

STOCKER L'ÉLECTRICITÉ :

OUI, C'EST INDISPENSABLE, ET C'EST POSSIBLE !

Pourquoi, où, comment

Il est aisé de stocker de l'essence dans sa voiture ou du fioul domestique chez soi dans une cuve. Essence et fioul constituent des stocks d'énergie pouvant ainsi être consommés quand nous le demandons. Peut-on aussi stocker de l'électricité afin de la consommer quand nous la demanderons, même si sa production est intermittente ? oui, c'est possible mais moins aisé.

Rédacteurs :

Bernard Multon, ENS Cachan - Antenne de Bretagne

Jacques Ruer, SAIPEM



ECRIN joue en amont le rôle de catalyseur et d'interface entre la recherche publique et la recherche privée. ECRIN est une force de proposition et d'orientation, véritable outil de veille stratégique au travers de son réseau d'experts. ECRIN trouve sa force dans sa capacité à fédérer, autour de thèmes émergents, pouvoirs publics, organismes de recherche, écoles et universités, grandes et petites entreprises.

L'activité d'ECRIN est multidisciplinaire, intersectorielle. Elle se répartit dans 7 domaines : Biologie, Santé et Technologies du vivant ; Chimie, Matériaux et Procédés ; Énergies et Applications ; Environnement, Économie et Société ; Risques et Sécurité ; Systèmes, Organisation et Réseaux ; Transports, Équipements et Logistique

Deux types de structures permettent d'atteindre les objectifs d'ECRIN : le Club et l'Action.

Le Club représente la concrétisation d'une volonté affirmée par plusieurs partenaires d'ECRIN d'approfondir une ou plusieurs thématiques d'intérêt général. L'Action, elle, a pour vocation de répondre dans une durée déterminée, à un besoin clairement exprimé, sous forme de problématique, nécessitant des compétences transversales.

Le document sur le stockage de l'électricité est le résultat d'un travail mené au sein du Club Energies Alternatives, présidé par Alain Feugier de l'IFP (Institut Français du Pétrole). Il s'inscrit dans le cadre du Débat National sur les Energies.

ECRIN - 32, boulevard de Vaugirard - 75015 Paris
Tél : 01 42 79 51 00 - Fax : 01 42 79 50 99
ecrin@ecrin.asso.fr - <http://www.ecrin.asso.fr>

STOCKER L'ELECTRICITE : **OUI, C'EST INDISPENSABLE, ET C'EST POSSIBLE !** **Pourquoi, où, comment**

Sommaire

1 - Le stockage de l'électricité, pourquoi ?	5
1.1 Ce qui existe déjà	5
1.2 Le nouveau contexte et les souhaits de développement durable.....	5
1.3 Pourquoi croit t'on communément que l'électricité ne se stocke pas ?.....	6
2- Le stockage de l'électricité : Où ?	7
2.1 Réseaux électriques	7
2.2 Producteurs d'énergie conventionnelle.....	8
2.3 Producteurs d'énergie renouvelable.....	8
2.4 Gestionnaire de réseau de transport	8
2.5 Consommateurs connectés à un réseau	9
2.6 Consommateurs non connectés à un réseau.....	9
3- Le stockage de l'électricité, comment ?	11
3.1 Généralités	11
3.2 Stockages à grande échelle	11
3.2.1 <i>Stockage par systèmes hydrauliques</i>	11
3.2.2 <i>Stockage sous forme d'air comprimé</i>	12
3.2.3 <i>Couplage avec un stockage de gaz nature</i>	13
3.2.4. <i>Couplage avec un stockage de gaz liquéfié</i>	14
3.2.5 <i>Stockage sous forme chimique</i>	14
3.2.6 <i>Stockage sous forme d'hydrogène</i>	15
3.2.7 <i>Stockage sous forme thermique</i>	15
3.2.8 <i>Synthèse sur les systèmes de stockage à grande échelle</i>	16
3.3 Stockages à faible échelle.....	18
3.3.1 <i>Accumulateurs électrochimiques</i>	18
3.3.2 <i>Volants d'inertie (FES : Flywheel Energy Storage)</i>	19
3.3.3 <i>Inductances supraconductrices (SMES : superconducting Magnetic Energy Storage)</i>	21
3.3.4 <i>Super-condensateurs</i>	22
3.3.5 <i>Stockage sous forme d'air comprimé</i>	23
3.3.6 <i>Stockage sous forme d'hydrogène</i>	24
3.3.7 <i>Synthèse sur les systèmes de stockage à faible échelle</i>	25
4- Conclusions générales et recommandations	26
Bibliographie.....	28

L'ouverture du marché de l'électricité, la mise en place de la directive européenne sur les énergies renouvelables, la production croissante d'énergie décentralisée augmentent les difficultés de stabilisation du réseau électrique, en raison essentiellement d'un déséquilibre entre production et consommation. C'est pourquoi le stockage de l'énergie électrique, sous forme stationnaire ou intermittente, est appelé à jouer un rôle essentiel. Différents types de stockage existent. Certains sont déjà utilisés, d'autres sont en cours de développement.

Le document décrit les caractéristiques principales des différentes techniques de stockage de l'électricité et leurs domaines d'application.

Les stockages à grande échelle comprennent les systèmes hydrauliques, ceux faisant appel à l'air comprimé, aux batteries ou encore ceux mettant en œuvre une forme thermique.

Les stockages à petite échelle sont de type électrochimique comme les accumulateurs et les supercondensateurs, de type mécanique comme les volants d'inertie, de type magnétique, ou encore sous forme d'air comprimé ou d'hydrogène.

À chaque situation rencontrée, il existe a priori un système de stockage approprié. Certes des progrès sont encore nécessaires pour améliorer les performances de certains d'entre eux et en diminuer les coûts. Mais il est encourageant d'affirmer que l'électricité peut être stockée quand on veut, où on le désire et en n'importe quelle quantité.

1 - Le stockage de l'électricité, pourquoi ?

1.1 Ce qui existe déjà

En l'absence d'un réseau interconnectant producteurs et consommateurs, la nécessité du stockage de l'énergie s'impose si l'on veut pouvoir consommer de l'électricité à la demande, même lorsque la production est nulle (cas d'une éolienne en absence de vent par exemple ou d'un générateur photovoltaïque la nuit).

Mais lorsque le réseau électrique existe et procure une mise en commun solidaire des ressources ainsi qu'un certain effet de lissage, le consommateur oublie que le problème continue à se poser. Cependant la stabilité du réseau, et par conséquent sa sûreté de fonctionnement, est assujettie à l'égalité permanente et instantanée de la production et de la consommation.

Dans le dispositif actuel, construit dans une logique de service public, les difficultés d'ajustement de la production électronucléaire sont gommées par la présence des centrales hydrauliques particulièrement souples puisque l'eau, ressource d'énergie potentielle mécanique, peut facilement s'accumuler. Il existe même des centrales de « pompage-turbinage » dont la fonction est d'emmagasiner les surplus d'énergie en période d'insuffisance de consommation et de fournir les pics en période de forte demande.

Un autre exemple d'ajustement concerne les centrales thermiques, notamment celles au gaz. Bien que démarrant moins vite, elles permettent de satisfaire les pointes grâce aux stocks de combustible, qui sont des réservoirs d'énergie chimique.

Tout cela fonctionne de façon optimisée grâce à une planification journalière prenant en compte la connaissance des habitudes des consommateurs, les prévisions météorologiques et la disponibilité des moyens de production.

Le duo stockage d'énergie et prévision fonctionne donc plutôt bien dans le contexte actuel des réseaux et il est rare que l'on assiste à leur effondrement même si cela est déjà arrivé, et peut se reproduire, dans tous les pays modernes.

1.2 Le nouveau contexte et les souhaits de développement durable

En conséquence de l'ouverture du marché de l'électricité, et de la mise en place de la Directive Européenne sur les énergies renouvelables, la principale nouveauté dans les réseaux est venue de l'introduction d'une production dite décentralisée, fournie par des producteurs « libres ». On citera l'introduction de systèmes de co-génération qui produisent simultanément chaleur et électricité. Il s'agit de chaudières, pour réaliser du chauffage résidentiel, tertiaire ou industriel. Les puissances de ces unités sont généralement beaucoup plus faibles que celles des usines thermiques et même de grande hydraulique.

On citera encore le fort développement de l'énergie éolienne, surtout en Europe. Il accroît les difficultés de stabilisation du réseau avec une ressource éminemment fluctuante et difficilement prévisible même si d'importants progrès ont été accomplis. Quand on sait que cette forme d'énergie devient économiquement compétitive et qu'elle sera à court terme, pour satisfaire nos engagements européens, la contributrice majeure à l'effort de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans la production d'électricité, il serait regrettable qu'à cause d'un contexte globalement difficile (libéralisation des marchés), elle soit accusée de

déstabiliser les réseaux. Les mêmes remarques s'appliqueront dans le futur avec le solaire photovoltaïque.

Enfin et plus récemment, l'ouverture des marchés de l'électricité a introduit un nouveau paramètre dans le système, au risque de le déstabiliser gravement. Le prix d'achat de l'électricité varie en effet au gré de la demande et, pour le producteur, il est intéressant de disposer d'énergie en réserve (en général du combustible ou de l'eau) pour la vendre au meilleur prix.

L'engagement actuel pour un véritable développement durable milite donc en faveur d'un moyen apportant une certaine souplesse pour garantir la bonne adéquation production - consommation. Ceci est particulièrement vrai lorsqu'on parle d'énergies renouvelables « intermittentes » comme l'éolien notamment. En conséquence il nécessite de recourir plus massivement au stockage de l'électricité. Or le kWh stocké a un coût déterminé :

- par le coût d'investissement du système lui-même,
- par celui de l'énergie dissipée lors des conversions (rendement énergétique),
- par son usure directement liée au nombre de cycles de charge/décharge et de leurs caractéristiques,
- par les coûts annexes sociétaux et environnementaux qui doivent éventuellement être pris en compte.

L'optimisation de ce coût implique de concevoir le système de stockage le mieux approprié en fonction des besoins et de ses contraintes réelles associées à un réseau complexe (producteurs et consommateurs très variés).

Des travaux de recherche sont encore nécessaires pour mieux évaluer les possibilités des systèmes de stockage existants, pour développer de nouvelles technologies, afin de les rendre compétitifs dans ce nouveau contexte de marché.

1.3 Pourquoi croit t'on communément que l'électricité ne se stocke pas ?

Nous avons tous entendu dire que l'électricité ne se stocke pas. Forme particulière de l'énergie, l'électricité ne se stocke pas en effet directement, mais elle peut se convertir en d'autres formes elles-mêmes stockables (potentielle, cinétique, chimique, magnétique...). Grâce à de bons rendements de conversion à l'occasion d'une double transformation, on peut donc la restituer.

L'électricité est massivement produite, transportée et utilisée en courant alternatif. Or dans le contexte énergétique précédant les années 1980, les moyens de conversion permettant le « stockage du courant alternatif » étaient excessivement coûteux, voire très peu fiables ou inexistantes. Tout cela a changé grâce à l'arrivée d'une électronique de puissance très performante, économique et dont les puissances traitées sont maintenant quasi illimitées.

On peut donc maintenant affirmer que l'électricité se stocke parfaitement, même s'il s'agit d'un stockage indirect. Mais ce stockage possède un coût qui doit être, bien sûr, acceptable.

On présentera plus loin un panorama d'ensemble des techniques existantes et en cours de développement. Elles sont généralement mal connues, essentiellement parce que leur mise en œuvre n'est pas nécessaire dans le contexte actuel du marché centralisé de l'électricité.

Dans le futur, cette situation va changer. C'est pourquoi il nous a paru utile de les décrire ci-après.

2- Le stockage de l'électricité : Où ?

2.1 Réseaux électriques

Un réseau électrique comprend schématiquement plusieurs unités de production, des lignes de transport et de distribution à divers niveaux de tension avec les stations de transformation et d'interconnexion associées, enfin de très nombreux consommateurs, qui peuvent appeler des puissances très différentes.

La consommation d'électricité des usagers est très fluctuante : le rapport entre la puissance crête (inférieure à celle souscrite dans l'abonnement au distributeur) et la puissance moyenne consommée atteint couramment des valeurs de l'ordre de 10 (à titre d'exemple, voir fig1 avec 6 kVA souscrits pour une consommation journalière de 18 kWh, soit une puissance moyenne de 750 W sur 24 heures et donc un rapport 8 entre puissance crête et puissance consommée).

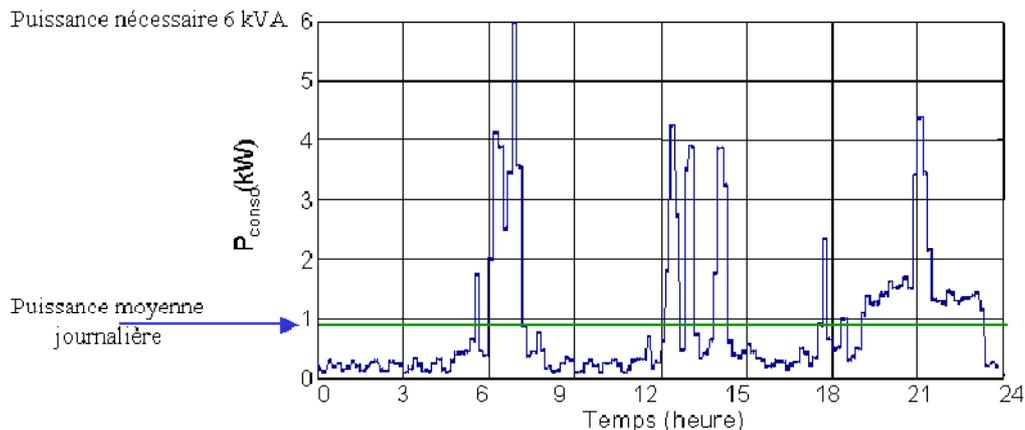


Figure 1 : Fluctuation de la consommation journalière d'une famille française (exemple)

Ceci conduit à surdimensionner les équipements de distribution et de transport d'énergie. Heureusement au niveau du réseau haute tension se produit un effet de lissage qui minimise les fluctuations et facilite la prévisibilité.

Cependant, malgré le lissage statistique, la puissance appelée varie considérablement selon l'heure et les saisons (figure 2).

À chaque point du réseau, on trouve des acteurs qui peuvent avoir des impératifs et des moyens d'action différents, si bien que leur attitude face au stockage de l'énergie est également différente, comme on va le voir dans les paragraphes suivants.

Prévision de la demande journalière par RTE

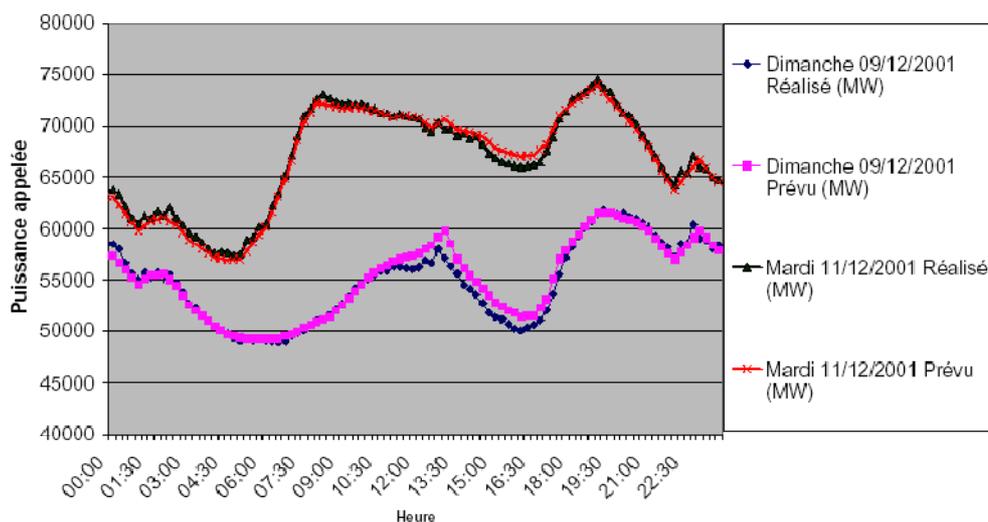


Figure 2 : Fluctuations de la puissance du réseau français

2.2 Producteurs d'énergie conventionnelle

Un stockage peut permettre de pallier une défaillance momentanée d'une unité de génération et de satisfaire une obligation commerciale de fourniture d'énergie vendue à l'avance, donc d'éviter des pénalités. Le niveau de puissance est comparable à la puissance minimale promise, tandis que la quantité d'énergie stockée doit résulter d'un compromis entre la durée de couverture souhaitée et les pénalités potentielles.

2.3 Producteurs d'énergie renouvelable

Le stockage rend ces énergies prévisibles, donc apporte de la valeur au courant fourni (par exemple, si l'électricité est livrée en heures de pointe). Toutefois, le stockage tampon a un coût qui doit être pris en considération. La puissance du stockage peut ne représenter qu'une partie de la capacité nominale de l'installation du producteur, et l'énergie disponible doit résulter d'un compromis contractuel.

2.4 Gestionnaire de réseau de transport

Le stockage est un instrument qui apporte une souplesse supplémentaire dans le maintien de l'équilibre du réseau. Ceci peut provenir d'un déficit momentané de production, éventuellement prévisible. Il est dans ce cas une alternative à l'achat de courant sur un réseau étranger interconnecté. Le besoin peut aussi résulter de la défaillance d'un ou plusieurs producteurs. Il s'agit généralement dans ce cas d'installations de grande puissance, comme le pompage hydraulique par exemple.

Géographiquement, les unités de stockage devraient être implantées de manière à minimiser les pertes en ligne, ce qui est malheureusement difficile à réaliser lorsqu'il faut utiliser des sites convenables parfois excentrés, comme cela est le cas avec le pompage hydraulique entre des lacs de montagne.

2.5 Consommateurs connectés à un réseau

Le premier intérêt du stockage consiste à éviter les inconvénients liés à une coupure d'alimentation. Si pour les particuliers, une chute du réseau ne crée guère que des désagréments passagers, les conséquences peuvent être beaucoup plus sérieuses pour des clients professionnels. Afin de sauvegarder leurs ordinateurs et leurs équipements sensibles, ceux-ci mettent en œuvre des alimentations auxiliaires qui comportent bien entendu un stockage local d'énergie. Techniquement, il faut que le système soit capable de se substituer au réseau de façon instantanée, et qu'il soit d'une grande fiabilité. La puissance de chaque unité ne correspond qu'au besoin des équipements à sauvegarder. Une durée de fourniture de l'électricité de quelques minutes est souvent suffisante. Il s'agit donc d'unités de petites tailles pour lesquelles la fiabilité est primordiale, mais le coût de l'énergie restituée est secondaire.

Si on imagine que le stockage local d'énergie se répand de manière significative, on peut arriver à la conclusion que des unités de stockage décentralisées, à la limite chez chaque utilisateur, peuvent considérablement soulager le réseau de distribution, puisque celui-ci n'aurait plus qu'à transporter la puissance moyenne, bien inférieure à la puissance maximale de raccordement. On peut dès lors suggérer que la généralisation de techniques de stockage économiquement acceptables pourrait recevoir des incitations financières, puisque cela amènerait des économies sur le réseau. Ceci n'est pas nouveau en soi. En effet, la tarification différentielle de l'électricité selon l'horaire a entraîné l'apparition des stockages d'énergie sous forme de chaleur chez les particuliers (chauffages à accumulation et ballons d'eau chaude). La progression de la technologie pourrait amener la diffusion d'équipements capables de restituer non plus simplement de la chaleur, mais bel et bien de l'électricité.

2.6 Consommateurs non connectés à un réseau

Lorsque le consommateur n'est pas relié à un réseau, il doit produire lui-même l'électricité dont il a besoin. Il peut le faire avec un groupe électrogène. L'énergie est alors stockée sous forme chimique et est achetée directement sous cette forme.

Il peut aussi faire appel à des sources d'énergies renouvelables. Le stockage d'électricité est alors indispensable. Il s'agit de situations marginales en France métropolitaine mais très fréquentes dans les pays en voie de développement (PVD). La fonction est alors réalisée par des batteries électrochimiques plomb-acide qui constituent la technologie la plus mature mais également la moins chère. Cependant, les batteries au plomb présentent divers inconvénients qui nécessitent de mener encore des travaux de recherche, notamment pour améliorer leur durée de vie. En effet, elles constituent souvent la principale source de défaillance et d'arrêt définitif du système dans les PVD : leur durée de vie en cyclage (charges et décharges) est, dans le meilleur des cas, de l'ordre du millier de cycles (environ 3 ans avec un cycle journalier et beaucoup moins dans des situations de lissage réseau), ce qui est très insuffisant dans des systèmes de production dont la durée de vie est de l'ordre de 20 à 30 ans.

Par ailleurs, leur état de charge est souvent mal connu car difficile à mesurer.

Enfin lorsqu'elles ne sont pas recyclées, elles constituent une source importante de pollution. D'autres possibilités existent ou émergent mais elles sont généralement plus coûteuses en investissement. Elles seront décrites plus loin.

Des besoins beaucoup plus modestes en terme d'énergie stockée peuvent correspondre à des utilisations pour lesquelles le consommateur est prêt à payer un prix élevé. Le meilleur exemple est celui des téléphones mobiles.

Enfin, l'avenir des véhicules électriques ne pourra être assuré que dans la mesure où le stockage de l'énergie électrique aura progressé de manière significative. Même les véhicules hybrides, qui resteront alimentés par un combustible, devront disposer d'un stockage d'électricité, notamment pour satisfaire les pointes de puissance et assurer la récupération d'énergie au freinage. L'électricité sera donc aussi stockée dans des systèmes embarqués, avec des contraintes différentes de celles du réseau (en particulier sur les volumes et les masses), les efforts de recherche doivent se poursuivre.

3- Le stockage de l'électricité, comment ?

3.1 Généralités

Tous les cours de Physique enseignent que l'électricité peut être stockée dans des condensateurs et dans des inductances. Toutefois, les quantités d'énergie qu'il est possible de confiner avec ces composants sont faibles, même avec les super-condensateurs récemment apparus ou avec les SMES (Superconductor Magnetic Energy Storage) nécessitant des supraconducteurs à basses températures (-269°C). En outre, l'utilisation actuelle se fait principalement en courant alternatif et les condensateurs se prêtent mal à un stockage direct sous cette forme.

Pour stocker l'électricité de façon significative, il faut d'abord la transformer en une autre forme d'énergie stockable, puis effectuer la transformation inverse lorsqu'on désire disposer à nouveau de l'électricité.

La forme d'énergie intermédiaire peut être mécanique, chimique ou thermique. Ces diverses solutions ont toutes été explorées. Elles ont donné naissance aux techniques qui seront présentées ci-après.

Selon la nature des besoins, la quantité d'énergie à stocker, la rapidité avec laquelle elle peut être disponible, la durée de vie souhaitable, les coûts acceptables en investissement et en maintenance peuvent varier considérablement. Pour donner une idée de cette variabilité, rappelons que la quantité d'énergie stockée dans une batterie de téléphone portable est de quelques Wattheures, tandis qu'un barrage de montagne stocke plusieurs GWh.

Dans ce qui suit, on s'intéresse d'abord aux techniques capables de stocker de grandes quantités d'énergie et qui peuvent être utilisées par un gestionnaire de réseau, puis aux techniques de stockage à moyenne et faible échelles dont les usages peuvent également servir le réseau, mais aussi la production décentralisée pour de nombreuses applications.

3.2 Stockages à grande échelle

3.2.1 Stockage par systèmes hydrauliques

On sait qu'une partie de l'électricité (environ 15 % en France) est produite grâce à des barrages qui utilisent la force motrice de l'eau, source renouvelable d'énergie très concentrée dont un intérêt primordial est qu'elle est quasi immédiatement disponible.

En faisant des réserves d'eau dans le barrage, on accumule ainsi de l'énergie qui ne sera transformée en électricité qu'en fonction des besoins instantanés du réseau (figure 3). C'est ainsi que certains barrages (Serre-Ponçon par exemple) fonctionnent essentiellement aux heures de pointe. On voit ainsi qu'une source renouvelable joue un rôle considérable dans la gestion du réseau.

Il est possible d'aller plus loin en utilisant l'électricité produite durant les heures creuses pour pomper de l'eau depuis la vallée et remplir à nouveau le barrage. On parle alors de Station de Transfert d'Énergie par Pompage, ou STEP.

Le pompage est utilisé en France dans de nombreux lacs de barrage. Le plus ancien est celui du Lac Noir dans les Vosges (1933), et le plus puissant est celui de Grand Maison dans l'Oisans (1690 MW).

Signalons aussi le cas de l'usine marémotrice de la Rance, où le pompage est réalisé astucieusement en jouant avec le balancement des marées.

Pompage et turbinage ont leurs propres rendements de conversion. Le rendement global d'une usine de montagne vu du réseau électrique est d'environ 65 % à 75 % selon les caractéristiques des équipements.

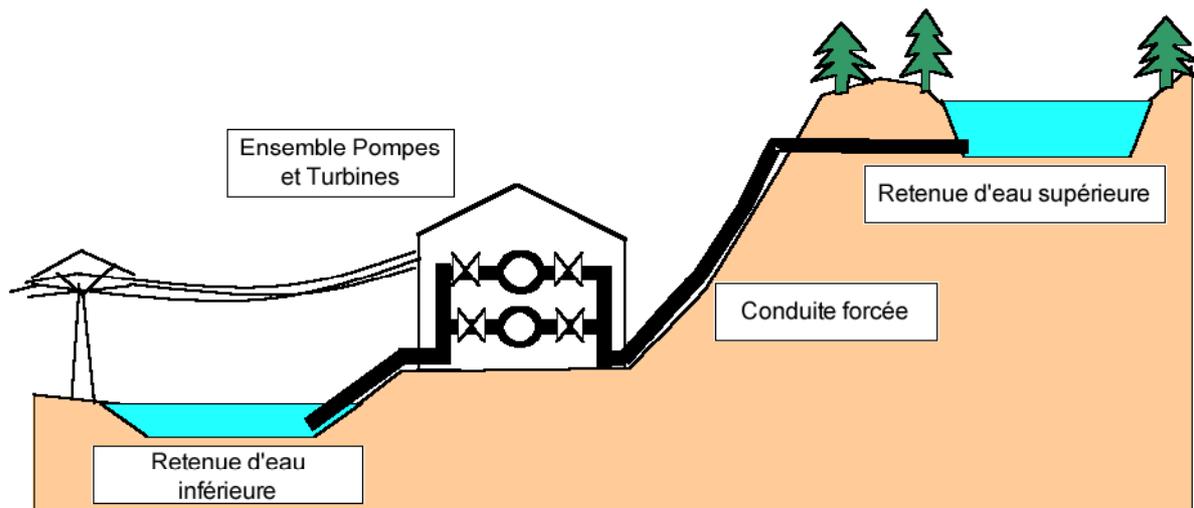


Figure 3 : Schéma d'une installation de stockage gravitaire

La mise en œuvre de cette technologie suppose bien entendu l'existence de retenues d'eau appropriées. En Europe, tous les sites potentiels ont pratiquement été déjà équipés. Toutefois, on mentionnera qu'il est prévu d'augmenter les capacités de pompage hydraulique en Norvège afin de régulariser la production d'électricité des éoliennes au Danemark. De nouvelles liaisons électriques sous-marines sont envisagées à cet effet entre les deux pays.

3.2.2 Stockage sous forme d'air comprimé

Dans ces installations (figure 4), l'électricité disponible durant les heures creuses sert à comprimer de l'air avec un turbocompresseur. L'air comprimé est stocké dans des cavernes situées à grande profondeur. Le poids des terrains au dessus de la caverne permet de résister à la pression de l'air.

Pour récupérer l'électricité, l'air comprimé est dirigé vers une machine semblable à une turbine à gaz. Il est réchauffé dans une chambre de combustion grâce à un appoint de gaz naturel, puis détendu dans la turbine. La chaleur résiduelle des fumées est récupérée. Dans une installation moderne, pour restituer 1 kWh au réseau, il faut utiliser 0,75 kWh d'électricité durant la phase de pompage et brûler 1,22 kWh de gaz naturel durant le déstockage.

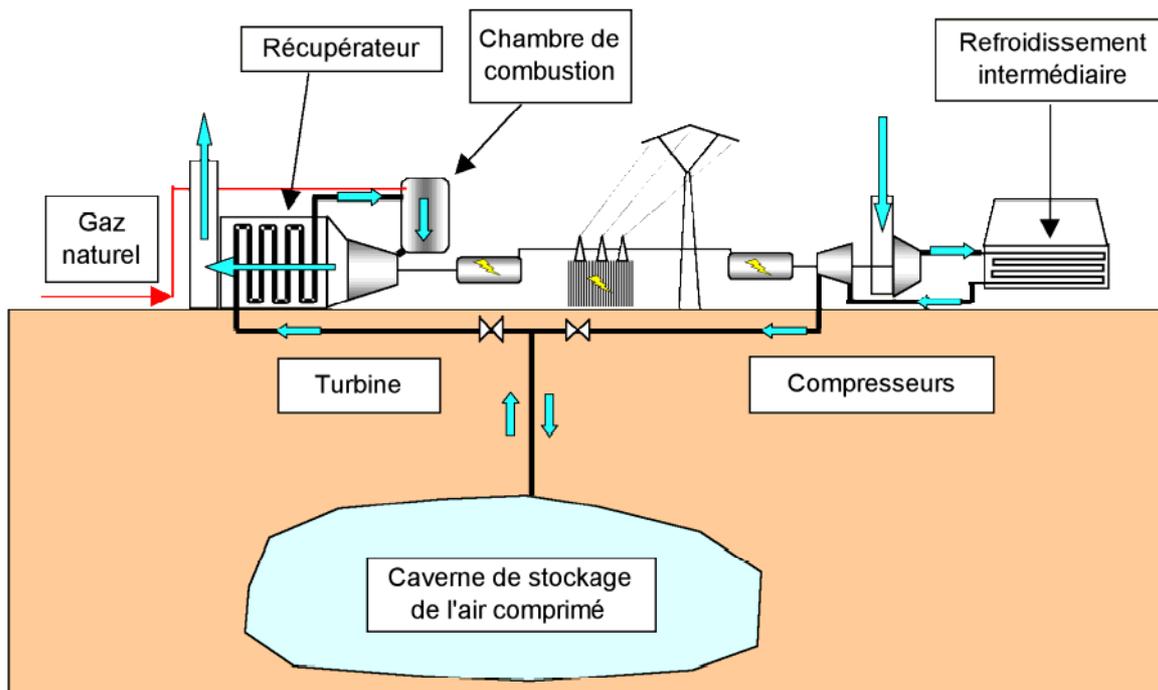


Figure 4 : Schéma de principe d'une installation de stockage à air comprimé

L'installation la plus ancienne est l'usine de Huntorf près de Brême en Allemagne (1979). L'air est stocké à 70 bars dans 2 cavernes creusées dans le sel de 310000 m³. La puissance électrique est de 290MW, la durée de fonctionnement de 2 heures.

Le projet le plus ambitieux est situé à Norton, au sud de Cleveland aux Etats-Unis. L'air sera stocké à 110 bars dans d'anciennes carrières de calcaire à 570 m de profondeur. Le volume disponible est de 10 millions de m³. La puissance électrique prévue est de 2700 MW.

Les cavernes nécessaires pour stocker l'air peuvent être obtenues aisément dans les couches salines par dissolution du sel. La technique est la même que celle employée pour la création de certains stockages de gaz naturel. Il est ainsi prévu d'installer 2000 MW de capacité autour du Golfe du Mexique, où les formations salines abondent. Il est aussi parfois possible de réutiliser des cavernes déjà existantes après aménagement, comme à Norton.

Si les conditions de perméabilité le permettent, l'air peut aussi être stocké dans des aquifères. De même une cavité de stockage de gaz naturel dont on n'aurait plus l'usage peut avantageusement être transformée en cavité de stockage d'air comprimé.

3.2.3 Couplage avec un stockage de gaz naturel

On pourrait en effet envisager de coupler le stockage souterrain de gaz naturel avec un stockage d'électricité. En effet, le gaz naturel est stocké dans des réservoirs souterrains à grande profondeur (1500 m) et à haute pression (220 bars environ), tandis qu'il est injecté dans les canalisations de transport à une pression de l'ordre de 60 à 80 bars. Cet écart de pression oblige à consommer de l'énergie pour la compression, laquelle pourrait être restituée sous forme d'électricité lors de la décompression.

3.2.4. Couplage avec un stockage de gaz liquéfié

La liquéfaction du gaz naturel ou de l'air consomme une quantité importante d'énergie. Des sociétés japonaises envisagent de mettre à profit ces échanges de chaleur pour stocker l'électricité. Le concept met en œuvre un réservoir de stockage de gaz naturel liquéfié, un réservoir d'air liquide, des échangeurs de chaleur régénératifs, un compresseur et une turbine à gaz. Durant les heures de consommation du gaz naturel, on vaporise celui-ci ainsi que l'air liquide, et le froid produit est conservé dans les échangeurs. Du gaz est brûlé dans la turbine, qui fournit donc de l'électricité. Durant les heures creuses, de l'air est refroidi grâce au froid emmagasiné auparavant, comprimé avec un compresseur qui consomme de l'électricité, pour être finalement liquéfié et stocké.

3.2.5 Stockage sous forme chimique

Tout le monde connaît les batteries électriques au plomb employées dans les automobiles. Des batteries de ce type sont également utilisées dans les sites isolés pour stocker l'électricité produite par des panneaux solaires ou des éoliennes. Des stocks tampons d'électricité dans des batteries sont aussi mis en œuvre lorsqu'il faut pallier toute éventualité de panne du réseau.

Il existe par exemple à Chino en Californie une installation de 40 MWh - 10 MW qui fonctionne depuis 1988. À Berlin Ouest, entre 1987 et 1994, le réseau était soutenu par une installation similaire de 14,4 MWh - 17 MW.

Dans une batterie classique au plomb-acide ou au nickel-cadmium par exemple, les réactions électrochimiques créent des composés solides qui sont stockés directement sur les électrodes où ils se sont formés. La masse qu'il est possible d'accumuler localement est forcément limitée, ce qui fixe un maximum à la capacité des batteries classiques.

Pour contourner cette limitation, on a créé des batteries dites à circulation d'électrolyte (figure 5). Les composés chimiques responsables du stockage de l'énergie sont liquides et restent en solution dans l'électrolyte. Les électrolytes utilisés sont à base de ZnBr, NaBr, VBr. En pompant ces derniers vers des réservoirs externes, on peut décupler la quantité d'énergie transformée par une batterie.

La technologie la plus représentative est le procédé Regenesys développé en Angleterre par la société Innogy. Il utilise les couples de réactifs NaBr / NaBr₃ et Na₂S₄ / Na₂S₂. Une installation de 15 MW - 120 MWh a été construite sur ce principe à Little Bardford près de Cambridge (UK). Les électrolytes sont stockés dans des réservoirs de 1800 m³ chacun. Le rendement électrique global du stockage électrochimique est d'environ 70 %.

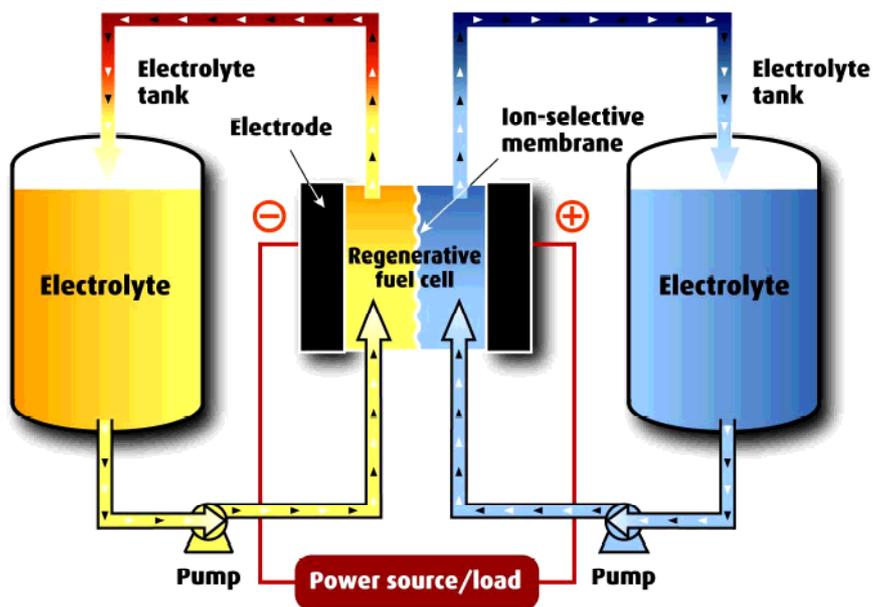


Figure 5 : Schéma de principe d'une batterie à circulation www.regenesys.com

3.2.6 Stockage sous forme d'hydrogène

Dans un futur plus lointain, lorsque l'hydrogène sera largement employé comme vecteur d'énergie, il pourra par exemple être produit par électrolyse de l'eau à partir d'électricité d'origine renouvelable. Son stockage souterrain à grande échelle pourra être envisagé en reprenant les techniques connues pour le gaz naturel (rappelons en effet que les premiers stockages souterrains ont été développés pour le gaz de ville, qui contenait une grande proportion d'hydrogène). L'électricité pourra ensuite être produite, par exemple à l'aide de piles à combustibles.

3.2.7 Stockage sous forme thermique

On peut parfaitement imaginer de stocker l'électricité sous forme thermique. Pour ce faire, il faut (figure 6) :

- transformer l'électricité en chaleur dans des résistances électriques
- stocker la chaleur produite dans des réfractaires
- transformer la chaleur en électricité grâce à une turbine à gaz.

Cette idée qui aurait pu paraître incongrue il y a quelques années devient maintenant envisageable grâce au développement des turbines à gaz à haute température (supérieure à 1400°C), qui autorisent un rendement de conversion de la chaleur en électricité de 60 % dans les cycles combinés. De plus, à ce niveau de température, la densité d'énergie qu'il est possible de stocker dans des réfractaires est considérable. (Il faut 500 kWh pour chauffer une tonne de réfractaires à 1400°C).

Les résistances nécessaires existent. Les réfractaires nécessaires pour stocker la chaleur à 1400°C sont déjà largement employés en sidérurgie. L'isolation thermique à ce niveau de température est également bien maîtrisée par cette industrie. Une première analyse montre d'ailleurs que les pertes thermiques d'un tel système sont relativement d'autant plus réduites que la taille du stockage est grande.

Par conséquent, tous les ingrédients nécessaires pour développer de tels systèmes de stockage sont disponibles. Ils permettraient de stocker de très grandes quantités d'énergie sans contrainte de site et sans risque majeur.

A titre d'exemple, un réservoir de stockage thermique dimensionné pour 1000 MWh ne mesurerait que 20 m de diamètre et 20 m de hauteur, soit un volume de 5000 m³. Un tel concept mériterait d'être développé.

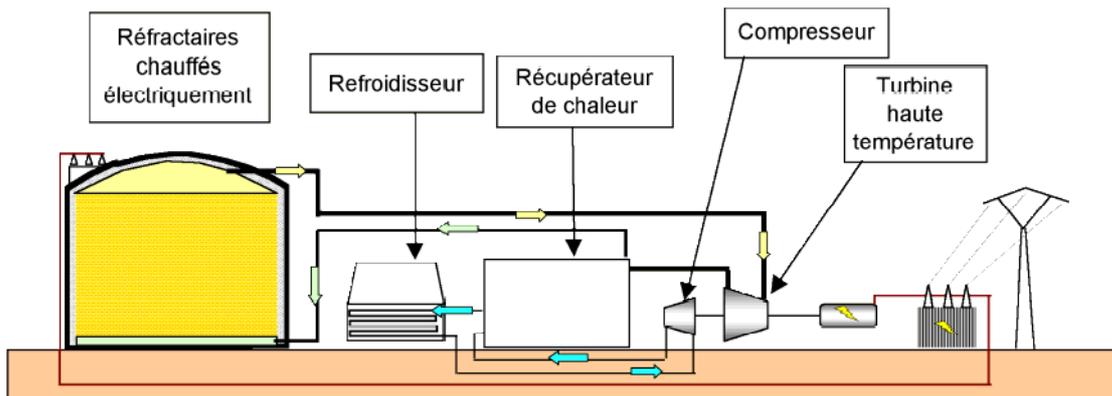


Figure 6 : Schéma de principe d'une installation de stockage thermique

3.2.8 Synthèse sur les systèmes de stockage à grande échelle

Le tableau 1 résume les principales caractéristiques des systèmes de stockage discutés précédemment. On constate que plusieurs techniques de stockage sont déjà mises en œuvre à grande échelle en France et à l'étranger dans le but de faciliter la gestion du réseau, mais aussi de favoriser la pénétration des énergies renouvelables.

Certaines de ces technologies sont liées à des sites particuliers et ne peuvent donc pas être implantées partout, mais d'autres pourraient facilement être développées en tous lieux et faciliter ainsi l'utilisation des énergies renouvelables.

Tableau 1 : Principales caractéristiques des systèmes de stockage à grande échelle

	Hydraulique	Air comprimé	Batteries	Batteries à circulation	Thermique
Forme d'énergie	gravitaire	air comprimé	chimique	chimique	chaleur
Densité d'énergie	1 kWh/m ³ pour une chute de 360 m	12 kWh par m ³ de caverne à 100 bars	Batterie au plomb : 33 kWh/t Batterie Li-ion : 100 kWh/t	33 kWh/m ³	200 kWh/m ³
Capacité réalisable	1000 – 100000 MWh	100 – 10000 MWh	0,1 – 10 MWh	10 – 100 MWh	1000 – 100000 MWh
Puissance réalisable	100 – 1000 MW	100 – 1000 MW	0,1 – 10 MW	1 – 10 MW	10 – 100 MW
Rendement électrique	65% - 80%	50% (avec l'apport de gaz naturel)	70%	70%	60%
Installations existantes	100 000 MWh 1000 MW	600 MWh 290 MW	40 MWh 10 MW	120 MWh 15 MW	-
Remarques	Sites avec retenues d'eau	Sites avec cavernes	Métaux lourds	Produits chimiques	À développer

Les investissements nécessaires pour implanter une installation de stockage dépendent de la quantité d'énergie stockée, de la puissance instantanée souhaitée, des caractéristiques propres du projet, de la nature du site. La figure 7 donne des ratios d'investissement indicatifs en terme d'euros par kWh d'énergie stockée et d'euros par kW de puissance.

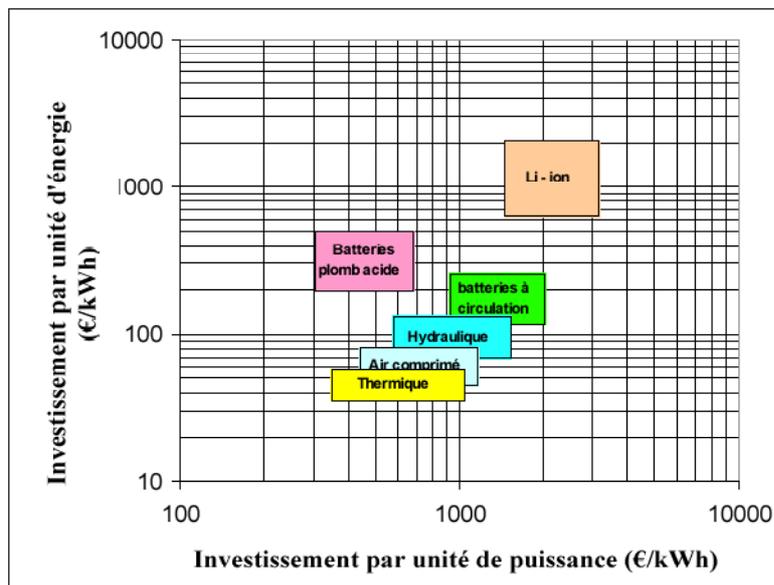


Figure 7 : Valeurs indicatives des investissements nécessaires pour les installations de stockage à grande échelle

3.3 Stockages à faible échelle

3.3.1 Accumulateurs électrochimiques

Ils permettent de stocker de l'électricité quand on les charge et de la restituer à la décharge. Ils sont constitués d'un couple électrochimique composé de deux électrodes séparées par un électrolyte et aux interfaces desquelles interviennent des réactions d'oxydation ou de réduction qui cèdent ou absorbent des électrons. Les ions ainsi générés circulent dans l'électrolyte. Pour avoir une grande énergie stockée, il faut un grand nombre d'électrons échangés par mole ainsi qu'une réaction entre un élément très oxydant et un autre très réducteur (le couple Lithium-Fluor a une fem théorique de 6 V). Il faut en outre une parfaite réversibilité des processus électrochimiques et des matériaux à faible masse ou volume molaire. Mais la masse des matières actives (sans séparateurs ni électrolyte !) ne représente que 10 à 30 % de la masse totale. Les réactions chimiques sont sensibles à la température, ainsi certains types d'accumulateurs sont inefficaces à basse température ($< 0^{\circ}\text{C}$), d'autres requièrent des températures élevées (300°C). La puissance (rapidité à délivrer l'énergie) est limitée par le plus lent des nombreux processus de conduction. Pour accroître la puissance, il faut augmenter les surfaces d'électrodes, augmenter leur porosité. Pratiquement, il existe toujours un compromis énergie/puissance.

Les technologies sont nombreuses, on ne citera que les principales commercialisées :

- Accumulateurs au *plomb-acide* (figure 8) : bon marché mais lourdes (25 à 40 Wh/kg, typiquement : 30 Wh/kg et 80 Wh/kg). Certaines, dites ouvertes, nécessitent des compléments d'eau pour compenser l'évaporation naturelle ou celles dues à l'électrolyse en fin de charge. Les efforts de recherche visent à tripler la durée de vie des batteries au plomb. Le niveau de rentabilité économique atteint alors leur permettra de résoudre de très nombreux cas de stockage.

- Accumulateurs au *nickel à électrolyte alcalin* (NiCd, Ni-métal-hydrure NiMH, Ni-Fe) moins lourds (pour le NiCd : 50 Wh/kg en énergie et 200 W/kg en puissance, 65 Wh/kg pour le NiMH) mais plus chers. Ils possèdent également un autre inconvénient, le fameux effet mémoire dont la conséquence est la suivante : si la batterie n'est pas totalement déchargée avant sa recharge, elle ne retrouve pas sa pleine capacité. Il est ainsi nécessaire de la décharger complètement avant la recharge. Les batteries NiCd pour véhicule électrique nécessitent une surveillance du niveau d'électrolyte tous les 50/100 cycles. Les batteries portables NiCd et NiMH se rechargent de la même façon : le courant est régulé, la charge est arrêtée dès que l'on observe un point d'inflexion sur la courbe de croissance de la tension. Une sécurité de température à 50°C permet d'assurer la survie de la batterie en cas de surchauffe.

- Accumulateur au *lithium-carbone* (électrode positive insérée dans un oxyde métallique à électrolyte organique liquide ou solide en fil mince polymère). Le lithium est très léger et très énergétique (environ 10 kWh/kg de masse active) mais il est très réactif et il a fallu d'intenses recherches pour arriver à un nombre de cycles satisfaisant (environ 1000). Les accumulateurs au lithium sont principalement utilisés dans les applications électroniques portables et leur énergie massique pratique est comprise entre 100 et 150 Wh/kg. Leur recharge nécessite une surveillance très précise de la tension.

La figure 9 compare les différentes technologies en terme de densité d'énergie. On notera encore que la durée minimale de décharge des accumulateurs électrochimiques descend

difficilement en dessous du quart d'heure. Cependant, pour certaines applications, on peut atteindre des puissances de quelques 100 W/kg, voire quelques kW/kg, en quelques secondes ou quelques minutes. À la différence des condensateurs leur tension reste plus stable en fonction de l'état de charge. Néanmoins, entre un fonctionnement en recharge à puissance élevée dans un état de charge proche du maximum et l'opposé, c'est-à-dire une décharge puissante au voisinage de la décharge profonde, la tension peut aisément varier dans un rapport de deux.

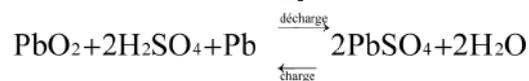


Figure 8 : Accumulateur plomb - acide sulfurique et équation bilan associée en charge et décharge

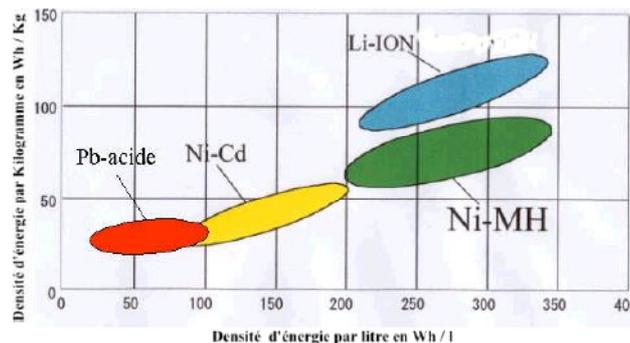


Figure 9 : Comparaison des performances de quelques technologies de batteries électrochimiques

3.3.2 Volants d'inertie (FES : Flywheel Energy Storage)

Un volant d'inertie est couplé mécaniquement à un convertisseur électromagnétique qui permet la transformation réversible d'énergie électrique en énergie mécanique.

L'énergie cinétique emmagasinée s'exprime par : $W = \frac{1}{2} J \cdot \Omega^2$, où J est le moment d'inertie ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$) et Ω la vitesse angulaire de rotation (rad/s).

L'énergie massique du volant seul vaut : $\frac{W}{M} = K \cdot \frac{\sigma_{\max}}{\rho}$ où ρ est la masse volumique du matériau et où K est un facteur dépendant de la forme du volant (K = 0,5 pour un cylindre à paroi mince) alors que l'énergie volumique s'exprime par $\frac{W}{V} = K \cdot \sigma_{\max}$.

Il est intéressant d'utiliser pour la constitution du volant d'inertie, des matériaux à haute résistance à la traction σ_{\max} (due à la force centrifuge) capables de vitesses périphériques

élevées. Les meilleurs matériaux sont les composites à fibres de carbone (structures bobinées) capables d'atteindre des vitesses périphériques de 1500 m/s correspondant à une puissance de 100 Wh/kg. Mais ces matériaux sont très coûteux. Pour minimiser le volume, des matériaux massifs de type acier à haute résistance offrent un bon compromis énergie volumique/coût.

Il faut adjoindre au volant des auxiliaires (paliers magnétiques, enceinte sous vide, moteur/générateur...) qui conduisent à des valeurs de puissance plus proches de 5 à 25 Wh/kg. Quant au moteur/générateur, il est l'interface électromécanique permettant la charge et la décharge.

La puissance impulsionnelle de ces dispositifs peut être élevée : 2 kW/kg. Les premières applications furent dans les transports (bus et tramways pour récupérer l'énergie de freinage ou pour éviter les systèmes de captation du courant). Depuis quelques années, des volants d'inertie équipent des alimentations ininterrompibles dans lesquelles ils concurrencent les batteries électrochimiques au plomb et au NiCd. Là également, il s'agit de fonctionnement impulsionnel (durée de décharge de l'ordre de la minute).

Des dispositifs commerciaux existent, telle que celle proposée par Beacon Power Systems (figure 10). Dans le cas d'applications stationnaires et pour raison de sécurité, l'installation peut être enterrée afin de prévenir l'éclatement éventuel du volant.

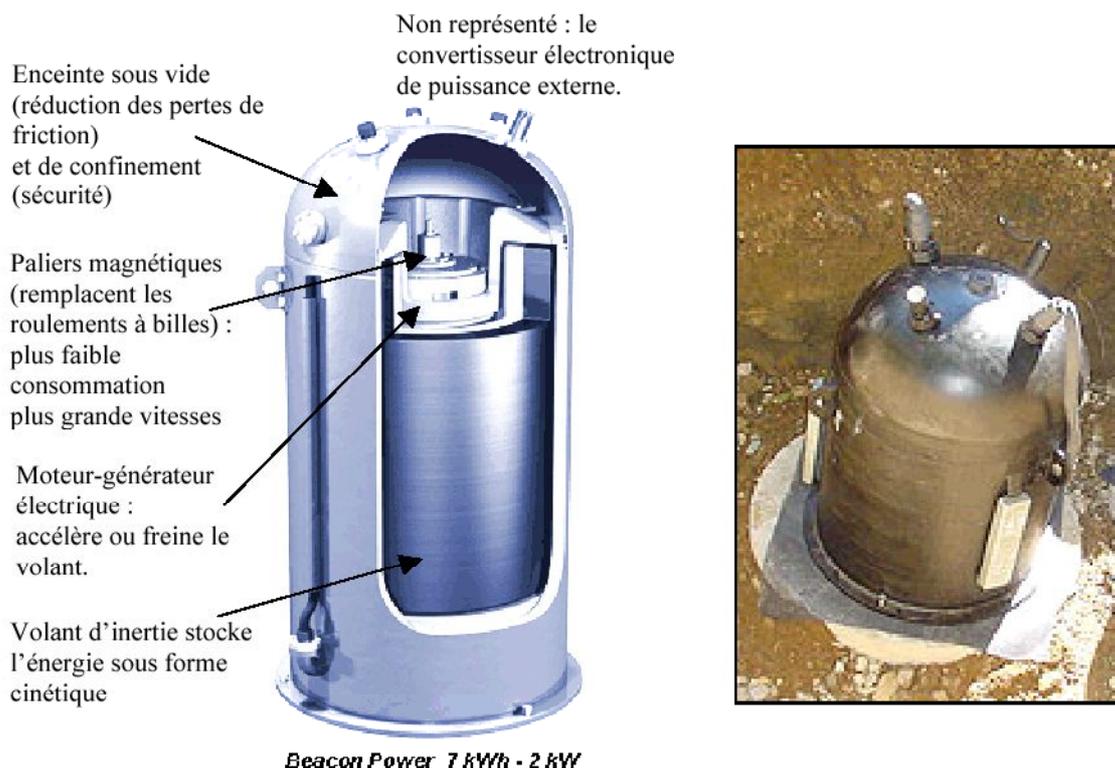


Figure 10 : volant d'inertie Beacon Power Systems (6 kWh et 2 kW, volant en fibres tournant à 22500 tr/mn, hauteur 1m20, diamètre 68 cm, masse 800 kg, durée de vie : 20 ans) - À droite : installation enterrée.

3.3.3 Inductances supraconductrices (SMES : superconducting Magnetic Energy Storage)

Ce système constitue un stockage magnétique. Pour minimiser les pertes par effet Joule qui ne permettent pas de conserver l'énergie accumulée au delà de quelques fractions de seconde, on a recours à des bobinages supraconducteurs qui opèrent à très basse température. Dans ces matériaux spéciaux, le courant circule sans résistance. Les deux types de bobinages envisagés sont le solénoïde et le tore, tous deux opérant à l'air. Le premier permet un meilleur stockage à volume donné de matériau supraconducteur, mais il rayonne fortement et engendre une pollution inadmissible dont la compensation est coûteuse et encombrante. Malgré un volume plus important, le tore se révèle la solution la plus souvent retenue.

Avec les supraconducteurs basse température à base de niobium (Nb), on obtient environ 4 Wh/litre à 6 Tesla. Les caractéristiques du NbTi, largement industrialisé, sont : 3000 A/mm² sous 5 T à 4,2 K (max 10 T). Celles du Nb₃Sn sont : 1200 A/mm² à 10 T, 300 A/mm² à 16 T (max. 24 T).

Avec les nouveaux supraconducteurs céramiques dits « haute température critique », on peut espérer des améliorations. Pour les applications de stockage, le meilleur compromis entre densité de courant, induction et température critique semblerait se situer à environ 15 T et 30 K. À cette température, le gain sur le système de réfrigération est très substantiel. Mais ces matériaux n'ont pas encore atteint la maturité industrielle des alliages au niobium.

L'avantage des inductances supraconductrices réside dans leur très grande puissance (possibilité de décharge à 50 % en moins de 1 s avec des brins multifilamentaires de très faible diamètre : quelques μm, voire submicroniques). La principale difficulté est liée au système de réfrigération qui, même s'il ne pose plus aujourd'hui de problème, accroît considérablement le coût et complique l'exploitation. De tels dispositifs sont commercialisés aux USA (figure 11).

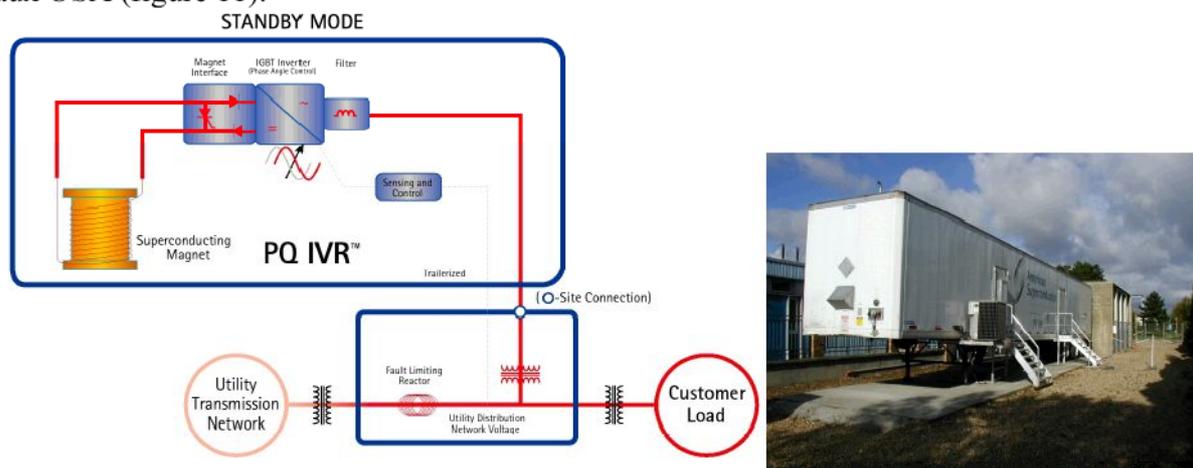


Figure 11 : Système « Power Quality » sur camion, 3 MVA, courte durée
<http://www.amsuper.com/>

3.3.4 Super-condensateurs

L'énergie électrique est accumulée dans le champ électrique de ces capacités. À la différence des dispositifs électrochimiques, il n'y a pas de réaction chimique ce qui accroît considérablement la cyclabilité.

Le principe est voisin de celui du condensateur mais l'isolant, qui sépare les électrodes, est remplacé par un électrolyte conducteur ionique (figure 12) dans lequel le déplacement des ions s'effectue le long d'une électrode conductrice à très grande surface spécifique (grains de carbone percolants ou polymères conducteurs micro-fibreux : 1200 m² par gramme). On obtient ainsi de meilleures énergies volumiques que dans les condensateurs : 5 Wh/kg voire 15 Wh/kg, à un coût très élevé mais avec une constante de temps de décharge supérieure à cause de la lenteur de déplacement des ions dans l'électrolyte (puissance de 800 à 2000 W/kg).

La tension par élément est limitée à 2,5 ou 3 V (modules jusqu'à 1500 F) et nécessite généralement une mise en série contrairement au condensateur.

On peut craindre un risque de déséquilibre lors de cette mise en série : pratiquement il y a peu de problèmes, l'équilibre se fait correctement car il y a peu de dispersions de caractéristiques.

Comme dans un condensateur la tension varie en fonction de l'état de charge : $W = \frac{1}{2} C.V^2$, ce qui conduit à la nécessité d'un convertisseur d'adaptation même en cas d'utilisation en courant continu.

La technologie est connue depuis les années 1980 et a été largement utilisée à petite échelle pour la sauvegarde mémoire sur les cartes électroniques. Ce n'est que depuis la fin des années 1990 que des dispositifs de taille significative ont permis d'envisager des applications de plus grandes puissances, plutôt impulsionnelles (fourniture brève d'énergie : quelques secondes à quelques minutes) telles que l'on peut en rencontrer dans le domaine des transports.

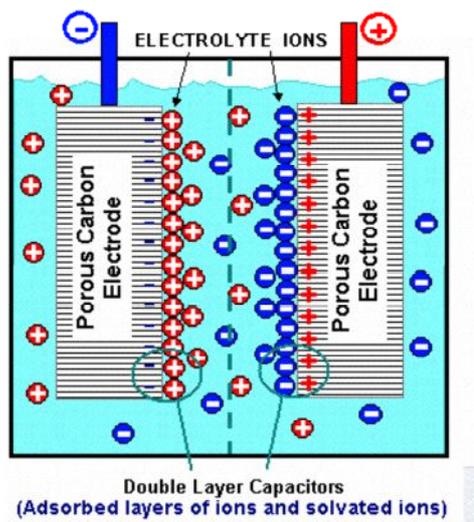


Figure 12 : Coupe schématique et vue de super-condensateurs www.electricitystorage.org

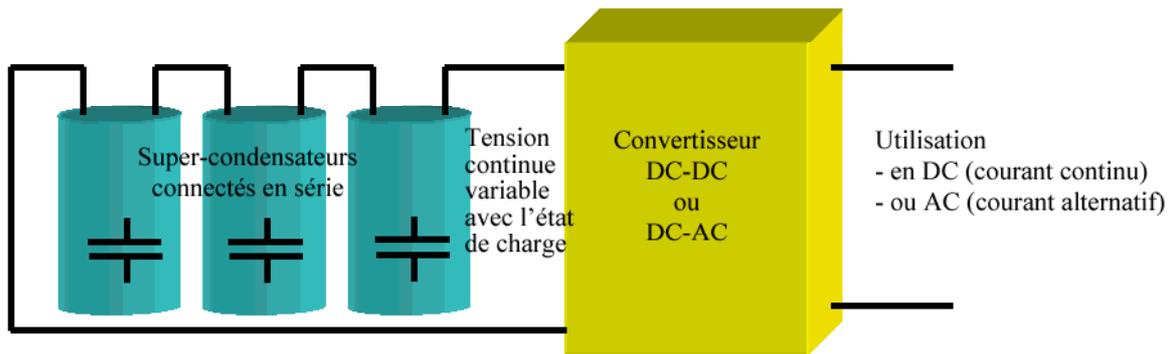


Figure 13 : Schéma d'un système utilisant des super-condensateurs

Pour obtenir un bon équilibre des tensions entre les nombreux éléments en série (on en a représenté seulement 3 sur la figure 13), le convertisseur électronique de puissance est fractionné et intégré aux éléments.

3.3.5 Stockage sous forme d'air comprimé

L'air est comprimé à haute pression dans un réservoir (jusqu'à 300 bars avec des structures en fibres de carbone), via un compresseur électrique qui peut se transformer en générateur lors de la détente (figure 14).

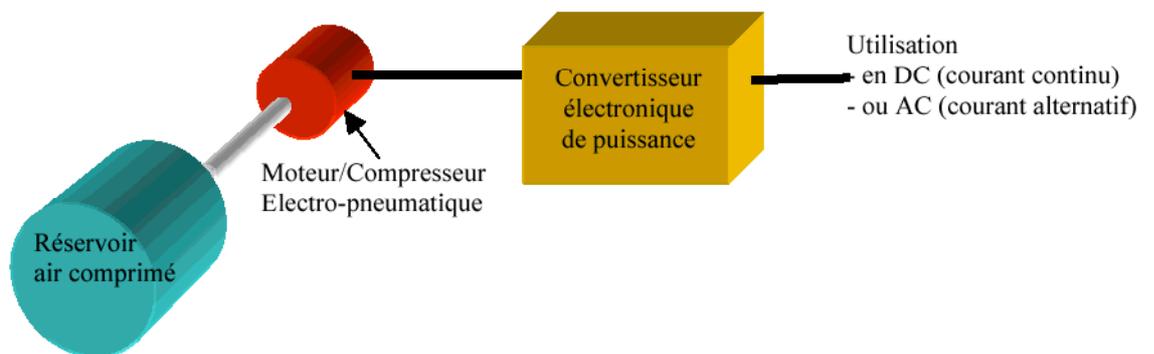


Figure 14 : Schéma d'un système de stockage à air comprimé

À titre d'exemple, à 200 bars, l'énergie volumique de l'air comprimé est de 6 Wh/dm^3 . Un réservoir en composite fretté sous 200 bars a une masse de 100 kg pour 140 litres. L'énergie stockée est donc environ de 800 Wh, soit 8 Wh/kg .

Le rendement global de la chaîne est d'environ 50 %, fonction de la puissance de recharge et de décharge.

Le nombre de cycles est principalement limité par la fatigue mécanique du réservoir : 10 000 à quelques dizaines de milliers de cycles.

Des installations de ce type sont proposées aux Etats-Unis pour assurer un soutien temporaire à un réseau (Small Scale Compressed Air Energy Storage ou SSCAES). L'air comprimé serait alors stocké dans des tubes métalliques enfouis sous la surface du sol.

3.3.6 Stockage sous forme d'hydrogène

Comme dans le cas des stockages à grande échelle, l'électricité peut servir à produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. Les piles à combustible (figure 15) sont ensuite un des moyens pour la restituer.

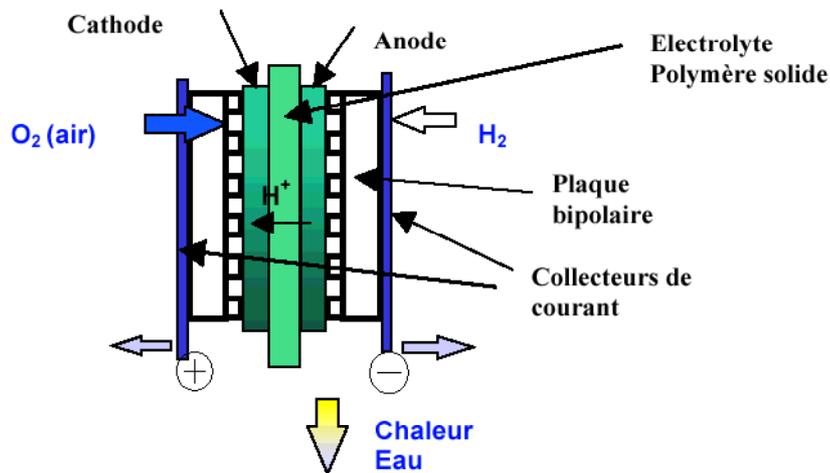


Figure 15 : Schéma pile à combustible PEM (Proton Exchange Membrane)

Le stockage de l'hydrogène est réputé difficile. Pour des applications stationnaires, la solution la plus simple actuellement est de faire appel à des réservoirs sous pression. Les caractéristiques sont les suivantes pour deux exemples d'application :

Hydrogène stocké à 200 bars : 2 kg H₂ pour 140 litres, soit 68 kWh pour 140 litres

- avec réservoir en acier et capacité massique de 1 % : pour 2 kg H₂ : 200 kg de réservoir

340 Wh_{th}/kg avec réservoir

- avec réservoir en composite fretté et capacité massique de 2 % : pour 2 kg H₂ : 100 kg de réservoir

680 Wh_{th}/kg avec réservoir

Hydrogène à 350 bars : 2 kg H₂ pour 75 litres

- avec réservoir composite et capacité massique de 5 % : pour 2 kg H₂ : 40 kg de réservoir

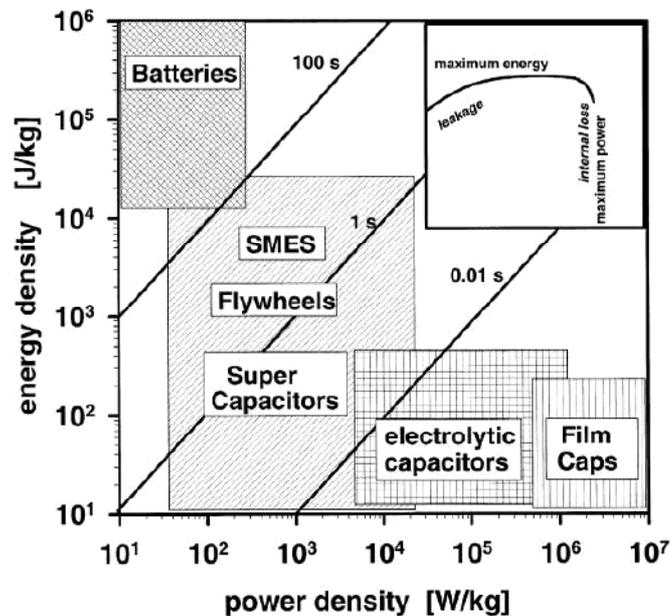
1700 Wh_{th}/kg avec réservoir

3.3.7 Synthèse sur les systèmes de stockage à faible échelle

Le tableau 2 et la figure 16 résument leurs caractéristiques principales.

Tableau 2 : Principales caractéristiques des systèmes de stockage à faible échelle

	Electro-chimique	Volant Inertie	Inductif supraconducteur	Super condensateurs	Air comprimé	Hydrogène PAC
Forme d'énergie	chimique	mécanique	magnétique	électrostatique	air comprimé	carburant
Densité d'énergie (accumulateur seul, hors équipements annexes)	20 à 120 Wh/kg	1 à 5 Wh/kg	1 à 5 Wh/kg	6 Wh/kg	8 Wh/kg (200 bars)	300 à 600 Wh/kg (200 à 350 bars) hors PAC
Capacité réalisable ou réalisée	qq Wh à qq MWh	qq kWh à qq 10 kWh			?	?
Puissance réalisable	qq W à qq MW	qq kW à qq MW				qq 10 W à qq MW
Rendement électrique	0,7 à 0,8	0,8 à 0,9				0,3 à 0,5
Connaissance de l'état de charge	Difficile Paramètres variables	aisé	aisé	aisé	aisé	aisé
Coût en €/kWh	Pb-acide : 50 à 150 Lithium : 700 à 1000	150 à 2000 (selon techno et performances)	?	50 000 à 150 000 (n puissance :	?	?
Remarques	Faible cyclabilité : qq 1000 au mieux	Sécurité ? Gde cyclabilité	cryogénie	Grande cyclabilité	Rendement en fonction de l'état de charge ?	Probablement intéressant dans un contexte de réseau de distribution d'hydrogène



T.Christen, M.W.Carlen, "Theory of Ragone plots", Journal of Power Sources, 91 (2000).

Figure 16 : Synthèse « classique » par le diagramme de Ragone

4- Conclusions générales et recommandations

Les paragraphes précédents ont montré que de très nombreuses techniques pour stocker l'électricité existent et que d'autres sont en cours de développement.

Chacune d'elles est capable de répondre à un besoin particulier, selon la situation rencontrée.

Ce rapide tour d'horizon n'a pas permis de détailler toutes les caractéristiques des différentes techniques, mais il a montré que l'électricité peut être stockée quand on veut, où on le désire et en n'importe quelle quantité.

Certes le stockage a un coût, mais il apporte un service. On a vu que dans de nombreux cas, un stockage est déjà mis en œuvre, signe qu'il est justifié économiquement. En poursuivant un effort de recherche dans ce domaine, nul doute que le champ d'application s'étendra.

L'Europe, et en particulier la France, possèdent des compétences qui devraient lui permettre de jouer un rôle de premier plan.

Ceci est vrai par exemple dans le domaine de l'électronique de puissance, souvent utilisée lors des étapes de transformation de l'électricité en une forme d'énergie stockable, et réciproquement.

De même, la maîtrise des matériaux et des différents secteurs de la chimie devrait autoriser des progrès rapides dans les piles à combustibles, les batteries à circulation ou le stockage thermique à haute température.

Le recours à des sources d'énergie renouvelables sera certainement un des moteurs de ce développement. On sait en effet qu'elles constituent un des moyens de réduction des gaz à effet de serre. Encore conviendra t'il d'effectuer un bilan global en évaluant les propres émissions de ces dernières lors des étapes de leur production, de leur utilisation et du traitement en fin de vie du système de stockage lui-même.

De même, les risques, l'impact social et environnemental de certains moyens de stockage doivent-ils être pris en compte (exemple : zones inondées, populations déplacées, gestion de l'eau pour le stockage hydraulique, etc...).

Au vu de la situation actuelle, et prenant la mesure de l'enjeu, il nous paraît opportun de faire les suggestions générales suivantes :

- Étudier les systèmes complets (stockage et transformations électriques associées), pour optimiser les techniques en termes de coût, rendement, fiabilité, maintenance, etc.
- Étudier l'influence d'une forte pénétration des stockages décentralisés sur la robustesse du réseau et sur le coût global des infrastructures et de l'énergie
- Étudier l'incidence des diverses options de stockage sur le taux de pénétration des énergies renouvelables que sont l'éolien et le photovoltaïque.

Nous proposons ensuite les suggestions particulières suivantes :

- Évaluer l'intérêt du stockage sous forme de gaz comprimé dans le contexte national,
- Évaluer l'intérêt de la technique du stockage thermique à haute température, qui présente le double avantage d'une forte puissance, et de pouvoir être implanté sans risque près des centres de consommation,
- Continuer l'effort de recherche visant à améliorer la durée de vie des batteries au plomb,

- Développer la technique du stockage par volants d'inertie faible coût et longue durée de vie, dont le potentiel est particulièrement intéressant pour les applications fortement décentralisées,
- Étudier l'incidence du développement des super-condensateurs dans les différents usages possibles,
- Renforcer les efforts de recherche et développement sur l'hydrogène et les piles à combustibles.

Bibliographie

Liste des auteurs et de leurs contributions présentées au sein du Groupe de Travail Stockage d'Énergie du Club Energies Alternatives d'ECRIN :

- Guy BESLIN (EDF R&D) « *Gravitaire hydraulique* » 23 mai 2002.
- Jacques RUER (Bouygues Offshore) « *Thermique haute température* » 23 mai 2002.
- Bernard MULTON (ENS de Cachan antenne de Bretagne) « *Stockage électromécanique d'énergie (cinétique ou inertiel)* », 23 mai 2002.
- Anne DE GUIBERT (SAFT) « *Electrochimiques maturité industrielle (Pb-acide, CdNi, NiMH, Li-ion et Li-Polymères)* » 12 juil. 2002.
- Jean-François FAUVARQUE (CNAM Electrochimie) « *Electrochimiques Métal-air et Redox* » 12 juil. 2002.
- Jean-Marie TARASCON (Université de Picardie), « *Electrochimiques tendances et possibilités due aux nanostructures* », 12 juil. 2002.
- Frédéric TERTRAIS (Batscap groupe Bolloré et EDF) « *Supercondensateurs* », 12 juil. 2002.
- Anne FALANGA (CEA) « *Piles à combustibles réversibles et système électrolyseurs/PAC* », 12 juil. 2002.
- Jean LEVEQUE (Green, Université de Nancy) « *Magnétique supraconducteur* », 12 juil. 2002.
- Kathia BARRAL (Air Liquide) « *Hydrogène sous pression* », 12 juil. 2002.
- Régine CLAVREUL (EDF) « *L'intérêt du stockage pour les énergies renouvelables* », réunion plénière Paris, 10 déc. 2002.
- Michel CRAPPE, « *La problématique d'intégration au niveau européen* », Journée ECRIN Intégration des Energies Renouvelables aux Réseaux électriques, Paris, 10 déc. 2002.
- Christian NGÔ (CEA) et Jacques RUER (SAIPEM) « *Stockage par air comprimé CAS et CAES* », 10 fév. 2003.

La rédaction du document a bénéficié également des commentaires et remarques des membres suivants du Bureau du Club :

- Jean BONAL (Président du Club Électronique de puissance - Conversion d'énergie)
- Alain CLEMENT (Ecole Centrale de Nantes)
- Gilles KIMMERLIN (GDF)
- Bruno MANOHA (EDF)
- Michel PAILLARD (IFREMER)
- Eric PEIRANO (ADEME)
- Serge POUILLAIN (ALSTOM)
- Pierre ROSSETTI (Responsable du Domaine Ecrin Énergies et Applications)



ECRIN - 32, boulevard de Vaugirard - 75015 Paris
Tél : 01 42 79 51 00 - Fax : 01 42 79 50 99
ecrin@ecrin.asso.fr - <http://www.ecrin.asso.fr>