

# Le stockage de l'énergie



*Sous la direction de*  
Pierre Odru

# Le stockage de l'énergie

François Badin  
Stéphane Biscaglia  
Jean Bonal  
Régine Clavreul  
Jean François Fauvarque  
Juliette Kauv  
Walid Lajnef  
Philippe Lefevre  
Hervé Lesueur  
Bernard Multon  
Sandrine Pincemin  
Alexandre Rojey  
Jacques Ruer  
Philippe Stevens

2<sup>e</sup> édition

DUNOD

Tout le catalogue sur  
[www.dunod.com](http://www.dunod.com)



Conception de la couverture : Raphaël Tardif

Photographie de couverture : VRD.Fotolia.com

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique

s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du

Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, Paris, 2010, 2013

ISBN 978-2-10-070209-1

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2<sup>o</sup> et 3<sup>o</sup> a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

# Table des matières

Liste des auteurs	vii
Avant-propos	ix
Introduction générale	1
Les défis du secteur de l'énergie	1
Stockage d'énergie et alternative énergétique	3
Stockage et efficacité énergétique	5
Les principales applications du stockage d'énergie	6
Les différents modes de stockage	7
Les critères de sélection du type de stockage à utiliser en fonction de l'application	9
Références	11
<b>Chapitre 1 : Le stockage d'électricité embarqué</b>	<b>13</b>
1.1 Le stockage embarqué appliqué aux véhicules terrestres	15
1.2 Les batteries électrochimiques	25
1.3 Les supercondensateurs	44
1.4 Le stockage inertiel	57
1.5 Conclusion générale stockage d'énergie embarqué	67
Références	70
<b>Chapitre 2 : Le stockage d'électricité stationnaire</b>	<b>73</b>
2.1 Besoins en stockage stationnaire d'électricité	76
2.2 Les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP)	83
2.3 Stockage d'énergie sous forme d'air comprimé	88
2.4 Stockage électrochimique stationnaire	97
2.5 Stockage sous forme d'hydrogène	103

## TABLE DES MATIÈRES

2.6 Le service réseau	110
2.7 Bilan et économie du stockage stationnaire	112
2.8 Conclusions	123
<b>Chapitre 3 : Le stockage de chaleur</b>	<b>125</b>
3.1 Stockage de chaleur latente ou sensible dans le bâtiment	127
3.2 Stockage géologique de chaleur	136
3.3 Stockage d'énergie thermique sous forme chimique et par sorption	149
3.4 Conclusion stockage de chaleur pour le bâtiment	158
3.5 Stockage de chaleur haute température pour l'électricité	159
Références	171
Conclusion générale	173
<b>Index</b>	<b>177</b>

# Liste des auteurs

## Ouvrage réalisé sous la coordination de Pierre Odru

**Avant-propos** de Stéphane Biscaglia, ADEME, ingénieur réseaux intelligents et stockage.

**Introduction** d'Alexandre Rojey, animateur du *think tank* IDées, Professeur à IFP School, ancien directeur développement durable à l'IFPEN.

## Chapitre 1

**1.1 Le stockage embarqué appliqué aux véhicules terrestres :** François Badin, directeur expert IFPEN et Pierre Odru, ingénieur principal de recherche IFPEN.

**1.2 Les batteries électrochimiques :** professeur Jean-François Fauvarque, Chaire d'électrochimie industrielle du CNAM.

**1.3 Les supercondensateurs :** Juliette Kauv, ingénieur de recherche 1re classe au département COSYS-LTN, IFSTTAR, et Walid Lajnef, post doctorant.

**1.4 Le stockage inertiel :** Jean Bonal, professeur, expert électronique de puissance – conversion d'énergie et Juliette Kauv.

## Chapitre 2

**2.1 Besoins en stockage stationnaire d'électricité** : Bernard Multon, professeur des universités à l'ENS Cachan, Pierre Odru.

**2.2 Les stations de transfert d'énergie par pompage** : Pierre Odru

**2.3 Stockage d'énergie sous forme d'air comprimé (CAES)** : Régine Clavreul et Philippe Lefevre, ingénieurs chercheurs, EDF

**2.4 Stockage stationnaire électrochimique** : Pierre Odru

**2.5 Stockage sous forme d'hydrogène** : Pierre Odru

**2.6 Autres stockages stationnaires** : Pierre Odru

**2.7 Bilan et économie** : Bernard Multon et Pierre Odru

## Chapitre 3

**3.1 Stockage d'énergie par chaleur latente ou sensible dans le bâtiment** : Sandrine Pincemin, Enseignante chercheur EPF, Docteur Ingénieur en énergétique.

**3.2 Stockage géologique de chaleur** : Hervé Lesueur, BRGM, Docteur en énergétique.

**3.3 Stockage d'énergie thermique sous forme chimique et par sorption** : Philippe Stevens, Ingénieur Expert à EDF R&D.

**3.4 Stockage de chaleur haute température pour l'énergie solaire** : Pierre Odru et Jacques Ruer, Saipem-SA, directeur adjoint développement des technologies.

**Conclusion générale** : Pierre Odru

**Remerciements** : Christian Ngo et Thierry Chappat, Fondation Tuck, Gil Mabilon, IFP EN.

# Avant-propos

Face à la menace que représente le réchauffement climatique pour l'ensemble de l'humanité, des accords internationaux ont été conclus, qui engagent les États signataires sur des objectifs de maîtrise de l'énergie et de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES).

Dans ce but, de nombreuses campagnes sont en cours afin d'informer l'ensemble de la population sur les comportements et moyens permettant d'éviter les gaspillages. Dans le même temps sont mis en œuvre d'importants programmes techniques visant à améliorer l'efficacité énergétique globale de nos activités.

Au niveau des systèmes énergétiques, que l'on souhaite de plus en plus efficaces et de moins en moins émetteurs de gaz à effet de serre, le principal défi à relever face aux combustibles fossiles est certainement celui du stockage de l'énergie. Par le passé, outre leur disponibilité et leur faible coût, les combustibles fossiles se sont imposés grâce à leur grande facilité de stockage. Cet atout a permis de concevoir des systèmes fixes (centrales thermiques, usines...) ou mobiles (automobiles, avions, bateaux...) avec la garantie de toujours disposer d'une réserve d'énergie suffisante pour accomplir la tâche prévue.

Or, qu'elles soient renouvelables ou nucléaires, les solutions de substitutions aux énergies fossiles appellent d'importants besoins de stockage sous forme thermique ou électrique.

L'habitat est en France, le troisième secteur émetteur de CO<sub>2</sub> après le transport et l'industrie. Les besoins thermiques, fortement dépendants de conditions climatiques variables, sont responsables de la plus grande part de ses émissions, liées à l'utilisation directe ou indirecte dans les centrales électriques de pointe, de combustibles fossiles. Des systèmes de stockage de chaleur ou de froid adaptés aux contraintes de l'habitat sont donc nécessaires pour éviter le recours à des moyens émetteurs de GES. Les ballons d'eau chaude « chargés » en heures creuses en sont un exemple typique. Parallèlement, les stockages thermiques à haute température, peuvent constituer la source chaude d'un cycle thermodynamique utilisable pour la production d'électricité.

L'énergie électrique peut être produite par de multiples moyens. Cette caractéristique offre la possibilité d'en maîtriser le contenu en carbone et en fait l'un des vecteurs énergétiques de prédilection pour l'avenir, en remplacement des combustibles fossiles, notamment dans les transports et l'industrie.

En Europe et dans le monde on assiste à une introduction massive dans le mix énergétique d'électricité d'origine renouvelable. Leur caractère intermittent (éolien et photovoltaïque) et la diffusion massive de moyens de production décentralisée introduisent de nouvelles contraintes dans la gestion des réseaux qui doivent assurer en permanence l'équilibre production/consommation. Les systèmes électriques doivent évoluer vers plus de flexibilité avec l'introduction de nouveaux degrés de liberté dans leur gestion. Le stockage constitue un des facteurs clé de cette flexibilité. Cependant, la production décentralisée d'électricité n'est pas le seul moteur du développement du stockage dans les systèmes électriques. Les réseaux de transport et de distribution y font également appel pour

des applications relatives à la qualité et la sécurité de la fourniture d'énergie.

Dans le domaine des transports, qui aujourd'hui dépend quasi exclusivement des produits pétroliers, les accumulateurs modernes seront la clé de voûte de la mutation du secteur, vers des véhicules de moins en moins dépendants des énergies fossiles.

Enfin, le stockage d'électricité est également le maillon indispensable à l'expansion rapide des appareils électroniques « nomades » (ordinateurs et téléphones portables, outillage, caméscopes, etc.) qui nous apportent confort et liberté d'action.

Au travers de ces quelques lignes apparaît l'importance capitale du stockage d'énergie dans le développement de nouveaux systèmes énergétiques plus efficaces et plus durables. Consciente des enjeux portés par cette thématique, l'ADEME soutien depuis de nombreuses années la recherche sur le stockage d'énergie et s'associe aux auteurs afin de porter la connaissance de ce domaine vers le plus grand nombre.



# Introduction générale

## Les défis du secteur de l'énergie

En ce début de XXI<sup>e</sup> siècle le secteur de l'énergie est confronté à des risques majeurs, susceptibles d'affecter l'ensemble de notre société. La fourniture d'énergie primaire est toujours assurée à plus de 80 % par des combustibles fossiles, comme l'indique la figure 1.

La place occupée par les énergies alternatives reste marginale et n'évolue que lentement. Après être passée par un maximum proche de 16 % de la part d'électricité produite, la part du nucléaire a décliné au cours des dix dernières années, pour se situer en 2012 aux environs de 13 %. Celle de l'hydroélectricité a légèrement diminué. La biomasse et les déchets sont restés globalement stables (ils étaient déjà de 10 % en 1973). L'éolien et le solaire progressent à un rythme rapide, mais leur part dans la fourniture mondiale d'énergie primaire reste de l'ordre du pourcent.

La forte dépendance aux combustibles fossiles de l'économie mondiale la rend vulnérable à deux types de crises qui pourraient surgir dans l'avenir :

– **Une rupture des approvisionnements.** Les ressources en combustibles fossiles sont par définition finies et face à une demande constamment croissante, on pourrait aboutir dans les prochaines

## LE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE

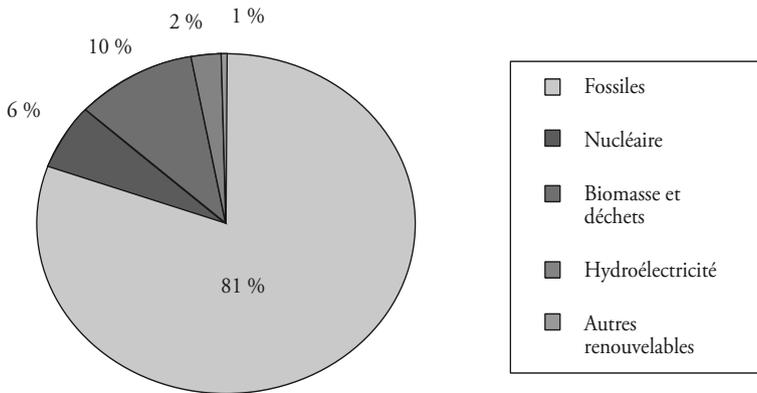


Figure 1 – Répartition de la fourniture mondiale d'énergie primaire (IEA World Energy Outlook 2012, chiffres 2010)

années à un plafond de production, puis à un déclin. De ce fait l'offre ne pourrait plus suivre la demande. C'est en particulier le cas pour le pétrole.

Ce risque est aggravé par des facteurs géopolitiques car les réserves sont concentrées dans certaines régions du monde, en particulier au Moyen-Orient. L'économie mondiale dispose d'une certaine marge d'adaptation vis-à-vis d'une réduction de la fourniture d'une ressource énergétique telle que le pétrole, mais limitée, en particulier lorsqu'il n'existe pas de solutions de substitution à court terme. C'est le cas pour les transports routiers et aériens.

– **Une catastrophe environnementale.** En dépit des quelques progrès enregistrés, l'augmentation de la pollution de l'atmosphère, des mers et des sols risque d'avoir des conséquences dramatiques sur la santé, la qualité de l'eau et la production agricole. Aujourd'hui toutefois, le risque le plus important et le plus immédiat concerne le changement climatique causé par les émissions humaines de gaz à effet de serre.

Le CO<sub>2</sub> émis dans l'atmosphère du fait de l'utilisation de combustibles fossiles est le principal gaz à effet de serre d'origine

humaine contribuant au réchauffement climatique. On estime à l'heure actuelle que pour éviter une augmentation de la température moyenne à la surface du globe supérieure à 2 °C, il faudrait diviser par deux à l'échelle mondiale les émissions humaines de CO<sub>2</sub> d'ici 2050. En prenant l'année 2000 comme référence, suivant les scénarios publiés dans le 4<sup>e</sup> rapport du GIEC, les émissions de CO<sub>2</sub> du fait de l'utilisation de combustibles fossiles sont passées de 27 Gt en 2000 à près de 32 Gt en 2011.

Il est donc nécessaire d'engager une véritable transition énergétique, destinée à continuer à assurer la fourniture économique à long terme d'énergie, tout en réduisant substantiellement les émissions de CO<sub>2</sub>. C'est un tel objectif que l'Union Européenne s'est fixé pour 2020 avec la règle des « trois fois 20 » : diminuer la consommation d'énergie de 20 %, réduire les émissions de CO<sub>2</sub> de 20 %, atteindre pour les énergies renouvelables une part de 20 % dans la fourniture d'énergie primaire. Le rôle du stockage d'énergie sera essentiel pour y parvenir.

### **Stockage d'énergie et alternative énergétique**

Les énergies renouvelables qui peuvent être substituées aux combustibles fossiles sont dans la plupart des cas intermittentes. C'est l'exemple typique de l'énergie solaire, qui fournit une puissance qui varie à une latitude donnée en fonction de l'heure de la journée, de la saison et des conditions météorologiques. C'est aussi le cas pour l'énergie éolienne, qui fournit une puissance variant avec la vitesse du vent.

L'énergie est recueillie sous forme d'électricité, qui est injectée dans le réseau. La variation de puissance électrique qui en résulte n'est pas ajustée à la variation de la demande. L'adéquation entre l'offre et la demande d'énergie peut être assurée en modulant la puissance d'un système thermique de production d'électricité, la fonction de stockage étant dans ce cas assurée par le combustible fossile. C'est ainsi qu'un cycle combiné au gaz naturel permet