

Chapitre 4

Stockage de l'Énergie

4.1 Introduction

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.

Le stockage de l'énergie est au cœur des enjeux actuels, qu'il s'agisse d'optimiser les ressources énergétiques ou d'en favoriser l'accès. Il permet d'ajuster la production et la consommation d'énergie en limitant les pertes. L'énergie, stockée lorsque sa disponibilité est supérieure aux besoins, peut être restituée à un moment où la demande s'avère plus importante. Face à l'intermittence ou la fluctuation de production de certaines énergies, par exemple renouvelables, cette opération permet également de répondre à une demande constante.

Les méthodes de stockage dépendent du type d'énergie. Les sources d'énergies fossiles (charbon, gaz, pétrole), sous forme de réservoirs à l'état naturel, remplissent naturellement la fonction de stocks. Une fois extraites, elles peuvent facilement être isolées, hébergées et transportées d'un point de vue technique. Le stockage s'avère plus complexe pour les énergies intermittentes: leur production est relayée par des vecteurs énergétiques tels que l'électricité, la chaleur ou l'hydrogène, nécessitant des systèmes spécifiques de stockage.

Le besoin de stockage est une réponse à des considérations d'ordre économique, environnemental, géopolitique et technologique.

L'accroissement mondial de la demande en énergies fossiles, la hausse des cours qui en résulte et les troubles politiques de plusieurs pays producteurs rendent l'approvisionnement partiellement incertain. Le stockage de l'énergie est donc un atout géostratégique,

notamment dans le cas des hydrocarbures.

Dans le domaine économique, en particulier lors des pointes de consommation, le stockage de l'énergie peut permettre de réguler les fluctuations des prix indexés sur les variations de l'offre et de la demande. Pour les entreprises et les particuliers consommateurs, une énergie disponible, sans interruption ou hausse des prix inopinée, est une nécessité au regard des modes de vie actuels. Le stockage est aussi un moyen de limiter les pertes lors d'une surproduction et donc de réduire la consommation globale d'énergie.

D'un point de vue technologique, le développement des équipements portables et des véhicules hybrides et électriques nécessite de nouvelles formes de stockage permettant d'héberger une forte densité d'énergie dans un volume limité et de la restituer aisément.

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, flux sur lesquels l'humain n'a aucun contrôle. Ce sont les énergies renouvelables, souvent issues du rayonnement solaire.

Du point de vue physique, il n'y a jamais *production d'énergie*, mais seulement transformation d'une énergie disponible dans la nature.

Le stockage consiste à constituer un stock d'énergie potentielle à partir de flux d'énergie dont on n'a pas l'usage immédiat, afin de pouvoir en disposer plus tard, lorsque la demande sera plus importante. La nature procède naturellement à ce stockage, par exemple avec la biomasse (non fossile), le cycle climatique de la Terre (pluie, neige,...), les marées,... Certains stockages naturels n'ont eu lieu qu'à l'échelle de temps géologique (création du charbon, du pétrole et du gaz, formation des étoiles et des éléments radioactifs dans les noyaux des planètes,...). Aujourd'hui, les stocks s'épuisent, leur renouvellement étant infinitésimal à l'échelle de temps de la vie humaine, raison pour laquelle ces ressources sont appelées non-renouvelables. Le stockage d'énergie est un enjeu vital pour les sociétés humaines. 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 très élevé, non seulement en termes de coûts économiques, mais aussi en termes de coûts sociaux : santé, sécurité, etc ; par exemple, une coupure de courant dans un hôpital peut avoir des conséquences désastreuses; tout hôpital se doit de disposer 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.

Une rupture de l’approvisionnement en énergie peut gravement désorganiser l’économie d’un pays et mettre en danger des fonctions vitales: défense, système de santé, etc. Il est donc essentiel de disposer de stocks suffisants pour faire face à une coupure des flux d’approvisionnement, en particulier en cas de crise géopolitique. Le premier choc pétrolier de 1973, créé par une baisse concertée des livraisons de pétrole par les pays de l’OPEP, suscitant une envolée des prix pétroliers, a amené les 16 nations les plus industrialisées (rejointes ultérieurement par 12 membres additionnels) à créer l’Agence Internationale de l’Énergie, chargée de coordonner leurs politiques énergétiques et de mettre sur pied une économie raisonnée de la ressource. Pour pouvoir adhérer à l’AIE, un pays doit prouver qu’il dispose de réserves de pétroles équivalentes à 90 jours d’importations, à disposition immédiate du gouvernement au cas où des mesures d’urgence seraient décidées par l’AIE; il doit également avoir mis au point un programme de rationnement capable de réduire de 10 % la consommation nationale de pétrole. En 2011, lorsque la guerre civile libyenne a causé une chute de la production de ce pays, l’AIE a décidé de prélever 60 millions de barils dans ces réserves stratégiques. La réserve stratégique de pétrole la plus importante, celle des États-Unis, atteignait 696 millions de barils à la fin 2011, soit 82 jours d’importations nettes. Les stocks de gaz jouent un rôle majeur dans le fonctionnement et la sécurité du système gazier. La politique de l’Union européenne en matière de sécurisation de l’approvisionnement en énergie est exposée dans le Livre vert de 2006 intitulé *Une stratégie européenne pour une énergie sûre, compétitive et durable*, préconisant en particulier une nouvelle proposition législative concernant les stocks de gaz qui donnerait à l’UE les moyens de réagir selon le principe de la solidarité entre les États membres en cas de situation d’urgence.

Cette nouvelle réglementation, adoptée en 2010, enjoint chaque état membre de désigner une autorité compétente chargée d’établir des plans d’urgence, des évaluations des risques, et d’imposer aux entreprises gazières de prendre les mesures nécessaires pour garantir des standards de sécurité d’approvisionnement, sans fixer d’objectif précis en matière de stockage; elle promet surtout des mesures de diversification d’approvisionnement (gazoducs évitant la Russie par le Sud, terminaux méthaniers) et d’amélioration des capacités d’échange, en particulier la bi-directionnalité des gazoducs. Dans le nucléaire, l’uranium contenu dans l’amont du cycle du combustible nucléaire (conversion en hexafluorure d’uranium, enrichissement, fabrication des assemblages, combustible en réacteur) représente plusieurs années de consommation, ce qui garantit une forte capacité de résistance à une rupture d’approvisionnement. Une des règles fondamentales de la sécurité

des centrales nucléaires est la redondance des dispositifs de secours : chaque centrale doit disposer de plusieurs sources d'alimentation électrique, par exemple des groupes diesel avec leurs stocks de carburant, afin de prendre le relais de l'électricité du réseau pour maintenir en fonctionnement les pompes du circuit de refroidissement

4.2 Ajustement production d'énergie – demande d'énergie

L'ajustement de la production d'électricité à la demande se fait pour l'essentiel par l'utilisation de moyens de production modulables à volonté, en particulier les centrales à gaz; des contrats d'effacement passés avec les consommateurs capables d'arrêter tout ou partie de leur consommation pendant les périodes de forte demande contribuent également, de façon encore marginale, à cet ajustement. Il est envisagé d'aller plus loin dans la maîtrise de la demande en énergie grâce aux smart grids. Des moyens de stockage sont aussi utilisés, comme les stocks de charbon ou de gaz sur le site des centrales électriques.

4.3 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 est associé à l'opération inverse: l'opération 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 (idéalement vide); 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 oeuvre 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 réellement stockée et une partie de l'énergie stockée n'est pas réellement 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.

4.4 Les grandes formes de stockage

Le stockage est directement lié à l'usage qu'on fait de l'énergie.

- **Stockage de combustible:** La combustion restant 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 agrocarburants.
- **Stockage électrochimique:** À plus faible échelle, le stockage d'énergie en vue de la production d'électricité (électrochimique dans les piles et les batteries, électrique dans les condensateurs) est bien moindre en termes de quantité d'énergie, mais très important sur le plan pratique. De nouvelles approches et/ou de nouvelles batteries associées à un système *intelligent* de gestion de l'énergie, permettent de doper le stockage d'électricité intermittente (solaire, éolienne), pour stocker et autoconsommer jusqu'à plus de 75 % de la production d'électricité photovoltaïque d'une maison équipée de modules photovoltaïques.
- **Stockage de 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 de chauffage et de rafraîchissement, permettant des économies directes. Les matériaux à changement de phase peuvent aussi dans les bâtiments accumuler de l'énergie solaire thermique de chauffe-eau solaires individuels. Les matériaux à changement de phase 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. À l'échelle industrielle, on peut stocker la chaleur solaire dans des réservoirs, comme intermédiaire 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 réguler le mouvement à des échelles de temps très courtes, inférieures à la seconde.

Il n'est pratiquement pas utilisé pour le stockage à long terme, car les quantités d'énergie stockées sont très faibles (ainsi une automobile d'une tonne lancée à 150 km/h ne représente que 860 kJ, soit moins de 1/4 kWh), mais a été utilisé en Formule

- 1 pour un gain ponctuel mais instantané de puissance.
- **Stockage sous forme d'énergie potentielle de pesanteur:** La remontée d'eau dans des barrages quand il y a surproduction d'électricité est déjà très utilisée pour la régulation et l'équilibrage des réseaux électriques (systèmes de pompage-turbinage). Son utilisation est envisagée par certains experts pour compenser l'irrégularité de la production des énergies éolienne et solaire.

4.5 Stockage d'électricité

En l'absence d'un réseau interconnectant producteurs et consommateurs, la nécessité du de stockage de l'énergie s'impose si l'on veut pouvoir consommer de l'électricité à la demande, même lorsque la production est nulle (cas d'une éolienne en absence de vent par exemple ou d'un générateur photovoltaïque la nuit).

Comme forme particulière d'énergie, l'électricité ne se stocke pas directement, mais elle peut se convertir en d'autres formes elles-mêmes stockable (potentielle, cinétique, chimique, magnétique,...). Grâce à de bons rendements de conversion à l'occasion d'une double transformation, on peut donc la restituer.

L'électricité est massivement produite, transportée et utilisée en courant alternatif. Or dans le contexte énergétique précédent les années 1980, les moyens de conversion permettant le stockage du courant alternatif étaient excessivement coûteux, voire très peu fiables ou inexistant. Tout cela a changé grâce à l'arrivée d'une électronique de puissance très performante, économique et dont les puissances traitées sont maintenant quasi illimitées.

On peut donc affirmer maintenant que l'électricité se stocke parfaitement, même s'il s'agit d'un stockage indirect. Mais ce stockage possède un coût qui doit être, bien sûr, acceptable.

Pour stocker de l'électricité de façon significative, il faut d'abord la transformer en une autre forme d'énergie stockable, puis effectuer la transformation inverse lorsqu'on désire disposer à nouveau de l'électricité.

La forme d'énergie intermédiaire peut être mécanique, chimique ou thermique. Ces diverses solutions ont toutes été explorées. Elles ont donné naissance aux techniques qui seront présentées ci-après. Selon la nature des besoins, la quantité d'énergie à stocker, la rapidité avec laquelle elle peut être disponible, la durée de vie souhaitable, les coûts acceptables en investissement et en maintenance peuvent varier considérablement. Pour donner une idée de cette variabilité, rappelons que la quantité d'énergie stockée dans une batterie de téléphone portable est de quelques Wattheures, tandis qu'un barrage de montagne stocke plusieurs GWh.

4.5.1 Système de Transfert d'énergie par pompage – STEP

Ces installations comprennent, comme le montre la figure 4.1, des réservoirs situés à des altitudes différentes et un dispositif de pompage réversible permettant de transférer une masse d'eau entre eux et donc une énergie potentielle.

Il permet de stocker de grandes quantités d'énergie électrique par l'intermédiaire de l'énergie potentielle de l'eau. Une STEP (station de transfert d'énergie par pompage), type de centrale hydroélectrique, est utilisée pour transférer l'eau entre deux bassins situés à des altitudes différentes. Lorsque le réseau fournit un surplus d'électricité, l'eau du bassin inférieur est pompée dans le bassin supérieur. Sous l'effet de la pesanteur, cette masse d'eau représente une future capacité de production électrique. Lors d'un déficit de production électrique, la circulation de l'eau est inversée: la pompe devient turbine et restitue l'énergie accumulée. Avec un rendement pouvant atteindre plus de 80%, il s'agit de la solution la plus employée pour stocker l'énergie des centrales électriques.

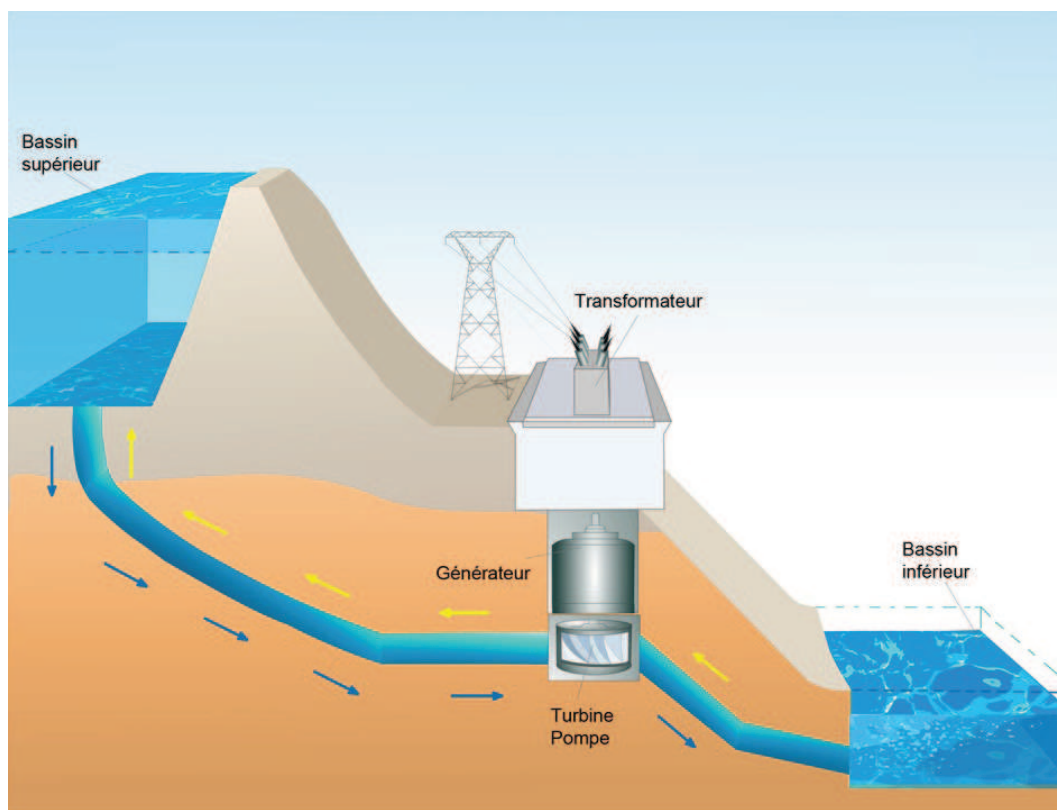


FIGURE 4.1 – Système de Transfert d'Énergie par Pompage – STEP



FIGURE 4.2 – Station de transfert d'énergie par pompage

4.5.2 Stockage par air comprimé – CAES

L'électricité alimente un compresseur qui va comprimer de l'air ensuite stockée dans des cavernes souterraines. L'air circule ensuite des cavernes vers une turbine pour produire de nouveau de l'électricité.

Quand la demande d'électricité est faible, les systèmes existants utilisent d'anciennes mines de sel comme réservoirs et un ensemble moteur-générateur-turbine. Quand la demande d'électricité est importante, l'air comprimé est utilisé pour faire tourner une turbine couplée à un alternateur produisant de l'électricité. Le rendement, actuellement aux environs de 50%, est un axe de recherche et de développement. Le stockage à air comprimé à partir des énergies éolienne et solaire fait l'objet d'installations pilotes en Allemagne et aux États-Unis.

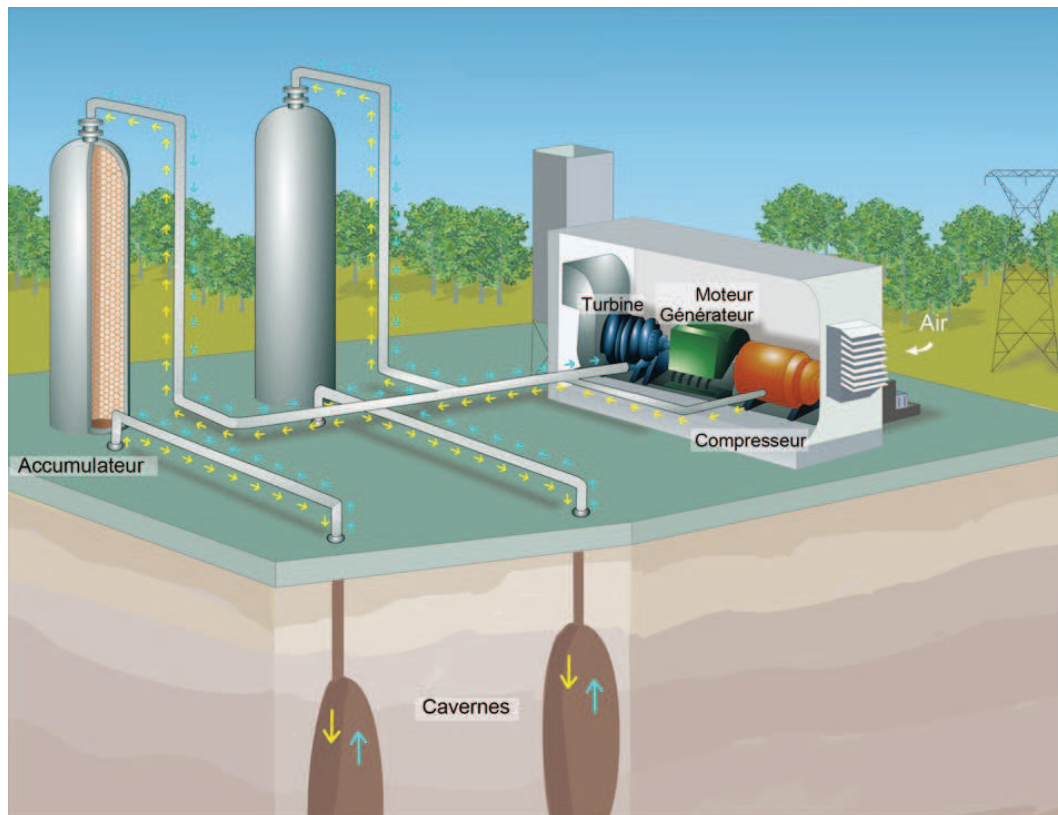


FIGURE 4.3 – Stockage par air comprimé – CAES

4.5.3 Vecteur hydrogène

L'électricité va permettre de produire, via un électrolyseur, de l'hydrogène. Le gaz est ensuite stocké soit sous forme liquide, solide ou gazeuse avant d'être consommé dans une pile à combustible. Re combiné à l'oxygène il va ainsi produire de l'eau et de l'électricité.

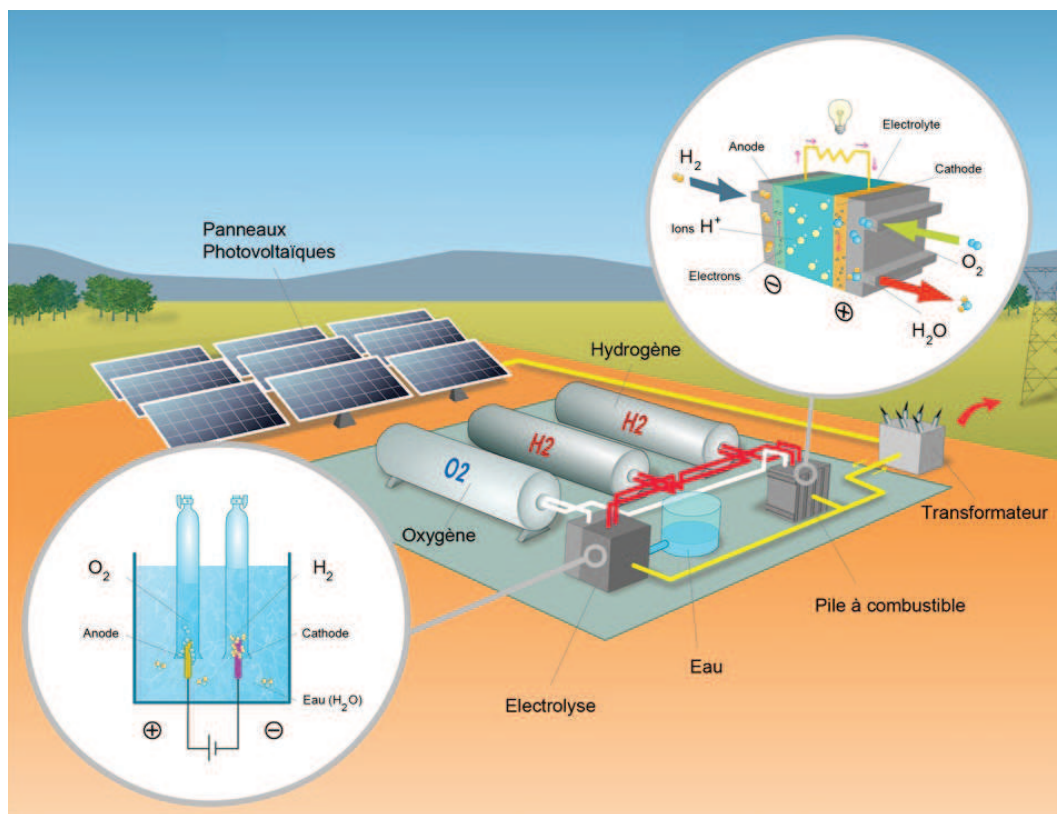


FIGURE 4.4 – Production et stockage de l'hydrogène

4.5.4 Les volants d'inertie

L'électricité fait tourner à très grande vitesse une masse autour d'un axe cylindrique dans un caisson isolé. L'énergie cinétique entraînée par la rotation du cylindre peut ainsi être conservée. Cette énergie est ensuite récupérée sous forme d'électricité grâce à un alternateur (principe de la dynamo).

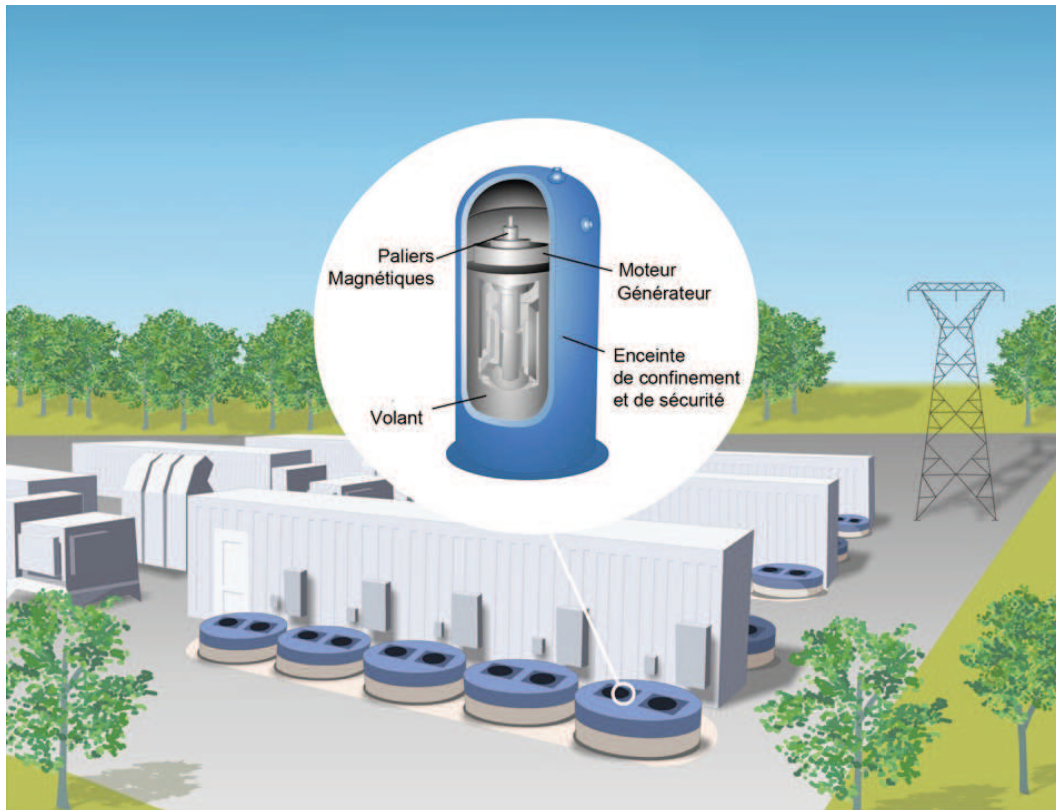


FIGURE 4.5 – Stockage par volants d'inertie

4.5.5 Les batteries

Le stockage d'électricité s'effectue grâce à des réactions électrochimiques qui consistent à faire circuler des ions et des électrons entre deux électrodes.

Les composants chimiques peuvent être différents d'une technologie à une autre, créant ainsi une grande variété de batteries.

Technologies plomb-acide

Il existe une variété assez importante de technologies plomb-acide optimisées pour répondre à différentes exigences en termes de compromis durée de vie, coût d'investissement et constante de temps. Les électrodes sont principalement constituées, pour l'une, de plomb, et pour la seconde, d'oxyde de plomb tandis que l'électrolyte est un mélange d'acide sulfurique (SO_4) et d'eau. Les problèmes d'évaporation de l'eau, et d'électrolyse en cas de surcharge, conduisent à de fréquents besoins de maintenance (par exemple une fois par mois selon conditions de température sachant qu'une augmentation de $10\text{ }^\circ\text{C}$ mul-

tiplie par 5 la vitesse de perte d'eau) dans le cas des batteries ouvertes. En revanche, les batteries fermées de type VRLA (Valve Regulated Lead Acid) à soupape de sécurité et avec un électrolyte gélifié sont sans entretien, avec des durées de vie qui peuvent atteindre 20 ans.

Les batteries au plomb permettent également de proposer des solutions de stockage de masse avec des performances tout à fait honorables en termes de coût et de durée de vie, en particulier grâce à de récents développements.

Technologies à base de nickel:

Il s'agit des technologies nickel-cadmium (NiCd) et nickel métal-hydrures (NiMH), qui fournissent, dans les deux cas, une force électromotrice par élément d'environ 1.2 V. Les performances massiques sont jusqu'à deux fois plus élevées que celles du plomb acide et les performances en puissance peuvent être excellentes.

Les technologies NiCd: Après avoir satisfait la demande en petits accumulateurs pour les applications électroniques grand public, sont aujourd'hui bannies de ce domaine à cause de la toxicité du cadmium et ne sont autorisées que pour des usages professionnels.

Actuellement, cette technologie est typiquement utilisée dans les chariots de maintenance comme elle l'a été dans les véhicules électriques de la fin du 20^{ème} siècle.

La technologie NiMH: a remplacé partiellement celle de type NiCd sur le marché grand public. Elle permet de se passer du cadmium tout en augmentant l'énergie massique, passant de 60 à 80 Wh/kg, et en doublant quasiment l'énergie volumique. Elle sert également de *batterie de puissance* dans les chaînes de traction hybride de Toyota.

Les technologies lithium: Bien plus jeunes que les deux précédentes (apparition dans les années 1990, mais en petites capacités et puissances), sont nombreuses et nous nous restreignons ici à un très bref panorama de leurs caractéristiques majeures et de leurs applications. Nous considérons les technologies suivantes selon les cathodes (positives), sachant que les anodes (négatives) peuvent être de type carbone (LiC_6) ou titanates (LTO):

- NCA : $\text{Li}(\text{NiCoAl})\text{O}_2$;
- NMC : $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$;
- LFP : LiFePO_4 ;
- LMO : LiMn_2O_4 ou $\text{LiNi}_{1/2}\text{Mn}_{3/2}\text{O}_4$;
- LMP : lithium métal polymère.

Selon les technologies, de 100 à 400 g de lithium métal sont requis par kWh de capacité de stockage. Les forces électromotrices d'un élément sont comprises entre 2.1 V (LFP-LTO) et 3.8 V (LMO-LiC), en passant par 3.3 V (LFP-LiC). Quant aux valeurs d'énergie massique, elles varient, respectivement pour des cellules seules ou pour des packs de grosse capacité, entre 70 ou 45 (technologie LFP-LTO) et 180 ou 120 Wh/kg (technologie NCA-LiC).

La technologie LMP, développée par très peu de fabricants, est entièrement solide et ne présente pas de risque d'explosion. Elle offre une densité d'énergie élevée d'environ 100 Wh/kg (en pack). Mais son principal inconvénient est sa température de fonctionnement optimale aux alentours de 60 à 80 °C.

Les technologies au lithium, largement utilisées pour les applications électroniques portables, ont nécessité d'importants développements pour réaliser des packs de fortes énergies et puissance.

Elles permettent aujourd'hui d'équiper les véhicules électriques avec des capacités énergétiques de dizaines de kWh ainsi que de réaliser des batteries de très grande capacité pour des applications réseau. La technologie LFP offre des performances exceptionnelles de durée de vie et de sécurité (pas de risque d'explosion ou d'inflammation en cas de défaillance).

4.5.6 Le stockage électromagnétique

Le stockage magnétique à supraconducteur est appelé aussi SMES pour *Superconducting magnetic energy storage* (Stockage d'énergie magnétique par bobine supraconductrice). Le SMES permet de disposer quasiment instantanément d'une grande quantité d'électricité, mais il ne pourra se généraliser tant que l'on n'arrivera pas à produire des aimants supraconducteurs performants, durables et moins coûteux. Il permet aujourd'hui, encore expérimentalement, 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 champ magnétique est généré par la circulation d'un courant électrique dans une bobine constituée d'un matériau supraconducteur et court-circuitée qui devait être refroidie à 4 °K, soit - 269 °C dans les premiers modèles. Il suffit de connecter la bobine au réseau pour la décharger. Pour l'instant, le coût des équipements (et l'énergie requise pour la réfrigération) réservent ce type de stockage à des applications de hautes technologies, civiles ou militaires (lanceur électromagnétique...)

4.5.7 Supercondensateurs

Le condensateur est un moyen de stocker l'énergie sous forme électrostatique. Les technologies traditionnelles des condensateurs ne permettent le stockage d'énergie qu'à de courtes échelles de temps, celles du filtrage des convertisseurs statiques (quelques micro à quelques millisecondes) et celles de la compensation de puissance réactive sur les réseaux 50 et 60 Hz (quelques dizaines de millisecondes). L'arrivée des technologies dites de supercondensateurs, au début des années 1980 (initialement pour des applications de petites énergies et petites puissances) a étendu les *constantes de temps* faisable vers les minutes avec des capacités de plusieurs farads, et aujourd'hui de plusieurs milliers de farads par élément.

Un supercondensateur est constitué de 2 électrodes poreuses, généralement en carbone activé, plongées dans un électrolyte liquide et séparées par un séparateur laissant circuler les ions mais pas les électrons. L'interaction des électrodes et de l'électrolyte entraîne l'apparition spontanée d'une accumulation de charges aux interfaces, on parle de formation d'une double couche électrochimique : une couche de charges positives et une couche de charge négatives, l'ensemble étant électriquement neutre. Les plus gros supercondensateurs ont été développés majoritairement pour une utilisation dans le domaine des transports.

Le supercondensateur possède une puissance instantanée plus importante que celle des batteries et une énergie plus grande que celle des condensateurs classiques. Sa durée de vie est plus élevée que celle des batteries (environ 10 ans).

4.6 Stockage de la chaleur

4.6.1 Le stockage par chaleur sensible

qui consiste à chauffer un fluide caloporteur ou un solide. La chaleur est ensuite récupérée en chauffant un autre fluide. C'est le principe du ballon d'eau chaude, couplé à un panneau solaire thermique. C'est aussi tout simplement le cas d'une pierre posée près d'une cheminée. Une fois qu'elle a emmagasiné la chaleur, elle peut être déplacée et céder sa chaleur.

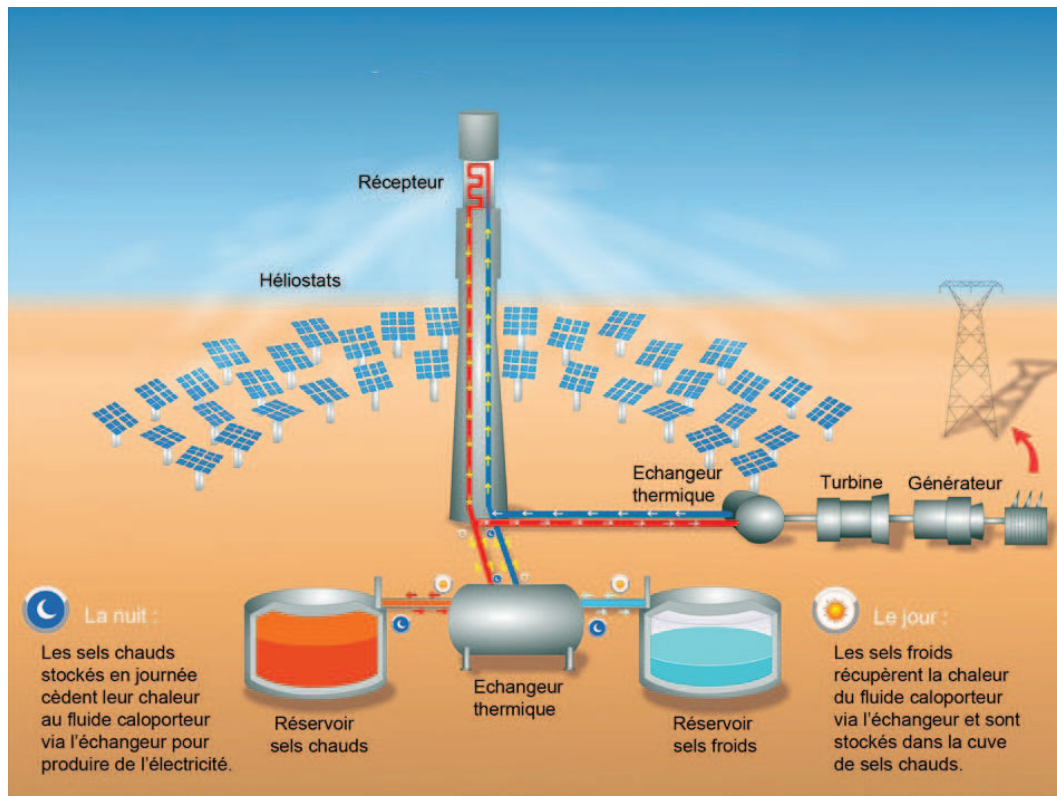


FIGURE 4.6 – Stockage par par chaleur sensible

L'élévation de la température d'un matériau permet de stocker de l'énergie. Ce principe est, entre autres, celui des chauffe-eau solaires : ils récupèrent la chaleur dans la journée pour la restituer ensuite, avec un rendement moyen de l'ordre de 40% pour les systèmes les plus récents. Les matériaux privilégiés sont l'eau, l'huile de synthèse, la roche ou encore le béton.

Pour de grands volumes, la chaleur de capteurs solaires ou des rejets industriels peut être stockée dans le sous-sol. Le stockage géologique, pouvant être couplé à des opérations de géothermie, est encore assez peu répandu.

4.6.2 Le stockage de chaleur par changement de phase

Ce mode de stockage est basé sur l'énergie mise en jeu lorsqu'un matériau change d'état (par exemple solide-liquide). C'est le cas, par exemple, de la paraffine dont la température de fusion est proche des 70 °C. La transformation inverse permet de libérer l'énergie accumulée sous forme de chaleur ou de froid, avec un rendement d'environ 60%. Cette technique peut être appliquée dans les bâtiments, par l'intermédiaire des Matériaux

à Changement de Phase (MCP). Incorporés aux parois, ils servent de régulateur thermique en fonction de la chaleur apportée par le soleil.

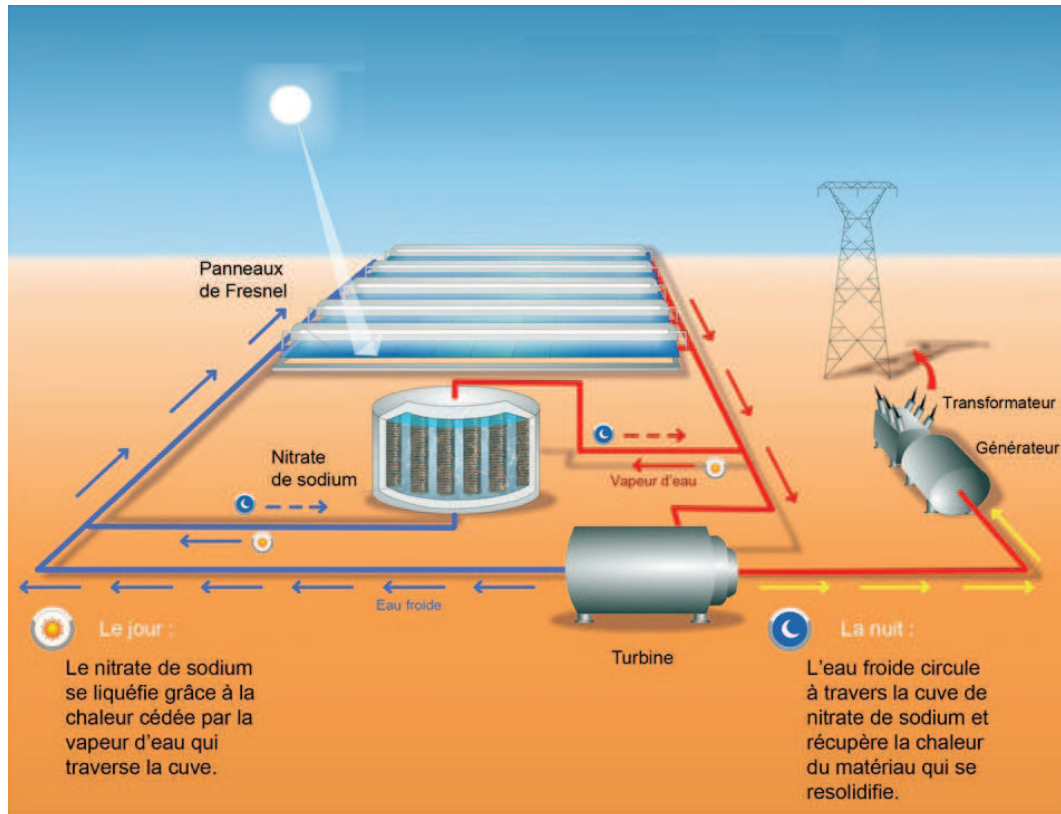


FIGURE 4.7 – Le stockage de chaleur par changement de phase

4.6.3 Le stockage de chaleur par réaction chimique

qui consiste en l'utilisation d'une réaction chimique réversible qui a besoin d'un apport de chaleur dans un sens (endothermique) et dégage de la chaleur dans le sens opposé (exothermique). Parmi les réactifs envisagés, la chaux. La chaleur apportée permet de l'assécher (c'est-à-dire retirer l'eau du mélange). La chaux sèche est ensuite conservée à l'abri de l'humidité. Lorsqu'elle est ré-humidifiée, se produit alors un dégagement de chaleur qui peut être utilisé notamment dans l'habitat. La stabilité de ce système peut permettre un stockage saisonnier.

Si certaines technologies, comme les STEP, sont aujourd'hui matures, la plupart des technologies existantes nécessitent encore des améliorations afin de les rendre plus efficaces et compétitives. En effet, certains des besoins identifiés aujourd'hui, comme la couverture en électricité lors des périodes de pointe de consommation, sont principalement comblés

par l'utilisation des énergies fossiles, émettrices de CO₂, dont le prix les rend encore attractives.

Les recherches sont donc essentielles pour :

- Trouver et utiliser des matériaux moins coûteux;
- Réduire la quantité de matériaux pour économiser les ressources naturelles;
- Pour les batteries, trouver des couples chimiques qui offrent de meilleures performances;
- Diminuer les pertes et donc augmenter le rendement;
- Anticiper sur les coûts d'installation et de maintenance.

L'impact environnemental est également une problématique à prendre en compte dans le choix de matériaux, dans l'encombrement de la technologie ou le lieu d'installation. Le développement de systèmes de gestion associés aux technologies de stockage est également déterminant. L'élaboration d'algorithmes permet notamment d'évaluer le système de stockage à associer à la production d'énergie et de simuler en temps réel le système combiné entre la production R et le système de stockage.

En combinant toutes les technologies de stockage de l'énergie envisagées ci-dessus il est possible, en théorie, de couvrir la majeure partie des besoins identifiés pour un mix énergétique intégrant une part importante d'énergies renouvelables. Mais la question du coût de construction de ces nouveaux équipements et de leur financement peut constituer un frein à leur développement.
