

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

L'objet de l'étude : deux des services rendus par les batteries

- Aider à rapprocher à chaque instant la fourniture d'électricité et la consommation pour mieux tirer parti des possibilités de production éolienne et photovoltaïque
- Contribuer à diminuer le besoin de capacités de production pilotables.

Le premier service se mesure en TWh/an ; le second se mesure en GW.

Les batteries rendent aussi d'autres services, hors du champ de ce étude cf. *in fine*.

Le cas des batteries de véhicules est également abordé en fin de note.

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 dont les valeurs sont différentes mais qui sont de même nature : une puissance de charge et une autre de décharge (en kW), *une contenance* (ou capacité, en kWh), un taux de perte et, naturellement 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.

Cette étude compare les dépenses totales du système électrique français sans compter les dépenses de batteries dans une hypothèse sans batteries et une autre avec les batteries. La différence est la valeur du service rendu par les batteries ; celle-ci est alors comparée au coût des batteries.

Résultats : 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 ». La valeur du service rendu par ces batteries *s'ajoutant à ce qui existe déjà* est inférieure à 15 % de leur coût.

Discussion : 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.

Cette étude suppose que la consommation française a ou bien n'a pas une priorité d'accès au nucléaire. Dans le premier cas, l'étude utilise un logiciel SimelSP3 qui est publié et simple d'usage. Dans le deuxième cas c'est plus compliqué car l'exportation d'électricité, limitée par la capacité des lignes d'interconnexion, a un effet sur les prix en France et hors de France qui, eux-mêmes ont un effet sur les exportations. L'étude utilise SimelSP4. Toutes les hypothèses retenues ici sont publiées.

Cette étude pourrait être faite à l'échelle européenne.

Dans de nombreuses situations des acteurs individuels, professionnels ou consommateurs (ceux-là pouvant également stocker) ont intérêt à se doter de moyens de stockage alors que, globalement, cela augmente les dépenses totales. Les causes de cet écart pourraient être analysées en étudiant « qui paie quoi ».

Le plan

- 1- Les batteries sont une composante d'un ensemble appelé ici le « stockage au sens large »
- 2- Si la consommation en France a une priorité d'accès au nucléaire
- 3- Si la consommation en France ne bénéficie pas d'une priorité d'accès au nucléaire
- 4- Du point de vue de l'économie nationale, pourquoi donc des batteries ?

1- 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.

2- Si la consommation en France a une priorité d'accès au nucléaire

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](#) et ici, le détail des hypothèses

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 spécifiquement d'une éventuelle flexibilité de la consommation. L'effet de cette flexibilité est semblable à celui des batteries.

Il n'y a pas d'importation d'électricité. La consommation en France a une priorité d'accès au potentiel nucléaire. *En fin de note, est abordé le cas où les exportations seraient libres dans la limite de la capacité des interconnexions*

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 que 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 une quantité d'électricité 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).

Le coût annualisé de 1 kWh de batteries est **26,32 €** : investissement : 240 €/kWh ; durée de vie 12 ans ; sans tenir compte des frais fixes annuels ; taux d'actualisation : 4,5 %. Le cas particulier du branchement bidirectionnel des batteries de véhicule est abordé à la fin de la note.

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

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.

Quelques résultats

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. La valeur du service rendu par les batteries est 38 €/kWh/an, supérieure à son coût.

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. La valeur du service rendu par les batteries est 4 €/kWh, moins du cinquième 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. La valeur du service rendu par les batteries est égale au dixième de leur coût.

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
Dépenses sans compter le coût des batteries	M€/an	61168	59241	59255	59052	58764	58628
Valeur du service rendu par les batteries	M€/an		1927		202		136
Valeur du service rendu par les batteries	€/kWh/an		38,53		4,05		2,72

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

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 1,7 GW. Les excédents augmenteraient très peu et le besoin de capacité pilotable serait à peine réduits.

Au total, la valeur du service rendu par les batteries est très faible : 3,0 €/kWh/an, alors que leur coût est, pour rappel, 26 €/kWh/an.

Une capacité de 50 GWh augmenterait les dépenses de plus d'un milliard d'euros par an.

Batteries / Steps / flexibilité hydraulique	GWh	0 / 90 / 150	50 / 90 / 150
Capacité de l'électrolyse pour P2G2P	GW	2,2	1,7
Diminution du besoin de capacité pilotable	GW	15,2	16,0
Quantité restituée par le « stockage »	TWh/an	8,8	9,2
Production à partir de gaz apporté au système	TWh/an	0,00	0,00
Possibilités de production excédentaires	TWh/an	53	55
Dépenses sans compter le coût des batteries	M€/an	58296	58147
Valeur du service rendu par les batteries	M€/an		150
Valeur du service rendu par les batteries	€/kWh/an		2,99

3- Si la consommation en France ne bénéficie pas d'une priorité d'accès au nucléaire

Les effets de la « libéralisation » des exportations d'électricité nucléaire

Si la consommation d'électricité en France a une priorité d'accès au nucléaire français, seules peuvent être exportées des quantités d'électricité qui ne peuvent pas être consommées en France ; ces exportations n'ont donc pas d'effet sur le prix sur le marché français. En revanche, si les exportations sont libres, elles ont pour effet d'élever le prix de marché (en augmentant le nombre d'heures pendant lesquelles la production à partir de gaz ou le déstockage est « marginale » donc détermine le prix de marché). Les importations d'éolien et de photovoltaïque augmentent, ce qui a tendance à abaisser le prix de marché en France. L'augmentation des exportations d'électricité nucléaire en remplacement d'électricité produite à partir de gaz abaisse le prix dans les pays d'importation. Les exportations montent alors jusqu'à un niveau qui rapproche les prix en France et hors de France. Néanmoins, ces exportations sont évidemment limitées par la capacité des interconnexions.

La simulation rend compte de cela en supposant qu'un pourcentage du potentiel de production nucléaire et mis à la disposition de la consommation hors de France. Ce pourcentage est ajusté pour que les prix moyens annuels en France et hors de France soient égaux. Cf. ici [le fonctionnement de SimelSP4](#)

Comparaison de deux situations sans batteries ou avec 50 GWh de batteries

La capacité des interconnexions est 40 GW – contre 30 GW aujourd'hui.

Les hypothèses

Dans les deux cas la demande finale en France hors pertes de réseau est de 570 TWh, la capacité des STEP et la flexibilité de la production des lacs est de 240 GWh, la capacité nucléaire de 60 GW *librement accessible* à la consommation hors de France. La production d'électricité produite à partir de gaz apporté au système est de 12,53 TWh seulement – par exemple avec 20 TWh th de biométhane.

Sans batteries : cela est possible avec 70 GW d'éolien sur terre et 20 GW en mer, 140 GW de photovoltaïque et une capacité d'électrolyse de 35 GW pour produire, par P2G2P, 30 TWh.

Les exportations sont alors de 133 TWh ; les importations d'électricité éolienne et photovoltaïque sont 221 TWh/an. Elles tirent les prix vers le bas ce qui a pour effet d'augmenter les exportations. Le prix est 77,5 €/MWh. Les STEPs et la flexibilité hydraulique permettent de diminuer le besoin de capacité pilotable de 23 GW.

Avec 50 GWh de batteries s'ajoutant aux STEPs et à la flexibilité de la production des barrages : la production par P2G2P est inférieure de 1,6 TWh et le besoin de capacité de production pilotable est inférieur de 1,5 GW. Les dépenses sans compter les dépenses de batteries sont inférieures de 180 M€/an.

La valeur du service : cette différence est une façon de calculer la valeur du service rendu par ces 50 TWh de batteries supplémentaires pour mieux utiliser le potentiel éolien et photovoltaïque diminuer le besoin de capacité pilotable : **soit 3,6 € par kWh et par an** – 15 % de leur coût.

On a vu plus haut que si la consommation française a une priorité d'accès au nucléaire et si l'on tient compte de l'existence des Steps et de la flexibilité de la production hydraulique, la valeur du service rendu par les batteries serait de 2,7 €/kWh. Cette valeur est légèrement supérieure lorsque les exportations sont libres. C'est logique ; mais elle reste très inférieure au coût des batteries.

4- Du point de vue de l'économie nationale, pourquoi donc des batteries ?

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

Notamment :

- agir comme réserve primaire pour compenser très rapidement les écarts qui apparaissent sans cesse entre la production et la consommation ; selon RTE, il suffit de peu de GW et GWh
- des batteries placées en amont d'un goulet d'étranglement sur le réseau peuvent stocker provisoirement ce que ne peut transporter la ligne, des batteries en aval déstockant au même instant avec la même puissance, ce qui équivaut à un renforcement « synthétique » de la ligne.
- 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.
- 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 nucléaires. Et 20 GW de capacité hydraulique (y compris les Steps) pilotables.
- pour répondre aux besoins en cas de longues périodes sans vent et avec peu de soleil ? Là aussi les batteries coûteraient beaucoup plus qu'une production à partir de gaz, celui-ci étant produit par P2G2P ou apporté au système. Il n'y a pas besoin d'une simulation pour s'en rendre compte. Celle-ci permet seulement de quantifier les résultats. Dans un cas étudié par ailleurs, pour pallier une très faible production éolienne et photovoltaïque pendant trois semaines, le service rendu par 50 TWh de batteries s'ajoutant aux Steps et à la flexibilité des productions hydraulique et nucléaire est d'environ 15 % du coût des batteries.

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

On retrouve souvent cette hypothèse dans la presse, présentée comme une contribution potentiellement rémunérée des propriétaires de véhicules électriques à l'équilibre des réseaux. Elle semble aujourd'hui abandonnée par RTE ; on peut comprendre pourquoi.

Par exemple, en ordre de grandeur : 20 millions de véhicules électriques pouvant mettre chacun 20 kWh à la disposition du réseau, mettraient à la disposition du réseau électrique 400 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 5 GW et la capacité d'électrolyse de 0,9 GW.

Selon notre simulation, la valeur du service rendu au réseau par ces batteries serait de 1,6 €/an par kWh de batteries. Donc de l'ordre de 30 €/an pour un véhicule ; moins encore sans doute car il faut en déduire le coût du branchement bidirectionnel au réseau, faible sans doute mais non nul.

D'ailleurs RTE ne retient plus l'hypothèse d'un branchement bidirectionnel.