

Le coût de l'hydrogène produit par électrolyse – une analyse

Cette étude propose une méthode pour évaluer le coût de l'hydrogène, en particulier lorsque l'électrolyse s'alimente sur le réseau électrique, et elle analyse comment se forme ce coût. Elle porte sur le système de production et de stockage d'électricité et d'hydrogène et y inclut aussi, à titre exploratoire, une production de chaleur à partir des possibilités de production d'électricité excédentaires, y compris le besoin de stockage de chaleur. Toutes les hypothèses de coût sont explicitées et justifiées et le modèle numérique dont on s'est servi pour simuler le système de production et de stockage d'électricité, d'hydrogène et de chaleur est publié. Les résultats sont donc contestables. Les commentaires sont possibles ; ils seront bienvenus.

Le coût de l'hydrogène produit par électrolyse est un sujet à la fois sensible et assez complexe.

Cette étude porte sur le « coût social » de l'hydrogène, son coût vu de l'ensemble de la société. Lorsque l'électrolyse est alimentée sur le réseau électrique, sont comparés deux systèmes répondant avec le minimum de dépenses à la même demande finale d'électricité et produisant plus ou moins d'hydrogène ; les dépenses sont calculées déduction faite de la valorisation des excédents. Le coût de l'hydrogène est la différence de dépenses rapportée à la différence de production d'hydrogène.

Le coût social de l'hydrogène ne dit rien de la façon dont il sera financé ; il ne dit donc rien de ce que sera ou ce que devraient être le prix de l'hydrogène ou le montant des subventions publiques.

Les informations qui figurent dans les documents publiés par les parties concernées par l'économie de l'hydrogène, qu'elles soient publiques ou privées, sont inévitablement partielles. Elles se bornent parfois à présenter des graphiques qui montrent comment le coût de production d'hydrogène dépend du coût de l'installation d'électrolyse, du prix de l'électricité et du facteur de charge, ce qui assez facilement compréhensible. On met parfois en avant le fait que la production d'hydrogène, si elle est très flexible, apporterait un service à la gestion du système de production d'électricité ; ou encore qu'elle pourrait utiliser des possibilités de production excédentaires dont on suppose qu'elles auront sur le marché un prix très bas. Il n'est pas rare de lire que le coût de production d'hydrogène est dans une fourchette de 1 à 10 € par kilo – une façon dene pas se tromper.

Cette étude analyse ce qui fait le coût de l'hydrogène. Elle présente et publie la méthode choisie pour évaluer ce coût et toutes les hypothèses qu'elle a retenues ; le moyen de simulation qu'elle utilise est également publié. Chacun pourra donc y introduire ses propres hypothèses.

Le modèle de simulation du système de production d'électricité et d'hydrogène utilisé ici, SimelSP3, est publié sur www.hprevot.fr.

Quatre grosses incertitudes :

- La valorisation des possibilités de production d'électricité excédentaires
- Le coût de l'installation d'électrolyse « clés en mains »
- Le rendement de l'installation d'électrolyse.
- Le coût du stockage d'hydrogène.

La valorisation des possibilités de production excédentaires : exportation et chaleur

Lorsque l'électrolyse est alimentée par une source d'électricité *qui lui est dédiée*, les possibilités de production d'électricité non utilisées sont faibles ; leur valorisation éventuelle a peu d'impact sur le coût de production d'hydrogène.

Lorsque l'électrolyse *s'alimente sur le réseau électrique*, ce peut être « en base moins la pointe » (c'est-à-dire à puissance constante sauf lorsqu'il faut, pour répondre à la demande finale d'électricité faire fonctionner des moyens de production coûteux) ou « sur excédents ». Les dépenses nettes du système dépendent de la valorisation des possibilités de production d'électricité excédentaires. En conséquence cette valorisation a un effet sur le coût de l'hydrogène.

Cette électricité excédentaire sera bien valorisée en étant *exportée* tant que des pays voisins produisent de l'électricité avec de l'énergie fossile. Une autre valorisation possible est de produire de *la chaleur*, à utiliser de suite ou plus tard après avoir été stockée. Le coût de la chaleur augmentera et la valorisation des exportations diminuera sans doute, ce qui crée un nouveau contexte qui pourrait donner de la valeur à une électricité excédentaire produisant de la chaleur par effet Joule. Il y a là matière à une réflexion approfondie sur le sujet - qui sort du cadre de cette étude et que j'ai abordé dans une autre étude qui fait suite à celle-ci.

On fait donc ici deux hypothèses sur la valorisation de l'électricité au-delà de la consommation finale et de la production d'hydrogène : 20 ou 40 €/MWh. On indique aussi, sous toutes réserves, ce qu'elle pourrait être si cette électricité était utilisée pour produire de la chaleur.

Le coût de l'installation d'électrolyse « clés en mains »

Il y a une très grande incertitude sur le coût de l'installation d'électrolyse. Il est habituel de dire que le coût de l'électrolyseur diminuera et pourrait être de l'ordre de 700 €/kW (comme l'écrit RTE, repris par d'autres). Je retiens donc cette hypothèse. Mais les publications ignorent souvent tout ce qu'il y a « autour » de l'électrolyseur. Après la lecture d'un article intéressant publié récemment (mai 2023) dans les Techniques de l'ingénieur à la lumière de l'opération Jupiter1000, j'étudie aussi le cas où l'installation de l'électrolyse coûterait 2000 €/kW.

Le rendement de l'installation d'électrolyse « clés en mains »

Le rendement de production de l'électrolyse est également incertain. On parle souvent de 75 %, hypothèse retenue ici. Néanmoins, si l'on tient compte des baisses de rendement dues aux fluctuations de l'alimentation en électricité, des pertes des redresseurs et transformateurs et aussi de la consommation d'électricité par les équipements qui entourent l'électrolyseur (purification de l'eau et des gaz, compresseurs, etc.), le rendement réel est certainement inférieur.

Le besoin et le coût du stockage d'hydrogène pour une livraison à flux constant.

La simulation calcule la capacité de stockage qu'il faut pour fournir l'hydrogène à flux constant. Quant au coût du stockage et du transport jusqu'au lieu de stockage, on se réfère à une étude très récente de RTE et GRT gaz (août 2023). Tant que la production est inférieure à 1 million de tonnes par an, il suffit d'utiliser les cavités salines servant au stockage de méthane. Le coût du stockage et du transport est alors, en annuité, d'environ 3 €/parkilo d'hydrogène de capacité de stockage.

Les cas étudiés

Avec une alimentation électrique dédiée à l'électrolyse : électricité nucléaire, photovoltaïque, éolienne sur terre et éolienne en mer. Coût de l'électrolyse 700 €/kW ou 2000 €/kW.

Avec une alimentation électrique prise sur le réseau :

A partir d'un parc de production d'électricité tel qu'il pourrait être pour répondre à une demande finale d'électricité de 580 TWh sans production d'hydrogène, ce parc est modifié pour permettre la production de 0,5 Mt/an (million de tonnes par an) d'hydrogène, ou 1 Mt/an ou 2 Mt/an avec une augmentation de la capacité nucléaire, ou de la capacité éolienne en mer ou de la capacité photovoltaïque.

A partir d'un parc de production d'électricité qui répond avec le minimum de dépenses à la demande d'électricité et d'hydrogène

Le coût de l'électrolyse est 700 €/kW ou 2000 €/kW.

Quelques résultats

Les besoins de stockage d'hydrogène

Lorsque l'alimentation de l'électrolyse se fait sur le réseau et utilise les « excédents » (c'est-à-dire les possibilités de production qui dépassent les besoins de la consommation finale), pour pouvoir livrer l'hydrogène à flux constant il faut une capacité de stockage qui est de l'ordre de 30 à 40 % de la production annuelle ; cela alourdit le coût de l'hydrogène d'environ 1 €/kg si le stockage, en annuité coûte 3 €/kg/an. Si l'alimentation de l'électrolyse se fait « en base moins la pointe », c'est-à-dire à puissance constante sauf effacement, le besoin de stockage est à peu égal à ce qui aurait produit avec l'électricité « effacée », soit 10 à 13 % de la production annuelle. Lorsque l'alimentation en électricité est dédiée à l'électrolyse, le besoin est de 16 % ou de 8 % de la production annuelle selon que la production d'électricité est photovoltaïque (avec éventuellement des batteries) ou éolienne (en mer) ; il est beaucoup plus faible si l'électricité est nucléaire.

Les coûts de production d'hydrogène : 0,5 Mt/an ou 1 Mt/an d'hydrogène

Avec une source d'électricité dédiée

Sans compter le coût de l'acheminement de l'électricité, en incluant le coût d'un stockage qui permet de délivrer un flux constant, avec une production d'électricité éolienne en mer ou sur terre ou photovoltaïque, le coût est dans une fourchette de 3,9 à 5,1 €/kg si le coût de l'électrolyse est 700 €/kW ; dans une fourchette de 5,2 à 6,2 €/kg si l'électrolyse coûte 2000 €/kW. Si l'électricité est nucléaire les coûts sont 3,6 ou 4,3 €/kg.

Si l'électrolyse s'alimente sur le réseau.

1- Avec une capacité nucléaire que l'on peut prévoir en 2030 ou 2035, le coût de l'hydrogène, *stockage compris*, dépend très peu de la façon dont le parc de production d'électricité est renforcé. Il dépend du coût de l'électrolyse et de la valorisation des excédents. Si les excédents valent 40 €/MWh, et si l'électrolyse coûte 2000 €/kW, le meilleur coût se trouve en renforçant la capacité de production nucléaire. Avec les hypothèses retenues ici, il est **de 5,9 à 6,6 €/kg**

A noter : il est possible de calculer avec une apparence de logique que le coût de l'hydrogène est très bas. Il en est ainsi lorsque l'on attribue à la production d'hydrogène une amélioration de l'efficacité du système électrique (due à une augmentation de la capacité nucléaire) qui aurait été possible sans production d'hydrogène. L'analyse de quelques cas décrit en quoi cette démarche est trompeuse.

2- Si la capacité nucléaire est proche de celle qui minimise le total des dépenses de production d'électricité et d'hydrogène, si l'électrolyse coûte 2000 €/kW et si les possibilités excédentaires de production d'électricité valent 40 €/MWh, le coût de production d'hydrogène est, coût du stockage inclus, de **4,4 €/kg**, proche de ce qu'il est lorsque l'électrolyse est alimentée par une source d'électricité nucléaire dédiée.

Autres résultats

Il serait possible avec le moyen de simulation utilisé d'avoir toute information sur le fonctionnement heure par heure du système électricité-hydrogène-chaleur. Par exemple : la variabilité de la production nucléaire (considérablement réduite par la production de chaleur), la variabilité de l'alimentation de l'électrolyse, le coût marginal de production d'hydrogène, le coût.

Pour aller plus loin : optimiser le système de production et de stockage, d'électricité et de chaleur : dans cette étude, la production d'hydrogène par électrolyse est donnée *a priori* ; il serait possible de se donner une hypothèse sur le coût de l'hydrogène produit autrement que par électrolyse et de rechercher le parc de production et de stockage d'électricité, d'hydrogène par électrolyse et de chaleur et les quantités produites d'hydrogène et de chaleur qui minimisent les dépenses totales de production d'électricité, d'hydrogène et de chaleur. C'est l'objet d'une étude qui prolonge celle-ci.

Le Plan et la table des matières	
Présentation	p. 1
Quatre grosses incertitudes / les cas étudiés / Quelques résultats	
Le Plan et la table des matières	p. 4
Préambule	p. 5
Le coût de l'électrolyse ; du stockage de l'hydrogène ; la valorisation des excédents	
Première partie : l'électrolyse est alimentée par une production d'électricité dédiée, éolien sur terre, éolien en mer, photovoltaïque ou nucléaire	p. 6
Le coût de production de l'électricité	
La méthode de calcul	
Quelques résultats	
Si le coût de l'électrolyse est 700 €/kW ou 2000 €/kW	
Commentaires : l'utilité du stockage de l'électricité / l'effet des pertes en ligne / l'effet du coût du stockage d'hydrogène /	
Un tableau des résultats	p. 8
Deuxième partie : la production d'hydrogène est une composante du système intégré de production d'électricité et d'hydrogène (et, à titre exploratoire, de chaleur)	p. 9
1- La méthode, les hypothèses	p.9
La méthode pour calculer le coût de l'hydrogène	
Les hypothèses	
La consommation finale d'énergie	
Le parc de production de référence et ses modifications : plus de nucléaire ou plus d'éolien en mer ou plus de photovoltaïque	
Les moyens de stockage d'électricité	
Les coûts	
2- Sans production d'hydrogène : le parc de référence, les dépenses	p. 10
3- Avec une production de 0,5 Mt/an (million de tonnes par an) d'hydrogène	p. 10
Les résultats : un tableau (la présentation et les résultats détaillés sont en annexe 4)	
Si les excédents servent à produire de la chaleur	
4- Avec une production de 1 Mt/an d'hydrogène	p. 11
Dans chaque cas, en utilisant les possibilités qui dépassent la consommation finale ou en alimentant l'électrolyse « en base moins la pointe – en supposant que l'électrolyse coûte 700 ou 2000 €/kW / en supposant que l'électricité excédentaire vaut 20 ou 40 €/MWh / comparaison des résultats / en supposant que l'électricité excédentaire sert à produire de la chaleur	
4.1- Avec 62 GW nucléaire au lieu de 55 GW	p. 11
Comment calculer que le coût de production de l'hydrogène est de 1 €/kg	p.12
4.2- Avec 23 GW d'éolien en mer au lieu de 12 GW	p.12
4.3- Avec 100 GW de photovoltaïque au lieu de 50 GW	p. 14
4.4- A partir d'un parc de production d'électricité avec 55 GW nucléaire : récapitulatif	p. 15
5- Si le but est de minimiser les dépenses de production d'électricité et d'hydrogène	p. 16
5.1- Produire l'électricité et 0 ou 1 ou 2 Mt/an d'hydrogène avec le minimum de dépenses	p.16
5.2- Le coût de production de 1 Mt/an ou de 2 Mt/an d'hydrogène	p. 16
Un tableau de résultat selon le coût de l'électrolyse, la valeur des excédents et le mode d'alimentation de l'électrolyse	p. 17
5.3- Comparaison entre les deux modes d'alimentation de l'électrolyse	p. 17
5.4- Si les excédents servent à produire de la chaleur	p. 17
6- Conclusion - provisoire	p.18
ANNEXES	
Annexe 1 : l'effet du coût de l'installation d'électrolyse sur le coût de l'hydrogène	p.19
Annexe 2 : la valeur de l'électricité excédentaire servant à produire de la chaleur	p.20
Annexe 3 : Les composantes du coût de production et de stockage d'électricité	p. 22
Annexe 4 : Produire 0,5 Mt/an d'hydrogène - même structure que le 4 ci-dessus	p. 23
Annexe 5 : Comment utiliser le simulateur SimelSP3 pour calculer le coût de production d'hydrogène lorsque l'électrolyse est alimentée par une source d'électricité dédiée	p.28

Préambule

Le coût de l'électrolyse ; du stockage de l'hydrogène ; la valorisation des excédents

Le coût de l'électrolyse :

Une étude récente de RTE suppose que l'électrolyse coûte en investissement 700 €/kW. Ce coût suppose une importante diminution du coût tel qu'on l'observe aujourd'hui et, précise RTE, n'inclut pas le « coût de l'environnement ». Il s'agit entre autres de compresseurs, redresseurs, transformateurs, purificateur de l'eau, bâtiments et autres infrastructures. Il est de coutume en ingénierie de tenir compte de cet « environnement » des équipements centraux en multipliant le coût par 2 ou 3. Dans le cas de l'électrolyse, cette évaluation forfaitaire s'est trouvée confirmée dans l'opération « Jupiter 1000 » qui a expérimenté et documenté la production d'hydrogène par électrolyse. On lit dans un article publié par « Techniques de l'ingénieur » en mai 2023 sous le titre « Le power-to-gas, technologies, enjeux et perspectives » : « Plusieurs sources rapportent des coûts d'investissement (CAPEX pour *Capital Expenditure*) allant globalement de 500 à 1 500 €/kW pour un électrolyseur alcalin et de 750 à 2 000 €/kW pour un électrolyseur PEM ». Puis : « un électrolyseur, notamment alcalin devrait pouvoir coûter moins de 500 €/kW à l'horizon 2030 ». Pour avoir une électrolyse flexible, mieux vaut une technique PEM. L'article se poursuit ainsi : « L'unité d'électrolyse représenterait entre un tiers et un demi du coût total d'une installation de Power-to-H₂. Ainsi une installation de Power-to-H₂ coûterait de 2000 à 4500 €/kW selon la technologie retenue ».

On présente donc ici les résultats avec deux hypothèses de coût de l'électrolyse : 700 €/kW et 2000 €/kW. Un tableau en annexe montre la différence de coût de production d'hydrogène selon que le coût de l'électrolyseur est 700 ou 2000 €/kW en tenant compte du facteur de charge de l'électrolyseur. Par exemple 2,2 €/kg si le facteur de charge est 3000 h/an.

Par ailleurs il est habituel de lire que le rendement de l'électrolyse serait de 75 % - c'est la valeur retenue ici - ou même davantage. Or si l'on tient compte des rendements des transformateurs et des redresseurs de courant, de l'énergie consommée par les auxiliaires (purification de l'eau et des gaz, compresseurs, etc.), le rendement global de l'installation est plus proche de 65 %.

En conséquence, les coûts évalués par cette étude sont probablement quelque peu sous-estimés.

Le lecteur apportera les corrections souhaitées en utilisant le logiciel de simulation, qui est publié.

Le coût du stockage d'hydrogène

Pour pouvoir délivrer l'hydrogène à flux constant, il faut une capacité de stockage d'hydrogène. Celle-ci peut se mesurer en pourcentage de la production annuelle.

La simulation calcule la capacité de stockage qu'il faut pour fournir l'hydrogène à flux constant. Il reste à faire une hypothèse sur le coût du stockage et du transport vers le stockage. Une étude très récente de RTE et GRT gaz (août 2023) évalue le coût du stockage et du transport vers le lieu de stockage. Si la production d'hydrogène est de 1 million de tonnes par an, il suffit d'utiliser des cavités salines servant aujourd'hui au stockage du gaz fossile, ce qui minimise les coûts. Alors le coût de l'infrastructure de stockage et de transport d'hydrogène est, en annuité, de 3 € par kg de capacité de stockage.

Dans la configuration retenue dans l'étude de RTE et GRTgaz, une capacité de stockage de 10 TWh, soit 0,3 Mt d'hydrogène dans les cavités salines, un investissement de 3,5 milliards d'euros pour le stockage et de 7 milliards d'euros pour le transport, soit en tout 10,5 milliards d'euros ou, en annuité, 1 milliard d'euros. Ce serait beaucoup plus s'il fallait créer de nouvelles cavités de stockage.

Dans cette étude, on suppose que le coût du stockage, y/c le transport jusqu'au lieu du stockage, est, en annuité, de 3 €/kg/an.

La valorisation des possibilités de production d'électricité excédentaires

Lorsque l'électrolyse est alimentée sur le réseau, que ce soit « en base moins la pointe » ou « sur excédents », le coût de production d'hydrogène dépend beaucoup de la valeur des possibilités de production qui dépassent les besoins de la consommation finale. Il faut donc faire des hypothèses sur la valeur de cette électricité « excédentaire ». Elles sont difficiles à justifier.

Cette électricité « excédentaire » peut être exportée pour remplacer une électricité produite à partir d'énergie fossile, soit immédiatement, soit après être passée par un stockage tel que les lacs de montagne en Suisse ou en Scandinavie. Sa valeur est alors de plusieurs dizaines d'euros par MWh. Mais ces possibilités se réduiront avec la disparition progressive de la production d'électricité à partir d'énergie fossile. Alors une autre utilisation pourrait être étudiée : la production de chaleur pour les réseaux de chaleur. La façon la moins coûteuse et la plus flexible est la chaudière électrique, comme cela s'est pratiqué jadis en France. Si cette chaleur peut être utilisée directement, la valeur de l'électricité est proche de celle de l'énergie qu'elle remplace, biométhane ou gaz fossile, dont le prix restera haut. Au-delà de cette utilisation directe, la chaleur devra être stockée sur plusieurs mois. La valeur de l'électricité est alors extrêmement sensible au coût du stockage intersaisonnier de chaleur. Il est possible de calculer la valeur de l'électricité selon des hypothèses aujourd'hui fort incertaines. Il est probable que la valeur des excédents diminue lorsque les quantités disponibles sont plus importantes puisque, alors, la part de la chaleur devant être stockée augmente. - cf. en annexe.

Quoi qu'il en soit, faute de mieux, je fais ici les hypothèses suivantes :

- La valorisation est nulle lorsque le facteur de charge des équipements pouvant utiliser ces possibilités de production est inférieur à 1000 €/an. Ce critère sert à déterminer le total des capacités (en GW) utilisant ces capacités de production excédentaires.
- La valeur des possibilités excédentaires est soit 20 €/MWh soit 40 €/MWh indépendamment du facteur de la disponibilité de celles-ci. J'indique aussi ce que serait la valeur de l'électricité utilisée pour produire de la chaleur, calculée avec des hypothèses de coût retenues à titre illustratif.

Première partie : l'électrolyse est alimentée par une production d'électricité dédiée

Le calcul du coût de l'hydrogène lorsque l'électrolyse est alimentée par une production d'électricité dédiée ne soulève pas de question de méthode. La simulation permet de calculer très aisément différentes configurations.

Le coût de production d'électricité

Le parc nucléaire est supposé fonctionner à puissance constante ; son coefficient de disponibilité est de 80 % ; le coût de production est 66 €/MWh. Le coût de l'éolien sur terre est 64 €/MWh, celui de l'éolien en mer, partie posé, partie flottant, y compris les coûts de raccordement est 88 €/MWh. Le photovoltaïque, qui est posé sur le sol, coûte 38 €/MWh. Le stockage d'électricité coûte 100 €/kWh.

Les possibilités de production d'électricité non utilisées par l'électrolyse ne pourraient être utilisées qu'avec un très faible facteur de charge. Elles ne sont pas valorisées.

Les pertes en ligne et le coût d'acheminement de l'électricité vers l'électrolyse sont supposés négligeables car la source d'électricité, dédiée à la production d'hydrogène, peut en être très proche.

Voir plus de détails en annexe 3

La méthode de calcul

Le coût de production d'hydrogène est fonction des dépenses d'investissement et de fonctionnement à faire pour produire l'électricité et pour l'électrolyse. Les dépenses d'investissement sont exprimées par une dépense annuelle tenant compte de la durée de vie de l'équipement et d'un taux d'actualisation. Le

coût de production est le rapport entre le total des dépenses annuelles et la production annuelle, exprimée en kg/an.

La capacité de production d'électricité étant donnée, la capacité d'électrolyse est ajustée de façon à minimiser le coût de production d'hydrogène.

Si la production d'électricité est intermittente, la capacité de l'électrolyse est inférieure à la capacité de production d'électricité. Il y a donc des possibilités excédentaires de production d'électricité. Il est possible d'en stocker une partie pour augmenter le facteur de charge de l'électrolyse, mais cela ne paraît intéressant que lorsque la production d'électricité est photovoltaïque, que le coût du stockage est bas et que le coût de l'électrolyseur est haut.

Les calculs sont faits à l'aide du simulateur SimelSP3, publié, où l'on introduit des valeurs nulles pour la consommation finale d'électricité et toutes les sources d'électricité sauf celles qui alimentent l'électrolyse. Cf. en annexe un « mode d'emploi » et sur www.hprevot.fr une notice technique.

Toutes les hypothèses sont présentées sur des tableaux publiés sur ce site.

Quelques résultats

Le coût de production de l'hydrogène avec une alimentation d'électricité dédiée

Voir un tableau de résultats *infra*.

Si le coût de l'installation d'électrolyse, tout compris, est 700 €/kW,

Le moyen le moins coûteux comporte une production photovoltaïque : 3,3 €/kg, sans compter le nécessaire stockage d'hydrogène. A partir de nucléaire, le coût est 3,6 €/kg avec très peu de stockage. A partir d'éolien sur terre le coût est 4,0 €/kg ; à partir d'éolien en mer, il est de 4,9 €/kg.

Ces valeurs, comme déjà dit, supposent que le coût d'acheminement de l'électricité est nul.

Et il faut y ajouter le coût du stockage d'hydrogène : 0,5 €/kg pour le photovoltaïque ; 0,3 €/kg pour l'éolien si le stockage coûte, en annuité 3 €/kg/an

Si le coût de l'installation d'électrolyse, tout compris, est 2000 €/kW,

A partir d'électricité nucléaire, le coût de production est 4,2 €/kg.

Si l'électricité est photovoltaïque et si l'on peut disposer d'un stockage d'électricité dont le coût est de 100 €/kWh, le coût de production est 4,7 €/kg. La différence avec le coût de production à partir d'électricité nucléaire est accrue si l'on tient compte des besoins de stockage d'hydrogène, qui sont de 17 % de la production annuelle (si l'on veut délivrer l'hydrogène à flux constant) ; elle est diminuée si l'on dispose de moyens de stockage d'électricité moins coûteux que 100 €/kWh.

A partir d'éolien sur terre ou en mer, la production d'hydrogène coûte 5,3 €/kg et 6 €/kg.

Commentaires

L'utilité du stockage d'électricité pour augmenter le facteur de charge de l'électrolyse

L'utilité du stockage d'électricité n'apparaît que dans le cas où l'électricité est *d'origine photovoltaïque*.

Si l'électrolyse est alimentée par une capacité photovoltaïque de 20 GW, avec une capacité de stockage d'électricité de 40 GWh et une capacité d'électrolyse de 3,4 GW, le nombre d'heures pendant lesquelles l'électrolyse est alimentée augmente de quelques heures seulement par jour en hiver mais de onze heures par jour de mars à octobre ; le stockage restitue en effet 8,1 TWh. Le facteur de charge de l'électrolyse est de 5745 heures. La production d'hydrogène est 405 kt/an. Le besoin de stockage d'hydrogène est égal à 17 % de la production annuelle.

On retrouve ces résultats en introduisant dans SimelSP3 une consommation d'électricité « en base moins la pointe » et avant effacement de 30 TWh et une capacité de batteries de 40 GWh. Celles-ci restituent 8,1 TWh, ce qui augmente beaucoup le facteur de charge de l'électrolyse. Le mouvement de charge et décharge du stockage est visible heure par heure. Les possibilités de production abandonnées sont de 1,5 TWh/an

Si le coût de l'électrolyse est 2000 €/kW

Si le coût du stockage d'électricité est 100 €/kWh, le coût de production est **4,69 €/kg** au lieu de 5,54 €/kg sans stockage de l'électricité. Le stockage d'électricité est intéressant si son coût est inférieur à 180 €/kWh.

Si le coût de l'électrolyse est de 700 €/kW, le stockage de l'électricité est intéressant lorsque le coût du stockage est inférieur à 75 €/kWh.

L'effet des pertes en ligne et du coût d'acheminement de l'électricité jusqu'à l'électrolyse

Si le coût d'acheminement, au lieu d'être nul, est égal à 10 €/MWh, le coût de l'hydrogène augmente de 1 €/kg. Si, de plus, les pertes en ligne sont de 7%, le coût est encore augmenté de 0,7 €/kg.

L'effet du coût du stockage, supposé être de 3 €/kg/an

Si l'électricité est nucléaire, le besoin de stockage est négligeable. Si elle est éolienne, le stockage coûte environ 0,3 €/kg. Si elle est photovoltaïque, il coûte 0,5 €/kg.

Electricité produite par 10 GW d'éolien en mer ou sur terre ou 20 GW de photovoltaïque ou 3 GW de nucléaire

Coût de l'électrolyse	700 €/kW		2000 €/kW	
	Eolien en mer 10 GW	Eol sur terre 10 GW	Eolien en mer 10 GW	Eol sur terre 10 GWe
Coût du stockage : 3 €/kg/an				
Capacité de l'électrolyse	8 GW	5 GW	7,5 GW	3,5 GW
Consommation par l'électrolyse	41,8 TWh	20,1 TWh	40,8 TWh	18,1 TWh
Possibilités de production abandonnée	0,3 TWh	1,0 TWh	1,2 TWh	3 TWh
Facteur de charge de l'électrolyse	4768 h/an	3756 h/an	5437 h/an	5173 h/an
Production d'hydrogène	859 kt/an	387 kt/an	841 kt/an	373 kt/an
Coût de production	4,9 €/kg	4,0 €/kg	6,05 €/kg	5,33 €/kg
Stockage d'hydrogène en % de la conso	8 %	11 %	6 %	9 %
Coût de production et de stockage	5,1 €/kg	4,3 €/kg	6,25 €/kg	5,60 €/kg

Coût de l'électrolyse	700 €/kW		2000 €/kW	
	Photovolt ** 20 GW	Nucléaire 3 GW	Photovoltaïque 20 GW	Nucléaire 3 GW
Coût du stockage : 3 €/kg/an				
Capacité	20 GW	3 GW	20 GW	3 GW
Capacité de l'électrolyse	8,0 GW	2,4 GW	6 / 3,4 GW *	2,4 GW
Consommation par l'électrolyse	18,5	21 TWh	17,0 / 20 TWh	21,0 TWh
Possibilités de production abandonnée	2,3 TWh	0 TWh	5,0 / 1,5 TWh*	0 TWh
Facteur de charge de l'électrolyse	2459	8760 h/an	2939 / 5745 h/an *	8760 h/an
Production d'hydrogène	406 kt/an	434 kt/an	351 / 405 kt/an *	434 kt/an
Coût de production	3,35 €/kg	3,57 €/kg	5,54 / 4,69 €/kg *	4,23 €/kg
Stockage d'hydrogène en % de la conso	16 %	0 %	14 % / 17 %*	0 %
Coût y/c le coût du stockage ***	3,85 €/kg	3,57 €/kg	5,94 / 5,19 €/kg	4,23 €/kg
* sans stockage d'électricité ou / avec un stockage de 40 GWh dont le coût est 100 €/kWh				
** sans stockage d'électricité				
*** coût du stockage d'hydrogène (y/c le transport jusqu'au stockage) : 3 €/kg de capacité /an				

Deuxième partie :

La production d'hydrogène est une composante du système intégré de production d'électricité et d'hydrogène

1 La méthode ; les hypothèses

On compare ici les dépenses de production d'électricité et d'hydrogène avec toujours la même consommation finale d'électricité et plus ou moins de production d'hydrogène. La production d'hydrogène est ou bien nulle ou égale à 0,5 Mt/an (million de tonnes par an), ou égale à 1 Mt/an ou égale à 2 Mt/an.

Note : les coûts de l'hydrogène sont calculés à partir d'une différence relativement petite entre deux termes beaucoup plus importants. En conséquence le résultat est très sensible à une petite variation de l'un des deux termes de la différence.

Note : Pour ne pas alourdir la lecture de cette note, le détail de ce qui est relatif à une production de 0,5 million de tonnes par an d'hydrogène est reporté en annexe.

Un point qui a son importance : Avec ou sans production d'hydrogène, le parc de production d'électricité est de ceux qui répondent à la demande finale d'électricité avec le minimum de dépenses, en tenant compte des possibilités et des contraintes de tous ordres.

Le coût de production apparent de l'hydrogène est la différence de dépenses rapportée à la différence de production d'hydrogène.

Remarque: quelle que soit la façon dont la capacité du parc de production d'électricité est augmentée, que ce soit avec du nucléaire, du photovoltaïque ou de l'éolien, il est impossible de dire d'où vient l'électricité consommée par l'électrolyse.

Les hypothèses

La consommation finale d'électricité

La consommation finale d'électricité est 580 TWh/an hors les pertes en ligne. Elle a le profil horaire de celle de l'année 2013.

Les moyens de production et de stockage d'électricité

Dans tous les cas la production hydraulique est 59 TWh/an. La production à partir de biométhane est 20 TWh/an, sauf dans un cas (production de deux millions de tonnes d'hydrogène).

La capacité éolienne sur terre est 30 GW.

La capacité nucléaire est selon les cas, 55 GW, 58 GW, 65 GW, 70 GW ou 75 GW.

La capacité éolienne en mer est selon les cas 12 GW, 18 GW ou 24 GW.

La capacité photovoltaïque est selon les cas 50 GW, 75 GW ou 100 GW.

La production nucléaire est modulée selon la saison. Son coefficient de disponibilité moyen sur l'année est 0,8 ; il passe par un maximum de 0,9 en hiver.

Les Steps, batteries et flexibilités de la consommation et de la production hydraulique ont ensemble une « contenance » de 240 GWh. Ensemble elles permettent de mieux utiliser les possibilités de production intermittentes et elles diminuent le besoin de capacité de production pilotable de 17 W en général ou de 19 GW lorsque la capacité photovoltaïque est forte.

Les coûts

Les hypothèses de coût de production et de stockage des moyens de production d'électricité sont les mêmes que dans la première partie de cette note.

Voir en annexe 3 les composantes du coût de production et de stockage d'électricité

Le photovoltaïque est moitié sur toiture, moitié sur le sol.

	Nucléaire	Eolien sur t.	Eolien en mer	Photov sur sol	Photov sur toit
LCOE €/MWh	66,2	64	88	38,2	94,7

Le coût du gaz fossile est 50 €/MWh ; le coût du CO₂ est 100 €/tCO₂ ; le coût du biométhane est 100 €/MWh.

Le coût des batteries est 100 €/kWh.

Le coût d'acheminement de l'électricité vers l'électrolyse est 10 €/MWh ; son effet sur le coût de l'hydrogène est de 0,5 €/kg.

Le montant de l'investissement en électrolyse est **700 €/kW ou 2000 €/kW**

Un tableau en annexe 1 montre la différence de coût de production selon que le coût de l'électrolyseur est 700 ou 2000 €/kW et selon le facteur de charge de l'électrolyseur. Par exemple 2,2 €/kg si le facteur de charge est 3000 h/an.

L'électricité non utilisée pour la consommation finale ni pour produire de l'hydrogène a un prix de 20 €/MWh ou 40 €/MWh.

On indique aussi ce que pourrait être sa valeur comme source de chaleur – sous les réserves dites plus haut.

2- Sans production d'hydrogène

Le parc de production ressemble à ce qu'il pourrait être en 2035 : 55 GW de nucléaire, 12 GW d'éolien en mer et 50 GW de photovoltaïque.

Les possibilités excédentaires sont 41 TWh/an. Les exportations ou autres utilisations, avec 17 GW, sont 33 TWh. Le facteur de charge marginal est 1000 h/an.

Les dépenses, y compris le coût du CO₂, sont 46710 ou 46049 M€/an selon que les exportations sont valorisées 20 €/MWh ou 40 €/MWh.

3- Avec une production de 0,5 million de tonnes d'hydrogène par an

Voir en annexe le détail des calculs.

Plusieurs configurations ont étudiées. Ou bien la capacité nucléaire est 58 GW au lieu de 55 GW, ou bien la capacité d'éolien en mer est 18 GW au lieu de 12 GW, ou bien la capacité photovoltaïque est 75 GW au lieu de 50 GW.

Dans chaque configuration, l'électrolyse est alimentée sur excédents ou bien « en base moins la pointe » ; le coût de l'électrolyse est 700 €/kW ou 2000 €/kW ; la valeur des excédents est 20 € ou 40 €/MWh.

Les résultats

Coûts de l'hydrogène, stockage compris	Electrolyse 700 €/kW	Electrolyse 2000 €/kW
Excédents : 20 €/MWh	Entre 3,70 et 3,90 €/kg Sur excédents	Entre 5,01 et 5,43 En base moins la pointe
Excédents : 40 €/MWh	Entre 4,74 et 4,94 €/kg Sur excédents	Entre 6,32 et 6,65 €/kg En base moins la pointe

Si les excédents servent à produire de la chaleur – à titre exploratoire

Les hypothèses relatives à la production de chaleur figurent en annexe. L'électrolyse coûte 2000 €/kg. Son alimentation se fait en base moins la pointe.

Avec une production d'hydrogène, la valeur du MWh d'électricité servant à produire de la chaleur est légèrement supérieure à ce qu'elle est sans production d'hydrogène car la quantité d'électricité pouvant servir à produire de la chaleur est moindre ; donc sa valeur est supérieure. Elle est de l'ordre de 20 €/MWh.

Le coût de production de l'hydrogène : il est de 4,8 €/kg. Il faut y ajouter 0,5 €/kg pour le stockage soit, stockage compris, **5,3 €/kg**.

4 Pour produire 1 million de tonnes par an d'hydrogène

4.1- Avec 62 GW nucléaire au lieu de 55 GW

Sans production d'hydrogène, si la capacité nucléaire est 62 GW au lieu de 55 GW, avec une capacité de 23 GW pour consommer les possibilités excédentaires, les dépenses de production d'électricité très inférieures à ce qu'elles sont avec seulement 55 GW nucléaire.

Cela s'explique par une forte diminution de la production à partir de gaz fossile (13,3 TWh au lieu de 31,0 TWh), une diminution de la capacité de production à partir de gaz (28,6 GW au lieu de 34,5 GW) et plus de possibilités excédentaires pouvant être consommées avec un facteur de charge marginal de 1000 h/an (64,4 TWh au lieu de 33 TWh).

S'il est possible d'avoir 62 GW nucléaire, il est de bonne gestion de porter la capacité nucléaire à ce niveau que l'on produise ou non de l'hydrogène. Pour évaluer le coût de production d'un million de tonnes d'hydrogène, nous prenons donc comme référence ce parc de production avec 62 GW et non un parc de production avec seulement 55 GW.

Sans production d'hydrogène les dépenses sont 45338 M€ ou 44010 M€ par an selon que les possibilités excédentaires sont valorisées 20 €/MWh ou 40 €/MWh.

Note : si l'on prenait comme référence le parc de production avec 55 GW en arguant que l'augmentation de 6 GW est décidée pour produire de l'hydrogène, on pourrait montrer que le coût de production d'hydrogène est de 1 €/kg. cf. *infra*.

1- En utilisant les possibilités de production qui dépassent la consommation finale

Les possibilités de production non utilisées par la consommation finale sont de 73 TWh. Une électrolyse de 15 GW en consomme 54 TWh et produit 1,4 Mt d'hydrogène par an. Une deuxième possibilité d'utilisation de 8 GW en consomme 12,2 TWh.

Le besoin de stockage d'hydrogène est de 38 % de la production annuelle. Son coût est de **1,11 €/kg**

1 Mt/an d'hydrogène ; 62 GW nucléaire, 12GW éolien sur mer ; 50W photovoltaïque Electrolyse sur excédents				
Référ. ; dépenses sans hydrogène	45142	44010		
Coût de l'électrolyse en base moins la p.	700 €/kW		2000 €/kW	
Valeur de l'électricité excédentaire	20 €/MWh	40 €/MWh	20 €/MWh	40 €/MWh
Dépenses M€/an	47683	47685	49485	49487
Coût de production de l'hydrogène €/kg	2,49	3,66	4,22	5,25
Coût y compris le stockage €/kg	3,60	4,67	5,33	6,36

2- En alimentant l'électrolyse « en base moins la pointe »

La capacité d'électrolyse est 6,96 GW ; les quantités effacées sont de 12,1 TWh ; le facteur de charge est de 6000 h/an. Une capacité de 13 GW consomme 21 TWh de possibilités de production excédentaires avec un facteur de charge marginal de 1000 h. Le besoin de stockage d'hydrogène est 15 % de la production annuelle. Son coût est **0,45 €/kg**

1 Mt/an d'hydrogène ; 62 GW nucléaire , 12 GW éolien sur mer ; 50W photovoltaïque				
Electrolyse en base moins la pointe				
Référ. ; dépenses sans hydrogène	45142	43850		
Coût de l'électrolyse en base moins la p.	700 €/kW		2000 €/kW	
Valeur de l'électricité excédentaire	20 €/MWh	40 €/MWh	20 €/MWh	40 €/MWh
Dépenses M€/an	49300	48881	49361	49718
Coût de production de l'hydrogène €/kg	4,16	5,03	5,00	5,87
Coût y compris le stockage €/kg	4,61	5,48	5,45	5,93

3- Comparaison entre les deux modes d'alimentation de l'électrolyse

En comptant le coût du stockage, le coût de l'hydrogène « en base moins la pointe » est inférieur à ce qu'il est sur excédents si l'électrolyse coûte 2000 €/kW. Ce mode d'alimentation est alors préférable d'autant plus que le fonctionnement de l'électrolyse est plus régulier. Si l'électrolyse coûte 700 €/kW, l'alimentation sur excédents est moins coûteuse si l'on ne tient pas compte de la perte de rendement d'une électrolyse qui fonctionne en dessous de sa puissance optimale.

4- Si les excédents servent à produire de la chaleur – à titre exploratoire

Avec 62 GW nucléaire, sans production d'hydrogène, pour minimiser les dépenses une chaudière de 17 GW consomme 56 TWh, dont la valeur est 19,4 €/MWh. Les dépenses de production d'électricité sont 45235 M€. On suppose que l'électrolyse coûte 2000 €/kW ; elle est alimentée en base moins la pointe. Une électrolyse de 6,96 GW alimentée « en base moins la pointe » produit 1,0 Mt d'hydrogène. Une chaudière électrique de 5 GW consomme 10 TWh dont la valeur est 42 €/MWh. La différence de valeur de l'électricité servant à produire de la chaleur selon que l'on produit ou non de l'hydrogène a pour effet de réduire le coût de l'hydrogène.

Le coût de l'hydrogène est 4,76 €/kg, donc, y compris le stockage : 5,21 €/kg.

5- Comment calculer que le coût de production d'hydrogène est de 1 €/kg seulement

Il suffit de dire que la capacité nucléaire a été portée de 55 GW à 62 GW *spécialement pour pouvoir produire un million de tonnes d'hydrogène par an.*

Sans production d'hydrogène, les dépenses sont 46710 ou 46049 M€ selon la valorisation des excédents. Avec une production de 1 Mt/an d'hydrogène par une électrolyse coûtant 700 €/kW et alimentée sur excédents, elles sont de 47683 ou 47438 M€. En rapportant l'augmentation de dépenses à la production d'hydrogène le coût de l'hydrogène est 0,9 €/kg ou 1,4 €/kg selon la valorisation des excédents.

4.2- Avec 23 GW d'éolien en mer au lieu de 12 GW

Si la capacité d'éolien en mer est 23 GW au lieu de 12 GW, avec 55 GW nucléaire et 50 GW photovoltaïque, sans production d'hydrogène et avec une capacité de 24 GW utilisant 63 TWh

d'excédents, les dépenses de production sont inférieures s'ils valent 40 €/MWh. Nous les retenons donc comme référence pour évaluer le coût de production d'hydrogène : 46627 ou 45363 €/MWh par an selon que les possibilités excédentaires sont valorisées 20 €/MWh ou 40 €/MWh.

Les stockages et flexibilités diminuent le besoin de capacité de production à partir de gaz de 20,5 GW.

1- En utilisant les possibilités de production qui dépassent la consommation finale

Les possibilités de production non utilisées par la consommation finale sont de 71 TWh. Une électrolyse de 16,5 GW en consomme 52 TWh et produit 1 Mt d'hydrogène par an. Une deuxième possibilité d'utilisation de 7,5 GW en consomme 17,8 TWh.

Le besoin de stockage d'hydrogène est de 34 % de la production annuelle. Son coût est de **1,02 €/kg**

1 Mt/an d'hydrogène ; 55 GW nucléaire, 23 GW éolien sur mer ; 50 W photovoltaïque				
Electrolyse en base moins la pointe				
Référ. ; dépenses sans hydrogène	46627	45363		
Coût de l'électrolyse en base moins la p.	700 €/kW		2000 €/kW	
Valeur de l'électricité excédentaire	20 €/MWh	40 €/MWh	20 €/MWh	40 €/MWh
Dépenses M€/an	49191	48835	51174	50818
Coût de production de l'hydrogène €/kg	2,54	3,43	4,50	5,39
Coût y compris le stockage €/kg	3,56	4,45	5,52	6,41

2- En alimentant l'électrolyse « en base moins la pointe »

La capacité d'électrolyse est 7,02 GW ; les quantités effacées sont de 12,7 TWh ; le facteur de charge est de 7000 h/an. Une capacité de 14 GW consomme 21 TWh de possibilités de production excédentaires avec un facteur de charge marginal de 1000 h/an. Le besoin de stockage d'hydrogène est 15 % de la production annuelle. Son coût est **0,45 €/kg**

1 Mt/an d'hydrogène ; 55 GW nucléaire, 23 GW éolien sur mer ; 50 W photovoltaïque				
Electrolyse en base moins la pointe				
Référ. ; dépenses sans hydrogène	46627	45363		
Coût de l'électrolyse en base moins la p.	700 €/kW		2000 €/kW	
Valeur de l'électricité excédentaire	20 €/MWh	40 €/MWh	20 €/MWh	40 €/MWh
Dépenses M€/an	50896	50345	51770	51189
Coût de production de l'hydrogène €/kg	4,27	4,98	5,11	5,83
Coût y compris le stockage €/kg	4,72	5,43	5,56	6,28

3- Comparaison entre les deux modes d'alimentation de l'électrolyse

Si l'électrolyse coûte 700 €/kW, le coût de production d'hydrogène, stockage inclus, est moins coûteux lorsque l'électrolyse est alimentée sur les excédents que si elle est alimentée en base moins la pointe. Si l'électrolyse coûte 2000 €/kW, les coûts de l'hydrogène sont à peu près les mêmes avec les deux modes d'alimentation

4.3 Avec 100 GW de photovoltaïque au lieu de 50 GW

Si la capacité photovoltaïque est 100 GW au lieu de 50 GW, avec 55 GW nucléaire et 12 GW d'éolien en mer, sans production d'hydrogène les dépenses sont voisines de ce qu'elles sont avec seulement 50 GW de photovoltaïque. Elles sont un peu supérieures si la valorisation des excédents est 20 €/MWh et un peu inférieures si les excédents valent 40 €/MWh.

Pour le calcul du coût de l'hydrogène, on retient donc comme référence une dépense de 46710 M€ ou de 45857 M€ selon que les excédents valent 20 ou 40€/MWh.

Avec 100 GW photovoltaïque les stockages et flexibilités diminuent le besoin de capacité de production à partir de gaz de 19 GW. Les possibilités excédentaires sont 83,7 TWh. Une capacité de 33 GW en consomme 70,3 TWh avec un facteur de charge marginal de 1000 h..Sans production d'hydrogène les dépenses sont de 47264 M€ ou 45857 M€ selon la valorisation des excédents.

1- En utilisant les possibilités de production qui dépassent la consommation finale

Une électrolyse de 20 GW en consomme 53 TWh et produit 1,02 Mt d'hydrogène par an. Une deuxième possibilité d'utilisation de 13 GW en consomme 17,3 TWh.

Le besoin de stockage d'hydrogène est de 39 % de la production annuelle. Son coût est de **1,20 €/kg**

1 Mt/an d'hydrogène ; 55 GW nucléaire, 12 GW éolien sur mer ; 100 GW photovoltaïque Electrolyse sur excédents				
Référ. ; dépenses sans hydrogène	46710	45857		
Coût de l'électrolyse en base moins la p.	700 €/kW		2000 €/kW	
Valeur de l'électricité excédentaire	20 €/MWh	40 €/MWh	20 €/MWh	40 €/MWh
Dépenses M€/an	50896	50345	52552	52206
Coût de production de l'hydrogène €/kg	2,82	3,85	5,17	6,21
Coût y compris le stockage €/kg	4,02	5,05	6,37	7,41

2- En alimentant l'électrolyse « en base moins la pointe »

La capacité d'électrolyse est 7,08 GW ; les quantités effacées sont de 13,2 TWh ; le facteur de charge est de 6000 h/an. Une capacité de 15 GW consomme 20 TWh de possibilités de production excédentaires avec un facteur de charge marginal de 1000 h. Le besoin de stockage d'hydrogène est 16 % de la production annuelle. Son coût est **0,48 €/kg**

1 Mt/an d'hydrogène ; 55 GW nucléaire, 12 GW éolien sur mer ; 100 GW photovoltaïque Electrolyse en base moins la pointe				
Référ. ; dépenses sans hydrogène	46710	45857		
Coût de l'électrolyse en base moins la p.	700 €/kW		2000 €/kW	
Valeur de l'électricité excédentaire	20 €/MWh	40 €/MWh	20 €/MWh	40 €/MWh
Dépenses M€/an	51471	51906	52322	51906
Coût de production de l'hydrogène €/kg	4,18	5,17	5,03	6,01
Coût y compris le stockage €/kg	4,66	5,65	5,51	6,49

3- Comparaison entre les deux modes d'alimentation de l'électrolyse

Si l'électrolyse coûte 700 €/MWh, le coût de production, stockage compris, est inférieur de 0,6 €/kg à ce qu'il est avec une alimentation en base moins la pointe. Inversement, si le coût de l'électrolyse est 2000 €/kW, les coût de l'hydrogène est inférieur de près d'une euro par kilo avec une alimentation en base moins la pointe.

4.4 A partir d'un parc de production avec 55 GW nucléaire- récapitulation

Le parc de référence dans cette étude comporte 55 GW nucléaire, 12 GW d'éolien en mer et 50 GW de photovoltaïque. Lorsqu'il faut produire 1 million de tonnes par an d'hydrogène, ce parc a été modifié en augmentant soit la capacité nucléaire, soit celle de l'éolien en mer, soit celle du photovoltaïque.

Les coûts ont été calculés selon deux valeurs différentes du coût de l'électrolyse et deux valeurs différentes de l'électricité excédentaire et selon que l'alimentation de l'électrolyse se fait « en base moins la pointe » ou « sur excédents ».

Si le coût de l'électrolyse est de 2000 €/kW, le coût est moindre lorsque l'électrolyse est alimentée « en base moins la pointe ».

Pour 1 Mt/an, coûts de l'hydrogène, stockage compris	Electrolyse 700 €/kW	Electrolyse 2000 €/kW
Excédents : 20 €/MWh	Entre 3,56 et 4,02 €/kg Sur excédents	Entre 5,45 et 5,56 En base moins la pointe
Excédents : 40 €/MWh	Entre 4,45 et 5,05 €/kg Sur excédents	Entre 5,93 et 6,49 €/kg En base moins la pointe

5- Si le but est de minimiser les dépenses de production d'électricité et d'hydrogène

5.1 Produire l'électricité et 1 Mt/an d'hydrogène avec le minimum de dépenses

Dans tous les cas, la consommation finale d'électricité est la même, 580 TWh hors pertes en ligne.

Jusqu'ici les capacités de production nucléaire, éolienne et photovoltaïque ont été fixées sans chercher à minimiser les dépenses totales - ce qui reflète ce qui se passe effectivement.

Dans ce paragraphe on suppose ceci :

- les capacités éoliennes et photovoltaïque ne peuvent pas être inférieures aux valeurs de référence retenues dans cette étude : 30 GW d'éolien sur terre, 12 GW en mer et 50 GW de photovoltaïque. La production à partir de biométhane ne peut pas être supérieure à 20 TWh.

- la capacité nucléaire est calculée de façon à minimiser les dépenses de production d'électricité sans production d'hydrogène ou avec une production de un million de tonnes par an en supposant le coût de l'électrolyse de 2000 €/kW.

- La valeur de l'électricité excédentaire est 40 €/MWh ou 20 €/MWh. On regarde aussi ce que vaudrait une électricité produisant de la chaleur – avec les réserves déjà formulées.

- L'électrolyse s'alimente sur le réseau « en base moins la pointe » ou en ruban sans s'effacer, ou « sur excédents », c'est-à-dire sur les possibilités de production d'électricité qui dépassent les besoins de la consommation finale

Produire 1 million de tonne par an d'hydrogène Electrolyse : 2000 €/kW			
	Excédents : 40 €/MW	Excéd : 20 €/MW	Calculé
Sans production d'hydrogène			19,5 €/MWh
Capacité nucléaire	68 GW	68 GW	68 GW
Capacité pour excédents et consomm	27 GW / 94 TWh	28 GW / 94 TWh	28GW / 95 TWh
Dépenses nettes	42012 M€/an	43879 M€/an	43929 M€/an
			Val. des excédents
Hydrogène en base moins la pointe			20,6 €/MWh
Capacité nucléaire	72 GW	72 GW	72 GW
Capacité de l'électrolyse et consomm.	6,28 GW / 49 TWh	6,39 GW / 49 TWh	6,39 / 49 TWh
Capacité pour excédents et consomm .	23 GW* / 70 TWh	24 GW* 70 TWh	18 GW / 62 TWh
Dépenses	46106	47783	47702
Coût de production de l'hydrogène	4,31 €/kg	3,91 €/kg	3,78 €/kg
Stockage en % de la prod. annuelle.	10 %	10 %	10 %
Coût de l'hydrogène, y/c stockage	4,60 €/kg	4,21 €/MWh	4,08 €/MWh
			Val. des excédents
Hydrogène sur excédents			24,6 €/MWh
Capacité nucléaire	68 GW	68 GW	68 GW
Capacité de l'électrolyse et consomm.	10,6 / 49 TWh	10,5 / 49 TWh	10,5 / 49 TWh
Capacité pour excédents* et consomm.	18 GW / 43 TWh	16 GW / 40 TWh	12 GW / 35,05
Dépenses	46529	47493	47286
Coût de production de l'hydrogène	4,44 €/kg	3,55 €/kg	3,30 €/MWh
Stockage en % de la prod. annuelle.	31 %	31 %	31 %
Coût de l'hydrogène, y/c stockage	5,37 €/kg	4,48 €/kg	4,23 €/kg
			Valeur des excéd.
Hydrogène en base sans effacement			20,7 €/MWh
Capacité nucléaire	75 GW		74 GW
Capacité de l'électrolyse et consomm.	5,59 GW / 49 TWh		45,59 GW 49 TWh
Capacité pour excédents* et consomm.	27 GW / 91 TWh		22 / 80 TWh
Dépenses	46916		48819
Coût de production de l'hydrogène	4,85 €/kg		4,89€/kg
Stockage en % de la prod. annuelle.	0 %		0 %
Coût de l'hydrogène, y/c stockage	4,85 €/MWh		4,89 €/MWh
* La capacité pour utiliser les excédents : lorsque la valeur des excédents est donnée, la capacité est telle que le facteur de charge marginal est 1000 €/an ; lorsque la valeur de l'excédent est calculée, la capacité est ajustée pour maximiser le revenu.			

5.2 Quelques commentaires sur les résultats

Comparaison entre les trois modes d'alimentation de l'électrolyse

Le résultat, du point de vue de la collectivité se mesure non pas sur le coût de l'hydrogène mais sur les dépenses totales. Si les excédents sont valorisés 40 €/MWh, il vaut mieux alimenter l'électrolyse à puissance constante avec effacement. Si les excédents valent 20 €/MWh, il est préférable de l'alimenter sur excédents, alors que

6- Conclusion - provisoire

On a montré les précautions à prendre parlant du coût de production de l'hydrogène. Il vaut mieux éviter par exemple de dire que la capacité de production d'électricité est *accrue pour pouvoir produire plus d'hydrogène*. C'est la première étape d'un raisonnement apparemment de bon sens qui conduit à un coût de l'hydrogène faussement très bas. Ici, le calcul du coût de production d'hydrogène a été fait de façon à ne pas pénaliser la consommation finale d'électricité.

Avec un électrolyse alimentée sur le réseau électrique et avec des capacités de production d'électricité qu'il est possible de prévoir en 2035, le coût de production et de stockage d'hydrogène serait compris entre 6 et 6,5 €/kg si le coût de l'installation d'électrolyse clés en main est 2000 €/kW et si les excédents exportés ou utilisés à autre chose valent 40 €/MWh.

Lorsque le parc de production d'électricité comportera suffisamment de nucléaire pour produire l'électricité au moindre coût, le coût de production d'hydrogène sera moindre. Il se rapprocherait de ce qu'il est lorsque l'hydrogène est alimenté par une source d'électricité nucléaire dédiée : on a calculé autour de **4,40 €/kg**, y/c le stockage.

On a aussi été étudié, à titre exploratoire, le cas où l'exportation pour remplacer une coûteuse production d'électricité à partir de charbon ou de gaz ne serait pas possible. Alors la valeur de ces excédents comme source de chaleur serait moindre que celle des exportations, ce qui pourrait légèrement diminuer le coût de l'hydrogène.

Cette étude a été réalisée à l'aide d'un outil de simulation du système de production et de stockage d'électricité, d'hydrogène et de chaleur simplifié et avec des informations incomplètes sur la production et la consommation de chaleur. Elle pourrait être prolongée avec de meilleures informations et en tenant compte d'une autre source de chaleur, par prélèvement au sortir des réacteurs nucléaires.

Comme les moyens de calcul et toutes les hypothèses sont publiés, ces résultats peuvent aisément être vérifiés ou corrigés. Tout commentaire sera bienvenu.

Annexe 1

Etude sur le coût de production d'hydrogène par électrolyse L'effet du coût de l'électrolyseur sur le coût de production d'hydrogène

Le coût de l'électrolyseur, le capex, est 700 €/kW ou 2000 €/kW.

La durée de vie est 25 ans. Le taux d'actualisation est 4,5 %. Les frais annuels de gestion sont 2,5 % du capex

Les frais fixes annuels, y compris les dépenses fixes de gestion, sont 64,7 €/kW/an ou 185 €/kW/an. La différence est 129 €/kW/an.

Si le facteur de charge est 1000 heures, la consommation annuelle d'électricité est 1 MWh ; la production annuelle d'hydrogène est de 20 kg. Le coût de production d'hydrogène avec un électrolyseur à 2000 €/kW et donc supérieur de 6,5 €/kg à ce qu'il serait avec un électrolyseur à 700 €/kW.

Si le facteur de charge est	La différence de coût de production d'hydrogène selon que l'électrolyseur coûte 2000 €/kW ou 700 €/kW est
1000 h/an	6,5 €/kg
2000h/an	3,2 €/kg
3000 h/an	2,2 €/kg
4000 h/an	1,6 €/kg
5000 h/an	1,3 €/kg
6000 h/an	1,1 €/kg
7000 h/an	0,9 €/kg

Annexe 2

Etude sur le coût de production de l'hydrogène

Quelle valeur donner aux possibilités de production d'électricité excédentaires

une amorce de réflexion

Cette étude porte sur le système de production d'électricité et d'hydrogène. Elle ne demande donc pas que l'on donne une valeur à l'électricité consommée pour produire de l'hydrogène. En revanche, lorsque des possibilités de production d'électricité sont consommées hors de ce système, et que la production d'hydrogène a pour effet de modifier les quantités ainsi « exportées » de ce système, il est faut leur donner une valeur. Cette valeur dépend de l'usage qui sera fait de ces excédents.

Un excédent sera exporté s'il rencontre une demande. Ce sera le cas lorsqu'il remplacera une production à partir de gaz ou de charbon. Il faudrait pour mesurer cela confronter les chroniques horaires d'excédents et celles de production à partir d'énergie dans les pays voisins, en tenant compte des possibilités de stockage d'électricité. Cela dépasse le champ de cette étude.

Une possibilité de production excédentaire peut être utilisée pour produire de la chaleur livrée par les réseaux de chaleur. Une production de chaleur par effet Joule présente *a priori* l'avantage d'être parfaitement flexible, qualité qui sera de plus en plus appréciée pour utiliser des excédents de production d'électricité.

La chaleur ainsi produite remplace alors du gaz fossile ou du biométhane consommée par l'industrie ou des réseaux de chauffage urbain. Elle peut être utilisée de suite ou stockée. L'utilisation directe est forcément limitée puisque ces excédents apparaissent hors des périodes de chauffage.

On suppose ici qu'il existe une capacité de stockage qui coûte peu, de capacité limitée, et une autre qui coûte beaucoup plus cher : un stockage géothermique.

Un stockage qui coûte peu cher : réchauffer l'eau de réservoirs utilisés par de la géothermie.

La valeur de l'électricité est calculée de sorte que l'électricité remplaçant du gaz ne modifie pas les dépenses de dépenses de chaleur.

La valeur de l'électricité dépend donc de données à introduire dans la simulation :

du prix du gaz

du coût d'investissement de la chaudière électrique par effet Joule, et de tous les autres frais fixes

du taux de pertes de stockage déstockage de la chaleur

de la quantité horaire d'électricité pouvant être consommée directement

de la capacité et du coût d'un mode de stockage « pas cher »

du coût d'un stockage coûteux.

et de grandeurs calculées par la simulation du système électricité-hydrogène :

les quantités d'électricité excédentaire, heure par heure, en fonction de la capacité d'accueil de la chaudière électrique.

J'ai aussi étudié le cas où l'électricité serait utilisée par des pompes à chaleur, ce qui augmenterait la production de chaleur. Comme une bonne partie de cette chaleur devrait être stockée et que le stockage coûte cher, cette idée,, n'est pas une bonne idée – sauf probablement pour un petit nombre de TWh/an d'électricité.

Les hypothèses

Les hypothèses sont proposées à titre illustratif, pour montrer le raisonnement. Dans une étude qui prolonge celle-ci, les possibilités de production d'électricité qui dépassent la consommation finale et la consommation par l'électrolyse sont confrontées heure par heure à la consommation de chaleur des réseaux de chaleur.

Prix du gaz : soit du gaz fossile y compris le coût du CO₂, soit du biogaz : **80 €/MWh th**

La chaudière : 200 €/kW

La limite de quantité horaire pouvant être consommée directement hors période de chauffage ; 1000 MWh.

La capacité et le coût d'un stockage peu coûteux : 2 TWh et, en annuité, 10 €/MWh

Le coût d'un stockage géologique de chaleur : selon une étude récente Large Storage system for DHC Networks de Flexynets (financée par l'Union européenne) de mars 2019 : 1000 à 2000 euros par MWh de capacité. Je retiens 2000 €/MWh. Amorti sur 100ans avec un taux d'actualisation de 2,5 %, le coût d'un investissement de 2000 € est, en annuité de 54,6 €/MWh.

Le taux de perte su stockage est de 30 %.

Une configuration

Consommation d'électricité ; 580 TWh. Capacité nucléaire : 62 GW ; capacité éolienne : 30 GW sur terre et 12 GW en mer ; capacité photovoltaïque : 50 GW.

Sans production d'hydrogène,

Les excédents sont 72 TWh.

Une capacité de chaudière de 18 GW consomme 58 TWh.

La quantité consommée directement est 17 TWh ; les quantités à stocker sont 40,8 TWh.

La chaleur utile est, après pertes de stockage : 45,8 TWh. Sa valeur est 3665 M€/an

Il faut stocker 40,8 TWh. L'annuité du stockage coûteux est 54,6 €/MWh.

Les dépenses de stockage sont 2143 M€.

Les dépenses fixes de chauffage sont 423 M€.

Les dépenses d'électricité sont donc 3665 diminué de 2143 et 423 soit 1100.

La valeur de l'électricité est **18,9 €/MWh.**

Avec une production de 1 Mt/an d'hydrogène sur excédents

La capacité de la chaudière est 10 TWh. Elle consomme 17 TWh.

La valeur de l'électricité de chauffage est **31 ,7 €/MWh.**

C'est donc plus que lorsque la quantité consommée est plus importante. Cela s'explique par le fait que la proportion de chaleur directement consommée est plus grande, ce qui diminue le poids du stockage.

Avec une production de 1 Mt/an d'en base moins la pointe

La capacité de la chaudière est 10 GW. Elle consomme 17 TWh.

La valeur de l'électricité est **30 €/MWh.**

La valeur de l'électricité de chauffage est donc supérieure avec production d'hydrogène que sans production d'hydrogène. Comparé ce que serait le coût de l'hydrogène si la valeur de l'électricité excédentaire était la même dans les deux cas, cela a pour effet de réduire le coût de l'hydrogène lorsqu'il n'y a pas d'autre débouché pour l'électricité qui dépasse les besoins de la consommation électrique finale que la production d'hydrogène et de chaleur.

Annexe 3

Etude sur le coût de production d'hydrogène par électrolyse

Les composantes du coût de production et de stockage d'électricité

Toutes les composantes des coût de production et de stockage d'électricité et d'hydrogène figurent sur cette page : www.hprevot.fr/Etd-cout-hydrog-rfr-55-GW-0-H2

Eolien en mer :

Coût d'installation, partie éolien posé et partie éolien en mer, y/c le raccordement au réseau : 4000 €/kW ; 25 ans de durée de vie ; taux d'actualisation de 4,5 % ; frais de gestion de 100 €/kW/an. Facteur de charge : 4200 h/an¹. Coût de production : 88 €/MWh.

Eolien sur terre

Coût : 1400 €/kW (y/c le raccordement au réseau), 25 ans de durée de vie, et 40 €/kW/an ; taux d'actualisation de 4,5 %. Facteur de charge : 2100 h/an. Profil de production horaire : comme en France en 2013. Coût de production : 64 €/MWh

Photovoltaïque sur le sol :

Coût d'installation : 400 €/kW (y/c le raccordement au réseau), 25 ans de durée de vie ; taux d'actualisation de 4,5 % ; frais de gestion de 15 €/kW/an. Facteur de charge : 1100 h/an. Coût de production : 38,2 €/MWh.

Photovoltaïque sur toiture

Coût d'installation : 1100 €/kW (y/c le raccordement au réseau), 25 ans de durée de vie ; taux d'actualisation de 4,5 % ; frais de gestion de 30 €/kW/an. Facteur de charge : 1100 h/an. Coût de production : 38,2 €/MWh

Nucléaire

Coût d'installation : 6000 €/kW, 60 ans de durée de vie, coefficient de disponibilité : 80 %. Taux d'actualisation de 4,5 % ; ; frais de gestion de 110 €/kW/an ; 9 €/MWh. Coût de production : 66,2 €/MWh

Le stockage d'électricité

Les pertes de charge et décharge sont de 10 %. Le coût est 100 €/kWh.

L'acheminement de l'électricité vers l'électrolyse ; les excédents de production d'électricité

Les pertes en ligne et le coût d'acheminement de l'électricité jusqu'à l'électrolyse

Lorsque l'électrolyse est alimentée sur le réseau

Pertes en ligne : 7 %

Dépenses de réseau : 10 €/MWh

Lorsque l'électrolyse est alimentée par une source d'électricité qui lui est dédiée

Les pertes en lignes et les dépenses de réseau sont considérées comme négligeables

¹ Le profil horaire de l'éolien en mer est celui qui a été retenu dans une étude faite par le CIRED fin 2020 : « How sensitive are optimal fully renewable power systems to technology cost uncertainty? » par Behrang Shirizadeh -Quentin Perrier -Philippe Quirion est publiée dans The energy journal

Annexe 4

Produire 0,5 million de tonnes par an d'hydrogène

Sans production d'hydrogène la capacité nucléaire est 55 GW, laa capacité d'éolien en mer est 12 GW et la capacité photovoltaïque est 50 GW.

Pour produire 0,5 Mt/an d'hydrogène quatre possibilités sont étudiées :

- 1- en prélevant sur les excédents sans modifier le parc de production ;
- 2- en augmentant la capacité nucléaire de 3 GW ;
- 3- en augmentant la capacité des éoliennes en mer de 6 GW ;
- 4- en augmentant la capacité photovoltaïque de 25 GW..

Le coût d'investissement de l'électrolyse est **700 €/kW** ou **2000 €/kW**.

La valeur de l'électricité excédentaire est 20 €/MWh ou 40 €/MWh.

1 Sans modifier la composition du parc de production

L'électrolyseur peut être alimentée « sur excédents » ou « en base moins la pointe ».

1- En utilisant les possibilités de production qui dépassent la consommation finale

Avec 11,5 GW d'électrolyse, le facteur de charge de l'électrolyse est 2110 h/an. En sus, avec une capacité de 5,5 GW, il est possible de valoriser 7 TWh. Pour livrer l'hydrogène à flux constant, le besoin de stockage d'électricité est de 40 % de la production annuelle. Son coût est 1,20 €/kg.

Dépenses sans production d'hydrogène M€	46710	46049		
Coût de l'électrolyse en base moins la p.	700 €/kW		2000 €/kW	
Valeur de l'électricité excédentaire	20 €/MWh	40 €/MWh	20 €/MWh	40 €/MWh
Dépenses M€/an	48233	48091	49615	49473
Coût de production de l'hydrogène €/kg	3,04	4,08	5,80	6,85
Coût y compris le stockage €/kg	4,24	5,28	7,00	8,05

2- En alimentant l'électrolyse « en base moins la pointe »

Il faut une capacité d'électrolyse de 3,54 GW. Elle consomme 24 TWh et les quantités « effacées » sont 7 TWh. Son facteur de charge est 6782 h/an. 13 TWh d'excédents sont utilisés par une capacité de 10 GW. Le besoin de stockage est égal à 17 % de la production annuelle. Son coût est de 0,50 €/kg.

Si le coût de l'électrolyse est 700 €/kW

Les dépenses totales, hors stockage d'hydrogène, sont 49059 M€ ou 48791 M€ selon la valorisation des excédents. Hors stockage le coût est donc de 4,75 ou 5,61. Soit, y compris le stockage, **5,25 ou 6,05 €/kg**

Si le coût de l'électrolyse est 2000 €/kW

Les dépenses totales, hors stockage d'hydrogène sont 49484 ou 49216; le coût est 5,61 ou 6,41 €/kg. Soit, y compris le stockage, **6,11 ou 6,91 €/kg** selon la valorisation des excédents.

Dépenses sans production d'hydrogène	46710	46049		
Coût de l'électrolyse en base moins la p.	700 €/kW		2000 €/kW	
Valeur de l'électricité excédentaire	20 €/MWh	40 €/MWh	20 €/MWh	40 €/MWh
Dépenses M€/an	49059	48791	49484	49216

Coût de production de l'hydrogène €/kg	4,75	5,61	5,61	6,41
Coût y compris le stockage €/kg	5,25	6,05	6,11	6,91

3- Comparaison entre les deux modes d'alimentation de l'électrolyse

Si l'électrolyse coûte 700 €/kW, l'alimentation sur excédents est sensiblement moins coûteuse que « en base moins la pointe ». Si elle coûte 2000 €/kW, le résultat est inversé. La différence de coût, dans un sens ou dans l'autre, est de 1 €/kg, soit 20 à 25 % du coût total.

2 Avec 3 GW de plus de capacité nucléaire : 58 GW au lieu de 55 GW

Note sur la méthode de calcul : Si l'on considérait que la capacité nucléaire a été augmentée de 3 GW *spécifiquement* « pour produire de l'hydrogène », on comparerait ces dépenses aux dépenses de production d'électricité avec 55 GW nucléaire et sans production d'hydrogène et l'on trouverait pour le coût de production de l'hydrogène une valeur très basse. Ce serait une illusion d'optique.

En effet, pour répondre à la consommation finale d'électricité sans production d'hydrogène, le coût de production avec 58 GW nucléaire est inférieur à ce qu'il est avec seulement 55 GW nucléaire. En conséquence, s'il est possible d'avoir 58 GW nucléaire, le coût de production d'hydrogène se calcule en comparant les dépenses totales aux dépenses de production d'électricité sans production d'hydrogène et avec 58 GW nucléaire.

Avec 58 GW nucléaire, sans modifier la capacité éolienne et photovoltaïque et sans production d'hydrogène, les possibilités excédentaires sont 53,9 TWh. Une capacité de 20 GW utilise ces excédents avec un facteur de charge marginal de 1000 h/an.

Les dépenses nettes sont 46026 M€/an ou 45094 M€ selon que la valorisation des excédents est 20 ou 40 €/MWh.

On rappelle qu'avec 55 GW nucléaires, elles sont de 46710 ou 46049 M€/an

1- En utilisant les possibilités de production qui dépassent la consommation finale

Une électrolyse de 8,2 GW consomme 26 TWh (le facteur de charge est 3200 h/an) et produit 0,5 Mt d'hydrogène par an. Une deuxième possibilité d'utilisation de 11,8 GW en consomme 20,6 TWh.

Le besoin de stockage d'hydrogène est de 39 % de la production annuelle. Son coût est de **1,20 €/kg**

Dépenses sans production d'hydrogène	46026	45094		
Coût de l'électrolyse en base moins la p.	700 €/kW		2000 €/kW	
Valeur de l'électricité excédentaire	20 €/MWh	40 €/MWh	20 €/MWh	40 €/MWh
Dépenses M€/an	47337	46925	48233	47910
Coût de production de l'hydrogène €/kg	2,62	3,66	4,39	5,63
Coût y compris le stockage €/kg	3,82	4,86	5,59	6,83

Si l'on se rapportait aux dépenses sans production d'hydrogène avec seulement 55 GW nucléaire, le calcul du coût de production d'hydrogène, avec une électrolyse à 700 €/kW, conduirait à **1,25 €/kg ou 1,75 €/kg.**

2- En alimentant l'électrolyse « en base moins la pointe »

La capacité d'électrolyse est 3,48 GW ; les quantités effacées sont de 6,2 TWh ; le facteur de charge est de 6300 h/an. Une capacité de 15 GW consomme 25 TWh de possibilités de production excédentaires. Le besoin de stockage d'hydrogène est 15 % de la production annuelle. Son coût est **0,45 €/kg**

Dépenses sans production d'hydrogène	46026	45094		
Coût de l'électrolyse en base moins la p.	700 €/kW		2000 €/kW	
Valeur de l'électricité excédentaire	20 €/MWh	40 €/MWh	20 €/MWh	40 €/MWh
Dépenses M€/an	48122	47614	48540	48032
Coût de production de l'hydrogène €/kg	4,19	5,04	4,98	5,87
Coût y compris le stockage €/kg	4,64	5,49	5,43	6,32

3- Comparaison entre les deux modes d'alimentation de l'électrolyse

En ajoutant le coût du stockage au coût de production, si l'électrolyse coûte 700 €/kW l'alimentation sur excédents est moins coûteuse ; en revanche, si l'électrolyse coûte 2000 €/kW, c'est l'alimentation « en base moins la pointe » qui est moins coûteuse.

Avec les hypothèses retenues ici la différence de coût d'hydrogène dans un sens ou dans l'autre est d'environ 0,6 €/kg.

4- Si les excédents servent à produire de la chaleur – à titre exploratoire

Les hypothèses relatives à la production de chaleur figurent en annexe. L'électrolyse coûte 2000 €/kg. Son alimentation se fait en base moins la pointe.

Sans production d'hydrogène, les dépenses totales de production d'électricité et de chaleur sont minimisées si la capacité du chauffage par effet Joule est 6 GW. Elle produit 21 TWh. La valeur de l'électricité est 29,9 €/MWh. Les dépenses de production d'électricité sont 46351 M€/an. Avec une électrolyse de 3,5 GW qui consomme 24 TWh (la consommation « effacée » est 6,6 TWh), une chaudière de 5 GW consomme 11,8 TWh valant 42 €/MWh. Les dépenses de production d'électricité et d'hydrogène sont 48670 M€. La production d'hydrogène est 0,504 Mt/an. Son coût est **4,60 €/kg**

3- Avec 6 GW de plus d'éolien en mer : 18 GW au lieu de 12 GW

Si la capacité d'éoliennes est 18 GW au lieu de 12 GW, les stockages et flexibilités diminuent le besoin de capacité de production de 19 GW au lieu de 17 GW.

Sans production d'hydrogène, les possibilités excédentaires sont 56,8 TWh. Une capacité de 21 GW en consomme 49,1 TWh avec un facteur marginal de 1000 h/an.

Avec ce parc de production d'électricité, les dépenses pour répondre à la consommation finale sont (légèrement) inférieures à ce qu'elles sont avec seulement 12 GW d'éolien en mer. C'est donc ce parc de production qui nous servira de référence pour calculer le coût de production d'hydrogène.

Les dépenses, sans production d'hydrogène sont 46602 ou 45619 M€/an selon que la valorisation des excédents est 20 ou 40 €/MWh.

1- En utilisant les possibilités de production qui dépassent la consommation finale

Avec une capacité éolienne en mer de 18 GW, les possibilités de production non utilisées par la consommation finale sont de 56,8 TWh. Une électrolyse de 8 GW en consomme 26 TWh (le facteur de charge est 2700 h/an) et produit 0,5 Mt d'hydrogène par an. Une deuxième possibilité d'utilisation de 13 GW en consomme 28,6 TWh.

Le besoin de stockage d'hydrogène est de 37 % de la production annuelle. Son coût est de **1,11 €/kg**

Dépenses sans production d'hydrogène	46602	45619		
Coût de l'électrolyse en base moins la p.	700 €/kW		2000 €/kW	

Valeur de l'électricité excédentaire	20 €/MWh	40 €/MWh	20 €/MWh	40 €/MWh
Dépenses M€/an	47892	47425	48854	48387
Coût de production de l'hydrogène €/kg	2,58	3,64	4,50	6,65
Coût y compris le stockage €/kg	3,69	4,74	5,61	6,65

2- En alimentant l'électrolyse « en base moins la pointe »

La capacité d'électrolyse est 3,42 GW ; les quantités effacées sont de 6,0 TWh ; le facteur de charge est de 6800 h/an. Une capacité de 17 GW consomme 29 TWh de possibilités de production excédentaires. Le besoin de stockage d'hydrogène est 15 % de la production annuelle. Son coût est **0,45 €/kg**

0,5 Mt/an d'hydrogène ; 55 GW nucléaire, 18 GW éolien sur mer ; 50 GW photovoltaïque Electrolyse en base moins la pointe				
Référ. : dépenses sans hydrogène	46602	45619		
Coût de l'électrolyse en base moins la p.	700 €/kW		2000 €/kW	
Valeur de l'électricité excédentaire	20 €/MWh	40 €/MWh	20 €/MWh	40 €/MWh
Dépenses M€/an	48685	48107	49097	48519
Coût de production de l'hydrogène €/kg	4,20	5,02	5,03	5,85
Coût y compris le stockage €/kg	4,62	5,44	5,48	6,65

3- Comparaison entre les deux modes d'alimentation de l'électrolyse

En ajoutant le coût du stockage au coût de production, l'alimentation en base moins la pointe est légèrement moins coûteuse si l'électrolyse coûte 2000 €/kW. Mais l'avantage de ce mode d'alimentation est en réalité supérieur à ce qui est calculé ici puisque les fluctuations de puissance d'électrolyse en diminuent le rendement.

4- Si les excédents servent à produire de la chaleur – à titre exploratoire

L'électrolyse coûte 2000 €/kW ; elle est alimentée en base moins la pointe. Sans production d'hydrogène, une chaudière de 8 GW consomme 28 TWh, dont la valeur est 25 €/MWh. Les dépenses de production d'électricité sont 46980 M€. Une électrolyse de 3,54 GW alimentée en base moins la pointe produit 0,503 Mt d'hydrogène. Une chaudière électrique de 5 GW consomme 12,6 TWh dont la valeur est 40,4 €/MWh. Le coût de l'hydrogène est **4,61 €/kg**

4- Avec 25 GW de plus de photovoltaïque : 75 GW au lieu de 50 GW

Si la capacité photovoltaïque est 75 GW au lieu de 50 GW, les stockages et flexibilités diminuent le besoin de capacité de production de 18 GW.

Sans production d'hydrogène, les possibilités excédentaires sont 62 TWh. Une capacité de 24 GW en consomme 51,2 TWh avec un facteur marginal de 1000 h/an.

Avec ce parc de production d'électricité, les dépenses pour répondre à la consommation finale sont très proches de ce qu'elles sont avec seulement 50 GW de photovoltaïque : légèrement supérieures si la valorisation des excédents est 20 €/MWh ; légèrement inférieures si elle est de 40 €/MWh. C'est donc ce parc de production qui nous servira de référence pour calculer le coût de production d'hydrogène.

Les dépenses, sans production d'hydrogène sont 46928 ou 45903 M€/an selon que la valorisation des excédents est 20 ou 40 €/MWh.

1- En utilisant les possibilités de production qui dépassent la consommation finale

Les possibilités de production non utilisées par la consommation finale sont de 62 TWh. Une électrolyse de 9 GW en consomme 26 TWh et produit 0,51 Mt d'hydrogène par an. Une deuxième possibilité d'utilisation de 15 GW en consomme 24,8 TWh.

Le besoin de stockage d'hydrogène est de 40 % de la production annuelle. Son coût est de **1,20 €/kg**

0,5 Mt/an d'hydrogène ; 55 GW nucléaire,12GW éolien sur mer ; 75W photovoltaïque				
Electrolyse sur excédents				
Référ. ; dépenses sans hydrogène	46928	45903		
Coût de l'électrolyse en base moins la p.	700 €/kW		2000 €/kW	
Valeur de l'électricité excédentaire	20 €/MWh	40 €/MWh	20 €/MWh	40 €/MWh
Dépenses M€/an	48803	47806	49384	48887
Coût de production de l'hydrogène €/kg	2,70	3,74	4,82	5,86
Coût y compris le stockage €/kg	3,90	4,94	5,02	6,34

2- En alimentant l'électrolyse « en base moins la pointe »

La capacité d'électrolyse est 3,48 GW ; les quantités effacées sont de 6,3 TWh ; le facteur de charge est de 6800 h/an. Une capacité de 18 GW consomme 29 TWh de possibilités de production excédentaires. Le besoin de stockage d'hydrogène est 15 % de la production annuelle. Son coût est **0,45 €/kg**

0,5 Mt/an d'hydrogène ; 55 GW nucléaire,12GW éolien sur mer ; 75W photovoltaïque				
Electrolyse en base moins la pointe				
Référ. ; dépenses sans hydrogène	46928	45903		
Coût de l'électrolyse en base moins la p.	700 €/kW		2000 €/kW	
Valeur de l'électricité excédentaire	20 €/MWh	40 €/MWh	20 €/MWh	40 €/MWh
Dépenses M€/an	48983	48404	49384	48887
Coût de production de l'hydrogène €/kg	4,11	5,00	4,95	5,96
Coût y compris le stockage €/kg	4,56	5,45	5,01	6,41

3- Comparaison entre les deux modes d'alimentation de l'électrolyse

Comme avec une augmentation de la capacité nucléaire ou éolienne, l'alimentation sur excédents est moins coûteuse si l'électrolyse coûte 700 €/MWh. Si elle coûte 2000 €/kW, le coût de l'hydrogène, stockage inclus est à peu près le même que l'électrolyse soit alimentée sur excédents ou en base moins la pointe.

4- Si les excédents servent à produire de la chaleur – à titre exploratoire

L'électrolyse coûte 2000 €/kW ; elle est alimentée en base moins la pointe. Sans production d'hydrogène, pour minimiser les dépenses, une chaudière de 6 GW consomme 19 TWh, dont la valeur est 30 €/MWh. Les dépenses de production d'électricité sont 47363 M€. Une électrolyse de 3,54 GW alimentée en base moins la pointe produit 0,503 Mt d'hydrogène. Une chaudière électrique de 5 GW consomme 11 TWh dont la valeur est 42 €/MWh. Le coût de l'hydrogène est **4,46 €/kg**

Annexe 5

Etude sur le coût de production de l'hydrogène

Comment utiliser le simulateur SimelSP3 pour calculer le coût de production de l'hydrogène

lorsque l'électrolyse est alimentée par une source d'électricité dédiée

On introduit dans SimelSP3 des valeurs nulles pour la consommation finale d'électricité et toutes les sources d'électricité sauf celles qui alimentent l'électrolyse. S'il n'y a pas de stockage d'électricité, l'utilisateur introduit la capacité de l'électrolyse alimentée par les possibilités « excédentaires ». Le rapport entre les dépenses totales et la production donne le coût de production de l'hydrogène ; le modèle donne le coût d l'hydrogène en €/kg. L'utilisateur ajuste la capacité de l'électrolyse de façon à minimiser le coût d l'hydrogène.

SimelSP3 peut aussi représenter le cas où il existe une capacité de stockage d'électricité. Alors l'utilisateur introduit les caractéristiques du stockage (taux de pertes et coût) puis il ajuste la production d'hydrogène « en base moins la pointe », la contenance du stockage en GWh et ses puissances de charge et décharge en GW, et la capacité de l'électrolyse alimentée « sur excédents » de façon à minimiser le coût de production d'hydrogène.

SimelSP3 calcule le besoin de production à partir de gaz fossile, en GW et en GWh ; ici ce besoin est nul car SimelSP3 réduit ou arrête l'alimentation de l'électrolyse selon le niveau de production d'électricité et les possibilités du déstockage.

Lorsque l'électrolyse s'alimente à une source d'électricité qui lui est dédiée, on a supposé dans cette étude on que le coût d'acheminement de l'électricité et les pertes en ligne sont négligeables – le coût d'acheminement est introduit par l'utilisateur sur la feuille 2.

Une fois choisis le coût d'investissement de l'électrolyse, les moyens et les coûts de production d'électricité et les coûts de stockage, la capacité d'électrolyse qui minimise les dépenses est trouvée, en tâtonnant, en moins de deux minutes.