

Fallais Benjamin
Pagot Arthur

fall.benjamin@gmail.com
arthur.pagot@yahoo.fr

Licence Professionnelle STMEER

Année 2010-2011

PROJET TUTEURE

Etat de l'art en matière de
stockage de l'énergie



Mandataire : Virage Energie Climat

Tuteur La Baronnerie : Bernard Cottier

Tuteur UCO : Catherine Mouneyrac

Remerciements

Nous tenons à remercier Bernard Cottier pour la nombreuse documentation qu'il nous a fournie ainsi que pour son cours sur les piles à combustible.

Nous remercions également l'ensemble de l'association Virage Energie Climat Pays de la Loire pour nous avoir accueillis chaleureusement à l'une de leur réunion.

Sommaire

Introduction	1
I) Pourquoi avoir besoin de stocker ?	2
1) Les énergies renouvelables, des ressources intermittentes.....	2
2) La problématique de demain, coller aux besoins	2
3) Le transport de l'énergie	2
II) Les solutions de stockage de l'énergie électrique	3
1) Air comprimé adiabatique	3
2) Volant d'inertie	4
3) Supercondensateur	5
4) Potentiel (STEP).....	6
5) Les batteries électrochimiques	7
6) Hydrogène	9
III) Les solutions de stockage de l'énergie thermique	10
1) Chaleur sensible	10
2) Chaleur latente.....	11
3) Biomasse énergétique.....	12
IV) Quelles solutions à mettre en place en Pays de la Loire ?	13
1) Le contexte énergétique des Pays de la Loire	13
2) Les solutions les plus cohérentes	13
Conclusion.....	14
Bibliographie.....	15
Annexe 1 Récapitulatif des solutions	16

Introduction

Ce projet a été commandité par l'association Virage Energie Climat des Pays de la Loire (VEC-PdL). Il a pour but d'effectuer une veille technologique sur l'état de l'art en matière de stockage d'énergie. L'association aimerait en effet savoir quelles solutions sont les plus adaptées dans la région des pays de la Loire.

Nous allons donc présenter les différents systèmes déjà disponibles ainsi que ceux qui ne sont qu'à l'état de recherche pour permettre d'effectuer un tableau récapitulatif des différentes solutions de stockage. Celui-ci permettra de savoir rapidement quelle est la meilleure méthode selon les besoins.

I) Pourquoi avoir besoin de stocker ?

1) Les énergies renouvelables, des ressources intermittentes

Les énergies renouvelables sont des productions qui sont souvent intermittentes puisqu'elles dépendent des conditions climatiques qui ne sont pas constantes. C'est d'ailleurs un argument fort des militants anti-éolien par exemple. Un stockage de l'énergie produite permettrait, dans la majorité des cas, de lisser les productions et augmenterait sensiblement le crédit accordé aux énergies renouvelables.

2) La problématique de demain, coller aux besoins

Aujourd'hui, avec des énergies renouvelables ou non, la production ne s'adapte pas en fonction des consommations réelles en énergie. Cela est dû aux centrales nucléaires qui produisent la majorité de notre énergie et qui ne peuvent pas être arrêtées ou mises en service rapidement. Pour parer à ce problème, EDF a mis en place le système des heures creuses qui permet de différer les consommations des cumulus électriques par exemple. Cependant, cela ne suffit pas et des systèmes de stockage que nous verrons par la suite ont déjà été mis en place.

Ces problèmes sont également présents dans les productions solaires puisque les productions ne sont pas constantes, elles ne peuvent pas répondre la majorité du temps aux demandes, particulièrement la nuit. Pour cela, on utilisera des stockages diurne/nocturne. On peut également remarquer l'apparition de projets de stockage d'énergie saisonnier. Il permettrait par exemple de faire un stockage d'énergie thermique d'origine solaire l'été, pour la restituer en chauffage l'hiver.

3) Le transport de l'énergie

Au-delà de tous problèmes de réponse de la production à la consommation, le transport de l'énergie impose lui aussi de trouver des solutions performantes de stockage. On peut citer le cas des téléphones, des ordinateurs portables ou des voitures. Tous ont besoin d'une source d'énergie transportable. Or les batteries utilisées aujourd'hui sont composées majoritairement de lithium ou de plomb. Ces derniers posent de nombreux problèmes environnementaux, économiques et géopolitiques, d'où la nécessité d'utiliser à l'avenir d'autres moyens de stockage.

II) Les solutions de stockage de l'énergie électrique

1) Air comprimé adiabatique

○ Principe :

Des compresseurs transforment l'énergie électrique en air comprimé en période creuse afin de restituer cette énergie en période de demande. Le stockage d'air comprimé peut s'effectuer dans des réservoirs souterrains naturels comme dans des séries de bombones.

○ Rendements :

Les pertes thermiques sont de 35% du total de l'énergie stockée. Actuellement on peut atteindre 60 à 65% de rendement global, cependant des projets allemand annoncent déjà des rendements de 80% grâce à la récupération de la chaleur de la compression.

○ Puissance ou énergie stockée :

La capacité du stockage dépend de la taille de la caverne utilisée et de sa capacité à accepter les fortes pressions. La capacité pour le stockage en bombones est très variable, elle dépend de l'investissement et de la puissance que l'on veut mettre en jeu. On atteint actuellement des projets variant de 300MW à plusieurs GW.

○ Investissement :

1,2 millions d'euros/MW stocké.

○ Durée de vie :

15000 cycles (20 ans) pour les réservoirs en fibre de carbone, 30 ans en sites caverneux.

○ Faisabilité :

Utilisé principalement pour le stockage d'énergie provenant de l'éolien. Ce système requiert un site caverneux naturel ou un investissement élevé pour le stockage en bombones.

○ Impact environnemental :

Une fois monté, ce genre d'installation ne rejette pas de gaz à effet de serre ou très peu pour son fonctionnement interne.

○ Capacité actuelle :

Actuellement quelques projets sont en fonctionnement aux USA ou en Allemagne. La plupart des projets par réservoirs se limitent à quelques tranches de 300MW. Par contre on peut atteindre des projets de l'ordre de quelques GW pour le stockage en sites caverneux.

○ Capacité future :

Cette technologie est en plein expansion, le projet Norton aux USA annonce une puissance de 2,7GW, tandis que le projet ADELE en Allemagne annonce une puissance de 200MW pour 1GWh stockée soit la puissance de 40 éoliennes pendant plus de 5 heures.

○ Etat de développement :

La première installation de ce genre date de 1981, depuis cette technologie est en perpétuelle expansion surtout grâce au nombre d'éoliennes construites. Des projets comme ADELE et NORTON sont en phase de développement. Le projet ADELE menée par l'Allemand RWE devrait voir le jour en 2013.

○ Portabilité :

La société française MDI construit depuis 1998 des véhicules à air comprimé.

○ Conclusion :

Le stockage en site caverneux nécessite un sol géologiquement favorable, par exemple une ancienne mine de sel ou de calcaire. Ce type de procédé devrait bientôt devenir courant pour pallier au problème de l'intermittence des énergies renouvelables car il est facile à mettre en œuvre mais demande de nombreuses études et un investissement élevé.

2) Volant d'inertie

○ Principe :

Les nouveaux volants d'inertie sont composés d'un cylindre maintenu par des aimants. On fait tourner le disque massif grâce à un moteur électrique. Lorsqu'il n'y a plus de charge, le disque continu de tourner. On récupère ensuite cette énergie cinétique par le biais d'un alternateur (le moteur électrique entraînant la roue pouvant faire également office d'alternateur).

○ Rendements :

On a des rendements de 80 à 90%. Certains volants ne perdent que 0,1% de leur énergie par heure.

○ Puissance ou énergie stockée :

Les puissances stockées sont de l'ordre de 10 à 30kW restituables en 1h. Cependant, il est courant de voir des « batteries » de volants d'inertie à savoir par exemple 40 volants d'inertie de 25kW restituables en 1h.

○ Investissement :

Environ 250€/kWh.

○ Durée de vie :

Supérieure à 20ans.

○ Faisabilité :

Assez facile à mettre en place.

○ Impact environnemental :

L'impact environnemental est peu élevé puisqu'il est à peu près identique à celui d'un moteur électrique.

○ Capacité actuelle :

Les capacités actuelles en tant que stockage de l'énergie à proprement parler sont faibles. Les puissances stockables sont trop faibles et la durée de stockage n'est pas très élevée ; de l'ordre de quelques heures. Cependant, les volants d'inertie sont utilisés dans la majorité des moteurs thermiques. Ils peuvent également permettre de compenser des variations brutales de puissance dans le cas des éoliennes par exemple, c'est pourquoi ils sont déjà très employés.

○ Capacité future :

Les temps de stockage étant assez faibles, il est difficile d'imaginer les volants d'inertie avec une autre utilisation que la compensation d'à-coups de la production d'électricité. C'est pourquoi les capacités devraient augmenter proportionnellement à l'évolution du nombre des moteurs thermiques et électriques produisant de l'électricité notamment.

○ Etat de développement :

La technique de volant d'inertie continue d'être améliorée. Il est maintenant question de roue en matériaux composites, de palier magnétique ou de disques très fins entraînés à grande vitesse.

○ Portabilité :

Pour du stockage réelle et non de la compensation, la portabilité est nulle. Pour les systèmes à compensation, la portabilité est bonne puisqu'ils équipent nos voitures.

○ Conclusion :

Les volants d'inerties ne peuvent pas servir à stocker de l'énergie sur une longue durée qui est aujourd'hui un réel problème. Ils peuvent cependant permettre de compenser les à-coups d'un système non réguliers, et c'est souvent la critique faite aux énergies renouvelables. Ils équipent tous les moteurs tournants aussi bien thermiques qu'électrique. C'est pourquoi on les retrouve dans les éoliennes ou les voitures.



Volant d'inertie de Léonard De Vinci

3) Supercondensateur

○ Principe :

La constitution d'un supercondensateur est semblable à celle d'une batterie (deux électrodes intercalées par un séparateur, le tout baignant dans de l'électrolyte). Comme pour une batterie, le stockage de l'énergie se fait par conduction ionique. Puisqu'il n'y a pas de réaction chimique, le stockage de l'énergie est sous forme électrostatique contre faradique pour une batterie.



Exemple de supercondensateurs

○ Rendements :

On a des rendements de 85 à 95%.

○ Puissance ou énergie stockée :

L'énergie stockée est de l'ordre de 1 à 10 Wh/kg. Pour le moment on atteint quelques kWh d'énergie stockée au maximum. Tension nominale supérieur à 2.3V en général.

○ Investissement :

L'investissement est élevé : 50 000 à 150 000 €/kWh ou 300€/kW.

○ Durée de vie :

De 10 000 à 500 000 cycles. La durée de vie dépend des conditions d'utilisation, mais reste supérieur aux batteries classiques.

○ Faisabilité :

De même type que les batteries, les supercondensateurs stockent peu d'énergie et ne sont pas adaptés aux grandes productions mais peuvent servir en cas de fort appel énergétique.

○ Impact environnemental :

L'impact environnemental reste élevé concernant leur construction (électrodes, électrolyte) et leur recyclage est difficile.

○ Capacité actuelle :

Actuellement utilisés dans l'industrie, le militaire et le transport, les supercondensateurs servent principalement à fournir ou à récupérer une puissance élevée. Ils sont par exemple mis en place pour récupérer l'énergie due au freinage des tramways (MITRAC de Bombardier).

○ Capacité future :

La tendance fait que dans le futur beaucoup de systèmes utiliseront des supercondensateurs en parallèle avec une autre source d'énergie. Comme pour les véhicules électriques afin de fournir une puissance pour l'accélération.

○ Etat de développement :

Réalisation dans des centres de recherches, utilisation militaire, alimentations complémentaires aux batteries (ordinateurs, télécoms) et utilisés en automobile pour des appels de puissance élevée, comme au démarrage.

○ Portabilité :

Ce système est d'une excellente portabilité, il est utilisé actuellement dans les transports.

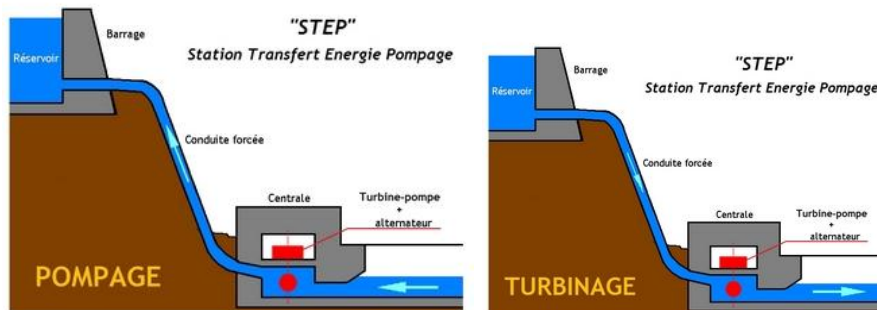
○ Conclusion :

Les supercondensateurs sont et seront très utiles pour le développement des énergies renouvelables. Ils doivent être utilisés pour la restitution de haute puissance lors les pics de consommations. Cette technologie ne peut donc pas servir de stockage exclusif mais permet de pallier aux problèmes de fourniture de puissance instantanée élevée.

4) Potentiel (STEP)

○ Principe :

Les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP) remontent de l'eau dans un réservoir à l'aide d'une pompe quand la demande est faible. Lorsque la production ne suffit plus, on fait descendre cette eau en la faisant passer par des turbines qui entraînent des alternateurs.



○ Rendements :

Rendement moyen de 75%. Cependant, il varie en fonction des pertes en ligne notamment.

○ Puissance ou énergie stockée :

Puissance stockée pouvant aller jusqu'à 1700MW (Grand Maisons, France) voir 2800MW (USA, Japon).

○ Investissement :

De 1000 à 20000€/kWh.

○ Durée de vie :

Plusieurs décennies

○ Faisabilité :

Seuls les sites montagneux sont pour l'instant rentables, avec de chutes d'eau pouvant attendre près de 200m de dénivelé.

○ Impact environnemental :

L'impact environnemental peut être important puisqu'il y a une nécessité de construire un barrage.

○ Capacité actuelle :

Dans le monde, la capacité actuelle dépasse les 120 000MW soit 99% de l'énergie stockée. En France, environ 17 000MW sont installés (soit 15% de la capacité mondiale).

○ Capacité future :

En France, les capacités de développement sont quasiment nulles, car toutes les zones propices aux STEP sont déjà équipées. Dans le monde, et notamment en Asie, les capacités croissent tous les ans de l'ordre de 5 000MW.

○ Etat de développement :

Des sites avec beaucoup moins de dénivelé sur terre ou en mer sont à l'étude. Cependant, à l'heure actuelle la rentabilité est directement liée à la hauteur de chute.

○ Portabilité :

La portabilité du système est évidemment nulle.

○ Conclusion :

En France, la quasi-totalité des zones capables d'accueillir des STEP sont déjà équipées, mais des projets de micro-STEP pourraient être mis en place prochainement, notamment dans le pays de Caux. Dans le monde, les STEP sont les moyens de stockage les plus utilisées et sont encore aujourd'hui en développement.

5) Les batteries électrochimiques

Nous allons voir ici 5 types de batteries :

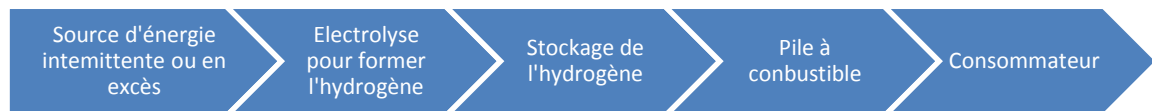
- Les batteries Plomb qui sont les seules utilisées, pour le moment, pour faire du stockage à grande échelle, grâce à leurs facilités de construction et leur prix. Elles peuvent stocker jusqu'à quelques MWh.
- Les batteries Ni-MH (Nickel et un alliage métallique capable de stocker de l'hydrogène). C'est ce type de batteries qu'utilisent la Toyota Prius et un grand nombre d'appareils portatifs.
- Les batteries Ni-Cd (Nickel et Cadmium). Ce type de batteries est la référence en ce qui concerne le matériel de transport (train, tramway, métro). Ces batteries sont interdites sur le marché grand public, mais elles sont utilisées pour les satellites et le démarrage des avions. Ces batteries sont recyclables et recyclées.
- Les batteries Li-ion (Lithium ion) qui ont une grande capacité d'énergie mais leur prix reste beaucoup trop élevé pour du stockage massif. Les composants chimiques de ces batteries sont dangereux mais cette technologie reste une des plus grandes avancées technologiques du XX^{ème} siècle et elles sont utilisées dans de nombreux nouveaux appareils portatifs.
- Les batteries Li-polymère qui sont encore à l'état de recherche mais qui atteignent de très hauts rendements en laboratoire.

- **Principe :**
Les batteries électrochimiques permettent de transformer de l'énergie électrique en énergie chimique et réciproquement. Cette transformation s'effectue selon le principe de RedOx, (échange d'électron du milieu électrique au milieu chimique). Une batterie est composée de deux électrodes baignant dans de l'électrolyte.
- **Rendements :**
Le rendement d'une batterie électrochimique peut aller de 50% pour une Ni-MH jusqu'à 95% pour une batterie Li-polymère.
- **Puissance ou énergie stockée :**
L'énergie stockée dépend du type de batterie. Les batteries plomb atteignent 40Wh/kg contre 230Wh/kg pour les batteries Li-polymère. A noter que les batteries Li-ion sont à 200Wh/kg contre 70Wh/kg pour les Ni-MH (Toyota Prius)
- **Investissement :**
L'investissement pour du stockage à grande échelle n'est pas rentable. En effet pour des batteries plomb par exemple l'investissement est de 0.1€/Wh et peut aller jusqu'à 1.5€/Wh pour une batterie Li-ion.
- **Durée de vie :**
Les batteries Ni-Cd (utilisées pour les satellites) dépassent les 2 000 cycles à l'inverse des batteries Li-ion qui ont un maximum de 2 000 cycles. Les batteries plomb sont beaucoup moins performantes car elles atteignent juste 1200 cycles au maximum.
- **Faisabilité :**
Bien que l'investissement soit élevé c'est ce genre de technologie que l'on retrouve le plus souvent pour des sites isolées (batteries plomb principalement). Le stockage uniquement par des batteries électrochimiques à l'échelle d'une région ne peut cependant pas être envisagé.
- **Impact environnemental :**
Les batteries électrochimiques utilisent des matériaux rares et dangereux comme le Lithium, le Cadmium et même le Plomb. Les batteries sont difficilement recyclables mais désormais des sociétés sont spécialisées dans ce type de procédés.
- **Capacité actuelle :**
Actuellement les batteries sont utilisées principalement pour le matériels portatif mais aussi pour les installations autonomes comme le solaire photovoltaïque.
- **Capacité future :**
Grâce à l'émergence des batteries Li-ion et Li-polymère pouvant atteindre des rendements de 98% avec une énergie stockée d'environ 200Wh/kg, on peut s'attendre à des systèmes de stockage de l'énergie électrique moins chers et plus capacitifs.
- **Etat de développement :**
Les batteries au plomb sont apparues en 1858, le principe de base (RedOx) est très répandu. On atteint désormais des capacités très intéressantes (Li-ion) et les besoins sont en perpétuelle augmentation grâce aux nombreux appareils portatifs qui nous entourent.
- **Portabilité :**
Les batteries électrochimiques sont utilisées dans la quasi-totalité des voitures électriques mais leur poids reste un inconvénient non négligeable.
- **Conclusion :**
Les batteries électrochimiques sont beaucoup utilisées pour le stockage d'électricité pour les appareils portatifs mais l'investissement pour du stockage massif d'énergie reste encore trop élevé.

6) Hydrogène

○ Principe :

Voici le principe du stockage d'énergie à l'aide de l'hydrogène :



On remarque que pour utiliser l'hydrogène après son stockage, on utilise une pile à combustible. Il faut faire attention et ne pas mélanger pile à combustible et stockage d'énergie car les deux ne sont liés que dans le cas de l'hydrogène alors que les piles à combustible peuvent fonctionner avec de nombreux autres fluides.

○ Rendements :

Rendement de 30% (60% lors de l'électrolyse et 50% avec la pile à combustible)

○ Puissance ou énergie stockée :

Les puissances stockées dépendent des réservoirs et n'ont donc pas vraiment de limite. Le facteur limitant est le type des piles à combustible qui ont une puissance variant de 1kW à 1MW selon les technologies.

○ Investissement :

Les investissements sont très lourds, mais il n'y a pas de chiffres sérieux communiqués.

○ Durée de vie :

Très importante, 15000 cycles (20 ans) pour les réservoirs en fibre de carbone.

○ Faisabilité :

Le stockage de l'hydrogène n'a pas de contrainte géographique particulière et on sait faire des réservoirs supportant des pressions importantes, nécessaires dans le cas de l'hydrogène (400 à 800bars).

○ Impact environnemental :

La combustion de l'hydrogène produit uniquement de l'eau. Cependant, les électrolytes utilisés dans les piles à combustible peuvent contribuer à l'effet de serre.

○ Capacité actuelle :

Pour l'instant très peu de projet sont commercialisés et la capacité de stockage grâce à l'hydrogène est aujourd'hui négligeable.

○ Capacité future :

Il est difficile de savoir les capacités futures tant les projets sont divers. On parle de piles à hydrogène dans les voitures, ou portables, et même de micro-piles à hydrogène.

○ Etat de développement :

Il est impossible de dire que la technologie est prête à être commercialisée. Beaucoup de projets sont à l'étude mais la capacité volumique du stockage à hydrogène n'est pas assez élevée pour être rentable, d'un point de vue encombrement.

○ Portabilité :

La portabilité des piles à hydrogène est très bonne et l'on pourrait même les voir équipées nos téléphones portables par exemple.

○ Conclusion :

L'hydrogène est une solution de stockage prometteuse mais qui a du mal à se concrétiser notamment pour les voitures à hydrogène, la faute à un encombrement ou un poids trop élevé. Cependant, des systèmes avec une taille réduite pourraient bientôt faire leur apparition notamment dans l'automobile pour remplacer le lithium qui devient très cher.

III) Les solutions de stockage de l'énergie thermique

1) Chaleur sensible

○ Principe :

On produit de l'eau chaude (avec l'énergie solaire par exemple) que l'on stocke ensuite pour restituer à la demande. On distingue 2 catégories de systèmes de stockage à chaleur sensible, d'une part le stockage journalier, d'une autre part le stockage saisonnier. On peut également les classer selon le type de réservoirs, à savoir classiques ou naturels dits géothermiques. On note enfin que l'on peut stocker du chaud ou du froid.

○ Rendements :

Rendement de 50 à 90% selon la technologie employée.

○ Puissance ou énergie stockée :

Certains systèmes (géothermiques) peuvent aller jusqu'à plusieurs milliers de m³.

○ Investissement :

Très variable selon le type de stockage, la profondeur ou la capacité.

○ Durée de vie :

Plusieurs décennies

○ Faisabilité :

Pour les réservoirs de type journalier, il n'y a pas de contrainte. Pour les réservoirs de stockage saisonnier de nombreuses études du sous-sol doivent être effectuées. La France n'a pas un potentiel très important.

○ Impact environnemental :

Sachant qu'il est question de modification du sous-sol, toutes les précautions doivent être prises pour assurer un impact environnemental minimum.

○ Capacité actuelle :

Les stockages journaliers sont surtout destinés aux particuliers par le biais des ballons d'eau chaude sanitaire (solaires ou pas). Pour le stockage saisonnier, plusieurs installations ont été mises en place notamment à Berlin où une extension d'un premier projet est en cours.

○ Capacité future :

Pour le moment, les réservoirs saisonniers accusent trop de pertes thermiques pour être implantés. Si l'on trouve des solutions d'isolation intéressantes et/ou que le prix des énergies fossiles augmente fortement, les capacités pourraient être accrues rapidement.

○ Etat de développement :

Les systèmes journaliers sont très développés et la technologie est mature. Pour les stockages de grandes dimensions, peu de logiciels de modélisation existent, tout comme le personnel formé à l'implantation de telle structure.

○ Portabilité :

La portabilité est nulle puisqu'on travaille avec de l'eau.

○ Conclusion :

Les réservoirs saisonniers par chaleur sensible paraissent être une bonne voie. Cependant, il n'est pas dit que les problèmes d'isolation soient résolus rapidement. Pour les systèmes journaliers et donc individuels, les pertes thermiques sont très faibles si le ballon est en volume chauffé. C'est donc une solution très intéressante et facile à mettre en place.

2) Chaleur latente

○ Principe :

Lors du changement de phase d'un matériau des chaleurs sont mises en jeu (qui ne font pas varier la température), c'est ce qu'on appelle la chaleur latente. On peut ainsi stocker de la chaleur en faisant évaporer un matériau que l'on condensera en temps voulu pour récupérer l'énergie emmagasinée lors de la transformation d'état. Les matériaux utilisés sont nommés MCP pour Matériaux à Changement de Phase. La chaleur latente est aujourd'hui très étudiée pour le déphasage (de quelques heures) de la température des bâtiments en intégrant des MCP dans les murs.

○ Rendements :

Le rendement varie selon les MCP mis en place. Il dépend en effet de la différence entre la chaleur latente de vaporisation et de condensation, qui elles-mêmes varient en fonction de la pression notamment.

○ Puissance ou énergie stockée :

La puissance stockée n'est pas un critère dans ce genre de méthode. On s'intéressera plus à l'inertie thermique récupérée.

○ Faisabilité :

Différentes méthodes peuvent être utilisées comme l'imprégnation dans des matériaux poreux ou l'encapsulation.

○ Impact environnemental :

Les MCP peuvent avoir un impact conséquent sur l'environnement. Des mesures pour limiter l'utilisation de certains gaz caloporteurs des pompes à chaleur (qui sont des MCP) ont d'ailleurs été prises.

○ Etat de développement :

De nombreuses recherches sont en cours mais peu de projet à l'échelle 1 sont aujourd'hui à l'étude. On peut noter la commercialisation marginale d'une capsule pour les ballons d'ECS solaire donc l'efficacité n'est pas prouvée.

○ Conclusion :

Les MCP pourraient être une bonne solution pour augmenter l'inertie des bâtiments notamment pour les maisons en bois dont la faible inertie pose des problèmes. Quelques projets industriels pour utiliser les MCP comme un stockage d'énergie « classique » sont à l'étude mais les résultats ne sont pour le moment pas très encourageants.

3) Biomasse énergétique

La biomasse énergétique, comme le bois ou les boues des stations d'épuration, est un stockage d'énergie puisque l'on peut récupérer de l'énergie thermique après combustion. L'idée est de favoriser la pousse de la biomasse afin de récupérer un maximum d'énergie rapidement.

Par exemple la bagasse de canne à sucre est une biomasse de bonne capacité énergétique (2.3 kWh/kg à 48% d'humidité contre 6.8 kWh/kg à 9% d'humidité pour du colza). Le colza reste plus énergétique, mais la canne à sucre comme le Miscanthus (4.7 kWh/kg) sont des biomasses bon marché. De plus elles sont faciles à brûler (biomasses non oléagineuses) et surtout ce ne sont pas des biomasses alimentaires comme le colza ou le blé. En effet, l'engouement pour la biomasse énergétique utilisée dans les carburants causes des problèmes alimentaire, au Brésil par exemple où les champs destinés à l'alimentation servent désormais à la production de carburant "vert".

Le problème de ces biomasses est la pousse qui prend beaucoup de temps par rapport à la demande énergétique. Il y a aussi le problème des conditions météorologiques non favorables en France.

Pour compenser ces problèmes on peut imaginer une solution verte de surexploitation de la biomasse énergétique. Voici la liste de technologie à mettre en œuvre :

- On utilise des panneaux solaires thermiques pour chauffer les serres.
- Pour le renouvellement de l'air et le séchage on peut penser à un système de récupération de l'air de la serre pour utiliser au maximum l'énergie produite par les panneaux.
- Pour l'alimentation électrique, on peut utiliser un système de panneaux solaires photovoltaïques.

Grâce à la pousse rapide de biomasse énergétique, une région peut, par exemple, stockée de l'énergie sous forme de biomasse pendant tout l'été pour la restituer l'hiver grâce à des réseaux de chaleur alimenter par des chaudières à biomasse. Bien sûr ce genre de procédé doit être réfléchi et sa mise en place prendra du temps (filière biomasse sur la région, création de réseaux de chaleur, mise en place de chaudières biomasses). Mais cela reste un procédé facile à mettre en œuvre et surtout les émissions de gaz à effet de serre sont quasi-nulles.

IV) Quelles solutions mettre en place en Pays de la Loire ?

1) Le contexte énergétique des Pays de la Loire

L'association Virage Energie Climat en Pays de la Loire nous a demandé de faire cette étude afin de connaître les solutions de stockage de l'énergie produite en Pays de la Loire. En effet dans leur rapport d'Octobre 2010, ils annoncent que des solutions de stockage devront être mises en place en Pays de la Loire afin de rentrer dans les objectifs Européen de réduction des émissions de gaz à effet de serre. En plus des solutions de stockage, les Smart Grid semblent être des solutions intéressantes pour économiser et mieux gérer l'énergie.

Selon l'association Virage Energie Climat, la consommation d'énergie en Pays de la Loire en 2010 est de 7.80Mtep. Les objectifs d'ici à 2020 seraient de faire diminuer cette consommation jusqu'à 5.46Mtep puis à 3.90Mtep d'ici à 2050. Voir tableau ci-dessous.

Evolution des économies d'énergie et de l'apport en ENR (unités d'énergie en Mtep)

	Energie en Mtep \ échéances	1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050
A	Consommation d'énergie actuelle	5,88	7,05	7,80				
B	% économie énergie sur 2010				30%	38%	44%	50%
C	Énergie après les économies	5,88	7,05	7,8	5,46	4,84	4,37	3,90
D	% du disponible ENR				70%	85%	100%	115%
E	Apport des ENR	0,00	0,00	0,00	2,0	2,47	2,9	3,34
F	Énergies "classiques" restantes	5,88	7,05	7,80	3,43	2,37	1,47	0,56

2) Les solutions les plus cohérentes

En terme de stockage d'énergie, nous recommandons la technologie de l'air comprimé adiabatique (sans apport de gaz). Ce procédé permet de stocker beaucoup d'énergie avec un principe simple de compression/détente, il peut s'adapter à tous les procédés de production d'énergie et le stockage peut se faire dans des cavernes naturelles ou dans des réservoirs. La technologie de l'air comprimé adiabatique repose sur le même principe que les STEP (stocker de l'énergie à un potentiel plus élevé en période creuse et la restituer en période pleine), nous recommandons également cette technologie mais le potentiel en Pays de la Loire est beaucoup plus faible.

Ces technologies doivent être couplées à des systèmes permettant de fournir de l'énergie rapidement. On retient dans ce cadre, les volants d'inertie et les supercondensateurs qui sont deux technologies faciles à mettre en place.

La biomasse énergétique est une énergie de stock très importante en France et il convient de l'utiliser à bonne escients. Il faut gérer la ressource forestière et mettre en place des filières bois pouvant alimenter les chaufferies bois et les chaudières individuelles.

Conclusion

Cette étude nous a permis de faire l'état de l'art concernant le stockage de l'énergie. Plusieurs technologies semblent émerger comme l'air comprimé adiabatique et les STEP qui se développent en milieu non-montagneux. Il faut noter que le stockage de l'énergie coûte cher et que la technologie employée doit être fonction de nombreux facteurs comme le mode de production et de consommation ainsi que des conditions géographiques. Il convient donc de faire une étude pour chacun de ces modes de production et de consommation. Par exemple le stockage par air comprimé adiabatique est le plus adapté pour les éoliennes car les bombonnes peuvent se placer directement sur site et la génératrice de l'éolienne peut être remplacée par un compresseur. Dans un autre cas, les STEP seront plus utilisées pour le nucléaire et les supercondensateurs et volants d'inertie pour les transports.

Au vu de l'investissement, nous pensons que l'association Virage Energie Climat doit mettre l'accent sur les économies d'énergies et les réductions de gaz à effet de serre et non pas sur le stockage. En effet, de nombreuses économies d'énergie peuvent être faites dans l'habitat et dans les transports. La sensibilisation et la mise en place de systèmes communicatifs et actifs permettant de réduire les consommations d'énergie semblent être la voie la plus adaptée au niveau de l'association. Le stockage de l'énergie ne doit pas être abandonné pour autant, car dans les années à venir, avec l'augmentation des productions intermittentes, des systèmes comme nous avons présentés devront obligatoirement compenser des variations de productions importantes.

Bibliographie

- Air Comprimé
Projet ADELE : <http://www.fedre.org/de/node/827>
<http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/63342.htm>
<http://www.techno-science.net/?onglet=news&news=5871>
- Volant d'inertie
www.cea.fr
La Revue 3E.I, Mars 2007,p20-29
- Supercondensateurs
La Revue 3E.I, Mars 2007,p20-29
Le stockage de l'énergie, Pierre Odru, DUNOD, p101-106
- STEP :
<http://www.hydroelec.fr/>
Le stockage de l'énergie, Pierre Odru, DUNOD, p101-106
2010.04.12_FR_Notes_EnergyStorage_EnergyThic_Stockage_energie_electrique_dans_le_nord_de_la_France1.pdf, François Lempérière
- Stockage par hydrogène :
Le stockage de l'énergie, Pierre Odru, DUNOD, p130-134
<http://www.cnr.ac.ma/>
Energie et développement durable, Octobre-Novembre 2010,p20-26
- Chaleur sensible :
Le stockage de l'énergie, Pierre Odru, DUNOD, p162-169
- Chaleur latente
Le stockage de l'énergie, Pierre Odru, DUNOD, p162-171
www.cea.fr/

Annexe 1 Récapitulatif des solutions

Energie Electrique					
Nom de la solution	Hydrogène	Air comprimé	Volant d'inertie	Supercondensateur	Potentiel (STEP)
Rendement (%)	50-60	40-80	85-95	85-95	82-85
Investissement	600€/kW	1,2 millions d'€/MW	250€/kWh	50 000 à 150 000 €/kWh ou 300€/kW	1000 à 2000€/kWh
Durée de vie (ans)	jusqu'à 100000h	15 000cycles (20ans) pour les réservoirs	20	de 10 000 à 500 000 cycles/dépend des conditions d'utilisation	-
Implantation	peu d'encombrement	Sites caverneux et réservoirs	industrie/portable	industrie	Sites en hauteur
Capacité actuelle	0.1 à 100 GWh	300MW-2,7GW	1MW pendant 1h	1 a 10 Wh/kg : Réalisé = Quelques kWh	6 GW (France)
Capacité future	0.1 à 100 GWh	4,2GW	Recherche	Recherche	100-200GWh
État de développement	Avancé	Existe depuis 50 ans	Existe depuis 40 ans	centres de recherches + militaire + batterie (ordinateurs, télécoms) + automobile (appel de puissance)	Existe depuis 50ans
Développeurs	Centre de recherche	RWE, DLR	Sevil	Centre de recherche	Collectivités
Remarques		Projet ADELE en Allemagne : Gwh stocké Mw elect		Connaissances aisée sur l'état de charge (tension)	

Energie Electrique						Energie thermique	
Nom de la solution	Batterie Plomb	Batterie Ni-MH	Batterie Ni-Cd	Batterie Li-ion	Batterie Li-Polymère	Chaleur sensible	Chaleur latente
Rendement (%)	70 à 75	50 à 70	70 à 90	85 à 98	90 à 95	50-90	-
Investissement	0,1€/wh stocké	0,7€/wh	0,5€/wh	1,5€/wh	-	variables	-
Durée de vie (ans)	-	-	dépasse 2000cycles	maximum 2000cycles	1000cycles	plusieurs décennies	plusieurs décennies
Implantation	Stockage à grande échelle	Pour appareil portatif	Pour appareil portatif	Prix trop élevé pour du stockage massif	-	Sous-sol	Maisons individuelles, ballon d'ECS solaire
Capacité actuelle	30 à 40 Wh/kg	60 à 70 Wh/kg	30 à 50 Wh/kg	200Wh/kg	130 à 230Wh/kg	-	-
Capacité future	30 à 40 Wh/kg	Recherche avancé	Recherche avancé	Recherche Avancé	Recherche	plusieurs milliers de m ³ d'eau	100-150kWh/m ³
État de développement	Possibilité d'approcher les Quelques MWh	appareil électronique portable/toyota prius	Référence pour les applications de transport	utilisée pour tous les nouveaux appareils portables.		Avancé	Moyennement avancé
Développeurs						Centres de recherche	CSTB-Kaplan, DLR
Remarques	seule utilisé epour des batteries non portatives	-	Recyclable supporte bien les décharges ou surcharges toxique interdit au marché public	Le lithium est rare Le li-ion est dangereux (recherche vers d'autres matériaux)	recherche et développement	Beaucoup de pertes thermiques	Utilisée plus pour créer de l'inertie et donc un déphasage