

Comment le stockage d'électricité, la gestion de l'eau des lacs et des fleuves,
et les déplacements de consommation diminuent les besoins de capacité de production

Le stockage de l'électricité et la flexibilité de la consommation devraient permettre de diminuer le besoin de capacité de production à partir de gaz et le besoin d'importation.

Les déplacements de consommation d'électricité et la modulation de la production d'électricité hydraulique autour de sa valeur moyenne ont le même effet que les mouvements de charge et de décharge des moyens de stockage tels que Steps¹ et batteries. On regroupe ici l'ensemble sous le terme de « *stockage* ».

Des logiciels très élaborés peuvent simuler un grand nombre d'hypothèses sur la consommation, le parc de production et toutes sortes d'aléas. Un logiciel simplifié permet néanmoins d'obtenir des résultats significatifs. Celui qui est utilisé ici (qui est publié) permet d'étudier ses propres hypothèses et montre heure par heure comment évoluent les productions et les charges et décharges de ce stockage.

Quelques résultats

- L'efficacité du stockage diminue très vite lorsqu'il s'ajoute à une capacité de stockage existante. Pourtant, quelques dizaines de GWh de batteries et de déplacements de consommation seront très efficaces car elles permettront de mieux utiliser les possibilités des Steps et des lacs de montagne, aujourd'hui sous-employées – cette étude permet de le mesurer.
- Pour cet hiver, des déplacements de consommation, en tirant pleinement parti de la capacité des Steps (en GWh), peuvent diminuer de 4 à 5 GW le besoin de capacité de production pilotable ou d'importation.

Note : cette étude a été réalisée avant l'hiver 2022-2023 pendant lequel la capacité nucléaire était réduite

- A moyen et long terme, si la flexibilité des lacs est portée à 100 GWh, selon la capacité nucléaire de 20 à 50 GWh de batteries abaisseront le besoin de capacité de production de 7 à 20 GW. Le rapport GW évités/GWh de batteries et de flexibilité de la consommation sera compris entre 0,3 et 0,4.
- La baisse du besoin de capacité de production à partir de gaz rendue possible par des batteries est plus grande avec 40 GW nucléaire qu'avec 75 GW nucléaire ; néanmoins, le besoin de capacité de production à partir de gaz est supérieur avec 40 GW nucléaire.
- Pour un système électrique qui refuserait le nucléaire, la valeur des lacs français est de 3 milliards d'euros par an.

Tous les moyens de « *stockage* » (au sens large) offrent aussi d'autres services. En particulier, ils permettent de mieux utiliser l'énergie du vent et du soleil pour répondre à la demande finale d'électricité. Ce service est d'autant plus utile lorsque les excédents sont peu valorisés.

1 Une step, station de transfert d'énergie par pompage, est un dispositif formé d'un bassin haut, d'un bassin bas de pompes et de turbines produisant de l'électricité qui font passer l'eau d'un bassin à l'autre

Le plan de la note

- 1- Ce que l'on entend ici par « stockage » ; la question étudiée ici
- 2- Les moyens de flexibilité : Steps, contribution de l'hydraulique, flexibilité de la demande (déplacement de la consommation et effacements définitifs)
- 3- La méthode utilisée pour faire la relation entre la capacité de stockage et la diminution du besoin de capacité de production à partir de gaz et d'importation.
- 4- Quatre exemples
 - 4.1- Premier exemple d'application : consommation finale de 630 TWh avec 40 GW nucléaire : avec la capacité de stockage actuelle ; en la complétant pour bien tirer parti du potentiel des Steps ; ou pour pouvoir tirer parti des possibilités de flexibilité de la production hydraulique,
 - 4.2- Deuxième exemple : même situation que dans le premier exemple mais avec 75 GW nucléaire au lieu de 40 GW
 - 4.3- Troisième exemple : consommation finale de 630 TWh ; sans nucléaire
 - 4.4- Quatrième exemple : une situation proche de la situation actuelle.
- 5- Conclusion :

Annexes :

- des tableaux de résultats avec deux hypothèses de chroniques horaires contrastées de consommation et d'activité éolienne.
- la valeur économique de la flexibilité de la production hydraulique
- La valeur des lacs pour un système électrique sans nucléaire.
- un schéma montrant l'utilité d'un stockage qui s'ajoute à des stockages existants.

1- Le stockage tel qu'on l'entend ici – l'objet de cette étude

Le stockage

Le système électrique doit répondre à une demande variable dans le temps et le parc de production comporte des éoliennes et du photovoltaïque qui ne sont pas pilotables. Plusieurs moyens permettent d'équilibrer à tout instant la fourniture d'électricité et la consommation. On distingue ici deux types de moyens :

- d'une part une capacité de production pilotable à partir de gaz (ou de fioul) et les importations
- d'autre part un ensemble de moyens qui, comme les batteries et les Steps, ont chacun une capacité exprimée en GWh (gigawattheures ; une quantité d'électricité) et une puissance maximum exprimée en GW (gigawatts). On appelle ici *cet ensemble de moyens* une capacité de « *stockage* ». On y trouve les batteries et les Steps, la flexibilité de la production hydraulique et la flexibilité de la consommation -cf. *infra* « les composantes du stockage ».

Une capacité de stockage permet de diminuer le besoin de capacité de production à partir de gaz et d'importation ; ce service se mesure en GW.

Elle permet aussi de mieux tirer parti des possibilités de production éolienne et photovoltaïque qui, sans elle, seraient excédentaires. Ce service se mesure en TWh/an ; il cela sera pris en compte lorsque sera évalué l'intérêt économique du stockage.

Le procédé P2G2P qui permet de produire de l'électricité à partir d'un gaz de synthèse produit à l'aide d'hydrogène lui-même produit par électrolyse sépare le moment où l'électricité est produite et celui où elle est consommée. En cela il semble fournir le même service qu'une batterie par exemple. Mais il en diffère en ceci qu'il n'est pas soumis à une limite qui lui est propre de quantité d'électricité. On ne le retient donc pas ici comme un moyen de stockage. D'ailleurs, il ne diminue pas le besoin de capacité de production à partir de gaz et d'importation.

Les questions étudiées

Supposant que la flexibilité des lacs peut être de 100 GWh, quelle doit être la capacité des batteries et des déplacements de consommation pour tirer pleinement parti de cette possibilité ?

La question est étudiée pour une même consommation finale avec trois hypothèses de capacité nucléaire et deux hypothèses sur le profil horaire de la consommation et de l'activité éolienne.

Serait-il utile de pousser la flexibilité des lacs jusqu'à 200 GWh ?

Pour l'hiver qui vient et le suivant, à partir de la situation actuelle, quelle peut être l'efficacité des déplacements de consommation pour abaisser le besoin de capacité de production à partir de gaz ou d'importation ?

Lorsque l'on utilise le stockage pour tirer au mieux parti des possibilités de production éolienne et photovoltaïque, il est déchargé avant les autres moyens de flexibilité et il n'est pas rechargé avec de l'électricité produite à partir de gaz ou de fioul. En revanche, pour que le stockage contribue autant que possible à la puissance garantie par le système, il faut qu'il soit chargé avant qu'on ait besoin de le décharger, même si la recharge se fait avec de l'électricité produite à partir de gaz ou de fioul.

2- Les composantes du « stockage »

Ce que l'on entend communément comme stockage : les batteries et les Steps

Une step, station de transfert d'énergie par pompage, est un dispositif formé d'un lac haut et d'un lac bas, d'une pompe pour faire passer l'eau du lac bas vers le lac haut lorsque les possibilités de production d'électricité sont excédentaires et d'une turbine produisant de l'électricité en cas de besoin. La capacité des Steps, lorsque les bassins haut sont pleins est 89 GWh ; la puissance maximum de turbinage est 4,5 GW.

On suppose ici que la puissance de décharge des batteries est telle qu'elles peuvent complètement se décharger en moins d'une heure.

La contribution de l'hydraulique

La production hydraulique de fleuve dépend bien sûr du débit des fleuves. Mais elle peut être modulée dans une certaine mesure pour tenir compte des besoins. Selon la chronique horaire de l'année 2013, cette modulation par rapport à la production moyenne (qui est en hiver de 5,8 GW) est équivalente au stockage et déstockage d'une capacité de 6,4 GWh pouvant fournir jusqu'à 1 GW.

De même, au vu de la chronique horaire de la production d'électricité par les lacs, on considère ici que celle-ci a une composante stable égale à la moyenne des production horaires en hiver, soit 3 GW, et une composante modulable qui a le même effet qu'un mouvement de charge et de décharge d'un stock de 10 GWh pouvant fournir jusqu'à 3 GW.

Au total, l'hydraulique apporte une flexibilité semblable à celle d'une batterie ou d'une Step de 16,4 GWh pouvant fournir 4 GW.

La flexibilité de la demande : déplacements et effacements définitifs

Lorsque les possibilités de production autres que la production à partir de gaz sont insuffisantes, une partie de la demande peut s'effacer définitivement ou se déplacer c'est-à-dire être différée ou anticipée en référence à ce qu'elle serait si elle ne cherchait pas à s'adapter aux possibilités de production. L'effacement définitif est possible dans la limite d'une puissance maximale. Il a le même effet sur le système électrique qu'une capacité de production. Le déplacement est possible dans la limite d'une puissance maximale et d'une quantité exprimée en MWh ou GWh, maximale.

L'effacement définitif : par exemple en remplaçant l'électricité par du (bio)fioul ou du (bio)méthane ou par du (bio)carburant avec un chauffage ou un véhicule hybride ; ou en utilisant des groupes électrogènes d'appoint.

Le déplacement de la consommation : il s'apprécie en comparaison avec un profil de consommation de référence ; par exemple, si l'on se réfère au profil de consommation d'une année récente, utiliser un chauffe-eau n'est pas vraiment un déplacement de consommation ; en revanche différer le fonctionnement du lave-linge ou couper le chauffage pendant un quart d'heure sont des déplacements de consommation.

Les effacements qui font l'objet de contrats passés avec des établissements industriels sont des déplacements de consommation ou de véritables effacements selon que la consommation totale d'électricité est maintenue ou diminuée.

Les possibilités de déplacement sont assimilées à une possibilité de stockage : différer la consommation pendant une demie-heure de 2 kW équivaut au déstockage de 1 kWh ; soit 20 GWh si 20 millions de foyers procèdent ainsi.

3- La méthode utilisée ici

La méthode utilisée ici permet de calculer ce que doit être au minimum la contenance du stockage (en GWh) pour qu'il diminue d'une quantité donnée (en GW) le besoin de capacité de production pilotable à partir de gaz (ou de fioul) ou d'importation.

Le logiciel de simulation du système de production d'électricité et d'hydrogène SimelSP2 a été complété par une nouvelle feuille consacrée au calcul de la capacité de stockage (en GWh) permettant de baisser le besoin de capacité de production (en GW) à partir de gaz et d'importation, comme le souhaite l'utilisateur du logiciel. La version ainsi complétée est SimelSP3. Les deux versions sont publiées. Elles proposent plusieurs profils horaires de consommation et de production éolienne ; il est facile d'y introduire tout autre profil horaire de consommation.

On introduit dans ce simulateur une chronique horaire de consommation avant les déplacements et les effacements et, éventuellement, les capacités d'effacement définitif (en GW).

On introduit aussi le parc de production nucléaire, éolien et photovoltaïque et la production annuelle des lacs et des fleuves.

L'utilisateur indique la diminution du besoin de capacité de production à partir de gaz (et de fioul) et d'importation (en GW) qui doit être rendue possible par les moyens de stockage (au sens large indiqué plus haut).

Le simulateur calcule ce que doit être la capacité totale, en GWh, des moyens de stockage. Il indique seulement la capacité totale, car on ne peut pas attribuer à tel ou tel moyen de stockage tout ou partie de la baisse du besoin de capacité de production.

L'utilisateur répartit ensuite la capacité indiquée entre les composantes du stockage tel qu'il est entendu ici : les déplacements de consommation, les batteries, les Steps et la flexibilité de la production des fleuves et des lacs. L'utilisateur introduit aussi les durée de charge et décharge de chacune de ces composantes, ce qui définit la limite technique de puissance de décharge.

La baisse de besoin de capacité ainsi calculée peut être largement inférieure à la somme des limites techniques de décharge des différentes composantes du stockage ; dans la réalité, elle ne peut pas lui être supérieure.

Comment procède l'outil de simulation

Les calculs sont faits sur la feuille « stockage » ; il se servent de données figurant sur la feuille 1.

L'utilisateur introduit sur la feuille1 la baisse du besoin de capacité de production à partir de gaz et d'importation, Pgar – appelée ainsi car elle a à peu près le même effet qu'une puissance garantie. Le simulateur calcule (feuille 1) ce que devrait être la capacité de production à partir de

gaz sans la baisse rendue possible par le stockage ; c'est P_{max} Le simulateur calcule alors la capacité de production à partir de gaz : $P_{max}-P_{gaz}$.

La possibilité de production « de base » P_{base} est, heure par heure, la somme de la possibilité de production nucléaire, éolienne, photovoltaïque et de la moyenne horaire glissante sur une durée de trois semaines de la production des fleuves et des lacs. La production de base est la production effective de ces moyens.

Sur la feuille 1 est calculée (colonne O) la demande faite aux Steps, aux batteries, aux déplacements de consommation, à la flexibilité de l'hydraulique et au gaz : P_{manq} .

L'utilisateur introduit la capacité du stockage de chaque moyen (en GWh) et la limite de puissance de charge et décharge. L'utilisateur indique aussi le contenu du stockage en début de période. Il est ajusté pour que le contenu en fin de période soit égal au contenu en début de période.

Le simulateur calcule heure par heure la possibilité de recharge du stockage : c'est la différence entre d'une part la possibilité totale de production (somme de la possibilité de production de base et de la possibilité de production à partir de gaz) et d'autre part la production effective de base et à partir de gaz. La quantités rechargées sont limitées par la capacité totale du stockage (en GWh)

Il faut déstocker lorsque P_{manq} est supérieur à la capacité à partir de gaz. Le déstockage est donc: $P_{décharge} = P_{manq} - (P_{max} - P_{gaz})$.

Les résultats sont faussés si la capacité de stockage (en GWh) n'est pas supérieure à ce qui est calculé et si la puissance maximum de charge et décharge est incohérente avec la capacité du stockage. L'utilisateur modifie donc la capacité du stockage en conséquence.

Le principe de la méthode :

Pour qu'une capacité de stockage (en GWh) rende possible une certaine diminution du besoin de capacité de production (en GW), le stockage doit pouvoir combler le manque de production sur un laps de temps indéfini, étant entendu que le stockage peut se recharger plus ou moins pendant ce laps de temps. Il convient donc de vérifier qu'il permet de répondre à la demande sur des laps de temps allant de l'heure au mois, voire au semestre dans le cas extrême où la production serait essentiellement photovoltaïque.

Le simulateur calcule donc les $P_{décharge}$ heure par heure et en fait la somme glissante sur deux heures, ou sur 3 h, ou sur 6 h, 12 h, 17 h, 24 heures, 3 jours, ou une semaine, 2 ou 3 ou 4 ou 5 ou 8 semaines ou 12 semaines, ou sur 4 mois, 5 mois, 6 mois, 7 mois ou 8 mois. Les valeurs trouvées augmentent puis plafonnent. Ce plafond indique ce que doit être la capacité du stockage.

Si l'on recherche une certaine diminution du besoin de capacité de production à partir de gaz et d'importation, exprimée en GW, une capacité du stockage exprimée en GWh égale au maximum maximorum permet de diminuer effectivement cette diminution de capacité comme souhaité.

Le simulateur peut étudier des situations très diverses avec plus ou moins de nucléaire et d'énergie renouvelable, y compris des hypothèses extrêmes telles qu'un parc de production formé seulement de nucléaire ou d'éolien.

Par exemple, la consommation, la capacité nucléaire et les possibilités de production hydraulique et à partir de bioénergie étant données, l'outil de simulation permet de trouver les combinaisons les moins coûteuses d'éolien (sur terre et en mer), de photovoltaïque, de production à partir de gaz de synthèse, de production d'hydrogène en base (moins la pointe) ou sur excédents, de capacité de batteries et de déplacement de consommation.

Avec un simple ordinateur de bureau, ce calcul de la contenance de stockage (en GWh) en fonction de la baisse de besoin de capacité de production (en GW) à partir de gaz et d'importation qu'il rend possible *ne demande que quelques secondes*.

4- Quelques exemples

4.1- Premier exemple

Consommation finale de 630 TWh (hors pertes en ligne) ; 40 GW de nucléaire.

4.1.1 Les profils horaires de consommation et d'activité éolienne sont ceux de l'année 2013.

A la consommation finale de 630 TWh s'ajoute une consommation de 100 TWh prise sur les possibilités de production excédentaires pour produire 1,9 million de tonnes d'hydrogène.

Le parc de production : nucléaire : 40 GW ; éolien : 37 GW sur terre et 49 GW en mer ; photovoltaïque : 180 GW ; production hydraulique : 52 TWh . Production à partir de biométhane : 20 TWh.

Le facteur de charge de l'éolien est de 2200 h/an sur terre, de 3900 h/an en mer ; celui du photovoltaïque est 1200 h/an.

La production annuelle à partir de gaz fossile ou importée est de 24 TWh Les possibilités de production excédentaires sont de 184 TWh.

Avec seulement les Steps, le besoin de capacité de production à partir de gaz et d'importation est de 70,5 GW. Nous nous intéressons ici à la diminution de ce besoin rendue possible par le stockage et les déplacements de consommation.

La baisse de capacité de production rendue possible par le stockage

Utiliser pleinement la capacité des Steps

Nous détaillons dans cet exemple les étapes du raisonnement qui montre à quel point les batteries et les déplacements de consommation sont efficaces lorsqu'ils permettent de bien tirer parti des possibilités de stockage existantes et à quel point, au-delà, ils sont pratiquement inutiles. Un graphique illustrant ce raisonnement est en annexe.

Première étape

Les Steps *et la flexibilité* de la production hydraulique telle qu'observée aujourd'hui, en tout 105 GWh, ne peuvent pas délivrer plus de **8,5 GW**, limite des possibilités de turbinage des Steps et des lacs (qui, rappelons-le, débitent aussi 3 GW « en base »).

Or le simulateur indique qu'un stockage pouvant contenir 105 GWh pourrait baisser le besoin de capacité de production de 23,1 GW.

Pour tirer pleinement parti de la capacité de stockage existante, il faudrait donc trouver 14,5 GW. Le simulateur calcule que ce serait possible avec une capacité de stockage de 35 GWh. Ce peut être des batteries ou des déplacements de consommation.

Deuxième étape

Cette capacité additionnelle porte la capacité de stockage à 139 GWh, ce qui diminue le besoin de capacité de production de 25,2 GW. Encore faut-il que le stockage puisse fournir cette puissance. Comme les Steps, les barrages et les fleuves ne peuvent fournir que 8,5 GW, les batteries et la flexibilité de la consommation doivent pouvoir fournir 17,7 GW. Leur capacité doit être de 48 GWh. C'est 13 GWh de plus que dans l'étape précédente pour diminuer le besoin de capacité de production de 3,2 GW de plus.

Au total, 48 GWh de batteries et de déplacement de consommation diminuent le besoin de capacité de production de 17,7 GW. Le rapport GWévité/GWh est de 0,35.

Troisième étape

Supposons que l'on veuille encore abaisser le besoin de capacité de production à partir de gaz en augmentant la capacité de stockage. Ajoutons donc 30 GWh de batteries. La capacité totale du

stockage passe de 138 GWh à 168 GWh. A ce niveau, elle diminue le besoin de capacité de production à partir de gaz de 26,8 GW, soit 1,6 GW de plus qu'avant d'ajouter ces 30 GWh. Le rapport GWévité/GWh est de 0,05.

Si l'on considère seulement les Steps, les déplacements de consommation et les batteries, on voit donc une limite très nette qui borne le domaine où batteries et déplacements de consommation sont efficaces pour diminuer le besoin de capacité de production. En deçà, ils sont très efficaces ; au-delà, ils sont pratiquement inutiles.

Dans cet exemple, c'est 33 GWh ; on peut aller plus loin en cherchant à mieux exploiter le potentiel des lacs de montagne.

Mieux employer le potentiel des lacs de montagne

La contribution des lacs de montagne à l'équilibre du réseau est limitée par la puissance de turbinage. Avec le développement des productions intermittentes, la demande faite aux moyens pilotables connaîtra des pointes beaucoup plus aiguës. Si les lacs, avec les fleuves et les Steps sont appelés « en haut de la pointe », du fait de leurs limites en puissance ils apporteront peu de GWh. Ils pourront en apporter beaucoup plus si, en haut de la pointe, sont appelés des batteries.

Reprenons les deux premières étapes ci-dessus.

Première étape

Supposons qu'il soit possible, pour équilibrer le réseau, de prélever sur les lacs jusqu'à 100 GWh de plus que la production horaire moyenne des lacs avant de prélever 100 GWh de moins. Avec les Steps (89 GWh) et la flexibilité de la production des fleuves (6 GWh), la capacité du stockage (au sens où nous l'entendons dans cette étude) sera alors de 195 GWh. Cette capacité diminue le besoin de capacité de production de **28,3 GW** à condition, bien sûr, que le stockage puisse fournir en pointe 28,3 GW, c'est à dire 19,8 GW de plus que les capacités de turbinage modulable de 8,5 GW des Steps, fleuves et lacs.

Cette puissance supplémentaire peut être apportée par 56 GWh de batteries et de déplacement de consommation qui seront appelés « en pointe ». La capacité totale du stockage (y compris les Steps et la flexibilité des lacs et des fleuves) sera alors 251 GWh ; cette capacité diminue le besoin de capacité de production de 30,5 GW. Mais, avec 56 GWh de batteries et de déplacement de consommation, le stockage ne pourra pas fournir plus de 28,3 GW.

Deuxième étape

Les Steps, les barrages et les fleuves ne peuvent fournir que 8,5 GW. Pour que l'ensemble des moyens de stockage puisse fournir 30,5 GW, il faudrait que les batteries et la flexibilité de la consommation apportent, en pointe, 22 GW. Il en faudrait 86 GWh, soit 30 GWh de plus que les 56 GWh qui permettent de fournir 28,3 GW. 30 GWh pour éviter 2,2 GW, le rapport GWévité/GWh n'est que de 0,08, beaucoup trop bas pour être économiquement intéressant même – on peut voir en annexe une approche économique.

Il vaut donc mieux limiter à 56 GWh la capacité des batteries et des déplacements de consommation ; le besoin de capacité de production est diminué de 19,8 GW ; le rapport GWévité/GWh est égal à 0,35.

4.1.2 : les profils horaires de consommation et d'activité éolienne sont ceux de l'année 2012

Supposons comme ci-dessus que la flexibilité des lacs soit de 100 GWh.

Alors la capacité totale du stockage (89 GWh de Steps, 6 GWh de flexibilité des fleuves et 100 GWh de flexibilité des lacs) est de 195 GWh. Elle permet d'abaisser le besoin de capacité de production de 22,9 GW. C'est **13,6 GW de plus** que la capacité de turbinage (qui est de 8,5 GW). Cette puissance peut être apportée par **47 GWh** de batteries et de flexibilité de la consommation.

Le rapport GWévité/GWh est de 0,29.

4.2- Deuxième exemple :

Consommation finale de 630 TWh (hors pertes en ligne) ; 75 GW de nucléaire.

4.2.1 les profils horaires de consommation et d'activité éolienne sont ceux de l'année 2013

Comme dans l'exemple précédent, la consommation finale de 630 TWh a le profil horaire de la consommation de l'année 2013.

Le parc de production : nucléaire : 75 GW ; éolien : 20 GW sur terre et 10 GW en mer ; photovoltaïque : 30 GW ; production hydraulique : 52 TWh . Production à partir de biogaz : 20 TWh.

La production annuelle à partir de gaz fossile ou importée est de 19 TWh. Les possibilités excédentaires sont de 60 TWh.

Sans modifier la flexibilité des lacs

La limite en puissance du déstockage est 8,5 GW. Or une possibilité de stockage de 105 GWh (y compris la flexibilité de la production hydraulique) permettrait d'éviter 13,4 GW, soit 4,9 GW de plus. Il serait possible d'apporter cette différence avec 11 GWh qui seraient appelés « en pointe ».

Ainsi, sans augmenter la flexibilité des lacs, une capacité de batteries et de déplacement de consommation de 11 GWh diminue le besoin de capacité de production à partir de gaz et d'importation de 4,9 GW. Le rapport GW évité/GWh est de 0,44.

Un complément de stockage est donc utile. Mais la baisse de besoin de capacité de production qu'il rend possible (ici 4,9 GW) est moindre qu'avec beaucoup d'électricité intermittente comme dans l'exemple précédent. Ce résultat est assez intuitif ; la simulation permet de le quantifier.

En tirant mieux parti de la flexibilité des lacs

Ici aussi, supposons que l'on veuille faire en sorte que la flexibilité des lacs puisse apporter 100 GWh. La capacité totale de stockage est alors de 195 GWh. Elle pourrait diminuer le besoin de capacité de production de 15,1 GW. Ce sera effectivement possible si des batteries et des déplacements de consommation apportent 6,6 GW. Pour cela leur capacité doit être de 18 GWh.

Ainsi l'apport de 18 GWh de batteries et de déplacements de consommation au système existant abaisserait le besoin de capacité de production de 6,6 GW : un rapport de GWévité/GWh de 0,37.

4.2.2 les profils horaires de consommation et d'activité éolienne sont ceux de l'année 2012

Si l'on peut tirer parti d'une flexibilité des lacs de 100 GWh, la capacité de stockage est de 195 GWh. Elle abaisse le besoin de capacité de production de 15,9 GW. Cela ne sera possible que si des batteries et déplacements de consommation apportent 7,4 GW. Leur capacité est de 21 GWh. Le rapport GWévité/GWh est ici de 0,35.

4.3- Troisième exemple : Consommation finale de 630 TWh (hors pertes en ligne) ; sans nucléaire

Cette hypothèse sans nucléaire serait, pour la France un cas d'école ; c'est un cas réaliste pour l'Allemagne, fort intéressée par les barrages français. Il n'est donc pas inutile d'imaginer qu'un système électrique à la dimension de celui de la France, sans nucléaire, cherche à tirer parti au mieux de la capacité des lacs de barrages.

4.3.1 les profils horaires de consommation et d'activité éolienne sont ceux de l'année 2013

Comme dans les exemples précédents, la consommation finale est de 630 TWh.

Le parc de production : il n'y a pas de nucléaire ; éolien : 80 GW sur terre et 100 GW en mer ; photovoltaïque : 450 GW ; production hydraulique : 52 TWh . Production à partir de biogaz : 20 TWh. Une capacité d'électrolyse de 25 GW permet de produire 30 TWh avec du gaz de synthèse (procédé P2G2P). La production d'électricité à partir de méthane fossile ou d'importation est de 7TWh.

Les possibilités excédentaires sont importantes ; on peut supposer qu'elle sont valorisées par la production d'hydrogène et la production de chaleur à stocker.

Pour utiliser pleinement une plus grande flexibilité de la production des lacs

Supposons que la flexibilité des lacs puisse être équivalente à une capacité de stockage de 100 GWh. Avec les Steps (89 GWh) et la flexibilité de la production des fleuves (6 GWh), la capacité du stockage serait de 195 GWh. Cette capacité permettrait d'abaisser le besoin de capacité de production à partir de gaz et d'importation de 33,4 GW. Or aujourd'hui, les Steps, les lacs et les fleuves ne peuvent pas délivrer plus de 8,5 GW. Il faut donc des batteries (et des déplacements de consommation) qui, appelées « en haut de la pointe », puissent baisser le besoin de capacité de production de 24,9 GW. Leur capacité est de 78 GWh. La capacité totale de stockage est alors de 274 GWh.

Elle pourrait diminuer le besoin de capacité à partir de gaz et d'importation de 38,5 GW, soit 30 GW de plus que la puissance des lacs, fleuves et Steps si la capacité des batteries et des déplacements de consommation est de 140 GWh. Il faudrait donc 62 GWh de plus pour gagner 5,1 GW. Le rapport GWévité/GWh de ce complément de batterie est donc de 0,08, trop bas pour être intéressant.

En conséquence, 78 GWh de batteries et déplacements de consommation abaissent le besoin de capacité de production de 24,9 GW. Le rapport GWévité/GWh est de 0,31

4.3.2 les profils horaires de consommation et d'activité éolienne sont ceux de l'année 2012

Avec les profils horaires de consommation et d'activité éolienne de l'année 2012, une capacité de stockage de 195 GWh permettrait de diminuer le besoin de capacité de production de 22,5 GW – beaucoup moins qu'avec le profil de consommation et de vent de l'année 2013. Pour que cette diminution soit effective, il faudra que les batteries et déplacement de consommation apportent 14 GW. Pour cela leur capacité doit être de 68 GWh. Le rapport GWévité/GWh est de 0,21.

Eviter ainsi le besoin de 14 à 30 GW de capacité de production avec seulement 70 ou 80 GWh de batteries, ce serait évidemment fort intéressant pour un pays qui a décidé de ne pas avoir de nucléaire. En annexe, on verra une ébauche de calcul économique qui donne aux lacs de barrage une valeur de 3,6 milliards d'euros par an.

4.4- Quatrième exemple : proche de la situation de l'hiver 2022-2023

La consommation finale est 430 GWh. Il n'est pas possible d'augmenter sensiblement la capacité de stockage par batterie mais il est possible d'augmenter les déplacements de consommation et d'amplifier la modulation de la production des lacs pour diminuer le besoin de capacité de production à partir de gaz et d'importation.

La capacité nucléaire est de 52 GW. La capacité éolienne sur terre est 19 GW ; la capacité photovoltaïque est 13 GW. La production hydraulique et bioénergie est de 67 TWh par an . La production en cogénération est 10 TWh.

Pour mieux employer la capacité des Steps et de l'hydraulique, des déplacements de consommation

La capacité des Steps et la flexibilité de la production hydraulique forment un stockage de 105 GWh ; pour des raisons techniques, il ne peut fournir que 8,5 GW.

Supposons que la capacité des batteries et l'ampleur des déplacements de consommation puissent atteindre en tout 5 GWh. Peu importe, on l'a dit, de distinguer l'un de l'autre puisque les deux offrent le même service ; d'ailleurs des déplacements de consommation peuvent être rendus possibles par des batteries chez le consommateur.

5 GWh de déplacement de consommation, c'est par exemple le déplacement de la consommation de 1 kWh pendant une demi-heure par 10 millions de consommateurs.

Avec le profil horaire de consommation et d'activité éolienne de l'année 2013

Ces possibilités de déplacement de consommation, placés « en pointe » permettent d'éviter une capacité de production 3,5 GW. Avec les 8,5 GW des steps, fleuves et lacs, cela fait 12 GW. Pour que cette puissance soit effectivement fournie par l'ensemble du stockage, la capacité de celui-ci doit être de 240 GWh. Outre les 5 GWh de déplacement de consommation, les 89 GW de Steps et les 6 GWh de la flexibilité des fleuves, la flexibilité des lacs devra apporter 140 GWh

Avec le profil horaire de consommation et d'activité éolienne de l'année 2012

Avec le profil de consommation et d'activité éolienne de l'année 2012, 5 GWh de possibilité de déplacement de consommation apporteraient 3,8 GW. Avec les 8,5 GW des steps, lacs et fleuves, cela ferait 12,3 GW. Cette baisse sera effective si la capacité totale du stockage est 190 GWh. La flexibilité des lacs devra alors apporter 100 GWh.

Est-il utile de chercher à augmenter les déplacements de consommation au-delà de 5 GWh ?

Supposons que les déplacements de consommations soient de 10 GWh. Situés en pointe, avec le profil de consommation de l'année 2013, ils apportent 4,4 GW. Avec les 8,5 GW de capacité de turbinage, cela fait 12,9 GW. La diminution du besoin de capacité de production à partir de gaz sera effective si le stockage peut fournir 305 TWh, c'est-à-dire si la flexibilité des lacs peut apporter 210 GWh - c'est-à-dire 200 GWh fournis en dépassement de leur production moyenne avant de produire moins que leur production moyenne.

Il faudrait 60 GWh de plus pour éviter 1 GW de plus. Ce ne sera sans doute pas possible

Quoi qu'il en soit, pour les hivers qui viennent, associés à la flexibilité des lacs, les déplacements de consommation sont donc très utiles.

5- Conclusion

Les moyens de stockage d'électricité, les possibilités de déplacement de consommation et la flexibilité de la production hydraulique doivent être considérés ensemble. Ils permettent de

diminuer, ensemble, le besoin de capacité de production d'électricité à partir de gaz et d'importation.

Avec le parc de production d'électricité qui était celui de la France sans éoliennes ni photovoltaïque, les déplacements de consommation suscités par les tarifications EJP et Tempo, la flexibilité de l'hydraulique et les capacités de turbinage des Steps, des lacs et des fleuves étaient équilibrées. La puissance croissante de l'éolien et du photovoltaïque a rompu cet équilibre. Il est désormais possible de tirer un meilleur parti des volumes d'eau contenus dans les lacs et les Steps en augmentant leur capacité de turbinage ou en ajoutant des batteries et des possibilités de déplacements de consommation.

La relation entre la capacité de stockage additionnelle, en GWh, (y compris les déplacements de consommation) et la capacité, en GW, des moyens de production qu'elle permet d'éviter dépend entre autre du profil du parc de production d'électricité. Elle dépend aussi, mais assez peu du profil horaire de la consommation et de l'activité éolienne.

Dans cette étude nous avons considéré plusieurs situations : celle de la France pendant l'hiver 2022-2023 ; celles où la consommation finale serait de 630 TWh et où la capacité nucléaire serait de 40 GW ou 75 GW et aussi une situation où la capacité nucléaire serait nulle – cas d'école pour la France mais réaliste dans d'autres pays européens.

Pour l'hiver prochain

Pour l'hiver prochain, une possibilité de déplacement de consommation permettra de mieux utiliser non seulement le potentiel des Steps mais aussi celui des lacs et des fleuves. 5 GWh de possibilité de déplacement pourraient diminuer le besoin de capacité de production ou d'importation de 4 ou 5 GW selon le profil horaire de la consommation et de l'activité éolienne.

L'intérêt économique du stockage ; la valeur du service rendu par les batteries

Pour le moyen terme, l'intérêt économique du stockage peut se mesurer en comparant les dépenses totales de production d'électricité et d'hydrogène avec plus ou moins de stockage. Lorsque le stockage augmente, le besoin de capacité de production à partir de gaz diminue ; le stockage permet de mieux utiliser les possibilités de production éolienne et photovoltaïque, ce qui diminue à la fois la consommation à partir d'énergie fossile et les possibilités de production excédentaires, qui seront sans doute assez mal valorisées.

Pour évaluer le service rendu par les batteries, on compare les dépenses totales sans compter le coût des batteries. Lorsque la capacité des batteries augmente, ces dépenses diminuent, mais de moins en moins vite. La valeur marginale du service rendu par les batteries, qui se mesure en comparant la diminution de dépenses à l'augmentation de la capacité des batteries, devient inférieure au coût des batteries lorsque leur capacité est de 50 à 100 GWh. Alors la contribution au stockage demandée aux lacs est inférieure à 100 GWh – voir en annexe.

Avec peu de nucléaire, le stockage abaisse davantage le besoin de capacité de production

Pour abaisser le besoin de capacité de production à partir de gaz, l'action conjointe des batteries et déplacements de consommation d'une part, de la flexibilité des lacs d'autre part est plus efficace lorsque la capacité des éoliennes et du photovoltaïque est plus grande. Cela compense partiellement le fait que, dans ce cas, le besoin de capacité de production à partir de gaz est plus grand.

A l'échelle française, sans nucléaire, des batteries permettant de mieux utiliser le potentiel hydraulique éviteraient une dépense de 3 milliards d'euros par an – voir en annexe. On comprend l'intérêt pour nos barrages montré par les producteurs d'électricité d'autres pays qui ont refusé le nucléaire.

De possibles prolongements à cette étude

Cette étude a été commencée sans autre objectif que d'utiliser la nouvelle version de l'outil de simulation SimelSP3 qui, comme la précédente, intègre la production d'électricité et la production d'hydrogène, et qui calcule la relation entre le stockage d'électricité et le besoin de capacité de production à partir de gaz qu'il permet d'éviter. Puis les premières simulations ont montré comment de nouvelles capacités de stockage sous forme de batteries pourraient permettre de mieux tirer parti des capacités des Steps existantes ; puis il est apparu possible, avec des capacités plus importantes de batteries, d'utiliser les grosses quantités d'eau contenues dans les lacs de montagne - de quoi produire 2500 GWh d'électricité : les lacs ne sont pas seulement, comme on a parfois tendance à le dire, un stockage « intersaisonnier » : ils peuvent être fort utiles pour répondre aux besoins du système électrique sur des périodes de quelques jours.

Puis s'est imposée l'idée que toutes ces flexibilités doivent être considérées ensemble, ce que l'on appelé ici le « stockage » d'électricité.

Bien d'autres sujets peuvent être étudiés avec cet outil de simulation puisque celui-ci rend compte de deux des services rendus par ce « stockage », ces deux services étant la baisse du besoin de capacité de production à partir de gaz et une meilleure utilisation des possibilités de production à bas coût, éolienne, photovoltaïque et nucléaire.

Par exemple :

- la comparaison entre les batteries et les déplacements de consommation, entre le « stockage » et l'augmentation des capacités de turbinage des lacs, entre le « stockage » et les importations, entre le « stockage » et la production de gaz de synthèse ; dans chaque cas le calcul des dépenses et des coûts marginaux pour savoir « jusqu'où aller ».
- plus largement, des comparaisons avec plus ou moins de production d'hydrogène et plus ou moins de stockage car la production d'hydrogène, en utilisant les possibilités de production d'électricité qui dépassent la consommation finale, est, comme le stockage, un bon moyen de répondre aux fluctuations de la demande et de la production.

ANNEXE

Ici, le « stockage » est l'ensemble formé par les batteries, les Steps, les possibilités de déplacement de la consommation, la flexibilité de la production des fleuves et des lacs.

La flexibilité des fleuves et des lacs est égale au maximum de la somme sur plusieurs heures consécutives de la différence entre leur production horaire et la moyenne sur trois semaines de leurs consommations horaires.

Le stockage a une capacité en GWh et une limite de puissance de décharge en GW.

Le stockage permet de diminuer le besoin de capacité de production à partir de gaz, mesurée en GW. Le logiciel SimelSP3 calcule la relation entre cette baisse de besoin de capacité de production, en GW, et la capacité du stockage exprimée en GWh. Cette baisse n'est effective que dans la limite de la puissance de décharge du stockage.

Aujourd'hui, la flexibilité apparente des lacs est de 10 TWh. Elle est limitée par la puissance de décharge du stockage. On a étudié le cas où elle pourrait être de 100 GWh ; ou, pour les hivers prochains, de 140 à 200 GWh.

L'étude montre comment des batteries et déplacements de consommation, en augmentant la puissance de décharge de l'ensemble du stockage, permettent de mieux exploiter les capacités, en GWh, des Steps et des barrages de lacs.

Consommation TWh/an -	630 TWh/an	630 TWh/an	630 TWh/an	430 TWh/an
Capacité nucléaire	40 GW	75 GW	0 GW	52 GW
Capacité éolienne sur terre / en mer	37 / 49 GW	20 / 10 GW	80 / 100 GW	19 GW
Capacité photovoltaïque	180 GW	30	450 GW	13 GW
Limite de puissance Steps, fleuves, lacs	8,5 GW	8,5 GW	8,5	8,5 GW
Steps et flexibilité des fleuves	95 GWh	95 GWh	95 GWh	95 GWh
Profil horaire de consommation et d'activité éolienne de 2013				
Pour que la flexibilité des lacs puisse être de	100 GWh			140 / 200
Si la possibilité de déplacement de consommation est de	5 / 10 GWh			
Batteries et flexibilité de la demande	56 GWh	18 GWh	78 GWh	5 / 10 GWh
et en GW	19,8 GW	6,6 GW	24,9 GW	3,5 / 4,4 GW
Rapport GWévité/GWh de batterie et flexibilité de la demande	0,35	0,37	0,31	0,72 / 0,44
Capacité totale du stockage	251 GWh	213 GWh	263 GWh	235 / 295 GWh
Diminution du besoin de capacité de production	28,3 GW	15,1 GW	33,4 GW	12 / 12,9 GW
Pour éviter 1 GW de plus de capacité de product	40 GWh	73 GWh	34 GWh	60 GWh

Profil horaire de consommation et d'activité éolienne de 2012

Batteries et flexibilité de la demande	47 GWh	22 GWh	68 GWh	5 / 10 GWh
et en GW	13,6 GW	7,4 GW	14 GW	3,8 / 5 GW
Capacité totale du stockage	242 GWh	217 GWh	263 GWh	305 / 485 GWh
Rapport GWévité/GWh de batterie et flexibilité de la demande	0,29	0,34	0,21	0,76 / 0,5
Diminution du besoin de capacité de production	22,1 GW	15,9 GW	22,5 GW	13,5 / 15 GW
Flexibilité des lacs	100 GWh	100 GWh	100 GWh	210 / 375 GWh

ANNEXE - La valeur du service rendu par les batteries au système électrique

Les batteries sont particulièrement utiles dans la mesure où elles permettent de mieux tirer parti des possibilités des Steps, des fleuves et des lacs, donc la puissance instantanée qu'ils peuvent délivrer est limitée.

On entend ici par « stockage » la somme, en GWh, des capacités en GWh des batteries et des Steps et des possibilités de flexibilité des productions horaires des lacs et des fleuves.

La flexibilité de production des lacs et des fleuves est ainsi mesurée ; c'est le maximum de la somme sur plusieurs heures consécutives des écarts dans un sens ou dans l'autre entre la production horaire et la moyenne de la production horaire, quel que soit le nombre d'heures consécutives. On distingue une moyenne de production horaire pendant six mois de période froide et six mois de période chaude.

La flexibilité des fleuves est aujourd'hui de 6 GWh ; la puissance modulable est de 1 GW en plus ou en moins de la puissance moyenne.

La flexibilité des lacs est limitée par la puissance maximale des turbines. En simplifiant, on convient que la puissance moyenne est 3 GW et qu'elle peut être augmentée ou diminuée de 3 GW. La flexibilité est aujourd'hui de 10 GWh. Elle peut être augmentée dans la limite des puissances.

La capacité des Steps est de 89 GWh ; la puissance maximum est 4,5 GW.

La question étudiée ici

La chronique horaire de la puissance demandée au « stockage » (comme défini plus haut) et à une production à partir de gaz présente des « pointes ». Le besoin de capacité à partir de gaz est diminué par le stockage lorsque celui-ci est appelé en haut de la pointe. L'apport de ce stockage est limité de deux façons : la puissance est limitée par la somme des possibilités techniques de chaque moyen de stockage ; la quantité délivrée est limitée par la contenance (en GWh) de ces moyens de stockage.

On considère ici que la contribution des fleuves au stockage ne peut pas être changée. La puissance délivrée par les lacs ne peut pas être changée. Et l'on suppose que la flexibilité des lacs, aujourd'hui 10 GWh, peut augmenter jusqu'à 200 GWh.

Lorsque l'on ajoute des batteries en haut de la « pointe », l'apport des lacs en GWh et dans le respect de la limite de puissance augmente.

La question étudiée ici est la suivante : pour minimiser les dépenses totales, jusqu'à quel point est-il utile d'ajouter des batteries ? Quelle est alors la flexibilité attendue des lacs ? Est-ce réaliste ?

Les phénomènes en jeu

Lorsque la capacité totale du stockage augmente, la baisse du besoin de capacité de production augmente, ce qui diminue les coûts fixes de production à partir de gaz.

Les quantités délivrées par le stockage augmentent, ce qui diminue la production à partir de gaz

Compte tenu du rendement de charge et de décharge, les possibilités excédentaires diminuent ; lorsque celles-ci sont partiellement employées à produire de l'hydrogène, pour avoir la même production d'hydrogène il faut légèrement augmenter la capacité de l'électrolyse.

Lorsque la capacité des batteries augmente, le rapport entre la puissance qu'elles peuvent garantir et leur contenu diminue.

Tout cela se traduit dans le total des dépenses de production et de stockage d'électricité et de production d'hydrogène, selon la capacité (en GWh) des batteries pour une même production d'électricité et d'hydrogène.

Un exemple :

Une situation de référence sans batteries ; la même avec 57 ou 120 ou 170 GWh de batteries

La consommation finale est 630 TWh ; son profil horaire et celui de la consommation durant l'année 2013. S'y ajoute une consommation de 105 TWh pour produire 2,169 Mt d'hydrogène.

Le parc de production : 40 GW nucléaire, 37 GW éolien sur terre, 49 GW en mer ; 180 GW de photovoltaïque.

Les frais fixes des TAC sont de 74,7 €/kW/an ; ceux des CCG de 109 €/kW/an

Le coût du gaz fossile est 50 €/MWh th ; s'y ajoute un coût du CO₂ de 100 €/tCO₂.

Les coûts fixes de l'électrolyse sont de 670 €/kW/an.

La valorisation des excédents hors électrolyse est de 20 €/MWh.

Le coût des batteries est 100 ou 200 €/kWh.

On ne compte pas les dépenses de production hydraulique.

Sans batteries ; la flexibilité des lacs apporte 10 GWh

La baisse du besoin de capacité à partir de gaz est limitée par les limites de puissance des trois composantes du stockage : les steps pour 4,5 GW ; les fleuves pour 1 GW et les lacs pour 3 GW. Elle est donc de 8,5 GW : Les dépenses sont de 66 070 M€/an

Avec assez de batteries pour que la flexibilité des lacs apporte 70 GWh.

La capacité des **batteries est de 57 GWh** ; en « haut de la pointe, les batteries apportent 20,3 GW. Les Steps, les fleuves et les lacs apportent 8,5 GW. Au total 28,8 GW La capacité totale du stockage est 222 GWh. Elle est suffisante pour abaisser le besoin de capacité de production de 28,8 GW.

Sans compter le coût des batteries, les dépenses totales sont de 63 928 M€/an.

Avec assez de batteries pour que la flexibilité des lacs apporte 100 GWh

Une capacité de **120 GWh de batteries** appelés « en haut de la pointe » peut garantir 24,5 GW. Steps, fleuves et lacs peuvent apporter 8,5 GW. Soit en tout 33 GW. Pour abaisser le besoin de capacité de production à partir de gaz de 33 GW, il faut que la contenance du stockage soit de 319 TWh. Les lacs apporteront donc 105 GWh.

Sans compter le coût des batteries, les dépenses totales sont de 63 490 M€/an.

Avec assez de batteries pour que la flexibilité des lacs apporte 200 GWh

Une capacité de **172 GWh de batteries** appelés en haut de la pointe, peut garantir 28 GW. Avec les steps, les fleuves et les lacs peut fournir 36,5 GW. Pour abaisser le besoin de capacité de production de 36,5 GW, il faut 460 TWh. Les batteries, les Steps et les fleuves peuvent fournir 267 TWh. Les lacs fourniront jusqu'à 193 GWh.

Les dépenses sont de 65 061 M€/an ou 66 890 M€/an selon que les batteries coûtent 100 ou 200 €/kWh.

Sans compter le coût des batteries, les dépenses totales sont de 63 232 M€/an.

Dans cet exemple, si l'on ajoute le coût des batteries, les coûts sont au minimum si la capacité de batteries est de 100 GWh environ. Alors la contribution des lacs au passage des « pointes » peut atteindre 100 GWh dans la limite de la puissance de leurs turbines. L'ensemble des moyens de stockage diminue alors le besoin de capacité de production de 24 GW.

Mais la valeur du service rendu par les batteries se mesure en comparant les dépenses sans compter le coût des batteries.

La valeur du service rendu par les batteries

La valeur du service rendu par les batteries diminue lorsque leur capacité augmente. Voici comment évolue la valeur marginale de ce service.

Pour les 60 premiers GWh, la valeur du service est de 37,6 €/kWh/an.

De 60 à 120 GWh, elle est de 6,9 €/kWh/an

De 120 à 170 GWh, elle est de 5,0 €/kWh/an.

Augmenter la capacité des batteries est intéressant tant que la valeur du service qu'elles rendent est supérieure à leur coût, qui est entre 10 et 20 €/kWh/an.

Il s'agit là seulement des dépenses.

Les batteries apportent un autre service dont la valeur n'est pas comptée ici : elles diminuent les achats de gaz et les besoins d'importation. Elles diminuent aussi les exportations, qui seront sans doute mal valorisées. Cela relève de la sécurité d'approvisionnement en énergie

Les premières dizaines de GWh sont très utiles. Sur cet exemple, il est sans doute inutile d'aller au-delà de 80 GWh.

A noter que les déplacements de consommation apportent le même service que des batteries. Il est donc plus exact d'écrire que, si les possibilités de déplacement de la consommation sont inférieures à 80 GWh, il est inutile de faire en sorte que le total des possibilités de déplacement de consommation et de batteries dépasse 80 GWh.

ANNEXE : La valeur économique des lacs en l'absence de nucléaire

Un essai d'évaluation

Nous comparons ici les dépenses de production d'électricité et d'hydrogène (consommé hors du système électrique) dans deux situations où la consommation d'électricité et la consommation d'hydrogène sont les mêmes et qui ne diffèrent que par la flexibilité de la production hydraulique, la production à partir de gaz fossile et la capacité de production à partir de gaz

La flexibilité de production des lacs est ainsi définie : chaque heure, la différence entre la production et la moyenne des productions horaires peut être assimilée à la charge ou à la décharge d'une batterie ; la flexibilité de la production est égale à la capacité, en GWh, de cette batterie équivalente.

Hypothèses de coût :

Il suffit d'indiquer ici ce qui diffère d'une situation à l'autre.

Les frais fixes des TAC sont de 60 €/kW/an ; ceux des CCG de 103 €/kW/an

Le coût du gaz fossile est 50 €/MWh th ; s'y ajoute un coût du CO₂ de 100 €/tCO₂.

Les coûts fixes de l'électrolyse sont de 67 €/kW/an.

La valorisation des excédents hors électrolyse est de 20 €/MWh.

Le coût annuel des batteries est 21,3 €/kWh/an.

Dans les deux situations,

La consommation d'électricité (hors pertes en ligne) est 630 TWh. Elle a le même profil horaire que durant l'année 2013. La production d'hydrogène est 2,162 millions de tonnes.

La capacité éolienne est 80 GW sur terre (avec un facteur de charge de 2200 h/an), 100 GW en mer (avec un facteur de charge de 3900 h/an) ; la capacité photovoltaïque est 300 GW (avec un facteur de charge de 1200 h/an). La production hydraulique est 52 TWh et la production à partir de biométhane est 20 TWh. Une capacité d'électrolyse de 25 GW permet de produire du gaz de synthèse pour produire de l'électricité.

La capacité des Steps est de 89 GWh ; la flexibilité de la production des fleuves est équivalente à une capacité de stockage de 6 TWh. Le rendement de charge-décharge est 0,8.

Situation 1 – avec une flexibilité de la production des lacs de montagne

La flexibilité de la production des lacs est de 100 TWh. S'y ajoutent une capacité de batteries de 100 GWh. Avec les Steps et la flexibilité des fleuves, la capacité totale est de 295 TWh. Ensemble, ces moyens diminuent le besoin de capacité de production à partir de gaz de **40 GW**.

Le stockage restitue 37 TWh.

La production à partir d'énergie fossile est nulle ; la production à partir de gaz de synthèse est 25 TWh. La capacité de production à partir de gaz (biométhane et gaz de synthèse) est de 74 GW – pour pouvoir répondre à la demande dans le cas où, au moment où celle-ci est maximum, la production solaire est nulle et la production éolienne égale à 1 % de sa capacité installée.

Les possibilités excédentaires sont 23 TWh.

L'hydrogène consommé hors du système électrique est produit par 40 GW d'électrolyse consommant 112 TWh prélevés sur les excédents. La production d'hydrogène est 2,162 Mt par an. Par ailleurs, 64 TWh de possibilités excédentaires sont consommées, par exemple pour produire de la chaleur ou du biocarburant par un de 40 GW.

*Sans compter les dépenses de production hydraulique (lacs et steps), les dépenses totales de production et de stockage d'électricité et de production d'hydrogène, déduction faite de la valorisation des excédents sont de **76 451 M€/an**.*

Situation 2 – sans flexibilité de la production hydraulique

Pas de barrages ni de Steps. Mêmes capacités (en GWh) de batteries que dans la situation 1 : soit 100 GWh.

Ces moyens diminuent le besoin de capacité de production à partir de gaz de **28 GW**.

Le stockage restitue 18,6 TWh ; la production à partir de gaz de synthèse est de 27 TWh.

La production à partir de gaz fossile est de 16,4 TWh.

Pour produire 2,162 Mt d'hydrogène, il suffit d'une capacité d'électrolyse de 37,2 GW.

La capacité de production à partir de gaz est supérieure de 12 GW à celle de la situation 1.

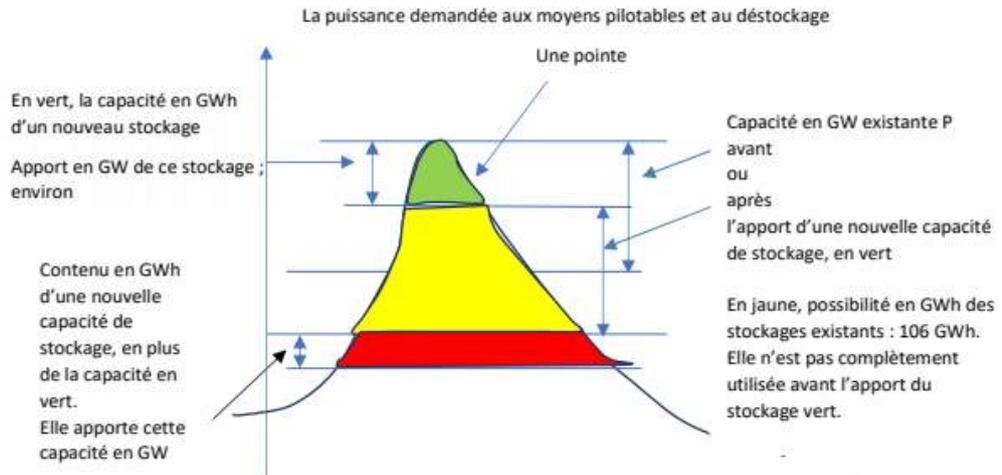
Sans compter les dépenses de production hydraulique (lacs et steps), les dépenses totales de production et de stockage d'électricité et de production d'hydrogène, déduction faite de la valorisation des excédents, sont de **79 464 M€/an**.

Sans la flexibilité des lacs, les dépenses sont donc supérieures de **3 milliards d'euros par an**.

Les dépenses de production à partir de gaz sans compter le coût du CO₂ sont supérieures de 3,2 milliards ; le coût du CO₂ est supérieur de 0,8 milliard ; les dépenses d'électrolyse sont inférieures de 0,24 milliards ; la valorisation des excédents est supérieure de 0,2 milliards.

Croquis montrant l'efficacité d'une capacité de stockage s'ajoutant à un stockage existant

Les possibilités de déplacement de consommation sont comptées parmi les possibilités de stockage : une possibilité de déplacement de consommation de 1 kW pendant une heure équivaut à un stockage de 1 kWh.



Avant l'apport du stockage vert, les capacités de stockage existantes couvrent la pointe et apportent une certaine puissance P. Cette puissance ne permet pas d'utiliser toute la possibilité du stockage, égale à la surface en jaune. L'apport du stockage vert apporte, en pointe, une puissance qui déplace le stockage existant vers le bas jusqu'à ce qu'il soit complètement utilisé : la surface jaune est alors égale à son contenu en GWh ; il peut descendre de quelques GW. Une nouvelle capacité de stockage, en rouge, se situerait donc « en base de la pointe » et apporterait très peu de puissance garantie, en GW.

La figure ci-dessus montre pourquoi des batteries qui sont très efficaces en-deçà d'un certain seuil deviennent inutiles au-delà. Il s'agit de l'illustration d'un phénomène qui ne peut être vraiment quantifié qu'au vu de plusieurs situations ; mais il suffit de regarder les situations les plus critiques.