

# Le stockage de l'énergie des systèmes photovoltaïques

Florence Mattera

<b>Résumé</b>	L'électricité issue de la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire nécessite l'utilisation d'un système de stockage afin de faire correspondre production et besoin des usagers. Cet article présente les technologies de stockage utilisées actuellement et les tendances futures.
<b>Mots-clés</b>	<b>Stockage de l'énergie, énergie photovoltaïque, solaire, batteries au plomb, batteries lithium-ion, systèmes connectés au réseau.</b>
<b>Abstract</b>	<b>Storage of the energy of the photovoltaic systems</b> Off grid and grid connected photovoltaic systems need a storage function, as they result in intermittent energy production. If for off grid systems, conventional batteries are used, the variability of the grid connected applications induces a wide range of possible storage systems. This paper reviews the present used technologies and the future trends.
<b>Keywords</b>	<b>Energy storage, photovoltaic energy, solar energy, lead-acid batteries, lithium-ion batteries, grid connected systems.</b>

Les systèmes fondés sur la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire, isolés ou connectés au réseau, présentent des besoins en matière de stockage afin de répondre à la problématique d'intermittence de leur production. Si à l'échelle des systèmes autonomes, les solutions techniques s'orientent principalement vers les batteries, les systèmes connectés au réseau présentent une vaste échelle d'applications et par conséquent de nombreux modes de stockage possibles. Cet article présente les technologies de stockage utilisées actuellement puis envisage les tendances futures.

## Les systèmes photovoltaïques autonomes

### Principes

Il existe une première catégorie de systèmes photovoltaïques solaires non raccordés au réseau électrique, ce sont les systèmes autonomes. Ils sont composés de modules photovoltaïques (ou panneaux solaires), d'une batterie et enfin d'un régulateur, permettant la gestion de l'énergie entre le module et la batterie (figure 1).

Ces systèmes ont été majoritaires depuis une vingtaine d'années, se développant dans le cadre des campagnes d'électrification rurales dans les pays en développement. Pour les deux milliards d'individus actuellement sans électricité, situés le plus souvent dans des zones présentant une ressource solaire élevée, les systèmes photovoltaïques constituent une des seules solutions énergétiques envisageables pour leur essor.

### L'élément indispensable : le stockage

Les systèmes photovoltaïques autonomes ont besoin d'un stockage électrique pour assurer une fourniture d'énergie quasi permanente, quelles que soient les

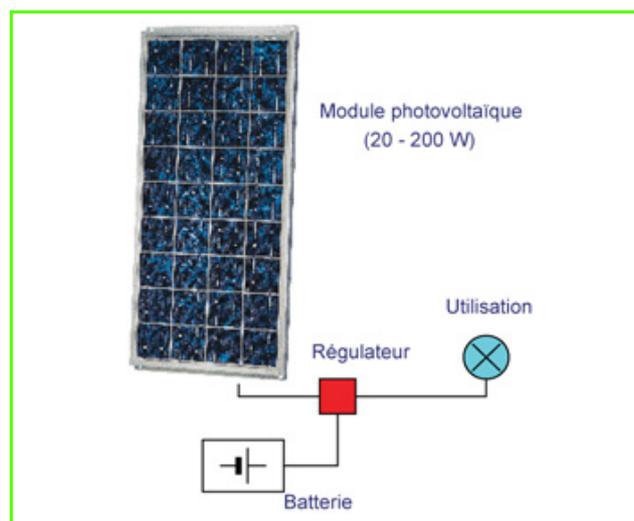


Figure 1 - Schéma de principe d'un système photovoltaïque autonome.

séquences d'ensoleillement. Suivant les applications, cette fourniture d'énergie sera assurée, par exemple, pendant deux à trois jours pour certains petits systèmes domestiques à une quinzaine de jours pour les applications professionnelles, comme les phares maritimes ou les relais de télécommunication.

Les différentes applications font appel à des batteries de technologies différentes afin de garantir le service rendu. Parmi ces technologies, la batterie au plomb, bien que connue depuis plus de cent ans, offre actuellement la meilleure réponse en termes de prix et de disponibilité. Certains sites, où les contraintes d'exploitation et d'environnement climatique sont particulièrement sévères présentant des températures de fonctionnement extrêmes, peuvent être équipés de batteries au nickel-cadmium, mais leur coût plus élevé ne permet pas la généralisation de leur emploi.

## Les batteries au plomb, actuellement les mieux adaptées

Les systèmes autonomes utilisent des batteries au plomb à plaques planes de type démarrage pour les installations d'une puissance crête installée proche de la centaine de watts (figure 2a). Les installations plus importantes seront pourvues de batteries à plaques tubulaires plus adaptées au cyclage journalier mais d'un coût du kilowatt-heure stocké de 1,5 à 2 fois plus élevé (figure 2b). Ce type de batterie équipe les installations de plusieurs centaines de watts à plusieurs kilowatts-crêtes et toutes les applications professionnelles pour des raisons de fiabilité et de sécurité (relais hertziens de télévision et de télécommunications, phares maritimes). La batterie au plomb étanche à recombinaison de gaz est employée essentiellement dans des environnements contraignants n'autorisant qu'une maintenance très espacée, comme l'équipement de balises maritimes, ou dans des installations confinées (figure 2c).



Figure 2 - Batteries au plomb (a) de type démarrage, (b) de type stationnaire, (c) étanches spiralées.

### Prolonger leur durée de vie

Le stockage dans un système photovoltaïque contribue pour une part non négligeable au coût total d'exploitation par ses remplacements successifs durant la durée de vie d'un système (pouvant aller jusqu'à plus de 60 % du coût du système global). En effet, suivant la technologie et l'utilisation des batteries au plomb, leur durée de vie peut varier entre deux et douze ans. En outre, le coût total du stockage ne suit pas la même baisse que celle obtenue sur les autres composants d'un système photovoltaïque. Un des objectifs actuels est de doubler la durée de vie des batteries bon marché jusqu'à six ans et de prolonger à quinze ans les batteries industrielles de type stationnaire à plaques positives tubulaires. Pour cela, les axes de recherche menés en collaboration avec les industriels fabricants de batteries ont porté depuis quelques années sur la conception de nouveaux produits mieux adaptés aux contraintes des applications photovoltaïques.

Un deuxième axe de travail concerne l'optimisation de la gestion énergétique de ces batteries au plomb par le développement d'interfaces électroniques adaptées à la recharge intermittente provenant des panneaux solaires photovoltaïques.

Les recherches conduites visent notamment le développement de régulateurs électroniques innovants. L'influence bénéfique de la recharge pulsée a été démontrée depuis plusieurs années [1-2], limitant les effets parasites de l'électrolyse de l'eau et améliorant l'efficacité de la recharge. Ces résultats obtenus en laboratoire devraient résulter en la mise sur le marché de régulateurs optimisés d'ici à deux ans.

Enfin, les régulateurs peuvent être de plus en plus sophistiqués et intégrer des fonctions d'information sur l'énergie disponible instantanément (état de charge ou SOC pour « state of charge ») ou sur l'énergie totale disponible (état de santé ou SOH pour « state of health ») [3]. Si ces informations sont très utiles pour les utilisateurs, elles vont également permettre



Figure 3 - Tableau de bord d'une batterie au plomb équipé d'une jauge d'état de charge.

d'améliorer l'intelligence globale des systèmes photovoltaïques tout en augmentant la durée de vie des batteries.

### La technologie lithium-ion semble prometteuse

Quels sont les enjeux futurs pour le stockage de ces systèmes photovoltaïques autonomes ? Les récentes améliorations de la technologie lithium-ion ont confirmé son intérêt pour cette application, compte tenu de ses caractéristiques spécifiques : fort rendement énergétique, durée de vie élevée, absence de maintenance, fiabilité, prédictibilité du comportement. Le coût de ces accumulateurs, principal facteur limitant, étant actuellement en forte décroissance (gain d'un facteur quatre au cours de ces dernières années, tendance confirmée par la perspective de leur utilisation dans les véhicules hybrides), cette technologie devrait jouer un rôle grandissant dans les prochaines années.

Depuis deux ans, plusieurs projets de recherche visent l'introduction de cette technologie dans les systèmes photovoltaïques [4-5] en intégrant des modules de stockage de plusieurs dizaines d'ampères-heures tout en adaptant les dimensionnements de ces systèmes et leur gestion.

Dans un premier temps, les applications professionnelles (balisage maritime, mobilier urbain) pour lesquelles le lithium-ion est d'ores et déjà compétitif sont visées avec des critères de fiabilité prépondérants et des coûts d'usage projetés de 0,2 €/kWh restitué (contre 0,5-2 €/kWh pour la technologie plomb).

La technologie lithium-ion sera probablement le moyen d'atteindre des durées de vie du stockage égales à celles des modules photovoltaïques, soit 20 à 25 ans.

### Les systèmes connectés au réseau

#### Un réseau électrique en pleine évolution

Depuis cinq ans, nous assistons à un bouleversement des réseaux électriques des pays développés en raison de plusieurs facteurs :

- la volonté de limiter les sources énergétiques émettrices de CO<sub>2</sub>, encouragée par les directives européennes (*Livre blanc*) ou mondiales (protocole de Kyoto) ;
- la libéralisation du marché de l'électricité induisant des retours sur investissement des moyens de production classiques plus incertains et privilégiant ainsi une multiplicité de sources de production décentralisées (figure 4).

Dans ce contexte de distribution décentralisée, le stockage de l'électricité a un rôle primordial à jouer. Outre son utilité pour pallier aux variations de la production électrique, il permet de s'adapter à la demande en injectant à n'importe quel moment sur le réseau l'énergie préalablement stockée. C'est un vecteur temporel de l'électricité.

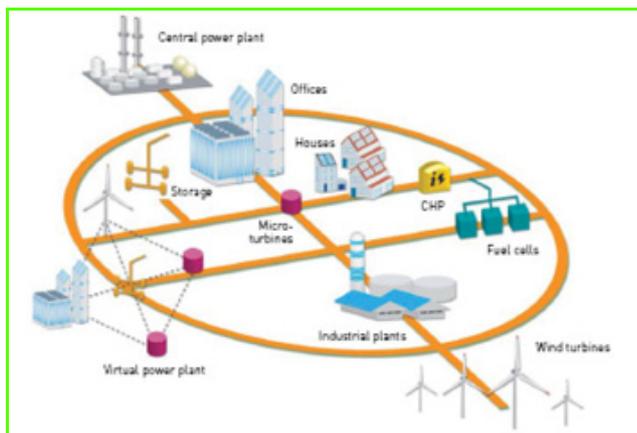


Figure 4 - Configuration de réseau électrique présentant des sources de production décentralisées.

Par ailleurs, on distingue différentes missions de stockage présentant des besoins ou périodes de stockage différents (tableau I). Ces missions constituent toutes des applications potentielles du dispositif de stockage.

Tableau I - Exemple d'applications de stockage connecté au réseau et durées de décharge associées.

Applications	Durées de la décharge	
	Minimum	Maximum
- Lissage de pointes	4 heures	10 heures
- Support du réseau de transmission	2 secondes	5 secondes
- Gestion de la demande	4 heures	12 heures
- Qualité de courant	10 secondes	1 minute
- Secours	15 minutes	5 heures

### Une multiplicité de systèmes de stockage en fonction des applications

Afin de répondre aux besoins étendus des systèmes connectés au réseau en matière de puissance, de temps de réponse et de durée de décharge, différentes technologies de stockage sont envisagées.

Pour de faibles puissances, de l'ordre de 10 kW-crêtes (type habitat solaire), les batteries, notamment la technologie lithium-ion, sont les plus intéressantes pour des applications de secours ou de lissage de pointe (figure 5a). Les supercondensateurs seront quant à elles utilisées avec des profils de microcyclage pour les applications de qualité de courant.

Pour de plus fortes puissances, de l'ordre de 100 kW-crêtes (type usine ou lotissement pour le lissage de pointe), les batteries sodium-soufre (figure 5b) fonctionnant à haute température ou les systèmes redox à circulation d'électrolyte (figure 5c) présentent un grand intérêt en termes de compacité et de cyclabilité [6].

Enfin, pour les puissances très élevées, de l'ordre de 1 mégawatt-crête (type centrale de production), des systèmes de stockage présentant des investissements initiaux lourds liés à la construction d'infrastructures (hydraulique avec pompage, compresseurs d'air couplés à des turbines à gaz [7]) peuvent être amortis en engendrant des coûts additionnels faibles.

### Le stockage connecté au réseau, un enjeu majeur pour la recherche

Batteries conventionnelles ou avancées, systèmes de stockage mécaniques de différentes puissances, l'essor des



Figure 5 - (a) : Exemple de système de stockage lithium-ion envisagé pour l'habitat solaire connecté au réseau ; (b) : Batteries sodium-soufre ; (c) : Batteries redox à circulation d'électrolyte.

systèmes photovoltaïques connectés au réseau implique le déploiement de toutes ces technologies de stockage. Si l'adéquation entre technologie et application constitue un premier axe de recherche, le développement des interfaces électroniques adaptées, présentant les niveaux de tension nécessaires est également prépondérant.

Enfin, en fonction de la localisation des systèmes de stockage sur le réseau électrique (génération, transmission ou distribution), une approche d'identification des bénéfices liés à ces systèmes est indispensable car elle permettra la sélection finale des différentes solutions énergétiques, notamment sur la base des critères des coûts (en €/kWh restitués).

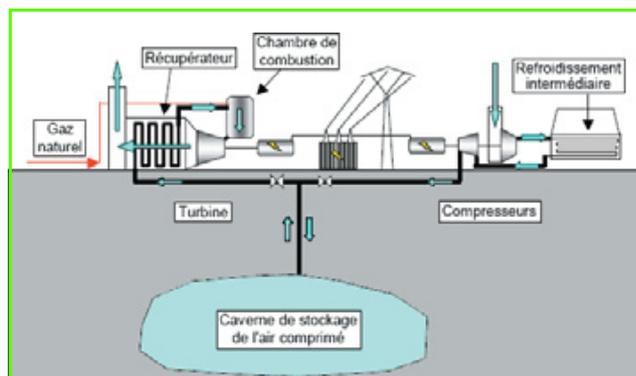


Figure 6 - Caverne équipée de compresseurs d'air couplés à des turbines à gaz.

### Références

- [1] Srinivasan V., Wang G.Q., Wang C.Y., *Journal of Electrochemical Society*, **2003**, 150, p. A316.
- [2] Kirchev A., Delaille A., Perrin M., Lemaire E., Mattera F., *Journal of Power Sources*, **2007**, 170, p. 495.
- [3] Delaille A., Perrin M., Huet F., Hernout L., *Journal of Power Sources*, **2006**, 158(2), p. 1019.
- [4] Perrin M., Malbranche P., Lemaire-Potteau E., Willer B., Soria M.L., Jossen A., Dahlen M., Ruddell A., Cyphelly I., Semrau G. *et al.*, *Journal of Power Sources*, **2006**, 154(2), p. 545.
- [5] Mattera F., Merten J., Mourzaghi D., Sarre G., Marcel J.C., Lithium batteries in stand alone photovoltaic applications, 22<sup>nd</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Milan, 3-7 septembre **2007**.
- [6] VRB Power Systems : [www.vrbpower.com](http://www.vrbpower.com)
- [7] Multon B., Ruer J., *Stockage de l'énergie électrique : état de l'art*, Diaporama ECRIN, 15 février **2007**.

#### Florence Mattera

est chef de projets Stockage Photovoltaïque au Laboratoire des Systèmes Solaires, CEA\*.

\* CEA-INES, BP 332, 50 avenue du Lac Léman, 73377 Le Bourget du Lac.  
Courriel : [florence.mattera@cea.fr](mailto:florence.mattera@cea.fr)