

# LE STOCKAGE DE L'ÉLECTRICITÉ



Un défi pour la transition énergétique

# Le stockage de l'électricité

Un défi pour la transition énergétique

**L***avoisier*  
**TEC & DOC**

[editions.lavoisier.fr](http://editions.lavoisier.fr)



# Préface

Dès le XIX<sup>e</sup> siècle, la révolution industrielle a accéléré le besoin en énergie. La force mécanique de la vapeur, puis l'électricité, symbole de modernité, transforment le quotidien et l'industrie. De nombreux scientifiques cherchent alors les moyens de domestiquer l'électricité pour qu'elle délivre son extraordinaire pouvoir à la demande : c'est le début de la quête des meilleures techniques de stockage de l'électricité. Gaston Planté invente ainsi dès 1859 l'accumulateur au plomb. 150 ans plus tard, cette quête se poursuit, à l'échelle mondiale, avec une pertinence et une dynamique renouvelées.

En 1937, le peintre Raoul Dufy réalise une immense fresque au titre emblématique « La Fée Électricité » ! Ce titre reflète pleinement le rôle de l'électricité dans le développement économique du XX<sup>e</sup> siècle et son identification à la modernité. Au fil des années, les usages de l'électricité se multiplient grâce à son universalité et sa plasticité pour améliorer la performance de l'industrie, la qualité des transports, le confort des habitats et rendre possible le développement des technologies de l'information. L'électricité, devenue banale dans les pays développés grâce à la très grande fiabilité des réseaux électriques de transport et de distribution, mais toujours attendue par plus d'un milliard d'êtres humains, s'efface derrière ses usages et est devenue indispensable, y compris maintenant pour la mobilité. Sans exhaustivité, pensons à l'éclairage de nos lieux de vie, aux produits électroménagers et multimédia, aux transports collectifs, aux voitures électriques, aux équipements des bâtiments résidentiels ou tertiaires tels qu'ascenseurs, climatisations ou pompes à chaleur, aux progrès de la grande distribution et de l'industrie, et aussi aux équipements urbains (éclairage public, signalisation, etc.).

La transition au niveau mondial d'une économie encore très carbonée vers une économie décarbonée à 80 % passe par un rôle croissant des vecteurs d'énergie faiblement carbonés dans chacun des secteurs :

- un système électrique insulaire comme l'île de la Réunion, avec un équilibre production-consommation fragile et une puissance installée d'environ 1 GW.
- un système électrique européen interconnecté, regroupé au sein de l'association des transporteurs européens l'ENTSO-E, qui s'étend de l'Atlantique à l'Oural, dessert plus de 530 millions de personnes et dispose d'une puissance installée totale de plus de 1 000 GW.
- un système électrique chinois dont la puissance installée croît très rapidement et souffrant parfois d'un manque de résilience. Ainsi, en 2014, 109 GW de capacité de production électrique supplémentaire ont été mis en service.

Ce sont autant de systèmes électriques, où la transition vers moins ou plus de combustibles fossiles va s'exprimer différemment tant en termes de rythme d'évolution qu'en termes de solutions techniques mobilisées. L'état actuel des moyens de production électrique de chacun de ces systèmes électriques et son évolution future définissent les besoins en flexibilité pour assurer l'équilibre entre production et consommation et la stabilité globale ou locale du réseau. Ces besoins peuvent être couverts par plusieurs techniques : ajustements de la production, modulation de la demande, interconnexions ou stockage d'électricité, etc.

Le stockage d'électricité correspond à la famille de technologies la plus vaste parmi celles du stockage, plus général, d'énergie. Celui-ci revêt des formes multiples dépendant des vecteurs d'entrée et de sortie (électricité, chaleur, gaz...). Pour le stockage d'électricité, on trouve ainsi des technologies de stockage sous forme d'énergie mécanique (volant d'inertie, retenue d'eau en hauteur), électrochimique (batterie, batterie à flux), chimique (gaz produit par électrolyse puis alimentant une pile à combustible), chacun d'eux ayant ses propres caractéristiques en termes de maturité, puissance, rendement d'énergie restituée, densité énergétique, rapidité de réponse, durée de vie ou encore cyclabilité ou sécurité.

Dès les années 1970, les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) de l'eau des barrages se développent et montrent l'intérêt économique du stockage d'électricité en France et dans plusieurs autres pays pour réaliser des transferts hebdo-journaliers permettant d'éviter le recours à des moyens de pointe carbonés et réduire le coût de production de l'énergie.

Pour le grand public, c'est certainement dans les domaines de la téléphonie mobile et de l'informatique portable que le stockage électrochimique a été le plus remarqué, avec l'utilisation des batteries lithium-ion. Ces développements phénoménaux de nouveaux usages ont aujourd'hui des retombées dans de nombreux domaines, dont celui de l'optimisation

du système électrique ou de la mobilité. Selon le scénario minimal de BNEF<sup>1</sup>, les véhicules électriques passeront d'environ 0,15 % des ventes mondiales de véhicules de tourisme en 2016 à 35 % des ventes à horizon 2040. On compte aujourd'hui 2 millions de véhicules électriques dans le monde, ce chiffre devrait être multiplié par 200 d'ici 2040. Il y a eu environ 700 000 nouveaux véhicules électriques immatriculés dans le monde en 2016 et on en attend 1 million supplémentaire en 2017.

Le développement de ces nouvelles applications induit en retour des gains de performances et accélère des baisses de prix des moyens de stockage ouvrant la voie à des nouvelles applications pour le stockage stationnaire dans les systèmes électriques, au profit d'une plus grande décarbonation de l'économie. Car c'est un enjeu écologique et économique majeur !

Le stockage de l'électricité est déjà utilisé dans les petits systèmes électriques pour accompagner la progression des énergies renouvelables variables. La fourniture de services systèmes par des stockages pour contribuer à l'équilibre offre demande est déjà une réalité dans plusieurs zones du monde. Pour déterminer et dimensionner ces stockages, la vitesse de mise à disposition (i.e. la réactivité), la durée du besoin d'électricité à servir (i.e. l'énergie) et la profondeur de ce besoin (i.e. la puissance) sont trois exemples de paramètres à intégrer.

Pour se déployer encore plus, les solutions de stockage électrique font encore face à de nombreux défis : baisse de coûts du système global, augmentation des rendements de conversion, sécurisation avec retrait des composants potentiellement nocifs ou présentant un risque d'indisponibilité, augmentation de la durée de vie, maîtrise du vieillissement, recyclage et régulation à mettre en place, et pour les batteries, amélioration du procédé de production des cellules, utilisation en seconde vie après un usage en mobilité, nouvelles chimies telles que le métal-air. Un plan d'action de recherche collaborative est à poursuivre, intégrant aussi des pilotes et des démonstrateurs pour confirmer les résultats des travaux plus amont.

Mais, les progrès des systèmes de stockage de l'électricité sont d'ores et déjà très rapides et créent de nouvelles opportunités pour élaborer des solutions répondant aux attentes des populations d'avoir accès à une électricité fiable, peu chère ou renouvelable et locale.

Ce progrès ouvre ainsi la voie à l'accès à l'électricité pour des centaines de millions de personnes qui en étaient privées. Pour le milliard de personnes qui n'ont pas encore accès à l'électricité, et qui vivent dans des zones très ensoleillées, un kit constitué d'un panneau photovoltaïque

---

1. Bloomberg New Energy Finance

de quelques dizaines de watts et d'une batterie d'une centaine de watt x heure constitue une solution locale apportant la télévision, de la lumière et la recharge d'un téléphone portable !

Dans les pays disposant d'infrastructures de réseaux, le stockage d'électricité va permettre de nouveaux équilibres. Dans les pays de l'OCDE, on observe actuellement une envie de « systèmes énergétiques locaux », systèmes qui visent à traiter à une maille locale les questions énergétiques dans leur ensemble : chaleur, climatisation, gaz méthane, carburants, électricité. Les nouvelles performances des stockages d'électricité ou de chaleur contribuent à apporter des solutions énergétiques locales.

Pour l'électricité, le stockage va permettre aussi, selon le contexte, des solutions d'autoconsommation partielle. Les systèmes associant panneaux photovoltaïques et batteries pourront être un complément à l'énergie toujours nécessaire apportée par des réseaux électriques fiables et centralisés.

Citons l'exemple d'une maison individuelle pour 4 personnes du bassin méditerranéen. Avec la régulation actuelle, notamment sur les frais d'accès au réseau et la fiscalité, une batterie de 10 kWh, installée dans le garage, et couplée à une installation PV de 3,6 kWc, en 2020, une famille pourrait atteindre un taux d'autoconsommation de 70 % moyennant un surcoût inférieur à 5 000 € sur 20 ans<sup>2</sup>. Ainsi dans les territoires irrigués par un réseau électrique, les moyens de production centralisés et mis en commun resteront encore longtemps un complément nécessaire aux solutions locales.

Entre ces deux situations extrêmes, l'accès basique à l'électricité en l'absence de réseau et l'autoproduction en complément du réseau, il y a autant de solutions techniques de stockage que de systèmes électriques et de situations géographiques. Il s'agit de trouver « les bonnes solutions au bon endroit et au bon moment » !

Les solutions développées par EDF à travers le monde commencent à écrire cette nouvelle histoire du stockage électrique dans les systèmes électriques. On peut ainsi citer le projet Toucan<sup>3</sup> en Guyane, le projet PEGASE<sup>4</sup> sur l'île de la Réunion, le projet Mac Henry<sup>5</sup> dans l'Illinois aux

---

2. En revanche, il faudrait une batterie de 60 kWh et une installation PV de 9 kWc de PV pour atteindre une autonomie énergétique complète, ce qui doublerait l'investissement initial de la maison.

3. Projet Toucan : projet PV + batteries en Guyane (5 MWc de PV, 1,5 MW/4,5 MWh de batteries « ZEBRA ») mené par EDF EN.

4. Projet PEGASE : système de 1 MW de batteries pour lisser les productions photovoltaïques variables, projet mené par SEI.

5. Projet Mac Henry : système de batteries Li-ion d'une puissance de 20 MW pour fournir des services de réglage de fréquence dans la zone PJM aux USA, projet mené par EDF RE.

transport, industrie, habitat. Les énergies renouvelables (chaleur renouvelable, biocarburants, biogaz, électricité renouvelable) et le nucléaire figurent parmi les solutions techniques majeures pour atteindre les objectifs réaffirmés lors de la conférence internationale pour la lutte contre le dérèglement climatique, COP 21, à Paris en 2016. C'est un vrai défi que la mise en œuvre des moyens techniques et organisationnels permettant de limiter effectivement l'accroissement de température à 2 °C en 2100.

L'Agence internationale de l'Énergie (AIE), estime ainsi dans son scénario central que le vecteur électricité, de plus en plus décarboné, a un rôle majeur à jouer : la consommation mondiale d'électricité devrait ainsi doubler d'ici 2050, prenant une part de plus en plus grande dans la consommation totale d'énergie. La consommation d'électricité continuera d'augmenter dans les pays industrialisés, par substitution de la consommation finale d'autres énergies carbonées, comme les produits pétroliers dans les transports et le méthane (gaz naturel) pour le chauffage, mais l'essentiel de la croissance proviendra des pays hors OCDE qui seront à l'origine de plus de 85 % de la croissance mondiale. La croissance économique devrait conduire à une forte augmentation de la consommation d'électricité, principalement en Asie (croissance annuelle d'environ 4 % en Inde et en Chine) et en Afrique (croissance annuelle supérieure à 1 %). En Afrique subsaharienne, il devrait rester plus d'un demi-milliard de personnes qui n'auront toujours pas accès à l'électricité en 2040 contre 1,2 milliard aujourd'hui à l'échelle de la planète.

Mais la croissance de la demande d'électricité doit se faire, au niveau mondial, en assurant qu'on réduira drastiquement les émissions de CO<sub>2</sub> liées à sa production. Réduire, voire supprimer, les productions à partir de charbon, de pétrole ou de méthane, à défaut d'une solution économique et fiable de capture et stockage du CO<sub>2</sub> émis, est donc un des enjeux de la transition énergétique mondiale et le stockage d'électricité va y aider.

Pour décarboner les différents systèmes électriques qui existent et se développent, il faut tenir compte de leur diversité, liée aux spécificités de leur territoire, tant en termes de ressources énergétiques que de besoins et attentes de leurs usagers. En voici quelques exemples :

- une habitation africaine dans un village isolé sans accès au réseau électrique, pour lequel un système photovoltaïque d'une puissance de quelques dizaines de watts (W) apporte la lumière, la télévision et la recharge du téléphone portable.
- une maison individuelle du bassin méditerranéen, raccordée au réseau, qui autoproduit 70 % de sa consommation avec une puissance de 5 kWc de panneaux photovoltaïques.



États-Unis, le projet ZECI<sup>6</sup> en Côte d'Ivoire, ou l'offre « Mon soleil et Moi<sup>7</sup> » en France métropolitaine !

Le stockage de l'électricité devient une réalité qui accompagne la décarbonation de l'économie par son électrification, en ouvrant la voie à de multiples solutions alliant production locale et centralisée, grands systèmes et petits systèmes à l'échelle de la maison, du quartier ou du territoire.

Le stockage d'électricité est-il la nouvelle baguette magique de la « Fée Électricité » ? Cet ouvrage a vocation à vous proposer des clés pour comprendre l'importance du stockage pour réussir la transition énergétique mondiale vers moins de combustibles fossiles et d'émissions de gaz à effet de serre et les challenges techniques et économiques que le stockage doit relever pour y parvenir efficacement.

## Contributeurs

Cet ouvrage est le fruit d'un travail collaboratif de 16 chercheurs d'EDF spécialistes du domaine. Il se veut le reflet pédagogique de leur savoir et expérience.

### **Jean-Baptiste Bart**

Jean-Baptiste Bart est chef délégué du département « Économie, Fonctionnement & Études des Systèmes Énergétiques » à la Direction Recherche et Développement d'EDF. Depuis 2001, au sein de diverses entités du groupe EDF, il travaille dans le domaine des marchés de l'énergie, des réseaux de transport de l'électricité et du stockage. Il est également vice-président du club Stockage de l'ATEE. Il est diplômé de l'École Supélec.

### **Emmanuel Bénéfice**

Emmanuel Bénéfice est diplômé de l'École Polytechnique et Télécom ParisTech, il a piloté de nombreux projets techniques et été administrateur de plusieurs sociétés de l'Internet et du numérique. Il a également managé une unité commerciale d'EDF et a occupé le poste de directeur marketing d'EDF Entreprises. Il dirige ZnR Batteries, une jeune entreprise française filiale d'EDF qui développe des batteries de technologie zinc-air.

### **Thierry Brincourt**

Diplômé de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers en 1991, Thierry Brincourt a intégré la Direction Recherche et Développement

---

6. Projet ZECI : partenariat entre EDF et l'entreprise Offgrid Electric pour commercialiser des kits PV + batteries en Côte d'Ivoire.

7. Offre « Mon Soleil & Moi » : offre d'autoconsommation proposée par EDF ENR Solaire.

d'EDF en 1993. Il travaille depuis 2003 sur le sujet du stockage d'énergie et du véhicule électrique. Il est actuellement responsable du projet Mobilité Électrique, Recharge Innovante et Technologies Exploratoires en animant une équipe de 20 personnes sur différentes thématiques : développement des infrastructures de charge, essais de véhicules, impacts sur le système électrique et l'analyse environnementale.

### **Annabelle Brisse**

Annabelle Brisse est chef de projet à l'institut européen de recherche sur l'énergie (EIFER) en Allemagne. Après son doctorat en électrochimie de l'Université Joseph Fourier réalisé au CEA sur les piles à combustible, elle a rejoint EIFER en 2009. Elle gère les activités de recherche sur la chaîne de valeur de l'hydrogène, des fondamentaux des technologies de production par électrolyse aux usages de l'hydrogène (industrie, mobilité et production d'électricité).

### **Albannie Cagnac**

Diplômée en Mathématiques appliquées et Statistiques, Albannie Cagnac a intégré Direction Recherche et Développement d'EDF en 2005 dans le département de Management des Risques Industriels. Elle a, durant 7 années, piloté différentes études sur la fiabilité des composants et des structures et sur une approche plus transverse du Retour d'Expérience pour différents modes de production d'électricité. En 2012, elle a intégré le groupe de Prospective Technologique et Procédés Innovants où elle pilote les études liées au stockage de masse CAES et un projet sur les cycles thermodynamiques innovants.

### **Gauthier Delille**

Gauthier Delille est Docteur en génie électrique (2010) et ingénieur de l'École Centrale de Lille (2007). Il a rejoint la Direction Recherche et Développement d'EDF en 2010 et a notamment travaillé sur l'insertion des énergies renouvelables et du stockage d'énergie dans les réseaux électriques. Chef de projet depuis 2015, il anime des activités de recherche sur la participation de la production renouvelable et du stockage au fonctionnement des systèmes électriques. Gauthier a contribué au développement de plusieurs installations de stockage par batteries : 2 MW dans le cadre du démonstrateur VENTEEA (centrale multi-service), 20 MW aux États-Unis (centrale dédiée au réglage de la fréquence), etc.

### **Timothée Hinchliffe**

Timothée Hinchliffe est responsable d'un projet sur l'économie du stockage d'énergie à la Direction Recherche et Développement d'EDF. Ses champs de recherche portent sur l'évaluation des besoins en stockage par l'analyse des différents services fournis et la prise en compte de la compétition/complémentarité avec les autres moyens de flexibilité

(interconnexions, flexibilité de la production, etc.). Timothée est diplômé de l'École Supélec.

### **Élodie Jeandel**

Élodie Jeandel est docteur en Géochimie de l'Université Paris Sud en collaboration avec l'Institut Français du Pétrole et des Énergies Nouvelles. Ingénieure de recherche à EIFER depuis 2008, elle travaille sur des sujets de géoscience de l'énergie : stockage géologique (du carbone, d'énergie) et géothermie, ainsi que sur la ville durable. Elle réalise des études de potentiels géologiques, d'évaluation des risques et des technologies sous-sol.

### **Gilles Lancel**

Gilles Lancel est ingénieur de l'École Chimie ParisTech et docteur en physique et chimie des matériaux. Il travaille à la Direction Recherche et Développement d'EDF sur les aspects technico-économiques du stockage stationnaire de l'énergie, comme le vieillissement des batteries lithium-ion, l'insertion des énergies renouvelables dans les systèmes électriques et l'autoconsommation.

### **Thierry Lefebvre**

Thierry Lefebvre est actuellement responsable du programme Gestion performante des Infrastructures des réseaux de Transport à la Direction Recherche et Développement d'EDF. Il a été toujours très impliqué au CIGRE (membre éminent) et dans la normalisation internationale IEC (président pendant 15 ans du comité Power Systems Management & Associated Communications) ou CENELEC (membre du conseil d'administration). Il est également président du comité français AFNOR sur les systèmes de stockage (UF120).

### **Philippe Loevenbruck**

Philippe Loevenbruck est diplômé de l'École Centrale de Paris en 1986. Il rejoint EDF en 1987 et travaille successivement sur les problèmes de système électrique : réglage de fréquence et reconstitution du réseau après un incident généralisé, et de réseaux de distribution : courbes de charge, économie de la distribution d'électricité et stockage décentralisé.

### **André Nekrasov**

Ingénieur de formation, diplômé de l'École Sup'Aero, André Nekrasov a rejoint la délégation d'EDF en Russie en 1998 en tant qu'ingénieur d'affaires. Depuis 2002, il est chercheur, chef de projet, puis chercheur expert au sein du département « Économie, Fonctionnement et Études des Systèmes Énergétiques » de la Direction Recherche et Développement d'EDF. Son domaine d'expertise couvre, entre autres, la régulation et les analyses technico-économiques du stockage et des réseaux intelligents.

**Emmanuel Pastor**

Emmanuel Pastor est ingénieur de recherche au Département « Économie du Fonctionnement des Systèmes Énergétiques » de la Direction Recherche et Développement d'EDF. Diplômé de l'INSA Toulouse, il travaille sur les réseaux de chaleur, la production de chaleur et d'électricité décentralisée assistée de stockage et leurs interactions possibles avec le réseau électrique européen (équilibre offre-demande, services système). Il analyse et met au point de nouveaux modèles d'affaires liés à ces fonctionnements (VPP, P2H, Effacement).

**Jean-François Penneau**

Jean-François Penneau est docteur en électrochimie de l'Université de Grenoble au sein du CEA de Grenoble. Il est ingénieur chercheur à la Direction Recherche et Développement d'EDF depuis 1992. Il a travaillé successivement dans les domaines des liquides diélectriques, du montage d'offres pour la Direction Commerce d'EDF, de la gestion d'énergie dans le résidentiel, du stockage de l'énergie et du photovoltaïque. Actuellement dans le département « Laboratoire des Matériels Électriques », il est en charge de la qualification des condensateurs de puissance pour Enedis et du développement du stockage capacitif pour les applications du réseau électrique HTA.

**Etienne Radvanyi**

Etienne Radvanyi est docteur en électrochimie et ingénieur de l'École Centrale Paris. Il travaille depuis 2014 au sein du « Laboratoire des Matériels Électriques » de la Direction Recherche et Développement d'EDF. Ses projets de recherche portent sur l'utilisation des systèmes de stockage dans les réseaux isolés.

**Robert Soler**

Robert Soler est Ingénieur-Sénieur à la Direction Recherche et Développement d'EDF. Diplômé de l'INSA de Lyon, il a débuté sa carrière à EDF en 1988 dans la Distribution puis a rejoint la Direction des Études et Recherches (R&D d'EDF de l'époque) un an plus tard. Il a vingt ans d'expérience dans le domaine de l'énergie solaire et travaille actuellement sur les thèmes des énergies renouvelables et du stockage d'énergie. Il est Maître de Conférences à l'Institut des Sciences et Techniques du Nucléaire, et chargé de cours à l'École CentraleSupélec et à l'EPF École d'Ingénieurs.

**Philippe Stevens**

Philippe Stevens est ingénieur de recherche senior à la Direction Recherche et Développement d'EDF. Docteur en chimie de l'Université de Manchester, il a travaillé à l'Université d'Oxford et au CEA avant de rejoindre le groupe EDF pour travailler sur le développement des piles

à combustible, la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau, les batteries et le stockage thermique saisonnier. Il est l'auteur de plus de 20 brevets et 50 publications et a reçu le Grand Prix de l'Académie des Sciences en 2005.

### **Laurent Torcheux**

Laurent Torcheux est docteur en chimie physique de l'Université Paris 7 Denis Diderot. Il a débuté sa carrière au début des années 1990 à IBM sur les études de contamination du silicium pour la microélectronique. Après 4 années, il a rejoint ensuite le service recherche du fabricant de batteries CEAC Exide pendant 7 ans. Arrivé en 2002 à la Direction Recherche et Développement d'EDF pour s'occuper de projets innovants sur les batteries et le montage des laboratoires d'essais des batteries lithium ion. Il est chef du groupe « Technologie batteries et chimie de matériaux » depuis 2010.

# Table des matières

|   |    |
|---|----|
| <b>1. Introduction</b> .....  | 1  |
| <b>2. Le contexte</b> .....   | 3  |
| <b>3. Les technologies de stockage</b> .....  | 5  |
| 3.1. Le stockage direct de l'électricité.....   | 5  |
| 3.1.1. <i>Station de Transfert d'Énergie par Pompage</i> .....                                  | 5  |
| 3.1.2. <i>Stockage d'énergie par air comprimé (CAES ou Compressed Air Energy Storage)</i> ..... | 9  |
| 3.1.2.1. CAES gaz.....  | 10 |
| 3.1.2.2. CAES adiabatique .....   | 12 |
| 3.1.2.3. CAES isotherme .....   | 13 |
| 3.1.3. <i>Volants d'inertie</i> .....   | 14 |
| 3.1.4. <i>Batteries électrochimiques</i> .....  | 18 |
| 3.1.4.1. Batteries au plomb .....   | 21 |
| 3.1.4.2. Batteries alcalines .....  | 24 |
| 3.1.4.2.1. Batteries Nickel-Cadmium .....   | 24 |
| 3.1.4.2.2. Batteries Nickel-Métal Hybride.....  | 25 |
| 3.1.4.3. Batteries au sodium.....   | 26 |
| 3.1.4.3.1. Batteries NaS.....   | 26 |
| 3.1.4.3.2. Batteries Zebra.....   | 30 |
| 3.1.4.3.3. Batteries Sodium-ion .....   | 32 |
| 3.1.4.4. Batteries au lithium .....   | 33 |
| 3.1.4.4.1. Batterie lithium métal polymère (LMP).....   | 34 |
| 3.1.4.4.2. Batterie lithium ion .....   | 35 |
| 3.1.4.4.3. Batteries au lithium de nouvelle génération .....                                    | 39 |
| 3.1.5. <i>Batteries métal-air</i> .....   | 40 |
| 3.1.5.1. Batteries Lithium air .....  | 40 |
| 3.1.5.2. Batteries Zinc air.....  | 42 |
| 3.1.6. <i>Batteries redox flow</i> .....  | 43 |
| 3.1.7. <i>Supercondensateurs</i> .....  | 46 |

|  |    |
|--|----|
| 3.2. Le stockage thermique et le stockage d'hydrogène .....  | 50 |
| 3.2.1. <i>Stockage thermique</i> .....   | 50 |
| 3.2.1.1. Power to heat.....  | 51 |
| 3.2.1.1.1. Ballons d'eau chaude sanitaire.....   | 51 |
| 3.2.1.1.2. Le stockage thermique court terme utilisé<br>par les centrales virtuelles .....           | 52 |
| 3.2.1.1.3. Le stockage thermique sensible intersaisonnier .....                                      | 53 |
| 3.2.1.2. Heat to power .....   | 54 |
| 3.2.1.2.1. Technologie tampon à « eau pressurisée »<br>(stockage de court terme) .....               | 55 |
| 3.2.1.2.2. Technologie « Sels fondus » (stockage<br>de long terme).....                              | 55 |
| 3.2.2. <i>Stockage d'hydrogène</i> .....   | 56 |
| 3.2.2.1. Le stockage sous forme de gaz comprimé .....  | 57 |
| 3.2.2.2. Le stockage d'hydrogène sous forme liquide.....   | 59 |
| 3.2.2.3. Le stockage massif en cavités souterraines<br>salines.....                                  | 60 |
| 3.2.2.4. Les technologies d'électrolyse de l'eau<br>et les piles à combustible.....                  | 61 |
| 3.2.2.4.1. Les technologies d'électrolyse.....   | 61 |
| 3.2.2.4.2. Les technologies de pile à combustible.....   | 63 |
| 3.3. La normalisation des technologies de stockage .....   | 66 |
| <b>4. Les grands services du stockage pour le système<br/>électrique</b> .....                       | 71 |
| 4.1. Quels noms pour quels services ? .....  | 72 |
| 4.2. L'arbitrage temporel, ou l'optimisation de la production.....                                   | 73 |
| 4.3. Le réglage de fréquence .....   | 77 |
| 4.4. La résolution des contraintes de réseau .....   | 81 |
| 4.5. Le lissage local de la production PV et éolienne.....   | 84 |
| 4.6. Comment augmenter l'autoconsommation<br>d'un producteur PV ?.....                               | 85 |
| 4.7. Le secours et l'amélioration de la continuité de fourniture.....                                | 88 |
| 4.8. Comment favoriser l'accès à l'énergie ? .....   | 89 |
| <b>5. Les perspectives : la place du stockage de demain</b> .....                                    | 91 |
| 5.1. La mobilité électrique .....  | 91 |
| 5.1.1. <i>Les enjeux</i> .....   | 91 |
| 5.1.2. <i>Les différents types de véhicules électriques</i> .....                                    | 92 |
| 5.1.3. <i>La batterie, un élément clé</i> .....  | 93 |
| 5.1.4. <i>Le nécessaire développement des infrastructures<br/>                de charge</i> .....    | 96 |
| 5.1.5. <i>Un marché mondial en forte croissance</i> .....  | 97 |
| 5.2. Les marchés en émergence.....   | 99 |
| 5.2.1. <i>Favoriser l'intégration des énergies renouvelables<br/>                variables</i> ..... | 99 |

---

|   |     |
|---|-----|
| 5.2.2. <i>Le stockage pour le réglage de fréquence dans les systèmes électriques</i> .....  | 100 |
| 5.2.3. <i>Électrification de zones isolées</i> .....  | 102 |
| 5.3. Quelques scénarios de développement à venir .....  | 102 |
| 5.3.1. <i>Scénarios « Tendance de fond » : quel futur pour le stockage dans les systèmes électriques ?</i> .....                            | 103 |
| 5.3.1.1. Le stockage dans un système interconnecté avec une forte pénétration des énergies renouvelables (photovoltaïque et éolienne) ..... | 104 |
| 5.3.1.2. Le stockage pour satisfaire le besoin en flexibilité d'un système isolé .....  | 105 |
| 5.3.1.3. Le Stockage pour équiper les réseaux électriques en développement .....  | 106 |
| 5.3.2. <i>Scénarios « Pressions externes » : quels vecteurs de déploiement du stockage ?</i> .....  | 107 |
| 5.3.2.1. Les véhicules électriques (VE) ou hybrides rechargeables (VHR) .....   | 107 |
| 5.3.2.2. Le stockage « domestique » .....   | 108 |
| 5.4. Les challenges à relever .....   | 108 |
| <b>6. Conclusion</b> .....  | 111 |



# Introduction

EDF Lab, 15 février 2017.

Ce livre est une photo du savoir et du savoir-faire de la R&D d'EDF en matière de stockage de l'électricité, des différentes technologies et de leurs applications aux systèmes électriques.

Le livre dresse, en premier lieu, un panorama détaillé des technologies de stockage de l'électricité, en marquant volontairement une distinction entre les systèmes de stockage direct de l'électricité et les systèmes de stockage de l'électricité *via* le stockage thermique et le stockage d'hydrogène.

On définit par stockage direct de l'électricité, les technologies qui convertissent l'électricité en une autre énergie (chimique, cinétique, compression, etc.) puis la reconvertissent systématiquement en électricité. Parmi ces technologies de stockage, les batteries électrochimiques sont les plus connues du grand public. Il faut néanmoins citer les STEP (Station de Transfert d'Énergie par Pompage), technologie de stockage la plus ancienne et la plus développée, ainsi que d'autres technologies comme le stockage d'énergie par air comprimé (CAES), les volants d'inertie, etc.

Une autre famille de stockage mise en avant dans l'ouvrage correspond au stockage de l'électricité *via* d'autres vecteurs énergétiques : le stockage thermique (avec l'exemple des ballons d'eau chaude sanitaire) et le stockage d'hydrogène (avec l'exemple des voitures hydrogène) qui vont permettre de différer l'usage de la production électrique (avec parfois une étape de reconversion vers l'électricité).

Après une revue détaillée des différentes technologies de stockage, l'ouvrage s'attache à mettre en relief les grands services que celui-ci

rend au système électrique, de l'optimisation de la production de grands réseaux maillés à l'électrification rurale de pays émergents. C'est le propos de la seconde grande partie du livre.

La troisième partie ouvre sur une réflexion plus large sur les perspectives de ces technologies, au regard des usages d'aujourd'hui et de demain dans les systèmes électriques.

*Remerciements à l'ensemble des contributeurs :*

*Cet ouvrage est le fruit d'un travail collaboratif et collectif de 18<sup>e</sup> chercheurs d'EDF spécialistes du domaine, dont les profils sont présentés après la préface. Il se veut le reflet pédagogique des savoirs et expériences de la R&D d'EDF en matière de stockage.*

*Il a été coordonné par Jean-Baptiste Bart, Étienne Brière, Alain Burtin, Jean-Paul Chabard, Stéphane Dupré La Tour, Sandrine Dyèvre, Salomé Kradaoui, François Molho, Stéphanie Muller, Bernard Salha et Laurent Torcheux.*

---

8. L'ouvrage a été rédigé par Jean-Baptiste Bart, Emmanuel Bénéfice, Thierry Brincourt, Annabelle Brisse, Albannie Cagnac, Gautier Delille, Timothée Hinchliffe, Elodie Jeandel, Gille Lancel, Thierry Lefebvre, Philippe Loevenbruck, André Nekrasov, Emmanuel Pastor, Jean-François Penneau, Etienne Radvanyi, Robert Soler, Philippe Stevens et Laurent Torcheux.

# Le contexte

Un système électrique peut difficilement se concevoir sans stockage d'énergie. Et pourtant l'électricité ne se stocke pas et il faut à chaque instant assurer l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité. Ceci est vrai pour les petits systèmes électriques insulaires ou isolés mais également à la maille des grands réseaux interconnectés continentaux.

Si l'électricité ne se stocke pas en tant que telle, la gestion des systèmes électriques s'appuie en général sur de grands stocks d'énergies qui constituent autant de sources potentielles d'électricité. Dans le cas de la France, c'est le combustible en réacteur des centrales nucléaires qui constitue le principal stock d'énergie : il s'agit d'un stock pluriannuel, les centrales nucléaires étant rechargées par quart ou tiers de cœur tous les 12 ou 18 mois. Les stocks neigeux et les grands barrages hydrauliques constituent des stockages saisonniers d'énergie, tandis que les écluses hebdomadaires et les ouvrages au fil de l'eau permettent de réguler l'énergie hydraulique en en faisant une source d'énergie renouvelable flexible. Les sources de combustibles fossiles permettent d'assurer le bouclage du système en extrême pointe, mais permettent également de compenser les aléas sur la production hydraulique en années sèches : les stocks de combustibles fossiles charbon, fioul et gaz représentent plusieurs mois de production. Du côté de la demande, le stockage de l'eau chaude sanitaire représente un levier de gestion à l'horizon journalier permettant de lisser les courbes de charge et de réduire le recours à des moyens de pointe pour un coût très faible. Le stockage centralisé d'électricité est assuré en France par les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage, il représente de l'ordre de 1 % de l'énergie produite en France et cible des services à forte valeur ajoutée. En résumé, c'est

le nucléaire, les combustibles fossiles et l'hydraulique qui fournissent l'essentiel des besoins de stockage du système électrique français (~ 90 %), les usages (stockages de chaleur et flexibilité de la demande) l'essentiel du complément (~10 %) et le stockage centralisé d'électricité moins de 1 %.

Au plan international, même si les mix électriques sont très différents, on retrouve des ordres de grandeur similaires pour le stockage stationnaire centralisé d'électricité.

L'émergence d'une production d'électricité renouvelable variable comme l'éolien et le photovoltaïque, qui, à la différence de l'hydraulique, ne se stocke pas, nécessite de développer de nouvelles sources de flexibilité et tend à changer la donne. Elle ouvre de nouvelles perspectives pour le stockage stationnaire d'électricité : utilisation de batteries pour le réglage rapide de fréquence, couplage de production photovoltaïque avec des batteries, etc.

Cette dynamique s'accompagne d'un développement des systèmes de stockage d'électricité pour des usages non connectés (mobiles, portables, etc), ainsi que pour la mobilité (véhicule électrique ou hydrogène).

Au-delà, les systèmes de conversion qui consomment de l'électricité pour restituer une autre forme énergétique stockable (chaleur, gaz, hydrogène, méthane, méthanol, etc), sans constituer à proprement parler des solutions de stockage d'électricité, sont des éléments potentiels de flexibilité des systèmes énergétiques futurs.

La question de l'économie du stockage d'électricité au sens large ne peut se concevoir sans considérer les solutions de conversion entre énergies, avec leurs rendements et pertes, ce qui nous renvoie aux lois de la thermodynamique... dans une vision multi-énergies.

Ces différentes questions sont abordées tout au long de cet ouvrage.





Développement des énergies renouvelables, émergence des systèmes électriques locaux, autoproduction et autoconsommation, mobilité électrique, baisse rapide des coûts des batteries, etc. : le stockage de l'électricité sous toutes ses formes est au cœur de la transition énergétique et de la lutte contre le réchauffement climatique. Cet ouvrage est indispensable pour comprendre les grands enjeux du stockage et les solutions techniques associées qui sont au centre des efforts de recherche et d'innovation des grands groupes et des start-up de l'énergie.

