

Systèmes photovoltaïques 12 V DC pour débutants :
comment concevoir et installer son propre système
photovoltaïque pour camping cars, fourgonnettes,
cabanes, bateaux et petites maisons

Volodymyr Vasyliv

28 novembre 2021

Table des matières

Introduction	2
1 Les fondamentaux de l'électricité	5
1.1 Les bases de l'électricité	5
1.2 Le Courant électrique continu et alternatif	8
1.3 Fonctionnement des circuits électriques : Circuits en séries et circuits en parallèles	11
1.4 La résistance électrique des matériaux	13
1.5 Les appareils fonctionnant en 12V continu	14
2 Les composants d'un système solaire photovoltaïque	16
2.1 Les panneaux solaires	16
2.2 Les batteries	19
2.3 Les régulateurs de charge - décharge	21
2.4 Les onduleurs	21
2.5 Les fils électriques et jeu de barres	22
2.6 Autres éléments indispensables dans un système photovoltaïque 12V DC .	22
3 Calculs essentiels pour un système photovoltaïque en 12 volts	35
3.1 Calcul des besoins en énergie électrique	35
3.2 Calcul de la taille du parc de batteries	37
3.3 Calcul de la taille du champ solaire	38
3.4 Calcul des sections des câbles de raccordement	40
3.4.1 Section des câbles entre les panneaux et le régulateur	41
3.4.2 Section des câbles entre le régulateur et les batteries	41
3.4.3 Section des câbles entre les batteries et l'onduleur	42
3.5 Choix du régulateur solaire et de l'onduleur	43
4 Câblage du champ photovoltaïque et du parc de batteries	44
5 Installation d'un système photovoltaïque en 12 volts sur camping-cars, fourgonnettes, cabanes, bateaux et petites maisons	50
5.1 Démarche d'installation	50
5.2 Installation du parc de batteries et ses dispositifs de protection	51
5.2.1 Emplacement, disposition et câblage des batteries entre elles	51
5.2.2 Moniteur de batteries pour suivre l'état de santé du parc	53
5.2.3 Fusible de protection du parc de batteries contre les surintensités .	53
5.2.4 Dispositif de protection des batteries contre les surcharges et les décharges critiques	54

5.3	Installation du régulateur de charge et ses dispositifs de protection	54
5.3.1	Emplacement et raccordement	54
5.3.2	Dispositifs de sécurité	55
5.4	Installation des panneaux solaires	55
5.4.1	Emplacement, orientation et inclinaison des panneaux	56
5.4.2	Câblage des panneaux	57
5.5	Création des circuits AC et DC	57
6	Maintenance du système	65
6.1	Maintenance préventive du système	65
6.1.1	Entretien trimestriel	65
6.1.2	Entretien annuel	68
6.2	Maintenance corrective	70
6.2.1	Les signes de dysfonctionnement les plus fréquents, identification de la panne associée et réparation	70
6.2.2	Conseils pour le remplacement des composants principaux	85
	Bibliographie	86

Introduction

Ces dernières années, la question de l'énergie est devenue une préoccupation mondiale au niveau de tous les maillons et secteurs des sociétés. La raison est simple : Les ressources pétrolières, principales sources d'énergie jusque la, s'épuisent à une vitesse phénoménale et les réserves restantes, ne donnent aucun espoir d'accès à l'énergie dans un futur proche. Nul besoin donc de vous dire que si des mesures adéquates ne sont pas prises, le monde pourrait très rapidement être confronté à de sérieux problèmes d'énergies. C'est pourquoi ces dernières années, une course vers le développement de nouvelles alternatives aux ressources pétrolières est engagée dans le monde entier aussi bien dans le milieu de la recherche que dans le milieu industriel.

Une alternative intéressante qui est activement explorée actuellement est le solaire photovoltaïque pour plus d'une raison :

- Le gisement en matière de ressource solaire est disponible en abondance et sur toute l'étendue du globe terrestre.
- Il offre beaucoup plus de flexibilité que les autres alternatives, permettant d'alimenter en électricité toute sorte de local, en zone urbaine ou isolée, et surtout offrant la possibilité à toute personne de produire sa propre électricité, voir même la revendre.
- La conception et l'installation pour des petits locaux n'a rien d'extraordinaire et peut être réalisée par tous.

Avoir son propre système photovoltaïque présente énormément d'avantages : autonomie, réduction du coût d'électricité, retour d'investissement sur le long terme et j'en passe. Cependant, bien qu'à la portée de tous de part sa simplicité de déploiement à petite échelle, il n'est pas exclu que l'installation soit mal conçue et que l'on fasse de grandes pertes financières pour aboutir à une production quasiment insatisfaisante, voir inutile.

L'objectif de ce livre est double :

- Encourager et persuader toute personne toujours dans le doute à cause de la crainte de l'échec, qu'elle peut avoir sa propre installation photovoltaïque pleinement fonctionnelle en suivant les conseils et astuces simples présentées ici.
- Mettre à la disposition du novice intéressé par l'installation de son propre système photovoltaïque un guide pratique et simple expliquant pas à pas la procédure sur la base d'exemples qu'il suffira de suivre pour déployer son propre système.

Le livre s'articule autour de chapitres aux travers desquels vous apprendrez à réaliser les tâches essentielles à l'installation d'un système photovoltaïque en 12V DC pour vos bateaux, camping cars, fourgonnettes, cabanes, et petites maisons.

- Dans les deux premiers chapitres, vous apprendrez les bases de l'électricité et les caractéristiques essentielles des éléments constitutifs d'un système de production photovoltaïque autonome.
- Dans les deux chapitres suivants, vous allez pouvoir estimer vos besoins journaliers en énergie électrique puis déduire le nombre de panneaux solaires et de batteries de stockage dont vous aurez besoins. Vous apprendrez également à choisir judicieusement la section du câble de raccordement selon le courant maximum qui va y passer.
- Vous apprendrez ensuite à travers d'autres chapitres comment connecter les différents éléments ensemble pour atteindre la puissance désirée
- Les derniers chapitres concerneront la création d'un circuit 12 volts pour alimenter des appareils électriques et la maintenance du système.

Chapitre 1

Les fondamentaux de l'électricité

1.1 Les bases de l'électricité

Le courant électrique est présent dans nos activités de tous les jours. Ce courant nous est fourni par plusieurs moyens et l'utilisation que nous en faisons est fonction du moyen selon lequel il est produit. Ainsi, le secteur 220-230 volts permet d'alimenter un certain nombre d'appareils notamment les lampes au néon, les téléviseurs, les congélateurs, etc. Les piles et batteries d'accumulateurs peuvent quant à elles alimenter les appareils à courant continu tels que les lecteurs mp3, les téléphones mobiles, etc. Le courant électrique est le résultat de la mise en mouvement d'électrons. Comment les électrons sont mis en mouvement ? Pour le comprendre nous allons d'abord comprendre la structure de la matière, à partir de celle de son unité structurale, c'est-à-dire celle de l'atome.

Les expériences d'électrisation ont montré que la matière est constituée de particules portant des charges électriques, positives pour les uns et négatives pour les autres. Ces particules se comportent de ce fait de manière très étrange : Deux particules portant des charges électriques de mêmes natures se repoussent tandis que celles qui portent des charges opposées se repoussent.

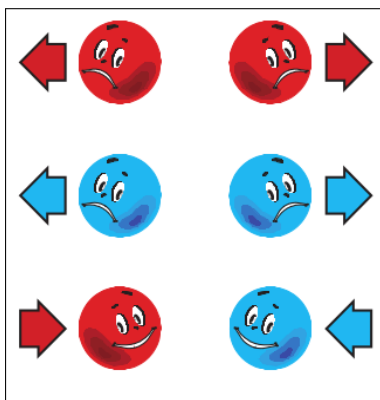


FIG. 1.1 : Deux charges positives ou deux charges négatives se repoussent tandis que deux charges opposées s'attirent.

Source : Électronique et Loisirs magazine

Plus tard, on a pu montrer que les particules chargées positivement surnommées **protons** sont confinés dans un noyau avec d'autres particules sans charges surnommées **neutrons**. Autour de ce noyau, les particules portant des charges négatives surnommées **électrons** tournent à la vitesse de la lumière (300000 km/s). La figure 1.2 illustre la structure générale d'un atome.

Les électrons chargés négativement sont assujettis à rester en orbite autour du noyau du fait de sa charge positive. La figure 1.3 illustre bien cela. Chaque atome appartient

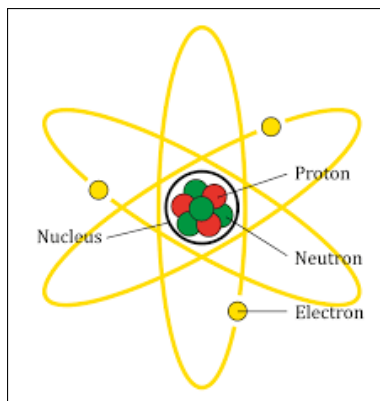


FIG. 1.2 : L'atome est constitué d'un noyau central de charge positive et d'électrons de charge négative qui sont en orbite autour de lui.

Source : commons.wikimedia.org

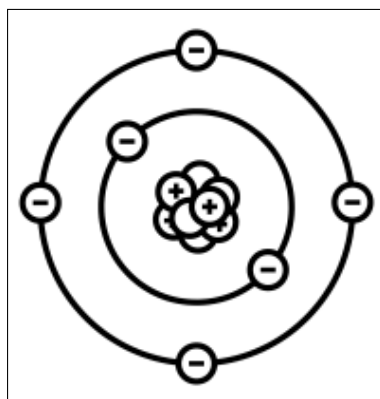


FIG. 1.3 : Les électrons sont maintenus en orbite par le noyau. Les électrons les plus éloignés peuvent facilement se soustraire à leur noyau.

Source : <https://thenounproject.com>

à un élément chimique déterminé et dans chaque élément chimique tous les atomes ont un nombre de protons et d'électrons identique. C'est ainsi que par exemple, les atomes de l'élément hydrogène ont tous un seul proton et un seul électron (figure 1.4), ceux de l'élément de carbone 6 protons et 6 électrons (figure 1.6), ceux de l'élément sodium 11 protons et 11 électrons (figure 1.6), et enfin ceux de l'élément argent totalise 47 protons et 47 électrons.

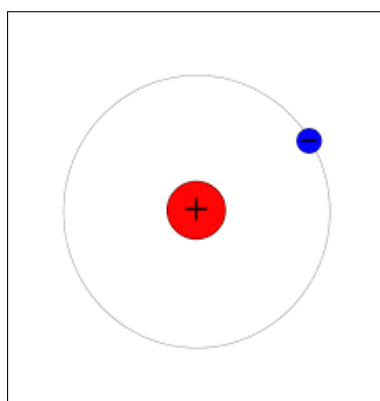


FIG. 1.4 : Hydrogène, 1 proton, 1 électron.

Source : commons.wikimedia.org

Le nombre d'électrons dans un atome est lié au nombre d'orbites autour du noyau. En effet, si ce nombre est élevé, alors il en va de même du nombre d'orbites autour du noyau. Dans ce cas de figure certains électrons sont proches du noyau tandis que les autres sont beaucoup plus éloignés. Les électrons proches du noyau sont qualifiés d'électrons liés, car ils sont difficiles à extraire de leur atome. Ceux qui sont sur l'orbite périphérique, éloignés du noyau sont qualifiés d'électrons libres, car on peut très facilement les enlever de leurs orbites. De ce fait, ces électrons peuvent très facilement se déplacer d'un atome à l'autre au sein du matériau. **C'est grâce à ces électrons libres qu'on peut produire**

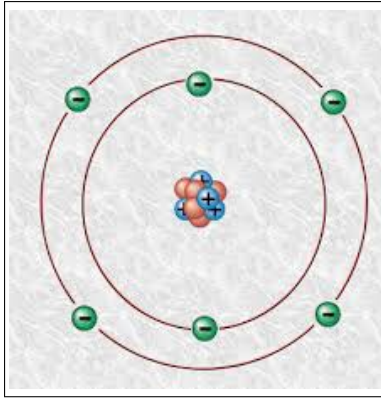


FIG. 1.5 : Carbone, 6 protons, 6 électrons.
Source : commons.wikimedia.org

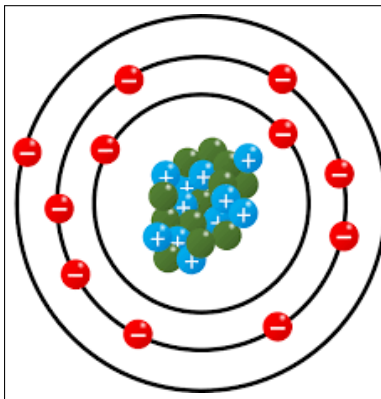


FIG. 1.6 : Sodium, 11 protons, 11 électrons.
Source : commons.wikimedia.org

le courant électrique Un peu de patience ! Nous le montrerons plus tard. Contentons-



Chrrrrrr ! Il nous prend pour des nez percés ou quoi ?
Ce n'est tout de même pas ces petites particules qui
alimentent nos lampes et télévisions à la maison !

nous de terminer cette partie sur la connaissance de la matière avec ceci : Si un atome perd un ou plusieurs de ses électrons périphériques, alors il aura plus de charges positives dans son noyau que de charges négatives autour du noyau. Globalement, il devient une entité chargée positivement que l'appelle ion positif ou encore cation. De même, si un atome gagne un ou plusieurs électrons supplémentaires sur son orbite périphérique, alors il aura plus de charges négatives autour du noyau que de charges positives dans le noyau. Globalement, il devient une entité chargée négativement que l'appelle ion négatif ou encore anion.

Ce que nous pouvons retenir : Toute matière est formée à partir d'atomes, eux même formés de particules chargée positivement, confinés dans un noyaux centrale avec des particules neutres, et des particules chargées négativement qui tournent en orbites autour du noyau et selon qu'elles sont proche ou éloignées du noyaux sont qualifiées de liés ou de libres. Grâce aux électrons libres, nous sommes à mesure de produire un courant électrique. Mais comment ? Nous le verrons tout à l'heure

1.2 Le Courant électrique continu et alternatif

Comment les électrons libres vont nous permettre de créer un courant électrique ? Pour le savoir, réfléchissons en visuel à ce qu'est un courant d'une manière générale. La figure



FIG. 1.7 : Courant d'eau
Source : pxsphere.com

1.7 illustre un courant d'eau. En d'autres termes, des particules d'eau se déplacent d'un point à l'autre. **Un courant d'eau n'est donc autre qu'un mouvement de particules d'eau dans une direction et sens donnée.** Il en est de même quand on parle de courant d'air. C'est un mouvement de particules d'air dans une direction et un sens donné.

Vous voyez ? Il n'y a donc pas de surprise ! **Le courant électrique est un mouvement de particules électriquement chargées et ces particules ne sont autres que les électrons libres de la matière dans laquelle s'établit le courant.**

Les matériaux dans lesquels il n'y a pas d'électrons libres sont des isolants électriques. On les utilise par exemple pour isoler les câbles haut tension des lignes de distribution électriques avec les poteaux métalliques.

Les matériaux dans lesquels il y a beaucoup d'électrons libres sont des conducteurs électriques. Nous allons nous en servir pour réaliser nos circuits électriques.

Certains matériaux sont intermédiaires entre les conducteurs et les isolants. Ils semblent être à première vue d'aucune utilité, mais moyennant quelques tours de passe-passe, on va pouvoir les utiliser en complicité avec le soleil pour forcer des électrons libres dans les conducteurs à se mettre en mouvement et ainsi créer un courant. Ces matériaux sont les semi-conducteurs que l'on utilise pour fabriquer les panneaux solaires. Essayons donc



C'est bien beau tout ça ! Mais comment va-t-on forcer les électrons libres à se mettre en mouvement ? et en plus dans un sens qu'on aura décidé ! Chrrrrrr !

d'illustrer cela. ce n'est pas si compliqué que ça ! Il suffit de se souvenir de notre courant d'eau et de se poser la question suivante : Pourquoi les particules d'eau sont forcées à aller dans le sens où elles vont et non le contraire ? Eh bien, c'est parce qu'il y a un côté de la rive qui est plus haut que l'autre ! C'est évident. Autrement dit, la cause de la circulation du courant d'eau est la **différence de hauteur**. Il en est de même pour les courants d'air : la cause est la **différence de pression**. Et le courant électrique ? Quelle est la cause ? Eh bien, c'est simple ! La cause est aussi une différence ! Mais une différence de quoi ? Pour le savoir, considérons le schéma ci-dessous où on relie deux plaques métalliques identiques avec un fil. Souvenons-nous à présent de ce qu'on avait dit précédemment : Si on retire des électrons à un atome, il se charge positivement du fait que son nombre de protons devient plus élevé que son nombre d'électrons. Si au lieu de retirer des électrons ; on y ajoute, l'atome devient négatif. Si donc on met au point une machine que nous nommerons "pompe à électrons", qui va retirer des électrons sur la plaque de gauche pour les déposer sur la plaque de droite, les deux plaques deviennent différentes : l'une se charge positivement et l'autre négativement. En terme technique, on dit que le potentiel électrique de la plaque de gauche est supérieur au potentiel électrique de la plaque de droite. Autrement dit, les deux plaques pressentent entre elles une **différence de potentiel électrique** que l'on appelle encore **tension électrique**. Que va-t-il alors se passer ?

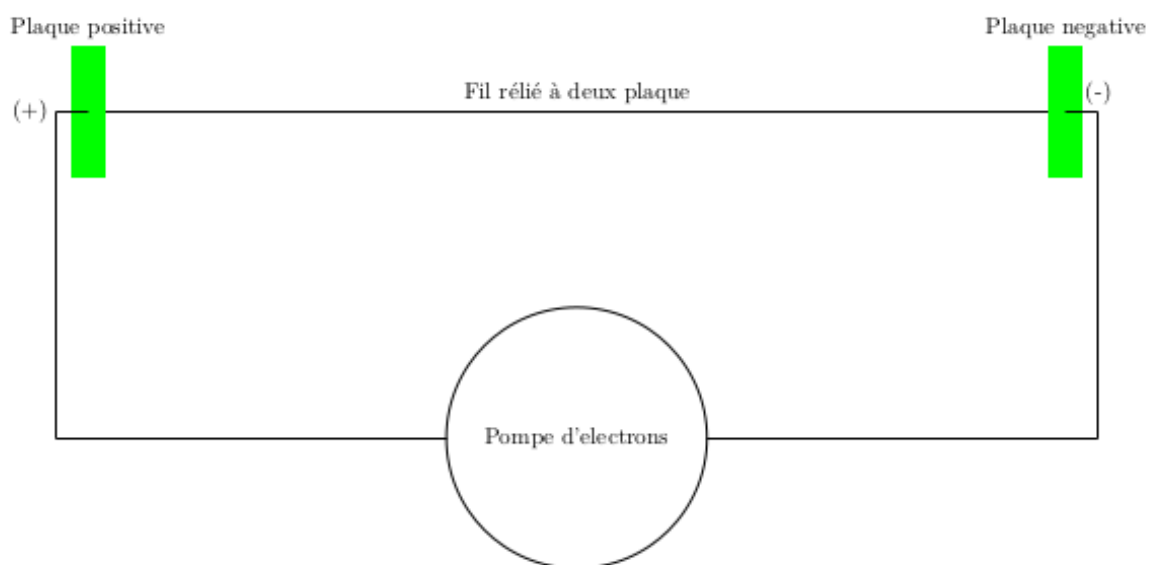


FIG. 1.8 : Illustration de la différence de potentielle électrique

- Si le fil qui relie les deux plaques est un isolant électrique rien ne se passera
- Si par contre, c'est un conducteur électrique alors les électrons libres vont se mettre en mouvement vers la plaque positive temps que la différence de potentiel est maintenue : **On a un courant électrique continu**

Supposons à présent que la pompe à électrons ait un comportement étrange : A des intervalles de temps réguliers, elle fait le contraire de ce qu'elle à fait précédemment. En d'autres termes, si elle maintient la plaque de gauche positive et celle de droite négative pendant 20 millisecondes par exemple, pendant les 20 millisecondes suivantes, elle maintient la plaque de gauche négative et celle de droite positive puis change encore les 20 autres millisecondes suivantes et ainsi de suite. Les plaques changent donc alternativement de polarité tous les 20 millisecondes. Les électrons libres ne circulent plus alors dans un seul sens, mais font des va-et-vient. **On a un courant électrique alternatif**. La pompe à électrons et les plaques forment ce que nous appelons le **générateur électrique**. Les piles, les batteries, les panneaux photovoltaïques sont des générateurs électriques de courant continu, le secteur 230 volt, les alternateurs ; les convertisseurs (ou onduleurs) sont des générateurs électriques de courant alternatif.

Pour terminer cette section, parlons de la mesure du courant et de la tension électrique. L'intensité du courant électrique se mesure à l'aide d'un appareil nommé **ampèremètre** et l'unité de mesure est **l'ampère** de symbole **A**. L'ampèremètre doit toujours être connecté de manière à ce que le même courant qui entre par son pôle positif et sort par son pôle négatif, traverse également l'appareil dont veut connaître le courant. Supposons que l'on

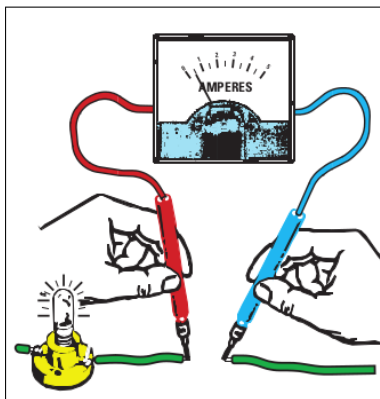


FIG. 1.9 : L'instrument appelé ampèremètre s'applique toujours en série sur un fil, pour mesurer le passage d'électrons.

Source : électronique et Loisirs magazine

puisse voir le déplacement des électrons dans les conducteurs électriques comme illustré sur la figure 1.10 et que l'on puisse compter le nombre d'électrons qui traversent une section transversale du conducteur chaque seconde. Si l'intensité du courant est élevé on observerait alors que beaucoup d'électrons traversent la section chaque seconde. Si par contre l'intensité du courant est faible, on observerait que très peu d'électrons traversent la section chaque seconde. L'intensité du courant électrique n'est donc autre que la quantité de charges électriques qui traverse une section de conducteur chaque seconde. La tension électrique ou la différence de potentielle que présente les pôles d'un générateur se mesure avec un appareil appelé **voltmètre** et l'unité de mesure est le **volt** de symbole **V**. Pour mesurer la tension électrique aux bornes d'un appareil électrique on doit connecter le pôle positif du voltmètre au pôle positif de l'appareil et le pôle négatif du voltmètre au pôle négatif de l'appareil. Plus la différence de potentielle est élevée, plus la quantité de charge qui traverse une section du circuit (intensité du courant) est élevé et plus la tension

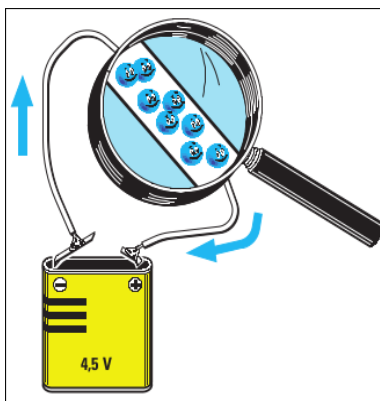


FIG. 1.10 : L'intensité du courant électrique traduit la quantité de charge électrique qui passe chaque seconde par une section du conducteur.

Source : électronique et Loisirs magazine

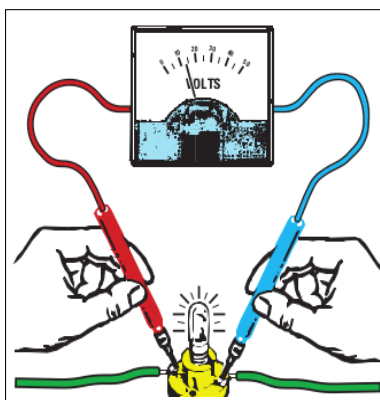


FIG. 1.11 : L'instrument appelé voltmètre s'applique toujours entre les pôles positif et négatif, pour mesurer la différence de potentielle qui existe entre les deux pôles.

Source : électronique et Loisirs magazine

électrique est grande. La tension électrique traduit donc jusqu'à quel point la différence que présente les bornes d'un appareil électrique ou un générateur électrique est grande.

Une lampe alimentée par une tension de 12 V et qui est traversé par un courant de 0,5A tire une puissance de 6 watt. Comme vous le voyez, ce que nous appelons **puissance**, c'est le produit de la tension et du courant. On l'exprime en **Watt** de symbole **W**

$$\text{watt} = \text{volt} \times \text{ampère}$$

$$\text{ampère} = \text{watt} : \text{volt}$$

$$\text{volt} = \text{watt} : \text{ampère}$$

1.3 Fonctionnement des circuits électriques : Circuits en séries et circuits en parallèles

Un circuit électrique est constitué d'un générateur et d'appareils électriques reliés entres eux par des conducteurs électriques. Nous allons ici présenter les différents types de circuits électriques, puis nous nous attarderons sur le type qui vous intéresse, c'est-à-dire celui qui utiliser dans les habitats et les voitures. La figure 1.13 présente des photos des différents types de circuit électrique que l'on rencontre : Les circuits en série, les circuits en dérivation et les circuits mixte. La figure 1.14 montre les schémas normalisés de ces mêmes circuits. En effet ; si on doit se contenter de dessiner les circuits électriques tels qu'ils sont, on ne s'en sortira pas lorsque le nombre de composants sera énorme. Pour pallier ce problème, tous les composants des circuits électriques sont remplacés par des

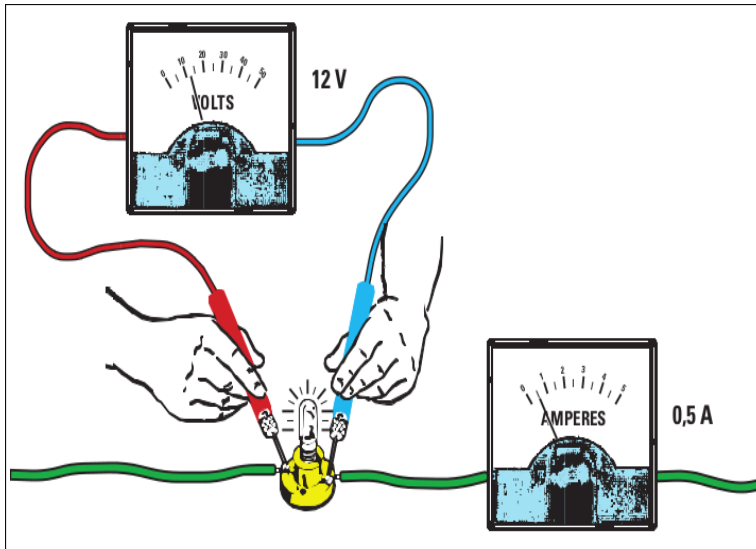


FIG. 1.12 : Lampe alimenté en 12 V et 0,5 ampère tirant une puissance électrique de 0,5 watt.
Source : électronique et Loisirs magazine

symboles normalisés dont quelque uns sont présentés sur la figure selon la norme NF C 15-100 ??

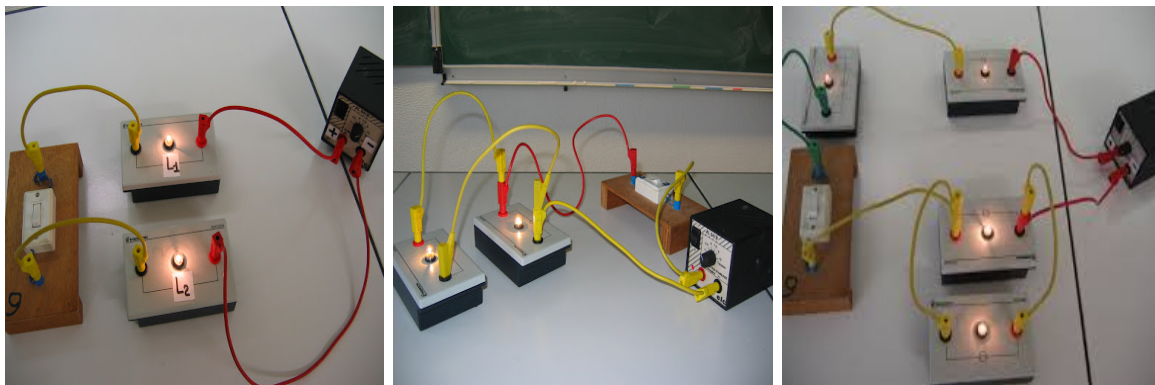


FIG. 1.13 : Les circuits électriques peuvent être en série, en dérivation ou mixte.
Sources : clausschimphycol.chez-alice.fr, <https://fr.wikimini.org/wiki>

Comme vous pouvez le voir, lorsque des appareils sont connectés l'un à la suite de l'autre, ils sont montés en série. On utilisera ce montage si on veut associer des générateurs pour augmenter la tension, mais on ne l'utilisera pratiquement pas pour alimenter les récepteurs que nous utilisons tous les jours. Lorsque leurs bornes de mêmes natures sont connectée entre elles deux à deux, on dit qu'ils sont montés en dérivation ou en parallèle. On utilisera ce montage si on veut associer des générateurs pour augmenter le courant débité. C'est aussi de cette façon que tous les appareils de nos installations domestiques sont alimenté. Enfin si on retrouve les deux situations dans le même montage on dit que c'est un montage mixte. On pourra l'utiliser si on veut associer des générateurs pour augmenter à la fois la tension et le courant.

Parlons un peu des propriétés des montages en dérivation. Si des appareils sont montés en dérivation avec le générateur, alors :

- Ils ont chacun la même tension que le générateur à ses bornes
- Le dysfonctionnement d'un appareil ne perturbe pas le fonctionnement des autres

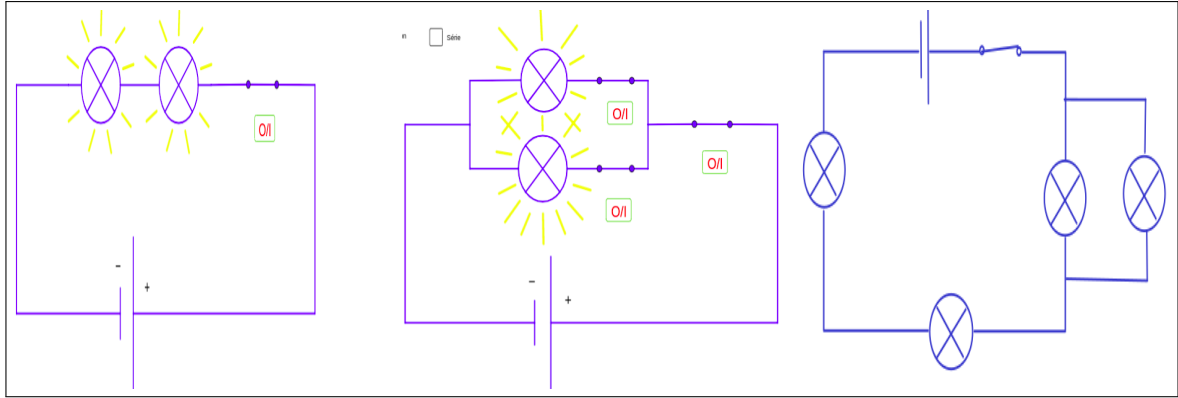


FIG. 1.14 : Schémas normalisés des en série, en dérivation et mixte.

- Le courant qui débité par le générateur est distribué dans les différentes branches en dérivation selon la puissance des appareils : Les plus puissants prennent plus de courant que les moins puissants.
- Si on augmente le nombre de branches en dérivation, le générateur augmente le courant principal qu'il débite afin d'ajuster. Cela peut être dangereux si le générateur débite un courant plus élevé que ce que le câble d'alimentation peut supporter. Il faut alors prévoir un dispositif de coupure automatique pour éviter tout désagrément.

1.4 La résistance électrique des matériaux

Nous l'avons vu plus haut, la mobilité des porteurs de charges dans les matériaux conducteurs solides dépend de la nature même du matériau. Par exemple, la facilité avec laquelle les électrons se déplacent dans les conducteurs en cuivre n'est pas la même dans les conducteurs en or ou encore dans les conducteurs en fer. En d'autres termes, les matériaux conducteurs selon leurs natures s'opposent à un certain degré à la mobilité des électrons, c'est-à-dire au passage du courant électrique. Cette capacité à s'opposer à un certain degré au passage du courant électrique est ce qu'on appelle la **résistance électrique**. On l'exprime en Ohm de symbole Ω . Pour un fil conducteur, la résistance R est proportionnelle à sa longueur L (en mètre) et inversement proportionnelle à sa section S (en mètre carré) et le coefficient de proportionnalité noté ρ porte le nom de **résistivité du matériau**, exprimée en ohm-mètre (Ωm).

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

La résistivité électrique est une propriété caractéristique des matériaux conducteurs. En effet, plus la résistivité est faible, plus le matériau est bon conducteur d'électricité. Notons qu'il existe des dipôles électriques dont les dimensions et la nature des matériaux utilisés pour leur fabrication sont judicieusement choisis de manière à ce que la tension électrique à leurs bornes soit proportionnelle au courant qui les traversent et le coefficient de proportionnalité soit exactement égale à la résistance électrique. De tels dipôles sont connus sous le nom de conducteurs ohmiques et la relation de proportionnalité entre tension et courant s'appelle la loi d'Ohm, qui s'écrit simplement

$$\text{Tension (Volt)} = \text{Résistance (Ohm)} \times \text{Courant (Ampère)}$$


































APPAREILS DE PRODUCTION ET TRANSFORMATION	APPAREILS DE MESURE	CANALISATIONS	APPAREILS D'UTILISATION
 Générateur  Batterie de piles ou accus  Transformateur  Transformateur triphasé triangle/étoile  Transformateur de courant  Transformateur tore  Autotransformateur	<p>Indicateurs</p>  Voltmètre  Ampèremètre  Wattmètre  Varmètre  Fréquencemètre <p>Enregistreurs</p>  Compteur d'énergie active (wattheuremètre)  Compteur d'énergie active (varheuremètre)	 Conducteur de phase  Neutre  De protection (terre)  5 conducteurs (3 P + N + T)  Connexion borne  Connexion barrette  Croisement de 2 conducteurs avec connexion  Sans connexion  Dérivation  Boîte de jonction non enterrée	 Lampe d'éclairage (symbole général)  Tube à fluorescence  Moteur  Sonnerie  Résistance  Condensateur  Impédance  Eclairage de sécurité sur circuit spécial  Bloc autonome d'éclairage de sécurité

FIG. 1.15 : Quelques symboles électriques normalisés.

Source : <https://cours.etsmtl.ca>

La puissance étant le produit de la tension et du courant, un tel conducteur consomme une puissance électrique qui s'écrit

$$\text{Puissance (Watt)} = \text{Résistance (Ohm)} \times (\text{Courant (Ampère)})^2$$

Cette puissance est dissipée sous forme de chaleur grâce à un phénomène connu sous le nom d'effet Joule.

1.5 Les appareils fonctionnant en 12V continu

Dans un passé proche avant la course vers les énergies renouvelables, il était difficile de trouver et de se procurer du matériel fonctionnant directement sur 12 volts. La quasi-totalité des appareils électroménagers était prévus pour être alimenté par le secteur 110/220/230 volts selon le pays d'utilisation. Aujourd'hui, avec l'avènement du solaire photovoltaïque, beaucoup de fabricants se sont tournés vers les appareils 12 volts CC. Ainsi depuis les appareils de petite consommation (Lampes au néon, poste radio etc) jusqu'aux appareils de forte consommation (Congélateur, micro-onde, projecteurs, etc.), rien n'échappe. Il est facile d'en trouver de très bonne qualité en 12 volts DC de nos jours comparé aux modèles AC et à des prix très compétitifs. Pour s'en convaincre, voici quelques liens vers du matériel 12 volts DC. Constatez par vous-même la grande diversité des produits :

- <https://www.freecold.com/>

- <https://www.leader-loisirs.com/167-electromenager-et-appareil-menager>
- <https://www.mon-camping-car.com/liste/54/petit-electromenager>
- <https://www.ludospace.com/chauffe-eau-electrique-c102x2971547>
- [https://geosolaire.ch/solaire/appareil-12 V](https://geosolaire.ch/solaire/appareil-12-V)

Comme vous pouvez le voir, il n'y a quasiment aucun appareil électrique AC qui n'a pas de version 12 V DC de nos jours. De plus, il est possible de convertir la tension de 12 V DC en une tension alternative de 230V AC grâce à un onduleur. Il sera alors possible d'alimenter aussi bien des appareils DC et des appareils AC de grande puissance comme les micro-ondes et les congélateurs. Il existe de nos jours des convertisseurs DC/AC pur sinus, qui délivrent à leur sortie une tension alternative quasiment identique à celle du réseau de distribution. Certains de ces onduleurs sont même à mesure de se synchroniser avec le réseau et permettre ainsi l'injection de puissance dans ce dernier.

Chapitre 2

Les composants d'un système solaire photovoltaïque

Les systèmes solaires photovoltaïques pour camping cars, fourgonnettes, cabanes, bateaux et petites maisons comprennent généralement les éléments suivants : panneaux solaires, batteries, onduleur, régulateur de charge - décharge, fils électriques, barres d'interconnexion, fusibles et boîte à fusible, interrupteurs de marche/arrêt, voltmètre.

2.1 Les panneaux solaires

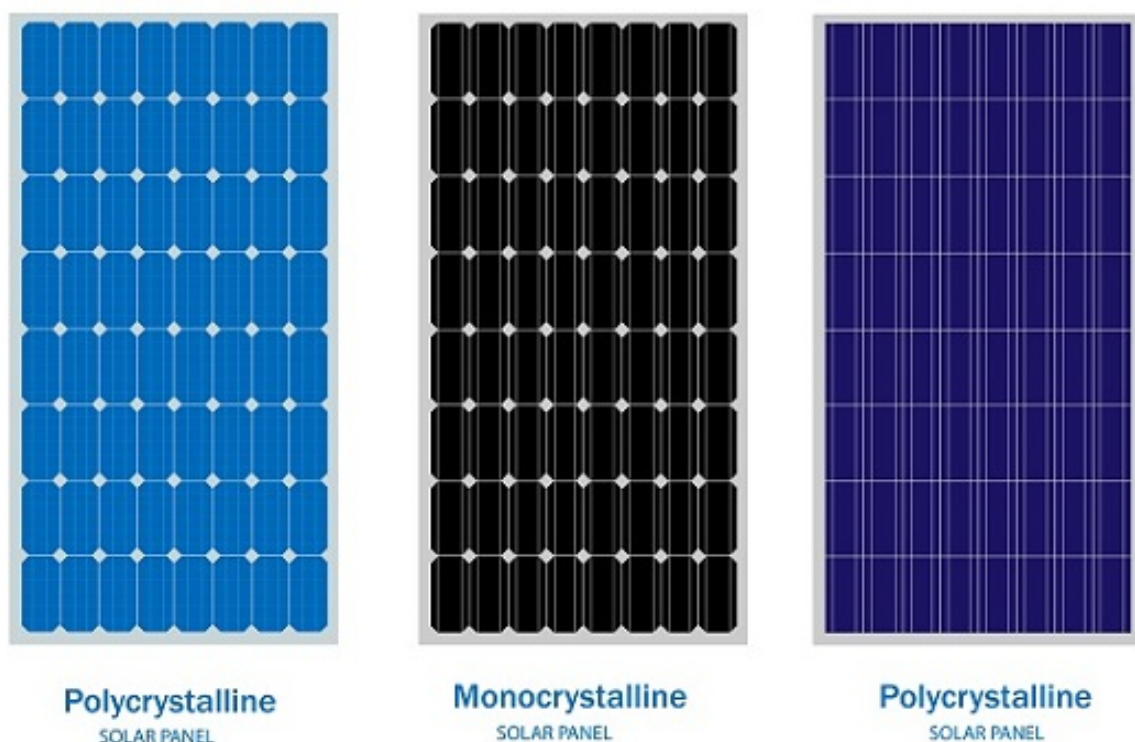


FIG. 2.1 : Panneaux solaires monocristallin et polycristallin
Source : www.habitatpresto.com

Un panneau solaire n'est qu'une matrice de cellules photovoltaïque ou simplement

cellules solaires interconnectées entre elles de manière à produire un courant et une tension désirée. Historiquement, les panneaux solaires à cellules de silicium monocristallin ont été les premiers à voir le jour. Ce sont les plus efficaces, car leur rendement est élevé par rapport aux autres. Puis viennent les panneaux à cellules de silicium polycristallin de rendement moindre que les monocristallins et enfin les panneaux à cellules au silicium amorphe de rendement encore plus faible.

Rappelons à présent que la puissance, c'est le produit de la tension et du courant. Si donc on souhaite fabriquer un panneau solaire d'une certaine puissance, nous devons connecter judicieusement les cellules afin de satisfaire à cette exigence. Les cellules seront d'abord connectées en série pour former des rangées dont la tension nominale est adaptée à la charge 12 volts. Habituellement 36 cellules de tension voisine de 0,5 volt sont nécessaires pour créer une différence de potentielle autour de 18V. Ensuite, pour augmenter le courant les rangées de cellules sont connectées entre elles en parallèle. L'ensemble des cellules connectées peut alors être placé sous-verre ou plastique à des fins de protection contre les aléas de la nature. Nous verrons dans une autre section comment connecter les modules en série et en parallèle pour atteindre la tension et le courant voulu.

Lorsque plusieurs panneaux solaires sont câblés de cette façon, on obtient un champ solaire. Plusieurs configurations sont possibles quant à l'emplacement du champ solaire : le toit de votre maison semble être l'endroit le plus intelligent pour les placer, car ils seront à l'écart et seront exposés à la plus grande quantité de lumière solaire, mais il est possible de placer les panneaux sur d'autres parties de votre maison, comme le jardin même si on sait que cette alternative occupe beaucoup de place, ou de construire des structures supplémentaires, telles qu'un pont surélevé, afin d'exposer les panneaux à la lumière du soleil sans avoir à sacrifier de l'espace.

Il est important de comprendre les paramètres qui caractérisent un panneau solaire, car ils interviennent dans les calculs pour déterminer la taille du champ solaire. Pour clarifier cette question, observons la figure 2.2 qui est une plaque signalétique collée au dos d'un panneau solaire. Sur cette plaque signalétique, on peut constater que les données sont consignées à l'intérieur de quatre cases rectangulaires. Ce sont les données des deux premiers rectangles qui nous intéressent, car il s'agit des paramètres électriques et des conditions de mesures de ces paramètres. Les éléments de la première case sont tous obtenus dans les conditions de test spécifiés dans la deuxième case. Ce sont les éléments suivants :

Maximum Power (P_{max}) : Il s'agit de la puissance électrique maximale que peut fournir le panneau dans des conditions de test normalisées. Pour cet exemple, la valeur est de 280W. Lorsque le panneau délivre sa puissance maximale, le courant débité et la tension délivrée sont alors maximales. Par convention cette puissance s'exprime en watt crête (Wc) (watt peak (Wp) chez les anglophones).

Voltage at P_{max} (V_{mp}) : Notée V_{mc} chez les francophones, elle représente la tension maximale délivrée par le panneau au point de puissance maximale. Elle vaut 32,2V dans cet exemple.

Current at P_{max} (I_{mp}) : Notée I_{mc} chez les francophones, il représente le courant maximum débité par le panneau au point de puissance maximum. Il vaut 8,7A dans cet exemple.

Short circuit current (I_{sc}) : Notée I_{cc} chez les francophones, il représente le courant de court-circuit du panneau, c'est-à-dire le courant qui serait débité si on relie

directement le pôle positif du panneau à son pôle négatif.

Open circuit voltage (Voc) : Noté V_{co} chez les francophones, c'est tout simplement la tension en circuit ouvert, c'est dire la tension mesurée directement aux bornes du panneau sans aucun appareil électrique connecté.

Autres paramètres : Les autres paramètres dans ce premier rectangle désignent respectivement le type de panneau selon le codage du fabricant (ESPMC280), la masse et les dimensions du panneau ($17,75kg$ et $1650 \times 990 \times 35mm$), la tension maximale à ne pas dépasser si on doit associer ce type de panneau en série, le courant de déclenchement du dispositif de protection contre les surintensités, la classe des cellules (codification indiquant l'état de dégradation des cellules, les meilleurs étant les classes A) et la plage de températures de fonctionnement des cellules.

Notons qu'avec ces caractéristiques, on peut déduire un paramètre traduisant la qualité du panneau nommé facteur de forme (FF). C'est simplement le rapport entre la puissance crête du panneau et le produit ($I_{cc} \times V_{co}$). Les panneaux de bonne qualité ont un facteur de forme entre 0,7 et 0,8. Pour notre exemple, on a :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{280}{9,36 \times 37,8} = 0,79$$

La seconde case rectangulaire de la plaque signalétique précise les conditions de test du panneau dans lesquels les paramètres électrique présentés précédemment ont été déterminé.

AM 1,5 : Ce paramètre correspond à la distance parcourue par les rayons solaires lorsque ce dernier se trouve à une hauteur h lors de la traversée de l'atmosphère pour atteindre un lieu donnée au sol. Il est nommé indice de masse d'air (ou air mass en anglais). La figure 2.3 en donne une illustration. Par convention cette distance a été fixée à un (1) lorsqu'on se trouve au niveau de la mer et que le soleil est au zénith. Si le soleil n'est pas au zénith, cette distance est alors plus grande et est déterminé par :

$$AM = OM = \frac{AO}{\sin(h)} = \frac{1}{\sin(h)}$$

Ainsi, si la hauteur du soleil est de 42 degrés ; cette distance vaut 1,5 et est notée AM 1,5. Cela veut dire pour nous que pendant les tests électriques sur ce panneau, le fabricant a simulé un soleil haut de 42 degrés d'angle.

1000 W/m^2 : Pour obtenir les paramètres présentés plus haut, le fabricant a simulé un soleil avec un éclairage de puissance 1000 watt par mètre carré arrivant sur le panneau.

25°C : Lors des tests, la température du panneau a été maintenue à 25 °C

Ces conditions de test sont connus sous le nom de "Conditions standards de test" (CST) (STC en anglais)

2.2 Les batteries

En dehors des rares cas comme le pompage photovoltaïque et les centrales électriques, pour la majorité des applications du solaire photovoltaïque, il n'est pas possible d'alimenter convenablement directement avec le champ solaire. Pourquoi ?

1. D'abord parce que l'ensoleillement n'est pas constant au cours d'une journée. De ce fait, il y a une fluctuation dans la puissance produite qui n'est pas favorable pour les appareils. De plus la conversion en AC devra utiliser des onduleurs intelligents capables d'ajuster la sortie pour la garder constante en tension malgré les fluctuations. Même dans ce cas, on ne peut éviter les fluctuations de la puissance de sortie.
2. Ensuite, il est clair que la nuit le système serait à l'arrêt et il faudrait attendre le retour du soleil pour que la production recommence. Cela n'est guère intéressant pour des systèmes prévus pour alimenter des petites maisons isolées, des bateaux, des fourgonnettes, des camping-cars et autres.

La batterie est l'élément qui va nous permettre de pallier ces problèmes. En effet, avec des batteries, on pourra stocker une partie de la production du champ photovoltaïque pour la réutiliser aux moments où le champ photovoltaïque n'assure plus une production suffisante. On peut même décider du nombre de jours d'autonomie du système, c'est-à-dire le nombre de jours pendant lesquels la batterie peut assurer les besoins en électricité même si le champ solaire ne produit pas du tout. De plus, grâce aux batteries, on va pouvoir stabiliser la tension du système à une valeur fixe et apporter un courant supplémentaire pour démarrer des appareils dont le courant de démarrage ne peut être assuré par les panneaux solaires comme par exemples les moteurs électriques. Tout comme les panneaux solaires qui sont constitués de cellules solaires, les batteries sont aussi constituées d'éléments de batteries appelés aussi des cellules électrochimiques ou accumulateurs électrochimiques. Une cellule de batterie est comme une pile. Elle est constituée de deux électrodes baignant dans une substance conductrice de courant électrique, c'est-à-dire une substance qui contient des particules de matières portant des charges électriques. La différence entre un élément de batterie et une pile est que la première est rechargeable tandis que la seconde ne l'est pas. Pour former une batterie, les cellules de tensions variant de 1 à 2 volts sont associées en série. On forme ainsi selon les applications des batteries de 6V, 12V, 24V etc. Pour les applications dans les petits systèmes solaires photovoltaïques, les batteries les plus couramment utilisées sont celles de 12 volts.

On peut classer les batteries en trois grands groupes : Les batteries au plomb-acide en abrégé (Pb-acide), les batteries au nickel-cadmium en abrégé (Ni-Cd) et les batteries utilisant d'autres couples électrochimiques. Parmi les trois groupes de technologies de batteries, celle qui est la plus répandue et la plus ancienne est la technologie Pb-acide. Les batteries de ce type sont en effet utilisées depuis plus d'un siècle à des fins divers : démarrer des voitures, créer des sources d'alimentation de secours, alimenter les moteurs des engins électriques et j'en passe.

Une batterie Quel que soit le type de technologie qu'elle utilise est caractérisée par un certain nombre de paramètres qu'il est utile de connaître pour bien estimer son installation solaire photovoltaïque. Pour comprendre ces paramètres, analysons les inscriptions portées sur la batterie de la figure 2.6 Les inscriptions les plus utiles pour le photovoltaïque sont les suivantes : 12V200AH@10h Rate, 12V200AH@20h Rate, AGM Deep Cycle Battery, Constante voltage charge et Sealed Lead Battery. Que signifie ces inscriptions ?

- 12V200AH@10h Rate et 12V200AH@20h Rate nous indiquent que la tension nominale de la batterie est de 12 volts et qu'elle est à mesure de débiter un courant de 20 Ampères ($\frac{200}{10} = 20$) pendant 10 h ou un courant de 11 ampères ($\frac{220}{20} = 11$) pendant 20 h. La valeur 200AH désigne la capacité de la batterie qui s'exprime en Ampère Heure. Plus la capacité est grande plus long sera la durée de son fonctionnement avant décharge. Comme vous pouvez le constater, cette valeur dépend du courant débité par la batterie, c'est-à-dire du nombre d'appareils qu'elle alimente.
- AGM Deep Cycle Battery et Sealed Lead Battery nous indique que c'est une batterie au plomb scellée, que son électrolyte est absorbé par une matière spéciale (AGM pour Absorbant Glass Mat) placée entre les électrodes des cellules électrochimiques et qu'enfin elle est conçue pour supporter des cycles de charge-décharge profonde. La profondeur de décharge d'une batterie est le pourcentage de sa capacité qui peut être utilisé sans engendrer de dommage à la batterie. En effet, selon la technologie de la batterie, elle ne peut supporter que la décharge jusqu'à un certain pourcentage de sa capacité. Celles qui peuvent supporter une décharge au-delà de 50 % sont généralement qualifiées de batteries à cycle de décharge profonde.
- La section "Constante voltage charge" donne les tensions de charge optimales de la batterie à 25 °C respectivement en mode veille et durant un cycle de charge. Elle indique aussi le courant maximum de charge à ne pas dépasser en début de charge.

À présent, passons en revue les trois groupes de batteries mentionnée précédemment.

Les batteries au plomb : Les électrodes des cellules électrochimiques de ces batteries sont faites à partir du plomb et chaque cellule à une tension nominale de 2 volt à ses bornes. On en distingue quatre types :

- Les batteries au plomb pur
- Les batteries au plomb-antimoine faible concentration qui supportent des profondeurs de décharge allant de 50 à 80 %, mais nécessite un entretien périodique. Elles peuvent être utilisées dans le photovoltaïque si l'entretien est assuré.
- Les batteries au plomb-antimoine forte concentration qui résistent aux régimes de charge-décharges rapides et aux vibrations. Elles sont de ce fait beaucoup utilisées dans l'industrie automobile.
- Les batteries au plomb-calcium qui ne nécessite pas d'entretien, mais ne supporte pas des profondeurs de décharge élevée.

Il est à noter que selon la nature de l'électrolyte utilisé dans les batteries au plomb, on distingue les batteries au plomb-acide dont l'électrolyte est une solution diluée d'acide, les batteries AGM dont l'électrolyte est absorbé dans un matériau spécifique placé entre les électrodes (Absorbant Glass Mat) et les batteries Gel dont l'électrolyte est sous forme de Gel. Les technologies AGM et Gel facilitent grandement le transport et ne nécessitent pas un entretien particulier.

Les batteries au Nickel-Cadmium : Les électrodes des cellules sont en oxy-hydroxyde de Nickel (NiOOH) et en Cadmium (Cd) et l'électrolyte est une solution de potasse (KOH). La tension nominale de chaque cellule à vide vaut 1,2 volts. Les batteries

de ce type sont robustes et ont une longue durée de vie. De plus, elles peuvent supporter des décharges profondes sans être endommagées. Elles sont très pratiques pour le photovoltaïque, mais en revanche, elles sont nettement plus chères que les batteries au plomb.

Les autres types de batteries : En dehors des batteries les plus répandus que nous avons vu plus haut, on rencontre également des batteries dont les cellules électrochimiques comprennent les couples Nickel-Zinc, Nickel-Fer et Lithium-Ion. Le dernier est particulièrement en plein développement, car leur capacité par kilogramme de poids est très élevé [1]. C'est un grand espoir pour le solaire, mais son coût est encore très élevé.

2.3 Les régulateurs de charge - décharge

Le contrôleur de charge et de décharge a pour rôle le contrôle permanent du niveau de charge de la batterie. Il protège la batterie contre les décharges profondes en déconnectant tous les appareils électrique lorsque la batterie atteint un niveau de décharge critique et contre les surcharges en déconnectant le champ PV lorsque la batterie atteint un niveau de charge critique. Ceux qui protègent uniquement contre la surcharge sont qualifiés de régulateurs parallèles et ceux qui protègent aussi bien contre la surcharge et la décharge profonde sont qualifiés de régulateurs séries. Ainsi, le contrôleur de charge s'assurera que les niveaux de tension sont ceux requis, garantissant ainsi une tension de charge optimale à tout moment. Ce faisant, vous éviterez à vos batteries d'être endommagées. Il est certainement utile d'examiner à l'avance les options dont vous disposez en matière de régulateurs. Si vous choisissez d'installer un système beaucoup plus important, vous devrez vous pencher sur un contrôleur de charge qui serait en mesure de gérer la charge. Cette condition jouera sur l'endroit où vous choisirez d'installer le chargeur lui-même tout en tenant compte des considérations de coût.

Qu'ils soient parallèles ou séries, on distingue deux sortes de régulateur de charge :

Les régulateur PWM (Pulse With Modulation) : Ces régulateurs transforme la tension des panneaux et délivrent en sortie une tension parfaitement adaptée à la charge de la batterie. Ainsi lorsque la batterie atteint cette tension de charge, la charge s'arrête.

Les régulateurs MPPT (Maximum Power Point Tracker) : Ils sont conçus pour tirer le maximum de puissance des panneaux. Effet, ils intègrent un algorithme de recherche du point de fonctionnement à puissance maximale et cherche toujours à se positionner en ce point. De ce fait, ils chargent plus efficacement les batteries que les PWM.

2.4 Les onduleurs

Pourquoi utiliser un onduleur ? Eh bien parce que tous les appareils que vous allez utiliser ne sont pas conçue pour fonctionner avec 12 volts qui est celle délivré par la batterie. D'ailleurs, la plupart des appareils électroménagers et des dispositifs fonctionnent sur 220 à 240 volts alternatifs en Europe et sont conçus. L'onduleur est l'élément qui se charge de convertir le courant continue des batteries en courant alternatif pour assurer

le bon fonctionnement de ces appareils AC. Mais, si vous cherchez seulement à alimenter quelques ampoules ou tout autre appareil de 12 volts, alors un système de 12 volts est plus que suffisant et il ne sera pas nécessaire d'avoir un onduleur. Pour connaître la puissance de l'onduleur qu'il vous faut, il suffit d'additionner les puissances de tous vos appareils AC et choisir un onduleur de puissance supérieur.

Outre la puissance, la qualité d'un onduleur se mesure par la forme de la tension qu'il délivre à sa sortie. On distingue ainsi les onduleurs à forme d'onde carrée qui sont les moins chères, mais limités, car ils ne pourront pas faire fonctionner correctement certains appareils comme les moteurs électriques et les onduleurs à forme d'onde sinusoïdale qui sont plus chers, mais aussi plus efficaces, car ils peuvent faire fonctionner correctement tout type d'appareil AC.

2.5 Les fils électriques et jeu de barres

Tous les éléments constitutifs d'un système solaire photovoltaïque sont interconnectés grâce à des fils électriques. Seulement, ces fils ne doivent pas être choisis au hasard. On doit les dimensionner en fonction du courant qui doit y circuler. Si ce n'est pas le cas, on court le risque de surchauffe qui peut conduire à un incendie. Les calculs pour déterminer judicieusement les sections des câbles dans une installation solaire photovoltaïque seront exposés dans le chapitre suivant.

Selon la taille du parc de batterie, on peut très rapidement être confronté à un problème sérieux : Le courant maximum qui sera débité est si fort que le diamètre du câble qu'il faudra pour les raccorder aux appareils est disproportionné et ne figure pas dans l'offre du marché. Il faut savoir que les diamètres de câbles sont normalisés et les fabricants s'y conforment. Que faire alors ? C'est là qu'intervient l'utilisation de barres d'interconnexion couramment appelée des **jeu de barres** ou encore selon la norme de la commission électrotechnique internationale **des barres omnibus** ou encore bus barre selon les anglophones. Il s'agit en réalité de deux barres généralement en cuivre, l'une destinée au raccordement électrique des bornes positives des batteries et l'autre au raccordement des bornes négatives. Le fort courant résultant de l'ensemble des batteries circule alors dans ces barres qui justement sont conçues pour cela. Des onduleurs ou des appareils CC peuvent alors être raccordés directement sur les barres.

2.6 Autres éléments indispensables dans un système photovoltaïque 12V DC

Dans un système photovoltaïque 12V DC, des éléments autres que ceux décrits plus haut peuvent s'avérer utiles :

- Si votre régulateur de charge est de type parallèle comme expliquée précédemment, il protégera vos batteries contre les surcharges, mais en revanche il n'y aura aucun contrôle de la décharge. Vos batteries peuvent donc se décharger en dessous du seuil critique sans que vous vous en rendez compte, et comme vous le savez cela peut conduire à leur destruction. Un contrôleur de tension et de courant placé dans un lieu visible peut pallier ce problème.
- Les niveaux de courant dans les fils conducteurs d'un système photovoltaïque peuvent devenir très élevés à la suite d'un incident quelconque comme un court-circuit. Pour

éviter le pire, les différents circuits doivent être protégés et le moyen le plus économique est l'utilisation de fusibles. Un fusible est un dispositif de sécurité, conçu pour protéger un circuit électrique contre les surintensités. Il est essentiellement constitué d'une portion de conducteur métallique spécialement dimensionné pour fondre en cas de surintensité et interrompre le circuit électrique. En cas de surintensité, si les fils sont sans fusibles, ils peuvent surchauffer et provoquer un incendie. Nous verrons dans les prochains chapitres comment choisir et installer convenablement des fusibles dans une installation photovoltaïque.

- Et bien entendu, comme toute installation électrique ordinaire, un disjoncteur ou interrupteur de marche/arrêt sera nécessaire pour arrêter et mettre en service l'installation en cas de besoin.

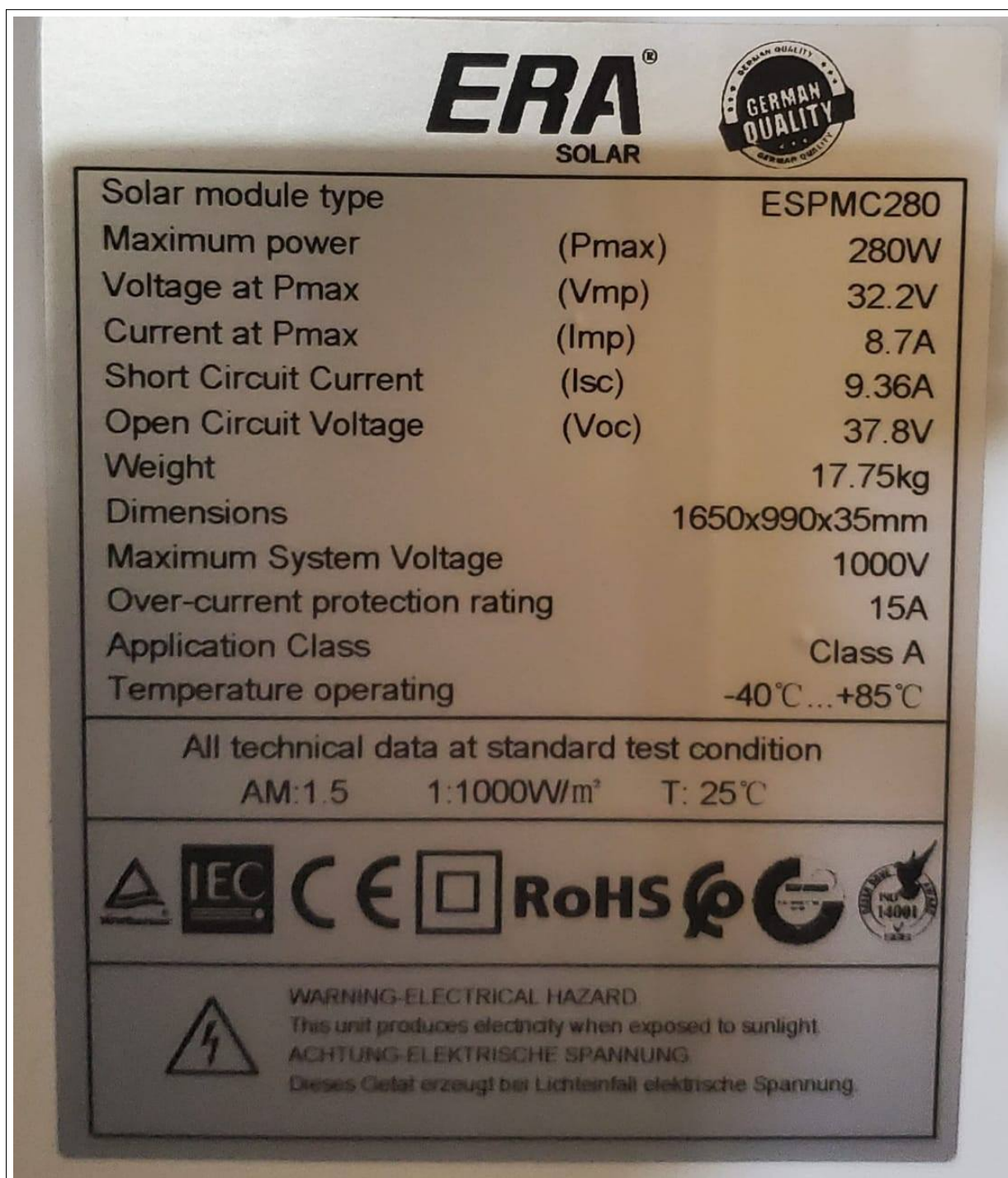


FIG. 2.2 : Caractéristiques électriques d'un panneau solaire
Source : Page Facebook de flowatt

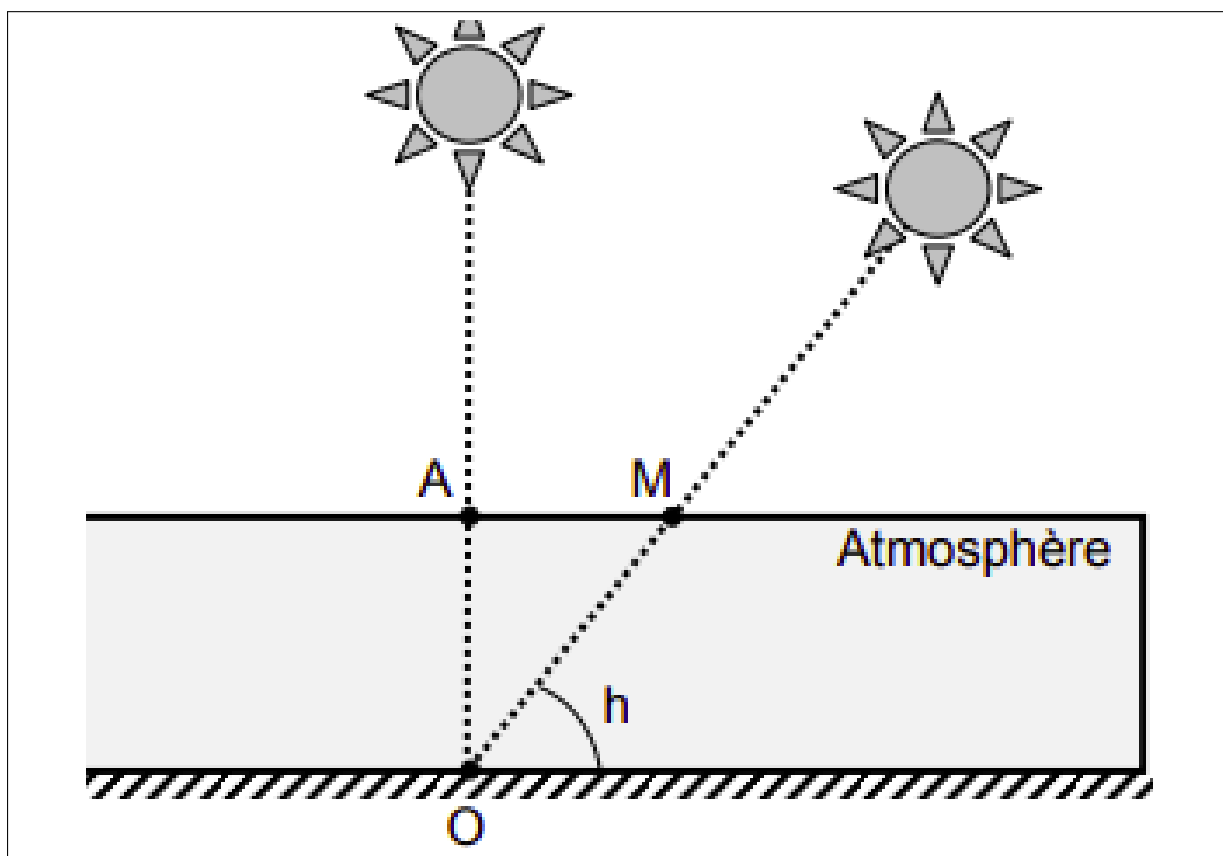


FIG. 2.3 : Illustration de l'indice de masse d'air
 Source : Photovoltaïque dans le bâtiment, édition ginger cated



FIG. 2.4 : Batterie au plomb-acide
Source : fr.made-in-china.com



FIG. 2.5 : Batterie au nickel-cadmium



FIG. 2.6 : Caractéristiques d'une batterie
Source : www.solaris-store.com



FIG. 2.7 : régulateur PWM
Source : www.myshop-solaire.com



FIG. 2.8 : régulateur MPPT
Source : kitsolaire-discount.com



FIG. 2.9 : Onduleur
Source : nrjsolaires.com

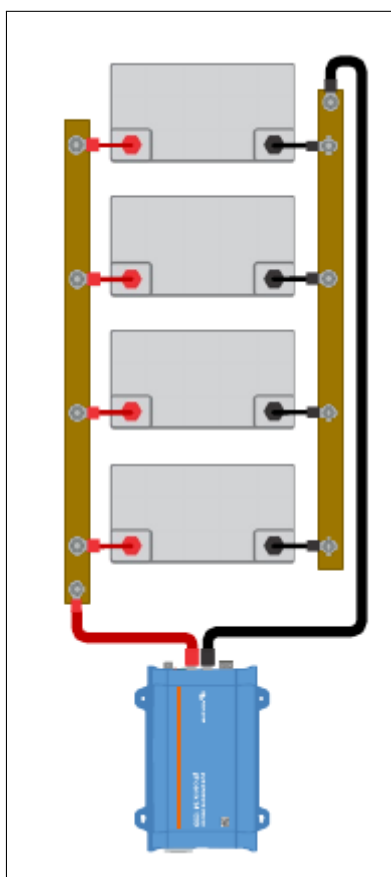


FIG. 2.10 : Raccordement de batteries sur des barres omnibus
Source : Wiring Unlimited - Rev 06, victron energy



FIG. 2.11 : Voltmètre et ampèremètre numérique pour systèmes photovoltaïque
Source : forum-camping-car.fr



FIG. 2.12 : Fusible solaire
Source : fr.rs-online.com



FIG. 2.13 : Bloc de fusibles
Source : www.yhpesi.com

Chapitre 3

Calculs essentiels pour un système photovoltaïque en 12 volts

Il est bien connu que toute démarche basée sur la pratique est meilleurs que l'exposition e longues formules de calculs. Nous n'allons pas déroger à cette précieuse règle. Pour ce faire, faisons la supposition suivante : Mme Prudence est détentrice d'une petite maison isolée en campagne. Elle décide d'installer un système photovoltaïque 12 volts pour alimenter 4 ampoules LED 12 V DC (Salon, cuisine, chambre et extérieure), un téléviseur LED 12 V DC, Un réfrigérateur 230 V AC, un micro-ondes 230 V AC et une minichaine HIFI 230 V AC. Utilisons ces données pour calculer l'installation de Mme Prudence.

3.1 Calcul des besoins en énergie électrique

Pour estimer les besoins en énergie électrique de Mme Prudence, nous allons séparer ses appareils en deux groupes : Ceux qui fonctionnent sans onduleur et ceux qui fonctionne par l'intermédiaire d'un onduleur. Pourquoi faire cela ? Parce que les onduleurs, elles même consomment de l'énergie et il faut donc majorer la consommation des appareils AC pour prendre en compte cet aspect. Pour ce faire, on va utiliser le rendement Européen de l'onduleur défini par la norme électrotechnique. À l'heure actuelle les technologies des onduleurs ont beaucoup évolués et le rendement Européen moyen est de l'ordre de 95 %. En d'autre terme lorsqu'un onduleur fonctionne, 5 % de l'énergie qu'il reçoit est perdu lors de la transformation. On va doc majorer les besoins en énergie électrique des appareils AC de 5 %.

Dans les tableaux [3.1](#), on va pouvoir analyser le fonctionnement de chaque appareil afin de déterminer le nombre d'heures de fonctionnement sur un cycle de 24 h. Vous pouvez faire ce tableau sur une feuille de calcul Excel pour faciliter votre analyse. Notez que pour chaque appareil on estime la durée de veille et la durée d'activité. Cela est nécessaire, car quand nous laissons nos appareils en veille, ils consomment de l'énergie même si pour la plupart ça semble négligeable.

Pour estimer la consommation journalière d'un appareil, il faut additionner sa consommation en veille et sa consommation en activité. Pour cela, on a besoin de la puissance électrique de chaque appareil. Généralement, sa valeur est consignée sur la plaque signalétique de l'appareil qui collé dessus. La valeur en watt n'est pas consigné, vous trouverez certainement les courants et tensions nominales en Ampère et en Volt. Vous pouvez alors

déduire la puissance en multipliant ces valeurs entre elle :

$$\text{Puissance (watt)} = \text{Tension (Volt)} \times \text{Courant (Ampère)}$$

Chaque consommation est calculée en multipliant la puissance par la durée sur un cycle de 24 heures.

$$\text{énergie (Wh/J)} = \text{Puissance (W)} \times \text{Durée (h)}$$

Appareils CC					
Désignations	Régime	Durées sur 24 h	Puissances (W)		Energie (Wh/J)
Ampoule Salon	Veille	18	Veille	0	0
	Actif	6	Actif	7	42
Ampoule Chambre	Veille	23	Veille	0	0
	Actif	1	Actif	7	7
Ampoule Cuisine	Veille	22	Veille	0	0
	Actif	2	Actif	7	14
Ampoule Extérieure	Veille	13	Veille	0	0
	Actif	11	Actif	7	77
TV LED	Veille	20	Veille	0,2	4
	Actif	4	Actif	26	104
Totaux par régime			Veille	0,2	4
			Actif	54	244
Total CC					248

Appareils AC					
Désignations	Régime	Durées sur 24 h	Puissances (W)		Energie (Wh/J)
Réfrigérateur	Veille	18	Veille	0,5	9
	Actif	6	Actif	60	360
Micro-onde	Veille	23,60	Veille	0,8	18,88
	Actif	0,40	Actif	1100	440
Mini Chaîne hifi	Veille	20	Veille	0,5	10
	Actif	2	Actif	20	40
Totaux par régime			Veille	1,8	37,88
			Actif	180	840
Total AC					877,88
Total AC rectifié des pertes onduleurs(+10%)					966

TAB. 3.1 : Estimation des besoins en énergie électrique

Que nous donne ces tableaux comme information ? Pour chaque appareil, le besoin d'énergie par jour en mode veille et en mode actif est estimé et consigné dans la colonne énergie en wattheure par jour (Wh/J). Les besoins totaux sont consignés dans la dernière ligne du tableau. Ainsi :

- Pour les appareils CC, les besoins journaliers de Mme Prudence sont estimé à **248 Wh**.
- Pour les appareils AC de Mme Prudence, les besoins journaliers sont estimés à **877,88 Wh**, mais pour compenser les pertes engendrées par les onduleurs, cette valeur est majorée de 10 % (Pertes moyennes des onduleurs les plus récents) et arrondie. Ce qui donne **966 Wh** de besoins journaliers

Les besoins journaliers en énergie électrique de Mme Prudence s'élèvent alors à

$$248Wh + 966Wh = 1214Wh/J$$

3.2 Calcul de la taille du parc de batteries

Combien de batteries Mme Prudence aura besoin pour couvrir ses besoins de **1214 Wh** par jour ? La réponse dépend des caractéristiques des batteries qu'elle va choisir d'acheter et du nombre de jours pendant lesquels les batteries peuvent tenir en cas d'absence de soleil ou d'improductivité des panneaux solaires. Quel que soit son choix, la capacité du parc de batteries en 12 volts peut être calculée à partir de la formule simple suivante :

$$\text{Capacité (Ah)} = \frac{\text{Besoins journaliers} \times \text{Jours d'autonomie}}{0,97 \times 12 \times \text{Profondeur de décharge}}$$

Notons que le nombre 0,97 est ajouté pour compenser les pertes engendrées par les fils de connexion. À présent, prenons un exemple : *On conseille à Mme Prudence d'acheter des batteries victron AGM super Cycle. Pour ces batteries, le fabricant recommande des profondeurs de décharge de 60 à 80 % soit de 0,6 à 0,8. Nous prendrons la valeur moyenne de 0,7. Par ailleurs, Mme Prudence souhaite qu'en cas de mauvais temps provoquant l'improductivité des panneaux solaires, qu'elle puisse tenir pendant 2 jours.* Le calcul sera le suivant :

$$\text{Capacité (Ah)} = \frac{1214 \text{ Wh} \times 2 \text{ Jours}}{0,97 \times 12 \times 0,7} \approx 298 \text{ Ah}$$

Les spécifications techniques de ce type de batteries sont consignés dans le tableau 3.2 ci-dessous. On peut remarquer que la capacité la plus élevée disponible dans des conditions déterminées est de 230 Ah. Il faudrait donc deux batteries de capacités supérieure ou égale à $\frac{298}{2} = 149 \text{ Ah}$. Comment choisir le modèle pour minimiser le prix ? Eh bien nos appareils totalisent une puissance de $54 + 180 = 234W$ d'après le tableau 3.1. Ce qui veut dire que le courant maximum que les batteries débiteront en 12 volts est de $\frac{234}{12} = 19,5A$ réparties entre deux batteries. Chaque batterie parc débitera donc un courant maximum de 9,75 A lorsque tous les appareils sont en service. La batterie qui convient le mieux pour cela est celle de l'avant-dernière ligne du tableau, le numéro **BAT412117081**. En effet, sa capacité est de 153 Ah lorsqu'elle fonctionne en C10, c'est-à-dire lorsqu'elle délivre un courant de 15,3 A. Le parc de batteries de Mme Prudence sera alors de 306 Ah dans l'hypothèse où tous ses appareils fonctionnent simultanément, et

Numéro de l'article	V	Ah C5 (10,8 V)	Ah C10 (10,8 V)	Ah C20 (10,8 V)	L x l x p mm	Poids kg	CCA @0° F	RES CAP @80° F	Bornes
BAT412015080	12	13	14	15	151 x 100 x 103	4,1			Faston
BAT412025081	12	22	24	25	181 x 77 x 175	6,5			Insert M5
BAT412038081	12	34	36	38	267 x 77 x 175	9,5			Insert M5
BAT412060081	12	52	56	60	224 x 135 x 178	14	300	90	Insert M5
BAT412110081	12	82	90	100	260 x 168 x 215	26	500	170	Insert M6
BAT412112081	12	105	114	125	330 x 171 x 214	33	550	220	Insert M8
BAT412117081	12	145	153	170	336 x 172 x 280	45	600	290	Insert M8
BAT412123081	12	200	210	230	532 x 207 x 226	57	700	400	Insert M8

TAB. 3.2 : Spécifications techniques des batteries Victron Deep Cycle

Source : www.victronenergy.com

puisque ça ne sera pratiquement jamais le cas, le courant ne dépassera jamais celui qui est débité en C20 de sorte que capacité des batteries seront de 170 Ah chacune et le parc de batteries de Mme Prudence aura une capacité de 340 Ah.

3.3 Calcul de la taille du champ solaire

Une fois que nous savons quelle capacité de stockage nous avons besoin, il nous faut recharger périodiquement ces batteries, c'est-à-dire à chaque fois qu'il y a du soleil. Pour cela, il nous faut des panneaux solaires qui totalisent une puissance à mesure de recharger les batteries à longueur d'une journée. Comment pouvons-nous estimer cela ? Comme dans le cas des batteries, on va l'expliquer sur la base d'un exemple, celle de Mme Prudence. Rappelons que pour alimenter ses appareils électriques, Mme a mis en place un parc de stockage de 340 Ah. Pour déterminer le nombre de panneaux qui lui seront nécessaire, elle doit d'abord estimer la puissance crête du champ photovoltaïque. Pour cela, elle à besoin d'un certain nombre de données :

L'ensoleillement du lieu : Généralement noté (G), c'est l'intensité du rayonnement solaire qui arrive sur un plan à un instant déterminé[2]. Son unité de mesure est le watt par mètre carré (W/m^2). Au cours d'une journée, l'ensoleillement commence par augmenter à partir de zéro le matin, puis atteint une valeur maximale au midi solaire, diminue de nouveau et s'annule. Une façon très pratique d'exprimer l'ensoleillement pour le solaire photovoltaïque est d'estimer en KWh/m^2 la quantité d'énergie (watts \times durée) reçu par un plan pendant les instants où la production solaire est jugée suffisante au lieu considérée[2]. Pourquoi cela s'avère pratique ? Eh bien, c'est simplement parce que la puissance solaire par mètre carré reçu par un plan varie au cours de la journée. Il faudrait alors faire le calcul pour tous les instants de la journée ou la production n'est pas nulle puis prendre la valeur moyenne, ce qui n'est pas du tout pratique, mais puisque cette énergie est mesurable, nous pouvons nous demander combien d'heures il faudrait pour avoir la même énergie pour un ensoleillement constant de $1000W/m^2$? La réponse est très intéressante : Ce nombre d'heures n'est autre que cette énergie moyenne en kWh/m^2 puisque $1kWh/m^2 = 1000W/m^2 \times 1h$. Ainsi, dire qu'en un lieu et une période donnés, l'ensoleillement est de $4000Wh/m^2$ soit ($4kWh/m^2$), c'est aussi dire qu'en ce lieu et en cette période, l'ensoleillement est en moyenne $1000W/m^2$ pendant une durée de quatre jours. Si on se souvient que dans conditions standards de test des panneaux solaire l'éclairement est de $1000W/m^2$, on voit tout de suite qu'en exprimant l'ensoleillement en termes d'énergie, on se positionne à peu près dans les mêmes

conditions que celles utilisées par les fabricants de panneaux solaires pour la mesure des paramètres caractéristiques.

Mais où peut-on trouver les valeurs de l'ensoleillement ? Plusieurs bases de données existent pour cela et elles sont assez fiables et régulièrement mis à jour. Ces bases sont entretenues par divers organismes du monde de la recherche et du monde d'entreprise. On peut citer entre autre : **PVGIS**[3], **metonorm**[4], **meteostat**[5]

Le rendement des batteries : Il est bien connu que la quantité d'énergie nécessaire pour recharger une batterie est toujours supérieur à l'énergie que cette batterie est capable de produire[6]. Si donc les panneaux solaires fournissent exactement l'énergie que les batteries peuvent produire, alors elles ne seront pas à pleine charge en fin de journée. Le rapport entre l'énergie que peut produire les batteries et l'énergie qu'il leur faut pour être pleinement chargée est le rendement électrique des batteries. Sa valeur dépend de la nature de la batterie. Elle varie entre 75 % et 90 %[2]. Nous prendrons la valeur moyenne 82,5 %.

Le rendement du champ photovoltaïque : La poussière, la température des modules, les câble conducteurs etc, engendrent des pertes d'énergie, de sorte que l'énergie qui arrive effectivement aux batteries est inférieure à ce qui devrait arriver s'il n'y avait aucune perte. Le rapport de ces énergies est le rendement du champ photovoltaïque. ce rendement est généralement supérieur à 90 %. Nous prendrons donc cette valeur pour nos calculs.

À présent, déterminons la puissance crête du champ photovoltaïque de Mme Prudence. Pour cela, on va appliquer la formule suivante[2] :

$$\text{Puissance crête} = \frac{\text{besoins journaliers}(Wh/J)}{\text{Ensoleillement}(KWh/m^2/J \text{ ou } Heures/J) \times 0,825 \times 0,90}$$

Supposons que Mme Prudence vit à Ouagadougou au Burkina Faso. La base de données PVGIS [3] va nous permettre de trouver la valeur de l'ensoleillement qui convient, mais d'autres bases de données peuvent être utilisés. Pour PVGIS, on pourra suivre les étapes suivantes :

- Aller sur le site de l'outil PVGIS
- Trouver sa localité sur la carte, l'agrandir et cliquer pour sélectionner la localité. Les coordonnées géographiques (Latitude et Longitude) du lieu sélectionné apparaissent alors en haut à droite. Dans mon exemple, on a 12,373 et -1,543.
- Cliquez ensuite sur données mensuelles puis cocher la case irradiation globale pour l'angle. Dans la case correspondante à l'angle mettez la valeur de la latitude du lieu (12,373 dans cet exemple) puis sélectionnez l'année la plus récente (2016 dans cet exemple) et cliquez sur "visualiser résultats". On obtient en bas un graphique sur lequel vous pouvez identifier le mois le plus improductif qui correspond au point le plus bas du graphique. Dans le cas de Mme Prudence, il s'agit du mois d'août pour lequel l'ensoleillement est de $164,89kWh/m^2$.
- L'ensoleillement quotidien en heures de soleil maximum s'obtient en divisant cette valeur par le nombre de jours du mois d'août 2016. On obtient pour cet exemple

$$\frac{164,89}{31} = 5,3kWh/m^2.J$$

On peut maintenant calculer la puissance crête de Mme Prudence :

$$\frac{1214Wh/J}{5,3 \times 0,825 \times 0,90} = 308,5watts$$

3.4 Calcul des sections des câbles de raccordement

Il est important de bien choisir les sections des câbles afin de minimiser les pertes de lignes. Comment pouvons-nous faire cela ? Des calculateurs en ligne comme SIGMA[7] existe, mais vous pouvez très bien les calculer vous-même. Pour bien comprendre le calcul, souvenons-nous du développement que nous avons fait à la section ?? du chapitre ?? : La résistance électrique d'un fil conducteur de longueur L et de section S s'écrit :

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

Si une puissance électrique produite en un point A doit être transférée en un point B par l'intermédiaire de fils conducteurs, il en résulte des pertes pendant le transport et la raison de ces pertes est simplement la résistance électrique des lignes de transport. La puissance électrique perdue lors du transport peut s'écrire

$$P(W) = R \times I^2 = \rho \times \frac{L}{S} \times I^2$$

On voit bien d'après cette formule que si on augmente la section (dénominateur), on diminue les pertes de ligne. Mais augmenter la section jusqu'à combien ? C'est à nous de décider cela en fixant une valeur pour les pertes que nous noterons désormais PT. On peut décider par exemple PT représente le pourcentage de puissance perdu lors du transport. Les pertes s'écrivent alors

$$P(W) = U \times I \times PT$$

. en égalisant ces deux expressions, on tire que

$$S = \frac{\rho \times L \times I}{U \times PT}$$

Autrement dit,

$$Section(m^2) = \frac{Résistivité (\Omega.m) \times Longueur (m) \times Courant (A)}{Tension (V) \times Pertes (\%)}$$

Pour avoir le résultat directement en mm^2 il faudrait multiplier la résistivité par 1000000.

$$Section(mm^2) = \frac{1000000 \times Résistivité (\Omega.m) \times Longueur (m) \times Courant (A)}{Tension (V) \times Pertes (\%)}$$

À présent, appliquons cette formule au cas de Mme Prudence pour calculer les sections de câbles entre panneaux et les panneaux et le régulateur, entre le régulateur et les batteries, entre les batteries et l'onduleur DC/AC et entre les batteries elles-mêmes. Mais avant cela, il faut savoir que les sections des fils conducteurs en électricité obéissent à une norme. De ce fait les valeurs qu'on obtiendra devront être ajustées pour correspondre à la valeur normalisée la plus proche.

3.4.1 Section des câbles entre les panneaux et le régulateur

Supposons ce qui suit :

- Les câbles sont en cuivre ($\rho = 17 \times 10^{-9} \Omega.m$) : $1000000 \times \rho = 0,017$
- Le champ solaire est constitué de trois panneaux de 100 watts
- La distance (Aller-retour) entre les panneaux et le régulateur est de seize mètres : $L = 8 \times 2 = 16m$
- La tension à la puissance maximale de chaque panneau du champ est $V_{mp} = 18,5V$. Si les panneaux sont connectés en séries, il faut multiplier la valeur de V_{mp} par le nombre de panneaux en série.
- Le courant à la puissance maximale de chaque panneau du champ est $I_{mp} = 5,4A$. Si les panneaux sont connectés en parallèles, il faut multiplier la valeur de I_{mp} par le nombre de branches en parallèles.
- Les pertes de lignes sont fixées à 1 % au maximum : $PT = \frac{1}{100} = 0,01$

La section de câble qu'il faudrait est :

$$S = \frac{0,017 \times (8 \times 2) \times 5,4 \times 3}{18,5 \times 0,01} = 23,8mm^2$$

La section normalisée la plus proche est $25mm^2$.

3.4.2 Section des câbles entre le régulateur et les batteries

Supposons ce qui suit :

- Les câbles sont en cuivre ($\rho = 17 \times 10^{-9} \Omega.m$) : $1000000 \times \rho = 0,017$
- La distance (Aller-retour) entre le régulateur et les batteries est de deux mètres : $L = 1 \times 2 = 2m$
- Le champ solaire est constitué de panneaux qui totalisent une puissance de 300 watts
- La tension nominale du parc de batteries est $U = 12V$
- Le courant maximum qui arrive aux batteries est

$$I = \frac{\text{Puissance du champ solaire}}{12} = \frac{300}{12} = 25A$$

- Les pertes de lignes sont fixées à 1 % au maximum : $PT = \frac{1}{100} = 0,01$

La section de câble qu'il faudrait est :

$$S = \frac{0,017 \times (1 \times 2) \times 25}{12 \times 0,01} = 7,08mm^2$$

La section normalisée la plus proche est de $10mm^2$.

3.4.3 Section des câbles entre les batteries et l'onduleur

Rappelons que l'onduleur a pour rôle d'alimenter les appareils fonctionnant en AC. Le courant dans les conducteurs qui arrivent à l'onduleur sera maximale lorsque tous les appareils AC seront en service simultanément, c'est-à-dire lorsque l'onduleur délivre une puissance égale à la puissance totale des appareils AC. Dans notre exemple, cette puissance vaut **234 W**. La puissance qui arrive à l'onduleur est alors cette puissance majorée par les pertes onduleur que nous avons déjà fixé à 10 % (0,1). Donc

$$234 + 0,1 \times 234 = 257,4 \text{ watts}$$

En 12 volts, cela correspond à un courant électrique de

$$\frac{257,4}{12} = 21,45A$$

Pour l'exemple de Mme Prudence, les paramètres de calcul se résument donc comme suit :

- Les câbles sont en cuivre ($\rho = 17 \times 10^{-9} \Omega.m$) : $1000000 \times \rho = 0,017$
- La distance (Aller-retour) entre le régulateur et les batteries est de quatre mètres : $L = 2 \times 2 = 4m$
- La puissance à l'entrée de l'onduleur est de 257,4 watts
- La tension nominale du parc de batteries est $U = 12V$
- Le courant maximum qui arrive à l'onduleur est 21,45A
- Les pertes de lignes sont fixées à 1 % au maximum : $PT = \frac{1}{100} = 0,01$

La section de câble qu'il faudrait est :

$$S = \frac{0,017 \times (2 \times 2) \times 21,45}{12 \times 0,01} = 12,155 mm^2$$

La section normalisée la plus proche est de $16 mm^2$

Pour produire les 21,45A de courant électrique pour les onduleurs, Mme Prudence va devoir utiliser deux batteries de 12 volts montées en parallèle. Nous l'avons expliqué plus haut et nous reviendrons sur les montages en série et en parallèles dans le chapitre suivant. Ce qu'il faut déjà savoir, c'est que dans ce type de montage, le courant principal qui va arriver aux onduleurs est le résultat des contributions des différentes batteries en parallèles du parc de batteries. De plus, si les branches en parallèles sont identiques, alors les contributions sont égales. Ainsi, dans l'exemple de Mme Prudence, chaque batterie apportera la moitié, soit 10,725A en 12volts. Il suffit d'injecter ces valeurs dans la formule précédente pour connaître la section des câbles à utiliser pour interconnecter les batteries entre elles. On pourra prendre un mètre comme longueur aller-retour des câbles.

$$S = \frac{0,017 \times (0,5 \times 2) \times 10,725}{12 \times 0,01} = 1,52 mm^2$$

La section normalisée la plus proche est de $1,5 mm^2$

3.5 Choix du régulateur solaire et de l'onduleur

- Le régulateur de charge se place entre les batteries et les panneaux. Son rôle est de gérer la charge des de manière optimale selon la production du champ photovoltaïque.
 - Si vous optez pour un régulateur de type PMW, ce qui est fréquent pour les petites installations, car c'est avantageux en termes de coût, il vous faut regarder deux choses : La première est le courant maximum indiqué par le fabricant sur le régulateur doit être supérieur ou égale au courant maximum du champ solaire à la tension du système. Ce courant s'obtient en divisant simplement puissance totale du champ de panneaux solaires par la tension du parc de batteries. La seconde est la tension en sortie qui doit être compatible avec celle des batteries. Certains modèles peuvent gérer plusieurs tensions de sortie à la fois. Dans le cas de nos suppositions précédentes, nos calculs prévoient un champ de panneaux qui totalise une puissance maximum de 300 watts et un parc de batteries à une tension de 12 volts. Cela nous donne

$$\frac{300}{12} = 25A$$

- . Un régulateur PWM de courant supérieur ou égale à 25A en 12 volts, fera l'affaire.
- Si vous optez pour un régulateur de Type MPPT, indiqué pour les installations de grandes et moyennes tailles, il faudra choisir un régulateur dont la tension d'entrée est supérieur d'au moins 10 % à la tension maximale du champ de panneaux solaire et le courant de sortie supérieur ou égale au courant maximum du champ de panneaux solaire à la tension du système. Ce courant s'obtient en divisant la puissance maximale du champ de panneaux solaires par la tension du parc de batteries. Par exemple, pour une puissance de champ solaire de 300 watts obtenu avec trois panneaux solaires de puissance 100 watts et de tension maximale 18,5 volts, et une tension de parc de batteries de 12 volts, on pourra choisir un régulateur de tension d'entrée supérieur à $18,5 \times 3 = 55,5$ et de courant supérieur à $\frac{300}{12} = 25A$. On peut choisir par exemple un régulateur MPPT de 75 volts et 30 A.
- L'onduleur alimente les appareils AC. Sa caractéristique principale est la puissance, mais la forme d'onde de la tension est délivrée est aussi importante pour certaines applications, de même que le rendement de conversion. La puissance à choisir est celle qui est immédiatement supérieure à la puissance totale de tous les appareils AC. Si elle est trop élevée, il faut opter pour l'utilisation de deux, trois, quatre etc, onduleurs pour couvrir tous les besoins AC. Dans l'exemple de Mme prudence un onduleur de puissance supérieur à 180 W est nécessaire.

Chapitre 4

Câblage du champ photovoltaïque et du parc de batteries

Dans les chapitres précédents, nous avons parlé de la connectivité des batteries en parallèle ou en série ou encore de manière mixée. Cela est indispensable pour obtenir la puissance souhaitée au niveau des panneaux solaires et la capacité souhaitée au niveau des batteries. Formulons notre curiosité sous la forme de questions :

1. Quel est l'intérêt de combiner les panneaux photovoltaïques ou les batteries en parallèle ?
2. Quel est l'intérêt de combiner les panneaux photovoltaïques ou les batteries en série ?
3. Quel est l'intérêt de combiner les panneaux photovoltaïques ou les batteries dans un montage mixte, incluant des branches en séries et des branches en parallèles ?

Essayons de répondre à ces questions sur la base de suppositions ! Je le répète encore, il est nettement plus motivant d'apprendre sur la base d'exemples. Allons-y donc en supposant que nous avons besoins 1000 watts de puissance au niveau du champ solaire et de 1000 Ah de capacité de stockage en 48 volts. Le matériel dont nous disposons est constitué de panneaux solaires de 100 watts (tension V_{mp} 18 volts et courant I_{mp} 5,5 A) et de batteries de 12 volts 200 Ah chacune. Avant de discuter des combinaisons adéquates pour nos suppositions, énonçons tout de suites les règles qui régissent les différentes associations de panneaux solaires et de batteries ! En ce qui concerne les panneaux solaires, les règles sont les suivantes :

- Si des batteries identiques sont montées en série alors leurs tension s'additionnent et la capacité en Ah reste inchangée. La figure 4.1 en est un illustration.
- Si des batteries identiques sont montées en en parallèle alors leurs capacités en Ah s'additionnent et la tension reste inchangée. La figure 4.2 en est un illustration.
- Si des batteries identiques sont montées de manière mixte (des branches en parallèles constituées de batteries en séries), alors la tension du parc est donnée par la somme des tensions des batteries en série dans une branche et la capacité est donnée par la somme des capacités des différentes branches en parallèles. La figure 4.3 en est une illustration.
- Si des panneaux solaires identiques sont montés en série alors leurs tensions s'additionnent et courant ne change pas. La figure 4.4 en est une illustration.

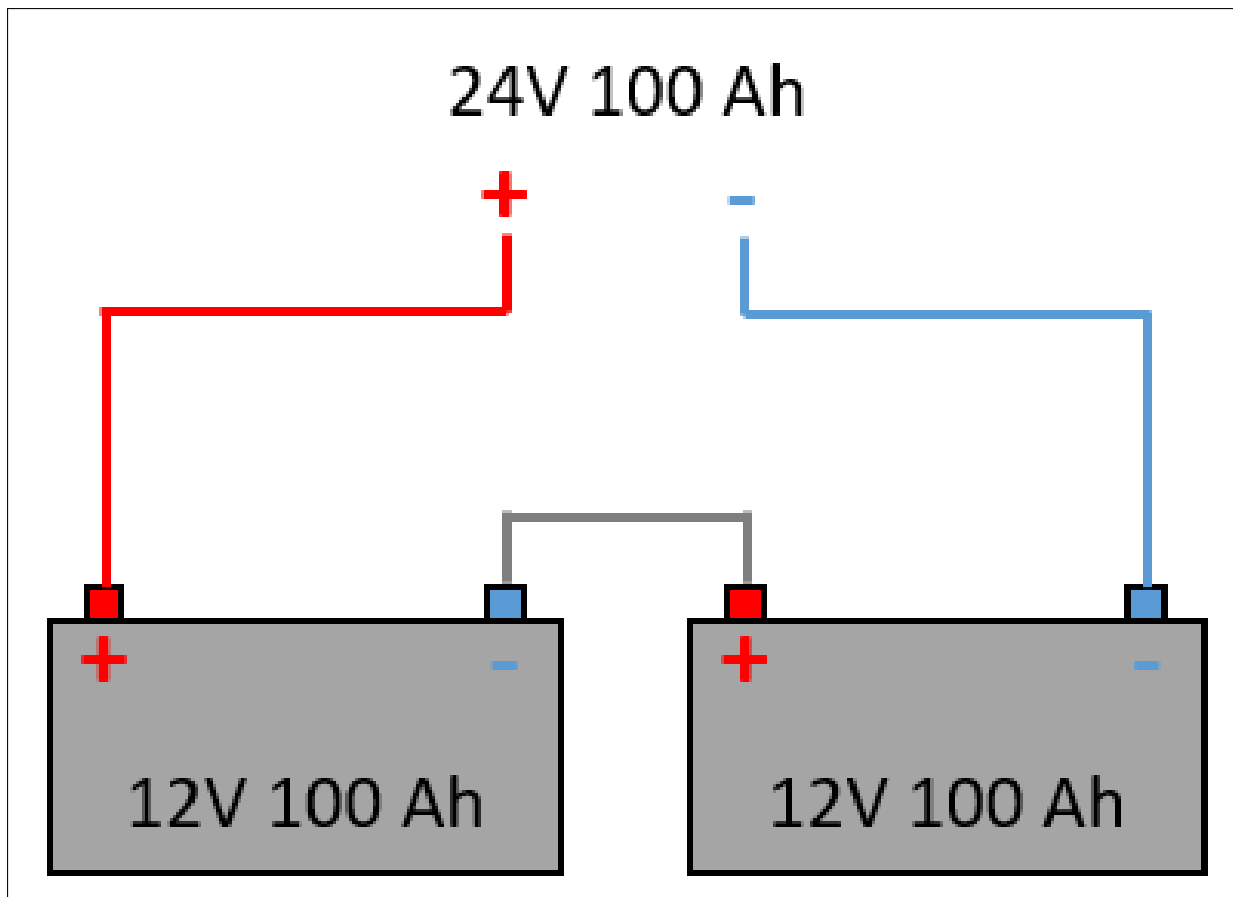


FIG. 4.1 : Association de batteries en série

Source : <https://www.myshop-solaire.com>

- Si des panneaux solaires identiques sont montés en parallèles alors leurs courant s'additionnent et la tension reste inchangée. La figure 4.5 en est une illustration.
- Si des panneaux identiques sont montées de manière mixte (des branches en parallèles constituées de panneaux en séries), alors la tension du champ est donnée par la somme des tensions des panneaux en série dans une branche et le courant débité par le champ est donnée par la somme des courants des différentes branches en parallèles. La figure 4.6 en est une illustration.

Revenons à présent à nos suppositions : Obtenir 1000 watts de puissance de champ solaire et 1000 Ah de capacité de stockage en 48 volts à partir de panneaux 100 watts ($V_{mp}=18\text{ V}$, $I_{mp}=5,5\text{ A}$) et de batteries de 12 volts 200 Ah.

- La tension du système étant de 48 volts, il nous faudrait pour l'obtenir avoir des branches de quatre batteries en série, totalisant 48 volts 200 Ah par branche.
- La tension du système étant de 48 volts, il nous faudrait pour recharger les batteries maintenir une tension supérieures à cette valeur aux bornes du champ solaire. Il nous faudra donc si on ne dispose pas de contrôleur de charge MPPT, garantir cela en créant des branches de trois panneaux en série totalisant 54 volts V_{mp} et 5,5 A soit 297 watts de puissance maximum par branche.
- Pour avoir 1000 Ah de capacité de stockage en 48 volts, il nous faudra mettre en parallèle 5 branches, ce qui donne un total de 20 batteries dans un montage mixte.

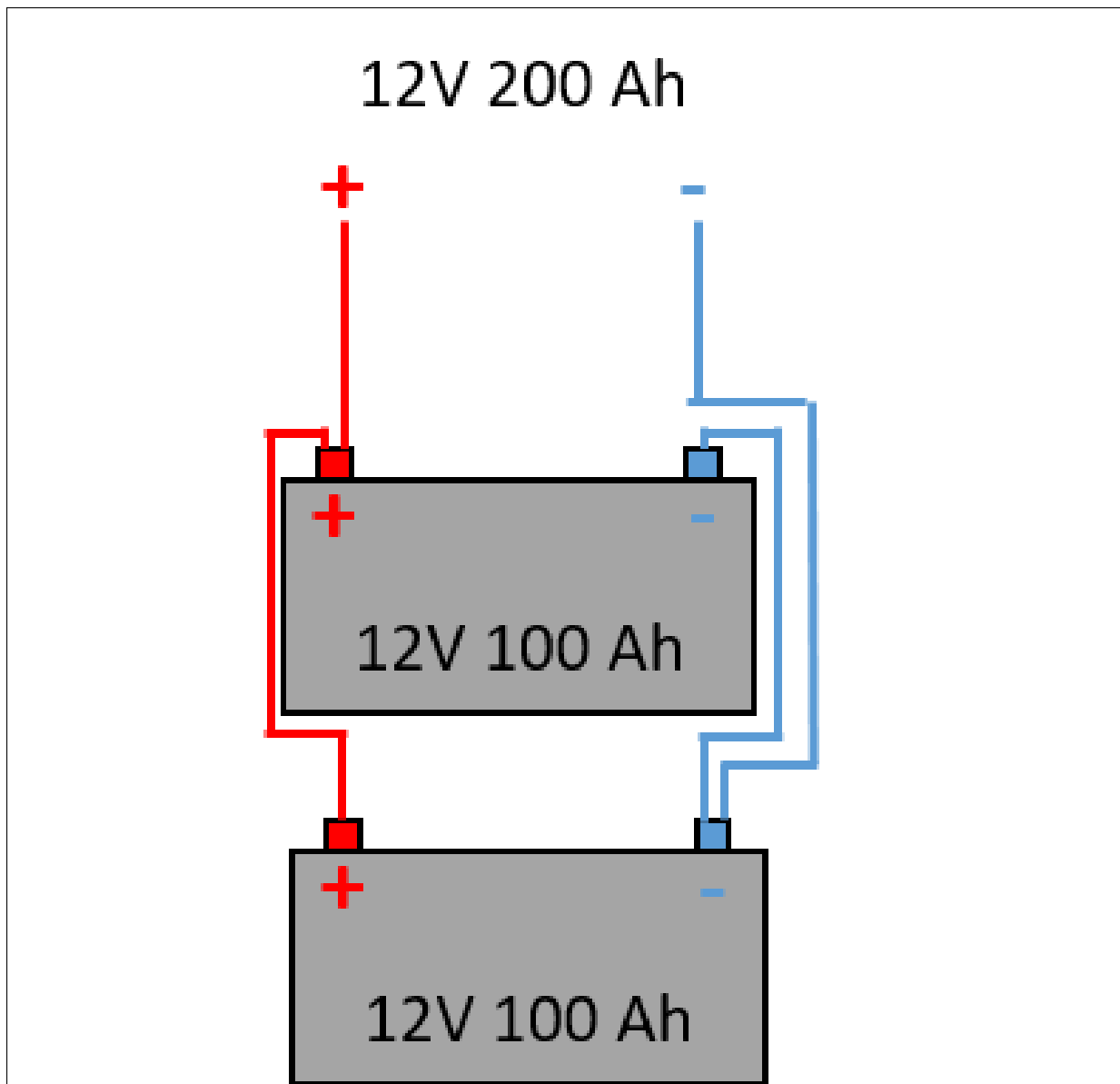


FIG. 4.2 : Association de batteries en parallèle

Source : <https://www.myshop-solaire.com>

- Pour avoir au moins 1000 watts de puissance maximale du champ photovoltaïque, il nous faudra 4 branches en parallèles, ce qui donne un total de 12 panneaux et une puissance poussée à 1188 watts. On peut très bien obtenir la même puissance en combinant trois branches de quatre panneaux en parallèles. Quel montage doit-on préférer dans ce cas de figure ? Cela n'a pas vraiment d'importance si notre contrôleur de charge est intelligent comme les régulateurs MPPT. Dans les autres cas, il faut préférer le montage qui donne plus de courant aux batteries si bien sûr il n'y a pas de limitations au niveau des sections de câbles disponibles et des paramètres d'entrée du régulateur de charge disponible. Voyons cela : Dans le premier ce courant sera de $5,5 \times 4 = 22A$ et dans le deuxième il est de $5,5 \times 3 = 16,5A$

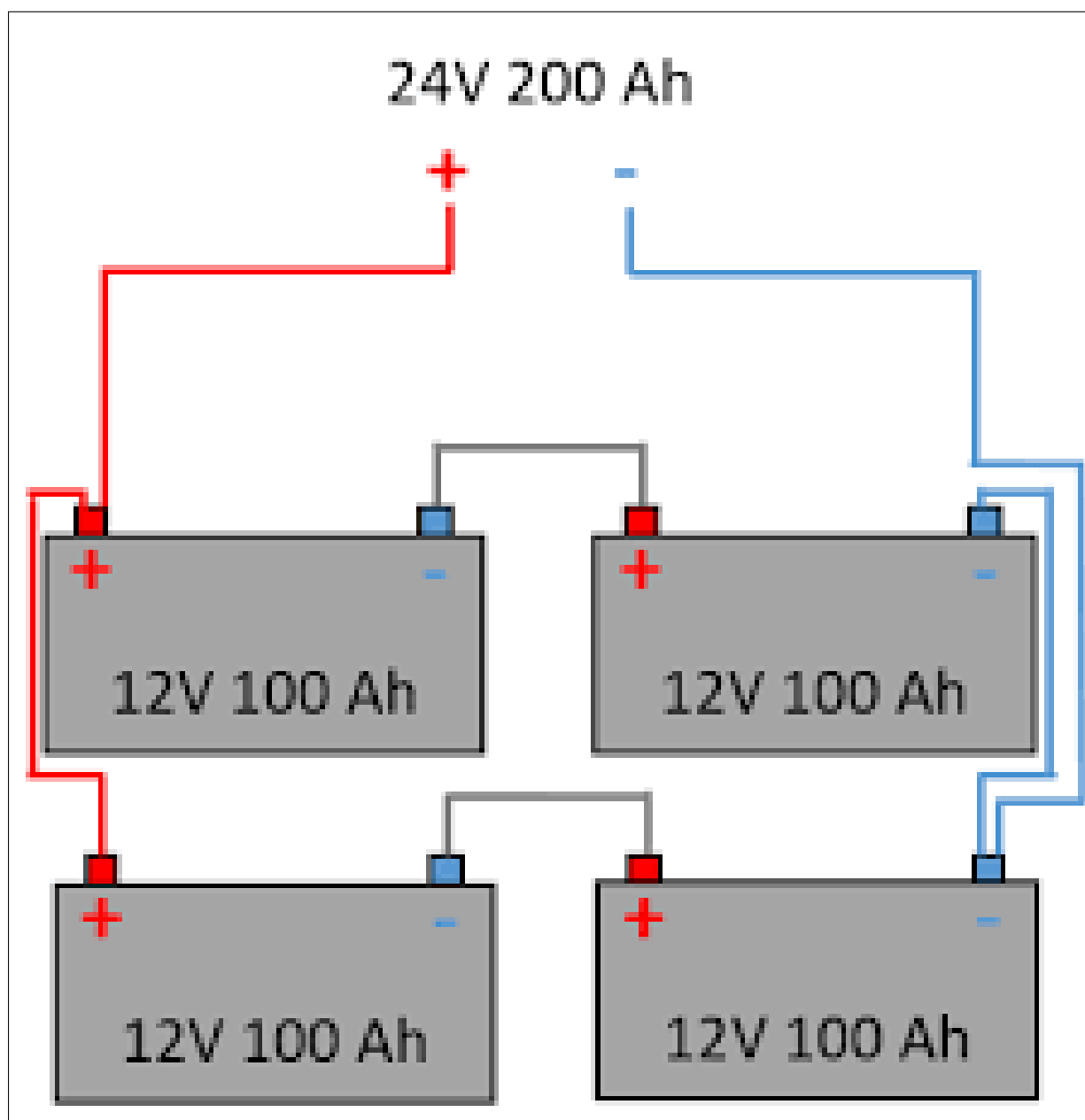


FIG. 4.3 : Association mixte de batteries
Source : <https://www.myshop-solaire.com>

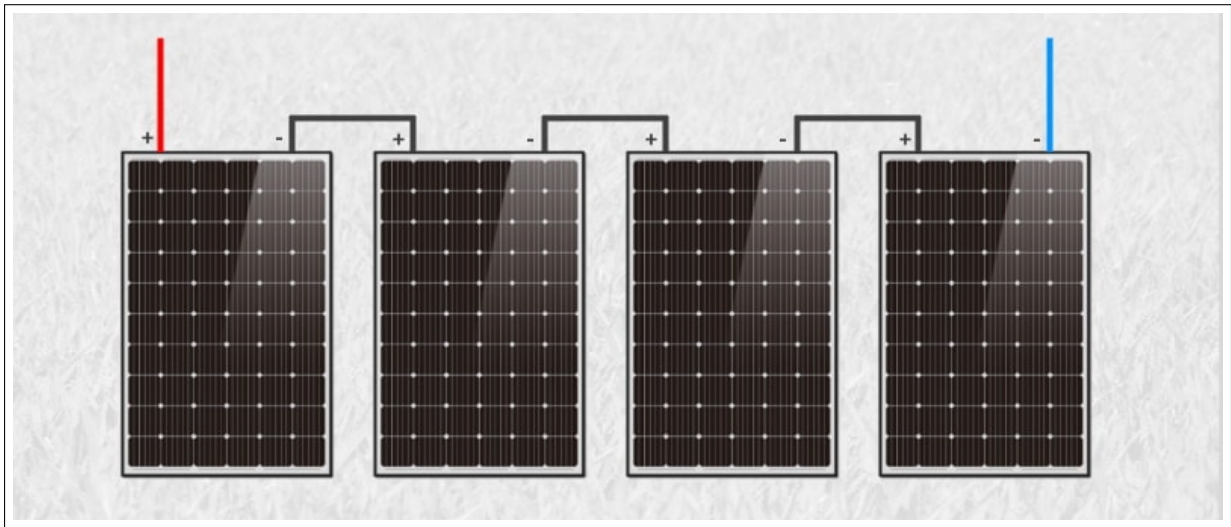


FIG. 4.4 : Association de panneaux solaires en série
 Source : <https://lesolairepourtous.fr>

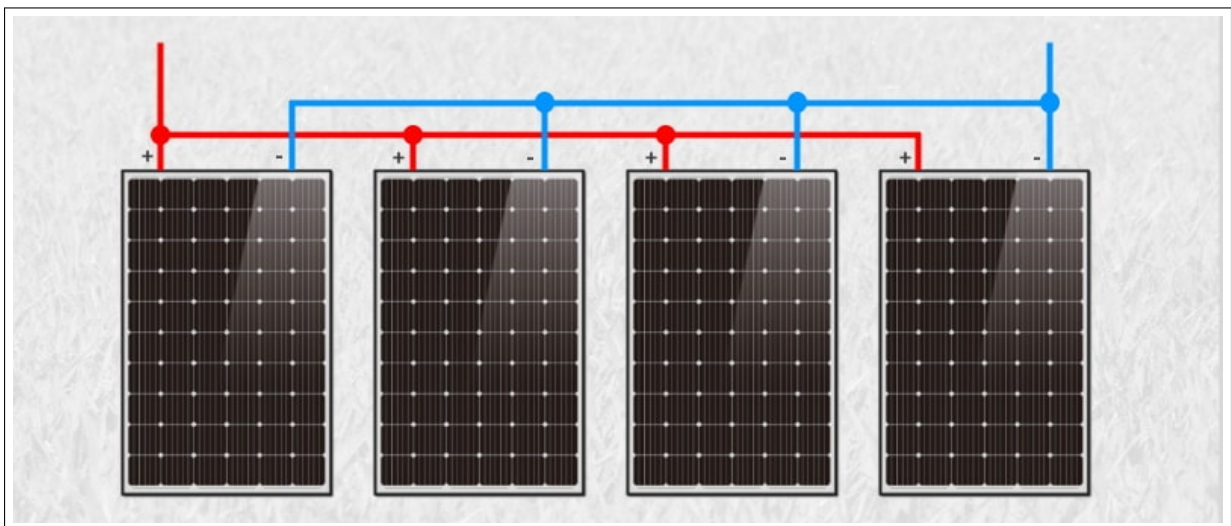


FIG. 4.5 : Association de panneaux solaires en série
 Source : <https://lesolairepourtous.fr>

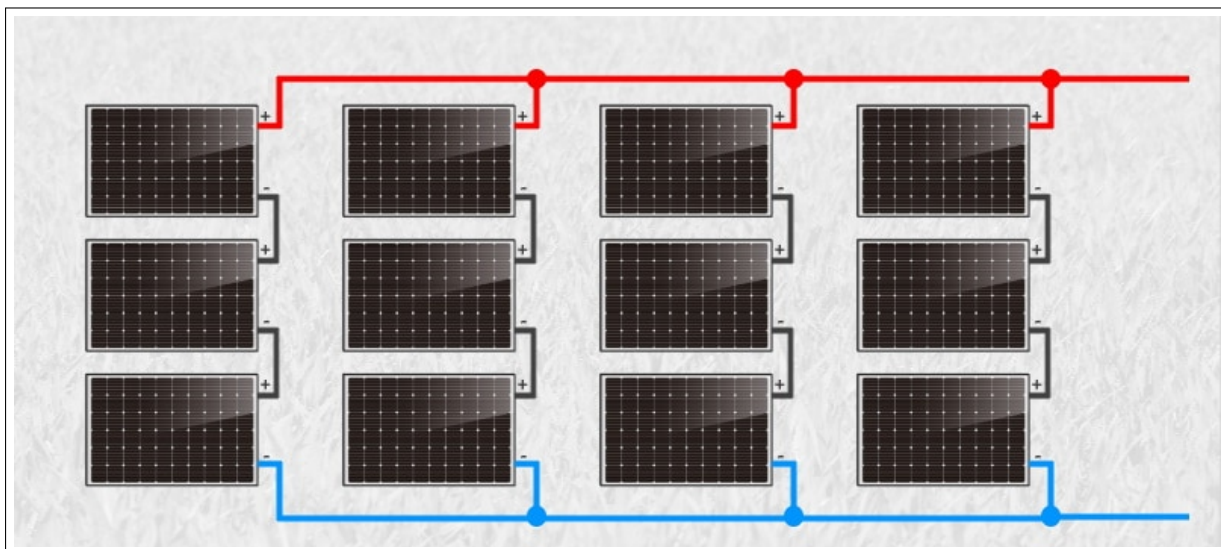


FIG. 4.6 : Association mixte de batteries
Source : <https://lesolairepourtous.fr>

Chapitre 5

Installation d'un système photovoltaïque en 12 volts sur camping-cars, fourgonnettes, cabanes, bateaux et petites maisons

5.1 Démarche d'installation

La démarche proposée ici s'inspire des guides d'installation proposés par MyShop Solaire [8] sur son site internet. Je vous propose de monter les principaux éléments du système dans l'ordre suivant :

1. Le parc de batteries et ses dispositifs de protection
2. L'onduleur et ses dispositifs de protection
3. Le régulateur de charge et ses dispositifs de protection
4. Le champ de panneaux solaires et ses dispositifs de protection

Pour être en conformité avec notre démarche et miser au maximum sur les aspects pratiques, nous allons reprendre l'exemple de Mme Prudence traité au chapitre 3. Pour ce faire, résumons les résultats des calculs précédents effectués :

- Les besoins journaliers de Mme Prudence s'élèvent à $1214Wh/J$
- La capacité de stockage requise pour son parc est de 298 Ah et elle a choisi d'acheter deux batteries à décharge profonde de 153 Ah en C10 (170 Ah en C20). Elle peut très bien utiliser aussi des batteries de 6 V (par exemple 6 V 100 Ah en C10). Il en faudra alors six.
- La puissance maximale du champ de panneaux solaires requise est de $308,5Watts$. Elle peut par exemple comme dans nos suppositions précédentes acheter trois (03) panneaux de puissance maximum 100 watt.
- La section des câbles qu'il faut pour connecter le régulateur aux panneaux et aux batteries est de $25mm^2$, ceux destinés au raccordement des batteries entre elles est de $1,5mm^2$ et la section des câbles de raccordement des batteries à l'onduleur est de $16mm^2$

- Un régulateur MPPT 20/100 qui peut gérer jusqu'à 20A en 100 volts à son entrée fera l'affaire, mais on peut très bien utiliser un PWM 20 A/12 volts

Le câblage de notre système va ressembler aux visuels des figures 5.1, 5.2 et 5.3 emprunté à MyShop Solaire[8]

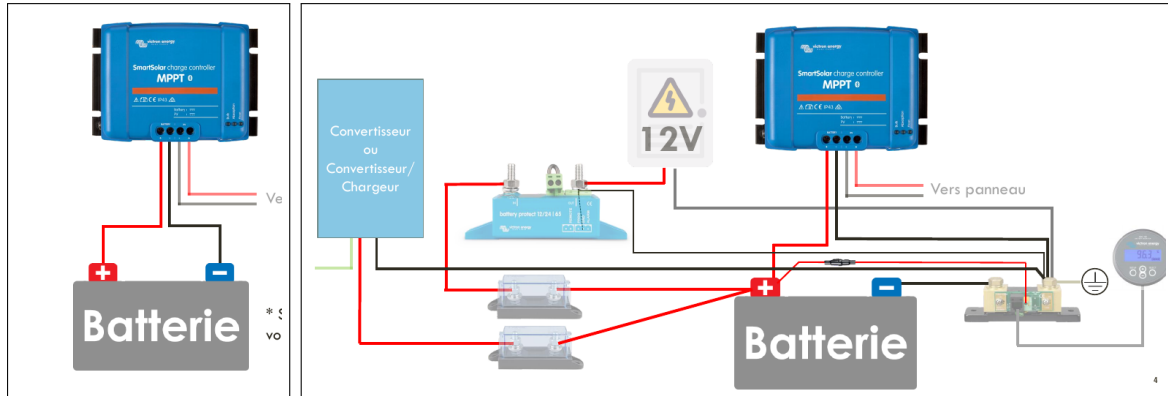


FIG. 5.1 : Connexion du parc de batteries avec et sans les éléments facultatifs
Source : myshop-solaire.com

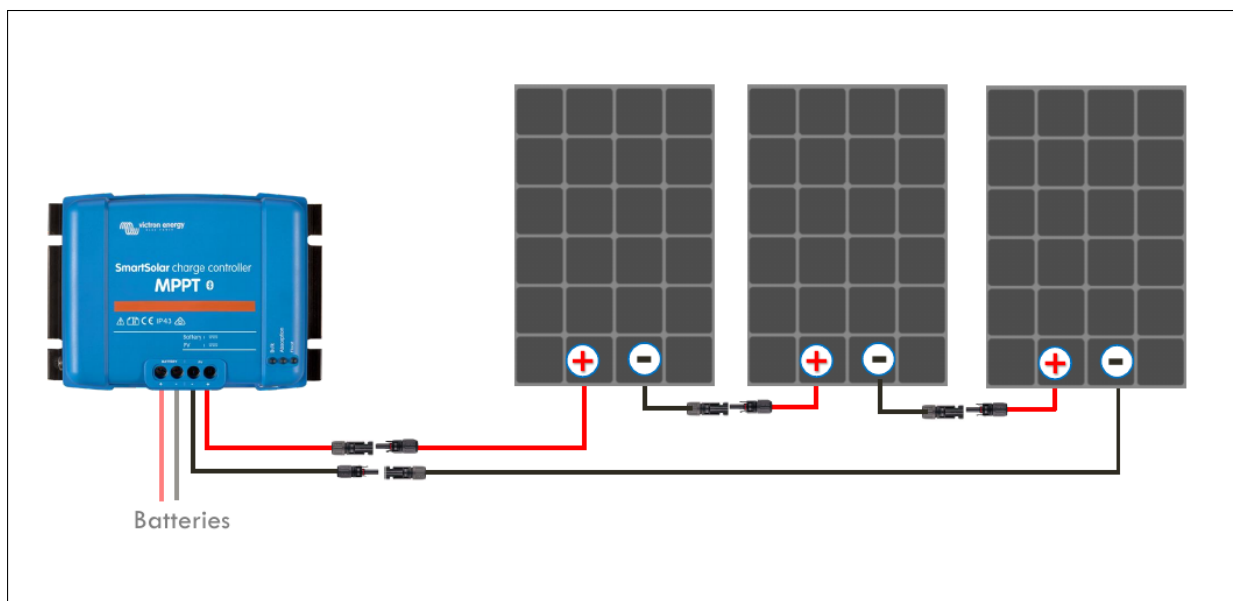


FIG. 5.2 : Connexion du champ de panneaux solaire en série
Source : myshop-solaire.com

5.2 Installation du parc de batteries et ses dispositifs de protection

5.2.1 Emplacement, disposition et câblage des batteries entre elles

Que ça soit en camping-car, fourgonnette, cabane, bateau ou petite maison, les batteries doivent être placées dans un endroit le plus aéré possible. Bureaux, chambre à

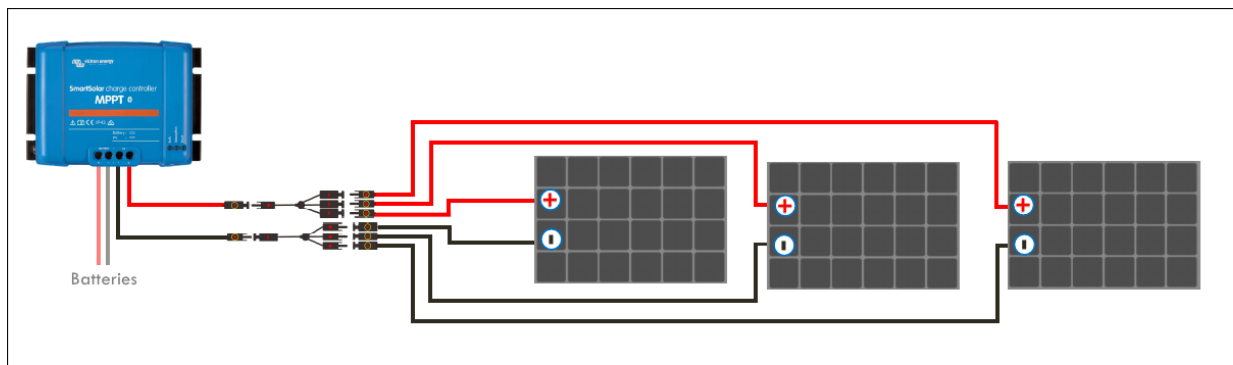


FIG. 5.3 : Connexion du champ de panneaux solaire en parallèle

Source : myshop-solaire.com

coucher, cuisine et tout autre endroit où des personnes vont y rester régulièrement pendant plusieurs heures sont des endroits à proscrire[9]. Un support, de préférence en bois induit d'une substance anticorrosion est nécessaire. Les batteries devront être disposées sur le support avant d'être interconnectées en série, parallèle ou en montage mixte selon la capacité et la tension voulu pour le parc. Pour notre exemple, les batteries devront être connectées en parallèle avec des câbles de section $1,5\text{mm}^2$ comme l'indique la figure 5.4

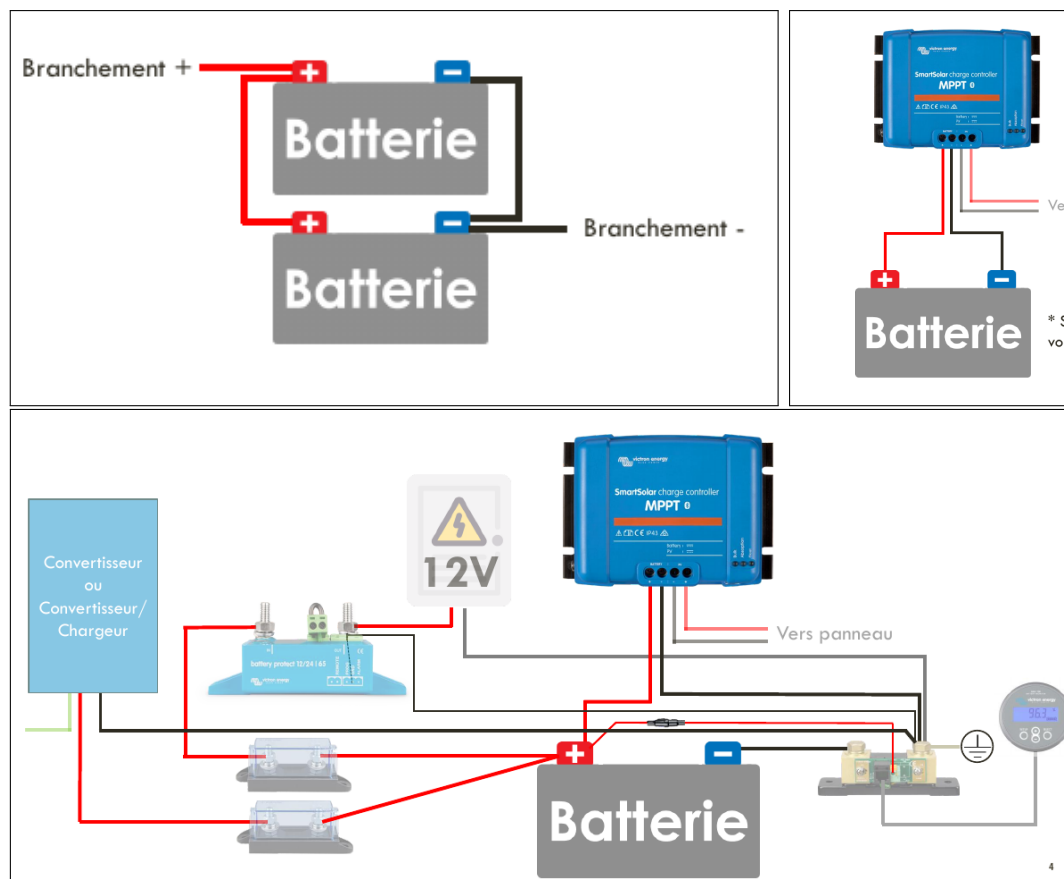


FIG. 5.4 : Connexion des batteries de 12 volts en parallèle pour obtenir la tension et la capacité souhaitée

Source : myshop-solaire.com

5.2.2 Moniteur de batteries pour suivre l'état de santé du parc

L'installation du moniteur de batterie est optionnel. C'est à vous de décider. Ce qu'il faut savoir, c'est que le moniteur de batteries est tout simplement un appareil de mesure qui enregistre les données (généralement la tension et le courant) en temps réel, puis les réutilise dans un algorithme plus ou moins complexe pour déterminer les informations utiles sur l'état de votre parc de stockage. Selon le modèle et le fabricant, ces informations peuvent vous être communiquées de manière régulière sur votre téléphone portable, par e-mail, SMS, etc. Vous pouvez également suivre le monitoring de ces informations sur un écran prévu pour cela et placé dans un endroit adéquat. Les instructions de montage d'un moniteur de batteries sont pour la plupart fournies de manière détaillée dans un manuel d'utilisation qui accompagne le matériel.

5.2.3 Fusible de protection du parc de batteries contre les surintensités

L'installation de fusible est optionnel, cependant, sa présence aide à réduire les risques de destruction des batteries en cas de court-circuit, mais aussi les risques de surchauffe des câbles qui peuvent provoquer des incendies. Alors autant que possible, il faut protéger le circuit en installant un fusible. Mais pour le faire, comment doit-on choisir le fusible ? Nous allons une fois de plus raisonner sur la base d'exemple :

- Le premier critère à considérer est la **tension** d'usage du fusible. Dans notre cas, le parc de batteries impose une tension de 12 volts. **Il nous faut donc un fusible dont la tension d'usage est supérieur à 12 volts.** Le second critère est le courant de rupture du fusible qui est déterminé sur la base du courant maximum admissible, c'est-à-dire le courant maximum pour lequel les appareils en service fonctionnent normalement. Si le courant dépasse cette dernière valeur, cela signifie qu'il y a une situation anormale quelque part dans les circuits du système et que si cette situation perdure, elle va conduire inéluctablement à de graves problèmes (endommager des éléments du système, brûler les câbles électriques, provoquer un incendie). Le fusible doit alors se déclencher en ouvrant le circuit par rupture. Comment trouver cette tension maximale admissible ? C'est simple, il faut supposer que tous les appareils sont en service et qu'ils fonctionnent normalement. Dans cette situation, le courant débité par les batteries est le courant maximum admissible et correspond à d'une part à la puissance totale de tous les appareils majorée des pertes onduleur et d'autre part au produit du courant maximum admissible et de la tension du parc de batteries. Prenons un exemple : Dans le cas de Mme Prudence, les appareils totalisent une puissance DC de 54 watts et une puissance AC de 180 watts et des pertes onduleur de 18 watts (10 %). Ce qui donne 252 watts en 12 volts. Le courant maximum admissible est de

$$\frac{252}{12} = 21A$$

Le fusible doit avoir un courant de rupture qui se situe entre cette valeur et le courant de court-circuit du parc de batteries. Pour un parc de batteries en 12 volts, le courant de court-circuit peut atteindre 26 A. Un fusible de 25 A pourrait donc convenir aux besoins de Mme Prudence.

5.2.4 Dispositif de protection des batteries contre les surcharges et les décharges critiques

La protection du parc de batteries contre les surcharges est généralement très bien pris en charge par la plupart des régulateurs de charge qui déconnecte les panneaux solaires lorsque les batteries sont chargées et les reconnecte lorsqu'elles sont déchargée. De même la plupart des régulateurs de charge disposent d'une sortie DC permettant d'alimenter les appareils DC. Cette sortie est également contrôlée par une fonction interne de ces régulateurs qui déconnecte les appareils lorsque les batteries sont déchargées et les reconnecte lorsqu'elles sont chargées. De cette façon, les batteries sont protégées contre les décharges profondes et les charges excessives qui peuvent les endommager irréremédiablement. Cependant, il y a un problème qu'il faut prendre en compte. En effet, la sortie DC des régulateurs de charge n'a généralement jamais la puissance nécessaire pour alimenter les appareils à haute consommation les fours à micro-ondes, les congélateurs, les radiateurs, etc. Ces appareils selon qu'ils fonctionnent en DC ou AC, doivent être connectés directement aux batteries ou par l'intermédiaire d'un onduleur. Si tel est le cas, il n'y a plus de protection des batteries contre les décharges profondes. Que faut-il faire alors ? Eh bien il existe des appareils conçus spécialement pour ça, des protecteurs de batteries. Par exemple le "smart battery protect 12 V/24 V - 65 A" fabriqué par Victron Energy. Connecté en sortie du parc de batteries, permet de déconnecter automatiquement du parc de batteries les appareils de grandes consommations et à faible priorité avant qu'elle ne se décharge complètement et donc de réduire le risque de les endommager. L'avantage de ces protecteurs est qu'ils sont paramétrables et on peut donc fixer soit même selon les besoins les conditions de déconnexion et de ré-connexion des appareils.

5.3 Installation du régulateur de charge et ses dispositifs de protection

5.3.1 Emplacement et raccordement

Maintenant que nous avons appris à choisir le régulateur de charge selon les paramètres électrique du système, nous devons l'installer de manière à ce qu'il fonctionne le plus efficacement possible. Je vous propose de suivre les étapes suivantes :

- Choisir un emplacement adéquat et fixer le régulateur. Un emplacement adéquat sous-entend ce qui suit :
 1. La distance entre l'emplacement choisie et le parc de batteries de stockage est inférieur à la distance que nous avons fixée pour la liaison régulateur-batteries lors du calcul de la section de câbles.
 2. La distance entre l'emplacement choisie et le champ de panneaux solaires est inférieur à la distance que nous avons fixée pour la liaison régulateur-panneaux lors du calcul de la section de câbles.
- Raccorder le régulateur au champ de panneaux solaires et au parc de batteries en suivant l'ordre indiqué par la figure 5.5. À noter que les ordres de connexion et de déconnexion sont inverses l'un de l'autre.
- Installer les éléments de protection, c'est-à-dire les fusibles.

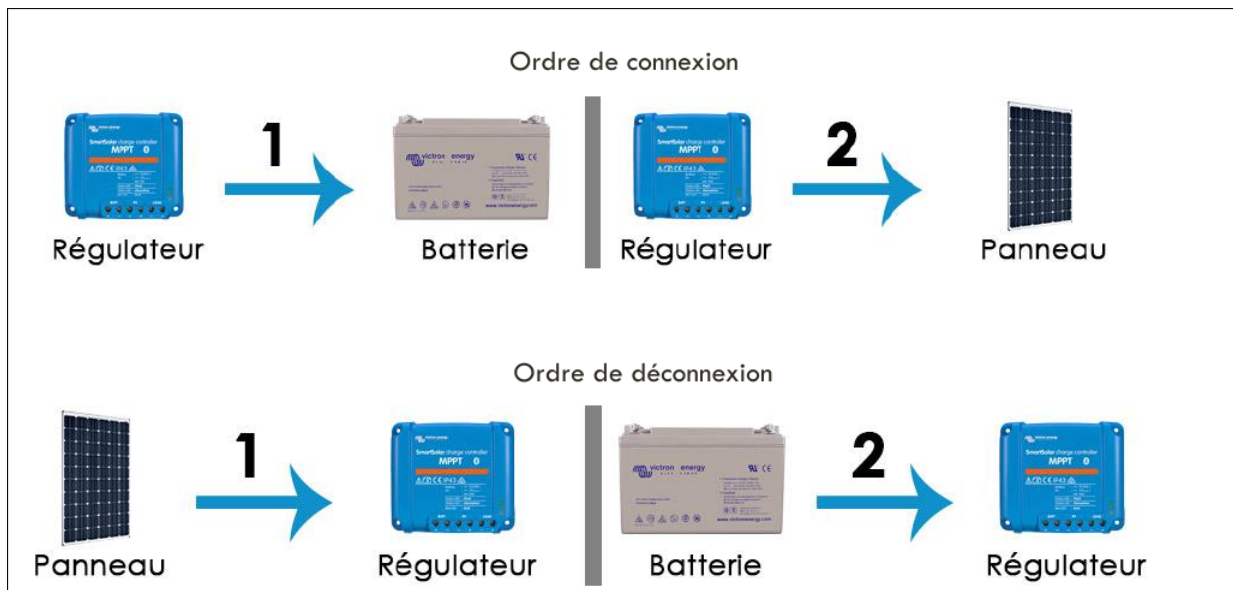


FIG. 5.5 : Ordre de raccordement du régulateur aux panneaux et aux batteries

5.3.2 Dispositifs de sécurité

Les paramètres électriques de ces derniers devront être judicieusement choisis en fonction des paramètres électriques de chaque ligne de transport.

5.4 Installation des panneaux solaires

Avant l'installation des panneaux solaires, il est important de procéder à la vérification de leurs éléments de protection. Ces éléments de protection sont des diodes, composants électriques qui ne laissent le courant passer que dans un seul sens. Pour un fonctionnement correct et sans danger de vos champs de panneaux solaires, vous devez vérifier que ces diodes de protection sont bien installées. On en distingue deux types dans les installations solaires :

- Les diodes anti-retour qui normalement sont livrés avec les panneaux photovoltaïques. Elles ont pour rôles de bloquer le courant de retour des batteries lorsque les conditions d'éclairage sont insuffisantes et de protéger ainsi les panneaux. Vérifiez dans le boîtier de connexion de chaque panneau solaire que cette diode est présente et bien connectée. Si ce n'est pas le cas il faut y remédier en suivant le plan de connexion fournie avec le panneau.
- Les diodes by-pass protègent les panneaux qui pour certaines raisons reçoivent moins d'éclairement que les autres à un instant donné. ces panneaux deviennent en ce moment comme des appareils électriques pour les autres panneaux. Le rôle des diodes by-pass est de déconnecter simplement ces panneaux tout en garantissant le fonctionnement du système. Vérifiez dans le boîtier de connexion de chaque panneau solaire que cette diode est présente et bien connectée. Si ce n'est pas le cas il faut y remédier en suivant le plan de connexion fournie avec le panneau.

Si elles ne sont pas installées, vérifier qu'elles se trouvent sur la face intérieure du couvercle de la boîte de jonction. Si elles y sont, les installer en suivant le schéma fourni, soit sur la notice d'utilisation, soit sur la face interne du couvercle de la boîte de jonction.

5.4.1 Emplacement, orientation et inclinaison des panneaux

Pour produire le maximum de puissance électrique, les panneaux solaires doivent être suffisamment éclairé par le soleil. Pour garantir cet éclairage suffisant, il est impératif de choisir convenablement l'emplacement des panneaux solaires, mais aussi de les orienter convenablement et enfin de les incliner d'un certain angle par rapport au plan horizontal. Nous allons donc dans ce qui suit donner des éléments de réponses aux questions suivantes :

1. Quelle est l'emplacement idéal pour vos panneaux solaires ?
2. Vers où orienter vos panneaux solaires selon le lieu où vous vous trouvez ?
3. De quel angle par rapport au plan horizontal devez-vous incliner vos panneaux solaires ?

Essayons de répondre à ces questions le plus simplement possible :

Emplacement des panneaux : Si vous installez votre système sur fourgonnette, camping-car ou sur bateaux, vous n'avez pas meilleur emplacement que dans les parties supérieures. Si vous installez votre système dans votre petite maison ou dans votre cabane, vous devez estimer la hauteur des obstacles en degré d'angle et optimiser l'emplacement en conséquence. Cependant, cette démarche est beaucoup plus orientée ingénierie et je vous propose de vous aligner sur un principe simple. Choisissez l'emplacement qui évite au maximum que l'ombre des obstacles à proximité (bâtiments, immeubles, arbres, etc.) n'arrive sur les panneaux solaires pendant plusieurs heures de la journée, notamment du matin au soir. Si nécessaire, vous serez obligé de tailler certains arbres à proximité. Dans ce cas de figure, il ne faut pas oublier d'oublier de vérifier régulièrement la repousse des feuilles de cet arbre. Le meilleur moyen dans ce cas est de supprimer l'arbre gênant et le remplacer par un autre à un autre emplacement. Il faudrait alors se conformer à la législation de votre pays en matière d'arbres.

Orientation des panneaux : Puisque le soleil se lève à l'est et se couche à l'ouest en suivant une trajectoire à peu près au-dessus de l'équateur terrestre, les rayons solaires n'arrivent pas de la même façon sur une surface située dans l'hémisphère nord et une surface située dans l'hémisphère sud. Aussi dans un même lieu, les rayons solaires n'arrivent pas de la même façon selon l'heure de la journée. Pour les grandes installations, l'optimisation se fait grâce à un suiveur solaire qui oriente les panneaux selon l'heure de la journée, c'est-à-dire la position du soleil. Dans le cas de nos petites installations, retenez simple ceci pour orienter convenablement vos panneaux solaires de votre système en petite maison ou cabane (La question d'orientation et de d'inclinaison n'a pas d'intérêt quand il s'agit d'installation pour bateaux, camping-cars ou fourgonnettes)[10] :

- Si votre pays se trouve dans l'hémisphère sud du globe terrestre, vos panneaux solaires doivent être orientés vers le nord
- Si votre pays se trouve dans l'hémisphère nord du globe terrestre, vos panneaux solaires doivent être orientés vers le sud
- Si votre pays se trouve dans les voisinages de l'équateur, la question d'orientation et d'inclinaison des panneaux solaires ne se pose pas. Vous pouvez disposer horizontalement vos panneaux solaires selon l'esthétique qui vous conviendrait.

Comment trouver la direction sud ou nord selon votre position ? Je vous conseille de vous servir de votre téléphone. De nos jours tous les smartphones sont équipés de boussole qui utilise des capteurs de haute précision l'orientation.

Inclinaison des panneaux solaires : De manière rigoureuse pour les grandes installations, l'inclinaison optimale des panneaux dépend du mois de l'année. Dans le cas de nos petites installations en cabane ou en petites maisons, la règle est simple. Vous devez incliner les panneaux solaires d'un angle égale à la latitude de votre position géographique. Pour trouver les coordonnées géographiques de votre position, ayez une fois de plus recours à votre téléphone. Les cartes de localisation comme [Google map](#) détectent automatiquement la position et indique les coordonnées.

À présent clarifions la question d'emplacement, d'orientation et d'inclinaison des panneaux par un exemple : Supposons que Mme Prudence habite quelque part au Venezuela. Les coordonnées géographiques obtenues en pointant au hasard la souris sur un point de ce pays donne une latitude de $6^{\circ}05'50''$ N. Cela veut dire qu'elle est dans l'hémisphère nord. Ses panneaux solaires doivent être orientés vers le sud et inclinés de 6° par rapport au plan horizontal.

5.4.2 Câblage des panneaux

Avant de procéder au câblage des panneaux, les panneaux solaires doivent être correctement fixés à l'emplacement choisi selon les critères énumérés plus hauts.

- Si vous avez choisi de fixer vos panneaux solaires sur une toiture, veillez à laisser une distance raisonnable entre le toit et l'arrière des modules, par exemple 10 mm. La même règle doit être respectée s'il s'agit d'un camping-car ou d'une fourgonnette. Pour y parvenir, une structure doit être au préalable fixée sur la toiture et les panneaux devront reposer sur cette structure.
- Si vous avez choisi de fixer vos panneaux solaires au sol, installez d'abord le support puis faire la pose des panneaux. Assurez-vous que les modules et le câbles ne sont pas à la portée des enfants. Dans l'idéal, la structure support doit être fixée sur béton.

Une fois que les panneaux solaires reposent solidement sur leurs supports, eux même solidaire au toit ou au sol, vous pouvez procéder au câblage des panneaux selon la configuration que vous avez déterminée au préalable (série, parallèle, hybride). Connectez ensuite les bornes positives et négatives de la boîte de jonction à celles du régulateur de charge en utilisant le câble dont la section a été déterminée à cet effet.

5.5 Création des circuits AC et DC

Maintenant que votre système est installé, il vous faut l'utiliser pour alimenter vos appareils électriques. Pour cela il vous faut mettre en place deux circuits : Le circuit DC qui alimentera vos appareils en courant continu et le circuit AC qui alimentera vos appareils en courant alternatif grâce à l'onduleur. Le but de ce livre n'étant pas d'enseigner les règles d'installation électrique dans le bâtiment, nous allons nous contenter de donner quelques conseils et exemples d'installations inspirés de sources diverses dans la mesure ou

les options disponibles sont diversifiées et dépendent du contexte (Installation en bateaux, fourgonnettes, camping-car, cabane ou petite maison).

D'abord, quelque soit l'usage ou le lieu, il faut savoir que toutes les installations électriques en AC partagent en commun un certain nombre de points[11] que l'on pourrait exploiter en sortie des onduleurs dans le cas d'une installation solaire :

Le tableau de repartition : Comme son nom l'indique, c'est là que tous les circuits AC sont raccordés. Chaque circuit partant de ce tableau est conçue pour des types d'appareils déterminés selon leur puissance. Le nombre d'appareils par circuit est déterminé par les normes électriques. La figure 5.6 est une illustration d'un exemple de répartition qui peut être réalisé dans un ou plusieurs tableaux de répartitions.

Les schema electriques : Les appareils électriques sont pour la plupart fourni avec des schémas de branchement. Servez-vous de ses schémas pour installer vos interrupteurs, ampoules, télérupteur, prise de courant, etc.

Le circuit encastré ou apparent : Il s'agit typiquement de l'installation des raccordements entre les différentes parties du circuit et le tableau de répartition. Ce raccordement peut être encastré dans les murs ou installés en apparent sous baguettes et moulure ou sous des tubes PVC. Il est évident que pour les petites installations solaires qui nous intéressent, c'est l'installation en apparent qui convient le mieux.

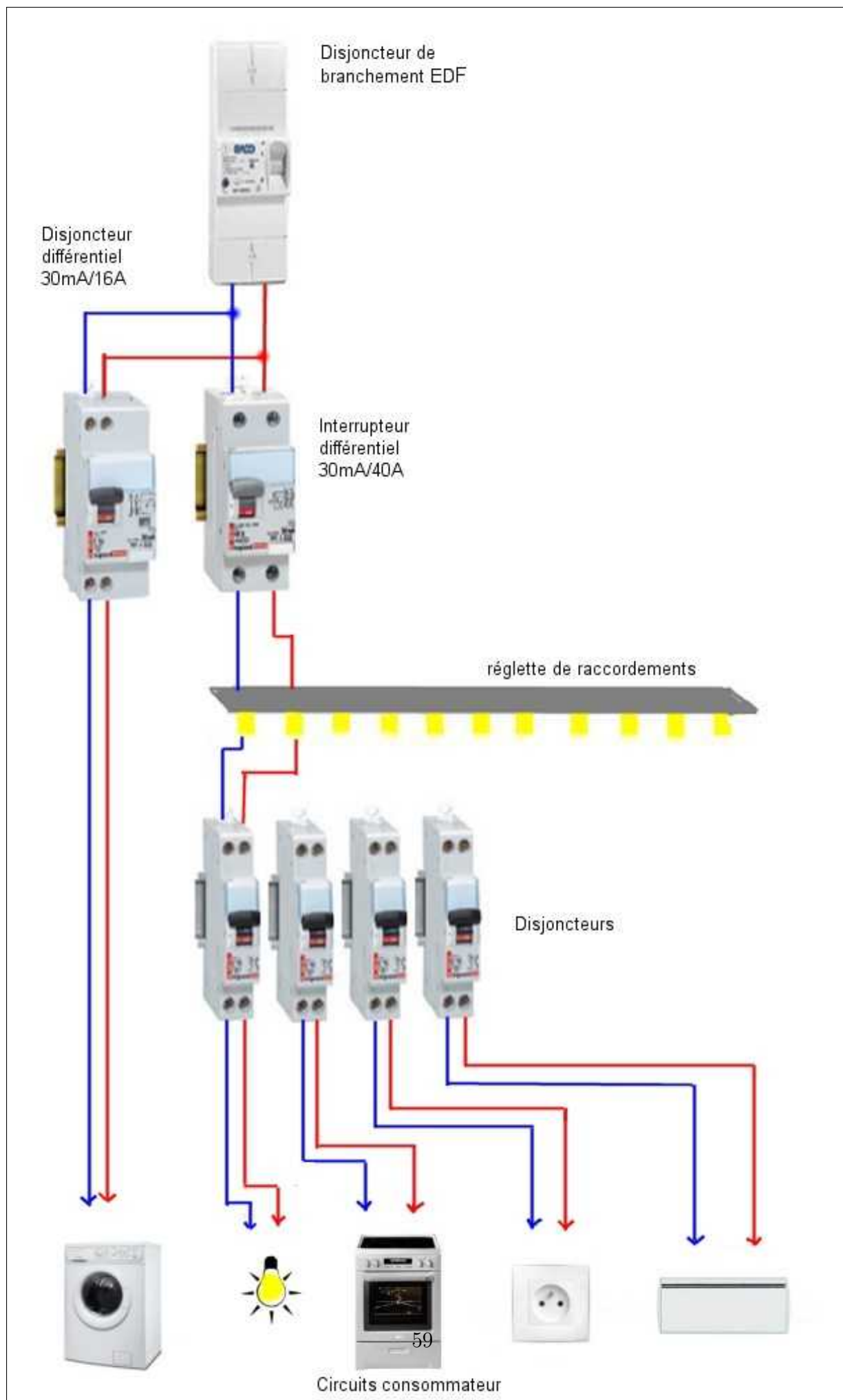
La pose des appareils : Une fois que les conduits et conducteurs sont installés soit encastré ou en apparent, vous pouvez procéder à la pose de l'appareillage (Prises, interrupteurs, etc.)

À présent, le circuit DC peut être mis en place. Le principe est à peu près le même. Garder juste à l'inscrite que les deux circuits ne doivent pas être mélangé. Utiliser des jeux de barres isolés pour connecter vos appareils DC à la batterie. Ci-dessous, quelques exemples de configurations sont présentés dans différents contextes :

Exemple 1 - Installation sur fourgonnette ou camping-car : Dans cet exemple de la figure 5.7, les batteries peuvent être chargées aussi bien par les panneaux photovoltaïques, mais aussi par le réseau électrique grâce une prise extérieure installés à cet effet. Le circuit AC est assuré par un convertisseur 12 V/230 V et le circuit DC est directement créé sur les batteries. La figure 5.8 nous donne une vue différente du même scénario.

Exemple 2 - Installation sur bateaux : Dans cet exemple de la figure 5.9, les batteries peuvent être chargées aussi bien par les panneaux photovoltaïques, mais aussi par le réseau électrique grâce une prise extérieure installés à cet effet. Deux autres options de recharges sont disponibles grâce à l'alternateur du bateau et à des éoliennes. Le circuit de distribution intègre le circuit AC assuré par un convertisseur 12 V/230 V et le circuit DC directement créé sur les batteries. La figure 5.10 nous donne une vue différente du même scénario.

Exemple 3 - Installation en cabane : Dans cet exemple de la figure 5.11, les batteries peuvent être chargées aussi bien par les panneaux photovoltaïques, mais aussi par un onduleur chargeur connecté à une source auxiliaire. Le circuit de distribution intègre le circuit AC assuré par un l'onduleur chargeur 12 V/230 V et les circuits DC dont l'un directement créé sur les batteries et l'autre sur la sortie contrôlée



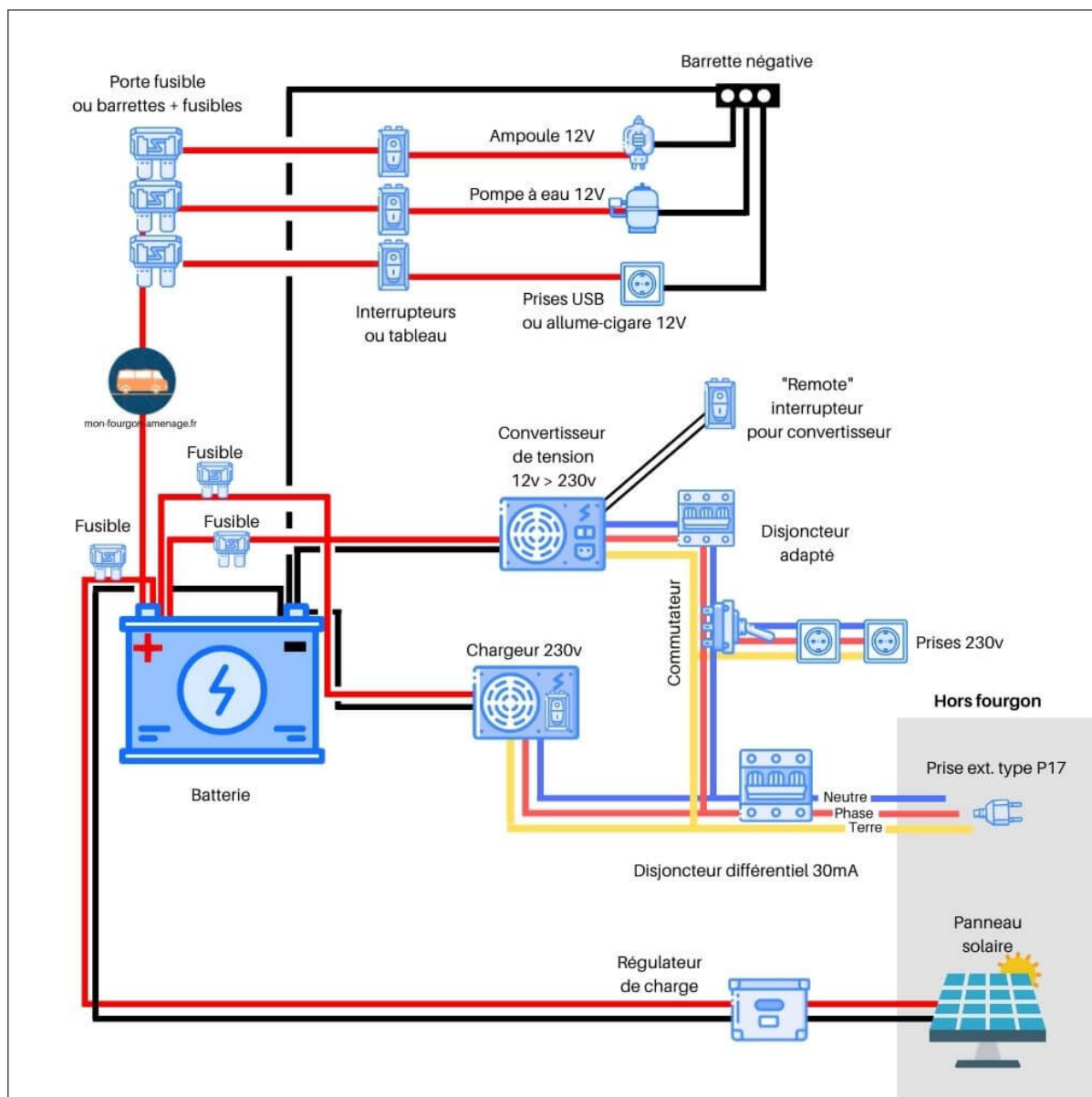


FIG. 5.7 : Exemple de configuration pour fourgonnettes et camping-car

Source : <https://mon-fourgon-amenage.fr>

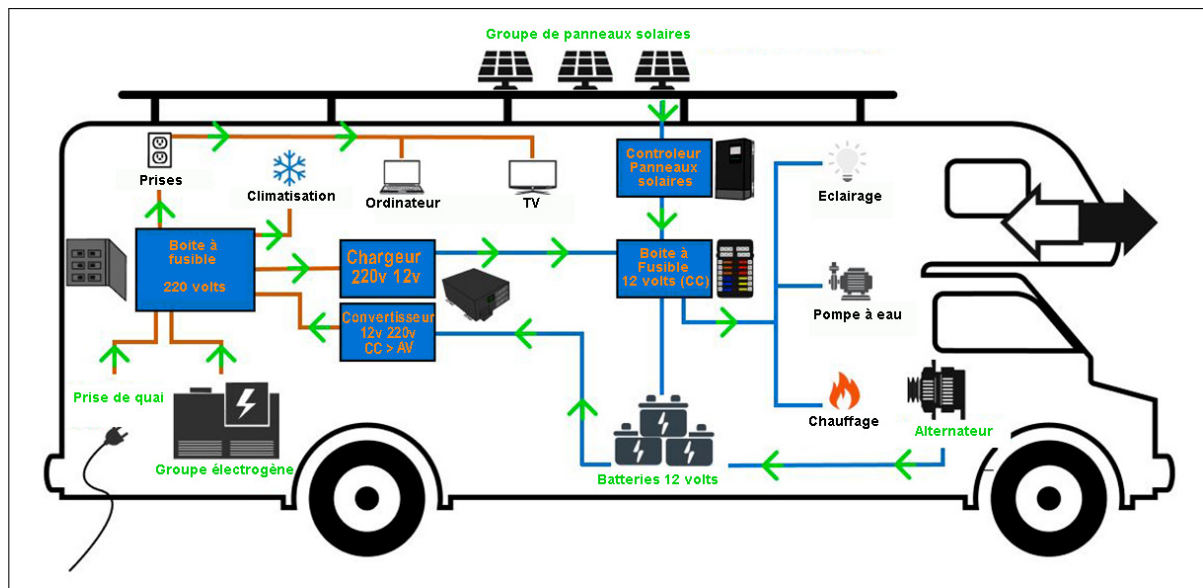


FIG. 5.8 : Exemple de configuration pour fourgonnettes et camping-car

Source : <https://jmconcept.fr>

du régulateur de charge. La figure 5.12 nous donne une vue différente du même scénario.

Plan électrique bateau et VR

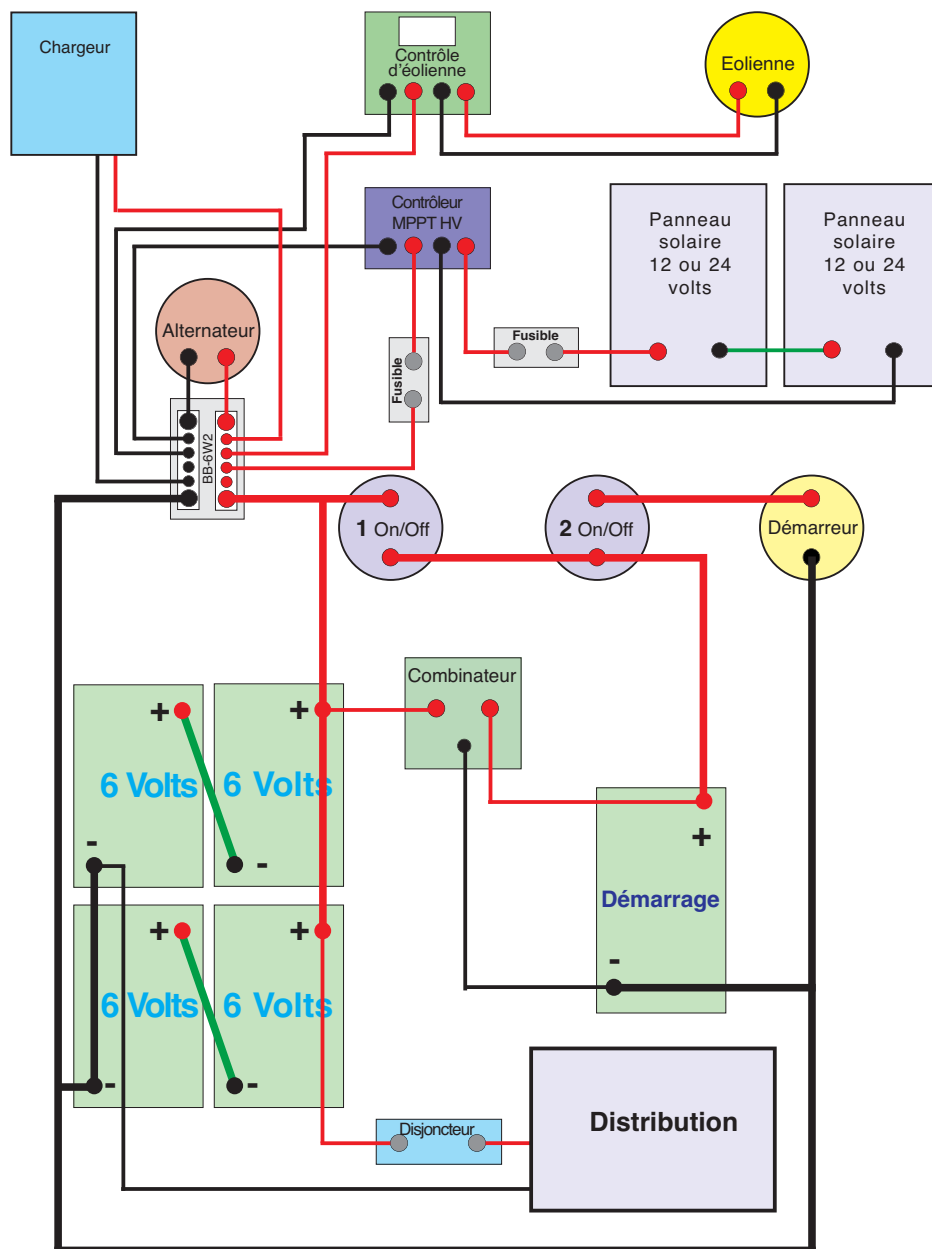


FIG. 5.9 : Exemple de configuration pour bateaux

Source : https://www.naviclub.com/PlanElect_BateauVr.pdf

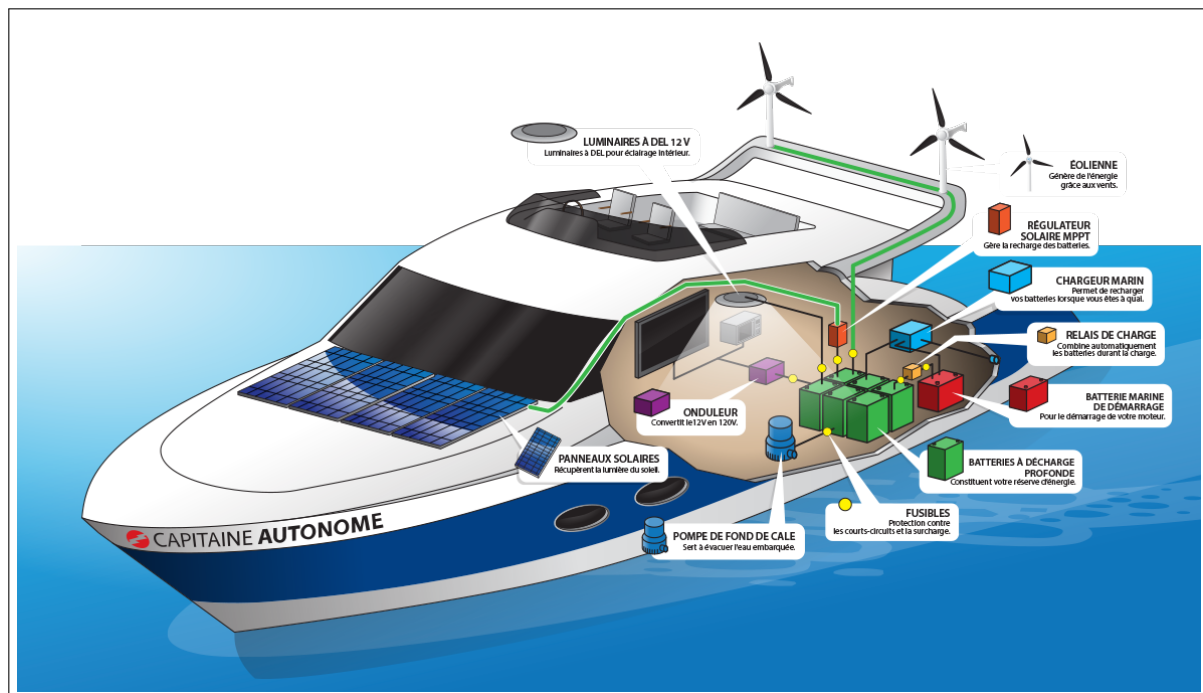


FIG. 5.10 : Exemple de configuration pour bateaux

Source : <https://www.batteriesexpert.com/fr/renewable-energy-rv-cottage>

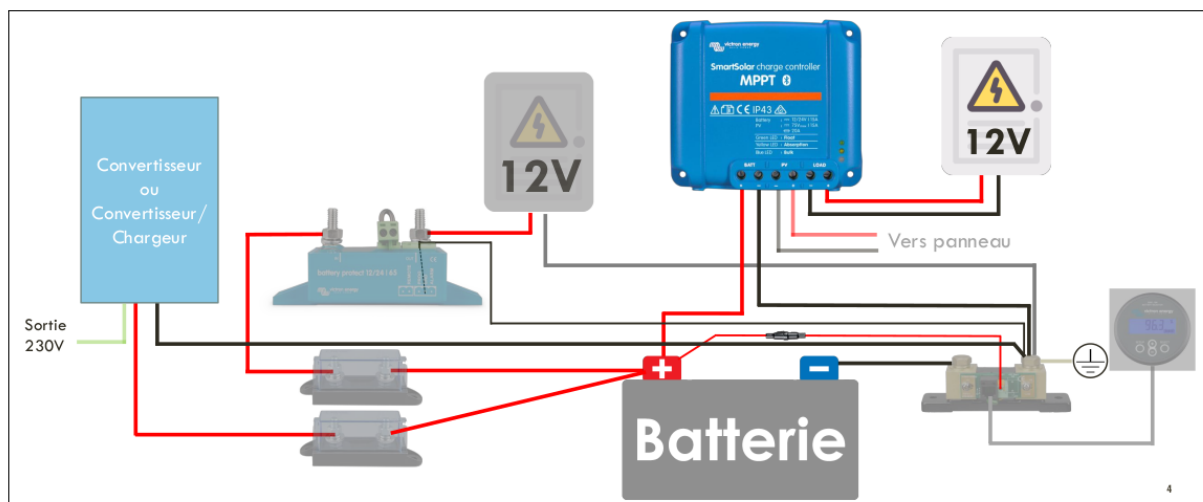


FIG. 5.11 : Exemple de configuration pour cabane

Source : myshop-solaire.com

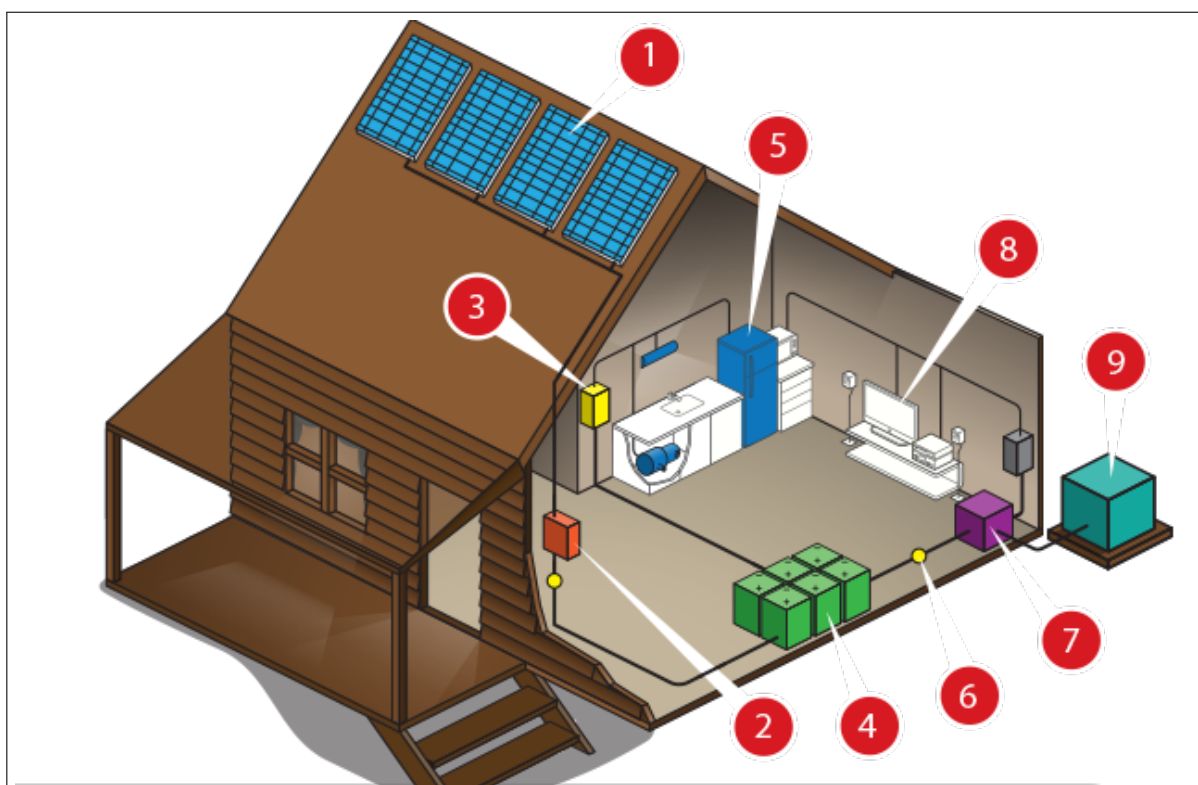


FIG. 5.12 : Exemple de configuration pour cabane

Source : <https://www.batteriesexpert.com/fr/renewable-energy-rv-cottage>

Chapitre 6

Maintenance du système

La maintenance regroupe l'ensemble des actions périodiques opérées sur le système en vue de le maintenir ou le ramener dans un état de fonctionnement bien défini. La maintenance d'un système est très important pour sa durée de vie. En effet, le manque de maintenance peut conduire à des pannes fréquentes et irrémédiables de composants du système et ainsi engendrer des coûts exorbitants. Les opérations de maintenance doivent donc être planifiées de manière à minimiser les coûts. Pour mettre en place les activités de maintenance de votre système, vous aurez besoins des différents manuels d'utilisation et fiches techniques fournis par les constructeurs des différents composants de votre système. Vous serez aussi amené à concevoir des fiches de suivi périodique. En clair, vous devez avoir un dossier de maintenance qui contient les manuels techniques et vos fiches. Vos activités de maintenance de votre système seront de deux types : Les activités de maintenance préventives qui se feront de manière périodique et les activités de maintenance curatives qui se feront selon le besoin.

6.1 Maintenance préventive du système

Il s'agit de faire un entretien périodique du système. Cet entretien à court et long terme. Cet entretien dans votre cas peut se limiter à au nettoyage des panneaux, à veiller à ce que l'ombre sur les panneaux n'évolue pas en défaveur du système, contrôle des câbles et autres constituants du système. Je vous propose de conduire ces opérations d'entretien trimestriellement et annuellement.

- Vous ferez l'entretien trimestriel tous les trois mois, l'objectif étant de s'assurer du bon fonctionnement des composants du système et aussi de prendre les mesures adéquates pour garantir leur bon fonctionnement. Vos actions se résumeront généralement à des contrôles visuels et des mesures.
- Annuellement, vous aurez à faire un entretien plus poussé, en reprenant les activités trimestrielles, mais aussi en faisant des mesures plus rigoureuses permettant d'analyser l'état de fonctionnement des composants du système.

6.1.1 Entretien trimestriel

Champ photovoltaïque : L'activité consiste à une inspection visuelle suivie d'action de remédiation selon le cas :

- Vérifiez l'état de propreté des modules. Si le niveau de propreté est insatisfaisant (couche poussiéreuse trop importante), alors il faut planifier un nettoyage. Le nettoyage des modules ne doit se faire que tôt le matin ou le soir, c'est-à-dire au moment où les panneaux ne sont pas exposés à un fort ensoleillement. Si vos panneaux sont sur le toit, l'opération sera plus difficile. Quoi qu'il en soit, asperger avec de l'eau vos panneaux solaires puis essuyer avec un chiffon doux ou une raclette. Il existe dans le commerce des kits de nettoyage de pas panneaux solaires prêt à l'emploi avec des guides d'utilisation qui accompagnent. Cela peut s'avérer très utile.
- Vérifiez les fixations des modules. Essayer de resserrer les vis et enduisez-les de dégrippant en cas de corrosion.
- Vérifiez le boîtier de connexion. S'il y a de l'eau ou des insectes, il faut assurer l'étanchéité.
- Vérifier l'ombrage sur les panneaux. Si des panneaux sont ombragés, trouver l'obstacle en cause et y remédier.

Les batteries d'accumulateurs : La procédure est la même, vérification et remédiation. Pour les batteries étanches, scellés à électrolyte gélifié ou absorbé, il n'y a pas vraiment de problèmes d'entretien. Les activités de maintenance se résumeront au dépoussiérage et au nettoyage du local dédié. Si vos batteries sont ouvertes, à électrolyte liquide comme les batteries plomb-acide pur et les batteries nickel-cadmium, alors l'entretien devra être plus rigoureux et se résumera aux activités suivantes :

- Vérifier que le local dédié au stockage est propre et aéré. Si ce n'est pas le cas, y remédier.
- Passer en revue toutes les batteries, et vérifier s'il y a des différences de couleurs, des dépôts dans les cellules des éléments de batteries, contrôler les connexions entre batteries et vérifier s'il n'y a pas de fuites d'électrolyte. En cas de fuites d'électrolyte, nettoyer avec un chiffon imbibé d'eau propre sans additif. Si des signes de corrosion sont présents sur les bornes et les connexions, il faut déconnecter les batteries en cause et nettoyer les bornes en utilisant une brosse métallique. Appliquer sur les bornes nettoyées de la graisse anti-corrosion avant de les reconnecter.
- Vérifier le niveau d'électrolyte dans chacune des cellules de batterie. Si le niveau dans une cellule n'est pas correct, corriger en complétant de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. L'eau distillée doit être conservée dans un récipient adéquat (verre, plastique, ébonite), étanche à l'air.
- Vérifier l'état de charge des batteries en mesurant la densité de l'électrolyte avec un densimètre. Si une des batterie se trouve déchargée au-delà de la profondeur maximale de décharge prévue lors des calculs de dimensionnement, alors cette batterie est endommagée et doit être remplacée. L'enregistrement des mesures de densité peut donner une indication sur le moment où les batteries commencent à se détériorer et nécessitent un remplacement. Pour déterminer l'état de charge des batteries, il faut déconnecter le système des batteries, puis à l'aide d'un densimètre mesurer la densité de l'électrolyte dans chaque cellule de batterie ainsi que la température. Les valeurs mesurées doivent être converties en pourcentage de décharge grâce à un tableau de correspondance puis consignés

dans un registre pour le suivi. Pour la technique de mesure avec un densimètre ou un pèse-acide, vous devez vous référer au Manuel du fabricant qui décrit les étapes à suivre.

TEMPERATURE	DENSITE																	
0	1321	1311	1301	1291	1281	1271	1261	1251	1241	1231	1221	1211	1201	1191	1181	1171	1161	1151
5	1318	1308	1298	1288	1278	1268	1258	1248	1238	1228	1218	1208	1198	1188	1178	1168	1158	1148
10	1314	1304	1294	1284	1274	1264	1254	1244	1234	1224	1214	1204	1194	1184	1174	1164	1154	1144
15	1310	1300	1290	1280	1270	1260	1250	1240	1230	1220	1210	1200	1190	1180	1170	1160	1150	1140
20	1307	1297	1287	1277	1267	1257	1247	1237	1227	1217	1207	1197	1187	1177	1167	1157	1147	1137
25	1304	1294	1284	1274	1264	1254	1244	1234	1224	1214	1204	1194	1184	1174	1164	1154	1144	1134
30	1300	1290	1280	1270	1260	1250	1240	1230	1220	1210	1200	1190	1180	1170	1160	1150	1140	1130
35	1296	1286	1276	1266	1256	1246	1236	1226	1216	1206	1196	1186	1176	1166	1156	1146	1136	1126
40	1293	1283	1273	1263	1253	1243	1233	1223	1213	1203	1193	1183	1173	1163	1153	1143	1133	1123
45	1290	1280	1270	1260	1250	1240	1230	1220	1210	1200	1190	1180	1170	1160	1150	1140	1130	1120
60	1286	1276	1266	1256	1246	1236	1226	1216	1206	1196	1186	1176	1166	1156	1146	1136	1126	1116
% DE DECHARGE	0	5	11	16	21	27	32	37	43	48	53	59	64	69	75	80	85	90
F.E.M. APRES 15 MINUTES DE REPOS	2,15	2,14	2,13	2,12	2,11	2,10	2,09	2,08	2,07	2,06	2,05	2,04	2,03	2,02	2,01	2,00	1,99	1,98

TAB. 6.1 : Profondeur de décharge en fonction de la densité à différentes températures

Source : <https://fr.wikibooks.org>

Entretien du régulateur de charge : Le régulateur de charge est l'un des composants des systèmes photovoltaïques qui nécessite très peu d'entretien. Trimestriellement vous pouvez néanmoins effectuer les opérations qui suivent :

- Vérifier la propreté du régulateur de charge. Si c'est le cas, souffler et nettoyer avec un chiffon sec.
- Vérifier que l'aération est suffisant et y remédier le cas échéant.
- Vérifier que les connexions aux bornes du régulateur sont parfaite. Ajuster si nécessaire.
- Vérifier que les indicateurs lumineux du régulateur fonctionnent correctement.

Entretien de l'onduleur : Tout comme le régulateur de charge, il n'y a pas grand-chose à faire en termes d'entretien du côté de l'onduleur. Toutefois, il faut vérifier périodiquement l'état de propreté et d'aération. S'il y a de la poussière ou des insectes qui obstruent les trous d'aération, il faut procéder à un soufflement suivi d'un nettoyage avec un chiffon doux.

Contrôle des câbles : Les câbles des liaisons panneaux-régulateur, batteries-régulateur, batteries-onduleur, onduleur-récepteurs et batteries-récepteurs peuvent pour une raison ou une autre être endommagé et provoquer un dysfonctionnement du système. Il y a lieu de procéder à leur inspection périodique pour s'assurer qu'ils sont en bon état et procéder à leur remplacement le cas échéant. La vérification se résumera à :

- Vérifier les raccordements aux batteries, régulateur de charge et panneaux.
- Suivre chaque câble d'un bout à l'autre en recherchant des signes de détérioration (ruptures, isolant dégradée, isolant détruit par des rongeurs et mettant à nu l'âme du câble, etc.)

6.1.2 Entretien annuel

Une fois par an, par exemple chaque dernier trimestre de l'année, procéder à une vérification plus poussée de votre système afin d'évaluer son état général de fonctionnement et prendre les mesures idoines s'il y a lieu. Cette vérification plus poussée concernera essentiellement les panneaux et les batteries.

Champ photovoltaïque : Il s'agira de faire une vérification visuelle grossier suivi de correction et d'ajustement, puis de mesurer les paramètres électriques des champs afin de s'assurer de la bonne santé des panneaux. De cette façon, on pourra détecter les baisses de performances dues au vieillissement et envisager un éventuel remplacement en temps opportun.

- Vérification visuelle : Vérifier la propreté des modules, la présence d'ombre dû à un obstacle à proximité, les fixations des modules, la propreté du boîtier de jonction, les défauts sur les modules.
 - Si les modules sont poussiéreux, alors procéder à leur nettoyage.
 - Si un obstacle tel qu'un arbre crée de l'ombre sur les modules, alors il faudra y remédier en taillant convenablement l'arbre. Si l'obstacle est intouchable alors il faudra envisager le déplacement du champ photovoltaïque.
 - Si les fixations sont desserrées ou présentent des signes de corrosion, alors resserrer les et induisez-les de dégrippant.
 - Si de la saleté ou de l'eau se trouve dans le boîtier de connexion, alors refaire l'étanchéité et resserrer les presses.
 - Si des modules présentent des défauts, alors envisager de les remplacer.
- Contrôle des paramètres de performance électrique : Il s'agira de mesurer les valeurs de la tension en circuit ouvert du champ solaire et le courant de court-circuit à la température d'opération. Pour y arriver, vous pouvez adopter la démarche suivante :
 - Pour la tension en circuit ouvert, la mesure se fera aux environ de midi, un jour ensoleillé. La tension en circuit ouvert étant la différence de potentielle aux bornes du champ photovoltaïque lorsque aucun courant n'est débité, il est nécessaire de déconnecter le champ de toute charge avant de procéder à la mesure. Les charges peuvent être reconnectées une fois la mesure terminée. Pour la mesure, on utilisera un voltmètre en DC ou un multimètre dont le sélecteur est positionné sur DC. La mesure s'obtiendra en mettant en contact les pointes des fiches de l'appareil de mesure avec les bornes de sortie du champ photovoltaïque en respectant les polarités et en veillant à ne pas mettre les bornes en court-circuit. Il faut ensuite mesurer la température des panneaux. Les valeurs acquises pourront être consignées dans le dossier de maintenance par le biais d'un tableau dédié. Elles peuvent également être comparée aux valeurs de la fiche techniques des plaques solaires.
 - Pour le courant de court-circuit, courant qui s'établit lorsqu'on relie directement les deux bornes du générateur, on fera également la mesure vers midi, un jour parfaitement ensoleillé. Pour ce fait, il faudra d'abord déconnecter le régulateur de charge des modules. La valeur de la mesure s'obtiendra grâce à un ampèremètre ou un multimètre règle sur mesure

d'intensité. Il est important que le calibre de l'appareil de mesure soit supérieure à l'intensité à laquelle on s'attend. Si ces conditions sont remplies, l'appareil de mesure peut être connecté aux bornes de sortie des panneaux pendant un court instant pour acquérir la valeur de la mesure qui sera également consigné dans le dossier de maintenance.

Les batteries Les vérifications et actions suivantes déjà proposées pour l'entretien trimestriel pourront également être réalisés annuellement : Pour les batteries étanches, scellés à électrolyte gélifié ou absorbé, il n'y a pas vraiment de problèmes d'entretien. Les activités de maintenance se résumeront au dépoussiérage et au nettoyage du local dédié. Si vos batteries sont ouvertes, à électrolyte liquide comme les batteries plomb-acide pur et les batteries nickel-cadmium, alors l'entretien devra être plus rigoureux et se résumera aux activités suivantes :

- Vérifier que le local dédié au stockage est propre et aéré. Si ce n'est pas le cas, y remédier.
- Passer en revue toutes les batteries, et vérifier s'il y a des différences de couleurs, des dépôts dans les cellules des éléments de batteries, contrôler les connexions entre batteries et vérifier s'il n'y a pas de fuites d'électrolyte. En cas de fuites d'électrolyte, nettoyer avec un chiffon imbibé d'eau propre sans additif. Si des signes de corrosion sont présents sur les bornes et les connexions, il faut déconnecter les batteries en cause et nettoyer les bornes en utilisant une brosse métallique. Appliquer sur les bornes nettoyées de la graisse anti-corrosion avant de les reconnecter.
- Vérifier le niveau d'électrolyte dans chacune des cellules de batterie. Si le niveau dans une cellule n'est pas correct, corriger en complétant de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. L'eau distillée doit être conservé dans un récipient adéquat (verre, plastique, ébonite), étanche à l'air.
- Vérifier l'état de charge des batteries en mesurant la densité de l'électrolyte avec un densimètre. Si une des batterie se trouve décharge au-delà de la profondeur maximale de décharge prévue lors des calculs de dimensionnement, alors cette batterie est endommagée et doit être remplacé. L'enregistrement des mesures de densité peut donner une indication sur le moment où les batteries commencent à se détériorer et nécessitent un remplacement. Pour déterminer l'état de charge des batteries, il faut déconnecter le système des batteries, puis à l'aide d'un densimètre mesurer la densité de l'électrolyte dans chaque cellule de batterie ainsi que la température. Les valeurs mesurées doivent être converti en pourcentage de décharge grâce à un tableau de correspondance présenté plus haut, puis consignés dans un registre pour le suivi. Pour la technique de mesure avec un densimètre ou un pèse-acide, vous devez vous référer au Manuel du fabricant qui décrit les étapes à suivre.

En plus de ces opérations déjà effectuées trimestriellement, des mesures de la tension à vide des cellules peuvent se faire annuellement.

6.2 Maintenance corrective

La maintenance corrective a pour but de remettre une installation dans état fonctionnelle après une panne. Elle se fait généralement en deux selon la disponibilité des pièces de rechanges : La maintenance corrective palliative qui consiste en un dépannage provisoire permettant de remettre temporairement le système en marche et la maintenance corrective curative qui consiste concrètement en la réparation complète du système.

L'identification d'une panne survenue dans votre système sera plus aisé si vous disposez du schéma global de votre installation et que vous pouvez identifier facilement chacun des composants sur votre schéma. De plus, il vous sera utile de disposer de fiches d'intervention dans lesquelles vous allez consigner les différentes interventions que vous effectuerez sur votre système.

Dans ce qui suit, nous allons essayer de vous donner quelques indications sur la démarche à adopter pour identifier les pannes les plus courantes qui surviennent dans les systèmes PV et les réparer.

6.2.1 Les signes de dysfonctionnement les plus fréquents, identification de la panne associée et réparation

Les signes de dysfonctionnement courants peuvent être regroupés en huit situations :

Signe 1 : Aucun appareil ne fonctionne, l'onduleur ne délivre aucun courant.

Signe 2 : Les appareils fonctionnent le soir pendant quelques heures, puis l'onduleur s'arrête.

Signe 3 : L'onduleur ne délivre pas de courant mais les indicateurs lumineux s'allument.

Signe 4 : La tension de sortie indiquée par l'onduleur est en dessous de la plage normale.

Signe 5 : L'onduleur n'arrive pas s'allumer ou bien s'arrête quelques minutes après le démarrage.

Signe 6 : La tension de sortie indiquée par l'onduleur est au-dessus de la plage normale.

Signe 7 : Les lampes ne s'allument pas.

Signe 8 : Les s'éteignent quelques heures après leur allumage.

Le tableau 6.2 résume les causes probables des dysfonctionnements ci-dessus ainsi que les conseils pour leur prise en charge.

TAB. 6.2 : Causes de dysfonctionnement et mesures à prendre

Causes probables	Confirmations	Réparations
Signe 1 : Aucun appareil ne fonctionne, l'onduleur ne délivre aucun courant.		
l'alimentation est coupée	Certains onduleurs intègrent d'un disjoncteur à l'entrée; Si le disjoncteur est ouvert alors l'onduleur n'est pas alimenté.	Assurez-vous que le disjoncteur est ouvert. Si c'est le cas, le mettre en position fermée et suivez le comportement de l'onduleur.
La tension aux bornes de l'onduleur faible	Certains onduleurs intègrent une fonction de protection des batteries contre les décharges profondes. L'onduleur déconnecte les récepteurs quand la tension du parc de batteries de 12 V est inférieure à une valeur seuil (tension de déconnexion de la charge Vmin, 11,4 V par exemple) et les reconnecte à partir d'une autre valeur seuil (tension de reconnexion de la charge Vmax, par exemple 12,6 V). Vérifier si vérifier si le voyant de décharge profonde est allumé : Si c'est le cas, alors le parc de batterie est déchargé et c'est la raison de l'arrêt de l'onduleur. Si ce n'est pas le cas, vérifier alors la tension du parc de batteries 12 V. Si la tension du parc est au-delà de 11,4 V, alors la tension de seuil bas de l'onduleur es probablement est peut être déréglé.	Dans le cas ou la tension mesurée est inférieure à la tension de seuil bas, alors la coupure est normale. Il faut alors laisser recharger les batteries et suivre leur comportement. Si la tension mesurée est supérieure à la tension de seuil bas, alors vérifier le seuil de déconnexion de l'onduleur. Si vous disposez d'un onduleur de secours essayez-le. Si le défaut est confirmé alors procédez au remplacement l'onduleur défaillant.

TAB. 6.2 : Causes de dysfonctionnement et mesures à prendre (Suite)

Causes probables	Confirmations	Réparations
La liaison batterie-onduleur est rompu	Il est possible que les connexions des batteries soient endommagées du fait de la corrosion. L'onduleur n'est donc plus correctement alimenté, affiche alors une tension basse et ne peut donc pas délivrer un courant.	Vérifiez toutes les connexions des batteries et aussi le circuit de liaison entre les batteries et l'onduleur. Si une rupture est identifiée, alors procédez à la réparation de cette rupture et suivez le fonctionnement de l'onduleur.
Batterie déchargée ou défectueuse	Débrancher les batteries des modules et de l'onduleur et mesurer la tension à vide du parc. Si elle est inférieure 11,1 V, alors les batteries sont déchargées profondément.	Effectuer une charge d'égalisation. Pour cela les récepteurs doivent être débranchés pendant une période qui permet de charger pleinement les batteries. Après la charge d'égalisation, testez la vitesse de décharge des batteries. Pour cela faite débiter chaque batterie en utilisant des charges croissantes tout en contrôlant la tension. Si la tension diminue trop vite la batterie concernée est endommagée.
Le champ solaire ne produit pas	Si d'aventure le champ solaire ne produit pas convenablement, les batteries ne se chargeront pas. Vérifiez l'état de propreté des modules. S'ils sont propres, alors vérifier les connexions des modules, puis la tension en circuit ouvert V_{co} et le courant de court-circuit I_{cc} . Si la valeur de V_{co} et I_{cc} sont faibles, alors vérifiez les diodes by-pass de chaque module.	Si c'est confirmé que les modules sont sales, alors procédez à leur nettoyage et suivez la charge des batteries. Si des connexions sont défectueuses, alors il faut les rétablir. Si V_{co} et I_{cc} sont faibles (d'environ la moitié de la tension totale du champ) et que des diodes by-pass sont défectueuses, alors il faut les remplacer ou les court-circuiter en attendant leur remplacement dans les plus brefs délais.
Signe 2 : Les appareils fonctionnent le soir pendant quelques heures, puis l'onduleur s'arrête.		

TAB. 6.2 : Causes de dysfonctionnement et mesures à prendre (Suite)

Causes probables	Confirmations	Réparations
Le nombre d'appareils dépasse ce qui était prévu lors du dimensionnement	Les appareils prévus pour être alimentés par votre système sont déterminés par le dimensionnement. Si des appareils supplémentaires sont branchés sur le système, la durée d'autonomie sera affectée.	Vérifier si des appareils supplémentaires n'ont pas été branchés. Si c'est le cas, il faut les débrancher et suivre le comportement du système.
Les batteries sont profondément déchargées	Débrancher les batteries des modules et de l'onduleur et mesurer la tension à vide du parc. Si elle est inférieure 11,1 V, alors les batteries sont déchargées profondément.	Effectuer une charge d'égalisation. Pour cela les récepteurs doivent être débranchés pendant une période qui permet de charger pleinement les batteries. Après la charge d'égalisation, testez la vitesse de décharge des batteries. Pour cela faite débiter chaque batterie en utilisant des charges croissantes tout en contrôlant la tension. Si la tension diminue trop vite la batterie concernée est endommagée.
Des batteries sont endommagées	Débrancher les batteries des modules et de l'onduleur et mesurer la tension à vide du parc. Si elle est inférieure 11,1 V, alors les batteries sont déchargées profondément.	Effectuer une charge d'égalisation. Pour cela les récepteurs doivent être débranchés pendant une période qui permet de charger pleinement les batteries. Après la charge d'égalisation, testez la vitesse de décharge des batteries. Pour cela faite débiter chaque batterie en utilisant des charges croissantes tout en contrôlant la tension. Si la tension diminue trop vite la batterie concernée est endommagée.

TAB. 6.2 : Causes de dysfonctionnement et mesures à prendre (Suite)

Causes probables	Confirmations	Réparations
Les Modules ne produisent pas convenablement	Si d'aventure le champ solaire ne produit pas convenablement, les batteries ne se chargeront pas. Vérifiez l'état de propreté des modules. S'ils sont propres, alors vérifier les connexions des modules, puis la tension en circuit ouvert V_{co} et le courant de court-circuit I_{cc} . Si la valeur de V_{co} et I_{cc} sont faibles, alors vérifiez les diodes by-pass de chaque module.	Si c'est confirmé que les modules sont sales, alors procédez à leur nettoyage et suivez la charge des batteries. Si des connexions sont défectueuses, alors il faut les rétablir. Si V_{co} et I_{cc} sont faibles (d'environ la moitié de la tension totale du champ) et que des diodes by-pass sont défectueuses, alors il faut les remplacer ou les court-circuiter en attendant leur remplacement dans les plus brefs délais.
Signe 3 : L'onduleur ne délivre pas de courant mais les indicateurs lumineux s'allument.		
Les appareil connectée à la sortie ont une consommation trop faible pour être détectée (7)	Certains onduleurs intègrent une technologie de mise en veille automatique. Ces onduleurs passent en mode veille lorsqu'il n'y a pas d'appareil alimenté. A la détection d'une charge en sortie ces onduleurs redémarrent automatiquement. Si la sensibilité programmée pour le redémarrage automatique est déréglé, alors cette fonction sera affectée. Vous pouvez vérifier cela en augmentant les appareils connectés et en suivant le comportement de l'onduleur.	Si l'onduleur est automatiquement remis en service après l'augmentation des charges, alors réduisez progressivement ceux-ci pour déterminer la charge optimale assurant la mise en route automatique de l'onduleur. Au besoin, modifiez le seuil de sensibilité de l'onduleur pour détecter la charge.
L'alimentation de certaines charges interrompue ou défaillante		
Signe 4 : La tension de sortie indiquée par l'onduleur est en dessous de la plage normale.		

TAB. 6.2 : Causes de dysfonctionnement et mesures à prendre (Suite)

Causes probables	Confirmations	Réparations
Le Câble d'alimentation de l'onduleur trop long	Nous avons vu que la section du câble d'alimentation de l'onduleur doit être calculée pour une longueur fixée pour minimiser les pertes de lignes qui peuvent provoquer des chutes de tension importantes. Vérifier que la section et la distance garantissent des pertes minimales grâce aux formules que nous avons présentées à la partie section des conducteurs.	Si la chute de tension dépasse 3 %, alors il faut réduire la longueur du câble d'alimentation de l'onduleur. Si le rapprochement ne peut être envisagé, alors il faut augmenter la section du câble. La chute de tension peut aussi être provoquée par une charge trop élevée en sortie de l'onduleur qui perturbe le démarrage de celui-ci. Vérifiez que ce n'est pas le cas et y remédier.
Les batteries ne sont pas suffisamment chargées ou sont endommagées	Débrancher les batteries des modules et de l'onduleur et mesurer la tension à vide du parc. Si elle est inférieure 11,1 V, alors les batteries sont déchargées profondément.	Effectuer une charge d'égalisation. Pour cela les récepteurs doivent être débranchés pendant une période qui permet de charger pleinement les batteries. Après la charge d'égalisation, testez la vitesse de décharge des batteries. Pour cela faite débiter chaque batterie en utilisant des charges croissantes tout en contrôlant la tension. Si la tension diminue trop vite la batterie concernée est endommagée.
Signe 5 : L'onduleur n'arrive pas s'allumer ou bien s'arrête quelque minutes après le démarrage.		
Le nombre d'appareils connectés est trop élevé	Les appareils prévus pour être alimentés par votre système sont déterminés par le dimensionnement. Si des appareils supplémentaires sont branchés sur le système, la durée d'autonomie sera affectée.	Vérifier si des appareils supplémentaires n'ont pas été branchés. Si c'est le cas, il faut les débrancher et suivre le comportement du système.

TAB. 6.2 : Causes de dysfonctionnement et mesures à prendre (Suite)

Causes probables	Confirmations	Réparations
Il y a une chute de tension trop importante au niveau de l'alimentation de l'onduleur	Nous avons vu que la section du câble d'alimentation de l'onduleur doit être calculée pour une longueur fixée pour minimiser les pertes de lignes qui peuvent provoquer des chutes de tension importantes. Vérifier que la section et la distance garantissent des pertes minimales grâce aux formules que nous avons présentées à la partie section des conducteurs.	Si la chute de tension dépasse 3 %, alors il faut réduire la longueur du câble d'alimentation de l'onduleur. Si le rapprochement ne peut être envisagé, alors il faut augmenter la section du câble. La chute de tension peut aussi être provoquée par une charge trop élevée en sortie de l'onduleur qui perturbe le démarrage de celui-ci. Vérifiez que ce n'est pas le cas et y remédier.
Les batteries ne sont pas suffisamment chargées ou sont endommagées.	Débrancher les batteries des modules et de l'onduleur et mesurer la tension à vide du parc. Si elle est inférieure 11,1 V, alors les batteries sont déchargées profondément.	Effectuer une charge d'égalisation. Pour cela les récepteurs doivent être débranchés pendant une période qui permet de charger pleinement les batteries. Après la charge d'égalisation, testez la vitesse de décharge des batteries. Pour cela faite débiter chaque batterie en utilisant des charges croissantes tout en contrôlant la tension. Si la tension diminue trop vite la batterie concernée est endommagée.
Signe 6 : La tension de sortie indiquée par l'onduleur est au-dessus ou en-dessous de la plage normale.		

TAB. 6.2 : Causes de dysfonctionnement et mesures à prendre (Suite)

Causes probables	Confirmations	Réparations
Le seuil de régulation du régulateur est probablement modifié	Nous l'avons vue, le régulateur de charge déconnecte les batteries du champ photovoltaïque si la tension de celle-ci dépasse la valeur seuil maximale programmée. Si la tension d'entrée de l'onduleur est plus grande que la valeur seuil alors il est possible que le régulateur ne fonctionne pas correctement. Vous pouvez vérifier cela en mesurant la tension aux bornes des batteries et aux bornes du régulateur de charge. Si des valeurs supérieures aux valeurs seuils sont mesurées, alors la régulation n'est plus assurée.	Remplacer le régulateur de charge et suivre l'évolution de la tension des batteries.
La liaison batterie-régulateur ou batterie-onduleur est défailante	Il est possible que les connexions des batteries soient endommagées du fait de la corrosion. L'onduleur n'est donc plus correctement alimenté, affiche alors une tension basse et ne peut donc pas délivrer un courant.	Vérifiez toutes les connexions des batteries et aussi le circuit de liaison entre les batteries et l'onduleur. Si une rupture est identifiée, alors procédez à la réparation de cette rupture et suivez le fonctionnement de l'onduleur.

TAB. 6.2 : Causes de dysfonctionnement et mesures à prendre (Suite)

Causes probables	Confirmations	Réparations
Le régulateur est défaillant	Nous l'avons vue, le régulateur de charge déconnecte les batteries du champ photovoltaïque si la tension de celle-ci dépasse la valeur seuil maximale programmée. Si la tension d'entrée de l'onduleur est plus grande que la valeur seuil alors il est possible que le régulateur ne fonctionne pas correctement. Vous pouvez vérifier cela en mesurant la tension aux bornes des batteries et aux bornes du régulateur de charge. Si des valeurs supérieures aux valeurs seuils sont mesurées, alors la régulation n'est plus assurée.	Remplacer le régulateur de charge et suivre l'évolution de la tension des batteries.
Signe 7 : Les lampes ne s'allument pas.		

TAB. 6.2 : Causes de dysfonctionnement et mesures à prendre (Suite)

Causes probables	Confirmations	Réparations
L'heure qu'il fait correspond à l'heure d'extinction programmée.	Certains régulateurs ont une sortie contrôlée qui aliment généralement les lampes. Ces régulateurs contrôlent la durée d'éclairage depuis la tombée de la nuit jusqu'au jour grâce à une horloge interne. Lorsque la durée programmée est atteinte, l'alimentation des lampes est coupée jusqu'à la tombée de la nuit encore. La définition de la durée d'éclairage peut être fait à travers le menu du régulateur et la manipulation à faire pour cela dépend de la marque. Vérifiez que la durée programmée est correcte. Si c'est le cas, alors, le problème n'est pas lié à la programmation du régulateur.	Si la durée programmée n'est pas correcte, alors il faut procéder à la reprogrammation du régulateur et suivre le comportement des lampes.

TAB. 6.2 : Causes de dysfonctionnement et mesures à prendre (Suite)

Causes probables	Confirmations	Réparations
La protection contre la décharge profonde des batteries est enclenchée.	Certain régulateur ont une fonction de protection contre les décharges profondes des batteries. Aussi les installations qui utilisent des régulateurs sans cette fonction utilisent une protection contre la décharge à part entière. Cette fonction désactive les sorties vers l'utilisation en cas de décharge profonde des batteries. Mesurer la tension du parc de batteries, et comparer à la tension de déconnexion de la fonction de protection (généralement 11,5V). Si elle est inférieure à 11,5 V alors le parc de batteries est déchargée.	Si le parc de batteries est déchargé et que les sorties vers l'utilisation sont désactivées, alors il faut laisser recharger les batteries pendant une durée de un à plusieurs jours selon la taille du parc et suivre le comportement des lampes.
La batterie ne se charge pas comme il se doit	Si les batteries sont fréquemment déchargées, alors elles ne sont probablement jamais chargées convenablement. Le champ photovoltaïque est probablement sale ou déconnecté du dispositif de régulation. Vérifiez que le voyant indicateur de charge sur le régulateur est allumé. Si c'est le cas, alors le champ charge les batteries. Vérifiez que les panneaux sont propres. Vérifiez les connexions entre le champ photovoltaïque et le parc de batteries, un problème quelconque peut déconnecter le champ des batteries.	Si voyant indicateur de charge du régulateur n'est pas allumée, vérifier la connexion entre le champ photovoltaïque et le parc de batteries. Si le voyant est allumé, alors vérifiez que les modules sont. Nettoyez-les si ce n'est pas le cas et vérifiez par des mesures que le courant de charge en fonction de l'ensoleillement est convenable.

TAB. 6.2 : Causes de dysfonctionnement et mesures à prendre (Suite)

Causes probables	Confirmations	Réparations
L'interrupteur crépusculaire est endommagé	Certains régulateurs sont reliés à un capteur de luminosité permettant d'allumer automatiquement les lampes à la tombée de la nuit et de les éteindre dès que la lumière du jour se fait sentir. Certaines installations intègrent explicitement des interrupteurs crépusculaires dans le circuit d'alimentation des lampes pour assurer la même fonction que ci-dessus. Si le capteur est défaillant, les lampes ne s'allumeront pas. Vérifier le bon fonctionnement du capteur en le recouvrant pour simuler l'obscurité. Si les lampes s'allument alors le problème ne vient pas du capteur. Si ce n'est pas le cas, alors le capteur est endommagé.	Si l'interrupteur crépusculaire est défaillant, le remplacer.
La lampes sont est grillées	Tester le bon fonctionnement des lampes en utilisant une lampe de remplacement	Si des lampes sont défaillantes, alors procédez à leur remplacement.

TAB. 6.2 : Causes de dysfonctionnement et mesures à prendre (Suite)

Causes probables	Confirmations	Réparations
Le Régulateur est défaillant	Nous l'avons vue, le régulateur de charge déconnecte les batteries du champ photovoltaïque si la tension de celle-ci dépasse la valeur seuil maximale programmée. Si la tension d'entrée de l'onduleur est plus grande que la valeur seuil alors il est possible que le régulateur ne fonctionne pas correctement. Vous pouvez vérifier cela en mesurant la tension aux bornes des batteries et aux bornes du régulateur de charge. Si des valeurs supérieures aux valeurs seuils sont mesurées, alors la régulation n'est plus assurée.	Remplacer le régulateur de charge et suivre l'évolution de la tension des batteries.
Signe 8 : Les lampes s'éteignent quelques heures après leur allumage.		

TAB. 6.2 : Causes de dysfonctionnement et mesures à prendre (Suite)

Causes probables	Confirmations	Réparations
La protection contre la décharge profonde des batteries est enclenchée	Certains régulateurs ont une sortie contrôlée qui aliment généralement les lampes. Ces régulateurs contrôlent la durée d'éclairage depuis la tombée de la nuit jusqu'au jour grâce à une horloge interne. Lorsque la durée programmée est atteinte, l'alimentation des lampes est coupée jusqu'à la tombée de la nuit encore. La définition de la durée d'éclairage peut être faite à travers le menu du régulateur et la manipulation à faire pour cela dépend de la marque. Vérifiez que la durée programmée est correcte. Si c'est le cas, alors, le problème n'est pas lié à la programmation du régulateur.	Si la durée programmée n'est pas correcte, alors il faut procéder à la reprogrammation du régulateur et suivre le comportement des lampes.

TAB. 6.2 : Causes de dysfonctionnement et mesures à prendre (Suite)

Causes probables	Confirmations	Réparations
La batterie ne se charge pas comme il se doit	Certain régulateur ont une fonction de protection contre les décharges profondes des batteries. Aussi les installations qui utilisent des régulateurs sans cette fonction utilisent une protection contre la décharge à part entière. Cette fonction désactive les sorties vers l'utilisation en cas de décharge profonde des batteries. Mesurer la tension du parc de batteries, et comparer à la tension de déconnexion de la fonction de protection (généralement 11,5V). Si elle est inférieure à 11,5 V alors le parc de batteries est déchargée.	Si le parc de batteries est déchargé et que les sorties vers l'utilisation sont désactivées, alors il faut laisser recharger les batteries pendant une durée de un à plusieurs jours selon la taille du parc et suivre le comportement des lampes.
Le régulateur à coupé l'alimentation des lampes	Si les batteries sont fréquemment déchargées, alors elles ne sont probablement jamais chargées convenablement. Le champ photovoltaïque est probablement sale ou déconnecté du dispositif de régulation. Vérifiez que le voyant indicateur de charge sur le régulateur est allumé. Si c'est le cas, alors le champ charge les batteries. Vérifiez que les panneaux sont propres. Vérifiez les connexions entre le champ photovoltaïque et le parc de batteries, un problème quelconque peut déconnecter le champ des batteries.	Si voyant indicateur de charge du régulateur n'est pas allumée, vérifier la connexion entre le champ photovoltaïque et le parc de batteries. Si le voyant est allumé, alors vérifiez que les modules sont. Nettoyez-les si ce n'est pas le cas et vérifiez par des mesures que le courant de charge en fonction de l'ensoleillement est convenable.

6.2.2 Conseils pour le remplacement des composants principaux

Module solaire : Avant toute chose, assurez-vous que le nouveau module convient bien à votre champ photovoltaïque, c'est à dire qu'il est quasiment identique aux autres en termes de puissance et des caractéristiques de fonctionnement en tension et en courant. Si vous insérer un module différent des autres, cela peut influencer le point de fonctionnement de tout le générateur. C'est un peu comme ce qui se passe lorsqu'un module est ombragé pendant que les autres sont bien éclairés, l'ensemble du générateur se trouve affecté en terme de performance avec des risques de détériorations. Si vous voulez remplacer un module, faites-le de préférence tôt le matin ou tard le soir. Pour cela, il faut masquer la surface des panneaux avec un matériau opaque. Déconnecter ensuite les câbles de liaison du champ au régulateur de charge en utilisant des outils isolants. Après avoir identifié et marqué les câbles positif négatif du module défaillant, débranchez-le de la boîte de jonction. Vous pouvez alors le retirer après avoir desserré les vis de fixations à la structure. Mettez alors le nouveau module, refixez à la structure, faites les connexions qui conviennent et remettez le système en marche.

Câbles : Les éléments de votre système sont reliés des câbles qui peuvent pour une raison ou une autre se détériorer. Tout câble dégradé doit être remplacé par un câble de mêmes caractéristiques. Pour cela, déconnecter le régulateur de charge et les panneaux. Remplacez ensuite le câble dégradé puis refaites les connexions.

Batteries : Le remplacement d'une batterie suit la même procédure que le remplacement d'un module. Veuillez à vous procurer une batterie de mêmes caractéristiques que les autres. Déconnecter le champ solaire du régulateur, puis le parc solaire. Déconnecter ensuite la batterie incriminée, la remplacer puis procéder au recablage.

Régulateur de charge : Déconnecter d'abord le champ solaire du régulateur. Déconnecter ensuite le parc de batterie. Remplacer le régulateur endommagé puis refaites les connexions en sens inverse.

Bibliographie

- [1] *Batterie pour Panneau Solaire / Guide Complet à Lire en 2021*. fr-FR. Juill. 2021. URL : <https://www.insunwetrust.solar/blog/le-solaire-et-vous/batteries-panneaux-solaires/> (visité le 25/10/2021).
- [2] Jimmy ROYER, Eric J SCHILLER et INSTITUT DE L'ÉNERGIE DES PAYS AYANT EN COMMUN L'USAGE DU FRANÇAIS. *Le pompage photovoltaïque : manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens*. French. OCLC : 38748615. Québec : Institut de l'énergie des pays ayant en commun l'usage du français, 1998. ISBN : 9782894810064.
- [3] *JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission*. URL : https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/fr/tools.html (visité le 25/10/2021).
- [4] *intro - Meteonorm (de)*. URL : <https://meteonorm.com/en/> (visité le 25/10/2021).
- [5] *Le Gardien du Temps / Meteostat*. URL : <https://meteostat.net/fr/> (visité le 25/10/2021).
- [6] Ricaud ALAIN. *Systèmes photovoltaïques*. French. Oct. 2011. URL : https://www.cythelia.fr/images/file/Syst%C3%A8mes%20PV_Polytech_Alain%20Ricaud_Oct-11.pdf.
- [7] *SIGMA TEC Photovoltaïque - Les câbles et les chûtes de tension -*. URL : http://sigma-tec.fr/textes/texte_cables.html (visité le 25/10/2021).
- [8] *MyShop-Solaire, expert en kit solaire panneau solaire photovoltaïque - Leader en France*. fr. URL : <https://www.myshop-solaire.com> (visité le 29/10/2021).
- [9] Dahouenon MANSOUR ASSANI. *Le manuel du technicien photovoltaïque*. Français. 2011. URL : https://www.pseau.org/outils/ouvrages/giz_ministere_en_charge_de_l_energie_manuel_du_technicien_photovoltaïque_2011.pdf.
- [10] INES. *Institut National de l'Énergie Solaire*. fr. URL : <https://www.ines-solaire.org/> (visité le 06/11/2021).
- [11] Michel BRANCHU et Christophe BRANCHU. *Electricité mode d'emploi*. Mai 2011. ISBN : 9782501072601.
- [12] *Schema électrique camping car en 2021 - Jm Concept*. fr-FR. URL : <https://jmconcept.fr/convertisseur-12v-220v/camping-car/schema-electrique/> (visité le 12/11/2021).
- [13] *Schéma Électrique fourgon et camping-car : 8 exemples*. fr-FR. Mai 2020. URL : <https://mon-fourgon-amenage.fr/electricite/schema-electrique> (visité le 12/11/2021).

- [14] *Énergie alternative Batteries Expert*. fr. URL : <https://www.batteriesexpert.com/fr/renewable-energy-rv-cottage> (visité le 15/11/2021).
- [15] *Naviclub - Vente, installation et réparation d'équipement nautique, récréatif, énergétique...* URL : <http://www.naviclub.com/> (visité le 15/11/2021).