

De l'utilité des batteries

Les scénarios prospectifs de production d'électricité sans émission de CO2 et avec peu de nucléaire montrent la nécessité de très importants moyens de « flexibilité » pour pallier l'intermittence de la production d'électricité éolienne et solaire. Parmi ces moyens, bien sûr, les batteries.

Il se dit souvent que les batteries des véhicules électriques pourront être utilisées. Comme elles seront « déjà payées » dans le prix d'achat du véhicule, les services qu'elles rendront au réseau électrique pourraient être, dit-on parfois, presque gratuits. Il faudra tout de même y ajouter le coût de la connexion au réseau (la transmission des commandes et des électrons). Aujourd'hui les batteries coûtent plus de 200 €/kWh. Pourquoi ne pas étudier l'hypothèse où cela coûterait dix fois moins cher de pouvoir utiliser ces batteries, soit 20 €/kWh - une annuité de 3 €/kWh ? Pourquoi ne pas étudier l'hypothèse où la moitié de la capacité des 30 millions de batteries de 80 kWh (une par véhicule électrique), soit 1200 GWh serait disponible pour aider à la gestion du réseau électrique ?

Pour ajuster à tout instant la consommation et la fourniture d'électricité, les moyens de flexibilité offrent une « puissance garantie » c'est-à-dire assurément disponible au moment où l'on en a besoin, cette puissance étant soit une capacité de production, soit une capacité de décharge de stockage, soit un report de la consommation.

Les batteries ont un débit de décharge maximum, exprimé en kW ou en mégawatts, MW, et une contenance maximum exprimée en kilowattheures, kWh, ou mégawattheures, MWh. Leur débit de décharge maximum n'est pas une puissance garantie. La puissance garantie par une batterie dépend de sa contenance, de son débit maximum et aussi – et surtout - du profil de la demande qui lui est faite. Comme c'est la contenance des batteries qui coûte cher, plus que leur débit de décharge, il est utile de connaître le rapport entre la contenance d'une batterie et la puissance qu'elle peut garantir, un rapport GWh/GW. Ce rapport dépend du profil de la demande, du parc de production *et aussi des capacités de stockage déjà installées*.

Nous étudions ici l'utilité d'une capacité (exprimée en GWh) de batteries de plus en plus importante, depuis 8 GWh jusqu'à 1400 GWh en passant par 20 GWh, 60 GWh et quelques centaines de GWh, en faisant quatre hypothèses sur leur coût, y compris les dépenses nécessaires pour y accéder et les contrôler : 300 €/kWh, 200 €/kWh, 50 €/kWh ou 20 €/kWh..

Nous partons de la situation décrite dans une étude récente où la consommation d'électricité est de 607 TWh par an, soit 650 TWh avant les pertes en ligne et où l'électricité nucléaire entre pour un peu moins de 50% de la consommation. Cette étude est [publiée ici](#).

Comme les batteries font partie intégrante du système de production et de consommation d'électricité, leur utilité ne peut s'évaluer qu'à l'aide d'un outil de simulation. On utilise ici le logiciel SimelSP publié sur www.hprevot.fr avec une note de présentation et une notice technique.

Résumé des conclusions

Des batteries peuvent remplacer une capacité production pilotable. D'autre part, comme elles aident à mieux employer les possibilités de production intermittente, elles permettent de diminuer la capacité éolienne ou photovoltaïque.

Partant d'un parc de production répondant à une demande de 607 TWh (650 TWh avant pertes en ligne) avec 50 % de nucléaire et où la seule capacité de stockage est celle des Steps, un stockage par batteries

est utile tant que la capacité des batteries est inférieure à un certain plafond. Si les batteries coûtent 200 €/kWh ce plafond est 20 GWh ; si les batteries coûtent 50 €/kWh, il est de 170 GWh ; si les batteries coûtent 20 €/kWh, il s'éloigne beaucoup, vers 1000 GWh, c'est-à-dire une partie de toute la contenance des batteries de 30 millions de véhicules électriques.

Avec les hypothèses retenues dans cette étude, une capacité disponible de 1000 GWh permettrait de diminuer la capacité de production à partir de biométhane ou de biofioul de 30 GW, la capacité éolienne de 7 GW (elle serait de 34 GW en mer au lieu de 41 GW) ou de diminuer la capacité photovoltaïque de 40 GW (72 GW au lieu de 110 GW). Mais les dépenses totales seraient supérieures à ce qu'elles seraient avec une capacité de batteries de 10 GWh si les batteries coûtent 200 €/kWh, de 170 GWh si elles ne coûtent que 50 €/MWh

| Les dépenses de production et de stockage d'électricité (hors hydraulique) en milliards d'euros par an | | | | | |
|---|-------|--------------|--------------|--------------|----------|
| La consommation finale est de 607 TWh (650 TWh avant pertes en ligne) | | | | | |
| Sans émissions de CO2, avec 50 % de nucléaire | | | | | |
| Capacité des batteries GWh | 0 | 20 GWh | 170 GWh | 1000 GWh | 1500 GWh |
| Coût des batteries | | | | | |
| 300 €/kWh | 56,06 | 55,21 | 57,42 | | |
| 200 €/kWh | 56,06 | 55,03 | 56,06 | 67,25 | |
| 50 €/kWh | 56,06 | 54,75 | 54,01 | 55,46 | 56,68 |
| 20 €/kWh | 56,06 | 54,69 | 53,60 | 53,00 | 53,19 |
| Avec 84 GW nucléaire, 20 GW éolienne, 20 GW photovoltaïque et une électrolyse de 9 GW, dépenses : 45 G€ | | | | | |

Si les batteries ou l'accès aux batteries coûtent 20 €/kWh (y compris le dispositif de gestion et de transmission), les dépenses avec 1000 GWh ne seront inférieures que de 0,6 milliards par an à ce qu'elles seraient avec 170 GWh de batteries, soit 0,7 € par an et par kWh dépassant 170 GWh.

Cela doit être mis en regard des difficultés considérables et des risques inconnus qui naîtraient de la gestion de millions de batteries dispersées et non contrôlées par le gestionnaire de réseau électrique. Et il n'est pas sûr que les propriétaires de véhicules électriques autoriseront RTE à puiser dans leurs batteries moyennant une redevance de quelques euros par an et par kWh.

Note

Dans cette simulation, les batteries ne sont déchargées que lorsque le nucléaire, avec l'éolien, le photovoltaïque et l'hydraulique, ne suffit pas à répondre à la demande. Si le nucléaire n'est appelé qu'après le stockage, celui-ci est beaucoup plus actif et la capacité éolienne ou photovoltaïque peut être moindre. Cela se traduit par des dépenses légèrement inférieures.

Nous n'avons pas retenu cette hypothèse car elle conduirait à solliciter très fréquemment des batteries *dont ce n'est pas la destination*. Prenons le cas où la capacité des batteries serait de 1000 GWh. Sur un potentiel nucléaire de 54 GW, si 34 GW n'étaient appelés qu'après les batteries, et si celles-ci étaient rechargées par de l'hydraulique, du photovoltaïque, de l'éolien et par le « socle » nucléaire de 20 GW, celles-ci connaîtraient un mouvement de charge ou de décharge autour de 4000 heures par an, c'est-à-dire près d'une heure sur deux.

Batteries et déplacements de consommation

Les reports de consommation d'électricité ont le même effet que des décharges de batteries ; de même une consommation d'électricité anticipée, tel le chauffage de l'eau d'un ballon de chauffe-eau, est équivalente à la recharge d'une batterie. D'ailleurs, les déplacements de consommation sont parfois rendus possibles par des batteries détenues par les consommateurs. L'un et l'autre se caractérisent par une « contenance »

exprimée en kWh ou en MWh et par une puissance maximum de charge ou de décharge. Par exemple le report d'une consommation pendant 2 heures d'une puissance de 3 kW est équivalent à un déstockage de 6 kWh. Lorsque cette quantité sera consommée, ce sera comme la recharge du stock. Les déplacements de consommation sont tout de même différents des batteries en ceci que l'espace de temps entre la charge et la décharge est très court : pas plus de quelques dizaines de minutes s'il s'agit d'énergie de chauffage, pas plus de quelques heures s'il s'agit de batteries de voiture ou d'électroménager (lave-linge ou lave-vaisselle). D'autre part, les batteries ont un coût ; les déplacements de consommation n'ont généralement pas de coût monétaire mais ont un « coût moral », une gêne, un souci.

Dans cette note nous ne différencions pas les batteries et les déplacements de consommation ; en conséquence les éventuels déplacements de consommation sont inclus dans les grandeurs relatives aux batteries.

Dans la suite du texte, la quantité d'énergie pouvant être stockée par les moyens de stockage est appelée « contenance » du stockage, exprimée en GWh et non « capacité » pour faire la différence avec la « capacité » des moyens de production, exprimée en GW.

Plan de la note

1- Les services rendus par le stockage

2- La situation de base, sans batteries : la consommation, le parc de production

3- Le parc de production et de stockage avec plus ou moins de batteries :

Les batteries permettent de diminuer la capacité de production à partir de gaz et la capacité de production de gaz de synthèse, ou la capacité éolienne, ou la capacité photovoltaïque

4- Une évaluation économique :

Le coût des moyens de production et de stockage ; les dépenses selon la contenance des batteries et selon que l'on diminue la capacité de production de méthane de synthèse ou la capacité éolienne, ou la capacité photovoltaïque

5- Pour conclure

Annexes

1- Les services rendus par le stockage à l'échelle de la minute, de quelques jours, de la saison

Pour fournir de l'électricité en hiver à partir d'électricité photovoltaïque produite en été, il est théoriquement possible de produire de l'hydrogène, de le stocker et de l'utiliser avec des piles à combustible. Comme l'hydrogène est difficile à stocker, une autre méthode est de l'utiliser pour produire du méthane qui sera utilisé plus tard pour produire de l'électricité ; c'est le procédé dit P2G2P. Les batteries ne peuvent pas rendre ce service.

Les batteries, s'ajoutant aux Steps, rendent deux services : d'une part, elles permettent de mieux employer l'énergie du vent et du soleil et, d'autre part, elles permettent de diminuer la capacité de production nécessaire pour répondre à la demande lorsque l'écart entre la demande et la production éolienne et photovoltaïque est grand.

1.1- Aider à passer les périodes « de pointe », donc réduire les capacités de production à partir de gaz

A l'échelle de la journée ou de quelques jours, les batteries peuvent fournir de l'électricité lorsque la demande faite aux moyens pilotables passe par un maximum ; elles diminuent donc le besoin de capacité de production pilotable. La capacité que les batteries peuvent ainsi garantir dépend non seulement du contenu effectif de l'ensemble du stockage (y compris les Steps) mais aussi de la forme de la « pointe » de la demande faite aux moyens pilotables.

L'efficacité des batteries peut donc se mesurer en comparant leur contenance, exprimée en GWh, à la diminution de la capacité des moyens pilotables, un rapport GWh/GW qui, lorsqu'il devient trop élevé,

montre que les batteries coûtent plus cher que la capacité de production qu'elles permettent d'éviter. C'est un bon indicateur, mais il n'est pas suffisant car les batteries rendent aussi un autre service.

1.2- Réduire les capacités éolienne et photovoltaïque ou la capacité d'électrolyse

Les batteries permettent aussi d'utiliser le potentiel de production de l'éolien et du solaire avec un rendement bien meilleur qu'en passant par la production de gaz de synthèse. Avec des batteries, le besoin de capacité d'électrolyse ou de capacité de production éolien et photovoltaïque sera donc moindre, ce qui diminue les dépenses. Si l'on maintient leur capacité, les batteries augmentent les possibilités de production excédentaires, pouvant être utilisées par ailleurs.

1.3 – Comparer l'ensemble des dépenses de production et de stockage

Pour évaluer l'utilité des batteries, une méthode est donc de comparer les dépenses totales de production et de stockage selon la contenance des batteries. Elles dépendent des coûts de production éolienne, photovoltaïque, nucléaire et aussi, bien sûr, du coût des batteries. Si l'on enlève de ces dépenses la valorisation des possibilités de production excédentaires, l'utilité des batteries dépend aussi du prix sur le marché de l'électricité.

C'est donc l'ensemble du système de consommation, de production et de stockage qu'il faut considérer, y compris les possibilités de valorisation des excédents. Nous utilisons ici le simulateur SimelSP publié sur www.hprevot.fr

SimelSP équilibre heure par heure la consommation et la fourniture d'électricité. Il évalue dans quelle mesure le stockage permet de mieux utiliser les possibilités de production éolienne et photovoltaïque et donne le moyen d'évaluer le service qu'elles rendent pour « passer la pointe ».

Une présentation du simulateur figure en annexe.

2- La situation de base, sans batterie

Dans cette étude la situation de base est celle qui est décrite dans l'étude mentionnée plus haut.

La consommation

On se place dans une perspective de « neutralité carbone ». Pour y parvenir, il faudra avoir ramené à zéro la consommation française d'énergie fossile qui est aujourd'hui de 1200 TWh par an, sous forme de carburant, de fioul et de gaz. Selon la SNBC, Stratégie nationale bas carbone, la consommation d'énergie devrait avoir été divisée par deux, et la consommation d'électricité serait en 2050 de 530 TWh par an, soit 70 TWh seulement de plus qu'aujourd'hui.

Dans son exercice de prospective pour 2050, RTE retient cette hypothèse. Mais elle laisse perplexe car elle impliquerait notamment de mettre tous les logements existants à la norme BBC (Bâtiment à basse consommation) comme les logements neufs d'aujourd'hui. Ce serait la cause de très grosses dépenses sans aucun effet sur les émissions de CO₂.

Selon une hypothèse réaliste, avec de gros efforts d'économie d'énergie et une utilisation massive de pompes à chaleur et de moteurs électriques pour la mobilité, la consommation finale d'électricité serait de 650 TWh par an. Néanmoins, pour ne pas nous écarter trop des hypothèses de RTE nous retenons ici comme hypothèse de base que la consommation d'électricité sera de 607 TWh par an, soit 650 TWh par an *avant les pertes en ligne*.

Le profil horaire de la consommation est semblable à celui de l'année 2013. Nous nous référons aussi au profil de consommation de l'année 2012 qui a connu un pic « historique ».

Le parc de production et de stockage

La production est « 50 % nucléaire » et sans émission de CO₂.

L'utilisation de biométhane est limitée à la production de 2 TWh par an.

La capacité nucléaire est de 54 GW.

La capacité éolienne est de 30 GW sur terre et 41 GW en mer

La capacité photovoltaïque est de 110 GW, dont 80 % sont posés sur le sol.

La production hydraulique et à partir de biomasse est de 60 TWh par an

La capacité de stockage est celle des Steps, soit 90 GWh pouvant fournir au maximum 5 GW. Dans la situation de base, il n'y a pas de batteries.

La capacité de l'électrolyseur pour produire du gaz de synthèse est de 21 GW.

La capacité de production à partir de gaz est de 57,5 GW – en l'absence de batteries – dont 25,6 GW de CCG et 32 GW de TAC. Cette capacité est suffisante pour répondre à ce que serait une consommation annuelle de 607 TWh par an dont le profil horaire serait semblable à ce que fut la consommation d'électricité sur l'ensemble de la période 2012 à 2017, et en supposant que l'activité éolienne soit la même que celle que l'on a connue sur cette période.

Pour plus de précisions sur les facteurs de charge des moyens de production et sur leur coût, voir l'étude référencée.

3- Le parc de production et de stockage avec plus ou moins de batteries

3.1- Les batteries permettent de diminuer la capacité de production à partir de gaz

On suppose que la contenance des batteries (en GWh) augmente progressivement pour pouvoir garantir une puissance qui augmente à chaque fois de 5 GW, jusqu'à 40 GW.

Pourquoi 40 GW ? Parce que cette performance conduit à une capacité de batteries qui est environ la moitié de celle de toutes les batteries de 30 millions de véhicules électriques. Cela ne préjuge certes pas qu'il soit possible ou souhaitable de brancher toutes ces batteries sur le réseau !

Sur l'ensemble de la période de 2012 à 2017, une des épisodes les plus critiques est le 9 février 2012 à 8 heures. La demande est forte et l'activité éolienne est de 12 à 15 % de la puissance nominale. Le 17 janvier 2013 autour de 8 heures, la demande est plus faible mais l'activité éolienne encore plus basse.

Il se trouve que dans les deux cas, le rapport entre la contenance des batteries et la capacité qu'elles peuvent garantir pendant la pointe est du même ordre – voir en annexe..

Prenons le cas du 17 janvier 2013, que l'on retrouve avec la version de SimelSP qui est publiée.

La contenance des batteries permettant d'augmenter la capacité garantie par les stockages

Sans batteries, la contenance du stockage est de 90 GWh et la capacité garantie de 5 GW.

| | | | | | | | | | |
|-----------------|---|-----|----|----|-----|-----|-----|------|--|
| Capac. garantie | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | |
| Batteries GWh | 0 | 8,2 | 23 | 60 | 170 | 540 | 980 | 1450 | |

Si l'on imagine que la contenance des batteries augmente à partir de zéro, dans un premier temps elles permettront de mieux tirer parti de la contenance des Steps (90 GWh), dont la puissance de décharge est de 5 GW, c'est-à-dire insuffisante pour utiliser tout leur contenu.

Cela s'explique : avec le développement de l'éolien et du photovoltaïque, les pointes de qui est demandé aux moyens de stockage sont beaucoup plus étroites. Une capacité, comme ici de 5 GW, fournit donc beaucoup moins d'électricité qu'auparavant.

Pour porter à 10 GW la capacité garantie, il suffit que les batteries apportent 5 GW pendant les quelques heures de pointe. Pour cela leur capacité doit être 8,2 GWh. Le rapport (GWh de batterie) sur (augmentation de la puissance garantie) est de 1,6 : il suffit de 1,6 GWh pour apporter 1 GW, ce qui est favorable.

Pour porter la capacité garantie par les stockages à 20 GW, leur contenance doit être 150 GWh. Les batteries doivent donc avoir une contenance de 62 GWh. Les Steps sont alors complètement employées.

Pour que le stockage garantisse 35 GW, les batteries devraient avoir une contenance de 1000 GWh.

Il suffit de 15 GWh pour faire passer la capacité garantie par les stockages de 10 GW à 15 GW. Il faut 30 ou 40 GWh pour la faire passer de 15 à 20 GW ; et entre 400 et 500 GWh pour la faire passer de 30 à 35 GW.

3.2- Les batteries permettent de diminuer la capacité de production de gaz de synthèse

Comme le rendement de charge et décharge d'une batterie (85 %) est bien meilleur que celui du procédé P2G2P (25 %), une augmentation de la capacité des batteries sans changer le parc de production permet de diminuer la capacité de production de gaz de synthèse et les pertes.

On suppose ici que l'augmentation de la contenance des batteries s'accompagne d'une diminution de la capacité d'électrolyse sans modification des capacités éolienne et photovoltaïque. Les pertes diminuent et les possibilités excédentaires augmentent.

Si la contenance des batteries est de 20 GWh, la capacité de l'électrolyse est de 19 GW, soit 1 GW de moins que sans batteries.

Avec 1000 GWh de batteries, la capacité de l'électrolyse est de 13 GW.

3.3- Les batteries permettent de diminuer la capacité photovoltaïque

Ici, lorsque la contenance des batteries augmente, la capacité de l'électrolyse reste égale à 20 GW, la capacité éolienne ne change pas non plus et la capacité photovoltaïque diminue de façon que la production à partir de biogaz reste égale à 1,9 TWh par an.

Les 60 premiers GWh de batteries permettent de diminuer la capacité photovoltaïque de 13 GW. Les 110 GWh suivants permettent de la réduire encore de 6 GW. Avec 1000 GWh de batteries, la capacité photovoltaïque pourrait passer de 110 GW à 74GW soit une diminution de 36 GW.

3.4- Les batteries permettent de diminuer la capacité éolienne

Lorsque ce qui est demandé aux moyens pilotables (batteries et production à partir de gaz) passe par un maximum, il y a toujours plus ou moins de vent. Donc les batteries, en diminuant la capacité des éoliennes, augmentent la puissance qui est demandée aux moyens pilotables, c'est-à-dire la production à partir de gaz et les batteries. On peut en tenir compte, surtout lorsqu'il y a beaucoup de batteries.

Les premiers 60 GWh de batteries permettent de diminuer la capacité éolienne en mer de 2,1 GW. Avec les 110 GWh suivants celle-ci diminue encore de 1 GW. Une capacité de batteries de 1100 GWh permet d'éviter 7 GW d'éoliennes en mer sur les 41 GW du parc de production de base.

3.5- Le mouvement de charge et décharge des stockages, heure par heure

Même si la capacité du stockage est dix fois supérieure à la capacité actuelle des Steps, elle permet de diminuer assez peu la capacité éolienne ou photovoltaïque.

C'est contraire à l'idée intuitive que l'on a parfois du rôle du stockage, qui se chargerait le jour et se déchargerait la nuit ou bien.

En réalité – faut-il le rappeler ? – un stockage peut recevoir une possibilité de production excédentaire que s'il n'est pas déjà chargé et il ne restituera de l'électricité que si deux conditions sont ensemble réunies : le stockage n'est pas vide et les moyens de production ne répondent pas à la demande.

Le mouvement du stockage est décrit à grands traits en annexe dans l'hypothèse de 1000 GWh de batteries avec une capacité éolienne sur terre de 30 GW et sur mer de 34 GW et en supposant qu'il est fait appel au déstockage lorsque les capacités éoliennes, photovoltaïque hydraulique et nucléaires ne suffisent pas à répondre à la demande.

Le cycle de charge pendant le jour et décharge pendant la nuit n'apparaît que dans les intersaisons. En été les stockages sont pleins ; en hiver ils ont du mal à se charger pendant la journée. On voit aussi que les stockages, aussi volumineux soient-ils, se vident vite dans les périodes peu ventées.

4- Une évaluation économique

Une évaluation économique doit tenir compte des dépenses de batteries et des économies réalisées sur les capacités de production à partir de gaz, du vent et du soleil. Si l'augmentation de la contenance des batteries s'accompagne d'une diminution de la capacité éolienne ou photovoltaïque, les quantités excédentaires sont à peu près constantes. Pour comparer les dépenses, il est donc inutile d'en tenir compte.

Le coût des batteries

Pour l'évaluation économique le coût des batteries inclut celui de l'ensemble du dispositif qui permet de les mettre à la disposition du réseau électrique. S'agissant des batteries de véhicules électriques, y sont inclus le coût des transmissions d'électricité et de commandes, une redevance versée aux propriétaires, le coût des risques de dysfonctionnement, y compris les piratages et autres sabotages.

Nous retenons ici quatre hypothèses : 300 €/kWh ou 200 €/kWh comme aujourd'hui. Quatre fois moins, soit 50 €/kWh et dix fois moins, soit 20 €/kWh.

Le coût des moyens de production et de la méthanation

| | nucléaire | éolien sur terre | éolien en mer | Photovoltaïque sur sol | Photovoltaïque sur toiture | méthanation | à partir de gaz CCG | pointe | Thermiques EnR |
|------------------------------|-----------|---------------------|------------------|---------------------------|-------------------------------|-------------|---------------------------|--------|-------------------|
| investissement €/kW | 5000 | 1190 | 2460 | 550 | 875 | 1500 | 730 | 400 | 3000 |
| Raccordement au réseau €/kW | | 160 | 700 | 80 | 80 | | | | |
| durée de vie années | 60 | | 25 | | 25 | 25 | 15 | 20 | 30 |
| frais fixes annuels. €/kW/an | 110 | 40 | 100 | 15 | 30 | 30 | 40 | 30 | 25 |
| frais variables €/MWh | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 40 | 67 | 80 |
| euros/MWh | 64,5 | 56,6 | 94,7 | 45,0 | 76,7 | | | | |

Pour l'éolien et le photovoltaïque les hypothèses de coût hors raccordement sont celles que RTE retient, pour l'élaboration de ses scénarios pour 2035.

Le résultat des calculs selon le coût des batteries

Les combinaisons entre la contenance des batteries en GWh, la capacité des moyens de production éolienne, photovoltaïque et à partir de gaz sont multiples.

Comme l'objectif le plus visible des batteries est d'aider à « passer la pointe », les quelques combinaisons décrites ici sont classées en fonction de la capacité qui peut être garantie par les batteries. Il est bien entendu que ce n'est pas une capacité de décharge : c'est la capacité qui peut être garantie aussi longtemps qu'il en est besoin lorsque la puissance demandée aux moyens pilotables passe par une pointe.

Nous nous référons ici aux situations les plus tendues au vu des chroniques de consommation et d'activité éolienne de l'année 2013. Il en existe certainement d'autres qui sont plus exigeantes.

La seule chose sûre est que les valeurs indiquées ci-dessous pour la contenance des batteries sont certainement inférieures à la réalité.

Les tableaux ci-dessous récapitulent les principaux résultats de cette étude : le volume des batteries, la diminution de la capacité des moyens de pointe, les capacités de production d'électricité selon que les batteries autorisent de baisser la capacité éolienne ou la capacité photovoltaïque, et les dépenses.

La première ligne des tableaux suivants indique la capacité de production à partir de gaz pouvant être évitée grâce aux batteries, c'est à dire la puissance garantie par les batteries, s'ajoutant aux 5 GW que peuvent délivrer les Sptes

L'examen des chroniques horaires de ce qui est demandé aux moyens pilotables montre ce que doit être la contenance des batteries. On introduit cette grandeur et l'outil de simulation SimelSP calcule la production à partir de gaz ; on règle la capacité éolienne ou bien la capacité photovoltaïque ou bien la capacité de l'électrolyseur pour que la production à partir de gaz soit de 1,9 TWh.

SimelSP calcule alors les possibilités de production excédentaire et les dépenses de production et de stockage hors l'hydraulique. Et il donne une description complète, heure par heure, des mouvements de production par moyen de production, de stockage et de déstockage.

La consommation est 650 TWh avant les pertes en ligne. Sans batteries, la capacité nucléaire est de 54 TWh, la production hydraulique et à partir de biomasse est de 66 TWh, la capacité éolienne de 30 GW sur terre egt 41 GW en mer, la capacité photovoltaïque est 110 GW, la capacité d'électrolyse pour du P2P est 20 GW.

La production à partir de biométhane est de 2 TWh.

Lorsque les batteries permettent de diminuer la capacité de production de méthane de synthèse

| GW garantis par les batteries | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 |
|--|-----------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|--------------|-------------|
| Batteries GWh | 0 | 8 | 23 | 60 | 170 | 630 | 980 | 1450 |
| Capacité d'électrolys GW | 20 | 19,7 | 19,1 | 18,2 | 16,8 | 14,2 | 13,1 | 12,1 |
| Possibilités excéd. TWh | 79 | 80,3 | 82,2 | 85 | 90 | 99 | 103 | |
| Dépenses de production et stockage G€/an | | | | | | | | |
| Batteries à 300 €/kWh | 56,06 | 56,1 | 56,29 | 56,7 | 58,3 | | | |
| Batteries à 200 €/kWh | 56,06 | 56,06 | 56,11 | 56,27 | 56,94 | | | |
| Batteries à 50 €/kWh | 56,06 | 56,0 | 55,8 | 55,54 | 54,90 | 55,70 | 56,55 | 57,96 |
| Batteries à 20 €/kWh | 56,06 | 56,0 | 55,8 | 55,40 | 54,49 | 54,19 | 54,19 | 54,47 |

Lorsque les batteries permettent de diminuer la capacité des éoliennes en mer

| GW garantis par les batteries | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 |
|--|-----------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-----------|
| Batteries GWh | 0 | 8 | 23 | 60 | 170 | 630 | 1100* | 1600* |
| éolienne en mer GW | 41 | 39,8 | 39,4 | 38,9 | 37,9 | 35,5 | 34 | 33 |
| Possibilités excéd. TWh | 79,3 | 77 | 76,7 | 76 | 74,1 | 69,6 | 66,9 | 65,1 |
| Dépenses de production et stockage G€/an | | | | | | | | |
| Batteries à 300 €/kWh | 56,06 | 55,49 | 55,33 | 55,67 | 57,62 | | | |
| Batteries à 200 €/kWh | 56,06 | 55,43 | 55,15 | 55,19 | 56,26 | 62,51 | 69,20 | 79,51 |
| Batteries à 50 €/kWh | 56,06 | 55,33 | 54,87 | 54,47 | 54,21 | 54,93 | 55,96 | 57,26 |
| Batteries à 20 €/kWh | 56,06 | 55,31 | 54,82 | 54,33 | 53,80 | 53,41 | 53,31 | 53,40 |

* Lorsque la contenance des batteries est très grosse, la capacité éolienne diminue beaucoup. Alors, au moment où le stockage est sollicité, l'apport des éoliennes est moindre ; cela est sensible même si le vent souffle peu. Pour garantir la même capacité (en GW), le calcul de la contenance des batteries doit en tenir compte.

Lorsque les batteries permettent de diminuer la capacité photovoltaïque

| GW garantis par les batteries | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 |
|--|------------|------------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-------------|
| Batteries GWh | 0 | 8 | 23 | 60 | 170 | 630 | 980 | 1450 |
| Photovoltaïque GW | 110 | 101 | 100 | 97 | 91 | 79 | 74 | 69,5 |
| Possibilités excéd. TWh | 79,3 | 70,2 | 69,6 | 66,8 | 61 | 49,7 | 45,2 | 41 |
| Dépenses de production et stockage G€/an | | | | | | | | |
| Batteries à 300 €/kWh | 56,06 | 55,31 | 55,21 | 55,53 | 57,42 | 67,38 | | |
| Batteries à 200 €/kWh | 56,06 | 55,25 | 55,03 | 55,04 | 56,06 | 62,32 | 67,25 | 74,14 |
| Batteries à 50 €/kWh | 56,06 | 55,15 | 54,75 | 54,33 | 54,01 | 54,74 | 55,46 | 56,68 |
| Batteries à 20 €/kWh | 56,06 | 58,13 | 54,69 | 54,18 | 53,60 | 53,22 | 53,00 | 53,19 |

5- Pour conclure,

1- Les batteries permettent de diminuer la capacité de production à partir de gaz

Lorsque les batteries contribuent à passer la pointe de la demande faite aux moyens pilotables, elles remplacent une capacité de production à partir de gaz qui serait utilisée seulement quelques heures ou dizaines d'heures par an. Elles sont intéressantes à ce titre si le rapport entre le nombre de GW évité et la contenance de la batterie en GWh est supérieure à un seuil qui dépend du coût de la batterie. Ce seuil est de 0,5 environ si la batterie coûte 200 €/kWh.

Lorsque leur contenance augmente, les batteries servent d'abord à bien tirer parti des possibilités des Steps. Puis le rapport GW garanti/GWh de batterie chute terriblement : pour passer d'une capacité garantie par les batteries de 15 à 20 GW, il faut augmenter la contenance des batteries de 90 GWh.

2- Les batteries permettent aussi de diminuer la capacité de production de gaz de synthèse, des éoliennes et du photovoltaïque

Avec nos hypothèses, si l'on dispose de batteries en quantité, il est moins intéressant de diminuer la capacité de production de méthane de synthèse que de diminuer la capacité des éoliennes ou du photovoltaïque.

Si les batteries coûtent 200 €/MWh, elles sont intéressantes si leur capacité est inférieure à 23 GWh.

Si les batteries coûtent seulement 50 €/kWh, elles permettent de diminuer les dépenses si elles ne dépassent pas 170 GWh. Alors les dépenses sont inférieures de 2 milliards d'euros par an à ce qu'elles seraient avec quelques GWh de batteries.

Dans l'hypothèse d'école où elles ne coûteraient que 20 €/kWh, avec 1000 GWh de batteries les dépenses seraient inférieures de seulement 0,6 milliards d'euros à ce qu'elles seraient avec seulement 170 GWh de batteries. L'avantage apporté par 830 GWh de batteries serait donc de 600 millions d'euros par an soit 0,7 €/kWh/an.

Il est probable que les dépenses techniques nécessaires pour pouvoir accéder aux batteries personnelles et les gérer soient supérieures à 20 € par kWh accessible à tout instant. Supposons qu'elles soient à ce niveau.

Alors, un automobiliste qui mettrait à la disposition du réseau électrique la moitié de la contenance d'une batterie de 80 kWh pourrait recevoir l'importante gratification de 30 € par an.

Si la capacité des batteries était de 170 GWh, les dépenses seraient inférieures de 1 milliard d'euros par an à ce qu'elles seraient avec seulement 20 GWh de batteries accessibles avec une dépense de 20 € par kWh. Un automobiliste qui mettrait à disposition 40 kWh pourrait donc recevoir une prime de 300 € par an. Insuffisante sans doute pour le convaincre.

Pour finir, notons qu'en quelques clics on calcule qu'avec un parc de production fait de 20 GW d'éoliennes sur terre, 20 GW de photovoltaïque, 84 GW de nucléaire et une électrolyse de 9,5 GW, les dépenses annuelles seraient de 45,04 milliards d'euros, soit 8 milliards d'euros de moins qu'avec un parc « 50 % nucléaire » et 1000 ou 1400 GWh de batteries à 20 €/kWh.

Annexe 1

Comment utiliser le logiciel de simulation SimelSP pour étudier l'utilité des batteries

Bien utiliser les possibilités de production éolienne et photovoltaïque

SimelSP distingue les moyens de production « de base » et les moyens « pilotables ». Les moyens de base sont l'hydraulique, l'éolien, le photovoltaïque, le nucléaire et la partie non pilotable de la production à partir de biomasse. Les moyens pilotables sont la partie pilotable de la production à partir de biomasse et la production à partir de gaz, CCG et TAC, et aussi l'effacement définitif.

Lorsque les possibilités de production éolienne, photovoltaïque et hydraulique ne suffisent pas à répondre à la demande, SimelSP fait d'abord appel au nucléaire, puis au déstockage, puis à une production pilotable à partir de biomasse et de gaz, en commençant par les CCG.

Lorsque les moyens de production de base dépassent la demande, la différence sert en priorité à recharger les stocks puis, lorsque ceux-ci sont pleins, à alimenter l'électrolyseur dans la limite de sa capacité. Les possibilités excédentaires sont utilisées à l'exportation ou d'autres façons, dans la limite de la capacité d'utilisation.

Pour éviter les émissions de CO₂, le gaz consommé est du gaz de synthèse ou, à défaut, du biométhane.

Selon une variante non publiée de SimelSP, lorsque les possibilités de production éolienne, photovoltaïque et hydraulique ne suffisent pas, il est fait appel en priorité au déstockage, puis au nucléaire. Les possibilités de production nucléaire non employées directement pour répondre à la demande alimentent l'électrolyseur. Au total, les réacteurs nucléaires sont moins sollicités, les batteries et le procédé de méthanation ont davantage sollicités. Les possibilités de production excédentaires sont moindres. Au total, la différence de dépenses entre les deux options est inférieure à 2 %

Diminuer la capacité de production à partir de gaz qu'il faut pour « passer les pointes »

Selon cette simulation, les stocks ne sont pas alimentés par de l'électricité produite à partir de gaz. Dans la réalité il en est différemment puisque les stocks sont gérés de façon à pouvoir diminuer la capacité des moyens de production pilotables à partir de gaz. Ils doivent être suffisamment remplis au moment où l'on en a besoin même si, pour cela, il faut avoir consommé du gaz. SimelSP ne simule pas cette façon de gérer les stocks mais donne toutes les informations utiles pour le faire.

Il donne la chronique horaire de ce qui est demandé au déstockage et à la production à partir de gaz. Si la capacité de production à partir de gaz est inférieure à ce qui est demandé en pointe, SimelSP calcule heure par heure les quantités d'électricité qui doivent être déstockées ; la somme de ces quantités indique ce que doit être la contenance du stockage par batterie. Il suffit de faire ce calcul sur les situations qui sollicitent le plus le stockage pour connaître la relation entre la contenance (en GWh) d'un stockage et la capacité (en GW), qu'il peut garantir.

SimelSP indique, d'une part, le nombre d'heures dans l'année pendant lesquelles le stockage a reçu de l'électricité excédentaire et, d'autre part, le nombre d'heures où il a fourni de l'électricité à la consommation pour remplacer une production à partir de gaz. Il indique aussi les quantités d'électricité correspondantes.

Dans la réalité, le gestionnaire des stocks tient compte aussi du prix de l'électricité sur le marché. Comme celui-ci fluctue pour de multiples raisons, les mouvements de stocks sont plus nombreux que ne le dit SimelSP. Du fait des pertes de charge et décharge, ces fluctuations augmentent le besoin de production d'électricité à partir de gaz fossile ou de biométhane.

Annexe 2

Relation entre la contenance d'un stockage, en GWh et la capacité qu'il peut garantir en GW**Deux situations tendues, l'une en 2013 et l'autre en 2012**

La relation entre la contenance d'un stockage et la capacité qu'il peut garantir se fait en examinant les chroniques horaires de ce qui est demandé aux moyens de production pilotables.

Il suffit d'observer ainsi les quelques situations qui sollicitent le plus ces moyens.

Voici deux cas : les chroniques de consommation et d'activité éolienne le 17 janvier 2013 autour de 8 heures et le 9 février 2012 autour de 8 h.

Si la puissance écrêtée est de 3 GW ou plus, la période pendant laquelle il y a écrêtement s'étend sur 48 heures ou plus.

Ces deux exemples suffisent à montrer à quel point le rapport (augmentation en GWh de contenance) / (augmentation en GW de capacité garantie) augmente.

Pour garantir une capacité en GW de (1^{ère} colonne) la puissance apportée par les batteries doit être de (4^{ème} colonne). La contenance des stocks doit être de (5^{ème} colonne pour le 17 janvier 2013 ou 7^{ème} colonne pour le 9 février 2012). Si la contenance des stocks est inférieure à la contenance des Steps (3^{ème} colonne), la contenance des batteries est celle qui leur permet de délivrer la puissance attendue d'elles. Par exemple, 8,2 GWh de batteries permettront d'apporter 5 GW en « pointe de la pointe » ; le contenu des Steps sera suffisant pour qu'elles apportent 5 GW le temps qu'il faut pour, au total, écrêter de 10 GW la demande. Si la contenance des stocks nécessaire à l'écrêtement souhaité est supérieure à la contenance des Steps, la contenance des batteries est la différence entre les deux (6^{ème} ou 8^{ème} colonnes).

| Pour garantir une capacité de | Les Steps | | Capacité garantie par les batteries | Le 17 janvier 2013 | | | Le 9 février 2012 | | |
|-------------------------------|-----------|-----|-------------------------------------|---------------------------------------|----------------|--------------------------|---------------------------------------|----------------|--------------------------|
| | | | | La contenance des stocks doit être de | Dont batteries | GWh en plus / GW en plus | La contenance des stocks doit être de | Dont batteries | GWh en plus / GW en plus |
| | GW | GWh | | GW | GWh | GWh | | GWh | GWh |
| 5 | 5 | 90 | 0 | 8,2 | 0 | | 6,9 | 0 | |
| 10 | 5 | 90 | 5 | 23 | 8,2 | 1,6 | 21,4 | 6,9 | 1,4 |
| 15 | 5 | 90 | 10 | 53 | 23 | 3 | 51,5 | 21,4 | 2,8 |
| 20 | 5 | 90 | 15 | 150 | 60 | 7,4 | 152 | 62 | 8,2 |
| 25 | 5 | 90 | 20 | 260 | 170 | 22 | 344 | 254 | 38 |
| 30 | 5 | 90 | 25 | 630 | 540 | 74 | 580 | 490 | 48 |
| 35 | 5 | 90 | 30 | 1070 | 980 | 88 | 1095 | 1004 | 100 |
| 40 | 5 | 90 | 35 | 1540 | 1450 | 100 | 1805 | 1715 | 140 |

Annexe 3

Un exemple de chronique horaire de charge et décharge des batteries avec 1000 GWh de batteries

On se base ici sur la chronique horaire de consommation et d'activité éolienne de l'année 2013.

La consommation est 607 TWh, soit 650 TWh avant les pertes en ligne.

Avec 1000 GWh de batteries et 90 GWh de Steps, 54 GW nucléaire, 30 GW d'éolien sur terre et 34 GW mer et 110 GW de photovoltaïque.

La capacité maximum de charge et de décharge des batteries et des Steps est de 40 GW. La capacité de l'électrolyse pour produire du gaz de synthèse est de 20 GW.

La quantité produite à partir de gaz de synthèse est de 20 TWh. Les possibilités excédentaires sont de 67 TWh.

Lorsque la puissance demandée aux moyens pilotables est forte, les batteries et les Steps peuvent garantir ensemble jusqu'à 40 GW. Elles interviennent ainsi pendant 650 h en une vingtaine d'épisodes ; les quantités écartées en un an sont de 4,9 TWh.

Si le stockage est sollicité seulement lorsque l'on en a vraiment besoin

Il est fait appel au déstockage lorsque la capacité de production hydraulique, éolienne, photovoltaïque *et nucléaire* ne suffit pas à répondre à la demande

Les batteries et les Steps se chargent 1440 heures par an. Au total elles reçoivent 17 TWh.

Les stocks sont pleins au 1^{er} janvier car ils sont rapidement rechargés à la fin décembre. S'ils ne sont pas rechargés par de l'électricité produite à partir de gaz, ils sont vides le 6 janvier. Ils se rechargent à partir du 27 janvier et sont vides à nouveau le 11 février. Puis on voit une alternance entre des périodes de charge le jour et de décharge la nuit. Le 9 avril, les stocks sont pleins et ne seront pas sollicités jusqu'à la fin du mois d'août. En septembre ils sont appelés 80 heures (sur 7200 heures). Puis on retrouve des décharges pendant les heures de nuit et des recharges pendant la journée.

Le 15 novembre, les stocks sont pleins. Puis intervient une période de faible activité éolienne au cours de laquelle les 64 GW d'éolienne fournissent pendant trente heures entre 3 et 7 GW. Les quantités en stock chutent de 800 à 200 GWh. Après une nouvelle période de vent relativement faible, les stocks sont vides avant la fin novembre. Puis on retrouve une alternance journalière entre charge et décharge avec un niveau de stock bas. Celui-ci remonte à la moitié au 20 décembre et, pendant la semaine des confiseurs, les stocks se remplissent complètement.

Sur cette chronique se greffent, on l'a dit, des mises en stock pour se préparer à passer une pointe de la demande faite aux moyens pilotables. Cela n'interviendra qu'une vingtaine de fois dans l'année.

Si le stockage est sollicité alors que le nucléaire pourrait fournir

Supposons que le nucléaire fournisse au minimum 20 GW et que, au-delà, il n'est appelé que lorsque les stockages sont vides. Le stockage se recharge avec l'éolien, le photovoltaïque, l'hydraulique et le nucléaire « de base ». Alors, les stockages se chargent 2040 heures par an et se déchargent 2500 heures. Ils reçoivent 43 TWh et restituent 35 TWh. Le stock en début d'année est vide. Il est plein seulement une centaine d'heures chaque année et vide la moitié du temps (4500 heures). Il commence à se remplir mi-avril puis respire chaque jour de façon assez régulière jusqu'à mi de septembre. A partir de novembre, il est très souvent vide jusqu'à la fin de l'année.