

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

*Alexandra WATIER, Ingénieure conseil climat-énergie chez BL évolution, et
Albert FERRARI, Associé de recherche à l'institut universitaire européen de
Florence et consultant.*

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. Ainsi, le gaz est plus simple à stocker que de l'électricité, qui doit aussi être transformée, mais moins que le bois ou le 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 à partir d'une source d'énergie fossile (charbon, gaz), nucléaire, renouvelable, notamment hydraulique, l'électricité est transportée via un réseau 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 et est très bien assuré aujourd'hui. Cependant, il devient plus complexe avec des sources d'électricité renouvelables à injection variable, 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%), bien que cela implique un temps de réaction varié (une centrale nucléaire ne se met pas en route en une minute). Quant à la consommation, elle peut également varier. Face à ce besoin d'équilibre du réseau électrique, les solutions actuellement majoritaires consistent en un foisonnement via le réseau et le pilotage de la consommation. Le stockage de l'électricité vient donc apporter une solution complémentaire 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.

Prendre en considération la notion de temps est très important 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. En effet, afin de conserver une quantité donnée d'énergie qui arrive sous forme d'électricité, il est nécessaire qu'elle soit convertie en une autre forme d'énergie, selon les diverses technologies disponibles, en fonction des besoins.

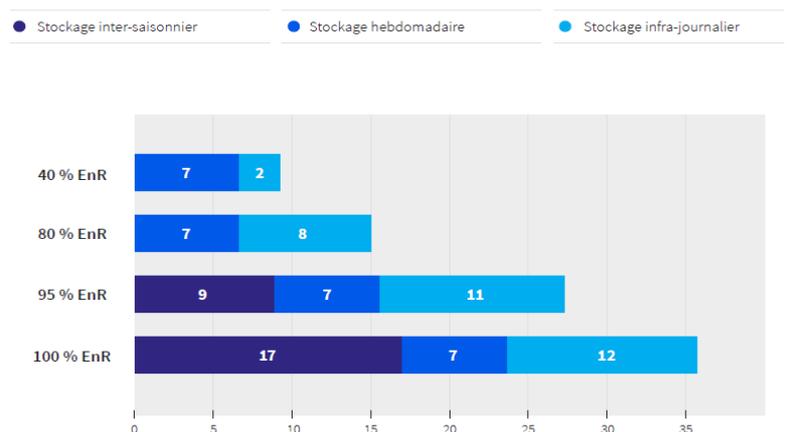
Deux raisons expliquent l'importance croissante de l'enjeu de stockage.

A. L'évolution du mix électrique en faveur des énergies renouvelables

Avec l'évolution du mix électrique et l'intégration de nouvelles sources d'électricité, qui pose aussi des problématiques de maintien de la stabilité de la fréquence du réseau, le stockage devient un enjeu crucial en France et dans le monde. A l'échelle mondiale, la lutte contre le dérèglement climatique impose de réduire drastiquement la part d'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 plus faciles à stocker mais dont il faudra se passer afin de limiter le dérèglement climatique¹.

A l'échelle de la France, c'est davantage la politique de réduction de la production nucléaire qui est à l'origine de l'évolution de ce mix électrique (les énergies fossiles n'occupant que 8,6% de notre électricité, contre 72% d'énergie nucléaire²). 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.

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



Source : ADEME

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>

Ces sources d'énergie présentent des particularités, notamment liées aux temporalités 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 difficulté.

Or, quel que soit le scénario énergétique - le 100 % ENR visé par le scénario négaWatt, ou encore une part de nucléaire réduite à 50 % 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. Dans cette perspective, les technologies relatives au stockage doivent être différenciées, car trois types de besoins différents existent :

- **Infra-journalier** sur la journée (répondant plutôt à la variabilité du photovoltaïque) ;
- **Hebdomadaire** sur une semaine ou plusieurs jours (répondant plutôt à la variabilité de l'éolien) ;
- **Saisonnier** sur plusieurs mois (répondant plutôt à la variabilité du photovoltaïque).

B. L'évolution des usages

Une seconde raison, moins importante, concerne l'autre pan de l'équation relative à l'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). D'une manière générale, les scénarios se basent sur la tendance d'une consommation électrique constante, mais leur saisonnalité est amenée à évoluer, avec par exemple 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 crée de nouveaux besoins dont le recours à de 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 impliquant qu'elles ne répondent pas aux mêmes besoins. Les cinq principales technologies de stockage sont résumées dans le tableau ci-dessous³.

	Forme d'énergie	Efficacité énergétique	Temps de réactivité	Temps de stockage	Capacité de stockage (puissance)
Station de transfert d'énergie par pompage	Énergie potentielle de pesanteur (l'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'électricité de 100 000 habitants pendant 15 jours (jusqu'à 2 GW)
Stockage d'énergie par air comprimé	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'électricité de 100 000 habitants pendant 15 jours (jusqu'à 200 MW)
Volant d'inertie	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'électricité de moins de 2 habitants pendant 1 jour (jusqu'à 40 MW)
Batteries	Énergie chimique	~ 70 à 80%	1 ms	De la journée à la semaine	Jusqu'à 10 MWh = consommation résidentielle d'électricité de 1600 habitants pendant 1 jour (jusqu'à 10 MW) et bien au-delà : Tesla développe des installations de plus de 20 GWh
Power to gas - hydrogène	Énergie chimique	~30% pour l'hydrogène ; ~25% pour l'ammoniac ou le méthane de synthèse	100 ms	Long (plusieurs mois)	Jusqu'à 10 GWh = consommation résidentielle d'électricité de 100 000 habitants pendant 15 jours (jusqu'à 1 GW)

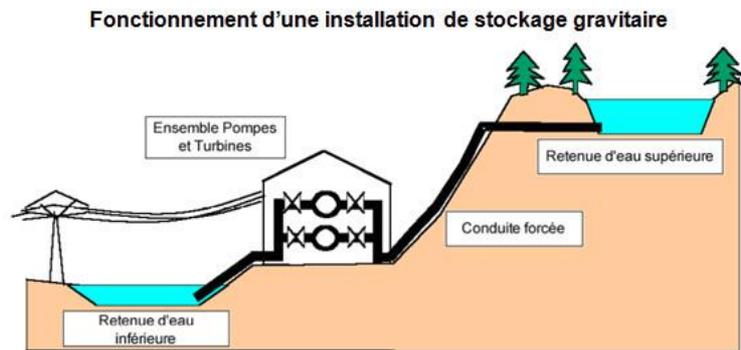
Leurs perspectives de développement peuvent s'analyser à partir des données de différentes études et scénarios publiés récemment⁴.

La technologie actuellement dominante repose sur les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP). C'est la solution presque systématiquement employée dans le monde pour

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.

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 Programmation Pluri-annuelle de l'Énergie (PPE) de 1,5 GW).



Le stockage d'énergie par air comprimé (CAES) permet un stockage d'assez grande puissance, concentrant d'assez grandes quantités d'énergie sur plusieurs semaines. Mais son potentiel de développement est lui aussi limité par les sites nécessaires à son installation⁵. La technologie du volant d'inertie est quant à elle 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 il 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 (de 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 nouvelles formes de batteries, nombreuses, 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 leur place sur le marché.

Différents outils permettent de développer le stockage par batteries, individuelles pour optimiser le taux d'autoconsommation ou garantir la stabilité de l'alimentation ou mutualisées, par exemple 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 pour 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

⁵ Caractéristiques des différentes technologies de stockage :

- 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.

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 qui reste 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 donc identifiés en matière de stockage : les batteries derrière le compteur chez les particuliers, les voitures électriques (3 000 000 de véhicules électriques anticipés en 2028) et les lignes virtuelles proposées par RTE. Dans une vision plus politique, négaWatt compte sur les batteries comme solution de stockage au même titre que l'air comprimé, sans les présenter pour autant comme une solution miracle. L'association entrevoit pour la mobilité électrique un développement "raisonné".

B. Le Power to gas et l'hydrogène

L'électricité convertie à un instant donné, par une source non pilotable telle que le vent ou le soleil, peut être utilisée 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 ensuite en électricité. Ce procédé permet, par exemple, de synthétiser de l'hydrogène. Il faut 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 consommé à des fins industrielles : c'est aujourd'hui la principale utilisation de l'hydrogène, produite par les raffineries ;
- Être injecté dans les réseaux de gaz naturel en l'état (dans une limite d'environ 20%) ou après avoir été associé à du CO₂ pour le convertir en méthane de synthèse (méthanation) ;
- Alimenter des véhicules lourds directement ;
- 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 méthanation⁹.

⁷ <https://www.connaissancedesenergies.org/stockage-deelectricite-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

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 œuvre du *Power to gas* à grande échelle n'apparaîtra vraisemblablement pas en France avant 2035".

III. Les enjeux économiques et environnementaux du stockage

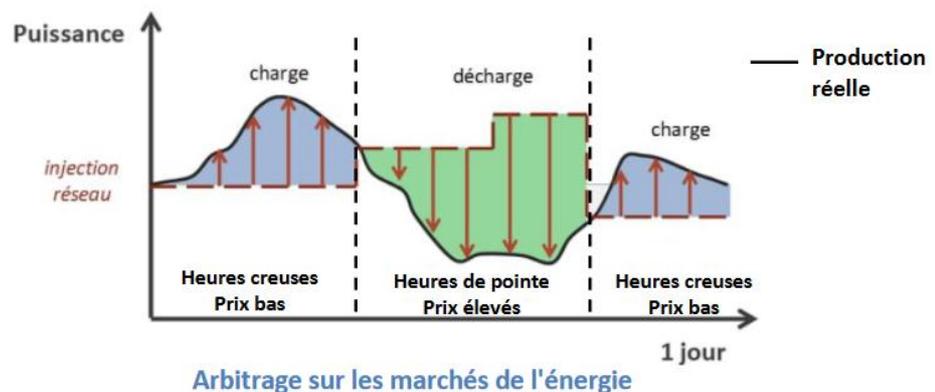
Le rôle du stockage dans la transition énergétique, et des différentes solutions existantes ou prochaines va dépendre principalement de leur compétitivité et de leur impact sur l'environnement.

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 décharge¹¹, de la valeur résiduelle et des charges financières¹².

Les quantités d'énergie stockée et injectée doivent en outre être mises en perspective par rapport à la fréquence et 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 qui pourraient n'être sollicitées que quelques heures dans l'année, comme par exemple le stockage d'énergie par air comprimé.



Source : ENEA

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/>

Selon un rapport du Conseil général de l'économie, le caractère variable d'une production d'électricité diminue la valeur systémique de cette électricité¹³, car elle peut être parfois trop abondante ou insuffisante par rapport à la demande. Au-delà de l'optimisation de la gestion du réseau et du pilotage de la charge, le stockage permet de compenser la sur- ou la sous-production, ce qui évite le lancement de centrales d'appoint, généralement fortement émettrices de CO₂ (au charbon ou au gaz), pendant les pointes de consommation, afin que l'équilibre offre-demande soit maintenu.

Lors des pointes de consommation, le stockage permet également 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 avec une production d'énergie stable, voire pilotable, issue des centrales électriques conventionnelles. Avec ce système, l'électricité peut être stockée lors d'un afflux de production et revendue plus tard.

Une installation d'électricité issue d'une ressource renouvelable variable combinée à un dispositif de stockage apporterait donc plus de stabilité pour le réseau, et permettrait d'optimiser l'injection par le producteur ou le soutirage par le consommateur, donc le prix de vente de cette énergie, au moment où celui-ci est le plus intéressant. De même, associé à une consommation sur site comme dans le cas de l'autoconsommation, le système de stockage réduirait l'utilisation du réseau, permettrait de lisser son utilisation et de prévenir un éventuel changement de tension, ou un renforcement coûteux du réseau électrique.

Pour optimiser l'équation économique au niveau national, dans une certaine mesure, il serait aussi important de mutualiser les besoins car le foisonnement naturel réduit de fait la variabilité (un grand nombre de variations se « compensent », la variation de la somme est bien inférieure à la somme des variations), voire même de centraliser, pour créer un effet « masse » : une installation plus importante est moins chère par MWh qu'une somme de petites installations –

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 surtout dans les véhicules électriques. En 15 ans, les commandes de batteries Lithium-Ion dans le monde sont passées de moins de 1 GWh à plus de 350 GWh, avec une croissance exponentielle¹⁴, souvent comparée à celle du développement du photovoltaïque.

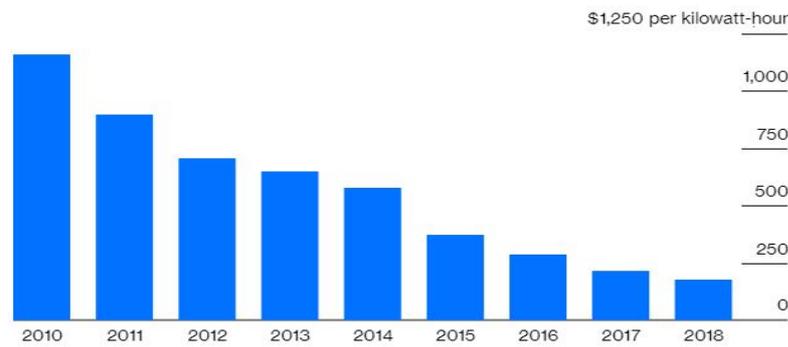
¹³ Le stockage stationnaire de l'électricité, Conseil général de l'économie, mars 2020

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/>

Downward Trajectory

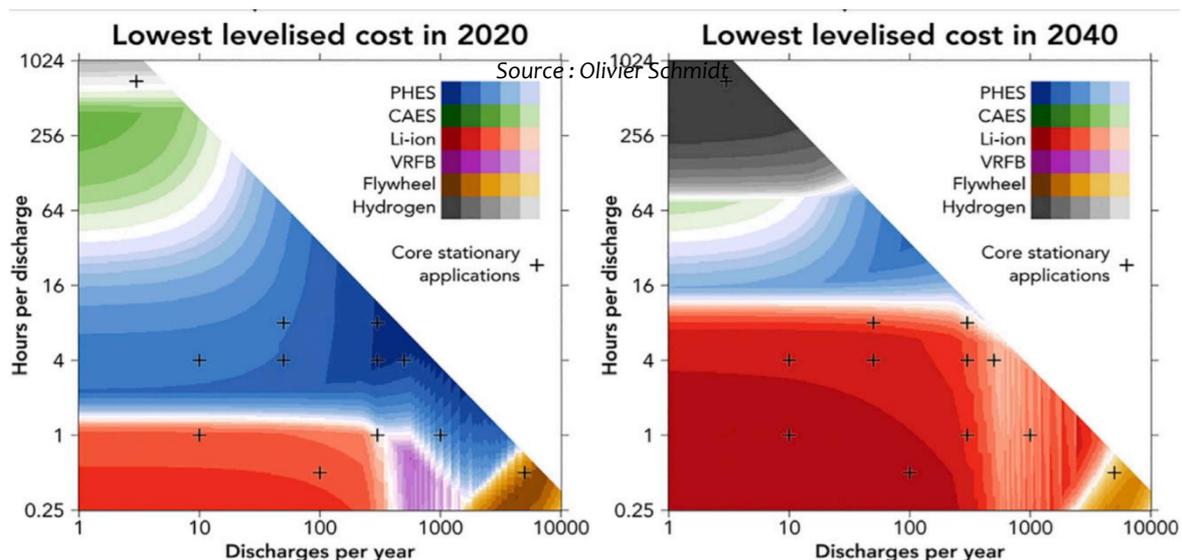
Volume-weighted average lithium-ion battery pack price*



Les différentes technologies de stockage satisfont des besoins de nature diverse, 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 sont en concurrence sur les mêmes créneaux de services.

Dans une étude de 2019¹⁵, 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 celles-ci : 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). Ces technologies sont évaluées 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.



¹⁵ Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies, Schmidt et al., Joule 3, 81–100 January 16, 2019 © 2018 Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.12.008>

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 rares¹⁶ et de matériaux critiques¹⁷, pour les batteries notamment, est polluant 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, notamment 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 pour l'industrie automobile européenne¹⁸.

La production de batteries est en outre gourmande en espace, en énergie et en eau : en Allemagne, la Gigafactory de Tesla nécessite le défrichage de plus de 150 hectares de forêt, et a un impact très négatif sur la biodiversité¹⁹ 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 également pleines de métaux lourds et produits chimiques (plomb, mercure...) qui posent des risques de contamination des sols et de pollution. Il est donc essentiel de structurer rapidement une filière de recyclage. Sur un continent européen pauvre en ressources naturelles et en métaux rares comme le lithium, l'enjeu du recyclage pourrait aussi permettre de relocaliser les industries de batteries et sécuriser une part de l'approvisionnement. Or, il se heurte aujourd'hui à des contraintes techniques et économiques importantes²⁰.

D'autres technologies, comme le stockage à air comprimé et les STEP, requièrent une forte intervention sur les espaces naturels et peuvent avoir un impact non négligeable sur l'environnement en déstabilisant les éléments naturels (lacs, gisements épuisés de gaz).

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

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

*

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, hebdomadaire ou saisonnier. Pour les premières catégories, les batteries semblent plus prometteuses à court terme - en particulier lithium-ion -, tandis que l'hydrogène, en cours de développement, conviendrait à un stockage de plus long terme en complément des stations hydroélectriques de pompage déjà présentes en France. Plus de l'apport dans l'équilibrage du réseau électrique, le stockage trouve surtout une pertinence particulière dans les zones non-interconnectées et là où le réseau est moins présent.

Bien qu'aujourd'hui associées à un système de production électrique vertueux au regard de ses impacts carbone et environnementaux, les ENR électriques ne sont pas sans faille. Leur développement massif nécessite du stockage, ce qui implique des coûts supplémentaires et des impacts sur les ressources et l'environnement qui devront 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 avec les concurrents asiatiques et américains. Cependant, le stockage est une technologie qui se situe au cœur 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 les cadres réglementaires autour de ces actions de régulation du réseau électrique restent ainsi à définir pour conserver l'équilibre offre-demande sur le réseau.

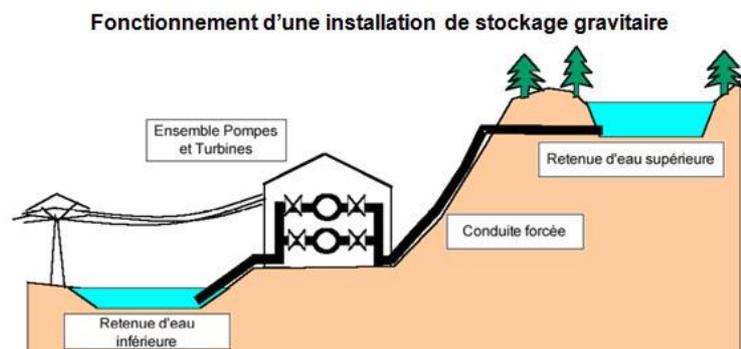
Annexe

Les différentes technologies de stockage

Les technologies matures mais au potentiel limité

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

Une station de transfert d'énergie par pompage (STEP) est un type de centrale hydroélectrique, qui est utilisé 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.



En France comme dans le monde, il s'agit de la solution la plus employée pour stocker l'énergie des centrales électriques avec 99% des capacités de stockage par les STEP (France : 5 GW ; Monde : 140 GW).

→ **Besoin de stockage auquel les STEP répondent : un stockage de grande puissance et de grandes quantités d'énergie sur plusieurs semaines ou mois.**

Son potentiel de développement est limité par les sites nécessaires à son installation ; des études sont en cours sur des STEP marines et des micro-STEPs²¹.

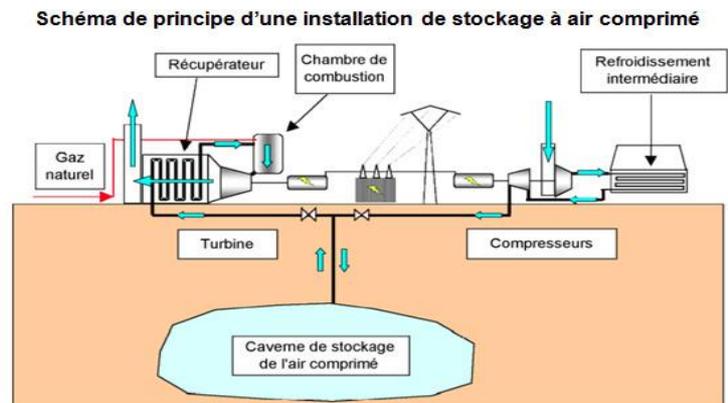
La PPE identifie un potentiel de développement des STEP de 1,5 GW à mettre en place, dans le cadre du renouvellement des concessions hydrauliques, d'ici 2025. Ce n'est pas le cas du scénario négaWatt, qui n'identifie pas de besoin spécifique de renforcer le rôle des STEP, en raison des impacts environnementaux, et parie davantage sur des solutions alternatives.

²¹ Caractéristiques des différentes technologies de stockage :
<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>

Progress in electrical energy storage system: A critical review, Haisheng Chena,b, Thang Ngoc Conga, Wei Yanga, Chunqing Tanb, Yongliang Lia, Yulong Dinga, 2008
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S100200710800381X?token=6718BA051F376E0A1EA9D6993520101CEFB38ADB9F9CE242B2CA5321F1B7547743DBC2E344059A36D726434E4036688D3>

B. Le Stockage d'Énergie par Air Comprimé (CAES)

Les installations de stockage d'énergie par air comprimé de grande puissance consistent, en utilisant l'électricité disponible à bas coût en période de faible consommation, à stocker de l'air dans des cavités souterraines (ancienne mine de sel ou caverne de stockage de gaz naturel) ou sous la mer grâce à un compresseur. Au moment de la pointe de consommation, cet air comprimé est libéré pour faire tourner des turbines produisant ainsi de l'électricité.



→ **Besoin de stockage auquel le CAES répond : un stockage d'assez grande puissance et d'assez grandes quantités d'énergie sur plusieurs semaines.**

Son potentiel de développement est limité par les sites nécessaires à son installation²². Compte tenu de son réseau et de son mix énergétique, la France n'a pas identifié le besoin de recourir au CAES à l'horizon de la PPE (2028), ni avant 2035, mais elle reconnaît son potentiel comme une solution de long terme. Le scénario négaWatt lui reconnaît aussi une solution prometteuse pour le stockage, sans toutefois préciser l'horizon temporel et la puissance à installer.

C. Les volants d'inertie

Un volant d'inertie est constitué d'une masse (anneau ou tube) en fibre de carbone entraînée par un moteur électrique. L'apport d'énergie électrique permet de faire tourner la masse à des vitesses très élevées (entre 8000 et 16000 tours/min) en quelques minutes. Une fois lancée, la masse continue à tourner, même si plus aucun courant ne l'alimente. L'électricité est donc stockée dans le volant d'inertie sous forme d'énergie cinétique. Elle pourra être restituée en utilisant un moteur comme générateur électrique, entraînant la baisse progressive de la vitesse de rotation du volant d'inertie.

Cette technologie est mature mais son développement est limité, principalement du fait de ses usages restreints par le très court temps de stockage et de la quantité d'énergie stockée par cette technologie qui est limitée par la quantité de matière (le poids) du volant d'inertie (les volants permettent d'obtenir en laboratoire des capacités de stockage de 100-130 Wh/kg)²³.

²² Caractéristiques des différentes technologies de stockage :

- 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>

²³ https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/cge/stockage_electricite.pdf

→ **Besoin de stockage auquel les technologies inertielles répondent : un stockage de moyenne puissance et de faible quantité d'énergie sur un temps très court** (applications de régulation ou d'optimisation énergétique d'un système, lissage à très court terme de la fourniture d'énergie au sein d'appareils de production, et potentiellement sur des installations photovoltaïques).

Comme pour l'air comprimé, la France n'a pas identifié le besoin de recourir à ce type de stockage à l'horizon de la PPE (2028), ni avant 2035, mais elle reconnaît son potentiel comme une solution si la part des énergies renouvelables s'accroît considérablement. C'est aussi la conclusion du scénario négaWatt.

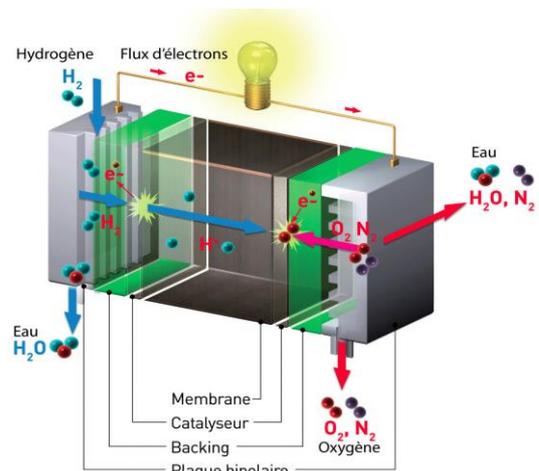
D. Les technologies de fort potentiel

1) Les batteries (dont véhicules électriques)

Je ne comprends pas l'importance donnée à cette question des batteries. Il me semble que la question est plutôt de regarder les enjeux de stockage de l'ensemble du système et non des seuls transports. Cela pose un problème d'échelle.

En phase de charge, l'électricité vient provoquer une réaction chimique qui diffère selon le type de batterie. Pour restituer de l'électricité, la réaction chimique inverse fait circuler les électrons et décharge le système. Il existe une grande variété de techniques proposées à divers niveaux de maturité.

Leurs performances, et donc leurs types d'usages, diffèrent considérablement, notamment en termes de capacité, de densité d'énergie stockée, de temps de charge et de décharge, ainsi que de nombre de cycles. Les plus prometteuses seraient : les batteries lithium-ion, sodium soufre, à flux circulant (redox flow) et les batteries acides avancées.



→ **Les batteries 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.**

Potentiel de développement : leur inconvénient majeur est lié à leur durée de vie, limitée par les dégradations chimiques des réactions et leur coût. Les batteries sont déjà utilisées à l'heure actuelle, 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.

Les batteries « tout solide » (“solid-state”) sont aussi en phase de développement. Ces dernières peuvent être classées en trois grandes familles : électrolytes polymères, verres et céramiques. Leur

avènement à grande échelle n'est pas assuré à court terme car des défis d'optimisation restent à relever à plusieurs niveaux : densité d'énergie (nécessitant des épaisseurs très fines d'électrolyte solide (<20µm) aujourd'hui hors de portée pour les verres et les céramiques), coûts de fabrication, température d'usage qui devra être réduite, et impacts sur l'environnement.

Usages possibles du stockage par batteries

Différents concepts permettent de développer le stockage par batteries :

- Les batteries individuelles : de plus en plus de particuliers et de professionnels ont recours à des systèmes de batteries en complément de leur installation de production en autoconsommation pour optimiser leur taux d'autoconsommation ou garantir la stabilité de leur alimentation.
- A une plus grande échelle, il existe aussi le concept de lignes virtuelles : lorsqu'une ligne du réseau de transport est saturée, une batterie de taille importante stocke l'électricité excédentaire en amont de cette ligne. Au même instant, ailleurs sur le réseau, une ou plusieurs batteries livrent la même quantité d'électricité.
- Le *vehicle to grid* (V2G) : il consiste à mutualiser des batteries de véhicules électriques à l'arrêt pour les mettre à disposition du réseau sous forme de stockage. Le V2G semble prometteur sur des usages de flexibilité journalière (puissance limitée, charge intelligente). 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 (ex : quelle rémunération aux propriétaires de véhicules pour qu'ils acceptent de mettre à disposition leurs batteries ?)
- Le *vehicle to home* (V2H) : au lieu d'être injectée sur le réseau, l'électricité peut directement alimenter les ménages propriétaires des voitures électriques.

Il faut noter que ces deux derniers systèmes se basant sur les véhicules sont dépendants du nombre de voitures électriques du parc, de leur disponibilité, des infrastructures de charge appropriées, de la définition d'un modèle économique pérenne, d'une gouvernance et d'une gestion qui restent à définir. En effet, il existe encore beaucoup d'incertitudes sur l'évolution des solutions de mobilité, avec l'arrivée des véhicules autonomes, la mutualisation des véhicules (autopartage), la fin de la voiture individuelle pour tous ou encore le comportement des utilisateurs (éviter de charger son véhicule en période de pic de consommation par exemple).

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".

2) 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. Dans le cas de l'hydrogène, l'électricité est utilisée pour casser des molécules d'eau (H₂O) en hydrogène (H₂) et en oxygène (O).

Point de vigilance à propos de l'hydrogène : on ne parle pas de l'hydrogène en tant que carburant (pour des véhicules à hydrogène), ce dernier étant majoritairement issu d'énergies fossiles (par vaporeformage de combustibles fossiles) et non de l'hydrolyse de l'eau. De par son faible rendement énergétique, l'hydrogène issue d'hydrolyse de l'eau présente l'intérêt d'avoir recours à de l'électricité "fatale" avec de l'électricité renouvelable, donc de jouer un rôle de stockage. Mais cet hydrogène issu d'électricité renouvelable ne permettrait pas de faire rouler des véhicules à échelle mondiale sans remise en question des besoins de transport.

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 CO₂ 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.²⁴

→ **Les technologies de Power to gas, en cours de développement, paraissent les mieux adaptées au stockage inter-saisonnier, notamment le stockage d'hydrogène produit par électrolyse.**

Potentiel de développement : 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.²⁵ 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 méthanation²⁶. 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 œuvre du Power to gas à grande échelle n'apparaîtra vraisemblablement pas en France avant 2035".

²⁴ <https://www.connaissancedesenergies.org/stockage-deelectricite-quappelle-t-le-power-gas-170908>

²⁵ <https://www.engie.com/activites/infrastructures/power-to-gaz>

²⁶ https://negawatt.org/IMG/pdf/scenario-negawatt_2017-2050_hypotheses-et-resultats.pdf