

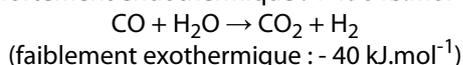
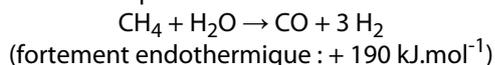
Le sens caché des fausses couleurs de l'hydrogène

Décarboner l'énergie est devenu un enjeu primordial pour l'humanité. Dans ce but, l'hydrogène (plus précisément le dihydrogène H₂) est pressenti pour jouer un rôle majeur [1]. Il est donc utile d'avoir une vue d'ensemble des divers procédés d'obtention que l'on distingue en attribuant une couleur à l'hydrogène produit. Il s'agit évidemment de fausses couleurs car comme chacun sait, le dihydrogène est un gaz incolore. Après une brève revue des procédés et des couleurs associées (voir la *figure*), nous verrons qu'il n'est pas toujours évident d'interpréter ces dernières, par exemple : gris, turquoise, rose, violet... Il est rare que les auteurs d'articles sur la production d'hydrogène prennent la peine de les justifier.

Une pléthore de procédés

À partir du méthane : l'hydrogène gris, bleu, turquoise

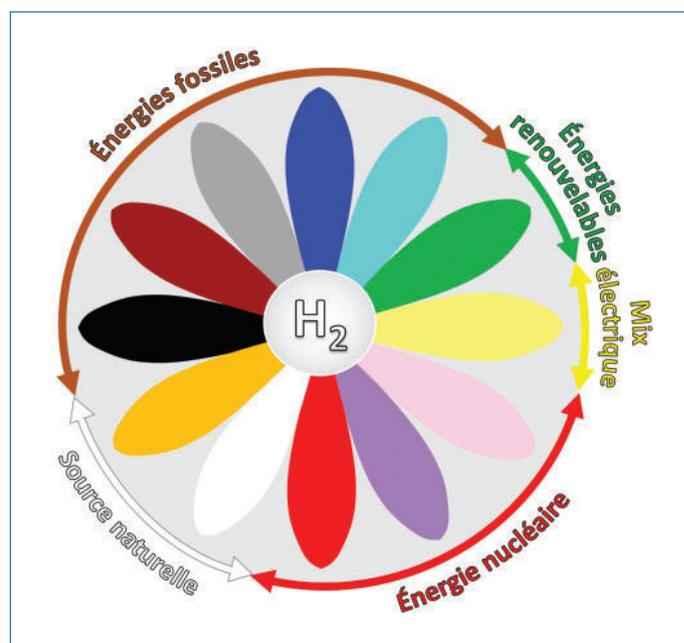
La méthode de production d'hydrogène la plus employée à l'échelle industrielle est le reformage du méthane par la vapeur d'eau. Ce vaporeformage se fait à haute température (entre 700 et 1 000 °C), sous une pression modérée (20 à 30 bars), en deux étapes :



L'hydrogène ainsi produit est qualifié de **gris** pour une raison qui sera expliquée plus loin. La quantité de CO₂ produite conjointement est importante : plus de 10 kg d'équivalent CO₂ par kg d'hydrogène (environ 12 kg selon l'ADEME). Ce procédé est actuellement le moins onéreux (1,5 €/kg) et représente environ 95 % de la production mondiale d'hydrogène.

L'hydrogène produit est qualifié de **bleu** lorsque le CO₂ en sortie est capté pour être utilisé (comme matière première pour certaines industries) ou être stocké en couche géologique (dans d'anciennes poches de gaz ou de pétrole vides). L'hydrogène bleu devrait donc en principe être considéré comme un hydrogène « bas carbone ». En fait, diverses études ont montré l'importance des émissions fugitives dues aux fuites le long de la chaîne d'approvisionnement en gaz naturel [2-3]. Des évolutions sont néanmoins possibles pour faire passer l'hydrogène bleu sous le seuil d'émission « bas carbone » en faisant appel à de nouvelles technologies, en modifiant le mode d'approvisionnement...

Un autre procédé suscite un intérêt croissant : la pyrolyse du méthane à haute température pour la coproduction d'hydrogène et de carbone solide [4-5]. Dans ce cas, on parle d'hydrogène **turquoise**. Cette méthode présente le double avantage d'une faible empreinte carbone et d'une demande énergétique trois à cinq fois inférieure à celle de l'électrolyse de l'eau. En outre, le noir de carbone est un produit à forte valeur ajoutée. Toutefois, le marché de ce dernier est limité au regard des besoins en hydrogène, et il ne faut pas négliger le problème que pose le stockage de ce matériau pyrophorique.



L'hydrogène est produit à partir de différentes sources d'énergie : énergies fossiles et renouvelables, énergie nucléaire... Il existe également à l'état naturel dans le sous-sol. Chaque procédé de production est associé à une couleur. Le code couleur est explicité dans le *tableau*. © B. Valeur.

L'électrolyse de l'eau : l'hydrogène vert, rose, jaune

L'électrolyse de l'eau a pour but de décomposer les molécules d'eau grâce à un apport d'électricité : l'oxygène se dégage à l'anode et l'hydrogène à la cathode. C'est certainement la façon la plus « propre » de produire de l'hydrogène, d'où le nom d'hydrogène « décarboné » ou hydrogène **vert**, à condition évidemment que l'électricité employée provienne d'énergies renouvelables (solaire, éolienne, hydroélectrique, marémotrice, géothermique). Bien que les électrolyseurs actuels atteignent un rendement de 70 %, la forte dépense énergétique (de l'ordre de 50 kWh/kgH₂) limite le développement à grande échelle de ce procédé.

L'électrolyse de la vapeur d'eau requiert moins d'énergie que celle de l'eau liquide, la différence représentant l'énergie nécessaire pour vaporiser l'eau. C'est pourquoi, lorsqu'il existe à proximité une source de chaleur à bas coût, notamment sur des sites industriels, cette chaleur peut être mise à profit pour se substituer à une partie de l'énergie électrique requise pour électrolyser l'eau liquide. Ainsi, grâce à la diminution de la dépense énergétique, le coût de production de l'hydrogène est réduit. La technologie d'électrolyse de la vapeur d'eau à haute température (EHT) fait l'objet de recherches et de développements car elle est potentiellement apte à produire de l'hydrogène décarboné à environ 2 €/kgH₂ pour des unités de grande taille [6].

L'hydrogène **rose** et l'hydrogène **jaune** sont eux aussi produits par électrolyse de l'eau mais la source d'électricité est différente : origine nucléaire pour le rose et origine mixte pour le jaune⁽¹⁾. Dans ce dernier cas, il s'agit plus précisément du

mix électrique qui représente la répartition de la production d'électricité selon les modes de production (énergies renouvelables et fossiles, énergie nucléaire). Le mix électrique dépend du pays, et en ce qui concerne la France, il est plutôt bas carbone grâce au nucléaire et aux énergies renouvelables. Selon l'ADEME, 1 kg d'hydrogène produit avec le mix électrique français émet environ 2,7 kg de CO₂, soit 4,5 fois moins que par reformatage.

Ces performances ne doivent cependant pas faire oublier l'impact environnemental résultant de la consommation d'eau douce, ou du rejet de saumure dans le cas de l'électrolyse de l'eau de mer.

Thermolyse de l'eau : l'hydrogène rouge

La thermolyse de l'eau, c'est-à-dire la dissociation par la chaleur, n'est possible qu'au-dessus de 2 500 °C. Toutefois, il est possible d'abaisser la température en mettant en œuvre des composés chimiques dans des cycles thermochimiques (cycle soufre-iode par exemple). Un apport suffisant de chaleur est fourni par des fours solaires et certains réacteurs nucléaires [7]. Il n'est pas envisageable de généraliser les premiers⁽²⁾ tandis que les seconds, dits de génération IV, sont prometteurs car la température peut atteindre de 700 à 900 °C en sortie et le rendement est proche de 50 %. Ce procédé n'a pas encore atteint le stade industriel car sa mise en œuvre est assez complexe du point de vue chimique. Des réacteurs très performants sont prévus à l'horizon 2030.

Thermolyse combinée à l'électrolyse : l'hydrogène violet

On parle d'hydrogène **violet** lorsque l'énergie nucléaire est doublement mise à profit : l'électricité est produite par un réacteur nucléaire pour réaliser l'électrolyse, et la chaleur fournie par ce dernier sert à élever la température pour faciliter l'électrolyse comme la thermolyse (voir ci-dessus).

À partir du charbon et de la lignine : l'hydrogène noir, brun

L'hydrogène **noir** est produit à partir de charbon bitumineux et l'hydrogène **brun** à partir de lignine. Charbon ou lignine sont gazéifiés, c'est-à-dire convertis en gaz de synthèse (appelé « syngas ») par un traitement thermique sous pression

à haute température (> 700 °C). Ce gaz contient un mélange d'hydrogène, de monoxyde de carbone (CO), de CO₂ et de vapeur d'eau. Ce procédé est le plus polluant de tous.

En provenance du sous-sol : l'hydrogène blanc, orange

L'hydrogène présent sous sa forme moléculaire H₂ dans le milieu géologique est dénommé hydrogène **blanc** [8-10]. Les scientifiques n'ont pas complètement compris comment cet hydrogène naturel se forme et migre et, surtout, s'il s'accumule d'une manière commercialement exploitable. L'hypothèse la plus couramment formulée quant à l'origine de l'hydrogène est l'oxydation de l'oxyde ferreux (FeO) par l'eau à des températures comprises entre 200 et 400 °C (réaction dénommée « serpentinisation »). Il semble toutefois que la plus grande source d'hydrogène dans la nature soit l'hydrogène profond émanant du cœur et du manteau de la Terre.

On estime à 20 mégatonnes par an la quantité d'hydrogène qui s'échappe du sol terrestre. Cette abondance incite à tirer profit de cette nouvelle ressource. De nombreux réservoirs naturels ont été répertoriés dans le monde. Celui de Bourakébougou au Mali, qui produit de l'hydrogène pur à 98 %, est exploité depuis 1987. Toutefois, certains sites d'émission dégagent d'autres gaz comme le méthane qui contribue à l'effet de serre.

L'émission naturelle d'hydrogène blanc a donné l'idée à des scientifiques d'injecter de l'eau dans le sous-sol à l'aide de pompes [11-12]. L'hydrogène dégagé par réaction de cette eau avec FeO et capté en surface est dénommé hydrogène **orange**. Par exemple, les roches appelées péridotites, constituées de silicates de magnésium avec environ 10 % d'oxyde ferreux, peuvent théoriquement dégager 2 à 4 kg d'hydrogène par mètre cube de roche.

Ce procédé présente un intérêt supplémentaire : la séquestration géologique de CO₂ est simultanément possible si l'eau injectée est saturée de ce gaz. Il se forme en effet des carbonates. La température optimale de cette formation est de 185 °C alors que celle de la production d'hydrogène est comprise entre 250 et 280 °C. Un compromis doit donc être recherché.

Le *tableau* récapitule les modes de production d'hydrogène et les fausses couleurs qui lui sont attribuées.

Ressource	Procédé	Apport d'énergie	Couleur	Empreinte carbone	Type d'hydrogène
Charbon	Gazéification	Chaleur	Noir	Élevée	Carboné
Lignine			Brun		
Méthane	Vaporeformage	Chaleur	Gris	Moyenne	Carboné
	+ capture de CO ₂		Bleu		
	Pyrolyse hte temp.		Turquoise	Faible	Bas carbone
Eau	Électrolyse	Électricité – provenant d'énergies renouvelables – d'origine nucléaire – d'origine mixte (mix électrique)	Vert	Minimale	Renouvelable
			Rose		
			Jaune	Faible	Bas carbone
	Électricité + chaleur (origines nucléaires)	Violet			
Thermolyse	Chaleur (origine nucléaire)	Rouge			
Hydrogène naturel		Aucun	Blanc	Minimale	Renouvelable
	Réaction FeO + H ₂ O	Mécanique (injection d'eau dans le sous-sol)	Orange	Faible	Bas carbone

Les divers procédés de production de l'hydrogène en regard des fausses couleurs qui lui sont attribuées. La colonne de droite précise le type d'hydrogène selon les catégories définies par l'ordonnance du 17 février 2021 du Ministère de la Transition écologique. © B. Valeur.

Décryptage du code couleur

Le choix d'une fausse couleur de l'hydrogène va de lui-même dans certains cas. Par exemple, il vient naturellement à l'esprit de parler d'hydrogène **vert** quand il est produit à partir de sources d'énergie renouvelables. Le vert est de fait la couleur « écolo », spontanément associée à la nature puisque c'est la couleur la plus répandue sur le sol terrestre. Aussi parle-t-on de chimie verte pour désigner les processus et les réactions peu ou pas néfastes pour l'environnement.

De même, il est naturel de qualifier de **noir** l'hydrogène issu du charbon et de **brun** celui provenant de la lignine, en référence aux couleurs de ces deux solides. Le noir a en outre une connotation négative. À l'opposé, le **blanc** symbolisant la pureté, la propreté... convient bien à l'hydrogène à l'état naturel.

Quant à l'hydrogène **orange**, il est naturellement associé à la couleur de la rouille : il implique en effet l'oxydation du fer(II) en fer(III) lors de la réaction de l'eau avec FeO qui conduit à un mélange complexe d'oxydes et d'hydroxydes de fer(III) constitutifs de la rouille.

Moins évidentes sont les autres couleurs. Commençons par l'hydrogène **gris**. On ne peut justifier cette couleur que si l'on a au préalable qualifié de blanc l'hydrogène à l'état naturel. En effet, puisque la couleur grise est intermédiaire entre le noir et le blanc sur l'échelle de la clarté, on comprend que l'hydrogène gris doive sa couleur à une émission intermédiaire de CO₂ (par kg d'hydrogène) : très élevée pour l'hydrogène noir et en principe nulle pour l'hydrogène blanc.

Il est plus difficile de justifier l'hydrogène **bleu**. Il se distingue en effet de l'hydrogène gris par le fait que le procédé met en œuvre un dispositif de captage et de stockage du CO₂ émis. Certes l'empreinte carbone est inférieure, mais de là à le qualifier de bleu ! Aucun rapport avec l'« énergie bleue » qui, elle, est naturellement associée à l'eau (dont la couleur est perçue bleue lorsqu'on l'observe à travers une grande épaisseur) : il s'agit d'une énergie osmotique mettant à profit la différence de salinité entre deux eaux plus ou moins salées. Dans cette lignée, il aurait été plus logique de qualifier de bleu l'hydrogène produit à partir de l'eau, mais la couleur verte, à forte connotation écologique, a été préférée.

Et l'hydrogène **turquoise** ? Cette couleur est intermédiaire entre le bleu et le vert : de fait, l'hydrogène turquoise, produit par pyrolyse du méthane à haute température, a une empreinte carbone inférieure à celle de l'hydrogène bleu et évidemment supérieure à celle de l'hydrogène vert qui est décarboné. Le choix de la couleur turquoise vient sans doute du géant allemand de la chimie BASF qui réalisa une installation pilote de pyrolyse du méthane en 2019-2020.

Quant à l'hydrogène **rouge**, produit par thermolyse, il doit sans doute sa couleur au fait que le rouge est perçu comme la plus « chaude » des couleurs, mais ce qualificatif est purement subjectif [13].

Enfin, on s'interroge sur le choix des couleurs de l'hydrogène **rose, jaune et violet** car les procédés de production ne diffèrent de l'hydrogène vert que par l'origine de l'électricité qui sert à l'électrolyse de l'eau. Et il est difficile de trouver des justifications dans la symbolique de ces couleurs.

Un classement par catégories complète le code couleur

Toutes ces qualifications de l'hydrogène par des couleurs, qu'elles soient évidentes ou non, laissent une impression de

flou « artistique ». Les jeux de couleurs dans les titres de certains articles en sont l'illustration : « How green is blue hydrogen ? » [3], « Orange hydrogen is the new green » [12]... Une catégorisation plus claire s'imposait donc : c'est l'objet de l'ordonnance du 17 février 2021 émise par le Ministère de la Transition écologique, qui classe désormais l'hydrogène en trois catégories [14] :

« **L'hydrogène renouvelable** est l'hydrogène produit soit par électrolyse en utilisant de l'électricité issue de sources d'énergies renouvelables [...], soit par toute une autre technologie utilisant exclusivement une ou plusieurs de ces mêmes sources d'énergies renouvelables et n'entrant pas en conflit avec d'autres usages permettant leur valorisation directe. Dans tous les cas, son procédé de production émet, par kilogramme d'hydrogène produit, une quantité d'équivalents dioxyde de carbone inférieure ou égale à un seuil. »

« **L'hydrogène bas-carbone** est l'hydrogène dont le procédé de production engendre des émissions inférieures ou égales au seuil retenu pour la qualification d'hydrogène renouvelable, sans pouvoir, pour autant, recevoir cette dernière qualification, faute d'en remplir les autres critères. »

« **L'hydrogène carboné** est l'hydrogène qui n'est ni renouvelable, ni bas-carbone. »

« L'hydrogène coproduit lors d'un procédé industriel dont la fonction n'est pas d'obtenir cet hydrogène et autoconsommé [...] au sein du même processus n'est pas considéré comme de l'hydrogène bas-carbone au sens du présent code. Il n'est pas comptabilisé au titre de l'objectif de décarbonation. »

Pour chaque procédé de production d'hydrogène, l'appartenance à l'une de ces catégories est indiquée dans la dernière colonne du *tableau*. Une telle classification est certainement plus rationnelle. Elle est toutefois moins diversifiée que celle fondée sur les couleurs qui se déclinent à foison. Gageons qu'il en apparaîtra de nouvelles ! Par exemple, une couleur est à choisir pour qualifier l'hydrogène produit par pyrolyse du biométhane qui peut aboutir à une empreinte carbone négative [15].

L'auteur remercie Hervé Toulhoat et Laurent Fulcheri pour la relecture du manuscrit et leurs remarques pertinentes.

(1) La couleur jaune est parfois attribuée à l'hydrogène produit par électrolyse de l'eau en utilisant de l'électricité d'origine solaire.

(2) Il n'existe que deux fours solaires dans le monde, dont l'un est en France à Odeillo dans les Pyrénées-Orientales.

[1] J.-P. Foulon, H. Toulhoat, E. Freund, La production d'hydrogène décarbonée et compétitive : un défi technologique à relever, *L'Act. Chim.*, 2021, 466, p. 11.

[2] Impact climatique de l'hydrogène « bleu », ADEME, Avis d'experts, mai 2022, <https://bibliothèque.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/5578-impact-climatique-de-l-hydrogene-bleu.html>

[3] R.W. Howarth, M.Z. Jacobson, How green is blue hydrogen?, *Energy Sci. Eng.*, 2021, 9, p. 1676-87.

[4] L. Fulcheri, La pyrolyse du méthane. De l'hydrogène « gris » à l'hydrogène « turquoise », *L'Act. Chim.*, 2021, 466, p. 28-34.

[5] L. Fulcheri, Production d'hydrogène « turquoise » par pyrolyse du méthane, *Annales des Mines – Réalités industrielles*, 2022, 4, p. 125-135.

[6] J. Mougou, Production d'hydrogène par électrolyse de la vapeur d'eau à haute température, *L'Act. Chim.*, 2021, 466, p. 12-19.

[7] Production d'hydrogène par dissociation thermo-chimique de l'eau, *Mémento de l'hydrogène*, France Hydrogène, https://s3.production.france-hydrogene.org/uploads/sites/4/2021/11/Fiche_203.2.2_20-r_C3_A9v_20juin_202021.pdf

[8] V. Zgonik, L'hydrogène naturel, une nouvelle source d'énergie renouvelable, *L'Act. Chim.*, 2021, 466, p. 35-37.

[9] A. Pinzhoher, É. Deville, De l'hydrogène naturel sous nos pieds, *Pour la Science*, 2015, 456, p. 38-43.

[10] E. Hand, Hidden hydrogen. Does Earth hold vast stores of a renewable, carbon-free fuel?, *Science*, 2023, 379, p. 630-638, www.science.org/content/article/hidden-hydrogen-earth-may-hold-vast-stores-renewable-carbon-free-fuel

[11] S. Bailly, Le double intérêt de l'hydrogène « orange », *Pour la Science*, 2023, 544, www.pourlascience.fr/sd/geosciences/energie-le-double-interet-de-l-hydrogene-orange-24546.php

[12] F. Osselin *et al.*, Orange hydrogen is the new green, *Nat. Geosci.*, 2022, 15, p. 765-769.

[13] B. Valeur, Couleur et température : une relation particulière... et paradoxale, *Pour la Science Blogs*, <https://scilogs.fr/questions-de-couleurs/couleur-et-temperature-une-relation-particuliere-et-paradoxe/>

[14] Ordonnance n° 2021-167 du 17 février 2021 relative à l'hydrogène, *Legifrance*, www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043148001

[15] J. Diab *et al.*, Why turquoise hydrogen will be a game changer for the energy transition, *Int. J. Hydrog. Energy*, 2022, 47(61), p. 25831-848.

Bernard VALEUR,

Professeur honoraire du Conservatoire national des arts et métiers.

* valeur.bernard@orange.fr