

Préambule :

Ces calculs ont été effectués par J. Carrey, M. Coriat, tous deux membres de l'Atelier d'Ecologie Politique (Toulouse), en se basant sur les données de la littérature. Ils n'ont vocation qu'à donner des ordres de grandeurs et non pas des valeurs précises. Néanmoins, si vous détectez une erreur manifeste dans ces calculs ou dans les valeurs prises, n'hésitez pas à nous le signaler par email :

julian.carrey@insa-toulouse.fr , mickael.coriat@irap.omp.eu

Les valeurs de rendements qui ont été utilisées pour les électrolyseurs et pour les densités surfaciques des fermes photovoltaïques sont plutôt dans les fourchettes « hautes ». Les valeurs de surface données dans l'article sont donc plutôt à considérer comme étant des valeurs minimales à l'heure actuelle, mais pouvant potentiellement être atteintes dans les années à venir.

Nous n'avons pas pris en compte le fait que des électrolyseurs haute-température connectés directement à un réacteur nucléaire pourraient avoir des rendements plus importants, en raison de l'utilisation de la chaleur produite par ces derniers, car ce type d'électrolyseurs est en cours de développement. De plus, le nombre de réacteurs nucléaires a été surtout donné pour illustrer la quantité d'énergie nécessaire, le nombre de TWh/an n'étant pas forcément une grandeur très parlante.

Valeurs utilisées pour le rendement énergétique de la production d'hydrogène depuis l'électricité.

- **Efficacité énergétique des électrolyseurs :**

Nous utilisons une consommation électrique spécifique des électrolyseurs industriels de **47,5 kWh/kg de H₂**, correspondant à un rendement de l'électrolyseur de 70% (PCI), une valeur plus élevée que ce qui est disponible commercialement actuellement (plus proche de 60%), mais qui pourrait être atteint dans les électrolyseurs industriels dans la décennie à venir ¹.

- **Pertes énergétiques dues à la compression à 350 bars :**

Nous utilisons une valeur moyenne de **3,04 kWh/kgH₂** en nous basant sur différentes publications^{2,3,4}.

- **Pertes énergétiques dues au transport :**

Routier sur 100 km : **2,38 kWh/kg** (d'après Bossel & Eliasson³)

¹ « [Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review](#) », A. Buttler and H. Spliethoff, Renewable and Sustainable Energy Reviews **82**, 2040, 2018.

² « [DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record](#) », M. Gardiner, 2009.

³ « [Energy and the hydrogen economy](#) », U. Bossel et B. Eliasson

⁴ « [Hydrogen delivery – liquefaction and compression](#) », R. Drnevich, 2003.

Pipeline sur 1000 km : **3,97 kWh/kg** (d'après Bossel & Eliasson³)

Valeurs utilisées pour la conversion en production nucléaire, éolienne ou photovoltaïque de l'électricité :

- **Production annuelle moyenne d'un réacteur nucléaire⁵ : 6,5 TWh/an**
- **Production annuelle moyenne d'un champ d'éoliennes⁶ : 20 GWh/km²/an**
- **Production annuelle moyenne d'une ferme solaire :**

Nous nous sommes basés sur la production de la ferme photovoltaïque installée récemment près de l'Oncopole à Toulouse, et qui produit 102 GWh/km²/an. Cette valeur se situe dans la fourchette haute des densités de puissance surfaciques des centrales solaires⁷.

Calculs effectués pour cet article.

- 1. En 2019, en Europe, la quantité d'hydrogène utilisée était de 339 TWh (PCI)⁸.
Pour produire cet hydrogène par électrolyse, combien d'électricité faudrait-il ?**

339 TWh (PCI) de H₂ correspondent à 10,18 millions de tonnes de H₂.

Pour produire cette masse d'hydrogène par électrolyse et en tenant compte des pertes liées à la compression ainsi qu'à une moyenne des pertes liées au transport routier sur 200 km et au transport pipeline sur 1000 km (i.e. 4,36 kWh/kg) il faudrait :

$$10,18 \times 10^9 \times (47,5 + 3,04 + 4,36) = \mathbf{561 \text{ TWh}}$$

Ceci correspond à la production annuelle de **87 réacteurs nucléaires** ou **28 000 km² d'éoliennes** ou **5500 km² de panneaux photovoltaïques**.

- 2. Hydrogen Europe (launch event, juillet 2020) se donne pour objectif de produire 10 millions de tonnes d'H₂ vert par an en 2030. Pour produire cet hydrogène par électrolyse, combien d'électricité faudrait-il ?**

Comme il s'agit uniquement de la production de 10 Mt et pas de ce qu'il devient une fois produit nous ne tenons compte que des pertes énergétiques liées à l'électrolyse :

⁵ « [Le nucléaire en France](#) », EDF, 2020.

⁶ « [Pourrait-on alimenter la France en électricité uniquement avec de l'éolien ?](#) », J.-M. Jancovici. Chiffre de l'ordre de grandeur donné dans cet article validé par l'entreprise Météolien (communication personnelle).

⁷ « [The spatial extent of renewable and non-renewable power generation: A review and meta-analysis of power densities and their application in the U.S.](#) », J. Zalka and P. Behrens, Energy Policy 123, 83 (2018)

⁸ « [Hydrogen roadmap Europe](#) », Fuel cells and hydrogen 2 Joint Undertaking, 2019.

$$10 \times 10^9 \times 47,5 = 475 \text{ TWh/an}$$

Ce qui correspond à la production annuelle de **72 réacteurs nucléaires** ou **23 800 km² d'éoliennes** ou **4670 km² de panneaux photovoltaïques**.

3. D'après Eurostat⁹, les camions en Europe ont parcouru en 2017 175 milliards de km, pour 1920 milliards de t.km, soit 11 tonnes en moyenne. Combien d'électricité serait nécessaire pour faire fonctionner à l'hydrogène vert 100 000 de ces camions (l'objectif actuel) sachant qu'ils roulent en moyenne 160 000 km/an¹⁰ ? Combien d'hydrogène vert serait nécessaire pour les faire tous fonctionner ?

D'après M. Oostdam¹¹ la consommation actuelle des camions à hydrogène varie entre 7,5 et 15 kg de H₂ pour 100 km selon les conditions du trajet. En prenant la moyenne de 11 kgH₂/100 km, alors pour 100 000 camions roulant 160 000 km/an, on obtient une consommation de 1,76 milliards de kg de H₂ par an et pour la totalité des camions, 19,3 milliards de kg de H₂ par an. En supposant que cet H₂ sera transporté soit par pipeline, soit par route sur de petites distances (100 km), soit produit proche des stations de ravitaillement, on peut estimer une moyenne des pertes énergétiques de l'ordre de 2 kWh/kg. En ajoutant la consommation des électrolyseurs et les pertes par compression, on obtient :

$$1,76 \times 10^9 \times (47,5 + 3,04 + 2) = 92,4 \text{ TWh/an pour 100 000 camions roulant 160 000 km par an.}$$

Ce qui représente **15 réacteurs nucléaires** ou **4620 km² d'éoliennes** ou **910 km² de panneaux photovoltaïques**.

Et pour la totalité du trafic :

$$19,3 \times 10^9 \times (47,5 + 3,04 + 2) = 1014 \text{ TWh/an}$$

Ce qui représente **156 réacteurs nucléaires** ou **50 700 km² d'éoliennes** ou **9 940 km² de panneaux photovoltaïques**.

4. Quelle est l'électricité nécessaire à la production d'ammoniac de l'usine Boréalys près de Rouen ?

Cette usine produit 400 000 tonnes d'ammoniac par an¹². Il faut au minimum 70 500 t d'hydrogène pour les produire. A partir des données de la question 2, on peut arriver simplement au fait que cela nécessite 3.3 TWh/an, soit **½ réacteur nucléaire**, ou **167 km² d'éoliennes** ou **33 km² de panneaux photovoltaïques**.

⁹ <https://market-insights.apply.com/fr/transport-routier-europeen-10-ans-de-transformation>

¹⁰ Source : Fédération nationale des transports routiers, communication privée

¹¹ « [Techno-economic assessment of hydrogen fuel-cell tractor semi-trailer](#) », M. Oostdam, 2019.

¹² <https://www.lelementarium.fr/product/ammoniac/>