

<https://cdurable.info/Stockage-de-l-electricite-ou-en-est-on.html>



Décryptage - N° 33

# Stockage de l'électricité : où en est-on ?

- Education au DD -



Date de mise en ligne : lundi 21 décembre 2020

"Stockage de l'électricité : où en est-on?"  
Décembre 2020

---

Copyright © CDURABLE.info l'essentiel du développement durable - Tous droits réservés

---

**Avec le déploiement des sources d'électricité renouvelables telles que le solaire ou l'éolien, le réseau d'électricité fait face à de nouvelles problématiques. En effet, l'équilibre entre l'offre et la demande sur le réseau n'est pas systématiquement assuré du fait de l'intermittence de ces sources d'électricité. Le stockage de l'électricité est donc un enjeu majeur. Le décryptage « Stockage de l'électricité : où en est-on ? » fait le point sur les différentes solutions de stockage et revient sur les avantages et les inconvénients de chaque technologie ainsi que sur leur stade de développement.**

## Table des matières

- [Introduction](#)
- [I. L'enjeu grandissant du stockage électrique](#)
- [II. Les technologies de stockage et leurs perspectives de développement](#)
- [III. Les enjeux économiques et environnementaux du stockage](#)
- [Conclusion](#)
- [Notes](#)

>



## Introduction

L'énergie peut provenir de diverses ressources, et prendre différentes formes (électricité, chaleur, gaz, carburant...). Tous les vecteurs énergétiques n'ont pas la même capacité de stockage. Le gaz se stocke mieux que de l'électricité mais moins bien que du bois ou du pétrole. Si la question du stockage est prégnante dans tous les secteurs énergétiques, elle est particulièrement structurante pour l'électricité, dont l'avenir est bouleversé par le développement de productions décentralisées. Le courant électrique est une forme d'énergie particulièrement pratique, qui a permis l'avènement de la seconde révolution industrielle. Convertie en électricité à partir d'une source d'énergie le plus souvent fossile (charbon, gaz), nucléaire ou hydraulique, l'électricité est transportée via un réseau électrique, jusqu'aux différents consommateurs. Le principal enjeu du réseau électrique est qu'à chaque instant, pour assurer sa stabilité, la quantité d'électricité injectée (produite) doit être égale à la quantité d'électricité soutirée (consommée). L'équilibre du réseau n'est pas une problématique nouvelle, mais elle s'accroît avec des sources d'électricité renouvelables variables, comme le solaire et l'éolien. Actuellement en France, les principales sources de production sont en grande majorité pilotables (nucléaire à 72%, hydraulique 12%, gaz 6,6%), cependant elles le sont avec un temps de réaction varié (une centrale nucléaire ne se met pas en route en une minute). Pour sa part la consommation peut varier aussi. Face à ce besoin d'équilibre du réseau électrique, le stockage de l'électricité vient apporter une solution pour équilibrer une insuffisance ou un trop-plein de production. Il convient donc d'explorer le rôle, les technologies et les enjeux du stockage pour un système électrique aux ressources renouvelables variables.

# I. L'enjeu grandissant du stockage électrique

Comment chacun le sait, l'électricité est un flux distribué par un réseau où l'offre et la demande s'équilibrent en permanence. Son stockage permet de conserver une quantité produite, lorsque la production est supérieure à la demande, pour la restituer à un autre moment, lorsque la production est inférieure à la demande. Cette notion de temps est très importante lorsque l'on parle du stockage : c'est principalement le "temps de conservation" de l'énergie entre le moment où elle arrive (en cas de surplus de production) et où elle repart (trop plein de consommation) qui détermine la technologie de stockage la plus adéquate. Pour conserver cette quantité d'énergie qui arrive sous forme d'électricité, celle-ci va être convertie sous une autre forme d'énergie, selon les diverses technologies disponibles, en fonction des besoins. Deux raisons expliquent que cet enjeu de stockage soit de plus en plus important.

## A. L'évolution du mix électrique

On entend de plus en plus parler de stockage dans le monde, et en France en raison de l'évolution du mix électrique avec l'intégration de nouvelles sources d'électricité. A l'échelle mondiale, la lutte contre le dérèglement climatique impose de réduire drastiquement la part de l'électricité carbonée : la moitié de l'électricité mondiale est produite par la combustion de charbon et un quart par la combustion du gaz naturel, deux sources d'énergie dont il faut se passer pour limiter le dérèglement climatique<sup>[1]</sup>.

A l'échelle de la France, c'est plutôt une politique de réduction de la production nucléaire qui fait évoluer ce mix électrique (les énergies fossiles n'étant à l'origine que de 8,6% de notre électricité, contre 72% d'énergie nucléaire<sup>[2]</sup>). Ainsi le mix électrique français évolue, avec l'intégration croissante de ressources d'énergies issues du vent et du soleil, converties en électricité par des éoliennes et des panneaux photovoltaïques. Ces sources d'énergies présentent des particularités, notamment la temporalité de leur production : il n'y a pas de soleil la nuit, il peut ne pas y avoir de vent pendant plusieurs jours de suite et il y a moins de soleil et plus de vent l'hiver que l'été. Lorsque la proportion des ENR dans le mix énergétique reste limitée, comme c'est le cas aujourd'hui en France (moins de 20%), les techniques d'optimisation des réseaux permettent de faire face à cette intermittence sans trop de difficultés.

Stockage installé (GW) en fonction du taux d'EnR



Source : ADEME

Mais quel que soit le scénario énergétique, le 100 % ENR visé par le scénario négaWatt, ou encore une part de nucléaire réduite à 50 % comme envisagé pour la France dans le scénario de la programmation pluriannuelle de l'énergie de l'Etat, la part de l'électricité photovoltaïque et éolienne est appelée à croître fortement. Trois types de besoins de stockage différents existent :

- **Infra-journalier** sur la journée (plutôt pour le photovoltaïque) ;
- **Hebdomadaire** sur une semaine ou plusieurs jours (plutôt pour l'éolien) ;

- **Saisonnier** sur plusieurs mois (plutôt pour le photovoltaïque).

### B. L'évolution des usages

Une seconde raison, moins importante, concerne l'autre côté de l'équation d'équilibre électrique : la consommation et les nouveaux usages (ex : la climatisation et les véhicules électriques viennent augmenter les besoins tandis que la désindustrialisation et la baisse des besoins de chauffage peuvent les diminuer). Au global, les scénarios se basent sur une tendance d'une consommation électrique constante, mais c'est la saisonnalité qui est amenée à évoluer : un report des consommations de chauffage vers des consommations de climatisation, ce qui décale sensiblement les moments de tension sur l'offre ou sur la demande.

Les usages entraînent une évolution des besoins en électricité, mais aussi une modification de la structure du réseau : la production électrique tend à se décentraliser, des systèmes d'autoconsommation se mettent en place... Cette nouvelle organisation du réseau électrique justifie le recours à des nouveaux dispositifs de stockage pour les consommateurs. Ainsi, avec le développement de l'autoconsommation individuelle et collective, on constate un important recours aux solutions de stockage, par batterie notamment, permettant ainsi d'utiliser l'excédent de production de la journée aux heures de plus grande consommation. Au niveau mondial, les chiffres de l'Agence internationale de l'énergie montrent une explosion du recours aux batteries placées derrière le compteur : rien qu'entre 2017 et 2018, la capacité installée dans l'année est passée de 0,9 GW à 1,8 GW.

## II. Les technologies de stockage et leurs perspectives de développement

Différentes technologies de stockage coexistent, avec des caractéristiques différentes qui font qu'elles ne répondent pas aux mêmes besoins. Les cinq principales technologies de stockage sont résumées dans le tableau ci-dessous<sup>[3]</sup>

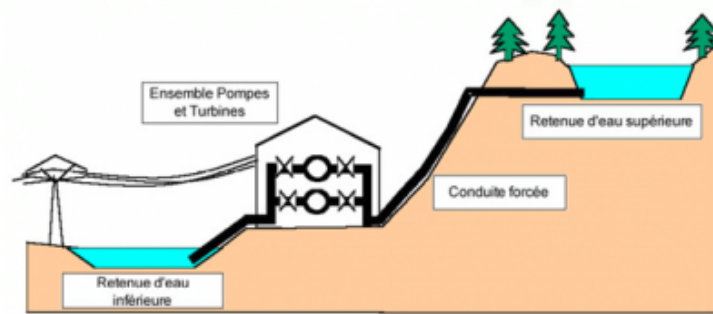
	Forme d'énergie	Efficacité énergétique	Temps de réactivité	Temps de stockage	Capacité de stock (puissance)
<b>Station de transfert d'énergie par pompage</b>	Énergie potentielle de pesanteur (énergie sera produite lorsque l'eau coulera, au travers d'une turbine)	~80% (technologie mature, pas d'évolution à prévoir)	10 min	Des heures à des mois (l'eau peut rester plusieurs mois stockée dans un bassin avec très peu de pertes)	Jusqu'à 10 GWh = consommation résidentielle d'élect de 100 000 habitant pendant 15 jours (ju 2 GW)
<b>Stockage d'énergie par air comprimé</b>	Énergie mécanique potentielle de l'air (pression de l'air qui sera relâchée)	~ 40% à 50% (Rendement à optimiser : perte d'énergie sous forme de chaleur lors de la compression de l'air)	1 min	Des heures à des mois (les pertes sont assez faibles)	Jusqu'à 10 GWh = consommation résidentielle d'élect de 100 000 habitant pendant 15 jours (ju 200 MW)
<b>Volant d'inertie</b>	Énergie cinétique (mouvement de rotation)	~ 80% pour un cycle de charge-décharge dans un temps court (quelques minutes)	5 ms	Court (quelques minutes)	Jusqu'à 10 kWh = consommation résidentielle d'élect de moins de 2 habit pendant 1 jour (jusq 40 MW)
<b>Batteries</b>	Énergie chimique	~ 70 à 80%	1 ms	De la journée à la semaine	Jusqu'à 10 MWh = consommation résidentielle d'élect de 1600 habitants pendant 1 jour (jusq 10 MW)
<b>Power to gas - hydrogène</b>	Énergie chimique	~30% pour l'hydrogène ; ~25% pour l'ammoniac ou le méthane de	100 ms	Long (plusieurs mois)	Jusqu'à 10 GWh = consommation résidentielle d'élect de 100 000 habitant

Leurs perspectives de développement peuvent s'analyser à partir des données de différentes études et scénarios publiés récemment<sup>[4]</sup>.

## Stockage de l'électricité : où en est-on ?

La technologie actuellement dominante repose sur les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP). C'est la solution pratiquement toujours employée dans le monde pour stocker l'énergie des centrales électriques. Mais son potentiel de développement en France est limité notamment par les sites nécessaires à son installation (développement prévu dans la PPE de 1,5 GW).

Fonctionnement d'une installation de stockage gravitaire



Le stockage d'énergie par air comprimé (CAES) permet un stockage d'assez grande puissance et d'assez grandes quantités d'énergie sur plusieurs semaines. Mais son potentiel de développement est là aussi limité par les sites nécessaires à son installation[5]. La technologie du volant d'inertie est mature, mais ne permet qu'un temps de stockage très court et une quantité d'énergie stockée limitée. Notre pays n'a pas identifié le besoin de recourir aux volants d'inertie ou à l'air comprimé à l'horizon de la PPE (2028), mais elle reconnaît le potentiel des volants d'inertie comme une solution si la part des énergies renouvelables s'accroît considérablement. C'est aussi la conclusion du scénario négaWatt.

Deux technologies ont en revanche un fort potentiel.

### ▶ A. Les batteries

Elles répondent actuellement à un besoin de stockage de durée assez courte (plusieurs heures à quelques jours) pour des puissances et des quantités d'énergie faibles à moyennes. Leur principal inconvénient est lié à leur durée de vie, limitée par les dégradations chimiques des réactions et leur coût.

Certaines technologies de batteries sont matures : batteries lithium ion, sodium soufre, plomb acide, nickel cadmium. De nombreuses nouvelles formes de batteries sont en cours de développement : celles où le lithium est remplacé par un autre alcalin, les batteries organiques... et il est difficile de prédire lesquelles trouveront un marché.

Différents concepts permettent de développer le stockage par batteries, individuelles pour optimiser le taux d'autoconsommation ou garantir la stabilité de l'alimentation, mutualisées (entre lignes de transport, ou par des batteries de véhicules électriques à l'arrêt).

Cette dernière technologie, dénommée *vehicle to grid* (V2G)[6], semble prometteuse sur des usages de flexibilité journalière et de nombreuses expérimentations sont en cours. Mais il faut attendre que le parc de véhicules électriques soit suffisamment important pour pouvoir en déduire des coûts fiables et des modèles d'affaires. Ce système se basant sur les véhicules est en effet dépendant du nombre de voitures électriques du parc, de leur disponibilité par rapport aux usages futurs de la voiture, des infrastructures de charge appropriées, de la définition d'un modèle économique pérenne, d'une gouvernance et d'une gestion encore à trouver.

La PPE reconnaît l'importance pour la France de développer les batteries, au nom d'une politique industrielle, de l'importance de la décarbonation du secteur des transports et du rôle qu'elles peuvent jouer dans l'équilibre du réseau. Trois axes de développement sont identifiés : les lignes virtuelles proposées par RTE, les batteries derrière le compteur chez les particuliers et les voitures électriques (3 000 000 de véhicules électriques anticipés en 2028). NégaWatt dans une vision plus politique, compte sur les batteries comme une solution de stockage au même titre que l'air comprimé mais sans les présenter comme une solution miracle, et entrevoit, pour la mobilité électrique un développement "raisonné".

### B. Le Power to gas et l'hydrogène

On utilise l'électricité convertie à un instant donné, par une source non pilotable telle que le vent ou le soleil, pour fabriquer un gaz de synthèse. Ce gaz aura diverses applications par la suite, dont la possibilité d'être brûlé dans une centrale thermique pour être converti en électricité. Ce procédé permet par exemple de synthétiser de l'hydrogène. A noter qu'actuellement, l'hydrogène issu de l'hydrolyse de l'eau à partir d'électricité renouvelable est largement minoritaire par rapport à l'hydrogène issu de vaporeformage de gaz naturel fossile. L'hydrogène ainsi produit peut alors être valorisé de différentes manières :

- Être injecté dans les réseaux de gaz naturel en l'état (dans une limite d'environ 20%) ou après avoir été associé à du CO<sub>2</sub> pour le convertir en méthane de synthèse (méthanation) ;
- Alimenter des véhicules à hydrogène ;
- Être consommé à des fins industrielles ;
- Être converti nouvellement en électricité via une pile à combustible à un moment de plus forte demande. Seul ce dernier usage restitue de l'énergie sous forme d'électricité.[\[7\]](#)

Le stockage sous forme d'hydrogène est une technologie au stade de démonstrateur. Des recherches sont en cours pour augmenter le rendement énergétique en récupérant la chaleur perdue mais la restitution sous forme d'électricité reste faible (de 30% à 50%). Sa réactivité permet de l'identifier comme une technologie adéquate pour faciliter l'intégration des ENR non pilotables.

A horizon 2035, l'ADEME évalue le potentiel d'hydrogène produit à partir d'électricité en France en ayant recours au *Power to Gas* à environ 30 TWh par an.[\[8\]](#) Le scénario négaWatt accorde beaucoup d'importance à la complémentarité des réseaux *Power to gas* et à la production d'hydrogène à des fins de méthanation[\[9\]](#).

Enfin, la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie vise d'atteindre 10 à 100 MW de démonstrateurs *Power to gas* en 2028. La PPE mentionne que "par rapport à d'autres solutions de stockage telles que les batteries, l'hydrogène est actuellement le moyen de stockage passif inter-saisonnier le plus prometteur" mais précise que "le besoin de mettre en oeuvre du *Power to gas* à grande échelle n'apparaîtra vraisemblablement pas en France avant 2035".

## III. Les enjeux économiques et environnementaux du stockage

Le rôle du stockage dans la transition énergétique, et des différents solutions existantes ou prochaines va dépendre principalement de leur compétitivité et de leur impact sur l'environnement.

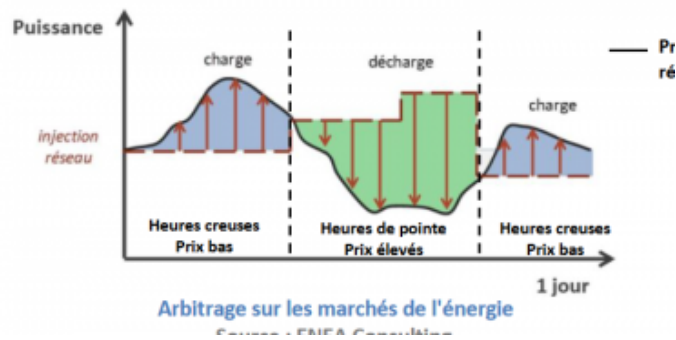
### A. Le coût et la compétitivité des solutions de stockage

#### 1) Le calcul du coût du stockage et le modèle économique

La compétitivité estimée du stockage dépend du calcul de son coût, et de la valeur du besoin qu'il satisfait. Or, le calcul du coût du stockage est une question complexe : selon l'approche la plus utilisée du Levelized Cost of Storage (LCOS)[\[10\]](#), il dépend des coûts d'investissement (CAPEX), des coûts de maintenance (OPEX), des coûts de recharge, de la profondeur de décharge[\[11\]](#), de la valeur résiduelle et des charges financières[\[12\]](#). Les quantités d'énergie stockée et injectée doivent en outre être mises en perspective de la fréquence et de la valeur du service fourni au système énergétique à un moment précis (tous les jours, quelques fois par an...). Par exemple, le coût de 350 \$ / Mwh des batteries Li-Ion est relativement compétitif lorsqu'il est rapporté à l'utilisation fréquente pour l'autoconsommation individuelle (usage infra-journalier), mais ce n'est pas le cas d'autres technologies de stockage

## Stockage de l'électricité : où en est-on ?

qui pourraient n'être sollicitée que quelques heures dans l'année, comme le stockage d'énergie par air comprimé.



Selon un rapport du Conseil général de l'économie, le caractère variable d'une production d'électricité diminue la valeur systémique de cette électricité [13], qui peut être parfois trop abondante ou insuffisante par rapport à la demande. Au-delà de l'optimisation de la gestion du réseau, le stockage permet de compenser la sur- ou la sous-production : il absorbe le surplus de production pour le redistribuer lorsqu'il y en a besoin, pour éviter le lancement de centrales d'appoint, généralement fortement émettrices de CO<sub>2</sub> (au charbon ou au gaz), pendant les pointes de consommation, et pour s'assurer que l'équilibre offre-demande soit maintenu.

Lors des pointes de consommation, le stockage permet de **réguler les fluctuations des prix indexés sur les variations de l'offre et de la demande**. En effet, en fonction de la quantité d'électricité produite à un instant  $t$  sur le marché européen, la loi de l'offre et de la demande s'applique : quand la production est supérieure à la demande, le prix est moins élevé, tandis que lorsque la demande est plus forte que l'offre, le prix de vente augmente. Mais ce service a un coût supplémentaire en comparaison à la production d'énergie stable, voire pilotable, des centrales électriques conventionnelles. Ainsi le stockage de l'électricité peut permettre de stocker lors d'un afflux de production électrique pour revendre plus tard.

Une installation d'électricité issue d'une ressource renouvelable variable combiné à un dispositif de stockage apportera plus de stabilité pour le réseau, et permettra d'optimiser aussi l'injection, donc le prix de vente de cette énergie, au moment où c'est le plus intéressant. De même, combiné à une consommation sur site, comme dans le cas de l'autoconsommation, le système de stockage va réduire l'utilisation du réseau, pour lisser son utilisation et prévenir un éventuel changement de tension, ou renforcement coûteux du réseau électrique.

### 2) Les batteries lithium-ion et l'hydrogène, des solutions qui s'imposent à l'horizon 2040

Les coûts se réduisent pour certaines nouvelles solutions de stockage, comme les batteries Lithium-Ion, ces dernières étant principalement employées pour des systèmes d'autoconsommation, de smart grid, et dans les véhicules électriques. En 15 ans, les commandes de batteries Lithium-Ion sont passées dans le monde de moins de 1 GWh à plus de 350 GWh, avec une croissance exponentielle [14], souvent comparée à celle du développement du photovoltaïque.

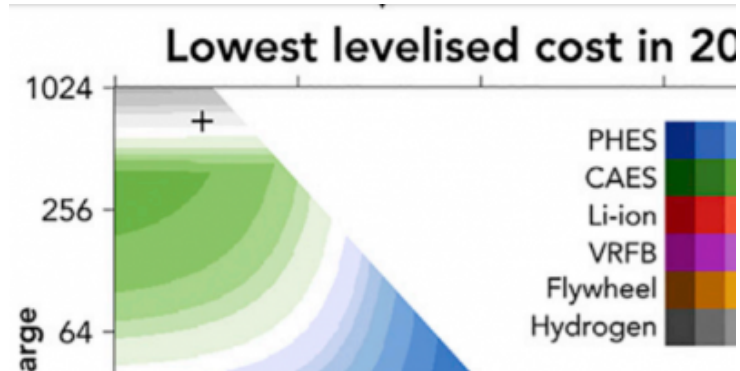


## Stockage de l'électricité : où en est-on ?

Les différentes technologies de stockage satisfont différents besoins, en fonction de leur rapidité d'activation, de la durée du stockage et de leur profondeur de décharge. Ces différents services peuvent donc avoir une valeur différente, et plusieurs technologies se concurrencent sur les mêmes créneaux de services.

Dans une étude de 2019[15], Olivier Schmidt de l'Imperial College of London s'est intéressé aux coûts (LCOS) comparés actuels et futurs des principaux systèmes de stockage. Au travers des graphiques suivants, il présente la technologie la plus compétitive, parmi les suivantes : stations de pompage turbinage (PHES bleu dans le graphique), air comprimé (CAES vert), batteries Li-Ion (Li-Ion rouge), batteries redox à flux circulant (VRFB violet), volant d'inertie (Flywheel orange), hydrogène (Hydrogen noir), en fonction du nombre de décharges annuelles (fréquence d'utilisation) et de leur capacité de stockage en heures.

Chaque croix indiquée sur le graphique correspond à l'un des 12 usages identifiés dans l'article (gestion des pointes, renforcement réseau, compensation variabilité EnR...). Le blanchissement des nuances des couleurs indique le rapprochement de la seconde technologie la moins chère en coût comparé.



A l'horizon 2040 et au-delà, **il est en revanche manifeste que les batteries Lithium-Ion et l'hydrogène joueront un rôle central dans les services de stockage** : d'après le graphique, les batteries et l'hydrogène répondent à la grande majorité des usages identifiés (11 usages sur les 12 identifiés).

### B. L'impact environnemental du stockage

De la production, à l'installation, en passant par le recyclage, l'impact environnemental du stockage est important.

L'extraction de terres rares[16] et de matériaux critiques[17], pour les batteries notamment, est polluante et consommateur d'eau. Par exemple pour les batteries, les verres contiennent généralement une quantité non négligeable de lithium et les céramiques utilisent typiquement du lanthane ou du germanium qui sont des matériaux rares.

L'industrie européenne est très dépendante de certains pays qui contrôlent les gisements : la Chine et le Congo pour le cobalt. En avril 2020, la Commission européenne a même inclus le lithium dans la liste des matériaux critiques dont l'importation est à surveiller car cruciale à l'industrie automobile européenne[18]. La production de batteries est en outre friande en espace, en énergie et en eau : en Allemagne, la Gigafactory de Tesla nécessite le défrichage de plus de 150 hectares de forêt, et impacte fortement la biodiversité[19] et les ressources en eau. Comme l'impact énergétique de la production de batteries dépend fortement des mix de pays, une relocalisation en Europe pourrait permettre d'internaliser ces coûts et de réduire aussi cet impact, compte tenu des réglementations environnementales plus strictes.

Les batteries sont pleines de métaux lourds et produits chimiques (plomb, mercure...) qui pose des risques de contamination des sols et pollution de l'environnement. Il est donc essentiel de structurer rapidement une filière de recyclage. Sur un continent européen qui manque de ressources naturelles, l'enjeu du recyclage pourrait aussi permettre de relocaliser les industries de batteries et sécuriser une part de l'approvisionnement, mais il se heurte aujourd'hui à des contraintes techniques et économiques importantes[20].

D'autres technologies, comme le stockage à air comprimé et les STEP, peuvent avoir un impact non négligeable sur



l'environnement en déstabilisant les éléments naturels (lacs, gisements épuisés de gaz) et requièrent une forte intervention sur les espaces naturels.

Ainsi, comme toute technologie, le stockage implique la fabrication d'équipements issus de ressources terrestres et le rejet de pollutions dans l'environnement. En fonction des choix industriels et réglementations mis en oeuvre, l'impact peut être maîtrisé pour ne pas entacher la production d'électricité renouvelable à laquelle le stockage est associé.

## Conclusion

Différentes technologies de stockage de l'électricité existent, à des stades plus ou moins matures, et répondent à des besoins multiples liés à ces ressources variables : stockage infra-journalier, stockage hebdomadaire et stockage saisonnier. Pour les premières catégories, les batteries semblent plus prometteuses, en particulier lithium-ion à court terme, et d'autres en cours de développement, tandis que l'hydrogène conviendrait à un stockage de plus long terme en complément des stations hydroélectrique de pompage déjà présentes en France. En plus de l'apport dans l'équilibrage du réseau électrique, le stockage peut trouver une pertinence particulière dans les zones non-interconnectées.

Bien qu'aujourd'hui associées à un système de production électrique vertueux au regard de ses impacts carbone et environnementaux, un développement massif des ENR électriques nécessitant du stockage implique des coûts supplémentaires et des impacts sur les ressources et l'environnement qui doivent être intégrés pour bâtir un système électrique renouvelable.

Le développement de filières de stockage amène, comme toute filière industrielle, un travail sur le modèle économique et la minimisation des impacts environnementaux et sociétaux. En Europe, les perspectives de création de filières de stockage, avec notamment la création d'un "Airbus des batteries" (sous l'impulsion de la France, l'Allemagne, et la Banque européenne d'investissement), devront aboutir à une alternative durable et performante, capable de rivaliser les concurrents asiatiques et américains.

Cependant, le stockage est une technologie qui se situe au coeur du système électrique dans son ensemble : incluant les producteurs, les gestionnaires de réseaux, les consommateurs, et les différentes parties prenantes autour de la régulation de ce système. Ainsi le stockage doit être remis dans ce contexte où d'autres pistes ne sont pas à négliger. La réduction de la consommation électrique par des économies d'énergie dans l'industrie et chez les ménages, et par le changement de vecteur énergétique (ex : remplacer l'électricité pour le chauffage par des réseaux de chaleur alimentés au bois-énergie) peut réduire le besoin de stockage. Il est aussi possible de prévoir une meilleure adéquation entre les consommations et la production en temps réel en favorisant la flexibilité à l'injection et au soutirage, via des solutions économiques (sur le prix de l'électricité) ou technologiques (smart grids et compteurs communicants). L'investissement dans le réseau électrique pour de nouvelles lignes, ou un renforcement des capacités existantes représente une alternative au renforcement des capacités de stockage.

Les enjeux du stockage, qu'ils soient techniques, économiques ou environnementaux, dépassent le périmètre d'action des gestionnaires de réseaux. Les choix de politique énergétique à l'échelle nationale peuvent influencer le développement du stockage, par l'impulsion de filières industrielles de production et de recyclage par exemple.

Le développement du stockage va de pair avec une évolution du rôle des consommateurs, qui sont amenés à produire de l'énergie, auto-consommer (individuellement ou collectivement), restreindre leur consommation, fournir des services de stockage de l'énergie (*vehicle to grid*), etc. Les modèles économiques et des cadres réglementaires

autour de ces actions de régulation du réseau électrique restent ainsi à définir pour conserver la stabilité du réseau.

## Notes

- ▶ [1] Données monde, 2017, International Energy Agency <https://www.iea.org/sankey/>
- ▶ [2] Données France, 2016, RTE\_ <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/mix-energetique-de-la-france>
- ▶ [3] Le détail de chacune de ces technologies est présenté en annexe.
- ▶ [4] Il s'agit notamment de [l'étude de l'ADEME sur le mix 100% ENR](#), du scénario négaWatt 100% ENR [et des indications contenues dans la Programmation Pluriannuelle de l'énergie - la stratégie énergétique de la France.](#)
- ▶ [5] Caractéristiques des différentes technologies de stockage :
  - [https://www.uarga.org/downloads/Documentation/stockage\\_electricite\\_ara\\_03\\_2016\\_log.pdf](https://www.uarga.org/downloads/Documentation/stockage_electricite_ara_03_2016_log.pdf)
  - <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=stockage-technologies>
  - <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=stockage-comparaison>
  - <https://ufe-electricite.fr/IMG/pdf/18.pdf>
- ▶ [6] Ou *vehicle to home* (V2H) quand l'électricité, au lieu d'être injectée sur le réseau, peut directement alimenter les ménages propriétaires des voitures électriques.
- ▶ [7] <https://www.connaissancedesenergies.org/stockage-delectricite-quappelle-t-le-power-gas-170908>
- ▶ [8] <https://www.engie.com/activites/infrastructures/power-to-gaz>
- ▶ [9] [https://negawatt.org/IMG/pdf/scenario-negawatt\\_2017-2050\\_hypotheses-et-resultats.pdf](https://negawatt.org/IMG/pdf/scenario-negawatt_2017-2050_hypotheses-et-resultats.pdf)
- ▶ [10] Le Levelized Cost Of Storage (LCOS) est la somme des coûts actualisés sur le cycle de vie de l'unité de stockage d'énergie, divisée par la somme de l'énergie restituée actualisée sur le cycle de vie.
- ▶ [11] La profondeur de décharge est la quantité d'énergie qui a été déchargée de la batterie. Elle est ici basée sur une utilisation optimale de la batterie pour une plus longue durée de vie.
- ▶ [12] <https://www.apricum-group.com/how-to-determine-meaningful-comparable-costs-of-energy-storage/>
- ▶ [13] Le stockage stationnaire de l'électricité, Conseil général de l'économie, mars 2020
- ▶ [14] How a battery can lead a quiet revolution, Bullard, BNEF, 2019 <https://about.bnef.com/blog/bullard-how-a-battery-can-lead-a-quiet-revolution/>
- ▶ [15] Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies, Schmidt et al., Joule 3, 81-100 January 16, 2019 <sup>a</sup> 2018 Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.12.008>
- ▶ [16] Matériaux dont les particularités chimiques en font un élément central aux nouvelles technologies et à la transition énergétique
- ▶ [17] Matériaux dont la criticité pour certaines industries et les risques pesant sur son approvisionnement en font des enjeux géopolitiques fondamentaux
- ▶ [18] <https://www.euractiv.com/section/batteries/news/lithium-tipped-for-eu-list-of-critical-raw-materials/>
- ▶ [19] <https://www.lesnumeriques.com/voiture/la-tesla-gigafactory-4-critiquee-en-allemande-pour-son-impact-environnemental-n146283.html>
- ▶ [20] Note technique Terres Rares, Energies Renouvelables Et Stockage D'énergie, ADEME, 2019

*Post-scriptum :*

## Le projet

Créée en 2013, La Fabrique Ecologique, Fondation pluraliste de l'écologie, est un Think et Do-Tank qui a pour

objectif de promouvoir l'écologie et le développement durable sur la base de propositions pragmatiques et concrètes.

Présidée par Géraud Guibert, elle est animée et soutenue par de nombreuses et très diverses personnalités de toutes générations (responsables d'entreprise et d'ONG, universitaires, syndicalistes, parlementaires et anciens ministres de l'écologie de tous bords politiques, ...). Elle est financée, en majeure partie, par du mécénat, en toute transparence et en s'appuyant sur une charte éthique garantissant son indépendance intellectuelle et sa liberté d'action.

Avec de nombreuses publications sur des sujets divers et un réseau de près de 800 experts répertoriés et actifs, ses travaux sont reconnus comme particulièrement sérieux et innovants : dans le baromètre annuel des think-tanks réalisé par l'Institut Think, La Fabrique Ecologique est sur la première marche du podium pour la qualité de ses travaux et sa transparence.

Les travaux s'articulent autour de six principes forts :

▶ Une rigueur scientifique irréprochable

Sous la caution de son conseil d'orientation et de son réseau d'experts représentant l'excellence dans leurs aires de compétence respectives, La Fabrique Ecologique garantit, sur chaque sujet, un état des lieux objectif et une analyse exhaustive des avantages, inconvénients, modalités et difficultés de mise en oeuvre des propositions portées. Une méthodologie des travaux très précise assure cette rigueur.

▶ Une exigence pluraliste et transpartisane

La Fabrique Ecologique, soutenue par des femmes et hommes impliqués dans la société civile et (ou) adhérents des partis politiques républicains, fait avancer la réflexion sur l'écologie et le développement durable au service de tous, dans l'intérêt général. Elle s'efforce de valoriser l'expertise citoyenne autour de ses travaux.

▶ Une transparence absolue

La Fabrique Ecologique publie ses propositions en toute indépendance. Les experts qui y publient des travaux déclarent leurs intérêts. Une Charte Éthique et de Conformité assure cette indépendance vis-à-vis des partenaires.

▶ Une approche européenne et internationale

Le défi écologique est mondial. Les réglementations, les économies, les normes, les bonnes pratiques sont aujourd'hui élaborées aux quatre coins du monde, et en particulier au niveau européen. Les travaux de La Fabrique Ecologique se doivent d'intégrer cette réalité.

▶ Des réponses concrètes

Intégrant pleinement les impératifs économiques et sociaux, La Fabrique Ecologique souhaite faire émerger des solutions à la fois ambitieuses et immédiatement applicables.

▶ Un positionnement unique, au service du développement durable

De nombreuses organisations travaillent sur ces sujets. La Fabrique Ecologique reconnaît le travail important accompli et dialogue en parfaite entente avec elles. Son originalité tient dans son positionnement inédit, alliant recherche et production d'idées à une proximité forte avec les responsables politiques, administratifs, de l'entreprise et des ONG. Ceci permet d'assurer un maximum d'impact aux propositions qu'elle porte.