

Compte rendu de la réunion du 14/03/2013 de la commission « Prospective »

Nous avons abordé les thèmes suivants :

- Panneaux photovoltaïques mobiles
- Mini centrales hydroélectriques
- Le stockage des énergies .

Panneaux photovoltaïques mobiles

Ce sont de petits panneaux de cellules solaires fournis avec le convertisseur qui permet de les raccorder au réseau électrique de la maison au moyen d'un simple cordon à brancher sur une prise électrique. La puissance fournie est de l'ordre de 300 W (équivalent de la consommation d'une dizaine de lampes basse consommation, ou d'un ordinateur...). Le panneau peut se poser sur un balcon, dans un jardin évidemment avec une orientation la plus proche du sud afin d'obtenir le meilleur rendement. Le coût de l'ensemble avoisinerait les 500 € en faisant une commande groupée.

Sites liés au photovoltaïque et à la consommation électrique :

<http://www.rte-france.com/fr/>

Permet , entre autre de visualiser la consommation d'électricité sur le territoire.

<http://www.eex.com/en/> (infortunetly in english)

Malheureusement en anglais, mais pour ceux que la barrière de la langue ne fait pas reculer, donne les volumes d'échange de l'électricité entre pays européens, les tarifs d'achats...

<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/> (in english to)

Encore en anglais, Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) permet, en fonction de la région, de l'exposition, de l'inclinaison du toit de la surface de cellules installée... de calculer le rendement des panneaux photovoltaïques que l'on envisage d'installer sur son toit.

Mini centrales électriques :

Prenant sur celle déjà existante du côté de Lods, nous avons envisagé de répertorier les sites ou pourrait être envisagée l'installation de mini centrales électrique et en particulier les multiples moulins ayant existé au long de nos rivières. L'avantage de ces centrales est de fournir leur maximum l'hiver ; au moment où les cours d'eau ont leur plus fort débit et où la demande électrique est la plus forte.

Le stockage de l'énergie :

Voici une revue des moyens de stockage de l'énergie électrique, nous en ferons l'analyse afin d'envisager si l'un ou l'autre de ces moyens sont applicables dans notre région.

Définition du stockage :

Le stockage de l'énergie est l'action qui consiste à placer une quantité d'énergie en un lieu donné pour permettre son utilisation ultérieure. Par extension, le terme « stockage d'énergie » est souvent employé pour désigner le stockage de matière qui contient cette énergie. La maîtrise du stockage de l'énergie est particulièrement importante pour valoriser les énergies alternatives, telles que l'éolien ou le solaire, sûres et renouvelables, mais par nature intermittentes.

Rendement du stockage d'énergie

Le rendement d'un cycle correspond au rapport entre la quantité d'énergie récupérée sur la quantité d'énergie que l'on a cherché initialement à stocker. En effet, chacune des deux opérations de stockage et de déstockage induit invariablement des pertes d'énergie ou de matière : une partie de l'énergie initiale n'est pas réellement stockée et une partie de l'énergie stockée n'est pas réellement récupérée. Le rendement d'un cycle de stockage d'énergie dépend énormément de la nature du stockage et des systèmes physiques mis en œuvre pour assurer les opérations de stockage et de déstockage.

Les grandes formes de stockage :

Stockage : de combustible (hydrocarbure, charbon, gaz, bois...)
électrochimique (piles, batteries, condensateurs...)
de calories (matériaux à grande inertie thermique..)

mécanique (volent d'inertie..)
d'énergie potentielle de pesanteur (remontée d'eau dans les barrages)

Stockage de combustible

Le stockage actuel des hydrocarbures et gaz naturel en cuves ou en cavités naturelles est bien connue et ne fait que conserver des énergies non renouvelables.

Par contre le stockage de l'énergie électrique issue d'énergie renouvelable est envisageable sous forme gazeuse. Voici les principales voies connues à l'heure actuelle :

Méthane :

L'énergie électrique excédentaire d'origine éolienne ou photovoltaïque est utilisée pour décomposer de l'eau en dihydrogène et dioxygène (électrolyse de l'eau), puis le dihydrogène est utilisé pour méthaniser du dioxyde de carbone (réaction de Sabatier).

L'un des principaux intérêts de ce procédé est d'utiliser les infrastructures (réservoirs et conduites de gaz) existantes, dont la capacité de stockage serait suffisante pour couvrir les besoins de méthane de l'Allemagne pendant plusieurs mois, par exemple pendant les périodes où le solaire et l'éolien ne peuvent couvrir les besoins énergétiques.

Hydrogène :

L'hydrogène comme carburant a été proposé comme solution dans les problèmes d'énergie. Il peut aussi être utilisé comme combustible ou pour la production d'électricité par une pile à combustible. Le stockage peut être réalisé sous plusieurs formes, **qui ont toutes un faible rendement :**

Stockage d'hydrogène gazeux :

Ce mode de stockage est le plus simple technologiquement, mais il présente des inconvénients. La plupart des matériaux sont en effet poreux vis-à-vis de l'hydrogène (phénomène de diffusion intra-atomique du à la très faible taille du noyau d'hydrogène, il passe au travers des mailles cristallines des métaux et de la matière condensée en général), ce qui génère des pertes lors d'un stockage de longue durée. De plus, ce mode de stockage nécessite une masse et un volume de stockage importants, et une compression fort coûteuse sur le plan énergétique. Néanmoins le stockage à 350 bar et à 700 bar avec des matériaux composites permet d'alimenter des flottes expérimentales de véhicules en Europe depuis 2000, notamment les autobus des projets européens Ectos, CUTE, Hyfleet Cute et bientôt CHIC.

Quatre constructeurs automobiles prévoient un lancement en série de voitures à piles à combustible en 2015 : Mercedes-Benz, Honda, Général Motors et Hyundai. La Mercedes "fuel cell" class B est en location à Oslo depuis janvier 2011. Vingt deux stations services hydrogène mises en place en 2010 et un total de 212 dans le monde distribuent l'hydrogène à 350 et/ou 700 bars et/ou sous forme liquide.

Stockage d'hydrogène liquide :

La liquéfaction de l'hydrogène (vers -252 °C) permet de pallier partiellement le problème de volume du stockage gazeux (bien que la densité de l'hydrogène liquide ne soit que de 70 g/l) mais nécessite de refroidir l'hydrogène et de le conserver à très basse température: ce **stockage est compliqué, très consommateur d'énergie, et éventuellement dangereux**. Il est réservé en général au spatial, mais il est aussi utilisé pour des voitures à hydrogène liquide, comme une version (non disponible à la vente) de la BMW série 7

Stockage sous forme de composés chimiques capables de libérer facilement le gaz.

On peut citer diverses propositions qui ont été faites plus ou moins récemment :

_ l'utilisation de nanotubes de carbone

_ les hydrures métalliques : Magnésium et autres métaux légers (titane, aluminium, ...).

_ l'acide formique qui par un procédé utilisant du fer comme catalyseur se décompose en dihydrogène et dioxyde de carbone. Cette voie catalytique permet d'après ces travaux d'obtenir 53 grammes d'hydrogène pur par litre d'acide formique aux conditions normales de température et de pression, contre 28 grammes pour de l'hydrogène comprimé à 350 bars.

Une alternative prometteuse est d'introduire (en une sorte de stockage diffusif) cet hydrogène dans le réseau public de gaz naturel qui peut en recevoir sans aucun problème jusqu'à 5 %. Cette solution sera expérimentée en 2013 (360 m³ d'H₂ injectée par heure) par le groupe E.ON dans le nord-est de l'Allemagne (à Falkenhagen via une installation pilote. En portant la proportion de 5 à 15 %, ce qui semble techniquement faisable, « *la totalité de la production actuelle (2011) d'électricité d'origine renouvelable pourrait être stockée dans le réseau gazier allemand* ».

Stockage sous forme d'énergie mécanique

L'énergie est stockée sous forme d'un fluide (eau ou air comprimé).

Stockage hydraulique

Les barrages hydrauliques constituent des réserves d'eau qui en tombant dans des conduites, actionnent des turbines fournissant l'énergie mécanique aux générateurs d'électricité.

Une optimisation du système consiste à réutiliser l'eau conservée ou issue d'un fleuve au pied de la centrale hydroélectrique. Le stockage par pompage-turbinage (également appelé STEP : *Station de Transfert d'Énergie par Pompage*) est utilisé pour égaliser la charge quotidienne (c'est-à-dire le besoin en électricité) : de l'eau est pompée et remontée vers les barrages d'altitude quand la demande sur le réseau est faible (pendant les heures creuses et le week-end par exemple), en utilisant la production excédentaire de sources d'énergie non ajustables (nucléaire, solaire, éolien,...) ; pendant les pics de consommation, cette eau redescend sous-pression et produit à nouveau de l'électricité.

C'est le même dispositif électromécanique réversible, qui produit de l'électricité en turbinage ou en consommation pour remonter de l'eau par pompage. **Le rendement est bon (de l'ordre de 80%** aux bornes de l'usine, en tenant compte des pertes de charge dans la conduite, du rendement des moteurs/alternateurs, des pompes/turbines et des transformateurs). Cependant, relativement peu de lieux conviennent: dotés des barrages de stockage de taille suffisante et avec un grand dénivelé entre les barrages/réserves d'eau inférieur et supérieur.

On utilise aussi une variante de ce dispositif dans la centrale marémotrice de la Rance (en France) : à marée haute, on ne se contente pas de stocker passivement l'eau, on pompe aussi pour augmenter la réserve, cette eau sera relâchée avantageusement à marée basse (on monte l'eau de quelques mètres, par contre on utilise son potentiel de chute sur une dizaine de mètres *de plus*).

Air comprimé

CAES (*Compress Air Energy Storage*) sous-marin

On sait utiliser de l'air comprimé pour produire un travail mécanique, par conséquent il est possible de stocker de l'énergie en comprimant un gaz (en général avec un compresseur mu par de l'énergie électrique disponible). **Le rendement est médiocre**, car la compression s'accompagne d'un échauffement du gaz, sauf à récupérer la chaleur produite (cogénération air comprimé + chaleur). Un système de ce type est actuellement développé par la société Enairys.

À plus grande échelle, on peut utiliser des cavernes souterraines ou d'anciennes mines pour stocker l'air comprimé; IFP Énergies nouvelles a récemment (2013) publié une étude sur cette technologie. Quand il y a une forte demande d'électricité, on utilise l'air qui a été précédemment comprimé et stocké pour mettre en mouvement une turbine qui grâce à un alternateur produit de l'électricité. Des installations de ce type ont été mises en place ou sont en projet à McIntosh dans l'Alabama (États-Unis), dans l'Iowa et en Allemagne, bien que le **rendement ne soit que d'environ 40 %**.

Une variante de ce système visant à stocker l'air comprimé dans un réservoir sous-marin profond (1000 à 2 000 m), est en développement au Royaume-Uni avec le soutien du producteur d'électricité E.ON²⁴.

Stockage sous forme d'énergie cinétique

Principalement utilisé sur des véhicules en mouvement, l'énergie est stockée dans un volant d'inertie qui stocke dans les descentes et restitue lorsque nécessaire.

Ce procédé a été utilisé dans les transports en communs mais peu fiable, faible rendement et coûteux.

L'évolution technique remet ce système au goût du jour. L'utilisation de deux disques contra-rotatifs plus légers, tournant à très grande vitesse grâce à de nouveaux matériaux plus résistants, et lancés par un moteur électrique intégré, permet une nette amélioration du rapport poids à vide / charge utile. Ceci permet également une utilisation dans les villes en pente, où le poids est encore plus pénalisant.

Plusieurs constructeurs travaillent ainsi sur l'application du volant d'inertie aux transports en commun, notamment Alstom pour ses tramways qui expérimente cette technique sur le réseau de Rotterdam depuis 2005.

Des applications dans le domaine ferroviaire ont également été tentées. Des volants d'inertie sont aussi utilisés depuis 2009 sur des voitures de Formule 1 (système SREC) et sur certaines voitures de sport pour récupérer l'énergie cinétique lors des freinages.

Le rendement de ce système, appelé parfois "batterie mécanique", est supérieur à celui permis par l'utilisation d'accumulateurs chimiques.

Cette technologie est aussi utilisée dans des alimentations sans interruptions statiques (ASI) et dynamiques (ADI) (*Uninterruptible Power Supply* en anglais) permettant de pallier la rupture de l'alimentation électrique pendant plusieurs secondes et de permettre d'attendre le démarrage d'un groupe de secours.

Stockage de l'énergie thermique

Le stockage de chaleur peut être réalisé à travers deux phénomènes différents associés aux matériaux qui assurent le stockage. On parle alors de stockage par chaleur sensible et de stockage par chaleur latente.

Le stockage par chaleur sensible

Dans le stockage par chaleur sensible, l'énergie est stockée sous la forme d'une élévation de température du matériau de stockage. La quantité d'énergie stockée est alors directement proportionnelle au volume, à l'élévation de température et à la capacité thermique du matériau de stockage. Ce type de stockage n'est limité que par la différence de température disponible, les déperditions thermiques du stockage (liée à son isolation thermique) et l'éventuel changement d'état que peut être amené à subir le matériau de stockage (fusion ou vaporisation).

Quelques exemples de stockage de chaleur sensible :

Dans les systèmes de chauffage domestiques, on utilise parfois la grande inertie thermique de certains matériaux (briques, huile) pour restituer lentement la chaleur accumulée au cours des périodes où la chaleur a été produite ou captée. Mais le plus souvent, le stockage est assuré par un ballon d'eau chaude isolé.

Dans les fours à feu de bois, en brique et terre réfractaire, la capacité de la voûte du four à emmagasiner la chaleur est utilisée pour la cuisson d'objets (poterie, émaux, etc.) ou de plats (pain, pizza, etc.).

Le stockage de l'énergie excédentaire produite par les centrales solaires le jour, afin d'être utilisée le soir et la nuit (exemple : chauffage urbain de la ville de Krems sur le Danube). Cette technique est utilisée dans des centrales solaires thermiques, telles les trois centrales d'Andasol en Espagne qui peuvent stocker chacune 0,35 GWh dans des réservoirs de sels chauffés à 390 °C.

Le stockage par chaleur latente

Dans le stockage par chaleur latente, l'énergie est stockée sous la forme d'un changement d'état du matériau de stockage (fusion ou vaporisation). L'énergie stockée dépend alors de la chaleur latente et de la quantité du matériau de stockage qui change d'état. Contrairement au stockage sensible, ce type de stockage peut être efficace pour des différences de températures très faibles. Dans le cas du changement de phase solide/liquide, et pour une quantité d'énergie stockée et un matériau de stockage donnés, le stockage latent nécessite moins de volume que le stockage par chaleur sensible du fait que la chaleur latente est généralement beaucoup plus élevée que la capacité calorifique.

Ces deux types de stockage peuvent être utilisés pour stocker du froid.

Quelques exemples de stockage de chaleur latente :

Des matériaux à changement de phase (MCP) sont actuellement étudiés pour améliorer l'inertie thermique des parois des bâtiments.

Les pompes à chaleur, notamment les réfrigérateurs, congélateurs et climatiseurs, utilisent des fluides changeant de phase comme caloporteurs. Ceux-ci ne stockent pas à proprement parler de chaleur, l'emmagasinant uniquement le temps du transport.

Des solutions pour l'avenir :

Supraconductivité

Le stockage magnétique à supraconducteur est appelé aussi SMES "*Superconducting Magnetic Energy Storage*" (Stockage d'énergie magnétique par bobine supraconductrice). Ce système permet de stocker de l'énergie sous la forme d'un champ magnétique créé par la circulation d'un courant continu de très haute intensité dans un anneau supraconducteur refroidi sous sa température critique de transition vers l'état supraconducteur. Le coût des équipements nécessaires et l'énergie requise pour la réfrigération réservent ce type de stockage à des applications de hautes technologies.

Antimatière

Bien que le stockage d'énergie par antimatière ne soit pour l'instant qu'une vue théorique, le principe pourrait être le suivant :

La phase « stockage » pourrait être réalisée en concentrant un photon très énergétique en un point précis, ce qui aurait pour effet de produire deux particules (une de matière, l'autre d'antimatière).

La phase "déstockage" serait réalisée en mettant en contact ces deux particules, qui en se rencontrant produiraient une formidable décharge d'énergie (la recombinaison de 10 kg de matière avec 10 kg d'antimatière produirait 500 TWh ($E = m.c^2 = 20 \text{ kg} \times (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 = 1,8 \times 10^{18} \text{ J}$, $1 \text{ TWh} = 3,6 \times 10^{15} \text{ J}$, $1,8 \times 10^{18} \text{ J} / 3,6 \times 10^{15} = 500 \text{ TWh}$) soit la production annuelle d'électricité de la France).

Les difficultés sont de plusieurs ordres :

Difficulté de stockage : l'antimatière s'annihile spontanément et immédiatement au contact avec la matière. Il faut donc totalement l'isoler

La recombinaison matière antimatière ne produit pas une énergie simple à récupérer (photons de très haute énergie.).

La conversion photon → couple matière antimatière n'est pas systématique, le couple de particules produites n'est pas déterminé et leur séparation peut être difficile (dans le cas de particules neutres).

Toutes les formes d'énergie décrites ci-dessus peuvent se stocker, mais plus ou moins commodément, et avec un rendement plus ou moins bon. J'ai reproduit ci-dessous les masses qu'il faut mettre en jeu pour "stocker" l'équivalent d'un kg de pétrole.

Masse requise pour stocker l'équivalent d'un kg de pétrole (11,6 kWh - 1,3 litre en gros)						
Bois	Batteries plomb acide	Hydrogène comprimé	Masse en mouvement	Eau en altitude	Uranium	Chaleur
2,22 kg quelques m ² de surface mobilisés sur un an	plus de 300 kg de batteries	de 15 à 30 kg de réservoir, occupant un peu moins de 30 litres	2 camions de 40 tonnes lancés à 116 km/h	43 tonnes d'eau pouvant effectuer 100 m de chute	1 milligramme	10 °C d'élévation de la température pour 1 tonne d'eau , ou 50 °C d'élévation pour 200 kg d'eau

Une conclusion s'impose à la lecture de ce tableau : pour les combustibles fossiles, la fonction de stock, qu'ils remplissent naturellement, sera très difficile à remplacer à énergie consommée équivalente lorsque l'usage de ces combustibles aura diminué, sauf pour le bois, qui est le plus proche en termes de masses et espaces mobilisés. Le nucléaire est un cas intermédiaire : l'uranium n'est pas renouvelable et serait assez vite épuisé avec les filières actuelles, mais peut devenir quasi-renouvelable avec la surgénération, et par ailleurs il est très facile de stocker l'uranium mais bien plus difficile de stocker l'électricité qui est issue des centrales.

Après cette revue des possibilités de stockage des énergies et après discussion au cours de notre prochaine réunion, je vous propose de répertorier les solutions que nous pourrions envisager sur le plan local (réalistes et/ou utopiques...).

Liens utiles :

Connaissance des énergies : <http://www.connaissancedesenergies.org/>

Est-il facile de stocker de l'énergie : <http://www.manicore.com/documentation/stockage.html>

Stockage de l'énergie éolienne par batteries : <http://www.consoglobe.com/eoliennes-sait-stocker-electricite-1712-cg>