



## Le stockage de l'énergie : le point faible de la filière énergétique

Christian Ngo

### Résumé

*Stocker de l'énergie (électricité ou chaleur) pour l'utiliser quand on en a besoin est une nécessité. Le stockage permet de lisser la production électrique : on stocke l'excédent des heures creuses pour l'utiliser aux heures de pointe. Pour les énergies intermittentes, comme l'éolien ou le solaire photovoltaïque dont la production n'est souvent pas en phase avec la demande, le stockage est indispensable sinon il faut utiliser des sources d'énergie complémentaires polluantes pour produire l'électricité lorsqu'elles n'en génèrent pas. Enfin, les batteries alimentent les systèmes électroniques nomades et certains moyens de transport (véhicules hybrides rechargeables ou électriques). La chaleur peut être stockée à court terme (ex : cumulus) mais plus difficilement à long terme (stockage intersaisonnier). Le stockage est stratégique, mais reste le point faible de la filière énergétique.*

---

On stocke ce que l'on a en trop pour pouvoir l'utiliser plus tard lorsque l'on en aura besoin. Dès les premières civilisations sédentaires, les agriculteurs ont stocké l'excès de grain qu'ils récoltaient en été pour satisfaire leurs besoins en hiver. Il en est de même pour l'énergie qui est indispensable aux êtres humains pour vivre et se développer économiquement. La nourriture n'est d'ailleurs qu'une forme particulière d'énergie qui leur est indispensable.

Les besoins énergétiques sont aujourd'hui satisfaits soit par des sources d'énergie (pétrole, charbon, gaz naturel...), soit par des vecteurs énergétiques. Un vecteur énergétique permet de transporter de l'énergie de manière continue d'un point à un autre. C'est le cas de l'électricité qui est de plus en plus utilisée dans les civilisations modernes, c'est aussi le cas d'un réseau de chaleur. Même si un vecteur énergétique peut fournir de l'énergie à un utilisateur, il faut une source d'énergie pour le produire. Ce que l'on qualifie habituellement de source d'énergie sont des substances ou systèmes qui possèdent intrinsèquement de l'énergie utilisable ; celle-ci diminuant au fur et à mesure qu'on la consomme. C'est le cas de l'essence qui est dans le réservoir d'une voiture : on ne la consomme que si la voiture fonctionne. Certaines sources d'énergie sont intermittentes : c'est le cas du rayonnement solaire qu'on utilise pour fabriquer de l'électricité avec un panneau photovoltaïque ; on ne produit de l'électricité que lorsqu'il y a du soleil.

Ce qui différencie l'homme moderne de ses ancêtres lointains est qu'il souhaite avoir de l'énergie quand il en a besoin et où il en a besoin. Ceci impose une contrainte forte aux systèmes énergétiques car nos besoins d'aujourd'hui sont bien supérieurs à ceux de nos ancêtres (un français aujourd'hui consomme presque 15 fois plus qu'un français il y a 2 siècles et nous sommes deux fois plus nombreux).

## Le stockage intrinsèque

Le moyen le plus simple de stocker de l'énergie est de disposer d'une source qui fasse aussi office de moyen de stockage. C'est le cas des combustibles fossiles et du bois. La quantité d'énergie dont on peut disposer dépend de la quantité de combustible que l'on peut stocker. Cela peut être de quelques mois pour un pays comme la France. Dans le cas de l'uranium, utilisé pour faire fonctionner les réacteurs nucléaires on peut avoir, et l'on a en France, des réserves sur le sol national pour des années, voire des décennies. Pour une source d'énergie que l'on importe il est important de disposer des stocks suffisants pour tenir le temps nécessaire à résoudre une crise d'approvisionnement des ressources : c'est le cas de l'uranium.

Au niveau du consommateur, il existe aujourd'hui deux moyens importants de stockage de l'énergie en France :

- Le réservoir des véhicules. Si l'on suppose, pour faire une évaluation simple, que les 30 millions de voitures individuelles françaises ont en moyenne 25 litres de carburant dans leur réservoir, cela fait, à un instant donné, une énergie stockée de 7,5 TWh, soit environ la production d'électricité annuelle d'un réacteur nucléaire.
- Les cumulus, qui équipent 11 millions de foyers stockent, dans l'année, environ 20 TWh de chaleur. Ils consomment de l'électricité aux heures creuses pour chauffer de l'eau qui sera notamment utilisée aux heures de pointes. Ce moyen de stockage, pourtant très utile, risque d'être mis en péril dans les logements en construction avec la nouvelle réglementation thermique (RT2012) qui favorise l'utilisation du gaz naturel pour le chauffage par rapport à l'électricité. Cette orientation va conduire à augmenter les émissions de CO<sub>2</sub> des logements neufs en France par rapport à une utilisation de l'électricité.

Comme le montre le tableau 1, comparant différentes solutions de stockage d'une énergie de 1 kWh, le pétrole est le moyen le plus compact et le plus économique. Toutefois, il faut un dispositif plus complexe pour l'utiliser (groupe électrogène, pour produire de l'électricité, moteur à explosion pour produire de l'énergie mécanique,...). Le stockage électrochimique par batteries est lourd et encombrant mais ce n'est rien comparé au stockage utilisant l'eau sous forme gravitaire utilisé à grande échelle par EDF pour stocker l'électricité produite aux heures creuses. Dans ces deux cas on stocke l'électricité sous une autre forme (chimique ou physique)

Matériau	1 kWh
Essence	0,07 kg (70g)
Batterie Pb	30 kg
Batterie Li-Ion	5-8 kg
Eau	3600 kg d'eau à une hauteur de 100m

Tableau 1

## Stockage de l'électricité

L'électricité est un vecteur énergétique de plus en plus utilisé. Il est si commode qu'il serait difficile d'imaginer une civilisation moderne sans cette commodité. La particularité de ce vecteur énergétique est que la production doit être, à chaque instant, égale à la consommation. Techniquement on sait stocker de l'électricité, sous une forme ou sous une autre, mais ce n'est pas toujours chose facile ; c'est souvent très cher et le rendement n'est pas toujours très bon. Il y a plusieurs intérêts à stocker l'électricité :

- Pour lisser la production. En effet la demande varie fortement en fonction de l'heure, du jour, de la saison... La figure 1 montre un exemple typique du profil de production-consommation d'électricité pour un jour de l'année. Or la plupart des moyens de production ne sont pas assez flexibles pour suivre rapidement l'évolution de la demande. Pour satisfaire le consommateur à tout instant, le producteur est obligé de surdimensionner les moyens de production et notamment avoir des centrales à flamme brûlant des combustibles fossiles car elles peuvent être modulées rapidement pour fournir de l'électricité en pointe. En France la puissance moyenne utilisée est de l'ordre de 65 GW alors que la puissance installée est proche de 120 GW car il faut pouvoir satisfaire la demande même pendant les jours les plus froids de l'année. Stocker l'électricité excédentaire produite aux heures creuses permet d'utiliser celle-ci aux heures de pointe.

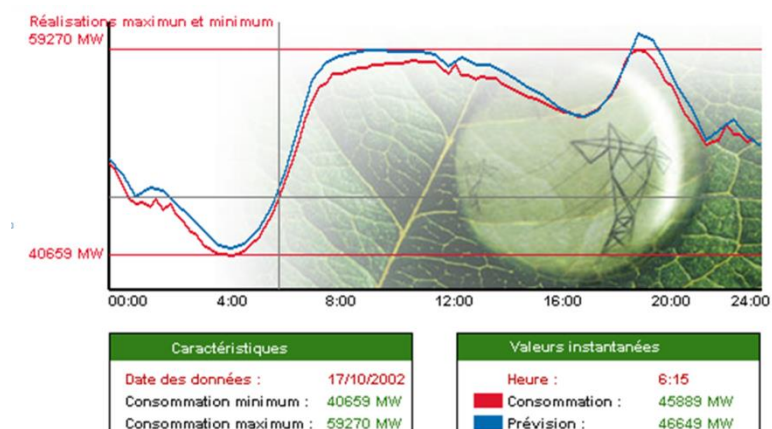


Figure 1. Profil de consommation (rouge) et de prévision (bleu) de l'électricité sur 24 heures pour un jour typique. Source RTE

- Il est aussi intéressant de stocker l'électricité en l'achetant à bas prix aux heures creuses pour la revendre cher aux heures de pointes. Ainsi, une partie de l'électricité éolienne produite au Danemark est achetée à bas prix par la Suède et la Norvège car elle est produite à des heures où la demande est faible. Ces pays la transforment en énergie gravitaire et stockent l'eau en altitude. Ils turbinent ensuite cette eau pour produire de l'électricité aux heures de pointe lorsque la demande au Danemark est forte et le prix élevé.
- Le stockage de l'électricité est indispensable pour les énergies intermittentes comme l'éolien ou le solaire si l'on veut développer ces sources d'énergie à grande échelle. En effet, si on prend le cas d'une éolienne, elle ne fournit de l'électricité que quand il y a du vent. Il faut que celui-ci ait une vitesse suffisante pour que la production soit importante car la puissance

varie comme le cube de la vitesse du vent (doubler la vitesse du vent multiplie la puissance délivrée par l'éolienne par un facteur 8). Si le vent est trop fort il faut l'arrêter sinon elle pourrait subir des dégâts irréremédiables. Pour une puissance installée donnée d'une éolienne, celle-ci ne fournit, dans l'année, que 20 à 30% de ce qu'elle pourrait fournir si elle fonctionnait de manière continue dans l'année à cette puissance (cela dépend bien sûr du lieu où elle se trouve ; parfois cela peut être moins que cela, dans d'autres cas cela peut être plus<sup>1</sup>). Un développement massif des énergies renouvelables intermittentes ne pourra se faire sans développer des moyens de stockage, ou augmenter notablement le nombre de centrales utilisant des combustibles fossiles, donc fortement émetteurs de CO<sub>2</sub>. L'état demande d'ailleurs aujourd'hui que les projets d'énergie renouvelables intermittentes dans les DOM-TOM aient prévu des moyens de stockage de l'électricité.

- Le stockage de l'électricité est indispensable pour les systèmes nomades (lecteurs mp3, téléphones portables, smartphones, ordinateurs portables, tablettes, etc.). La batterie reste pour ces appareils le point faible et il est difficile d'obtenir une autonomie qui satisfasse complètement l'utilisateur tout en gardant un poids et un volume acceptable.
- Le stockage de l'électricité peut enfin être utile pour fournir à l'utilisateur de l'électricité d'excellente qualité pour des besoins spécifiques. On peut aussi prévoir des moyens de stockage pour pallier à des défaillances du réseau électrique.

On peut schématiquement distinguer 3 classes de moyens de stockage : les appareils nomades, la mobilité (véhicules électriques ou hybrides) et le stockage à grande échelle pour le réseau électrique. Les principaux moyens de stockage de l'électricité sont montrés dans la figure 2.

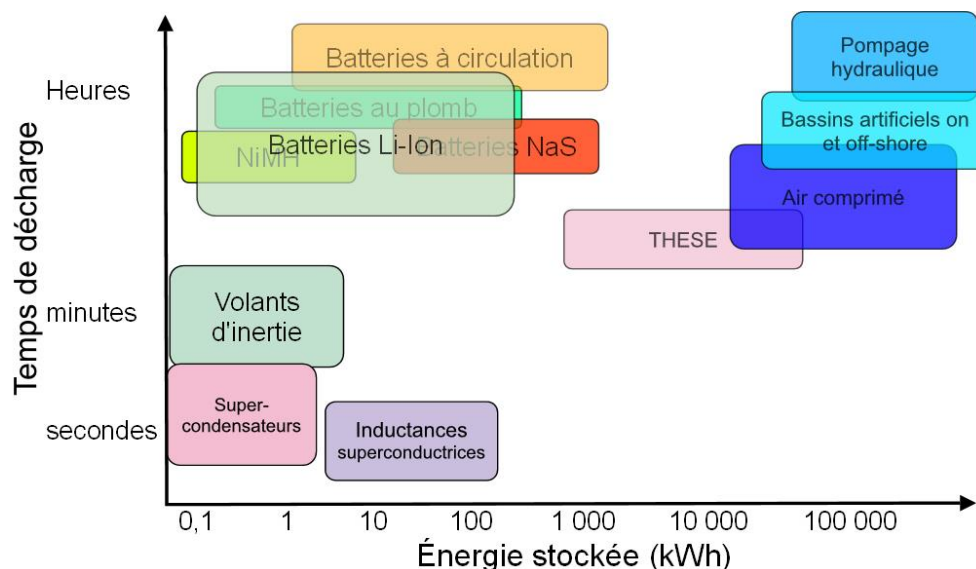


Figure 2. Différents moyens de stockage en fonction de la quantité d'énergie stockée et du temps de décharge.

<sup>1</sup> En Allemagne, par exemple, ce rendement n'est que d'environ 15%, valeur mesurée sur une décennie. Ainsi, les 62 GW d'éolien installés en Allemagne produisent 74 TWh/an. A titre de comparaison, les 63 GW électriques de nucléaire installés en France produisent 405 TWh/an.

Le stockage nomade (téléphones portables, lecteurs mp3, ordinateurs portables, etc.) est aujourd'hui dominé par les batteries de type Li-Ion. Les dispositifs électroniques consomment de moins en moins d'énergie à puissance de traitement de l'information égale mais cette puissance augmente fortement ce qui fait perdre en partie le gain obtenu. Les batteries Li-ion pour appareils nomades, c'est-à-dire à faible contenu énergétique, ont maintenant une densité massique d'énergie de l'ordre de 200 Wh/kg.

Les véhicules électriques ou hybrides rechargeables utilisent pour la plupart des batteries de type Li-Ion. Toutefois, pour des raisons de sécurité, suite à des accidents qui se sont produits avec des téléphones ou des ordinateurs portables, la technologie des batteries pour les véhicules tend à être différente. Leur densité massique d'énergie est pour cette raison plus faible, typiquement de 100 à 150 Wh/kg. Certains véhicules, comme la Prius de Toyota, qui sont des hybrides non rechargeables, utilisent des batteries de type NiMH. Un véhicule électrique doit embarquer une énergie de l'ordre de 15 à 20 kWh pour avoir une autonomie de 150 à 200 km. On notera que le nombre de cycles (charge-décharge profonde), qui est de l'ordre de 500 à 1000, voire plus selon la technologie, peut être considérablement augmenté si les décharges ne sont que partielles.

Au niveau du réseau, les quantités d'électricité à stocker sont bien plus considérables. Le moyen de stockage le plus utilisé est basé sur le pompage-turbinage de l'eau entre 2 réservoirs situés à des altitudes différentes. Ce sont les STEPs (Stations de Transfert d'Énergie par Pompage). Il y a environ 350 STEPs dans le monde et leur puissance totale est proche de 150 GW. Elles permettent de moduler environ 6% de la puissance électrique moyenne et représentent 15% de la puissance hydroélectrique mondiale. La plupart fonctionnent avec de l'eau douce, le dénivelé entre les réservoirs est compris entre 80 et 1000 m. La puissance par site est de 100 à 1 500 MW. Le coût de construction est de l'ordre de 1000 €/kW mais elles ont une durée de vie très longue. Comme nous l'avons dit plus haut, les énergies renouvelables intermittentes vont nécessiter de développer des moyens de stockage importants ; aussi la construction de STEPs artificielles utilisant l'eau de mer ou l'eau douce est une possibilité<sup>2</sup>. Le coût de construction de ces moyens de stockage est du même ordre de grandeur que celui des STEPs classiques. Il y a intérêt à construire des STEPs artificielles de grande surface car la quantité d'énergie est proportionnelle à la surface alors que la digue est proportionnelle au périmètre de l'ouvrage. Compte tenu du fait qu'une STEP n'est pas utilisée de manière continue, on estime que sur 10 ans (elles dureront beaucoup plus) le surcoût par kWh stocké serait de l'ordre de 5 à 7 c€.

## Stockage de la chaleur

La chaleur représente une part importante de la consommation d'énergie. Comme pour l'électricité, il est intéressant de la stocker lorsque l'on en a trop, ou lorsque l'on dispose d'une source d'énergie qui peut, dans certaines périodes de temps, la produire à bas coûts, pour l'utiliser

---

<sup>2</sup> Voir par exemple : F.Lempérière, *Stockage de l'énergie par pompage de l'eau de mer*, Techniques de l'ingénieur et <http://www.hydrocoop.org/fr/publications.php>

THESE Procédé en développement basé sur un matériau céramique dont une pompe à chaleur extrait l'énergie d'un réservoir basse température pour élever sa température dans un réservoir haute température, la restitution se faisant avec un rendement de 70%.

quand on a besoin. Pour le particulier il est intéressant de produire et stocker de la chaleur lorsque l'électricité est moins chère (la nuit lorsque l'on dispose de tarifs spéciaux) pour l'utiliser tout au long de la journée suivante. C'est de cette manière que sont utilisés les cumulus ou ballons d'eau chaude sanitaire.

En France on a besoin d'eau chaude sanitaire toute l'année et des besoins importants en chauffage l'hiver. Si l'on utilise l'énergie solaire thermique, par exemple, celle-ci est importante en été mais faible en hiver. Le stockage intersaisonnier serait une possibilité intéressante mais demande de grands volumes de stockage et, dans l'état actuel de la technologie, reste cher.

Le stockage thermique est aussi nécessaire pour exploiter le solaire thermique à concentration, technique qui consiste à transformer la chaleur en électricité, puisqu'il n'y a pas de soleil la nuit. En stockant l'excédent de chaleur on peut ainsi continuer à fournir de l'électricité dans la soirée et pendant la nuit.

Il existe 3 grands moyens de stockage de la chaleur :

- On peut utiliser la capacité calorifique d'un matériau : de l'eau que l'on chauffe par exemple de 15°C à 80°C contient des calories que l'on peut récupérer par la suite. On qualifie cette propriété de chaleur sensible.
- On peut utiliser la chaleur latente lors d'un changement de phase d'un matériau (transformation glace-eau ou ébullition (transformation eau-vapeur), par exemple). Ces transitions de phase se produisent à une température fixe.
- On peut utiliser des réactions thermochimiques dans lesquelles on fait une transformation endothermique (qui absorbe de la chaleur) pour stocker la chaleur. Lorsque l'on veut récupérer celle-ci, la transformation inverse, exothermique, libère celle-ci. On peut ainsi conserver de la chaleur pendant un temps très long sans perte notable.

L'eau est l'une des substances les plus performantes en terme de capacité calorifique (1,2 Wh/kg/°C, contre 0,25 Wh/kg/°C pour le béton). Il faut toutefois des quantités considérables d'eau pour stocker suffisamment de chaleur l'été pour pouvoir l'utiliser l'hiver. Pour mémoire, 1kWh d'énergie thermique permet de porter 10 kg d'eau de 20°C à 100°C, de faire fondre 10 kg de glace à 0°C ou de faire bouillir 1,5 kg d'eau à 100°C. Lorsque l'on stocke de la chaleur avec de l'eau, on a des densités énergétiques très faibles. Par exemple si l'on prend de l'eau à 60°C et qu'on fasse baisser sa température de 30°C, on ne récupérera que 35 kWh/m<sup>3</sup>. Une maison de 150 m<sup>2</sup>, relativement bien isolée, ayant une consommation de 100 kWh/m<sup>2</sup>/an pour son chauffage, a besoin de 15 000 kWh. Cela représente un volume de stockage équivalent à celui d'une piscine remplie d'eau de 20m de longueur, sur 10 m de largeur et 2 m de profondeur.

L'ordre de grandeur des densités d'énergie que l'on peut stocker sous forme de chaleur avec des technologies performantes est d'environ 50 kWh/m<sup>3</sup> sous forme de chaleur sensible, de 100-150 kWh/m<sup>3</sup> pour des matériaux à transition de phase et supérieure à 300-500 kWh/m<sup>3</sup> en utilisant des processus thermochimiques.

Pour produire de l'eau chaude sanitaire il faut environ 45 kWh/m<sup>3</sup> (ce qui correspond à chauffer de l'eau de 10°C à 50°C environ). Bien que ceci puisse être très variable d'un foyer à l'autre, il faut compter environ 50 litres d'eau chaude sanitaire par personne et par jour ce qui correspond à une consommation de 800 kWh par personne et par an. Le stockage et la distribution de l'eau

chaude sanitaire sont sujets à des pertes qui dépendent de l'installation et peuvent augmenter significativement ces ordres de grandeur.

## L'hydrogène

L'hydrogène est un vecteur énergétique mais il faut de l'énergie pour le produire. On peut le considérer comme un moyen de stockage de l'électricité même si le rendement global n'est pas extraordinaire. Produire de l'hydrogène à partir de gaz naturel est ce qui coûte aujourd'hui le moins cher : 2 à 3 fois moins que par électrolyse. Toutefois c'est ce dernier moyen qu'il est intéressant d'utiliser pour l'éolien. En effet, il existe des périodes de production d'électricité où il n'y a pas de demande. Dans ce cas cette électricité n'a aucune valeur ou même une valeur marchande négative (il faut payer pour s'en débarrasser !)<sup>3</sup>.

Si l'on a un rendement de 70% pour l'électrolyse à haute température et de 50% pour une pile à combustible qui régénère l'électricité, on voit que le rendement global est relativement faible, de l'ordre de 35%. Il est préférable d'utiliser l'hydrogène comme combustible en le mélangeant avec du gaz naturel (méthane).

Typiquement, il faut 1 litre d'eau pour produire 1 m<sup>3</sup> d'hydrogène dans les conditions normales de pression et de température (Nm<sup>3</sup>) et la consommation d'électricité est, en tenant compte des pertes, de l'ordre de 4 à 6 kWh.

Le problème majeur de l'hydrogène est sa faible densité énergétique par unité de volume. Or, pour la plupart des applications mobiles, le volume est un facteur limitant. En effet, si la densité massique de l'hydrogène (33,3 kWh/kg) est 3 fois supérieure à celle de l'essence (environ 12 kWh/kg), sa densité volumique à 700 bars n'est que de 2 kWh/l et celle de l'hydrogène liquide de 2,3 kWh/l. Avec les hydrures on dépasse de peu les 3 kWh/kg. Si l'on compare la densité d'énergie transportée dans des pipelines, dans un même volume circulant sous pression, le gaz naturel transporte 5 fois moins d'énergie que le pétrole et l'hydrogène 3 fois moins que le gaz naturel, soit au total un facteur 15 entre l'hydrogène et le pétrole.

## Conclusion et perspectives

Le stockage est le point faible de la filière énergétique. Deux grands moyens de stockage dominant aujourd'hui le marché pour le stockage de l'électricité :

- pour les très grandes quantités d'électricité que l'on doit stocker au niveau national, les STEP sont le moyen de stockage le plus efficace et le moins cher. Dans l'avenir on peut envisager la construction de STEP artificielles soit sur terre ou en mer pour gérer les énergies intermittentes.
- Pour des quantités d'électricité plus faibles comme celles nécessitées par les véhicules et dispositifs électroniques nomades, les technologies Li-Ion dominant le marché. Dans le futur

---

<sup>3</sup> En Europe, le prix de l'électricité peut varier entre approximativement -500€/MWh à 3 000€ :MWh selon l'offre et la demande.

on peut espérer l'apparition de nouvelles technologies, notamment pour les véhicules électriques ou hybrides rechargeables, comme les batteries Li-Air qui permettraient, pour un véhicule, d'avoir plus de 500 km d'autonomie contre 100-150 km aujourd'hui.

La figure 3 résume les principaux moyens de stockage de l'électricité avec, pour certains d'entre-eux le rendement et une estimation du coût.

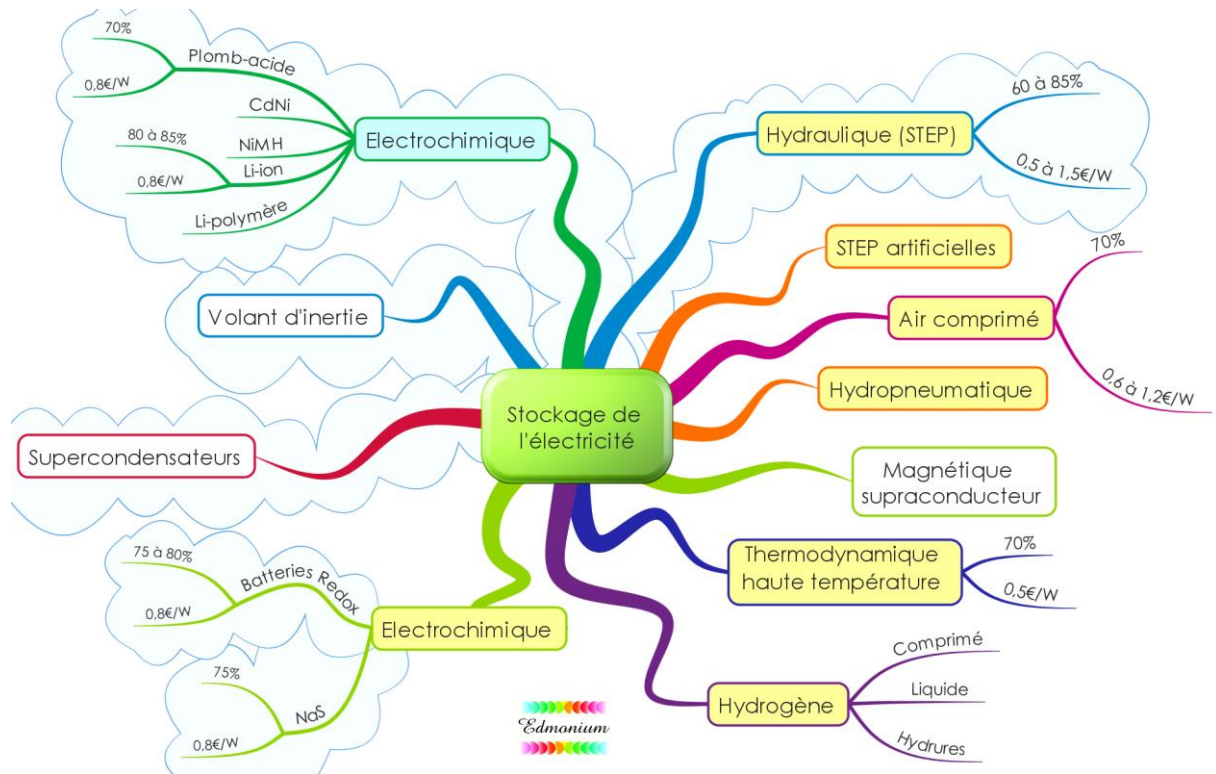


Figure 3. Principaux moyens de stockage de l'électricité. Ceux situés dans les nuages sont largement utilisés aujourd'hui dans des applications.

On sait facilement stocker la chaleur pour de courtes périodes (cumulus, par exemple). Le stockage intersaisonnier de la chaleur est par contre plus complexe à mettre en œuvre et demande de grandes quantités de matériaux de stockage, l'eau étant celui qui est de loin le plus commode, notamment pour son faible impact sur l'environnement.

### Références générales

*Le stockage de l'énergie*, ouvrage collectif coordonné par P.Odru, Dunod, 2010

*Our energy future, resources, alternatives, and the environment*, C.Ngô and J.Natowitz, Wiley 2009

*Demain l'énergie, moteur de l'humanité*, C.Ngô, Dunod, 2009