



# Stockage des énergies

Comment améliorer le rendement des énergies non carbonées

# Introduction

- Enjeux et technologies pour stocker l'énergie, dont l'électricité.
- L'utilisation du stock obtenu peut se restituer.
- Pas de nouvelles sources d'énergie, mais technologies mettant en adéquation l'offre et la demande d'électricité.
- Aucune technologie miracle ne dispensera des efforts d'efficacité et de sobriété énergétique nécessaires...

Cette conférence a pour objet les enjeux et les technologies explorées pour permettre le stockage de l'énergie, et particulièrement de l'énergie secondaire représentée par l'électricité. Celle-ci est constituée d'électrons en mouvement, elle ne peut être stockée directement et doit être transformée en une autre forme d'énergie stockable (chimique, gravitationnelle, inertielle, ...). L'utilisation du stock obtenu peut se faire ensuite sous forme d'électricité, de carburant ou de chaleur selon le mode de stockage choisi et le besoin énergétique.

Il ne s'agit pas de faire croire à l'émergence de nouvelles sources infinies d'énergie, mais de présenter les technologies qui pourront participer à l'adéquation entre l'offre et la demande d'électricité en facilitant la gestion de la variabilité de certaines sources d'énergie renouvelable. Aucune technologie miracle ne nous dispensera des efforts d'efficacité et de sobriété énergétique nécessaires à l'émergence d'une société 100% renouvelable...

## Définition

- Action qui consiste à placer une quantité d'énergie en un lieu donné pour permettre son utilisation ultérieure.
- Par extension,
- Maîtrise du stockage
- Ici

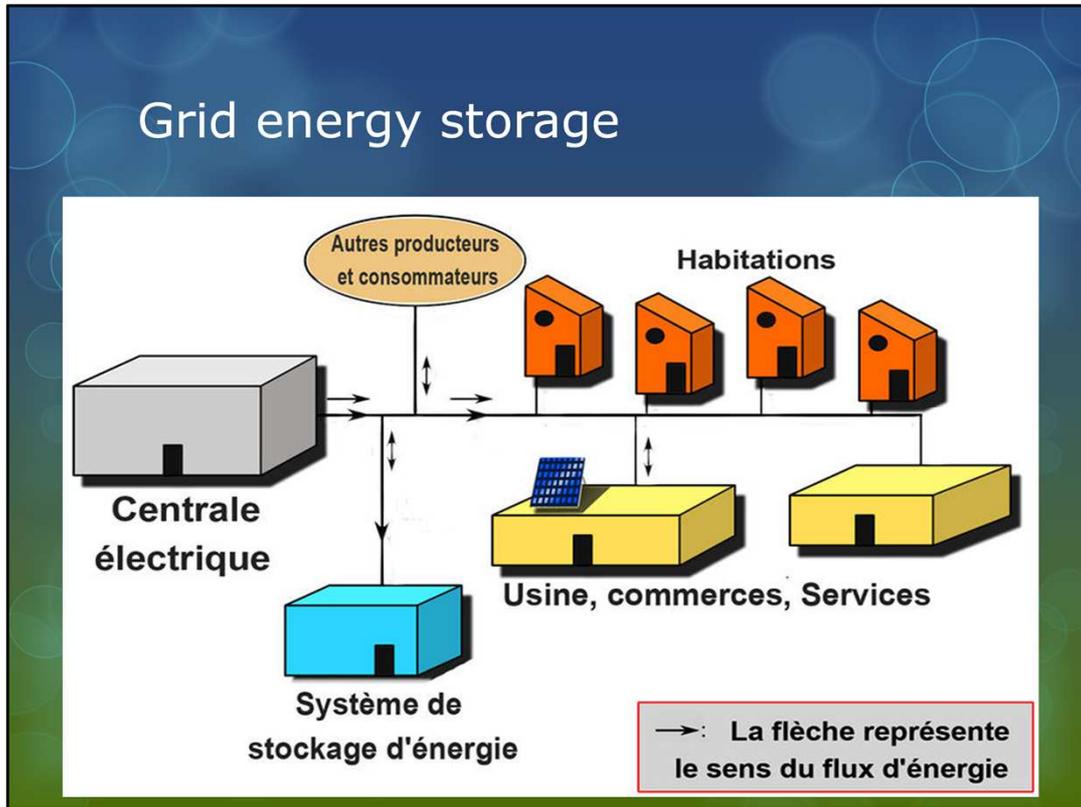
Le **stockage de l'énergie** est l'action qui consiste à placer une quantité d'énergie en un lieu donné pour permettre son utilisation ultérieure.

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 fluctuantes.

On s'intéressera ici principalement à l'opération consistant à créer un stock à partir d'énergie disponible, et non directement à la gestion des stocks (notamment des stocks d'énergie fossile), ni au déstockage.

## Grid energy storage



Voici le schéma simplifié et de principe d'un système intégré de stockage dans un réseau électrique, de type « *Grid energy storage* »

## Rendement

- L'opération de stockage d'énergie est toujours associée à l'opération inverse, le déstockage.
- À la fin d'un cycle
- Rendement d'un cycle
- Pertes d'énergie ou de matière inévitables
- Le rendement dépend de la nature du stockage et des systèmes physiques mis en œuvre.

L'opération de stockage d'énergie est toujours associée à l'opération inverse, consistant à récupérer l'énergie stockée (le déstockage). Ces deux opérations de stockage/déstockage constituent un cycle de stockage.

À la fin d'un cycle, le système de stockage retrouve son état initial (idéalement "vide").

On a alors régénéré le stockage. 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**
- **Stockage électrochimique**
- **Stockage de calories**
- **Stockage mécanique**
- **Stockage** sous forme d' **énergie potentielle de pesanteur** (par remontée d'eau dans des barrages quand il y a surproduction d'électricité)
- **Stockage électrostatique** : supercondensateurs avec matériaux supraconducteurs.

**Combustible** : La combustion est le processus énergétique le plus courant, c'est le stockage le plus développé. Tous les États disposent de stocks stratégiques de pétrole et/ou charbon, mais même en excluant ces éléments fossiles, il faut rappeler l'importance pratique du bois-énergie, dont on fait des stocks pour l'hiver, et le développement des agrocultures.

**Électrochimique** : A plus faible échelle, le stockage d'énergie pour la production d'électricité (électrochimique dans les piles et les batteries, électrique dans les condensateurs) est moindre en termes de quantité d'énergie, mais très importante sur le plan pratique. De nouvelles approches ou de nouvelles batteries associées à un système "intelligent" de gestion de l'énergie, permettent de doper le stockage d'électricité fluctuante (solaire, éolienne), pour stocker et autoconsommer jusqu'à plus de 75 % de la production d'électricité d'une maison équipée de modules PV. C'est le système Milléner.

**Calories** ; Au-delà de l'usage du cumulus, des habitations de grande inertie thermique (murs épais, bonne isolation) permettent de lisser et diminuer les besoins en chauffage et en rafraîchissement, permettant des économies directes. Les Matériaux à Changement de Phase (MCP) peuvent aussi dans les bâtiments accumuler de l'énergie solaire thermique de chauffe-eau solaires individuels (CESI). Les MCP permettent de lisser la production d'énergie (gratuite) fournie par le Soleil et d'augmenter la capacité de stockage grâce à leur grande densité énergétique volumique. La société Kaplan Energy a été le premier fabricant à équiper ses CESI et SSC (Système solaire combiné) de batteries solaires thermiques constituées de MCP. À l'échelle industrielle, on peut stocker la chaleur dans des réservoirs avant la production d'électricité, pour lisser l'apport solaire ; ce type d'usage est marginal en volume mais c'est une voie intéressante dans le cadre d'une production électrique par une centrale solaire thermodynamique.

**Stockage mécanique** ; C'est un élément pratiquement obligatoire dans tous les moteurs, sous forme de volant d'inertie, pour régulariser le mouvement à des échelles de temps très courtes, inférieures à la seconde. Il n'est pratiquement pas utilisé à long terme, car les quantités d'énergie stockées sont faibles (ainsi une automobile d'une tonne lancée à 150 km/h ne représente que 860 kJ, soit moins de 1/4 de kWh !).

**Énergie potentielle de pesanteur** (par remontée d'eau dans des barrages quand il y a surproduction d'électricité) ; il est déjà très utilisé pour la régulation et l'équilibrage des réseaux électriques. Il accroît la rentabilité et la disponibilité des énergies renouvelables.

**Électrostatique** : nous y reviendrons succinctement.

## Stockage d'énergie chimique : biomasse issue d'énergie rayonnante

- Deux formes, toutes deux combustibles :
  - le bois
  - l'huile
- Le stockage sous forme de biomasse est long (plusieurs mois), compliqué et cher, et d'un rendement faible (1 % de l'énergie solaire disponible).
- De plus, la biomasse comme carburant ne tire pas profit des propriétés alimentaires des molécules produites par les être vivants.
- Pour ces raisons, la biomasse est un mode de stockage accessoire et qui le restera.

La production de molécules riches en énergie par photosynthèse et facilement utilisable pour libérer cette énergie est à la base de la vie. L'homme récupère cette énergie stockée naturellement essentiellement sous deux formes, toutes deux combustibles : le bois et l'huile.

Le stockage d'énergie sous forme de biomasse est long (typiquement plusieurs mois), compliqué et cher, et d'un rendement faible (la photosynthèse ne récupère qu'environ 1 % de l'énergie solaire disponible). De plus, l'usage de la biomasse comme carburant ne tire pas profit des intéressantes propriétés des molécules produites par les être vivants, à commencer par leur qualité alimentaire. Pour toutes ces raisons, la biomasse est un mode de stockage accessoire (ce qui ne signifie pas négligeable), et qui le restera (pour autant qu'on s'autorise un pronostic).

## Stockage d'énergie chimique : potentiel électrochimique

- L'électricité est une énergie secondaire et un vecteur d'énergie non stockable.
- Le stockage d'électricité n'a jamais été réalisé.
- Batterie d'accumulateurs ou de piles utiles
  - Pour les petits appareils électroménagers
  - Pour les appareils électroniques embarqués (par exemple sur un bateau).
  - Pour les applications portables électroniques
- Véhicules électriques
- Condensateurs chimiques et « SuperCap »

L'électricité est une énergie secondaire et un vecteur d'énergie ; c'est-à-dire qu'elle résulte de la transformation d'énergie primaire. Une fois produite elle est instantanément consommée ou perdue. Elle n'est pas directement stockable (sauf dans un condensateur), et doit donc être convertie en une autre forme d'énergie pour être stockée.

Le stockage de grandes quantités d'électricité avec des accumulateurs électrochimiques géants n'a jamais été réalisé. Les accumulateurs électrochimiques sont généralement lourds, chers, ont une durée de vie limitée et posent des problèmes de pollution (acides et métaux lourds) lors de leur fin de vie, et même parfois des risques d'incendie voire d'explosion lorsqu'on les sort de leurs conditions normales d'utilisation.

En revanche, de nombreux systèmes domestiques déconnectés du réseau de distribution d'électricité sont basés sur l'utilisation de batterie d'accumulateurs ou de piles. En pratique, elles sont utiles pour les petits appareils électroménagers ou les appareils électroniques embarqués (par exemple sur un bateau). Les batteries au lithium sont massivement utilisées pour les applications portables électroniques, à plus de 95 % pour les téléphones, les ordinateurs portables et les caméscopes / appareils photo, avec 1,15 milliards de batteries au lithium mises sur le marché en 2003.

Récemment un regain d'intérêt pour les véhicules produisant peu ou pas de gaz polluants a relancé la création de véhicules électriques : vélos et automobiles fonctionnant complètement grâce à ce type d'énergie ou de manière hybride (électricité en complément d'énergie fossile). On s'oriente aujourd'hui vers des batteries au lithium, solutions LiPo et surtout LMP.

Les condensateurs de moyenne et grosse capacité, dits condensateurs chimiques et les « SuperCap » sont une autre utilisation des couples électrochimiques pour stocker de l'énergie. Leur utilisation est très courante dans les appareils et machines électriques avec ou sans électronique embarquée.

## Batterie d'accumulateurs



La batterie d'accumulateurs est le mode le plus courant de stockage d'électricité sous forme chimique.

Ci-dessous un aperçu des différentes technologies de batterie :

→ Batteries plomb / acide

→ Batteries Nickel-cadmium

→ Batteries Nickel – hydrure métallique

→ Batteries lithium-ion

→ Batteries lithium phosphate-fer

→ Batteries sodium-soufre

→ Batteries redox flow : à la différence des batteries classiques, les matières actives ne sont pas contenues dans deux anodes solides mais sont en solution dans deux électrolytes liquides séparés par une membrane échangeuse d'ions. Les électrolytes sont stockés dans deux réservoirs distincts et amenés par pompage au contact de la membrane où la réaction va se produire et libérer les électrons dans le circuit. Les développements, orientés essentiellement vers des applications stationnaires, sont focalisés sur trois systèmes : vanadium-vanadium, vanadium-brome et zinc-brome.

La Réunion dispose d'une batterie sodium-soufre de 1 MW sur 7 heures, pesant 100 t et affichant un rendement de 80%, garantie 15 ans par son constructeur japonais, NGK, et ayant nécessité un investissement de 3,5 millions d'euros. Inaugurée le 9 juillet 2010.

A Yokohama, un projet de smart grid intégrera en 2014 2000 véhicules électriques et une puissance PV de 27000 MWc répartis sur 4000 foyers.

## Stockage par le gaz : méthane = méthanation

- Réaction de Sabatier :
  - $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
  - Catalyse par nickel ou mieux ruthénium sur alumine
  - Température et pressions élevées
  - Étape clé de l'exploration martienne
  - Stocke les surplus d'énergie électrique solaire ou éolienne

Dans la perspective d'une transition vers des énergies renouvelables, des chercheurs de l'entreprise autrichienne Solar Fuel Technology (Salzbourg), en coopération avec l'Institut Fraunhofer de recherche sur l'énergie éolienne de Leipzig (IWES), le Centre de recherche sur l'énergie solaire et l'hydrogène de Stuttgart (ZSW) et l'université de Linz ont mis au point une solution de stockage de l'énergie sous forme de 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 une période où le solaire et l'éolien ne peuvent couvrir les besoins énergétiques.

## Parc énergétique de Morbach (Rhénanie-Westphalie)



Rien à voir avec les parasites pubiens...

Ce processus de méthanation permet de stocker les surplus d'énergie d'origine solaire ou éolienne sous forme de méthane. Une réalisation concrète existe déjà en Allemagne à l'Energielandschaft de Morbach, en Rhénanie.

## Stockage par le gaz : hydrogène

- L'hydrogène = carburant ou combustible dans une pile
- Plusieurs formes de stockage de faible rendement:
  - Hydrogène gazeux
  - Hydrogène liquide
  - Autres propositions :
    - Nanotubes de carbone, clathrates (cages d'eau)
    - Hydrures métalliques : le composé métallique agit comme une éponge à hydrogène. Les alliages LaNi5 sont utilisés dans les batteries Ni-MH
    - Hydrures complexes (à base de bore ou d'aluminium) : 30 kg suffisent pour 4 kg d'hydrogène (norme de base pour un réservoir de véhicule)
    - Acide formique : contient 53 g/l d'hydrogène à pression et température normale, soit deux fois plus que de l'hydrogène comprimé à 350 bars ( $\text{HCOOH} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$ ). Solution de stockage de l'hydrogène présentée par l'EPFL en Suisse.
    - Éponges macromoléculaires (fullerènes) : moyens de stockage et de libération à trouver.
    - Introduction dans le réseau public de gaz naturel jusqu'à 5%

### Hydrogène gazeux :

- stockage le plus simple mais il présente des inconvénients : porosité des matériaux à l'hydrogène, ce qui génère des pertes lors d'un stockage de longue durée
- nécessite une masse et un volume de stockage importants
- compression fort coûteuse sur le plan énergétique.
- Néanmoins le stockage à 350 bars et à 700 bars 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.

### Hydrogène liquide :

- La liquéfaction de l'hydrogène (vers  $-252^\circ\text{C}$ ) 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).
- Nécessite de refroidir l'hydrogène et de le conserver à très basse température : ce stockage est compliqué, énergivore et dangereux. Il est réservé au spatial.
- Est aussi utilisé pour des voitures à hydrogène liquide, comme une version (non disponible à la vente) de la BMW série 7.

## Pile à combustible

Piscine municipale de Woking. Première expérience anglaise de pile à combustible fonctionnant en cogénération (chaleur + électricité pour l'éclairage).



Une pile à combustible est une pile dans laquelle la fabrication de l'électricité se fait grâce à l'oxydation sur une électrode d'un combustible réducteur (par exemple le dihydrogène) couplée à la réduction sur l'autre électrode d'un oxydant, tel que le dioxygène de l'air. La réaction d'oxydation de l'hydrogène est accélérée par un catalyseur qui est généralement du platine. Si d'autres combinaisons sont possibles, la pile la plus couramment étudiée et utilisée est la pile dihydrogène-dioxygène ou dihydrogène-air.

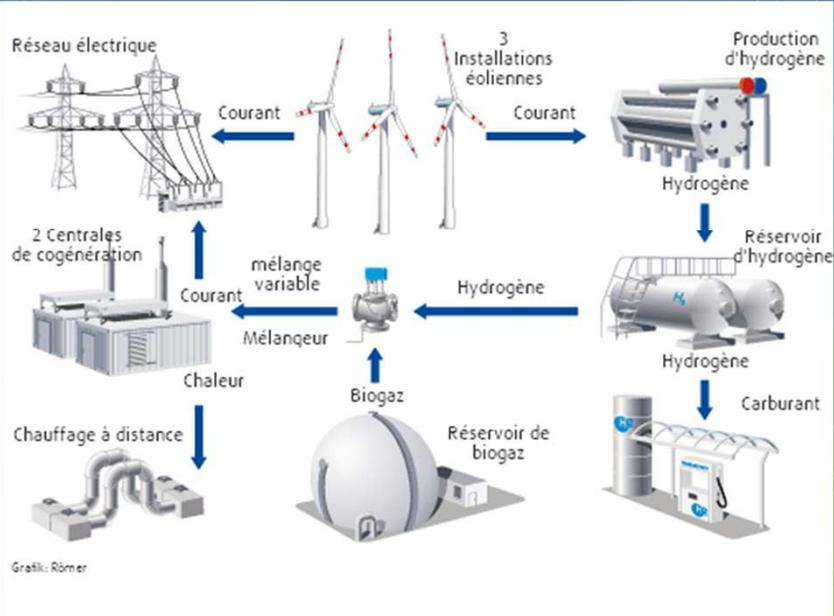
Le fonctionnement d'une pile dihydrogène-dioxygène est particulièrement propre puisqu'il ne produit que de l'eau et consomme uniquement des gaz. Mais jusqu'en 2010, la fabrication de ces piles est très coûteuse, notamment à cause de la quantité non négligeable de platine nécessaire et au coût des membranes échangeuses d'ions.

Les rendements énergétiques cumulés des synthèses du dihydrogène, de compression ou liquéfaction, sont généralement assez faibles. Le dihydrogène n'est donc pas une source d'énergie primaire, c'est un vecteur d'énergie.

L'utilisation de piles à hydrogène dans l'automobile s'appuie sur plusieurs schémas :

- Tout hydrogène ou « full power » : c'est une pile à hydrogène dont on fait varier la puissance de sortie qui alimente directement le ou les moteurs électriques de propulsion (en anglais FCEV).
- Hybride ou « mid range » : La pile à hydrogène en fonctionnant dans une plage étroite fournit de l'électricité qui est utilisée par le ou les moteurs ou pour recharger une batterie de capacité limitée (en anglais FCHEV).
- à prolongateur d'autonomie ou « range extender » : Une petite pile à hydrogène vient recharger la batterie d'un véhicule électrique en assurant éventuellement le chauffage de l'habitacle. (en anglais EREV)

# Centrale hybride de Prenzlau



## Centrale de Prenzlau (Brandebourg)



A gauche, la cuve à hydrogène au premier plan, et les cuves à biogaz au second plan. A droite, la ferme éolienne.

Le projet « *hybridkraftwerk* » a été lancé le 21 avril 2009. Il s'agit de la première centrale hybride au monde associant éolien, biogaz et hydrogène. L'inauguration a lieu en octobre 2011.

Le pilote a consisté en un groupe de trois éolienne associées à un électrolyseur alcalin. L'hydrogène et l'oxygène produits sont alors comprimés à 4 bars pour être stockés et utilisés dans un moteur (voiture à hydrogène après avoir été transporté par citernes une fois comprimé à 200 bar) ou mélangé à du biogaz alimentant une centrale de cogénération fournissant d'une part l'électricité et d'autre part la chaleur distribuée via un réseau de chaleur. En 2012, la centrale à cogénération n'est pas encore mise en place.

Elle a la particularité de transformer les excédents de production électrique du champ éolien proche d'Uckermark-Prenzlau en hydrogène (par électrolyse d'eau), et de le stocker, de manière à pouvoir le vendre ou à l'introduire dans le gaz de la centrale de biogaz, afin de le convertir en chaleur et électricité

Cette unité hybride dispose de 50 MW éolien associée à 120 MW de capacité hydrogène et à 20 MW de biogaz, pour produire 390 MW d'« électricité renouvelable » ; l'équivalent des besoins électriques de 375.000 foyers.

Un accord permettra d'alimenter une station-service en hydrogène, testera des procédés de stockage utiles aux industries de l'énergie électrique, des transports et thermique. Cet important partenariat conforte ENERTRAG dans sa position de leader dans le domaine de l'hydrogène-éolien.

## Bus à moteur à hydrogène à Berlin



Bus avec un moteur à combustion interne fonctionnant à l'hydrogène circulant sur la ligne 309 de la ville de Berlin. Le bus est muni de dix réservoirs chacun stockant 50 kg d'hydrogène gazeux à 350 bar. Le bus pèse environ 18 tonnes et peut transporter 80 personnes sur environ 220 km. On peut lire « Mit Wasserstoff in die Zukunft », i.e. « avec de l'hydrogène dans le moteur ».

## Châssis de la Honda Clarity



Véhicule alimenté en hydrogène, pour produire l'énergie électrique nécessaire à son moteur, grâce à une pile à combustible. Chacun des réservoirs stocke quelques kg d'hydrogène gazeux à 350 bars.

## Stockage d'énergie mécanique : volant d'inertie

- Le volant d'inertie est fixe et occupe peu d'espace. En lui donnant de la vitesse, on lui fournit de l'énergie qu'il est possible de récupérer lors du ralentissement du volant.
- Ce principe est mis à profit dans :
  - les jouets dits à *friction*.
  - sur des autobus ou tramways : l'idée étant de récupérer l'énergie pendant la phase d'arrêt du bus pour la reprendre au démarrage.
  - depuis 2009 sur des voitures de Formule 1 (système SREC) et sur certaines voitures de sport pour récupérer l'énergie lors du freinage et la réutiliser lors des accélérations, permettant ainsi une économie de carburant.
- Problème = comportement gyroscopique du volant à grande vitesse

Le volant d'inertie tournant autour d'un axe fixe a l'avantage de rester globalement à la même place et donc occupe peu d'espace. En lui donnant de la vitesse, on lui fournit de l'énergie qu'il est possible de récupérer lors du ralentissement du volant.

Ce principe est mis à profit dans les jouets dits à *friction*. Il a été essayé sur des autobus : l'idée étant de récupérer l'énergie pendant la phase d'arrêt du bus pour la reprendre au démarrage. Il est aussi utilisé depuis 2009 sur des voitures de Formule 1 (système SREC) et sur certaines voitures de sport pour récupérer l'énergie lors du freinage et la réutiliser lors des accélérations, permettant ainsi une économie de carburant.

Le procédé peut poser un problème du fait du comportement gyroscopique du volant qui lorsqu'il tourne à grande vitesse, impose des efforts énormes sur les paliers. Pour cette raison, lors de la fabrication d'un volant d'inertie, il faut faire en sorte que le volant tourne au maximum à 70/80 % de sa vitesse maximale. De plus, le choix du matériau est déterminé par sa résistance et sa vitesse périphérique maximale

## Volant d'inertie d'un véhicule de tourisme



Volant d'inertie d'un moteur de véhicule de tourisme. On distingue les dents de la couronne en périphérie. L'embrayage est du côté non visible.  
Les quantités d'énergie récupérable sont très faibles, mais le temps de réaction est très court (ms); rendement de 80 à 95%, coût de l'ordre de 6000 euros le kWh.

## Stockage d'énergie mécanique : énergie hydraulique (STEP)



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 consomme 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.

Ici le barrage poids de Grand'Maison, entre les Grandes Rousses et Belledonne, sur un affluent de la Romanche : 1820 MW, 1420 GWh annuels.

## Schéma d'un barrage hydro-électrique

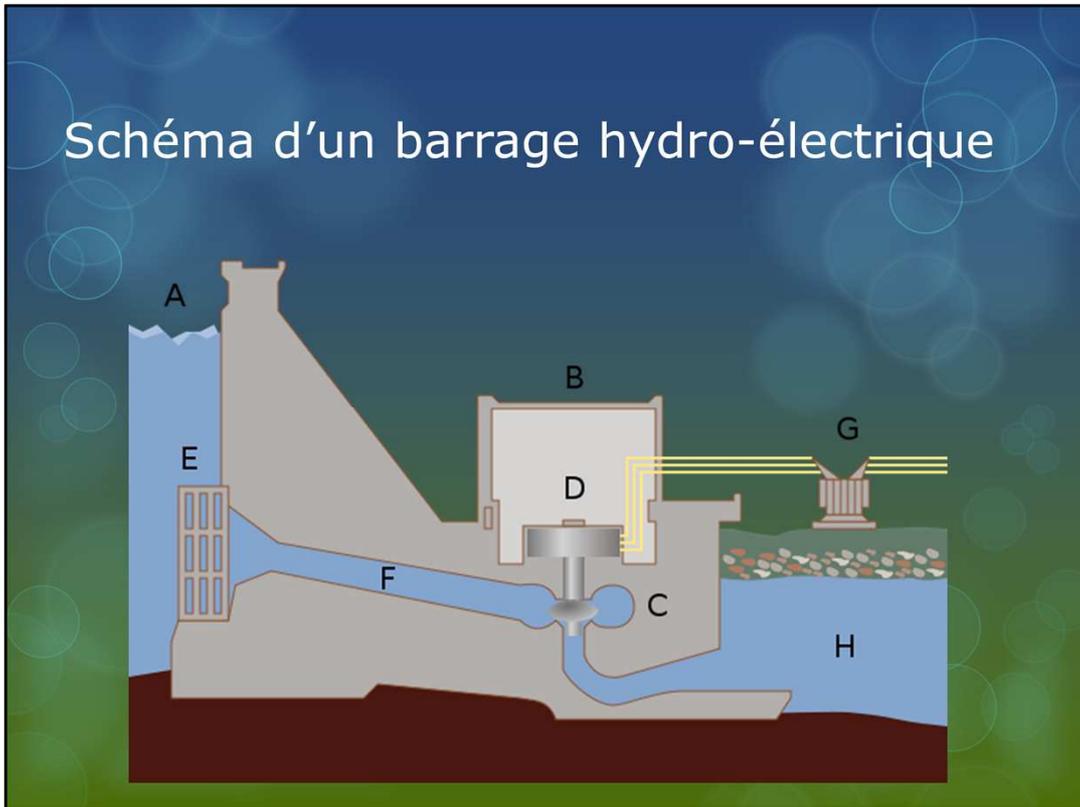


Schéma en coupe d'un barrage hydroélectrique. A - réservoir, B - centrale électrique, C - turbine, D - générateur, E - vanne, F - conduite forcée, G - lignes haute tension, H - rivière

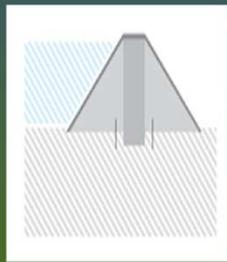
Le STEP est le stockage d'électricité le plus mature, avec un rendement important de l'ordre de 80%, une durée de vie très longue, et des coûts d'investissement de 1000 à 2000 euros/kW, ou 60 à 400 euros le kWh produit. Dans le monde, 300 STEP pour 150 GW. La majorité en montagne, ou en bord de mer et au sommet d'une falaise.

6 STEP en France dont Grand Maisons, pour 5 GW et 5,5 TWh. Le gisement inexploité potentiel de STEP est de 4 GW en montagne. La Norvège et la Suisse possèdent 60% du pompage-turbinage à eau douce d'Europe. Une piste : l'exploitation combinée de l'éolien off-shore allemand avec les STEP norvégiennes par un câble sous-marin à THT (HVDC)

## Types de barrages



voûte

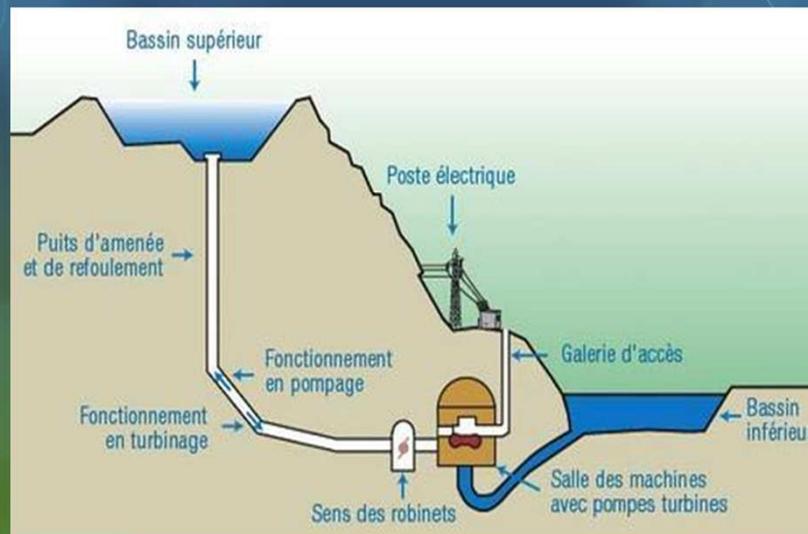


digue



poids

## Schéma d'une STEP (sans barrage)



La Commission européenne vient d'accorder une aide de 13,3 millions d'euros à eStorage. Ce consortium réunissant EDF, l'Université britannique Imperial College, et les groupe de conseil DNV Kema (ingénierie) et Algoé (management) travaillent ensemble sur la conception d'une solution rentable d'intégration des énergies intermittentes, et notamment l'énergie éolienne, au réseau électrique. Ce travail se concentrera sur les moyens de stockage de l'énergie et sur les systèmes de gestion du réseau.

L'une des principales applications concrètes de ce projet sera la transformation d'une station de transfert d'énergie par pompage (STEP EDF du Cheylas) à vitesse fixe en STEP à vitesse variable.

Cette modification permettra de fournir 70MW de capacité de régulation supplémentaire au cours de la nuit.

En effet, alors que les STEP à vitesse fixe permettent seulement de réguler la production d'électricité, les STEP à vitesse variable permettent également la régulation électrique en mode pompage.

Elles peuvent ainsi apporter une réponse à la problématique de l'intermittence de certaines énergies renouvelables comme l'éolien et le solaire.

## Grande-Dixence : le site



Voici la situation géographique du barrage de la Grande-Dixence, dans le canton du Valais, au sud de la vallée du Rhône.

## Grande-Dixence



Grande Dixence : le plus haut barrage poids du monde (Valais, Suisse) =

- 285 m de mur, inégalé
- 15 millions de tonnes de béton, plus que Khéops
- 20% de l'énergie d'accumulation de la Suisse (de 30% = 6% de l'électricité suisse)
- Retenue de 400 millions de m<sup>3</sup>

## Grande-Dixence : carte des sites à visiter



Sur cette carte, le Nord est en bas, où l'on devine la vallée du Rhône.

4 stations de pompage :

### **Station de pompage de Z'Mutt**

Elle est composée d'un barrage voûte de 74 m de hauteur, il collecte les eaux des glaciers de Bis et de Schali. Puissance totale de 88 MW. 140 millions de m<sup>3</sup> d'eau annuellement refoulées dans le collecteur principal, réservoir de 840000 m<sup>3</sup>, dénivelé de 470 et 365 m.

### **Station de pompage de Stafel**

Les installations de pompage ont une puissance de 26,4 MW. Annuellement environ 100 millions de m<sup>3</sup> d'eau sont refoulées dans le collecteur principal. 70000 m<sup>3</sup>, 212 m.

### **Station de pompage de Ferpècle**

Annuellement environ 60 millions de m<sup>3</sup> d'eau sont refoulées dans le collecteur principal de la Grande Dixence. 100000 m<sup>3</sup>, 21,3 MW, 212 m.

### **Station de pompage d'Arolla**

La station est dotée de trois pompes d'une puissance totale de 48,6 MW. Annuellement environ 90 millions de m<sup>3</sup> d'eau sont refoulées dans le collecteur principal de la Grande Dixence. 312 m, 17300 m<sup>3</sup>.

### **Usine de Fionnay**

290MW, 166000 m<sup>3</sup>.

### **Usine de Nendaz**

6 x 2 turbines Pelton, 390 MW

### **Usine de Bieudron**

3 turbines Pelton de 423 MW chacune (record du monde).

Soit au total 2133,3 MW, dont 184,3 MW en pompage-turbinage et 1949 MW en centrale à accumulation.

## El Hierro (l'île de Fer)

- ▶ La plus occidentale et méridionale des Canaries
- ▶ 287 km<sup>2</sup>, 10500 hbts



Voici l'île d'El Hierro.

El Hierro est la première île tropicale totalement autonome en production électrique. La centrale de El Hierro est conçue pour assurer l'autonomie énergétique de l'île et de ses 10 500 habitants permanents. Elle se substitue à une centrale thermique à fioul. Cette centrale de 11,32 MW (4 turbines Pelton de 2,83 MW), couplé à un parc éolien de 11,5 MW, avec un bassin supérieur de 556000 m<sup>3</sup>, dont 406000 m<sup>3</sup> pour la consommation d'eau douce, et une falaise de 658 m, permet d'éviter l'importation d'environ 6 000 t de pétrole, auparavant destiné à la production électrique, d'éviter aussi la production de 18 000 t de CO<sub>2</sub>. Les excédents de la production électrique seront consacrés au dessalement de l'eau de mer.

## Barrage de La Rance



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*).

## Une STEP à La Réunion? Où?



Takamaka, Grand Etang, Rivière des Remparts? Quid du Parc National?

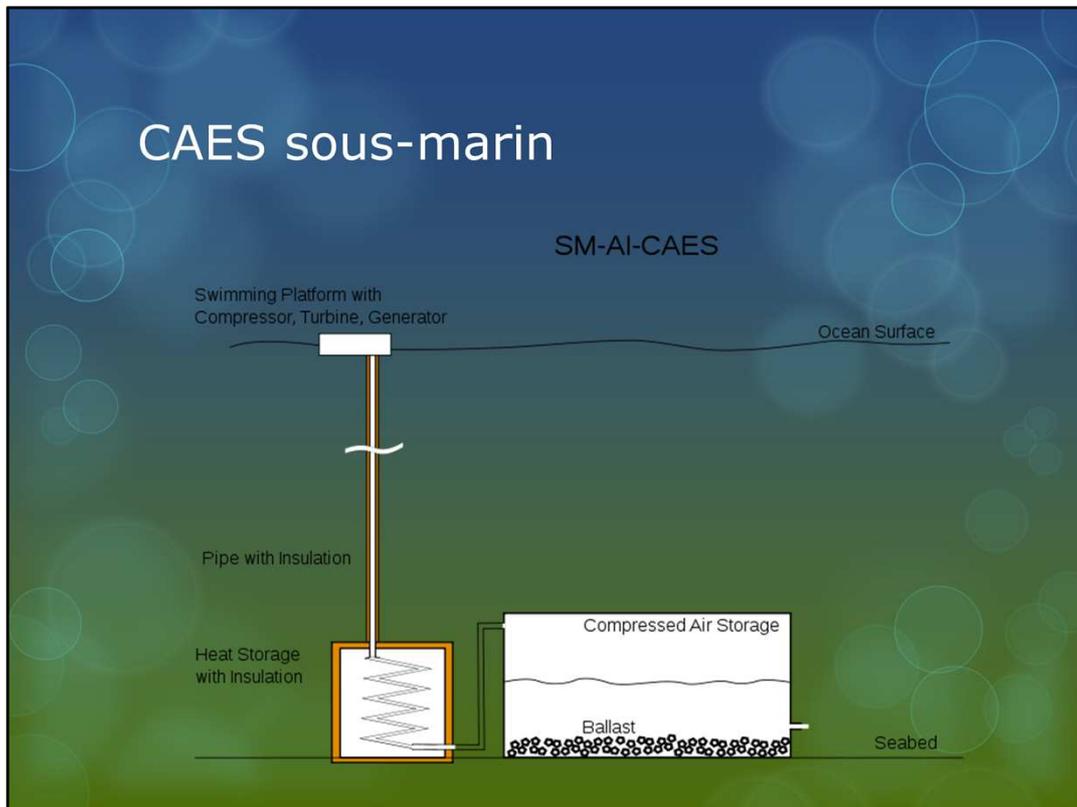
## Stockage d'énergie mécanique : air comprimé

- L'air comprimé peut produire un travail mécanique, par conséquent il est possible de stocker de l'énergie en comprimant de l'air.
- Rendement médiocre, car la compression s'accompagne d'un échauffement du gaz.
- Utilisation de cavernes souterraines ou d'anciennes mines pour stocker l'air comprimé. 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.
- Une variante de ce système visant à stocker l'air comprimé dans un réservoir sous-marin profond (1000 à 2000 m), est en développement au Royaume-Uni avec E.ON
- Utilisation possible avec véhicules à air comprimé.

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 sera 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.

A plus grande échelle, on peut utiliser des cavernes souterraines ou d'anciennes mines pour stocker l'air comprimé. 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 2000 m), est en développement au Royaume-Uni avec le soutien du producteur d'électricité e.on



Une centrale de stockage de l'énergie par air comprimé est une centrale à gaz modifiée. Elle fonctionne selon les trois étapes suivantes :

- L'air extérieur est comprimé grâce à des compresseurs. On utilise de l'électricité en provenance du réseau lors des périodes de faible demande. L'air comprimé est injecté et stocké dans des réservoirs souterrains (cavité rocheuse, cavité saline, nappe aquifère).
- Lors des périodes de pointe, l'air est chauffé dans une chambre de combustion où du gaz se mélange à l'air comprimé et s'enflamme.
- Les gaz chauds se détendent en traversant une turbine, où leur énergie thermique est transformée en énergie mécanique qui permet d'actionner un alternateur pour la production d'électricité.

Le rendement de cette technologie reste limité à 50%, mais la récupération de la chaleur produite en compression doit permettre d'atteindre un rendement de 75% (on parle alors de CAES adiabatique).

Cette technologie permet également d'éviter le recours à du gaz naturel pour réchauffer l'air comprimé.

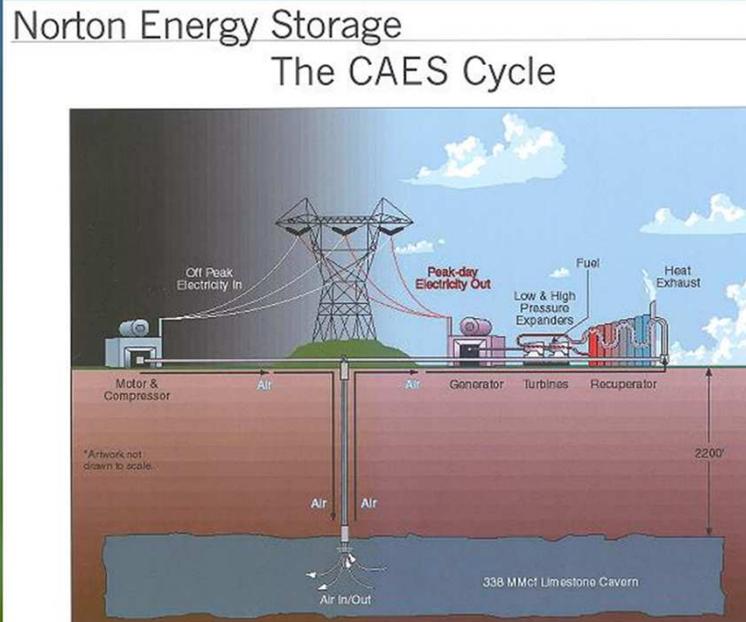
Le stockage d'énergie par compression d'air présente l'inconvénient de nécessiter l'utilisation de cavités géologiques de grandes dimensions avec une bonne étanchéité soit existantes soit à créer, ce qui entraîne des temps de réalisation longs (3 à 6 ans) et des questions sur la stabilité dans le temps.  
Coûts d'investissement : 700 €/kW et 10 €/kWh pour les CAES classiques, 1000 €/kW et 30 €/kWh pour les CAES adiabatiques.

Coûts d'exploitation : 1-2 €/MWh pour les CAES classiques, 5€/MWh pour les CAES adiabatique.

Coûts de maintenance : 7-10 €/kW/an pour les CAES classiques, 30 €/kW/an pour les CAES adiabatiques.

Durée de vie : 30 ans.

# CAES de Power South, McIntosh, Alabama



Situé à McIntosh, en Alabama, l'installation de stockage d'énergie à Air comprimé (CAES) de 110 mégawatts est une source unique de production d'électricité.

L'unité PowerSouth CAES a été ouverte en 1991. C'est la seule de son genre aux États-Unis et une des deux seules au monde. L'autre unité de la SCAE est située à Huntorf, Allemagne.

L'unité capte l'énergie creuse dans la nuit, lorsque les coûts sont plus bas. Des compresseurs agissent dans un réservoir de stockage souterrain à haute pression. PowerSouth utilise l'énergie accumulée durant les périodes de demande d'énergie intermédiaire et de pointe pour produire de l'électricité.

À pleine capacité, l'installation de la CAES produit assez d'électricité pour alimenter environ 110 000 foyers.

L'usine CAES brûle par ailleurs environ un tiers du gaz naturel par kilowatt-heure de sortie par rapport à une turbine à combustion classique, produisant ainsi deux tiers de CO<sub>2</sub> en moins.

## Stockage d'énergie thermique : chaleur sensible

- Élévation de température du matériau de stockage. La quantité d'énergie stockée est proportionnelle au volume, à l'élévation de température et à la capacité thermique du matériau. Limites :
  - différence de température disponible
  - déperditions thermiques du stockage
  - changement d'état que subit le matériau de stockage
- Quelques exemples :
  - Inertie thermique de certains matériaux (briques, huile)
  - Stockage par ballon d'eau chaude isolé.
  - Dans les fours réfractaires, la chaleur emmagasinée est utilisée pour la cuisson
  - Stockage d'énergie excédentaire produite par les centrales solaires le jour, afin d'être utilisée le soir et la nuit (exemple : chauffage de la ville de Krems sur le Danube).
  - Centrales solaires thermiques d'Andasol en Espagne qui peuvent stocker chacune 0,35 GWh dans des réservoirs de sels chauffés à 390 °
  - Locomotives Francq à eau surchauffée (fin XIX<sup>e</sup>). Un réservoir d'eau de 3 m<sup>3</sup> chauffée à 180 °C constituait la source d'énergie et permettait de tracter plusieurs wagons de tramway et leurs voyageurs sur des trajets de plus de 10 km.

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, voir photo). 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.

On peut aussi citer l'utilisation à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle des locomotives Francq sans foyer et à eau surchauffée. Un réservoir d'eau de 3 m<sup>3</sup> chauffée à 180 °C constituait la source principale d'énergie et permettait de tracter plusieurs wagons de tramway et leurs voyageurs sur des trajets de plus de 10 km.

## Stockage thermique à Krems (Autriche)



50000 m<sup>3</sup> d'eau, 2 GWh.

Le projet SETHER en France vise un rendement de 70%.

## Site d'Andasol, près de Guadix (Andalousie)



**Andasol** est la plus puissante centrale solaire thermodynamique d'Europe en 2008. Elle est située près de Guadix en Andalousie (Espagne). La centrale a démarré en novembre 2008. Elle génère une puissance-crête de 50 MWe (150 MW avec les extensions Andasol 2 et 3) et sa production est de 175 à 180 GWh d'énergie électrique par an. Construite sur un site privilégié à 1 100 mètres d'altitude, elle bénéficie d'un climat semi-aride qui se traduit par une insolation directe de 2 200 kWh/m<sup>2</sup>/an (soit, en moyenne, 250 W/m<sup>2</sup>).

## Stockage d'énergie thermique : chaleur latente

- L'énergie est stockée sous la forme d'un changement d'état du matériau de stockage (fusion ou vaporisation). Elle dépend de la chaleur latente et de la quantité du matériau de stockage.
- Efficace pour des différences de températures très faibles.
- Nécessite moins de volume que le stockage par chaleur sensible.
- Ces deux stockages peuvent être utilisés pour stocker du froid.
- Quelques exemples :
  - Des matériaux à changement de phase (MCP) sont utilisés dans le solaire thermique et actuellement étudiés pour améliorer l'inertie thermique 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.

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.

## Autres formes de stockage

- Supraconductivité
- Antimatière

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. Le système SMES stocke l'énergie sous forme d'un champ magnétique, 50% de l'énergie peut être restituée en moins d'une seconde, le rendement est de 90%.

Le stockage d'énergie par antimatière n'est pour l'instant qu'une vue théorique, et s'expose aux difficultés suivantes:

- 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  $\rightarrow$  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).

## Facteurs à prendre en compte

- Puissance disponible en MW
- Capacité de stockage en MWh
- Réactivité
- Densité électrique lorsque la portabilité est en jeu
- Durée de vie
- Vitesse de charge (véhicules électriques)
- Efficacité kWh in and out
- Coût d'investissement
- Emprise au sol (besoin en foncier)
- Sécurité, environnement, recyclage
- Coûts d'exploitation et de maintenance
- Consommation des auxiliaires et coût d'achat de l'énergie

# Financement

- Qui pour financer les unités de stockage?
  - Le gestionnaire du réseau?
  - Les consommateurs?
  - Les opérateurs de stockage qui factureront aux bénéficiaires?
- Plusieurs approches :
  - Adjonction d'unités de stockage gérées par l'exploitant. Le producteur a alors la responsabilité de la livraison, avec volumes prévisibles et garantis;
  - La stabilité incombe au gestionnaire du réseau, avec à la clé économies d'échelle, centralisation des moyens mais perte de souplesse de gestion.

# Conclusion

- Enjeu primordial.
- L'indépendance énergétique :
  - Pour les états,
  - Pour les individus
  - Pour les entreprises
- Le stockage est essentiel :
  - Pour la production d'énergie
  - Reconstitution d'un stock d'énergie potentielle à partir d'énergie dont on n'a pas l'usage immédiat.
  - Indispensable quand l'énergie est variable dans le temps, comme c'est le cas des EnR fluctuantes (solaire, éolienne).

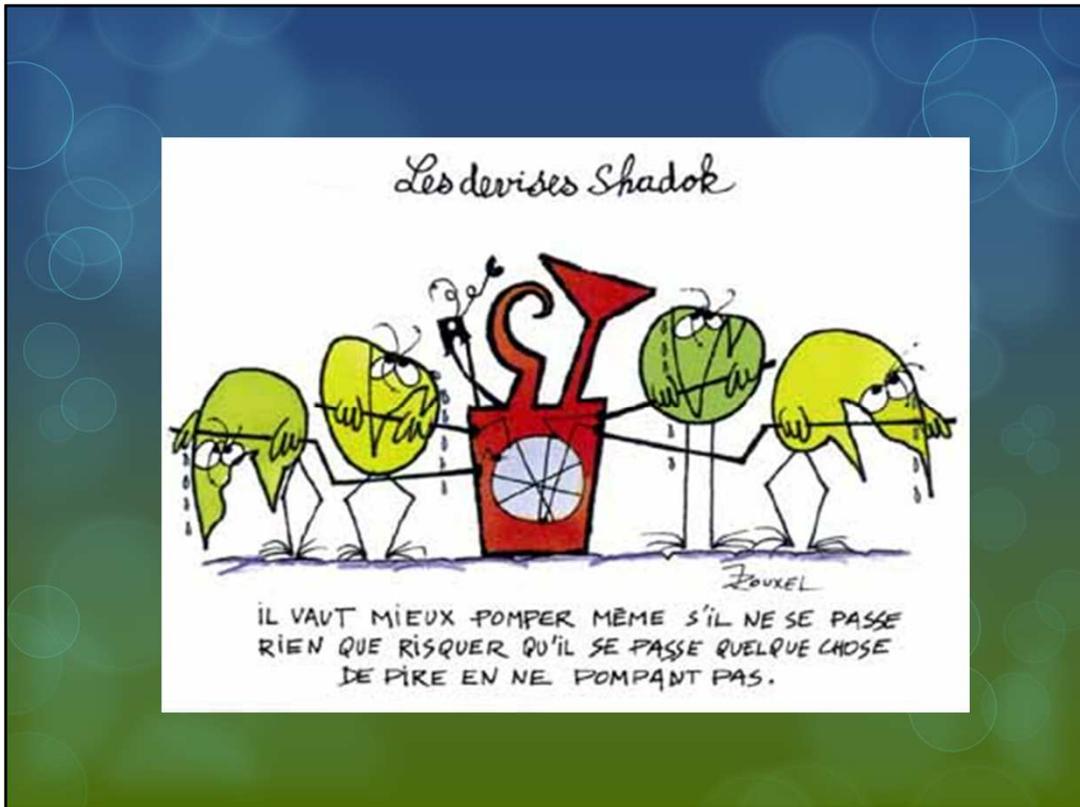
Le stockage d'énergie est un enjeu à la hauteur de la consommation d'énergie : primordial.

Pour les états, l'indépendance énergétique est stratégique et économiquement essentielle. Pour les individus et les entreprises, une énergie disponible à la demande, sans coupure inopinée, est un confort et une commodité pour la production.

Même pour la « production d'énergie », le stockage est essentiel : en réalité, ce qu'on appelle couramment et économiquement « production d'énergie » n'est pas, physiquement, de la production, mais de la transformation d'un stock d'énergie potentielle (charbon, eau stockée en hauteur, matière fissile ...) en une énergie directement utilisable pour un travail (électricité, travail mécanique).

Le stockage consiste à reconstituer un stock d'énergie potentielle à partir d'énergie dont on n'a pas l'usage immédiat. Le but est de pouvoir en disposer plus tard, lorsque la demande sera plus importante.

Cela est en particulier indispensable quand l'énergie immédiatement disponible est variable dans le temps, comme c'est le cas des énergies renouvelables intermittentes (solaire, éolienne).



Les spécialistes de l'énergie de l'huile de coude!