

La valeur de deux des services rendus au système électrique par les batteries :
utiliser plus efficacement l'énergie éolienne et solaire et diminuer le besoin de capacité pilotable

Synthèse

Sur la méthode : cette étude considère ensemble les batteries, les Steps, la flexibilité de la consommation et la flexibilité de la production hydraulique. En effet, chaque composante de cet ensemble a des caractéristiques différentes mais de même nature : une capacité de charge et une autre de décharge (en kW), une contenance (en kWh), un taux de perte, un coût. Cet ensemble, appelé ici « stockage au sens large », permet de mieux utiliser le potentiel de production éolien et solaire et de diminuer le besoin de capacité pilotable.

Résultats : en utilisant un logiciel de simulation du système électrique qui est publié, cette étude montre que, pour rendre ces deux services, l'efficacité marginale de cet ensemble diminue très vite lorsque son importance augmente. Dans le cas de la France, compte tenu de la flexibilité nucléaire, des Steps existantes et de la production hydraulique pilotable, de nouvelles batteries augmentent *très peu* la valeur de ces deux services rendus par le « stockage au sens large ». Il en est de même des déplacements des consommations horaire ayant pour but de rapprocher le profil de la consommation de celui des productions éolienne et photovoltaïque

Discussion : les batteries stationnaires rendent d'autres services qui ne sont pas étudiés ici. Cette étude est faite au pas horaire ; la même faite à un pas égal au quart d'heure donnerait des résultats numériques légèrement différents sans modifier les conclusions ; la valeur des services rendus au système électrique doit être comparée au coût des batteries ou des déplacements de consommation.

Une forte augmentation de la capacité des interconnexions accompagnée d'une forte augmentation des exportations peut modifier les conclusions de cette étude.

Cette étude pourrait être faite à l'échelle européenne.

1- Les batteries peuvent rendre plusieurs types de service au système électrique :

Stocker une production éolienne ou solaire lorsque celle-ci dépasse les besoins immédiats auxquels doit répondre le système électrique puis restituer les quantités mises en stocks ; ce service se mesure en TWh par an (un térawattheure vaut 1000 GWh, gigawattheures).

Diminuer le besoin de capacité de production pilotable à partir de gaz. Cette diminution du besoin de capacité de production pilotable à partir de gaz se mesure en GW.

Ce gaz peut être du gaz fossile, ou du biométhane, ou de l'hydrogène apporté au système ou de l'hydrogène produit à partir de l'électricité produite par le système ou encore du méthane de synthèse produit à partir de gaz carbonique et d'hydrogène, celui-ci étant produit à partir du système – dans les deux derniers cas on parle de P2G2P, power to gaz to power.

Les batteries rendent d'autres services qui ne sont pas dans le champ de cette étude, par exemple : elles peuvent agir comme réserve primaire pour compenser très rapidement les écarts qui apparaissent sans cesse entre la production et la consommation ; des batteries en amont et en aval d'un goulet

d'étranglement sur le réseau permettent d'améliorer le passage de l'électricité ; des batteries directement couplées à des panneaux solaires ou des éoliennes peuvent diminuer la vitesse de croissance ou de décroissance des quantités mises sur le réseau. *Le cas des batteries de véhicules est abordé in fine.*

2- Les batteries sont une composante d'un ensemble appelé ici le « stockage au sens large »

Une batterie se caractérise par une contenance, en kWh et par une puissance de décharge maximum, en kW. Ajoutons qu'elle ne peut livrer que la quantité d'électricité qu'elle a en stock. De plus une batterie a un rendement de charge-décharge.

Une Step est un dispositif formé d'un réservoir supérieur et d'un réservoir inférieur, de pompes et d'une turbine ; comme les batteries il a une contenance en kWh ou MWh (1000 kWh) ou GWh (1000 MWh) et un débit maximum qui se traduit par une puissance de décharge maximum. En France, les Steps ont une contenance de 90 GWh et peuvent délivrer une puissance de 5 GW (mégawatt ; million de kW).

La flexibilité de la production des lacs de montagne peut se visualiser en considérant les variations du niveau de l'eau des lacs autour de son niveau moyen. Ces variations de ce niveau ont le même effet sur le réseau électrique qu'une charge ou décharge de batteries. Dans la production hydraulique des barrages, la simulation distingue donc deux composantes. L'une d'entre elles est sa moyenne mobile sur deux mois observée une année donnée, l'autre est l'écart entre la production réelle et cette moyenne mobile. Supposant que cet écart est une production pilotable, on calcule ce que devrait être la contenance d'une batterie pouvant rendre le même service. En réalité, l'écart à la moyenne mobile n'est pas libre de contraintes. Dans la simulation on introduit donc une valeur inférieure à ce qui a été ainsi calculé. La production à partir des fleuves est, elle aussi, en partie pilotable, mais beaucoup moins.

La flexibilité de la consommation représente la possibilité donnée heure par heure à la consommation de s'écarter d'un niveau qui sert de référence. Par exemple, si la situation de référence consiste à maintenir branché un chauffage électrique qui consomme 3 kW, le fait de pouvoir l'arrêter pendant 20 minutes avant de le rebrancher est une flexibilité de la consommation de 1 kWh.

Les batteries, les Steps, les flexibilités de la production hydraulique et de la consommation présentent en commun ces caractéristiques : une contenance maximum (en GWh), une puissance de débit maximum (en GW), un taux de perte. *Leur effet sur le réseau électrique ne peut pas être imputé à l'une ou à l'autre. Il se mesure donc en les considérant toutes les quatre ensemble.*

Ensemble, ces quatre composantes forment un « stockage au sens large » dont la contenance est la somme des contenances et dont le débit maximum est la somme des débits maximum.

Les batteries se trouvent donc en concurrence avec les trois autres composantes de ce stockage au sens large.

La simulation du système électrique par Simel3 ou 3H (publiés) identifie chacune des quatre composantes : sa contenance, son taux de pertes, son débit de charge ou de décharge, les composantes de son coût. La simulation les considère toutes ensemble pour évaluer les quantités « stockées » et « déstockées » (en TWh/an) et la diminution du besoin de capacité pilotable (en GW).

La simulation du système électrique équilibre *heure par heure* la fourniture d'électricité et la consommation. L'électricité fournie provient directement de la production nucléaire, éolienne photovoltaïque, hydraulique, ou produite à partir de biomasse ou à partir de gaz apporté au système, ou encore à partir d'hydrogène produit par électrolyse à partir de possibilités de production d'électricité non consommée directement ; si cela ne suffit pas, il est fait appel au « stockage au sens

large ». Les possibilités de production qui dépassent les besoins de la consommation sont chargées dans ce « stockage au sens large », dans la limite de puissance de charge et de la capacité en GWh de ce stockage. Voir ici [une présentation simplifiée de SimelSP3](#).

3- Les batteries dans un système électrique tel que celui qui est programmé dans la PPE3

Les données identiques dans toutes les simulations

La consommation finale est 570 TWh/an ; son profil horaire est tel que ce qu'il fut en 2019 ; on ne tient pas compte d'une éventuelle flexibilité de la consommation.

Il n'y a pas d'importation. La consommation en France a une priorité d'accès au potentiel nucléaire.

La capacité nucléaire est 60 GW.

La capacité éolienne est 35 GW sur terre et 13 GW en mer ; la capacité photovoltaïque est 80 GW. Les profils horaires de production sont les mêmes durant l'année 2019.

La production hydraulique annuelle est de 43 TWh au fil de l'eau et 18 TWh de lacs de montagne. La flexibilité de la production hydraulique des lacs est équivalente à une capacité de stockage de 150 GWh.

Note : à partir des données de l'année 2019, si l'on suppose que la production « de base » des lacs est sa moyenne mobile sur deux mois et que la différence entre la production réelle et cette production de base est fournie ou « consommée » par une batterie, celle-ci a une contenance de 275 GWh.

On ne compte pas la valorisation des excédents. Les dépenses de réseau sont les mêmes dans tous les cas (4260 M€/an).

Les données variables d'une simulation à l'autre et les calculs

La contenance des Steps est, ou bien nulle, ou bien égale à ce qu'elle est aujourd'hui soit 90 GWh.

La flexibilité de la production hydraulique est ou bien nulle (alors la production est, heure par heure, ce qu'elle fut en 2019) ou bien égale à 150 GWh.

La capacité des batteries est nulle ou égale à 50 GWh. Elles peuvent ensemble délivrer une puissance de 50 GW.

La capacité de l'électrolyse pour P2G2P est généralement nulle ; alors la simulation calcule la production à partir de gaz. Ou bien, la capacité de P2G2P est calculée de façon que la production à partir de gaz soit nulle.

La simulation calcule les deux services du « stockage au sens large » : batteries, Steps et flexibilité hydraulique : les quantités restituées d'une part et, d'autre part la diminution du besoin de capacité pilotable que ce stockage rend possibles.

La simulation calcule les dépenses totales et le coût du MWh.

Quelques résultats

Le coût annualisé de 50 GWh de batteries est 1316 € : investissement : 240 €/kWh ; durée de vie 12 ans ; sans tenir compte des frais fixes annuels ; taux d'actualisation : 4,5 %.

Le coût des Steps et de la flexibilité hydraulique est compté pour zéro.

Avec une petite production à partir de gaz apporté au système électrique

Sans Steps ni flexibilité hydraulique, une capacité de 50 GWh de batteries diminue de 6,1 TWh/an la production à partir de gaz et de 10,2 GW le besoin de capacité pilotable. Cela se traduit par une baisse du coût de production de 1,1 €/MWh. La valeur de service des batteries est 38 €/kWh/an, supérieure à son coût, qui est 32 €/kWh/an.

En revanche, une capacité de 50 GWh de batteries *ajoutée* aux Steps existantes diminue la production à partir de gaz de 0,6 TWh seulement et diminue le besoin de capacité pilotable de 1,2 GW seulement. Ces batteries augmentent le coût de l'électricité de 2,0 €/MWh. En effet sa valeur de service est seulement de 3,2 €/MWh, le dixième de son coût.

Si l'on tient compte de la flexibilité de la production hydraulique, l'ajout de 50 TWh de batteries a encore moins d'effets sur le réseau électrique.

Batteries / Steps / flexibilité hydraulique	GWh	0 / 0 / 0	50 / 0 / 0	0/90/0	50/90/0	0/90/150	50/90/150
Capacité de l'électrolyse pour P2G2P	GW	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Diminution du besoin de capacité pilotable	GW	0,0	10,25	12,4	13,2	15,90	16,0
Quantité restituée par le « stockage »	TWh/an	0,0	5,7	6,6	7,3	7,9	8,3
Production à partir de gaz apporté au système	TWh/an	12,25	6,19	5,24	4,66	4,03	3,64
Possibilités de production excédentaires	TWh/an	73	67	66	65	64	64
Coût	€/MWh	107,3	106,2	103,4	105,4	102,6	104,6
Dépenses	M€/an	61168	60557	58935	60092	58486	59649
Valeur de service des batteries	€/kWh/an		38,5		3,18		3,05

Sans production d'électricité à partir de gaz apporté au système et avec une production d'hydrogène pour produire de l'électricité

Batteries / Steps / flexibilité hydraulique	GWh	0 / 90 / 150	50 / 90 / 150
Capacité de l'électrolyse pour P2G2P	GW	2,2	2,1
Diminution du besoin de capacité pilotable	GW	15,0	16,0
Quantité restituée par le « stockage »	TWh/an	7,9	8,3
Production à partir de gaz apporté au système	TWh/an	0,00	0,00
Possibilités de production excédentaires	TWh/an	57	58
Coût	€/MWh	102,0	104,1
Dépenses	M€/an	58161	59351
Valeur de service des batteries	€/kWh/an		2,7

Pour éviter d'avoir besoin d'un apport extérieur de gaz, il est nécessaire d'en produire à partir de l'électricité du système électrique. Sans capacités nouvelles de batteries, la capacité de l'électrolyse serait de 2,2 GW. Avec 50 GWh de batteries, elle serait de 2,1 GW, mais les dépenses totales seraient supérieures ; ces batteries augmenteraient le coût du MWh de 2,1 €.

Selon le résultat de ces simulations, étant donnée l'existence d'une production nucléaire flexible, des Steps et de la flexibilité de la production hydraulique, il est possible de répondre à la demande sans

apport de gaz - biométhane ou hydrogène. Au contraire, une capacité de 50 GWh augmenterait les dépenses de plus d'un milliard d'euros par an.

4- Pourquoi donc des batteries ?

Pour fournir au réseau des services qui ne sont pas représentés par notre simulation

Pour mémoire, entre autres : une réserve primaire avec une vitesse de réaction meilleure que celle de l'hydraulique, le déglottage du réseau, la diminution des rampes de production éolienne ou photovoltaïque. Il s'agit sans doute de quelques dizaines de GWh, pas plus.

Pour fournir des GW en pointe si les autres moyens de stockage manquent de puissance

Le cas ne se présente pas en France, avec ses 60 GW nucléaire.

Il pourrait se présenter en Europe où la part de la production nucléaire et de l'hydraulique sera beaucoup plus faible. Pour représenter ce cas, supposons que la capacité nucléaire en France soit seulement de 30 GW. Il serait alors possible de répondre à la demande avec, par exemple 60 GW d'éolien sur terre et 30 GW en mer et 180 GW de photovoltaïque. Alors, une batterie de 10 GWh appelée « en pointe de la pointe » pourrait apporter jusqu'à 5 GW pendant 3 heures. Dans certaines configurations, cet appoint de puissance permet de mieux employer le potentiel de la flexibilité de la production hydraulique. Les batteries seraient alors peut-être moins coûteuses que l'augmentation du débit de décharge des lacs et de la puissance de turbinage.

Pour répondre aux besoins en cas de longues périodes sans vent et avec peu de soleil ?

Vu les quantités en cause, les batteries sont beaucoup trop coûteuses. Pour se prémunir de ces circonstances très défavorables, le meilleur moyen est de disposer d'une capacité de production de réserve à partir de gaz.

Relier les batteries de véhicules au réseau dans les deux sens ?

Par exemple, en ordre de grandeur : 20 millions de véhicules électriques pouvant mettre chacun 40 kWh à la disposition du réseau, cela fait 800 GWh de capacité de stockage. Lorsque ces batteries s'ajoutent aux 240 GWh de Steps et de flexibilité de la production hydraulique, ils diminuent le besoin de capacité de production pilotable de 8 GW et la capacité d'électrolyse de 0,9 GW. L'apport de ces batteries de véhicules diminue les dépenses totales *hors batteries* de production d'électricité 1000 €/an, soit 2,7 euro par kWh et par an – c'est-à-dire à peu près dix fois moins que le coût d'une batterie stationnaire.