

systèmes solaires autonomes

Production d'électricité indépendante du réseau

Thomas Scherer (Allemagne)

Qu'est-ce qu'un système solaire autonome ? Où un tel système est-il nécessaire ou pratique ? Quels sont les points principaux à considérer ? Cet article répondra à ces questions et à bien d'autres.

Dans le n° de sept./oct. 2021 d'*Elektor*, nous avons fait le tour d'une installation photovoltaïque raccordée au réseau [1]. Ici, nous aborderons principalement les installations solaires autonomes et isolées du réseau public. Elles permettent de produire de l'électricité là où le raccordement au réseau serait trop coûteux, par ex. dans un abri de jardin en habitat collectif, ou impossible, comme sur un bateau à moteur ou à voile. Ce sont en

général des systèmes de faible puissance de crête, de quelques watts à quelques kilowatts. En outre, les tarifs de rachat continuant de baisser, les installations solaires domestiques fixes plus simples uniquement à usage privé, stockant l'énergie produite dans des batteries au lieu de l'injecter dans le réseau public, commencent à prendre tout leur sens. Ces installations ont généralement une puissance maximale de quelques kWc (c pour crête). Voyons maintenant ces systèmes à petite échelle de plus près.

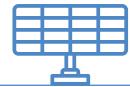
Principe de fonctionnement

Une installation solaire autonome comporte au moins trois éléments : le panneau solaire, le stockage d'énergie sous forme de batterie et le régulateur de charge qui veille à ce que la batterie ne soit pas surchargée. Pour les petits systèmes, fonctionnant en 12 ou 24 V, en théorie cela suffit. Toutefois, s'il faut une sortie de 230 V_{CA} 50 ou 60 Hz, un 4^e élément entre en jeu : l'onduleur. La **figure 1** montre une solution type à quatre éléments. De prime abord, elle semble très simple, mais attention

aux détails. Dans les paragraphes ci-dessous, nous nous intéresserons à ces éléments. Voici un exemple concret : *Klaus*, un de mes bons amis, décide d'installer un système 12 V dans son abri de jardin en raison du faible prix et de la taille raisonnable des composants. Pour concevoir le système et spécifier les éléments, il faut d'abord répondre à deux questions.

Énergie et puissance

La 1^{ère} question concerne la quantité d'énergie totale que le système doit stocker. Elle conditionne la capacité minimale de la batterie. Il faut donc estimer la charge moyenne de l'installation. Le nombre de jours de temps couvert que le système doit subir sans faiblir influe sur ce calcul. Dans son abri, *Klaus* aimerait de temps en temps utiliser une perceuse électrique et préparer une tasse de thé, mais d'utilisation occasionnelle, ces charges n'influent que peu sur le calcul de la charge moyenne. La nécessité d'avoir des boissons fraîches sous la main est plus importante : il faut donc un réfrigérateur 12 V



fonctionnant en continu, soit une consommation moyenne de 20 W. Il faut que le système puisse fonctionner pendant au moins un jour sans soleil.

La 2^e question concerne la puissance crête requise. À partir de là, nous pouvons déterminer le courant maximal qui sera tiré de la batterie et donc aussi spécifier les paramètres du régulateur de charge (et de l'onduleur, s'il est utilisé). En général, il est facile de répondre à cette question : pour l'abri de jardin de mon ami, la réponse est de 1 kW ; cela permet d'alimenter la bouilloire, une perceuse standard et peut-être une pompe à eau, le tout fonctionnant en 230 V.

Le panneau solaire

Sur 24 heures, le réfrigérateur de l'abri de Klaus consomme au plus 500 Wh. Bien situé dans une région ensoleillée du sud-ouest de l'Allemagne, le toit de l'abri est malheureusement à l'ombre d'un arbre et le panneau ne peut donc pas y être installé. Il faut le disposer verticalement sur le mur sud de l'abri, ce qui réduit sa puissance d'environ 30 % par rapport à un montage à l'angle optimal par rapport au soleil. Il faut surdimensionner le panneau d'environ 40 % pour compenser cette perte. Par chance, l'espace disponible est grand et le prix des panneaux a considérablement baissé ces dernières années. Le montage vertical a aussi des avantages : en hiver, la neige ne s'accumule pas ; de plus, comme le soleil est à un angle plus bas, le rendement augmente : dans le meilleur des cas, la bière restera fraîche même pendant les journées ensoleillées d'hiver.

Nous pouvons maintenant calculer la puissance requise pour le panneau. Dans cette région, nous pouvons compter sur une énergie incidente annuelle moyenne $\geq 1200 \text{ kWh/m}^2$ sur une année. Outre la consommation quotidienne d'énergie prévue, il faut prévoir une marge de sécurité de 100 %. Ainsi, pour 500 Wh/jour (du printemps à l'automne), il faut chercher à produire 1 kWh/jour. Sur la base de 8h d'ensoleillement par jour, nous arrivons à une puissance requise du panneau d'environ 125 Wc. Pour compenser le montage vertical, nous arrivons à 175 Wc. Soit un panneau de 180 W, qui s'adaptera confortablement au mur de l'abri : voir **figure 2**.

La ou les batteries rechargeables

L'énergie nécessaire pour constituer une journée de réserve est de 500 Wh au moins.

En 12 V, cela équivaut à une batterie d'au moins 40 Ah de capacité. Comme notre onduleur est spécifié pour une puissance de sortie de 1 kW, il nous faut bien voir qu'à charge maximale, il exigera un courant d'entrée d'au moins 85 A. C'est une considération importante dans le choix d'une batterie. Nous devons d'abord décider du couple

électrochimique de la batterie. Un pack de batteries au lithium de 40 Ah peut facilement gérer ce courant (environ '2C' ou deux fois le courant que la batterie peut fournir pendant une heure) en raison de sa faible résistance interne. Cependant, un tel pack peut facilement coûter plus de 250 € et nécessite une gestion attentive. Klaus a préféré opter pour

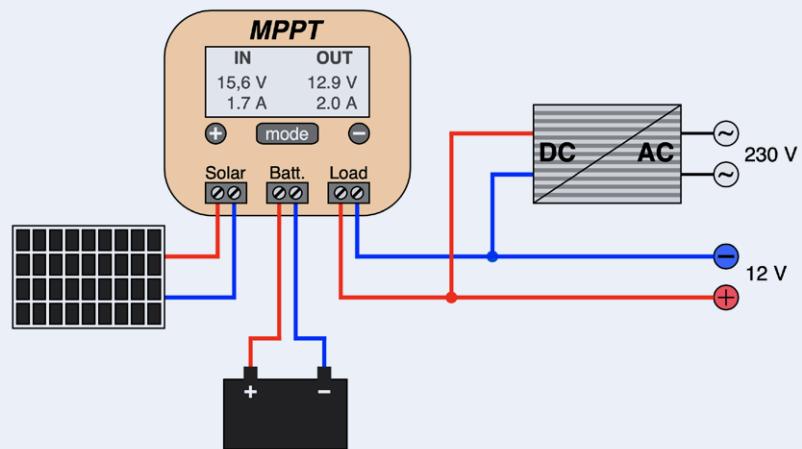


Figure 1. Câblage standard des quatre éléments composant une installation solaire autonome. L'onduleur à droite n'est nécessaire que pour faire fonctionner des appareils alimentés en 230 V_{CA}.



Figure 2. Le panneau solaire 12 V monté verticalement sur le mur de l'abri de Klaus. Il a une puissance de 180 Wc.



Figure 3. Trois batteries AGM 12 V, chacune de 36 Ah, sont câblées en parallèle pour stocker l'énergie dans l'abri de Klaus.

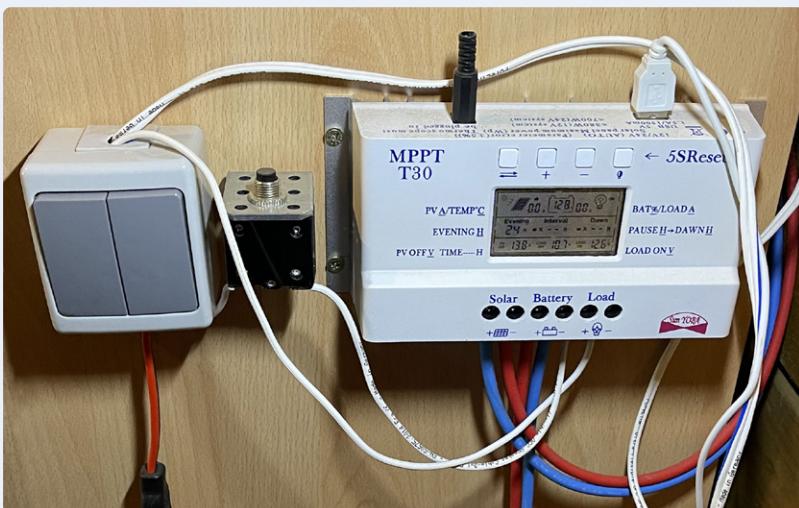


Figure 4. De gauche à droite : interrupteur d'éclairage, disjoncteur électromagnétique 30 A, et régulateur MPPT.



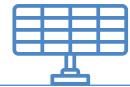
Figure 5. Les régulateurs de charge similaires à celui-ci n'ont certainement pas la fonctionnalité MPPT (même s'ils portent un autocollant MPPT !). (Source : Ministère de l'Énergie des États-Unis)

une classique batterie au plomb coûtant une fraction de ce prix. Il a porté son choix sur une batterie de voiture, car elle supporte des courants de pointe élevés. Cependant, elle présente des inconvénients : rendement et durée de vie faibles ; taux d'autodécharge élevé. Il a donc choisi une batterie au gel, mais avec ce type de batterie le courant de décharge nominal est moindre. Pour compenser, deux batteries de 36 Ah chacune ont donc été connectées en parallèle. Cette combinaison offre une énergie nominale stockée de 864 Wh et coûte un peu moins de 150 €.

En plein soleil, le panneau solaire choisi fournit assez d'énergie pour charger complètement les batteries en une seule journée, et leur capacité permet de couvrir 1,5 jour sans soleil. J'avais quelques doutes quant à la forte consommation de courant à l'entrée de l'onduleur, mais Klaus a décidé de tenter le coup et, si deux batteries ne suffisaient de compléter par une 3^e en parallèle. Une fois le système installé et les batteries complètement chargées, nous nous sommes amusés à faire un 1^{er} essai avec une bouilloire de 1 kW. La tension de la batterie tomba à 11,7 V, mais il fut néanmoins facile de faire bouillir un demi-litre d'eau. À ce courant élevé, une estimation rapide donne un rendement de batterie (énergie restituée/énergie de recharge) de 50 % au plus et ce courant n'est pas favorable à la longévité de la batterie. Une batterie supplémentaire de 36 Ah a donc été ajoutée : voir **figure 3**. Lors d'une décharge à 85 A, la tension initiale est maintenant de 12,6 V, ce qui est plus acceptable ; la capacité totale atteint maintenant près de 1,3 kWh, ce qui garantit plus de deux jours de réserve.

Le contrôleur de charge

Une recherche sur eBay ou chez un distributeur spécialisé permet d'en trouver un large éventail. Les régulateurs 10 A ne coûtent pas plus de 15 €. Cependant, un panneau de 180 Wc fournit 15 A sous 12 V, il faut donc un régulateur d'au moins 20 A : ces régulateurs coûtent environ 20 €. Si le régulateur de charge doit être connecté comme indiqué sur la figure 1, il est préférable de choisir une version 100 A, coûtant peut-être un peu moins de 50 €. Entrons maintenant dans les détails. Le régulateur a pour mission de charger la batterie grâce à l'énergie fournie par le panneau, et de stopper la charge lorsqu'une



tension de seuil est atteinte. Ainsi la batterie connectée ne sera pas surchargée et donc non endommagée. Presque tous les régulateurs commandent la connexion de la charge et, pour empêcher la décharge profonde de la batterie, la déconnectent quand elle atteint son seuil inférieur de tension. Ils utilisent toujours un microcontrôleur et la plupart d'entre eux sont configurables pour s'adapter à différents types de batteries, notamment plomb-acide, plomb-gel et lithium. Ils s'adaptent aussi automatiquement à une tension nominale aux bornes de 12 ou 24 V. Souvent, il est possible de configurer manuellement les seuils de sous-tension et de surtension.

La topologie du chargeur est un point central. Tous les appareils bon marché utilisent une commande MLI (en anglais PWM = Pulse Width Modulation) même si MPPT (Maximum Power Point Tracking) est mentionné : une étiquette ne coûte rien, mais un vrai chargeur MPPT est meilleur, plus complexe et donc plus cher !

En MLI, le courant de charge est réglé de sorte que la tension de sortie du panneau soit juste au-dessus de la tension instantanée aux bornes de la batterie. La batterie est donc chargée au courant maximal possible résultant du flux lumineux total reçu par le panneau, et de l'état de charge de la batterie dans une large gamme de conditions. Le circuit nécessaire n'emploie qu'un microcontrôleur simple et un MOSFET de puissance : une solution peu coûteuse,

mais non optimale.

Or, la puissance de sortie d'un panneau est égale au produit de sa tension par son courant de sortie. Pour un panneau et un niveau d'éclairage donnés, il existe un point où ce produit est maximal ; en ce point de puissance maximale, on a presque toujours : *tension de sortie du panneau > tension de la batterie*. Un contrôleur MPPT détermine en permanence où se trouve ce *point idéal* et pilote le régulateur de tension abaisseur de sorte qu'il consomme le courant optimal et donc délivre la puissance maximale possible. Dans le cas le plus favorable, la puissance de sortie d'un régulateur MPPT dépasse de 30 % celle d'un MLI. Cependant, cela a un coût : même bon marché, un contrôleur MPPT coûte plus de 50 €, et une unité de marque au moins 100 €. Le régulateur de charge 30 A de la **figure 4** est un régulateur MPPT bon marché (environ 60 €) et Klaus a estimé que son gain en puissance de sortie en valait la peine. Si vous voulez un régulateur MPPT, évitez ceux qui ressemblent à celui de la **figure 5** : ce type de régulateur existe en diverses couleurs et avec différents marquages.

L'onduleur

S'il faut produire une sortie de 230 V_{CA}, alors un onduleur est essentiel. Les modèles bon marché avec des spécifications de puissance peu crédibles et des formes d'onde de sortie très éloignées d'une sinusoïde sont à éviter. Un point important à noter est que la puissance



Figure 6. Cet onduleur de 1 kW fabriqué par Ective s'est révélé très stable et fiable au fil du temps.

continue maximale spécifiée est donnée pour une charge ohmique. L'onduleur de 1 kW de Klaus convient parfaitement pour alimenter une bouilloire de 1 kW et 500 ml, mais la situation est tout à fait différente avec une charge inductive ou, cas plus rare, capacitive. Il faut alors aussi vérifier la puissance réactive : notez que la puissance apparente est toujours \geq à la puissance réelle. Parmi les charges les plus difficiles, on trouve les moteurs électriques. Leur courant d'appel élevé peut déclencher

Publicité

PERFORMANCE. RELIABILITY. SERVICE.

Optocouplers by Würth Elektronik



WÜRTH ELEKTRONIK
MORE THAN YOU EXPECT

WE meet @ PCIM Europe
Hall 6, Booth 402

Optocouplers by Würth Elektronik

With the new optocouplers, Würth Elektronik presents one of the latest additions to its optoelectronic product portfolio. The innovative design features a coplanar structure and high-grade silicon for total internal reflection. The coplanar design ensures the isolation gap stay fixed during the production process and provide perfect isolation and protection for your application. The total internal reflection provide stable CTR over the whole temperature range and high CTR even at low current operation.

Provided in all industry standard packages. Available with all binnings ex stock. Samples free of charge: www.we-online.com/optocoupler

- Innovative coplanar design
- High grade silicon encapsulation
- Copper leadframe for high reliability
- Stable CTR over whole temperature range
- High CTR in low current operation

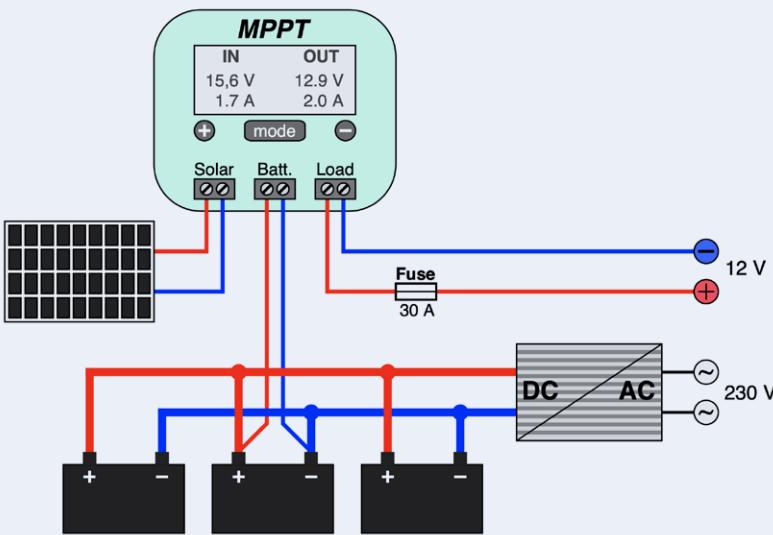


Figure 7. Dans l'installation de Klaus, l'onduleur est connecté directement à la batterie, et la sortie 12 V du régulateur bénéficie d'une protection supplémentaire.

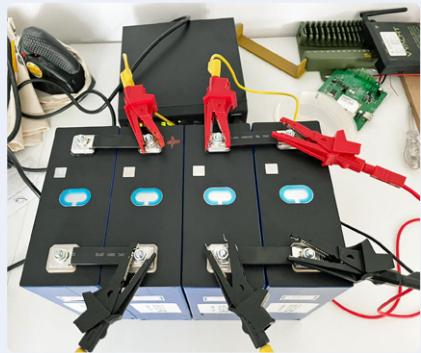


Figure 8. Essai de batteries LiFePO₄ avant l'installation dans le bateau de Martin. (Source : Martin Jepkens)



Figure 9. De puissance nominale 120 Wc, le panneau solaire pliant choisi par Martin et Detlev peut être rangé sous le pont en navigation. (Source : Martin Jepkens)



Figure 10. Guide d'installation du régulateur dans le bateau de Detlev.

le circuit de protection antisurchARGE d'un onduleur mal dimensionné. Une marge de sécurité de 100 % pour utiliser un moteur n'est pas excessive, même pour un onduleur de haute qualité. L'onduleur de 1 kW de Klaus, illustré à la figure 6, gère confortablement une perceuse électrique et une pompe à eau de 450 W. Il coûte plus de 200 €.

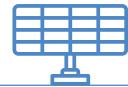
Câblage

Comme vous l'avez peut-être deviné en regardant les illustrations, le câblage entre le panneau solaire, le régulateur et la batterie est réalisé à l'aide de fil multibrin de 6 mm² de section ; les connexions aux prises allum-cigare 12 V ne sont pas représentées. La mise en parallèle des batteries elles-mêmes est réalisée avec du fil de 16 mm². La section de fil utilisée doit être adaptée au courant à transporter : tenter de faire des économies sur ce point serait une erreur.

L'onduleur est connecté directement à la batterie à l'aide d'un fil de 16 mm² pour réduire les pertes. Seule une protection contre la sous-tension permet la connexion directe de l'onduleur (comme c'est le cas ici) à la batterie pour la protéger contre une décharge profonde. L'onduleur n'est activé que lorsque la sortie 230 V est réellement requise : sinon, au courant de repos, sa consommation (quelques dizaines de milliampères) serait un gaspillage inutile d'énergie. La configuration finale est donc celle de la figure 7.

Autres systèmes autonomes

L'alimentation électrique de l'abri de Klaus est un exemple type d'installation solaire autonome. Divers fournisseurs proposent des packs panneau solaire + régulateur de charge + onduleur prêts à l'emploi de différentes puissances nominales. Si vous optez pour l'énergie éolienne plutôt que solaire, il existe également des générateurs et régulateurs de charge adaptés, basés sur les mêmes principes. Pour ma part, l'an passé, j'ai modifié ma tondeuse robot pour la rendre autonome [2]. Un panneau de 50 W et un simple contrôleur de charge MLI firent l'affaire ; aucun onduleur n'était nécessaire. Depuis, je suis passé d'une batterie de 12 Ah à une de 30 Ah, pour aider à couvrir les périodes pluvieuses que nous avons eues. J'ai aussi récemment remplacé le contrôleur MLI par un meilleur (et plus cher) contrôleur MPPT. Le système produit maintenant assez d'électricité pour tondre la pelouse même tard en automne.



L'alimentation autonome a bien sûr beaucoup d'autres applications. Deux autres de mes amis ont un bateau : *Martin* navigue sur un grand bateau en acier à travers les paysages fluviaux des Pays-Bas, tandis que *Detlev* écume la Méditerranée sur son bateau de sport à carène planante. Tous deux passent souvent des jours loin d'un port ou autre lieu d'amarrage avec électricité disponible et aimeraient donc avoir plus d'autonomie, surtout en ce qui concerne la réfrigération : pour la boisson, mais aussi pour conserver des aliments. Il serait peu écologique, voire inefficace, de faire régulièrement tourner le moteur pour charger la batterie de bord, les deux bateaux ont donc été équipés en systèmes solaires.

Ingénieur intelligent, Martin n'a pas besoin de mes conseils. Néanmoins, de temps en temps, il discute de ses idées avec moi. Il se demandait si le générateur de son bateau pouvait être surchargé en y connectant une grosse batterie LiFePO₄ de 200 Ah. Les dangers

d'une telle démarche sont analysés dans une vidéo YouTube [3]. La **figure 8** montre la configuration des batteries pour l'essai de capacité : il choisit une batterie LiFePO₄ principalement en raison de sa longévité, mais aussi de sa compacité par rapport à une batterie au plomb. Dans le bateau de Martin, les batteries de bord et de démarrage sont distinctes. Afin d'alléger la charge de l'alternateur, les batteries sont chacune chargées par leur propre régulateur quand le moteur tourne. Un panneau solaire pliant de 120 Wc et un régulateur sont également installés pour la charge en cas d'arrêt dans un endroit sans accès à une prise de courant (voir **fig. 9**). En raison du manque d'espace disponible, une installation fixe de panneaux solaires ne convient pas sur le bateau de sport de Detlev. Il opta pour le même type de panneau solaire que Martin, même si aucun des deux ne savait ce que l'autre avait choisi ! Detlev n'est pas férus d'électronique, et au début, il voulait utiliser sa batterie de bord supplémentaire de 120 A,

car elle était plutôt récente. J'ai fait quelques calculs pour lui et je lui ai dit que question fiabilité, utiliser la prise allume-cigare du pont de son bateau pour connecter le panneau solaire n'était pas une bonne idée : je lui ai suggéré d'utiliser plutôt un connecteur étanche Neutrik. J'ai précâblé le connecteur et rédigé un guide d'installation (**fig. 10**) à l'adresse du constructeur de son bateau, afin que le système soit installé dans le port d'Istrie. La combinaison panneau pliant de 120 Wc/contrôleur de charge MPPT de *Victron Energy* a coûté un peu moins de 500 €. Le régulateur de charge dispose d'une connexion Bluetooth et une application pour smartphone affiche tous les paramètres et graphiques.

La maison semi-autonome

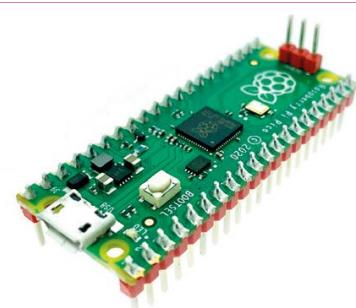
En ces temps de baisse des tarifs de rachat, l'installation solaire fixe qui, dans la mesure du possible, consacre toute l'énergie produite à la demande de la maison connaît un regain d'intérêt. Par ex., un ensemble de dix panneaux

Publicité

ABONNEZ-VOUS ET RECEVEZ

Raspberry Pi + Headers GRATUIT

TOUS LES 2 MOIS, LES DERNIÈRES NOUVELLES
DU RASPBERRY PI ET LES MEILLEURS PROJETS !



Vos avantages :

- Une carte Raspberry avec headers
- Prix au numéro réduit
- Chaque numéro directement dans votre boîte aux lettres
- Tous les numéros disponibles sous forme numérique (PDF)
- Découverte de chaque nouveau numéro avant sa sortie en kiosque



ABONNEZ-VOUS : WWW.MAGPI.FR

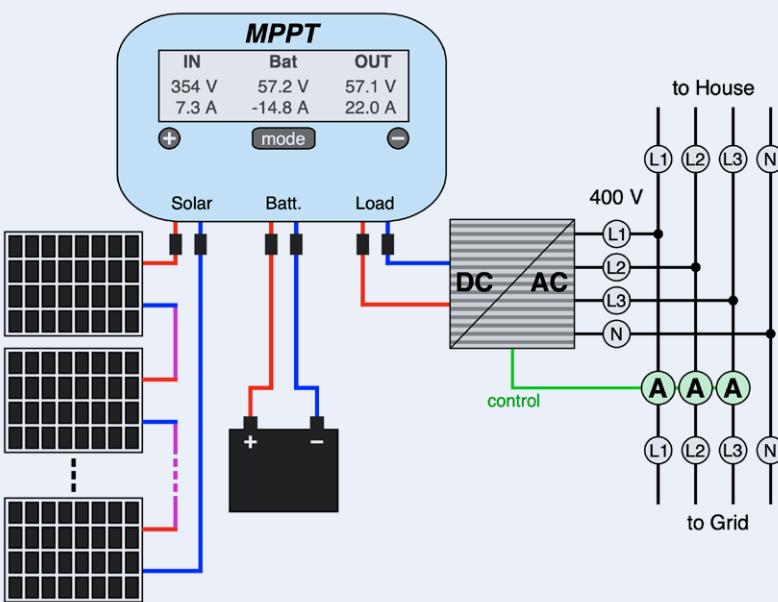


Figure 11. Installation solaire semi-autonome pour une maison. La mesure du courant triphasé commande l'onduleur de manière à n'envoyer aucune énergie électrique sur le réseau.

solaire modernes produisent environ 3,75 kWc ; un régulateur de charge solaire MPPT approprié charge ensuite une batterie LiFePO₄ d'une capacité de 6,5 kWh ; un circuit de surveillance du courant (les trois ampèremètres en bas à droite de la **figure 11**) pilote un onduleur triphasé pour s'assurer qu'en aucun cas l'énergie électrique n'est envoyée sur le réseau. Tout le « courant » est donc utilisé localement. Avec en 2022, un coût de l'électricité en Europe d'environ 0,35 €/kWh, cette option est très intéressante : non seulement elle évite d'avoir un onduleur complexe et coûteux relié au réseau avec une électronique de charge intégrée pour la batterie, mais elle dispense aussi de formalités compliquées. C'est une considération non négligeable ! (Notez qu'un tel montage peut ne pas être légal dans tous les pays).

Avec le schéma de la figure 11, les économies réalisées grâce à l'utilisation de la conception simplifiée vont de 1 000 € à 2 000 €. Au tarif de rachat, il faudrait quelques années pour récupérer ce montant. La partie la plus coûteuse du système est la batterie :

une batterie LiFePO₄ de 6,5 kWh coûte plus de 3 000 €. Avec une garantie de 6 000 cycles de charge à une profondeur de décharge de 90 %, cela signifie qu'environ 36 MWh d'énergie auront transité par la batterie, ce qui fait que le coût de la batterie est d'environ 0,09 €/kWh. De plus, à ce stade, la capacité de la batterie est encore appréciable et le coût

effectif du kWh sera donc encore plus bas. Sur la durée de vie de la batterie, une solution de ce type permet d'économiser environ 13 000 € grâce à l'énergie produite localement. En rechargeant aussi un véhicule électrique (à un faible taux de charge), une installation de ce type peut s'amortir en quelques années. 

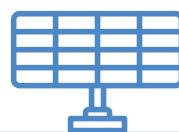
210644-04

Contributeurs

Texte et illustrations (sauf indication contraire) : Thomas Scherer
Rédaction : Jens Nickel
Traduction : Yves Georges
Mise en page : Harmen Heida

Des questions, des commentaires ?

Contactez Elektor (redaction@elektor.fr).



PRODUITS

- **PeakTech 4350 - pince ampèremétrique**
www.elektor.fr/18161
- **Pokit Meter - multimètre, oscilloscope et enregistreur portable**
www.elektor.fr/19854
- **PeakTech 3445 - multimètre numérique à valeur efficace, avec Bluetooth**
www.elektor.fr/18774

LIENS

- [1] « Centrale solaire sur balcon », T. Scherer, Elektor, 09-10/2021 : www.elektormagazine.fr/210326-04
- [2] « Énergie solaire pour les robots de tonte », T. Scherer, Elektor 07-08/2021 : www.elektormagazine.fr/200553-04
- [3] « How to not blow up your alternator when charging lithium », Victron Energy, YouTube : www.youtube.com/watch?v=jgolocPgOug.