

Climat, environnement et économie circulaire | Stockage d'énergie

Décryptages

Le stockage de l’énergie consiste à préserver une quantité d’énergie produite pour une utilisation ultérieure.
L’idée est d’assurer l’équilibre entre la production et la consommation de l’énergie, de réduire les pertes et ainsi d’optimiser les coûts.

- Le stockage d'électricité
- Le stockage thermique



LE STOCKAGE D'ÉLECTRICITÉ

Pour accompagner l'essor des énergies renouvelables (solaire et éolien) dont la production est variable, non pilotable et décentralisée, **l'augmentation des capacités de stockage de l'électricité est une nécessité**. Mais il existe encore de nombreux obstacles techniques, réglementaires et économiques qui freinent le déploiement des nouvelles technologies de stockage. D'où des efforts importants de recherche engagés un peu partout dans le monde.

Qu'est-ce que le stockage d'électricité ?

Il faut distinguer deux systèmes de stockage :

- **le stockage stationnaire de l'électricité** : le stockage de l'électricité permet d'assurer l'équilibre entre production et consommation d'électricité sur les réseaux, et en particulier de **pallier la variabilité de la production des énergies renouvelables.** Le stockage permet, par exemple, de garder l'énergie produite en excédent à certaines périodes, pendant une journée très ensoleillée, pour la restituer en soirée. Le stockage permet aussi d'apporter l'énergie nécessaire lors de pics de consommation ou encore lors de défaillances du système d'approvisionnement.
  Ces systèmes de stockage sont de capacités variables (de quelques kW à plusieurs GW).

- **le stockage embarqué pour les applications mobiles** (batteries pour les véhicules, batteries de téléphone, etc.) : ces systèmes sont de plus petite capacité, de l'ordre du kWh.

Les puissances installées de stockage stationnaire dans le monde sont estimées à environ 180 GW, c'est-à-dire environ 3 % des puissances installées électriques mondiales. A titre de comparaison, la capacité éolienne totale installée a dépassé 651 GW en 2020 selon le GWEC.

La plupart du temps, l'énergie électrique n'est pas stockable directement. Celle-ci est transformée en une autre forme d'énergie qui sera stockée, puis récupérée et retransformée en électricité lors de son utilisation.

Le stockage mécanique

Les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP)

Ce système de stockage repose sur le principe de l'énergie gravitaire. Il existe environ 400 STEP, dont près de la moitié en Europe.

Les STEP représentent 97 % des capacités de stockage d'électricité connectées dans le monde. (source : *Electricity storage and renewables: cost and markets to 2030*, Irena, 2017)

Comment ça marche ?
Ce système, lié à l'énergie hydroélectrique, **fonctionne sur le principe de deux retenues d'eau à des hauteurs différentes et est souvent couplé avec un barrage**. Lorsque l'électricité est produite en excès, l'eau du bassin inférieur est pompée via une conduite forcée vers le bassin supérieur, qui devient un réceptacle d'énergie potentielle. Lorsque le besoin se fait ressentir, une partie du réservoir supérieur est vidée et, par gravité, l'eau passe dans une turbine qui produit l'électricité. C'est un système réversible qui associe pompe et turbine.

La STEP est une technologie mature qui nécessite néanmoins des installations conséquentes et un contexte géographique spécifique avec un dénivelé entre les deux réserves d'eau. Si les STEP ont été utilisées majoritairement pour apporter de la flexibilité dans la génération d'énergie classique (hydraulique et nucléaire), elles peuvent également être associées à de grandes installations d'énergies renouvelables ; notamment pour réguler et lisser la production de grosses fermes éoliennes via le creusement de bassins artificiels.

C'est ainsi le cas de la centrale de pompage turbinage hydroéolienne d'El Hierro dans les îles espagnoles des Canaries. Ici, l'énergie produite en surplus par les éoliennes permet de pomper l'eau du bassin inférieur vers le bassin supérieur et, en l'absence de vent, l'eau du bassin supérieur est relâchée et alimente des turbines hydrauliques pour produire de l'électricité. Les éoliennes et les turbines peuvent également produire de l'électricité en même temps pour gérer les pics de consommation.

Le stockage par air comprimé (CAES, *Compressed Air Energy Storage*)

Le stockage d’énergie par air comprimé existe industriellement depuis 1978 (centrale de Huntorf en Allemagne).

L'inconvénient majeur de ce système est lié aux grandes quantités de chaleur générées par la compression de l'air et aux besoins de réchauffage de cet air lorsqu'on le détend, avant qu'il n’entraîne la turbine de production d'électricité. Compte tenu des échanges énergétiques nécessaires au fonctionnement du système, le rendement d'une installation CAES classique est de l'ordre de 50 %.

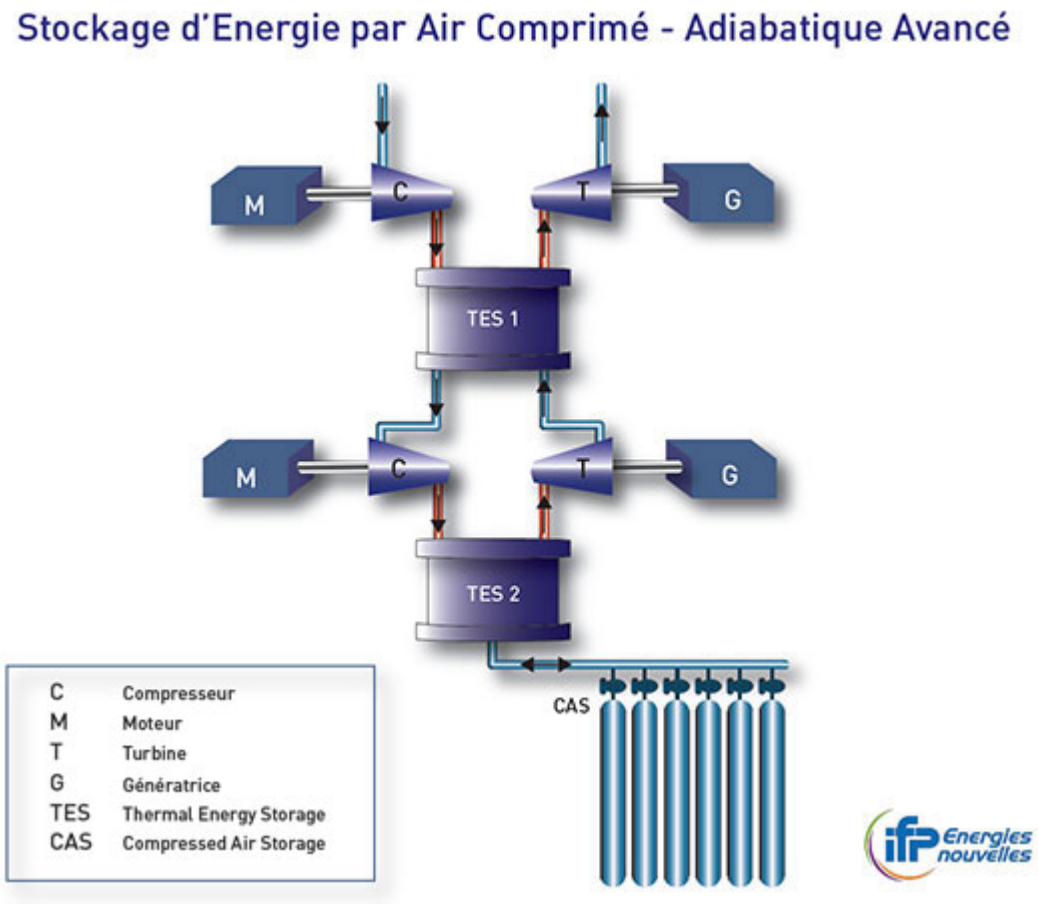
Comment ça marche ?
L'air est d'abord comprimé via un système de compresseurs, à très haute pression (70 à 150 bars) pour être stocké dans un réservoir (cavités souterraines par exemple). Pour récupérer cette énergie potentielle, l'air est détendu dans une turbine qui entraîne un alternateur. Comme l'air se réchauffe pendant sa compression, la chaleur à la sortie du compresseur peut être récupérée via des échangeurs et stockée afin d'être utilisée pour réchauffer l'air en entrée de la turbine.

Un concept plus évolué qui permet de stocker à la fois de l’air comprimé et de la chaleur est en cours de développement : l’***Advanced Adiabatic CAES (AA-CAES)***.

Définition
Un processus est dit adiabatique s’il n’y a pas d’échange de chaleur avec l’extérieur.

L’idée est de s’affranchir des deux phases de refroidissement et de réchauffement qui consomment de l’énergie extérieure. Ce concept a l’avantage de stocker la chaleur de la compression pour la restituer lors de la décompression et d’atteindre un rendement bien plus important (de l'ordre de 70 %). La construction d’une première plateforme de démonstration est l’objet du projet Adele en Allemagne.

L'air comprimé est généralement stocké dans un réservoir de surface ou dans des cavités salines souterraines, selon la capacité de stockage que l'on souhaite obtenir.
>> **En savoir plus**



Le stockage électrochimique : les batteries

De plus petite capacité (plusieurs centaines de kW, voire quelques dizaines de MW), **les batteries répondent aux besoins de l'électronique portable, des transports (voiture électrique) mais également de certaines applications de stockage stationnaire**. Les batteries peuvent, en effet, délivrer une puissance pendant quelques heures et résister à un certain nombre de cycles de charge/décharge.

Dans le cas du stockage stationnaire d'énergie, leur utilisation se situe plutôt à l'échelle locale (individuelle, bâtiment, petite collectivité) pour **l'autoconsommation photovoltaïque, les *microgrids* ainsi qu'en complément du développement des réseaux électriques dits intelligents**.

La mise en parallèle de plusieurs batteries peut permettre d'accéder à de grandes puissances et capacités de stockage.

Tesla a installé, en Australie, le plus grand système mondial de stockage d'énergies renouvelables sur batteries lithium-ion d'une puissance de 100 MW. Il est connecté à des fermes éoliennes permettant d'alimenter quelque 30000 foyers.

Comment ça marche ?
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, donnant lieu ainsi à une grande variété de batteries.

Batteries lithium-ion

Le fonctionnement de la batterie lithium-ion, actuel standard du marché, repose sur l'échange réversible de l'ion lithium entre une électrode positive et une électrode négative. Ces batteries équipent déjà plusieurs millions de véhicules électriques et hybrides rechargeables.
La R&D s'intensifie sur des batteries Li-ion stationnaires disposant d'une capacité compatible avec le stockage temporaire d'énergie renouvelable.

Batteries sodium pour stockage stationnaire

La R&D dans ce domaine est aujourd'hui en plein essor et les installations se multiplient, en particulier sur les systèmes sodium-soufre adaptés au stockage stationnaire. Dotées d'une grande capacité énergétiques et d'un excellent rendement, ces batteries fonctionnent à ce jour à haute température (de l'ordre de 300 °C) ce qui pose des problèmes, notamment de durée de vie.

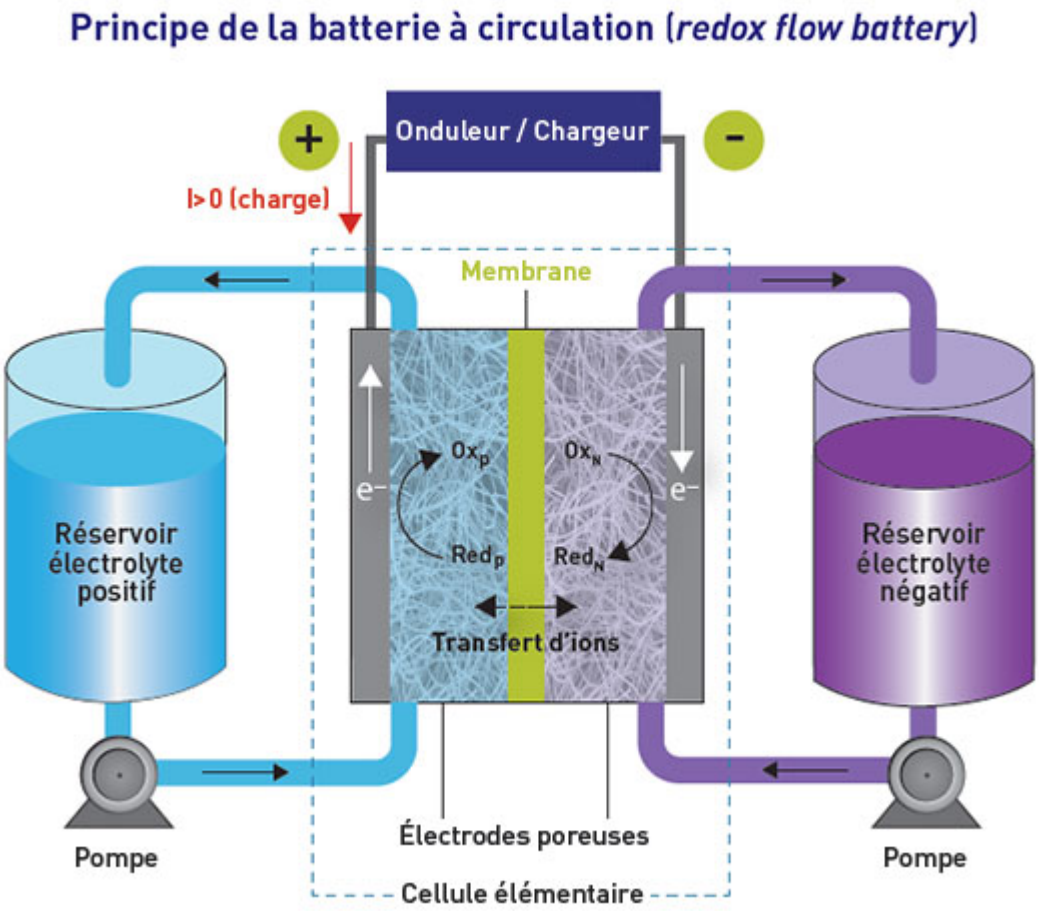
Batteries sodium-ion

Encore à l'état de prototype, ce type de batterie se rapproche de la batterie li-ion. Son principe est le même, mais ses composés diffèrent : au lieu du lithium, on utilise du sodium, mille fois plus abondant sur terre et donc nettement moins cher. Elle reste néanmoins moins énergétique que la batterie au lithium, mais paraît bien adaptée au stockage stationnaire.

Batteries à flux

Ces batteries permettent le stockage de l'énergie dans des liquides. Des couples électrochimiques sont solubilisés dans des électrolytes qui circulent à travers une cellule électrochimique séparée en deux compartiments par une membrane échangeuse d'ions. L'avantage de cette technologie réside dans sa modularité : on peut dimensionner indépendamment la puissance de la batterie (nombre d'électrolyseurs) et son énergie (quantité d'électrolytes). Cette technologie peut devenir économiquement rentable pour les temps de stockage longs et les grandes quantités d'énergie stockée. Les électrolytes peuvent également fonctionner comme liquides caloporteurs, facilitant ainsi la régulation de température, alors que les batteries conventionnelles dépendent d'une conduction passive de la chaleur, conduisant à des températures élevées à l'intérieur des cellules.
Plusieurs types de batteries à flux sont étudiées mais deux seulement sont commercialisées : **les batteries Zn-Br et les batteries à flux Vanadium (VFB).**

De nouvelles technologies de batterie à flux à base de molécules actives organiques solubles dans l'eau sont en développement au stade pilote et permettraient une baisse des coûts de cette technologie tout en utilisant des matières premières abondantes.



Le stockage chimique : l'hydrogène

En cas de surproduction (notamment s'il s'agit d'électricité produite à partir d'énergies renouvelables intermittentes), **l'électricité excédentaire peut servir à produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau**. Cet **hydrogène pourrait être stocké et reconverti en électricité** au moment du besoin, via une pile à combustible. Mais ce mode de valorisation implique des coûts très élevés de production de l'électricité. Il devra, de ce fait, trouver un modèle d'affaire adapté, et s'inscrire dans une vision plus large du déploiement de **l'hydrogène**.

À l'heure actuelle, plusieurs études portent sur des systèmes de stockage d'hydrogène de grande capacité (réservoirs de stockage tampon ou réservoirs souterrains) entre sources d'énergies renouvelables variables et réseaux électriques.

La **plateforme expérimentale** Myrte installée en Corse illustre ce principe : elle est constituée d'une centrale photovoltaïque d'une puissance installée de 560 kW reliée à un électrolyseur qui convertit l'électricité en hydrogène pendant les heures creuses ; cette énergie est ensuite restituée via une pile à combustible qui reconvertit l'hydrogène et l'oxygène en électricité pendant les heures de forte consommation.

Quel avenir pour le stockage d’électricité ?

Les technologies actuelles ont besoin d'améliorations significatives pour atteindre la compétitivité.

Les principaux sujets de recherche portent sur :

- les procédés de fabrication et de mise en œuvre,
- les matériaux (contenant et contenu),
- le rendement global, l'autodécharge et les pertes,
- la durée de vie et le vieillissement, la sécurité, la localisation et le lien avec le réseau (approche système),
- l’impact environnemental (émissions de gaz à effet de serre, polluants, déplétion des ressources naturelles, etc.),
- la gestion de l'énergie.

Aucun procédé n'apparaît aujourd’hui mieux positionné qu'un autre ; chacun peut répondre aux besoins locaux ou nationaux en fonction de plusieurs facteurs (technique, sécurité, localisation et proximité de la source d'énergie, surface d'encombrement, liaison avec le réseau en place, coûts d'investissement et de fonctionnement, etc.).

Pour un kWh d'électricité stocké, les **coûts actualisés du stockage,** ou **LCOS,** se situent aux environs de :

- 0,11 € pour les STEP,
- 0,12 € pour les technologies de CAES installées,
- 0,16 à 0,50 € pour les batteries lithium-ion.

Ces coûts sont donc encore élevés en comparaison des coûts européens de production d’électricité moyens de l'ordre de 0,05 à 0,07 €/ kWh pour une centrale à gaz naturel ou au charbon. Mais, au-delà de 2025, des techniques de stockage compétitives pourraient arriver à maturité.

Aujourd'hui, il n'existe pas de business model du stockage d'énergie, sauf pour les sites isolés.
Toutes les applications de stockage sont peu ou prou subventionnées (plus de 50 % aux États-Unis).

LE STOCKAGE THERMIQUE

Le stockage thermique concerne principalement le chauffage (stockage de chaleur) et la climatisation des bâtiments (stockage de froid), qui représentent près de 50 % de la consommation énergétique en Europe.

L’idée du stockage de chaleur est de recueillir la chaleur quand elle est disponible (l’été, le jour) pour la réutiliser quand on en a besoin (le soir, l’hiver). Ainsi, la chaleur des capteurs solaires et la chaleur perdue des équipements d'air conditionné peut être collectée pendant la saison chaude et être utilisée pour le chauffage quand elle est nécessaire, y compris pendant les mois d'hiver. Il est également

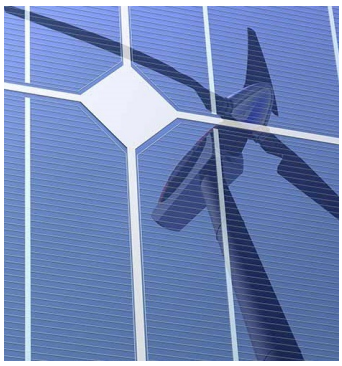
possible de stocker la chaleur perdue produite par certaines industries.

Tout matériau possède la capacité de libérer ou de stocker de la chaleur via un transfert thermique. Ce transfert peut être :

- par **chaleur sensible**, c'est-à-dire par changement de la température du matériau ; la chaleur est alors emmagasinée dans le matériau (la plupart du temps de l'eau). Le stockage sensible de grande capacité concerne surtout le stockage saisonnier en réservoirs (aquifères naturels, roches, etc.) ;
- par **chaleur latente**, c'est-à-dire par changement de phase du matériau, généralement changement solide/liquide d'un matériau pour lequel la variation volumique est faible. Il n'existe pas à ce jour d'installations de stockage de grande capacité basées sur ce principe mais de nombreux projets sont en cours.

Le stockage de chaleur peut aussi se faire par voie thermochimique (ou **sorption**) via des procédés mettant en œuvre des réactions chimiques réversibles qui permettent de séparer un produit sous l'effet d'une source de chaleur. Les deux (ou plus) composants sont alors stockés séparément sans perte thermique et la chaleur est restituée lorsqu'ils sont remis en présence en reformant le produit initial. Les procédés mis en œuvre ici sont plus complexes mais des applications existent pour la climatisation des bâtiments.

Une autre voie en cours d'étude est le **stockage de chaleur lié aux centrales solaires thermodynamiques**, qui consiste à concentrer le rayonnement solaire sur un récepteur permettant de chauffer à haute température un fluide caloporteur (qui transporte la chaleur) qui, directement ou après stockage, va activer un générateur d'électricité via une turbine. L’Espagne possède les quatre plus grandes centrales thermodynamiques solaires européennes, Solaben, Solnova, Andasol et Extresol qui totalisent une puissance de 650 MW. Andasol et Extresol disposent de réservoirs contenant des sels fondus qui peuvent stocker plus de 1010 MWh de chaleur, ce qui permet ensuite de faire fonctionner des turbines à pleine puissance pendant 7h30.



IFPEN :
Nos expertises > Stockage d'énergie



Recherche fondamentale

Actualités septembre 2017

Stocker de l’électricité, comment ça marche ?

Notes de conjoncture



IFPEN

Actualités janvier 2025

Réseaux électriques et stockage : IFPEN classé 9e mondial pour ses innovations

Énergies renouvelables | Stockage d'énergie

Le stockage d’énergie : accompagner le déploiement des énergies renouvelables

Lien vers la page web :