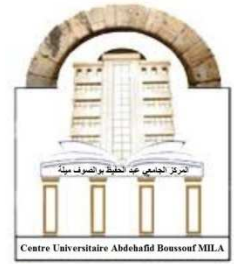




République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique
Centre Universitaire Abdel Hafid Boussouf
Mila



Support de Cours

Matière : Transport et Stockage de l'Énergie

Chapitre IV : Stockage d'énergie

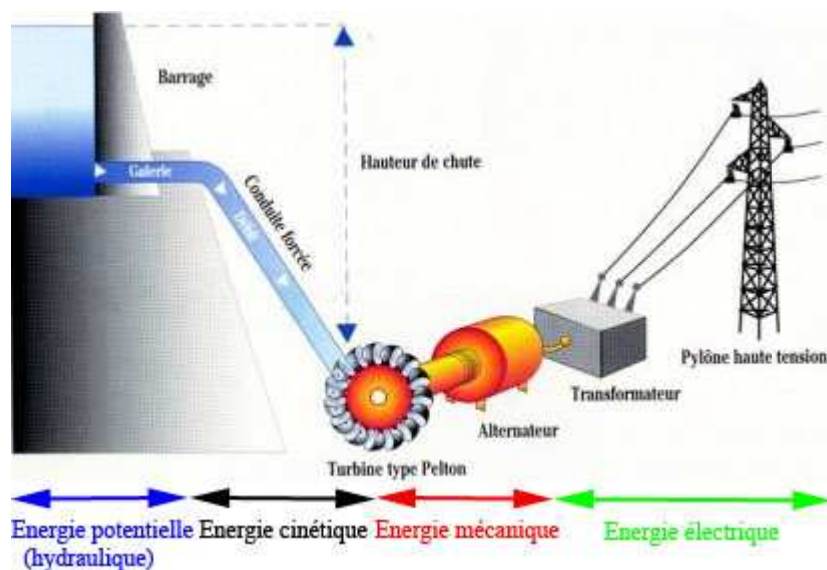
Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Master2

Semestre 3

Dr. ZEGHBID Ilhem



Année universitaire 2019-2020

Chapitre IV

Stockage d'énergie

1. Introduction

Le **stockage de l'énergie** consiste à mettre en réserve une quantité d'énergie provenant d'une source d'énergie en un lieu donné, sous une forme aisément utilisable, pour une utilisation ultérieure. Il est nécessaire pour valoriser avec efficacité les énergies renouvelables et propres lorsqu'elles sont intermittentes, telles que l'énergie éolienne et l'énergie solaire. Stocker des calories ou de l'électricité permet de stabiliser les réseaux énergétiques et de lisser les irrégularités de production/consommation dans le contexte de développement des énergies renouvelables, particulièrement sur les sites insulaires ou isolés.

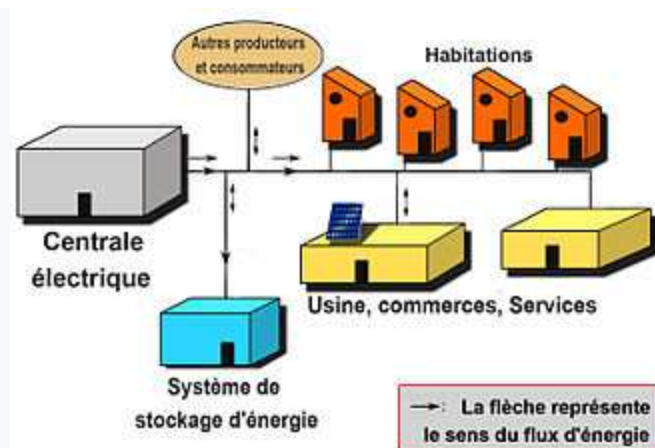


Schéma de principe simplifié d'un système intégré de stockage dans un réseau électrique.



Centrale solaire d'Andasol (Espagne), cette centrale solaire utilise la technologie de stockage de chaleur dans des réservoirs de sel fondu, pour produire de l'électricité la nuit ou le jour quand le soleil ne brille pas.

Pour la « production d'énergie », le stockage est essentiel : en réalité, ce qu'on appelle couramment et économiquement « production d'énergie » est :

- soit la transformation d'un stock d'énergie potentielle (combustible fossile, eau stockée en hauteur, matière fissile...) en une énergie directement utilisable pour un travail (électricité, travail mécanique) ou un usage thermique ;
- soit la transformation directe de flux d'énergie naturels, sur lesquels l'humain n'a aucun contrôle. Ce sont les énergies renouvelables, issues pour la plupart, directement ou indirectement (vent, hydraulique, biomasse, etc.), du rayonnement solaire. Leur production irrégulière rend souvent nécessaire un stockage permettant de pallier les irrégularités de production.

Le stockage est la constitution d'un stock d'énergie potentielle à partir de flux d'énergie dont on n'a pas l'usage immédiat, pour en disposer plus tard, quand la demande sera plus importante.

2. Intérêt

Le stockage d'énergie est un enjeu vital pour les sociétés humaines et l'industrie. Pour les États, l'indépendance énergétique est stratégique et économiquement essentielle. Pour les individus et les entreprises, l'énergie doit impérativement être disponible à la demande, sans coupure inopinée. Toute rupture d'approvisionnement a un coût économiques et social élevé et en termes de santé et de sécurité, etc. ; par exemple, une coupure de courant dans un hôpital peut avoir des conséquences désastreuses, ce pourquoi il est muni de plusieurs groupes électrogènes de secours et de stocks de carburant.

Le stockage d'énergie répond à trois motivations principales :

- sécurisation de l'approvisionnement en énergie d'un pays ou d'un groupe de pays ;
- ajustement de la production d'énergie en fonction de la demande ;
- compensation de l'irrégularité de la production des énergies dites intermittentes.

3. Efficacité énergétique d'un stockage d'énergie

Sauf pour les moyens naturels de stockage d'énergie ambiante, comme la lumière solaire dans la biomasse, le vent ou la pluie, le stockage d'énergie réversible est associé à l'opération inverse consistant à récupérer l'énergie stockée (le déstockage d'énergie). 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; on a alors régénéré le stockage.

L'efficacité énergétique 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. Ce rapport est généralement inférieur à 1, sauf pour les moyens naturels de stockage d'énergie ambiante où il peut être considéré comme infini (division par zéro), puisque personne ne fournit l'énergie à stocker, qui est de fait gratuite.

L'efficacité énergétique 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. Dans tous les cas, 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 intégralement stockée et une partie de l'énergie stockée n'est pas intégralement récupérée. Mais pour de l'énergie ambiante naturelle, ces pertes influent surtout sur l'amortissement économique des investissements éventuellement nécessaires : la lumière du soleil arrive même si l'humain ne la capte pas.

4. Formes de stockage

Le choix d'une forme de stockage est directement lié à l'usage qu'on fait de l'énergie. Cette section dresse un aperçu des grandes catégories de stockage, présentées plus en détail dans les sections suivantes.

- Stockage de combustible

La combustion restant le processus énergétique le plus courant, le stockage de combustible est le plus développé. La plupart des États disposent de réserves stratégiques de pétrole et/ou de charbon. Ces combustibles fossiles sont complétés par le bois énergie, dont on fait des stocks pour l'hiver, et les agrocarburants.

- Stockage électrochimique

À plus faible échelle, le stockage d'énergie en vue d'une utilisation sous forme électrique consiste principalement en stockage électrochimique (piles et batteries) et électrique (condensateurs et « supercondensateurs »). Il permet de constituer des réserves réduites, mais très importantes sur le plan pratique. Ainsi, outre les applications mobiles courantes (batteries au lithium, batteries de voitures, etc.), cette filière permettrait de doper le stockage d'électricité intermittente (particulièrement d'origine solaire et éolienne). En usage résidentiel, elle permettrait de stocker et d'autoconsommer la production électrique d'une maison équipée de capteurs solaires photovoltaïques, en l'associant à un réseau électrique « intelligent ».

- Stockage mécanique

C'est un élément pratiquement obligatoire dans tous les moteurs, sous forme de volant d'inertie, pour réguler le mouvement à des échelles de temps très courtes, inférieures à la seconde. Il peut être utilisé pour le stockage à court terme. Certaines évaluations donnent des quantités d'énergie stockées assez faibles : ainsi pour une automobile d'une tonne lancée à 150 km/h cela représenterait 860 kJ, soit moins de $\frac{1}{4}$ kWh. Un prototype commercial a aussi été conçu, pour l'automobile, établissant une économie de 25 % de carburant.

- 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.

1. Le stockage par chaleur sensible



Stockage thermique à Krems en Autriche, 50 000 m³d'eau, 2 GWh.

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 et celle supportée par le matériau ou son conteneur, par les déperditions thermiques du stockage (liée à son isolation thermique) et par l'éventuel changement d'état (ou « changement de phase ») que peut être amené à subir le matériau servant au 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. Il est aussi possible de stocker de l'eau chaude l'été pour l'hiver avec un dimensionnement correct du réservoir, même si le climat est froid.
- 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 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.
- La chaleur peut aussi être stockée dans du silicium à très haute température, dont l'énergie lumineuse peut être reconvertie en énergie électrique au moyen de cellules photovoltaïques. « Cette technique est intéressante, car avec la chaleur, on stocke l'énergie à un coût bien inférieur qu'avec des batteries électriques ».

2. 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 des changements de phase solide/liquide ou liquide/vapeur, et pour une quantité d'énergie stockée et un matériau de stockage donnés, le stockage par chaleur latente 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.
- Des matériaux à changement de phase (solide/liquide) encapsulés dans une cuve de stockage permettent de stocker de l'énergie sous forme de chaleur latente, la nuit par exemple, durant laquelle l'électricité est moins chère, et permet ensuite de restituer cette énergie la journée. Dans le cas de la climatisation et de la réfrigération, le MCP utilisé peut être de l'eau ou de la paraffine. Cette technologie permet également de réduire la puissance installée, car elle permet de faire fonctionner le système de production de froid à sa puissance nominale, et non pas de façon aléatoire (dû à la forte demande ou à aucune demande).
- Les pompes à chaleur, notamment les réfrigérateurs, congélateurs et climatiseurs, utilisent des fluides caloporteurs. Ceux-ci ne stockent pas à proprement parler de chaleur mais la transportent en changeant, éventuellement sa nature (chaud ↔ froid) et sa puissance^f.
- Le stockage latente (STL) repose sur un dispositif composé d'une cuve remplie de nodules et d'un fluide caloporteur. Environ 60 % du volume de la cuve est occupé par les nodules et les 40 % restants par le fluide caloporteur. Le nombre de nodules dans un système détermine à la fois l'énergie totale stockée dans le STL mais aussi les puissances d'échange entre les nodules et le fluide caloporteur en mode de charge et de décharge.

- **Le Système de Stockage d'Énergie Électrique (SSEE)**

Un accumulateur d'énergie électrique, exploitable au sein d'un système énergétique plus global, constitue déjà à lui seul un système relativement complexe, lié notamment aux conversions vers une forme d'énergie intermédiaire. Les principales fonctions présentes dans un système de stockage d'énergie électrique générique sont mises en évidence figure 5, en particulier le bloc « forme intermédiaire d'énergie » représente le « réservoir », c'est-à-dire la partie stockant « physiquement » l'énergie. C'est le module dont le dimensionnement est directement dicté par la capacité énergétique.

Les formes d'énergie intermédiaires sont très variées. Il peut s'agir d'énergie potentielle associée à la gravité terrestre, d'énergie cinétique d'un système en rotation, de la pression des fluides compressibles, d'énergie des liaisons covalentes de certaines molécules (électrochimie) ou encore de formes électromagnétiques de l'énergie (condensateurs, et inductances supraconductrices).

Doit-on privilégier un stockage direct ou indirect ? En définitive, cela a peu d'importance car, quel que soit le moyen de stockage, il est nécessaire d'utiliser un ou plusieurs convertisseurs d'adaptation comme le montre la figure 5, ne serait-ce que pour adapter électriquement le système de stockage à la source électrique à laquelle on l'associe. Un convertisseur électronique de puissance permet d'assurer cette adaptation purement électrique, mais également le contrôle du flux d'énergie (puissance) en charge et décharge.

Dans les systèmes de stockage les plus évolués, on ajoute des fonctions de contrôle et de diagnostic, notamment pour connaître leur état de charge mais également pour évaluer leur état de santé ou d'usure. Car, si l'énergie électrique se stocke effectivement, les systèmes de stockage sont toujours relativement coûteux et il est fondamental de les exploiter le plus efficacement possible afin de minimiser leur vieillissement.

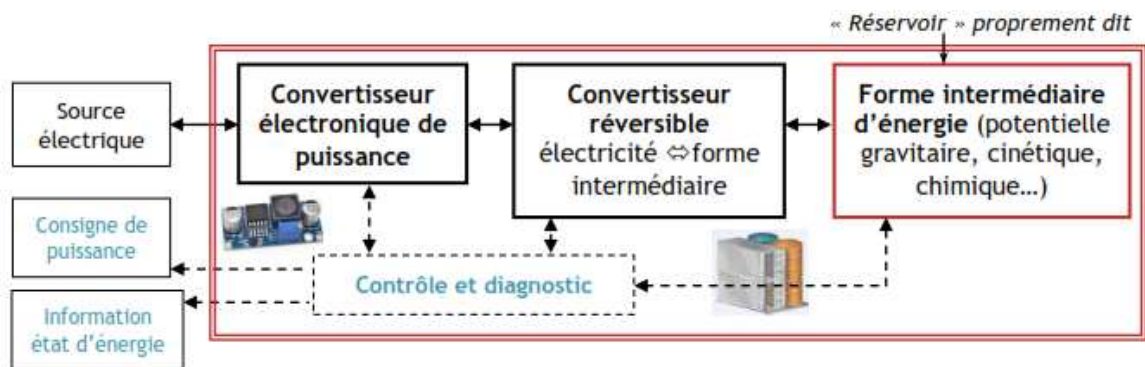


Figure 5 : Synoptique générique d'un système de stockage d'énergie électrique (SSEE), source B. Multon

5. Les technologies du stockage

Le stockage de l'énergie est multiforme. On peut stocker de l'énergie pour la restituer en mobilité électrique, on peut également stocker de l'énergie sous forme de thermies, d'énergie potentielle... Ces modes de stockage peuvent jouer un rôle important dans le système électrique. On se focalisera néanmoins ici sur le stockage d'électricité « pour l'électricité », c'est-à-dire pour restitution directe dans le système électrique. Des STEP aux batteries, la gamme des technologies est large.

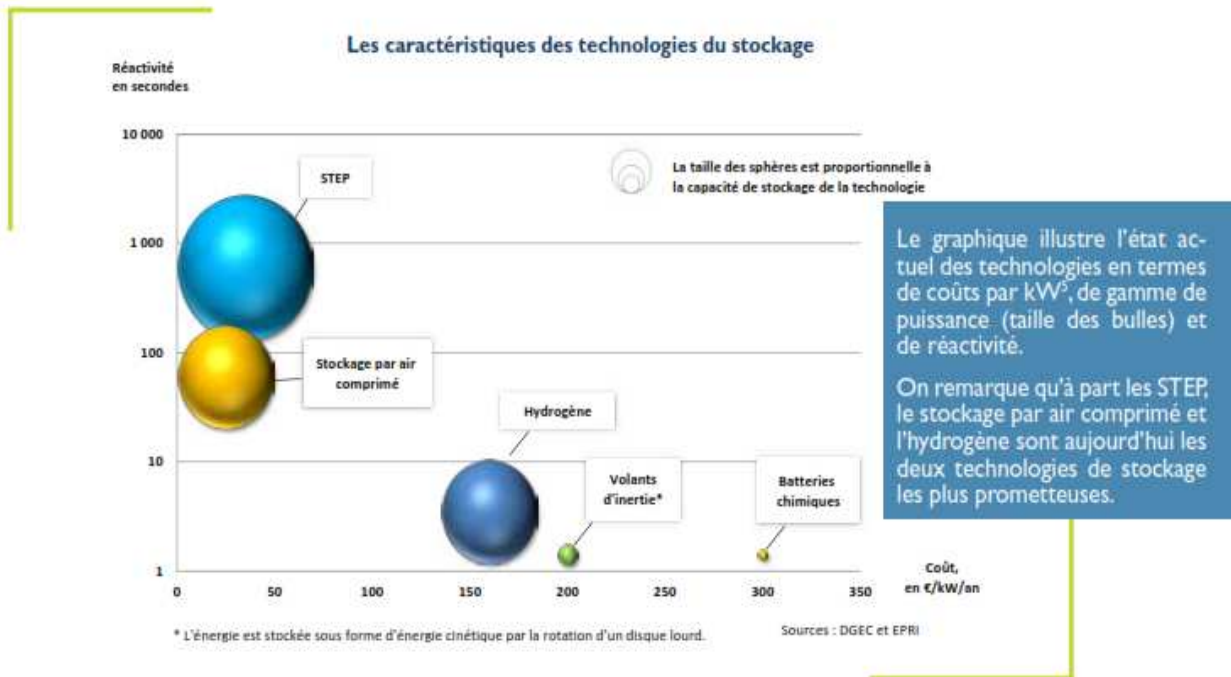
5.1. Les nouvelles technologies de stockage d'énergie

Les différentes technologies de stockage sont caractérisées par une puissance typique (du MW au GW), une énergie stockée (du kWh au GWh), une durée de vie (de quelques années à plusieurs décennies), ainsi que par une maturité technologique et un coût. Les principales technologies de stockage existantes sont les suivantes :

- Les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP)
- Le stockage par air comprimé (CAES)
- Le stockage par l'hydrogène
- Les volants d'inertie
- Les batteries

Actuellement, seule la technologie des STEP est mature. Le principe des STEP consiste à pomper de l'eau dans un bassin supérieur pour stocker l'électricité, et à turbiner pour la réinjecter dans le réseau. Il en existe 4,3 GW en France aujourd'hui. Si le potentiel géographique de STEP n'est pas encore complètement exploité en France, il est relativement limité en termes économiques du fait de coûts d'investissements élevés. Le CAES (air comprimé) est une technologie d'avenir dont les caractéristiques économiques (taille, puissance, capacité de stockage...) ressemblent à celles des STEP. Mais elle n'est pas mature. Son développement reste conditionné par des efforts de R&D, la réalisation de démonstrateurs (allant au-delà des deux seuls ouvrages existants dans le monde en Allemagne et aux États-Unis), et la disponibilité de sites de stockage.

Les autres technologies nécessitent davantage d'efforts de RD&D (Recherche, Démonstration & Développement), notamment sur la chimie des batteries. Les technologies non matures peuvent cependant être compétitives pour certaines applications. Ainsi, les batteries, dont les coûts sont encore trop élevés s'il faut les dimensionner pour fournir des services de transfert d'énergie, peuvent être adaptées et économiques pour des applications de « flexibilité » (gestion des « réserves », certains services « système » tels que la tenue de fréquence) ou pour des applications isolées du réseau électrique.



6. Coûts de stockage d'énergie

Les coûts du stockage de l'énergie sont liés à l'amortissement de l'investissement, qui est la part la plus marquante pour l'acheteur et à ceux de fonctionnement (maintenance, pertes énergétiques, vieillissement).