



Stockage résidentiel et autoconsommation solaire

Analyse technico-économique, marché et perspectives

**Marion Perrin,
Nicolas Martin**

Oscaro-Power

Introduction

A ce jour, l'énergie solaire photovoltaïque (PV) est la seule source très distribuée que le particulier est en mesure d'adopter massivement pour couvrir une partie conséquente et croissante des besoins en énergie de son habitat. Il s'agit de la source d'électricité distribuée la plus économique avec un prix du kWh produit à l'échelle du

Avec la diminution du prix des panneaux photovoltaïques, du prix des batteries et l'augmentation des prix de l'électricité, la tendance actuelle va vers un couplage accru du solaire avec un système de stockage pour maximiser l'autoconsommation.

particulier compris entre 3,6 ct€/kWh (à Pertuis dans le Lubéron) et 5,6 ct€/kWh (à Lille) pour un système standard de 4800 Wc auto-installé. On peut estimer que le coût de l'installation par un professionnel double ces valeurs.

Afin de maximiser les taux d'autoconsommation, c'est-à-dire la fraction de l'énergie produite localement qui est directement

consommée par la maison, deux solutions sont possibles. La première consiste à déclencher les consommations de manière synchrone avec les périodes de production.

La seconde solution pour maximiser l'autoconsommation est d'adjoindre au système solaire un moyen de stockage qui permette d'absorber l'excédent d'énergie électrique généré en journée et le restituer pour les

besoins ultérieurs de la maison. Le présent article traite de l'évolution du marché de telles solutions de stockage résidentiel en France et en dehors, en matière de volumes, de technologie utilisée et de perspectives.

Le cas d'étude de la maison individuelle

Consommation et production de l'habitat individuel en France

En France, 150 TWh sont consommés annuellement dans le secteur résidentiel (37 à 38 % de la consommation

totale) pour 33,4 millions de sites [1]. La consommation annuelle d'électricité d'un foyer français est en moyenne de l'ordre de 4,5 MWh.

Le parc immobilier se constitue de 56 % de maisons individuelles [2]. Ce type d'habitat possède une surface par membre du foyer supérieure au logement collectif et « une consommation totale d'électricité 2,2 fois supérieure à celle d'un appartement » [4]. On en déduit une consommation électrique moyenne annuelle de 3,2 MWh pour l'appartement et de 7 MWh pour la maison individuelle.

En ce qui concerne la production solaire, pour chaque unité de puissance de panneaux solaires exprimée en kilowatts crête (kWc)¹, la production est fonction de la localisation, de l'inclinaison, de l'orientation et de l'exposition de l'installation. Chaque kWc de panneau installé correspond à un peu moins de trois panneaux solaires de technologie actuelle (400 à 430 Wc par panneau) pour une surface de 2 m² par panneau. La production par kWc installé avec une orientation plein sud et une inclinaison de 35° est résumée dans le tableau 1 pour quelques localisations en France.

Afin de produire sur l'année autant d'énergie qu'il en consomme, un logement résidentiel nécessite entre 8 à 16 panneaux solaires standards de 400 Wc.

Maison témoin

Une grande partie des illustrations de cet article se réfèrera au cas d'étude que nous nommerons « Maison témoin ». ●●●

1 kWc : il s'agit de la puissance maximale mesurée en laboratoire pour une exposition à un rayonnement orthogonal de 1000 W/m² dans les conditions standard de température c'est à dire 25 °C de température des cellules solaires

Ville	Production annuelle (kWh/kWc)
Lille	1070
Paris	1137
Lyon	1278
Pertuis	1545
Bastia	1362
Bordeaux	1259
Nantes	1232
Nancy	1124
Chambéry	1283

Tableau 1 : Production annuelle en kWh pour chaque kWc de panneaux installés (données PVGIS, inclinaison 35° orientation sud) [3].

“ Afin de produire sur l'année autant d'énergie qu'il en consomme, un logement résidentiel nécessite entre 8 à 16 panneaux solaires standards de 400 Wc. ”



Figure 1 : Maison témoin avec ses 20 panneaux de 280 Wc installés fin 2018.

●●● Ce cas d'étude est représentatif du parc immobilier français récent d'habitat individuel par ses équipements et sa consommation annuelle (tableau 2).

Maximiser l'autoconsommation sans batterie : la meilleure rentabilité économique et sociétale

La synchronisation des consommations sur les périodes de production permet de maximiser le taux de couverture par le solaire des besoins énergétiques de la maison. Une fraction importante des charges de l'habitat peut en effet être mise en fonctionnement de manière ciblée. La figure 2 présente la consommation et la production d'une maison à Chambéry équipée d'un système solaire de 5,4 kWc et d'un chauffe-eau électrique sur deux journées du mois de septembre 2022. Dans le premier cas le chauffe-eau se déclenche vers 11 h, dans le second cas en tout début de matinée.

Une telle stratégie de déclenchement horaire présente la meilleure rentabilité puisqu'elle ne nécessite pas d'investissement coûteux dans une batterie. De simples logiques de programmation horaire peuvent déjà réaliser une grosse partie de l'optimisation. Ainsi, pour une maison consommant 5 MWh par an avec un chauffe-eau électrique d'une puissance de 2,25 kW, la simulation de l'autoconsommation selon les deux scénarios a été réalisée (figure 3) :

- avec une courbe de consommation correspondant au profil standard ENEDIS et un abonnement heures creuses (chauffe-eau se déclenchant à 23h pour 2 h) ;
- avec le chauffe-eau positionné sur le créneau 11 h-13 h

Pour la maison témoin, l'autoconsommation passe de 22 % de l'énergie produite sans décalage du chauffe-eau en journée, à presque 40 %, l'optimum étant trouvé pour un champ de 4 kWc et une

Type d'habitat	Maison individuelle 120m ²	Habitat
Nombre d'habitants	2	
Localisation	Proche Chambéry en Savoie	
Année de construction	2015	Consommation
Eau chaude sanitaire	Pompe à chaleur air – eau	
Chauffage		
Consommation annuelle	5000 kWh	
Equipement mobilité	Véhicule électrique Peugeot Ion	Système solaire
Installation	09/2018	
Panneaux	20 panneaux de 280 Wc = 5,6kWc	
Onduleur solaire	Onduleur de chaîne 5 kVA	
Production annuelle	7500 kWh	
Batterie	Li-ion 10 kWh	

Tableau 2 : Description des caractéristiques de la maison témoin.

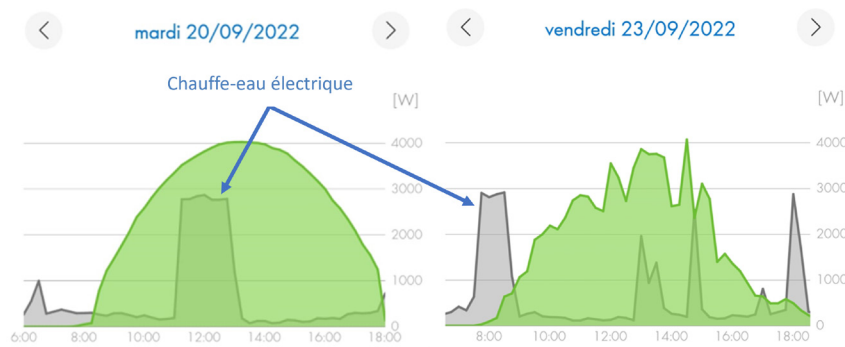


Figure 2 : Illustration de la consommation (en gris) et la production PV (en vert) d'une maison avec déclenchement du chauffe-eau électrique synchronisé ou non sur la période de production solaire.

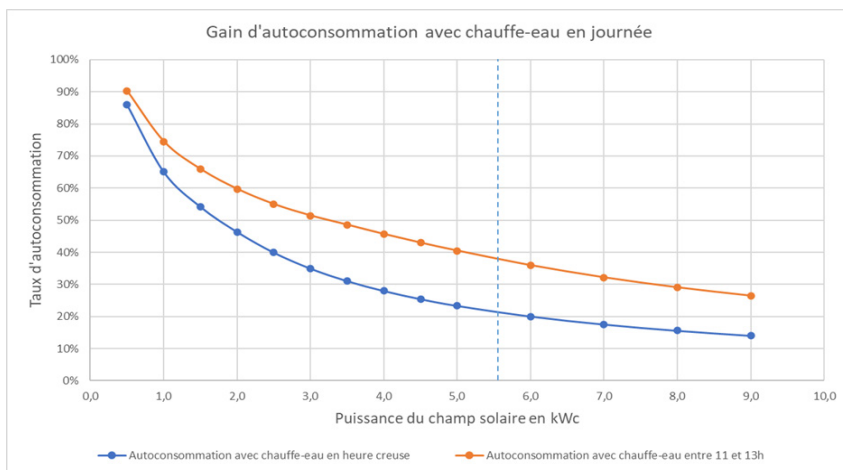


Figure 3 : Simulation du taux d'autoconsommation pour une maison consommant 5 MWh par an en Savoie selon le profil standard ENEDIS avec un chauffe-eau électrique de 2,25 kW en fonction de la puissance solaire installée.

autoconsommation qui passe de 28 % à 46 %.

Marché du stockage résidentiel

Les conditions d'émergence

Alors que l'installation de panneaux solaires dans le secteur résidentiel a toujours été motivée pour le client par la volonté de consommer sa propre énergie, les circuits de raccordement des premières installations solaires ont été réalisés en vente de la totalité de la production dans de nombreux pays dont la France. L'explication pour ce schéma sans autoconsommation réside dans le fait qu'il était nécessaire de subventionner massivement l'énergie produite pour faciliter son développement et faire émerger un marché.

Le nouvel essor du marché du solaire photovoltaïque résidentiel a démarré au moment de parité réseau du coût de l'énergie solaire à l'échelle résidentielle. C'est-à-dire le point à partir duquel pour un usage résidentiel, le kWh autoproduit par le particulier est au même coût que l'énergie soutirée du réseau. Ce point a été atteint à différentes dates en fonction des pays et des régions puisqu'il dépend du coût de l'électricité de détail et de la productivité d'un système solaire au même endroit. En Allemagne, premier pays à l'atteindre, c'est en 2012 que ce point de parité réseau a été constaté pour les systèmes PV résidentiels. En 2014, 19 pays l'avaient atteint [5]. En France la parité réseau était atteinte entre 2015 et 2017.

Une fois la parité réseau dépassée, les conditions économiques favorables commencent à émerger pour l'ajout d'un système de stockage à l'échelle résidentielle. Il est nécessaire que la différence entre le coût de production de l'énergie solaire photovoltaïque et le coût du kWh soutiré du réseau soit suffisante pour rentabiliser le système de stockage.

Pour un système solaire de 6 kWc, la rentabilité d'un système avec ou sans stockage est assez semblable. La rentabilité s'effondre sur des petits systèmes car le taux d'autoconsommation est proche de 100 % avant même l'ajout d'une batterie. Au-delà de la notion financière, on constate que l'autoconsommation naturelle (sans batterie) se limite à environ 40 % alors que l'autoconsommation avec batterie monte à plus de 60 % avec une batterie de 5 kWh (figure 3).

Etude de cas

On considère une maison avec une consommation annuelle de 5 500 kWh et dont le profil de charge est celui de la courbe de référence de ENEDIS (hypothèse de non évolution des usages pour les mettre en journée). Une localisation à Chambéry est considérée pour un système solaire orienté sud à 25° d'inclinaison. Le coût d'investissement est de 1 €/Wc pour le solaire et de 1000 €/kWh pour la batterie. Le prix de la vente de surplus de 10 ct€/kWh fixe sur 20 ans et le prix de soutirage de 30 ct€/kWh fixe sur 20 ans. L'autonomie correspond à la part de l'énergie consommée produite à partir du solaire. Le gain net financier correspond à la somme des gains (économies liées à l'autonomie à laquelle on ajoute la vente de surplus et desquelles on soustrait le prix d'investissement).

En dernier lieu, l'addition d'un système de stockage à sa résidence peut aussi être motivée par des conditions extra-économiques comme la volonté de sécurisation de l'approvisionnement. Une telle motivation est particulièrement observée en Australie, en Amérique du Nord et de façon croissante en Europe.

Marché en France et hors France

Les premières mises en œuvre massives de systèmes de stockage résidentiel couplés à des systèmes de production photo-

voltaïques sont intervenues en Allemagne à partir de 2008. A cette époque, la parité réseau de l'énergie solaire est presque atteinte en Allemagne. C'est aussi à cette époque que se profile la fin de la rémunération de l'énergie produite pour certaines centrales du programme «1000 Dâcher», système atteignant les 20 ans de longévité. Le parlement allemand anticipe donc le développement de l'autoconsommation et un marché croissant du stockage résidentiel.

Afin de permettre l'émergence de solutions nationales avec des niveaux de qualité, d'interopérabilité et de bénéfice socio-économique optimisés, à partir de 2012 une subvention est attribuée aux propriétaires de systèmes de stockage couplés à une installation solaire sous réserve de sept critères. Parmi ces critères, on retrouve une limitation de la puissance solaire maximale injectée sur le réseau à 50 % de la puissance crête, une garantie produit de 10 ans et un accès ouvert au protocole du BMS (*Battery Management System* ou système de gestion de batterie). Un programme de recherche au sein de l'institut ISEA est lancé de manière concomitante à la subvention pour observer les solutions techniques déployées dont les rapports annuels sont une source précieuse d'information sur l'évolution des systèmes de stockage résidentiels avec l'augmentation de maturité du marché.

Le marché allemand des solutions de stockage résidentiel a alors commencé à se développer massivement. A fin 2021, environ 400 000 stockages résidentiels avaient été installés. Il s'agit du pays qui compte le plus grand nombre de telles installations avec 130 000 nouvelles installations en 2021 (soit 56 % des nouvelles installations solaires).

Les analystes estiment que ce marché à l'échelle mondiale croît actuellement et pour les 5 ans à venir de 20 % par an avec une valeur en 2022 de l'ordre de 720 millions USD. L'Europe, tirée par le marché allemand, et l'Amérique du Nord, sont les deux gros centres de ce marché mondial [9].



●●● Pour la France, la proportion de systèmes avec stockage est très faible. En 2021 et 2022, la proportion de systèmes solaires officiellement raccordés au réseau ENEDIS qui incluent un système de stockage est de 1 %. En cumulé, dans le segment inférieur à 36 kWc, la puissance raccordée avec stockage est de 33 MW sur un total raccordé sur ce segment en fin de troisième trimestre 2022 de 2 463 MW.

Pour le 3^{ème} trimestre et pour les producteurs inférieurs à 36 kVA, les demandes de raccordements avec stockage représentent de l'ordre de 3 % du total, donc la tendance est à la hausse.

Les technologies mises en œuvre en matière de stockage résidentiel

De nombreuses technologies revendiquent une bonne performance pour le stockage des énergies renouvelables. Dans ce panel, qui va des du stockage électrochimique, incluant batteries et vecteur hydrogène, au stockage par pompage hydraulique ou aux supraconducteurs, un nombre limité de technologies ont atteint la maturité suffisante. Dès 2003, une évaluation multicritère des technologies de stockage au sein du projet de recherche européen INVESTIRE [7] démontrait que, d'un point de vue purement technique (rendement, durée de vie, adéquation en puissance et énergie), la technologie lithium-ion était la plus apte à répondre aux exigences du stockage solaire résidentiel (figure 4).

Toutefois, pour des raisons de coût et de cinétique de développement, les premiers systèmes de stockage ayant vocation à optimiser l'autoconsommation solaire résidentielle représentaient seulement une évo-

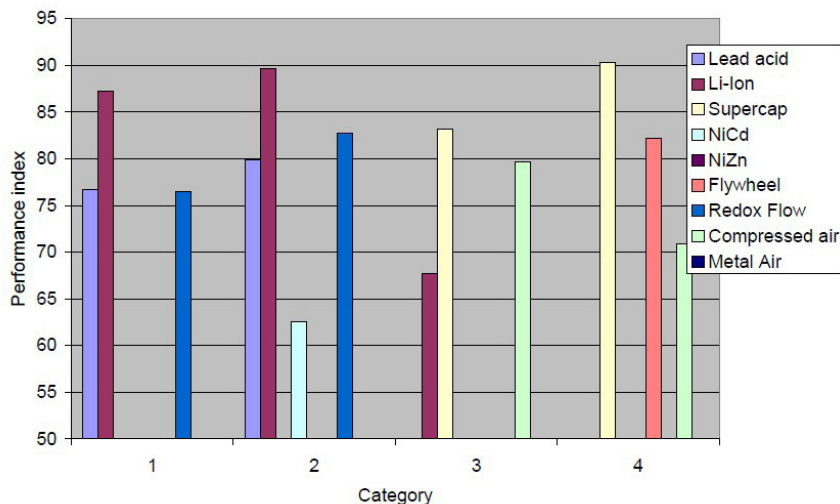


Figure 4 : Adéquation en performance des différentes technologies de stockage pour les applications du projet européen INVESTIRE (les catégories 1 et 2 concernent des applications solaires, les catégories 3 et 4 du stockage très court terme de type régulation de fréquence. L'absence d'une technologie implique qu'elle ne remplissait pas les critères minimaux de performance pour l'application).

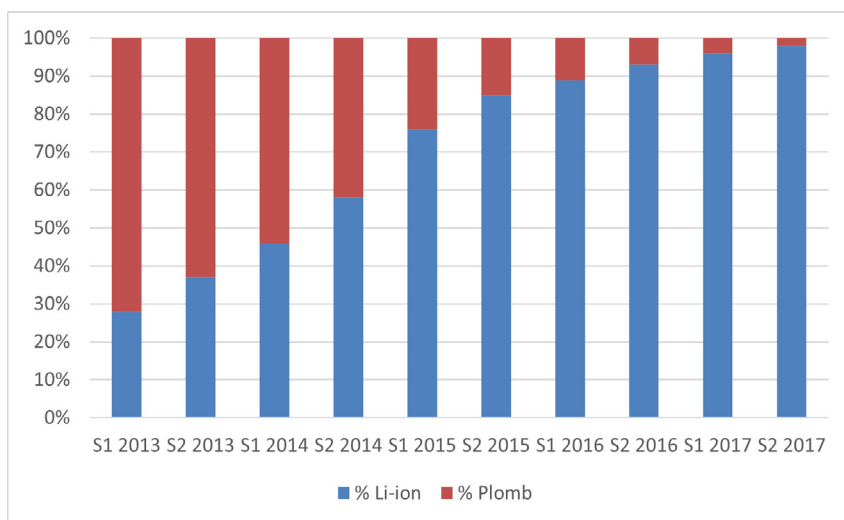


Figure 5 : Proportions de systèmes basés sur les technologies plomb et lithium-ion (source des données [6]).

“ Historiquement les sites isolés solaires ont été équipés de batteries au plomb et tout le matériel de conversion (appelé onduleur batterie) était optimisé pour une telle technologie. ”

lution technique incrémentale par rapport aux systèmes solaires photovoltaïques implantés dans les sites isolés. Historiquement les sites isolés solaires ont été équipés de batteries au plomb et tout le matériel de

conversion (appelé onduleur batterie) était optimisé pour une telle technologie. C'est pourquoi les premiers systèmes de stockage résidentiels à vocation d'optimisation de l'autoconsommation ont utilisé principalement des batteries au plomb. La tendance a toutefois très rapidement basculé en faveur de la technologie lithium-ion : alors que cette technologie était présente dans moins de 30 % des systèmes de stockage installés en Allemagne au premier semestre 2013, au second semestre de 2017 c'était plus de 98 % des systèmes qui utilisaient du lithium-ion (figure 5).

En matière de coût, le prix au kWh du système de stockage est de l'ordre de 1000 euros en 2022. Alors qu'il a baissé sensiblement dans les années 2013 à 2017, il est maintenant stable, voire de nouveau en croissance sur le second semestre 2022 du fait de la forte demande (figure 6).

“ Alors que les premiers kWh de stockage sont les plus cyclés dans une installation, donc les plus rentables économiquement, le coût marginal de kWh additionnels est faible.”

Optimisation maximale de l'autoconsommation par le stockage résidentiel

Dimensionnement du stockage

Dans le premier projet traitant extensivement d'un système d'autoconsomma-

tion photovoltaïque avec stockage mené entre 2008 et 2012 et appelé Sol-Ion [3], l'impact de la taille du système de stockage sur le taux d'autoconsommation a été calculé par simulation exhaustive sur des séries temporelles de consommation réelles de 97 habitations et des

séries temporelles de production solaire en trois localisations (Chambéry, Kassel, Guadeloupe). Comme illustré sur la figure 7 (qui concerne une habitation consommant 5 MWh annuellement et équipée de 5 kWc de solaire), il a pu être démontré que :

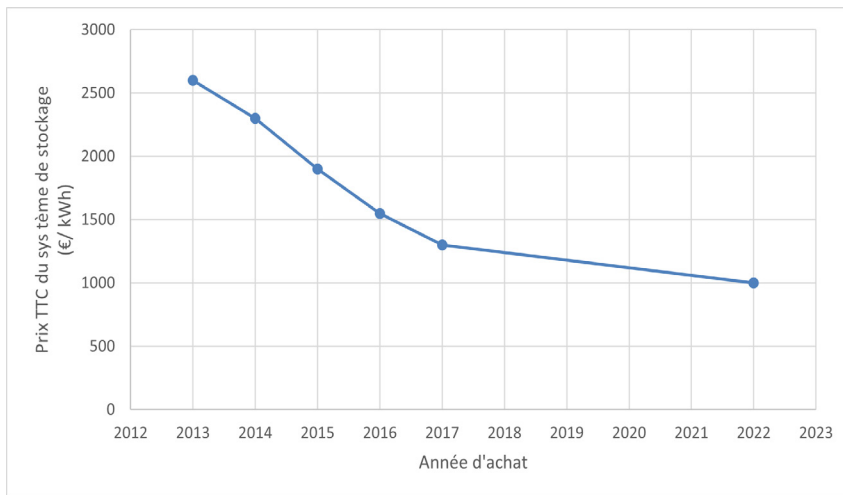


Figure 6 : Prix final TTC client du système de stockage (€/kWh).

- la taille de stockage optimale est de 1 à 2 kWh par kWc de solaire installé. Un stockage plus grand augmentera bien entendu le taux d'autoconsommation mais peu en proportion et rendra moins optimal le rendement économique de l'installation.

- plus l'ensoleillement est homogène sur l'année, plus la capacité de stockage optimale est grande, car elle optimisera mieux l'autoconsommation.

Alors que les premiers kWh de stockage sont les plus cyclés dans une installation, donc les plus rentables économiquement, le coût marginal de kWh additionnels est faible. Les marchés les moins matures ont donc tendance à installer des petits systèmes de stockage (<1kWh/kWc) alors que les marchés les plus matures surdimensionnent le stockage. La même tendance est observable en matière de dimension de système solaire.

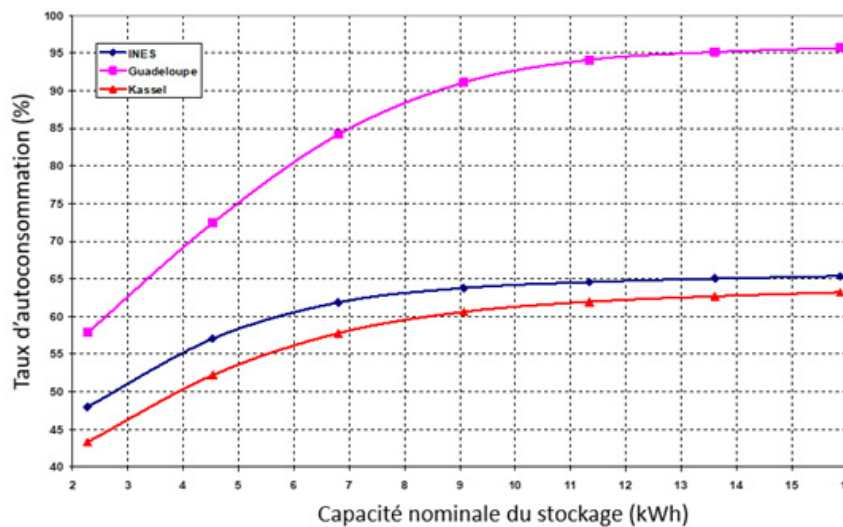


Figure 7 : Evolution du taux d'autoconsommation en fonction de la taille de la batterie pour une maison consommant 5 MWh annuellement et équipée de 5 kWc de panneaux solaires photovoltaïques et localisée à Chambéry/INES, en Guadeloupe ou à Kassel (DE)

Vers des niveaux d'autoconsommation et d'autonomie de 75 %

Le pilotage de la consommation permet une amélioration substantielle du taux d'autoconsommation, toutefois l'adjonction d'un système de stockage est la solution technique ultime de l'optimisation.



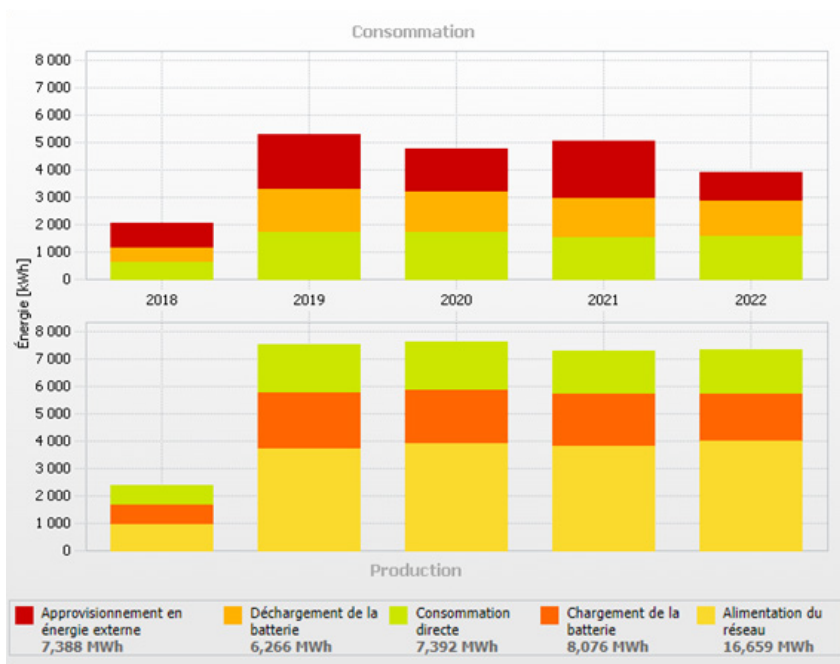


Figure 8 : Bilan énergétique annuel de la maison témoin.

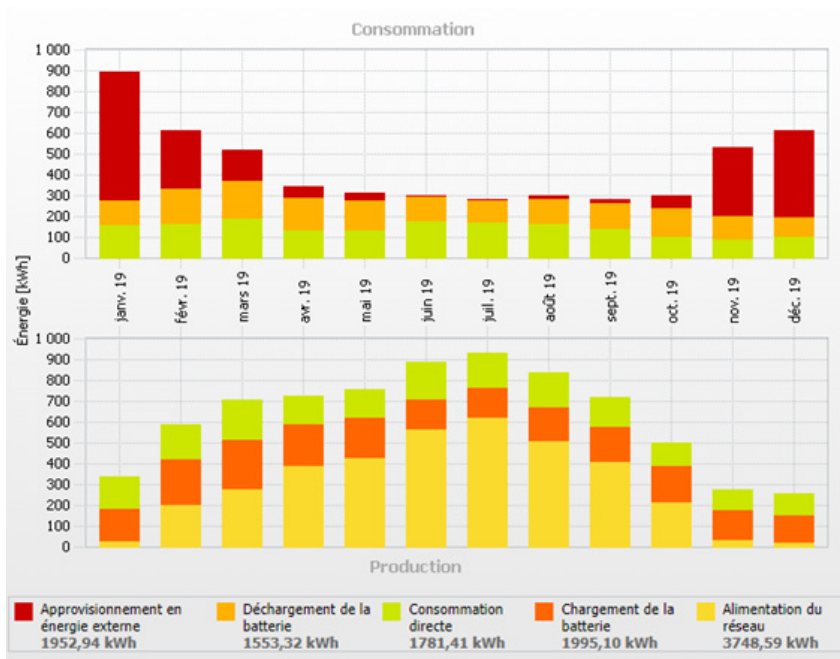


Figure 9 : Bilan énergétique de la maison témoin en 2019.

●●● Sur notre maison témoin, si l'on prend le bilan sur quatre ans de fonctionnement (figure 8), la présence du stockage de 10 kWh a permis de passer le taux de couverture des besoins de la maison par le solaire (autrement appelé « autonomie ») de 35 % sans batterie à 65 % avec batterie. Concernant le taux d'au-

toconsommation, il passe de 23 % à 42,5 %, le système solaire produisant 52 % de plus que la consommation de la maison.

Avec le dimensionnement choisi dans notre maison témoin, il est toutefois à noter que le surplus d'énergie est considé-

nable en particulier à certaines périodes. Si la plus grosse fraction du besoin est bien couverte par un système solaire plus batterie en moyenne sur l'année, le partage de l'énergie en surplus en été et le soutirage du réseau en hiver restent majoritaires sur certains mois comme illustré dans la figure 9.

Une perte de 15 à 20 % pour l'énergie qui transite par le stockage

Alors que le stockage semble la solution technique idéale pour optimiser le taux d'autoconsommation et couvrir la plus grande fraction du besoin énergétique de la maison, il est toutefois associé avec une perte d'énergie non négligeable, en lien avec le rendement des différents étages de conversion. Si l'on se réfère à la figure 9, en 2019, la maison témoin a chargé 1995 kWh dans le système batterie et déchargé 1553 kWh. Ce qui correspond à un rendement du système de stockage de 78 %. Ainsi 22 % de l'énergie chargée dans le système de stockage est perdue.

Afin d'optimiser ces valeurs de rendement, de nouvelles topologies de système combinant solaire photovoltaïque et stockage émergent. Deux topologies de système sont rencontrées couramment :

- celle dans laquelle le système de stockage se compose d'une batterie (basse tension typiquement 48 V ou haute tension autour de 300V) et d'un onduleur dédié qui est raccordé à la maison sur un disjoncteur du tableau général basse tension (appelée couplage AC ou couplage courant alternatif) ;

- la topologie selon laquelle la batterie haute tension est raccordée sur le même bus courant continu (DC) que le solaire avec un unique convertisseur DC/AC pour les deux sources continues (appelée couplage DC).

Les topologies en couplage AC permettent d'ajouter un système de stockage sur un système solaire existant qui n'était

“ La diminution du prix du matériel solaire, couplée à l’augmentation des prix de l’électricité, induisent que la rentabilité des systèmes solaires atteint des sommets. En Belgique par exemple, des taux de rentabilité interne de 60 % et plus sont constatés. Cet état de fait est un facteur de croissance de la dimension des systèmes solaires et d’amélioration de la rentabilité du stockage. ”

pas prévu à l’origine pour une intégration de stockage. Les topologies en couplage DC sont privilégiées dans les nouvelles installations qui incluent donc le stockage dès l’installation ou qui a minima le prévoient.

Perspectives sur stockage résidentiel

Vers des systèmes solaires pour couvrir 75 % des besoins

La diminution du prix du matériel solaire, couplée à l’augmentation des prix de l’électricité, induisent que la rentabilité des systèmes solaires atteint des sommets. En Belgique par exemple, des taux de rentabilité interne de 60 % et plus sont constatés. Cette tendance constitue un facteur de croissance de la dimension des systèmes solaires et d’amélioration de la rentabilité du stockage. Par exemple, en Allemagne, la puissance classique d’une installation solaire est d’environ 9 kWc et 56 % des installations nouvellement raccordées en 2021 incluent du stockage. Au vu de la topologie de consommation électrique résidentielle française (qui est plus importante que pour les maisons allemandes), on devrait assister à l’installation de plus en plus de systèmes solaires de forte puissance et donc plus favorables à l’adoption d’un système de stockage.

En outre, toute contrainte sur l’injection de surplus aura aussi un effet favorable pour le stockage. Par exemple, en France, la limite d’injection est fixée à 6 kVA par phase.

Un particulier qui s’installe un système solaire de plus de 7 kWc afin de couvrir une forte fraction de son besoin aura donc tout intérêt à stocker le surplus qu’il ne pourra pas se faire rémunérer. De la même manière, le particulier qui souhaite minimiser les démarches administratives liées à son système solaire a intérêt à se raccorder en convention d’autoconsommation sans injection. Outre un effet rebond qui incite à consommer un potentiel surplus, cela induit aussi un intérêt accru du stockage qui jouera alors un rôle dans le bridage de la puissance maximale injectée sur le réseau.

Le système solaire avec stockage comme générateur principal

Un système solaire conventionnel cesse toute injection en cas de coupure réseau. En effet, les systèmes photovoltaïques intègrent des onduleurs solaires qui injectent en courant de manière synchrone avec le réseau local. Ces onduleurs sont conçus avec une sécurité qui garantit un arrêt de l’injection en moins de 20 ms lorsque le réseau disparaît afin que toute personne intervenant sur le réseau de distribution en amont du compteur (et donc côté réseau) ait la garantie qu’aucune génération ne viendra la mettre en danger.

Les perspectives de développement s’orientent désormais vers un système solaire avec stockage fonctionnant de manière autonome. Le réseau électrique est alors considéré comme un appoint d’énergie.

Les auteurs

Marion Perrin est directrice scientifique de Oscaro-Power. Titulaire d’un doctorat en électrochimie réalisé en Allemagne, elle a dirigé au CEA pendant 16 ans un



laboratoire puis un service de recherche traitant des thématiques du stockage électrochimique et de l’intégration massive d’énergie renouvelable – en particulier solaire photovoltaïque – dans les systèmes électriques. Dans ce cadre elle rejoint en 2005 l’INES pour participer à sa création. En 2018, elle rejoint le fondateur de Oscaro.com pour créer Oscaro-Power et en faire le leader européen de l’habitat à énergie solaire prépondérante en autoinstallation.

Nicolas Martin est actuellement directeur technique de Oscaro-Power. Ingénieur Arts-et-Métiers de formation, il a travaillé au CEA sur l’utilisation du stockage pour



des applications stationnaires puis dirigé le laboratoire « systèmes électriques intelligents ». Il participe à la création de Oscaro Power pour contribuer à démocratiser l’autoconsommation.

Afin de permettre une alimentation de la maison par le système solaire sans réseau, celui-ci doit nécessairement être couplé à un système de stockage ². Ce couplage est une condition nécessaire mais non suffisante. En effet, les fonctions de découplage du réseau (initialement intégrées dans l’onduleur) et de modification du régime de neutre, nécessitent dans la plupart des cas des composants spécifiques coûteux ainsi qu’une intervention dans la configuration de la distribution électrique de la maison. En 2019, seulement 15 % des systèmes de stockage ins-

² On notera que les technologies d’alimentation électrique sans stockage et sans réseau commencent à être commercialisées (Fronius GEN24 et Enphase IQ8).

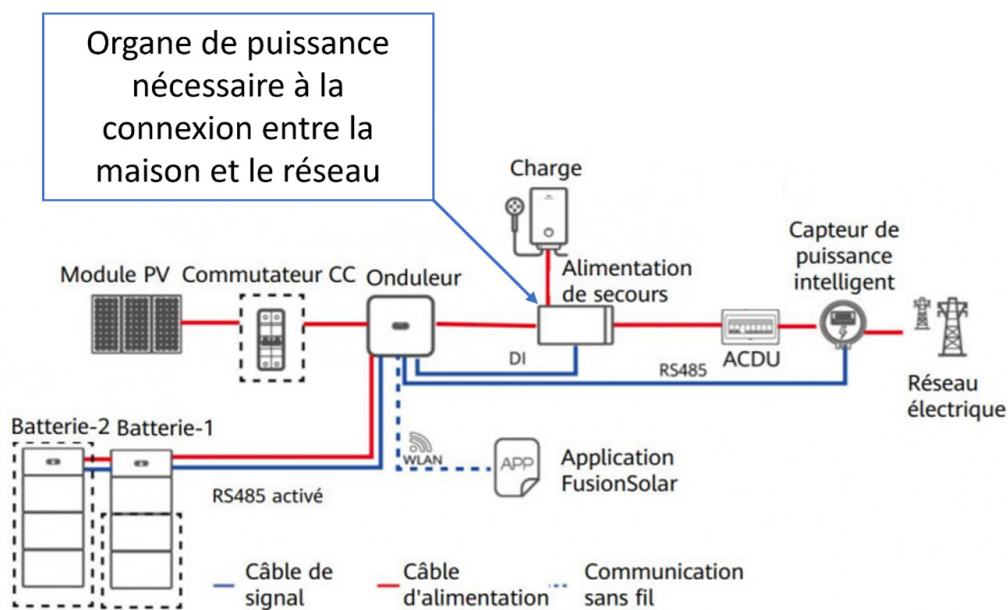


Figure 10 : Schéma de raccordement d'un système solaire photovoltaïque dans la maison et addition d'une fonction de sécurisation.

“ L’adoption du stockage est aussi poussée par la croissance de la taille des systèmes solaires : avec une tendance vers des niveaux d’autonomie largement supérieurs à 50 %, voire 75 % où l’alimentation par le réseau devient marginale. ”

●●● tallés en Allemagne intégraient la fonction de sécurisation (figure 10).

La complexité et le surcoût associé à la fonction de sécurisation sont pour l’instant une contrainte pour les installateurs de systèmes solaires avec stockage. Il est donc probable que l’offre s’adapte à la demande et que l’évolution des systèmes solaires permette de plus en plus de sécurisation à coût maîtrisé.

Vers une convergence batterie avec le véhicule électrique ?

Les analystes estiment actuellement que le déploiement du véhicule électrique est un facteur favorisant du stockage résidentiel [9]. Toutefois, le véhicule étant aussi une batterie de forte capacité (de l’ordre de 50 kWh quand le stockage résidentiel solaire ne né-

cessite que 5 à 10 kWh) qui est souvent raccordée au réseau, des stratégies de pilotage intéressantes se développent pour optimiser l’autoconsommation avec des concepts de mobilité solaire. L’exploitation avancée de cette charge intelligente pourrait réduire l’investissement coûteux, économiquement et d’un point de vue environnemental, dans un stockage stationnaire.

Des stratégies avancées de bidirectionnalité du véhicule émergent aussi qui permettraient d’utiliser la batterie du véhicule en décharge dans le réseau domestique. De tels concepts pourraient avoir beaucoup de sens sous réserve de ne pas impliquer un surinvestissement dans des convertisseurs peu utilisés. De nouvelles topologies de bornes de recharge en courant continu couplées au système solaire permettraient un déploiement frugal en conversion de

telles solutions, comme proposé par certaines sociétés innovantes [11].

En conclusion

Cet article s’est attaché à démontrer la tendance actuelle qui va vers un couplage accru du solaire avec un système de stockage dans un objectif de maximisation de l’autoconsommation à l’échelle résidentielle. En France le recours à un système de stockage reste marginal. Toutefois la tendance est très sensiblement en train d’évoluer, à l’image de nos voisins européens et d’un mouvement de fond au niveau mondial à mesure que le prix des installations solaires décroît, que le coût de l’électricité augmente, et que les incertitudes sur le futur motivent les particuliers à se prémunir contre hausses des tarifs et coupures potentielles. L’adoption du stockage est aussi poussée par la croissance de la taille des systèmes solaires : avec une tendance vers des niveaux d’autonomie annuelle largement supérieurs à 50 %, voire 75 % où l’alimentation par le réseau devient marginale. Afin d’optimiser la tendance de recours au stockage, un couplage entre le solaire et le véhicule par des solutions de charge intelligente, voire de véhicule bidirectionnel, serait à même d’éviter l’investissement dans un stockage stationnaire. ■

Références

- [1] CRE : Observatoire. Les marchés de détail de l'électricité et du gaz naturel 4^{ème} trimestre 2020
- [2] INSEE : Le parc de logements en France au 1er janvier 2018 paru le 02/10/2018
- [3] <https://ses.jrc.ec.europa.eu/sol-ion>
- [4] Les consommations électrodomestiques dans le logement – Etude Enertech, RTE et ADEME 1er juin 2021
- [5] «2014 Outlook: Let the Second Gold Rush Begin». Deutsche Bank Markets Research. 6 janvier 2014
- [6] Wissenschaftliches Mess- und Evaluierungsprogramm Solarstromspeicher 2.0 Jahresbericht 2018
- [7] INVESTIRE-NETWORK WP 3: Recommendations for the best matching storage technologies for renewable applications (Janvier 2004)
- [8] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1078876/umfrage/anzahl-installierter-solarstromspeicher-in-deutschland/>
- [9] <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/residential-energy-storage-market-153284325.html>
- [10] Stromspeicherinspektion 2022. Volker QUASCHNING et al.
- [11] <https://www.dcbel.energy/uk/?lang=en>
- [12] OpendataEnedis <https://data.enedis.fr/>
- [13] Sol-ion PV Storage System: field trial, results, spread of operating conditions and performance evaluation based on field data, J. Binder et al., 2012

Résumé

Alors que les systèmes photovoltaïques résidentiels deviennent de moins en moins coûteux et que l'énergie solaire au niveau résidentiel a plus qu'atteint la parité avec le réseau, le couplage à un système de stockage suscite un intérêt croissant. Pour le domaine résidentiel, les batteries au lithium-ion sont désormais les seules solutions proposées aux propriétaires. Cette technologie performante et de bonne longévité est disponible à un coût abordable de l'ordre de 1000 €/kWh. En termes de marché, l'Allemagne domine avec 400 000 systèmes déjà installés à la fin de 2021, tandis qu'en France, en 2022, seulement 1 % des nouveaux systèmes PV sont couplés à des batteries. D'autres pays européens et de l'Amérique du Nord suivent la tendance allemande.

Si la motivation première de coupler le stockage à un système PV a été l'amélioration de l'autoconsommation - en doublant généralement le taux d'énergie autoconsommée - de nouvelles fonctionnalités sont de plus en plus demandées, comme la sécurité de l'approvisionnement.

D'une manière générale, il devient de plus en plus réaliste de tendre vers une maison alimentée principalement par l'énergie photovoltaïque autoproduite tout au long de l'année. De plus, avec le développement des véhicules électriques, les nouvelles architectures de systèmes permettent un couplage direct en courant continu induisant une utilisation bidirectionnelle de la batterie du véhicule. Ces solutions pourraient éviter l'investissement dans un stockage stationnaire coûteux pour l'environnement. ■

Abstract

While residential PV systems become less and less costly and PV energy at residential level has more than reached grid parity, the coupling to a storage system is gaining increasing interest. In terms of technology, at residential level, lithium-ion is now the only solution proposed to household owners: its optimal performance and longevity is now available at a cost around 1000€/kWh that makes it affordable for such application. In terms of market, Germany is predominant with 400 000 systems already installed end of 2021 while in France, in 2022, only 1 % of the new PV systems are coupled with storage. Other European countries are following the German trend as well as North America.

While the primary motivation of coupling storage to a PV system has been the improvement of self consumption – typically doubling the rate of the self consumed energy – new functionalities are more and more required such as safety of supply.

As a general trend, tending toward a house mainly provided over the year with self-produced PV energy becomes more and more realistic. Moreover, with increased use of electric vehicles, emerging system topologies allow direct DC coupling inducing bidirectional use of the vehicle battery. These solutions could avoid the investment in an environmentally costly stationary storage. ■