

À CHAQUE ÉNERGIE SES PROPRIÉTÉS

Offre énergétique	Énergie spécifique MJ/kg	Densité d'énergie MJ/l	Masse volumique kg/m ³
Fioul domestique	46,2	37,3	807,359
Gaz naturel	53,6	0,0364	0,679
Méthanol	19,7	15,6	791,878
Méthane (1,013 bar, 15 °C)	55,6	0,0378	0,680
Propane (gaz de pétrole liquéfié : GPL)	49,6	25,3	510,081
Butane (GPL)	49,1	27,7	564,155
Gaz naturel liquéfié (GNL) à -160 °C	53,6	22,2	414,179
Ammoniaque liquide (sa combustion donne de l'azote N ₂ et de l'eau H ₂ O)	18,6	11,5	618,280
Kérosène	43	35	813,953
Hydrogène liquide à pouvoir calorifique supérieur (PCS), c'est-à-dire incluant l'énergie de la vapeur d'eau dégagée	141,86	10,044	70,802
Hydrogène liquide à pouvoir calorifique inférieur (PCI)	119,93	8,491	70,800
Hydrogène PCS (1 atm à 15,5 °C)	141,86	0,01188	0,084
Hydrogène PCI (1 atm à 15,5 °C)	119,93	0,01005	0,084
Hydrogène PCI (690 atm à 15,5 °C)	141,86	5,323	37,523
Hydrogène PCI (690 atm à 15,5 °C)	119,93	4,5	37,522
Essence	46,4	34,2	737,069
Éthanol	30	24	800,000
Gasoil	45,6	38,6	846,491
Pétrole brut	41,868	37	883,730
Gaz naturel comprimé (GNC) à 250 bars	53,6	9	167,910
Biodiésel	42,2	33	781,991

En comparaison, la densité d'énergie du méthane liquide (GNL) est plus de deux fois supérieure à celle de l'hydrogène liquide. À volume transporté égal, le méthane liquide véhicule deux fois plus d'énergie. De plus, nous l'avons vu, la faible température d'ébullition de l'hydrogène entraîne d'importantes contraintes en termes d'équipements nécessaires (réservoirs, pompes et compresseurs).

VERT OU BLEU ?

Ainsi, on peut en conclure que dans une société sans carbone, les besoins en hydrogène d'origine renouvelable seront massifs. Cette molécule représentera une étape intermédiaire critique dans la fourniture d'énergie spécifique la mieux adaptée à chaque besoin et une matière première essentielle pour l'industrie.

Le choix entre l'hydrogène vert et son pendant bleu dépendra évidemment du coût et, plus spécifiquement pour l'hydrogène vert,

RÉFÉRENCES

E. Hegnsholt et al., **The real promise of hydrogen**, Boston Consulting Group, 31 juillet 2019. <http://bit.ly/BCG-Hydro>

A. Scipioni et al. (éd.), **Hydrogen economy**, Academic Press, 2017.

M. Larsson et al., **Synthetic fuels from electricity for the Swedish transport sector : comparison of well to wheel energy efficiency and costs**, *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 1875-1880, 2015.

J. Van Mierlo et al., **Which energy source for road transport in the future ? A comparison of battery, hybrid and fuel cell vehicles**, *Energy Convers. Manag.*, vol. 47, pp. 2748-2760, 2006.

U. Vol Bossel, **Does a hydrogen economy make sense**, *proceedings of the IEEE*, vol. 94(10), pp. 1826-1837, 2006.

de la disponibilité des ressources énergétiques renouvelables nécessaires à sa production. En ce qui concerne l'hydrogène bleu, la question de l'opinion publique et son acceptation du stockage du CO₂ se posera.

L'option consistant à capturer et stocker le CO₂ est la mieux adaptée aux grandes installations, par exemple dans l'industrie chimique ou sidérurgique. Elles sont d'ores et déjà dotées de canalisations et de dispositifs de stockage. La route vers l'hydrogène vert est plus fragmentée et convient davantage, du moins au début, à des investissements moins importants. Quelle que soit la solution retenue, il reste beaucoup de chemin à parcourir, même si certains éléments, comme les électrolyseurs, sont déjà parvenus à maturité.

Toujours est-il que les molécules, d'hydrogène ou à base de carbone, resteront longtemps indispensables pour faire de la transition énergétique une réalité. ■

Pour une décarbonation optimale

Comment l'Europe peut-elle atteindre la neutralité carbone en 2050 au meilleur coût ? Et quelles technologies mettre en œuvre pour répondre efficacement aux ambitions du *Green Deal* ?

LES AUTEURS

HUGUES DE PEUFEILHOUX,
GAUTHIER DE MAERE
D'AERTRYCKE ET
PIERRE-LAURENT LUCILLE,
ENGIE

En décembre 2019, Ursula von der Leyen, la présidente de la Commission européenne, a officiellement lancé le pacte vert pour l'Europe (*European green deal*) dont l'ambition est de faire de l'Europe le premier continent neutre en carbone d'ici 2050. Dans quelle mesure est-ce un objectif atteignable ?

L'étude d'ENGIE « Decarbonizing Central Western Europe » menée en 2019 dans les principaux marchés énergétiques interconnectés de l'Europe de l'Ouest (*voir ci-contre*) apporte des éléments de réponse. Il s'agit de l'analyse économique de la réorganisation de la production d'énergie vers des sources « propres » pour progressivement éliminer toute émission de CO₂. Plus précisément, l'idée est de tester la faisabilité de la décarbonation en Europe de l'Ouest des secteurs électrique, chaleur et transport d'ici à 2050 et d'identifier un chemin économiquement optimal qui s'appuie sur les atouts de chacun des vecteurs énergétiques.

Outre l'électricité, terrain familier des modélisateurs, les autres usages énergétiques que sont la production de chaleur (industrielle et résidentielle), le transport et l'agriculture ont été simulés, afin de combiner les différents effets de substitution inhérents à la transition énergétique. Il s'agit de trouver un nouvel équilibre d'ensemble optimisé entre électricité, biogaz, hydrogène et biomasse pour répondre au mieux aux usages.



Les pays de l'étude « Decarbonizing Central Western Europe ».

Pour des raisons d'acceptabilité et de disponibilité en sites, le développement de la séquestration du CO₂ n'a pas été pris en compte. Mais toutes les autres technologies énergétiques, y compris les systèmes de stockage et ceux favorisant la flexibilité, comme l'utilisation du stock de véhicules électriques en symbiose avec le réseau, concourent à répondre à l'atteinte d'un système décarboné. Celle-ci réclame néanmoins un effort ambitieux en termes d'efficacité énergétique, qui conduirait à une réduction de la demande finale en énergie de près de 41 % d'ici 2050.

Par rapport à la plupart des études disponibles qui simulent des chiffres annuels, voire uniquement l'image finale en 2050, ou bien ne se focalisent que sur un sous-secteur, l'optimisation combinée de tous les usages énergétiques, à un