

Réflexions à propos du coût de production de l'hydrogène par électrolyse

Le coût de production d'hydrogène : entre 2,4 €/kg(??) et 11 €/kg, sans le coût du stockage

Supposons qu'il n'y ait pas de production d'hydrogène et que la production d'électricité réponde à une demande supérieure de 20 % à celle d'aujourd'hui sans consommer d'énergie fossile et avec seulement 20 GW de nucléaire. Puis, il est décidé d'augmenter la capacité nucléaire pour pouvoir produire un million de tonnes par an d'hydrogène. Les dépenses, y compris la production d'hydrogène, augmentent de 2,4 milliards d'euros par an. Le coût *apparent* de l'hydrogène est donc de 2,4 € par kilo d'hydrogène - résultat trompeur –cf. *in fine*.

On lit souvent dans la littérature que le coût de l'électrolyseur est de 900 €/kW et devrait beaucoup diminuer. On lit plus rarement que le coût de tout ce qui entoure l'électrolyseur est aujourd'hui 2000 €/kW et diminuera peu. C'est pourquoi, je retiens ici un investissement de 2200 €/kW.

Autre situation. La consommation d'électricité est la même que ci-dessus. La production à partir d'énergie fossile est 27 TWh/an. Sans production d'hydrogène, il y a 50 GW nucléaire. On augmente la capacité de production d'électricité sans augmenter la production à partir d'énergie fossile. Le coût moyen du premier million de tonnes annuel d'hydrogène est ici de 4,9 €/kg ou 5,9 €/kg ou 7,6 €/kg selon que, pour produire l'hydrogène, on augmente la capacité nucléaire ou éolienne ou photovoltaïque.

Cette note présente une étude qui analyse ce qui fait le « coût » de l'hydrogène, la première étape étant de définir ce que l'on entend par « coût ».

On utilise pour cela un logiciel de simulation du *système* formé par la production d'électricité et d'hydrogène.

L'hydrogène peut être consommé hors du système électrique ou servir à produire le gaz de synthèse dont le système électrique a parfois besoin. L'électrolyse peut être alimentée à puissance constante sauf lorsqu'il faut utiliser, pour produire de l'électricité, des turbines à combustion (TAC). Le logiciel calcule de combien les flexibilités de la consommation et de la production hydraulique et les possibilités des moyens de stockage (exprimées en GWh) permettent de diminuer le besoin de capacité de production à partir de gaz ; cette diminution du besoin de capacité (exprimée en GW) dépend de la configuration du parc de production.

Les principales hypothèses figurent en annexe ; l'ensemble des hypothèses et des résultats est publié sur www.hprevot.fr

Définition du coût de l'électricité consommée par les électrolyseurs

Il est habituel de calculer le coût de production d'hydrogène à partir du montant de l'investissement (non seulement l'électrolyseur mais aussi de tout ce qui l'entoure), des coûts fixes annuels, du facteur de charge des équipements et du coût, pour l'électrolyse, de l'électricité.

Le facteur de charge dépend de la façon dont l'électricité est produite (en « base moins la pointe » ou « sur excédents »), du profil horaire de la consommation d'électricité et de l'activité éolienne, de la capacité des différents moyens de production d'électricité, des possibilités de stockage.

Quant au prix de l'électricité, il serait commode de dire que c'est un « prix de marché ». Mais la réflexion et l'expérience montrent à quel point le prix de marché est incapable d'orienter les décisions de d'investissement et de financer ces investissements. Il suffit de rappeler l'ampleur et la brutalité de ses variations selon, par exemple, le niveau de la consommation ou la force du vent.

Ici, le coût de production de l'hydrogène est calculé du point de vue de la collectivité. Le coût de production d'une quantité *supplémentaire* d'hydrogène est la différence des dépenses totales de production d'électricité et d'hydrogène avec ou sans cette quantité supplémentaire d'hydrogène.

On calcule ainsi le coût du premier et du deuxième million de tonnes d'hydrogène produit en un an.

Le coût de l'hydrogène dans quelques situations

La consommation finale d'électricité est proche de ce qu'elle pourrait être en 2030 : 530 TWh hors pertes en ligne – soit 567 TWh avant les pertes en ligne, comme la calcule RTE. Elle a le même profil horaire que celle de l'année 2013, une année moyenne.

A cela s'ajoute une consommation pour produire 1 ou 2 millions de tonnes d'hydrogène par an.

Quatre situations de référence :

Deux situations avec une production à partir de gaz fossile et deux sans émissions de CO₂.

Avec une production de 27 TWh à partir de gaz fossile

- **SR1** : une capacité **nucléaire de 50 GW** ; les capacités d'éolienne sur terre, en mer et photovoltaïque sont 30 GWh, 12 GW et 50 GW

- **SR2** : une capacité **nucléaire de 30 GW** ; les capacités d'éolienne sur terre, en mer et photovoltaïque sont 30 GWh, 22 GW et 50 GW.

Sans production d'électricité à partir de gaz fossile

- **SR3** : une capacité **nucléaire de 20 GW**, les capacités d'éolienne sur terre, en mer et photovoltaïque sont 95 GW, 40 GW et 130 GW.

- **SR4** : une capacité **nucléaire de 63 GW** ; les capacités d'éolienne sur terre, en mer et photovoltaïque sont 14 GW, 12 GW et 48 GW.

Dans tous les cas, la production hydraulique est de 59 TWh/an. A partir de biométhane, elle est de 20 TWh/an.

Pour chaque combinaison capacité nucléaire*production d'hydrogène, trois ou quatre possibilités pour produire la quantité d'hydrogène :

On augmente soit la production la capacité des **éoliennes sur terre**, soit la capacité du **photovoltaïque** ; soit la capacité **nucléaire**. A partir de SR1 et SR2, on peut aussi augmenter la production à partir de gaz fossile.

Dans chaque cas l'alimentation de l'électrolyse se fait « en base moins la pointe » et/ou sur excédents. La répartition entre ces deux modes minimise les dépenses totales.

Pour minimiser les dépenses, il y a une production de gaz de synthèse lorsque la capacité nucléaire est 20 GW et sans production à partir de gaz fossile : cas SR3.

Les excédents sont valorisés dans la mesure où le facteur de charge moyen des équipements qui les consomment est supérieur à 1000 h/an ; leur valorisation est 20 €/MWh.

Les coûts de production

Taux d'actualisation : 4,5 %

Le LCOE : nucléaire : 70 €/MW, éolien sur terre : 6 €/GWh ; en mer : 106 €/MWh ; photovoltaïque, moitié sur toiture et moitié sur le sol : 73 €/MWh. Ces coûts incluent le coût de raccordement au réseau.

Le gaz fossile coûte 50 €/MWh. Le coût du CO₂ est 100 €/t CO₂

Pour produire l'hydrogène : si l'électrolyseur coûte 800 €/kW, le montant total, y compris l'équipement qui entoure l'électrolyseur, est 2200 €/kW soit 169,2 €/kW/an ; frais fixes annuels : 2,5 % du montant de l'investissement ; rendement : 70 %. Le rendement dépend du niveau de puissance effective et de ses variations, ce qui n'est pas représenté ici.

Le coût de production d'hydrogène selon plusieurs configurations - en €/kg				
La consommation finale est 530 TWh/an soit 567 TWh/an avant les pertes en ligne				
Production à partir de gaz fossile : 27 TWh/an				
Capacité nucléaire de référence : 50 GW				
Coût de production de l'électricité à la charge du consommateur : 92,3 €/MWh				
Augmentation de production d'électricité en augmentant	la conso de gaz fossile	La capacité de l'éolien	La capacité du solaire	La capacité du nucléaire
Coût de production du 1 ^{er} Mt/an d'hydrogène	9,2 €/kg	5,9 €/kg	7,6 €/kg	4,9 €/kg
Coût de production du 2 ^{ème} Mt/an d'hydrogène.	9,8 €/kg	6,5 €/kg	11,1 €/kg	5,1 €/kg
Capacité nucléaire de référence : 30 GW				
Coût de production du 1 ^{er} Mt/an d'hydrogène.	6,8 €/kg	6,3 €/kg	7,4 €/kg	4,8 €/kg
Production à partir de gaz fossile : 0 TWh				
Capacité nucléaire de référence est 20 GW				
Coût de production de l'électricité à la charge du consommateur : 123,2 €/MWh				
Coût de production du 1 ^{er} Mt/an d'hydrogène.		4,4 €/kg	5,3 €/kg	2,4 €/kg
Coût de production du 2 ^{ème} Mt/an d'hydrogène		4,9 €/kg	6,3 €/kg	3,8 €/kg
Capacité nucléaire de référence est 63 GW				
Coût de production de l'électricité à la charge du consommateur : 88,3€/MWh				
Coût de production du 1 ^{er} Mt/an d'hydrogène		5,8 €/kg	9,2 €/kg	5,0 €/kg

Commentaires

Les capacités de production et les dépenses figurent en annexe.

Les dépenses sont les dépenses de production d'électricité et d'hydrogène. Elles n'incluent pas les dépenses de production d'électricité hydraulique, ni les dépenses de stockage d'hydrogène ni les dépenses de transport et distribution d'électricité et d'hydrogène vers la consommation finale.

Dans tous les cas la consommation finale d'électricité est 530 TWh/an.

Le coût de production d'hydrogène de 2,4 €/kg

On obtient des coûts de production très bas dans des circonstances particulières.

Il n'y a pas de production à partir d'énergie fossile. La capacité nucléaire, sans production d'hydrogène, est 20 GW. Il faut donc une forte capacité éolienne et photovoltaïque. Les productions excédentaires sont fort importantes. On réduit autant que possible les dépenses totales en produisant du gaz de synthèse, ce qui diminue le besoin en éoliennes et photovoltaïque. Cela diminue aussi beaucoup les productions excédentaires, ce qui n'est guère coûteux puisque les exportations sont mal valorisées. Pour minimiser les dépenses, l'électrolyse qui permet de produire du gaz de synthèse a une capacité de 13 GW. La capacité éolienne est ici 95 GW sur terre, 40 GW en mer et la capacité photovoltaïque 130 GW. Les dépenses totales (hors hydraulique) sont 58,0 milliards d'euros par an.

Pour produire 1 million de tonnes d'hydrogène par an, il faut 55 TWh (en comptant les pertes en ligne), pris sur les possibilités excédentaires. On augmente la capacité de production d'électricité et l'on diminue la production d'électricité à partir de gaz de synthèse, ce qui a pour effet d'augmenter les possibilités de production excédentaires, qui sont utilisées de façon efficace pour produire de l'hydrogène qui sera consommé hors du système électrique.

Si l'on choisit d'augmenter la capacité nucléaire, la façon la moins coûteuse de produire 1 million de tonnes d'hydrogène par an se trouve en l'augmentant de 6,4 GW et en produisant du gaz de synthèse

avec une capacité de 2,5 GW (au lieu de 13 GW). Une capacité d'électrolyse de 11,9 GW a un facteur de charge de près de 5000 heures. Ce qui explique le très bas coût de production apparent de l'hydrogène : 2,4 €/kg.

Au lieu d'augmenter la capacité nucléaire on peut augmenter la capacité des éoliennes de 20 GW - ce sont ici des éoliennes sur terre, mais ce pourrait être, bien sûr, des éoliennes en mer. Le coût du premier million par an d'hydrogène, produit avec 14,5 kW d'électrolyse est de 4,4 €/kg.

Si l'on choisit d'augmenter la capacité photovoltaïque, parmi d'autres possibilités qui donnent à peu près le même résultat, il suffit d'augmenter de 10 GW la capacité voltaïque et de diminuer la capacité de production de gaz de synthèse à 11,6 GW. Le coût de production d'hydrogène est 5,3 GW.

Ces résultats tiennent au fait que le parc de production d'électricité, sans production d'hydrogène, est *très loin* de fournir l'électricité au moindre coût.

Il en est de même dans une moindre mesure du deuxième million de tonnes de production annuelle d'hydrogène. En portant la capacité nucléaire à 30 GW. Son coût est de 3,8 €/kg.

Des coûts de production compris entre 4,8 €/kg et 11 €/kg

Parmi les cas étudiés ici, hors celui d'une production d'électricité avec très peu de nucléaire et sans production à partir d'énergie fossile, avec plus ou moins de production d'électricité à partir d'énergie fossile, plus ou moins de nucléaire et plus ou moins de production d'hydrogène, le système électrique répond à la demande de consommation finale sans qu'il soit besoin de produire du gaz de synthèse.

Lorsque, pour produire de l'hydrogène on augmente la capacité nucléaire, le coût de l'hydrogène est compris entre 4,9 et 5,3 €/kg.

Si l'on augmente la capacité des éoliennes, le coût de production d'hydrogène est compris entre 5,9 et 6,5 €/kg.

Le coût de production de l'hydrogène est plus élevé lorsque l'augmentation de la capacité de production du système électrique se fait avec une augmentation de la capacité photovoltaïque ; il est de 7,5 à 11 €/kg.

Toutes les hypothèses, y compris le coût des moyens de productions, figurent sur des tableaux publiés sur www.hprevot.fr ; le simulateur, lui aussi publié, permet d'étudier d'autres jeux d'hypothèses.

On a donné pour cette étude une définition claire du « coût de production de l'hydrogène ». Il convient de rappeler que, s'agissant d'un système de production d'électricité et d'hydrogène, il n'est pas possible d'attribuer telle ou telle composante du coût à tel ou tel facteur.

Le coût le plus bas de 2,4 €/kg pourrait être invoqué par ceux qui voient dans l'hydrogène l'avenir de l'énergie. Il ne doit pas faire illusion. Il est calculé dans l'hypothèse où l'électricité est produite sans émissions de CO₂ et où la capacité nucléaire passe de 20 à 26 GW pour que le système électrique puisse alimenter une électrolyse qui produit 1 million de tonnes d'hydrogène par an.

Or ce résultat tient à ce que les consommateurs d'électricité sont pénalisés par la façon dont est produite l'électricité, avec seulement 20 GW nucléaire. Sans production d'hydrogène, le coût de production d'électricité est de 123 €/MWh. Si la capacité nucléaire, sans production d'hydrogène, était de 25,3 GW, le coût de l'électricité serait moindre et, avec une augmentation de la capacité nucléaire vers 30 GW, le coût de l'hydrogène serait supérieur à 2,4 €/kg – raisonnement que l'on peut recommencer et qui conduit à une capacité nucléaire de 50 ou 60 GW et un coût de production de l'ordre de **5 €/kg** avec 60 GW nucléaire.

Une étude sur le coût de production de l'hydrogène
Annexe

La consommation finale est 530 TWh/an soit 567 TWh/an avant les pertes en ligne
La production d'hydrogène est nulle ou égale à 1 Mt/an ou égale à 2 Mt/an
La production à partir de gaz fossile est 27 TWh/an
La capacité nucléaire est 50 GW ou 30 GW

La production hydraulique (fleuves et lacs) est 59 TWh/an ; à partir de biométhane : 20 TWh/an,
La capacité de l'éolien en mer est 12 GW ; elle est portée à 22 GW lorsque la capacité nucléaire est 30 GW

Les moyens de production d'électricité et d'hydrogène selon plusieurs configurations -				
Situation de référence : production à partir d'énergie fossile : 27 TWh/an				
	Gaz fossile	Éol. sur t	solaire	nucléaire
Si la capacité nucléaire est 50 GW Eolien en mer : 12 GW				
Sans production d'hydrogène Gaz fossile ; éolien sur terre, solaire , nucléaire ;	27 TWh	30 GW	50 GW	50 GW
Dépenses M€/an et coût – hors hydraulique et réseau	44815 M€/an 92,3 €/MWh			
Pour 1 Mt d'hydrogène on augmente seulement la prod à partir de gaz ou la cap. éol sur t, ou PV,ou nucl	636TWh	64 GW	125 GW	57,8 GW
Capacité de l'électrolyse	6,4 GW	6,8 GW	6,3 GW	6,3 GW
Dépenses hors les dépenses de fleuves et lacs	54092	50708	52454	49750
Coût de production de l'hydrogène, sans le stockage	9,2 €/kg	5,9 €/kg	7,6 €/kg	4,9 €/kg
Pour 2 Mt d'hydrogène on augmente seulement la prod à partir de gaz ou la cap. éol sur t, ou PV,ou nucl	117 TWh	103 GW	240 GW	65,8 GW
Capacité d'électrolyse pour hydrog hors syst élect	13,1 GW	12,8 GW	17,2 GW*	13,2 GW
Dépenses M€/an hors les dépenses de fleuves et lacs	63742	57528	64009	54860
Coût de production du deuxième million de tonnes	9,8 €/kg	6,5 €/kg	11,1 €/kg	5,1 €/kg
Si la capacité nucléaire est 30 GW :Eolien en mer : 22 GW				
Sans production d'hydrogène P2G2P : 10 GW	27 TWh	76 GW	100 GW	30 GW
Dépenses	49525 M€/an			
Pour 1 Mt d'hydrogène on augmente seulement la prod à partir de gaz ou la cap. éol sur t, ou PV,ou nucl	49 TWh	94 GW	128 GW	36,3 GW
Capacité d'électrolyse sur excédent	0 GW	9 GW	14 GW	0 GW
Capacité totale de l'électrolyse	7,6 GW	13 GW	16,6 GW	7,4 GW
Dépenses M€/an – hors les dépenses de fleuves et lacs	56334	55827	56905	54389
Coût de production de l'hydrogène, sans le stockage	6,8 €/kg	6,3 €/kg	7,4 €/kg	4,8 €/kg

* dont 6 GW sur excédents pour consommer 15 TWh

Si la capacité nucléaire est 60 GW et si la production à partir de fossile est 27 TWh, sans production d'hydrogène, il suffit de 13 GW éolienne sur terre et 6 en mer et 30 GW de photovoltaïque. Pour produire 1 Mt d'hydrogène avec 67,8 GW nucléaire, le coût est 4,7 €/kg. Le coût du deuxième million de tonnes d'hydrogène, avec 76,2 GW nucléaire est 5,5 €/kg.

Situation de référence : production à partir d'énergie fossile : 0 TWh/an

La consommation finale est 530 TWh/an soit 567 TWh/an avant les pertes en ligne

La production d'hydrogène est nulle ou égale à 1 Mt/an ou égale à 2 Mt/an

La production à partir d'énergie fossile est nulle

La capacité nucléaire est 20 GW ou 60 GW

La production hydraulique (fleuves et lacs) est 59 TWh/an ; à partir de biométhane : 20 TWh/an,

La capacité de l'éolien en mer est 50 GW ou 12 GW selon que la capacité nucléaire est 20 ou 60 GW

Les moyens de production d'électricité et d'hydrogène selon plusieurs configurations -				
		Éol. sur t	solaire	nucléaire
Nucléaire, sans production d'hydrogène : 20 GW éolien en mer : 40 GW				
Sans production d'électricité à partir de gaz fossile				
Sans production d'hydrogène		95 GW	130 GW	20 GW
Capacité pour produire du gaz de synthèse	13GW			
Dépenses et coût de production hors hydraulique et réseau	58045 M€/an 123,2 €/MWh			
Pour produire 1 Mt d'hydrogène on augmente seulement la capacité éolienne sur terre, ou photovoltaïque ou nucléaire		115 GW	140 GW	26,4 GW
Capacité pour produire du gaz de synthèse		7 GW	11,6 GW	2,5 GW
Capacité de l'électrolyse sur excédents		14.5 GW	18 GW	11,9 GW
Capacité de l'électrolyse pour fournir hors du système		14.5 GW	18 GW	11,9 GW
Dépenses M€/an hors les dépenses de fleuves et lacs		62506	63353	60420
Coût de production de l'hydrogène, sans le stockage		4,4 €/kg	5,3 €/kg	2,4 €/kg
Pour produire 2 Mt d'hydrogène on augmente seulement la capacité éolienne sur terre, photovoltaïque ou nucléaire		140	160	28,5
Capacité pour produire du gaz de synthèse		2,5	9	0
Capacité de l'électrolyse sur excédents		24	40	24,5
Capacité de l'électrolyse pour fournir hors du système		24	40	24,5
Dépenses hors les dépenses de fleuves et lacs		67391	69604	64242
Coût de production du deuxième million de tonnes		4,9 €/kg	6,3 €/kg	3,8 €/kg
		Éol. sur t	solaire	nucléaire
Nucléaire, sans production d'hydrogène : 63 GW éolien en mer : 12 GW				
Sans production d'hydrogène		14	48	63
Dépenses et coût de production hors hydraulique		41594 M€/an	88,3 €/MWh	
Pour produire 1 Mt d'hydrogène on augmente seulement la capacité éolienne sur terre, ou photovoltaïque ou nucléaire		39	128	69,5
Capacité de l'électrolyse sur excédents		3	3	2
Capacité de l'électrolyse pour fournir hors du système		8,8	8,3	7,5
Dépenses M€/an hors les dépenses de fleuves et lacs		47402	50795	46621
Coût de production de l'hydrogène, sans le stockage		5,8 €/kg	9,2 €/kg	5,0 €/kg

