

QUEL HYDROGÈNE POUR S'É LIBÉRER DES ÉNERGIES FOSSILES?

Face au défi climatique et écologique, de grands espoirs sont placés dans l'hydrogène. Or, aujourd'hui, il n'a rien d'écologique, explique **Didier Astruc**. En pointe dans les recherches sur l'hydrogène décarboné, il alerte sur l'urgence des décisions qu'elles exigent.

Q

CHIMIE DES NANOSCIENCES

Dans le cadre de notre partenariat avec l'Académie des sciences, les académiciens nouvellement élus fin 2019 présentent un éclairage sur leur discipline et ses enjeux scientifiques, éthiques, politiques et sociétaux, à travers leur expérience personnelle.

quelque cinq années après l'accord de Paris (COP 21), ratifié par 189 pays, promettant de contenir la limite du réchauffement climatique au cours du siècle bien en dessous de 2 °C, quelle est la situation ? L'utilisation des énergies basées sur les matières fossiles produisant du gaz carbonique (CO₂) non seulement ne faiblit pas, mais se trouvait en augmentation de 5 % en 2019 par rapport à 2015, soit 59 milliards de tonnes de CO₂ (1). Les sources fossiles devraient pourtant être remplacées par des sources non carbonées, en particulier l'hydrogène, dont la combustion ne produit que de l'eau. L'hydrogène (H) est l'élément de très loin le plus abondant dans l'Univers (92 % des atomes), mais la molécule d'hydrogène (H₂), le dihydrogène (que nous appellerons désormais ici hydrogène), est inexistante naturellement sur la Terre. Pourtant, cette toute petite molécule va-t-elle sauver la planète d'une catastrophe en tant que vecteur d'énergie propre ? Pas dans l'état actuel. En effet, contrairement à l'idée bien ancrée dans les esprits, l'hydrogène actuel n'a rien d'écologique, étant produit à 96 % à partir de sources fossiles. De cette façon, la synthèse d'une tonne de H₂ nécessite la formation

de 50 tonnes de CO₂ ! Ainsi, outre les virus, deux autres grands problèmes actuels de l'humanité, la pollution et le réchauffement climatique, restent toujours à solutionner.

Pour supprimer l'utilisation des énergies fossiles, les solutions nécessitent un investissement rapide et massif en recherche et développement des infrastructures avec un changement d'ordre de grandeur des financements actuels. Pour fournir un hydrogène décarboné, il faut s'orienter vers l'électricité d'origine nucléaire à risques contrôlés (ERP-2, petits réacteurs nucléaires modulaires, réacteurs de 4^e génération, en attendant la fusion avec Demo, un projet de réacteur à fusion de deutérium et tritium), et les énergies renouvelables que sont l'énergie solaire, les biocarburants, l'éolien et l'hydraulique. Cet hydrogène décarboné pourra être utilisé dans les différents modes de transport, le chauffage, et l'industrie. Ainsi, ce sont plusieurs centaines de millions de tonnes d'hydrogène décarboné qui devraient être produites au cours du demi-siècle à venir, alors que la production actuelle n'est que d'environ 2 millions de tonnes.

PASSER DU GRIS AU VERT

La production actuelle d'hydrogène utilise les ressources fossiles et émet donc du CO₂, principal gaz à effet de serre. Elle contribue aussi à la pollution. Par exemple, selon Oliver Milman, dans « The Guardian » (2), un décès sur cinq dans le monde est dû à



PROFIL

Professeur émérite à l'université de Bordeaux, **Didier Astruc** est membre de l'Académie des sciences, de l'Académie nationale allemande Leopoldina et de diverses académies européennes. Chimiste des nanosciences, il travaille avec son équipe sur des nanosystèmes pour concevoir notamment des réservoirs d'hydrogène, dans l'esprit de la chimie verte.

la pollution en raison de la combustion de produits d'origine fossile produisant des particules fines. Une étude effectuée par des chercheurs de Harvard et d'autres universités, confortée par une large communauté de chercheurs américains en toxicologie, indique que cette pollution a été la cause, en 2018, d'un décès sur dix en Europe et d'un décès sur trois en Asie de l'Est (2). Par ailleurs, il a aussi été démontré que les microparticules émises par la pollution sont des vecteurs efficaces des virus (Covid-19 et autres), ce qui explique en partie la contamination virale actuelle supérieure dans les régions industrielles, localisée en France dans le Nord, l'Est et la région parisienne. Outre les microparticules, certaines nanoparticules organiques sont connues pour leur toxicité extrêmement élevée en raison de leur pénétration dans les organes vitaux et les dégâts qu'elles provoquent. C'est le cas, par exemple, du benzopyrène émis par combustion du diesel. L'hypertoxicité du benzopyrène, connue depuis un demi-siècle, est due à sa solubilisation dans l'orga-

nisme par oxydation et hydratation catalysées par certaines enzymes. Ces réactions conduisent à l'insertion du benzopyrène, ainsi fonctionnalisé, dans une hélice de l'ADN, perturbant sa transcription, ce qui empêche la fixation de la protéine qui inhibe la suppression des cellules cancéreuses et cause leur prolifération (3).

Actuellement, le gaz naturel, constitué essentiellement de méthane (CH_4), est la principale source d'hydrogène, assurant environ les trois quarts des 70 millions de tonnes de H_2 produites annuellement suivant le procédé de « reformage » du méthane, essentiellement le « reformage à la vapeur ». Employé à grande échelle, ce procédé consiste à traiter le méthane avec de la vapeur d'eau en présence de catalyseur autour de 900°C , la réaction consommant beaucoup de chaleur. Ainsi, le méthane est partiellement oxydé par l'eau en monoxyde de carbone (CO) et H_2 . Le CO produit dans cette réaction réagit aussi avec l'eau dans le milieu réactionnel pour donner CO_2 et H_2 , une réaction optimisée à plus basse température. Outre le gaz naturel, les autres sources de H_2 sont le charbon (23 %), les 2 % restants provenant du pétrole et de l'électricité.

« POTENTIEL ÉNORME » ET EXPÉRIMENTATIONS

Quelles sont les méthodes permettant de produire l'hydrogène sans les ressources fossiles ? L'hydrogène peut être produit par électrolyse de l'eau, procédé qui, à l'aide d'un courant électrique, permet de décomposer l'eau en H_2 et O_2 , et dont le rendement est augmenté à haute température. C'est un procédé simple déjà utilisé en faible quantité et coûteux car il dépend de la production d'électricité, c'est-à-dire de la politique énergétique. L'éolien et le photovoltaïque fournissent déjà un tiers de l'électricité nécessaire en France ; leur développement doit permettre d'abonder la production d'hydrogène.

Par ailleurs, il faut encourager le développement de possibilités qui ne sont pas matures aujourd'hui, en tirant profit du « bio-hydrogène » (fermentation, culture d'algues) (4) et de l'énergie solaire (photochimie, photo-électrochimie). En effet, la lumière visible est d'énergie largement suffisante pour effectuer la coupure de l'eau en H_2 et O_2 , mais la difficulté est de trouver le bon photocatalyseur et de séparer H_2 et O_2 . Des travaux pionniers sur ce sujet de nos deux prix Nobel de chimie français, Jean-Marie Lehn et Jean-Pierre Sauvage, entre 1977 et 1984, et d'Henri Kagan, en 1979-1980, avaient ouvert la voie, et les progrès sont actuellement encourageants au Japon et en Chine.)))

L'hydrogène décarboné peut être produit par l'électrolyse de l'eau, un procédé simple mais coûteux qui dépend de la production d'électricité, donc de la politique énergétique.

Seule une politique étatique décidée à miser sur le développement de la recherche, l'énergie nucléaire et l'éolien, les infrastructures adéquates et les transports publics à base d'hydrogène, permettra de concurrencer le gaz et le pétrole.

» Seule 2 % des besoins d'énergie primaire sont fournis par la production d'hydrogène décarboné. L'hydrogène est pourtant utilisé depuis longtemps dans le raffinage et la chimie, et son potentiel est énorme dans tous les domaines de l'énergie, en particulier le transport et même le chauffage. La combustion de H₂ génère trois fois plus d'énergie que l'essence pour le même poids.

UNE ÉNERGIE STOCKABLE ET TRANSPORTABLE

Il est déjà employé depuis des années comme carburant de la fusée Ariane ; il l'est actuellement à titre expérimental dans tous les transports : vélo (une centaine en France), voiture (des centaines de taxis de couleur bleu ciel à Paris ; recharge : 3 minutes, autonomie : 500 km), bus (150 bus à H₂ circulent actuellement en Europe, dont 5 à Versailles et 1 au Mans), tramway (en Chine à Tangshan), train (lancé en Allemagne en 2018), bateau (« Energy Observer », navire à H₂ mis à l'eau en 2017 pour un tour du monde en autonomie énergétique avec H₂ produit à bord par électrolyse d'eau de mer) et avion (Boeing, 2008). Le principe énergétique en est la pile à combustible produisant l'électricité et de l'eau par recombinaison électrochimique de l'hydrogène avec l'oxygène de l'air (principe inverse de l'électrolyse de l'eau). Ainsi, l'hydrogène peut aussi être stocké, contrairement à l'électricité, servir de réservoir de chaleur et d'énergie, et peut être transporté. Le problème est le coût et le manque d'infrastructures.

Seule une politique étatique très rapidement décidée à faire face au défi climatique et écologique, c'est-à-dire à remplacer la combustion des énergies fossiles par l'hydrogène en développant essentiellement la recherche, l'énergie nucléaire et l'éolien, les infrastructures adéquates et les transports publics à base d'hydrogène, peut concurrencer le gaz et le pétrole.

Les subterfuges temporaires utilisant les infrastructures pétrolières existantes sont la captation du CO₂ lors de son émission pour l'enfouir dans des champs souterrains à 2 km de profondeur, solution extrêmement

coûteuse, ou la transformation du CO₂ émis en produits (urée, carbonates, méthanol) (4), certes louable, mais dont les quantités devraient être tellement énormes qu'elle ne trouverait pas de débouchés. Parmi les techniques récentes intermédiaires, remarquons le reformage plasma et la décomposition catalytique qui permettent de décomposer le méthane (fossile ou biométhane) en carbone (C) et hydrogène sans produire de CO₂ (5).

Comme pour la gestion planétaire des pandémies, l'urgence d'une politique nationale consciente des enjeux et volontariste pour la production d'hydrogène décarboné apparaît clairement, allée à une coopération supranationale mondiale tenant compte des éléments géostratégiques, y compris les problèmes de coûts, de risques (explosions) et de transport de l'hydrogène. ★

(1) « Rapport 2020 des Nations unies pour l'environnement, 2020. Sur <https://www.unep.org/fr/emissions-gap-report-2020>

(2) O. Milman, « « Invisible Killer » : fossil fuels caused 8.7m deaths globally in 2018, research finds », in « The Guardian », 9 février 2021.

(3) J. F. A. Miller et coll., « Induction of Skin Tumor by Benzopyrene », in « Nature », 1963, 199, 921.

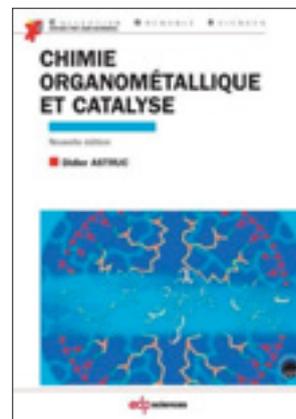
(4) M. Fontecave, « Que faire du dioxyde de carbone ? De la chimie pour le transformer... », en partenariat avec l'Académie des sciences, l'« HD » 480 du 1^{er} octobre 2015 : www.academie-sciences.fr/pdf/revue/LHUMANITE_octobre2015.pdf

(5) J.-M. Basset et coll., « Methane Decomposition to H₂ : a Review », in « International Journal of Hydrogen Energy », 2020, 45, 7981.

LE SITE DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES :

www.academie-sciences.fr
Pour suivre les actualités sur l'hydrogène, le site de l'Afhyac (Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible) :

<https://www.afhyac.org>
« CHIMIE ORGANOMÉTALLIQUE ET CATALYSE », DE DIDIER ASTRUC. EDP SCIENCES, 2013.



L'usine à hydrogène vert inaugurée en 2020 outre-Rhin, un nouveau jalon dans la décarbonisation de l'industrie allemande.



JENS BÜTTNER / ZUMA / REA