

réutilisation. Autrement, seules deux sources de molécules sont neutres en carbone : celles produites à partir d'eau et de CO_2 à l'aide d'une énergie verte et celles, que nous n'aborderons pas ici, issues de la biomasse.

Dans les industries intensives, hautement énergivores, ce besoin en molécules est particulièrement évident, comme vecteur énergétique, mais surtout comme matière première. La synthèse d'une molécule de méthane (CH_4) ou de méthanol (CH_3OH) à partir de CO_2 et de H_2O requiert beaucoup plus d'énergie que celle, réutilisable ensuite, contenue dans la molécule elle-même. Par conséquent, ce besoin en molécules augmentera fortement la demande en énergie totale. Certains secteurs de l'industrie réclamant des molécules pour des applications spécifiques, par exemple pour la chimie spécialisée, seront à étudier au cas par cas.

Un bon exemple de l'utilité des molécules dans la réussite de la transition énergétique est la « Dunkelflaute », un terme allemand signifiant une longue période sans soleil et sans vent pendant laquelle la production d'énergie est impossible. Avec l'hydrogène, des molécules « propres » à un (méthane et méthanol) ou deux atomes de carbone (éthane C_2H_6 et éthanol $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) aideront à suppléer au manque d'énergie solaire et éolienne. Il s'agira alors de choisir la mieux adaptée.

TRANSPORT ET MOLÉCULES

Les vertus de ces molécules sont souvent évidentes lorsqu'on se penche sur le secteur des transports, même si l'on doit se garder de généraliser à tous les modes. De fait, les deux roues, des vélos électriques de plus en plus plébiscités jusqu'aux motos électriques dont le marché progresse, n'ont pas besoin de molécules. Et il en va de même pour les voitures électriques des particuliers. Pour ces véhicules, la batterie est en termes de coût plus avantageuse qu'une solution à base d'hydrogène. De fait, ils profitent de l'infrastructure existante (on peut recharger facilement) et ils jouissent d'une bien meilleure efficacité énergétique, comparé par exemple aux piles à combustible qui pourraient équiper certains véhicules électriques. La prochaine décennie sera déterminante pour le développement des voitures particulières fonctionnant à l'hydrogène.

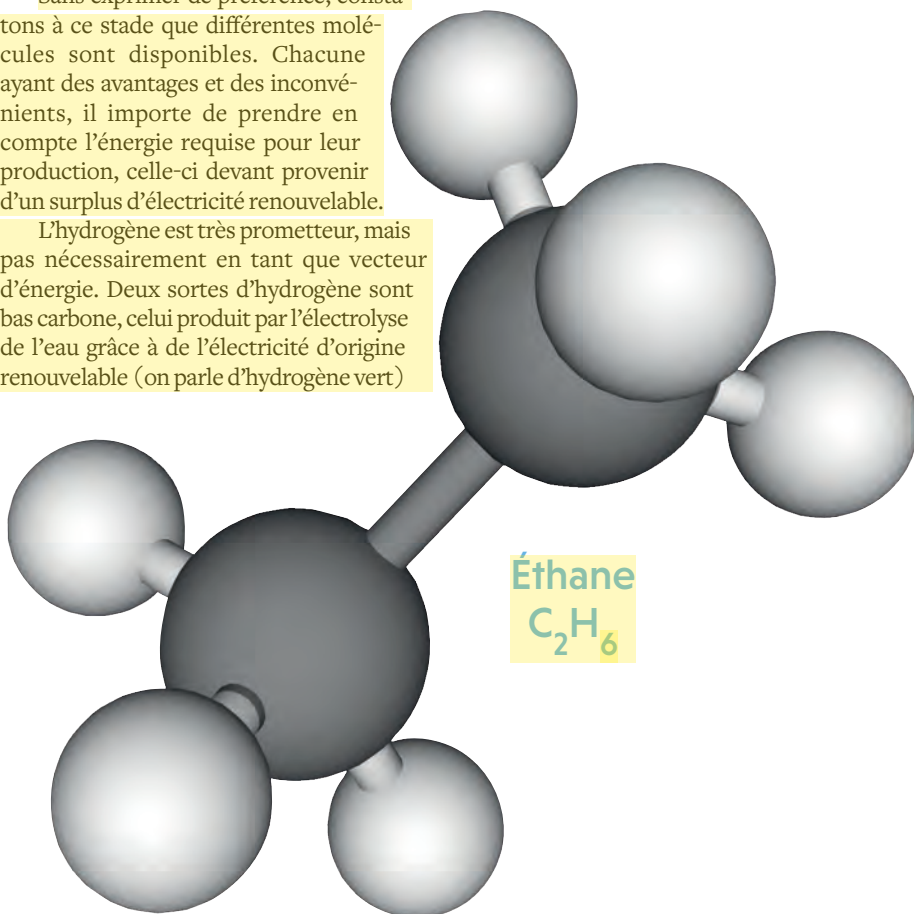
Le futur du transport de marchandises sur route est encore flou. Certes, des camions électriques équipés de batteries roulent déjà. Et Siemens expérimente de son côté une autre approche : équiper une voie d'autoroute de caténaires pour que les camions hybrides puissent rouler grâce à l'énergie électrique tout en chargeant leurs batteries, indispensables pour les premiers et les derniers kilomètres. Le besoin en molécules sera là encore faible, voire nul.

“ Les vertus des molécules sont souvent évidentes lorsqu'on se penche sur le secteur des transports ”

Les trains, les bus et les transports locaux seront de plus en plus électrifiés. Le transport fluvial devrait lui aussi adopter la propulsion électrique au moins pour une partie de son activité. Mais on ignore encore si les batteries auront une densité énergétique assez élevée pour parcourir de longues distances, sans prendre trop de place à bord ni augmenter le poids de façon significative. Les molécules auront certainement un rôle à jouer dans ce domaine, d'autant plus pour la navigation maritime, où les besoins en énergie sont nettement plus importants. Le constat est le même pour l'aviation, bien que les premiers avions électriques aient déjà effectué de courtes distances. Quant aux drones, qui occuperont une place importante dans la mobilité du futur (services de livraison, taxi dans les grandes villes...), ils sont déjà électriques.

Sans exprimer de préférence, constatons à ce stade que différentes molécules sont disponibles. Chacune ayant des avantages et des inconvénients, il importe de prendre en compte l'énergie requise pour leur production, celle-ci devant provenir d'un surplus d'électricité renouvelable.

L'hydrogène est très prometteur, mais pas nécessairement en tant que vecteur d'énergie. Deux sortes d'hydrogène sont bas carbone, celui produit par l'électrolyse de l'eau grâce à de l'électricité d'origine renouvelable (on parle d'hydrogène vert)



et l'hydrogène produit à partir de combustibles fossiles, mais dont le CO_2 est capturé (hydrogène bleu). Cet hydrogène bas-carbone, ainsi que les combustibles de synthèse, seront essentiels à la décarbonation de vastes secteurs de l'économie mondiale et donc une aide précieuse dans nos efforts visant à limiter le réchauffement de la planète à moins de 2°C . Citons notamment l'industrie chimique, la pétrochimie, l'acier, le ciment et l'industrie papetière.

De nombreuses études vantent la production d'énergie électrique dans les déserts, des régions non seulement étendues, mais aussi très ensoleillées. La littérature indique que le Sahara et l'Australie sont des zones potentielles. Mais comment transporter l'énergie, par exemple, du Sahara vers l'Europe ? Deux possibilités : les lignes à courant continu haute tension (CCHT), ou sous forme d'énergie chimique, c'est-à-dire de molécules. De nombreux spécialistes évoquent l'hydrogène, mais deux questions se posent. Cette molécule est-elle la mieux adaptée du point de vue énergétique ? Est-elle la plus performante ? Il est évident que l'électricité n'est pas une option en Australie, compte tenu de la distance avec l'Europe.

L'AVANTAGE DU MÉTHANE

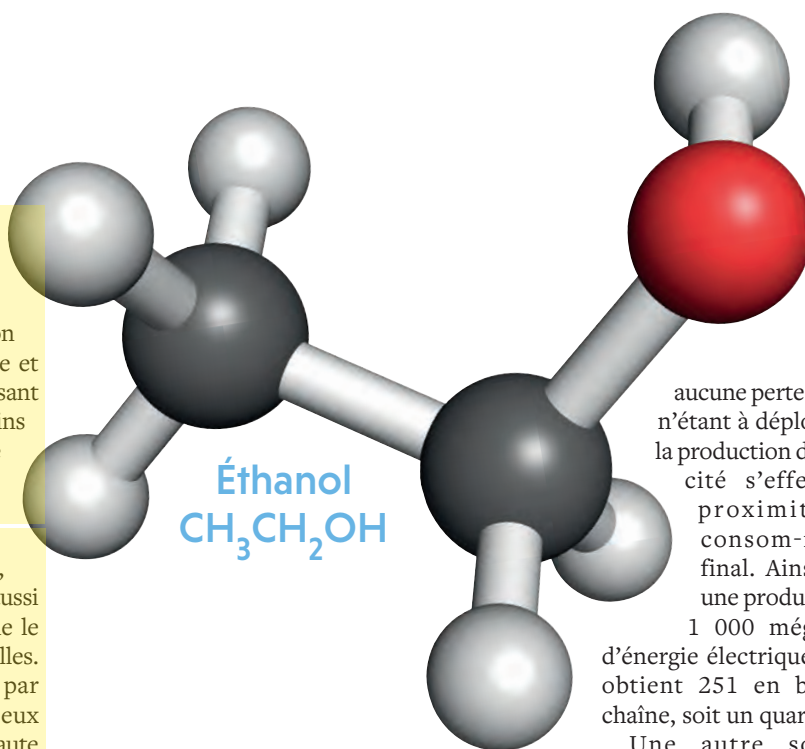
Détaillons la chaîne énergétique de l'hydrogène. D'abord un électrolyseur est requis, ce dispositif produisant de l'hydrogène par l'électrolyse de l'eau en décomposant des molécules d'eau (H_2O) en H_2 et O . Or trouver de l'eau dans le Sahara, ou dans tout autre environnement désertique, n'est pas sans poser des difficultés, mais passons.

Partons sur une efficacité de 70 %

pour cette étape. Le moyen le plus efficace pour transporter l'hydrogène en Europe est le transport sous forme liquide par bateau dans des réservoirs cryogéniques. La température d'ébullition de l'hydrogène étant extrêmement basse ($-252,87^\circ\text{C}$), sa liquéfaction est très énergivore. Différentes valeurs de rendement existent dans la littérature, mais prenons là encore 70 % pour cette deuxième étape.

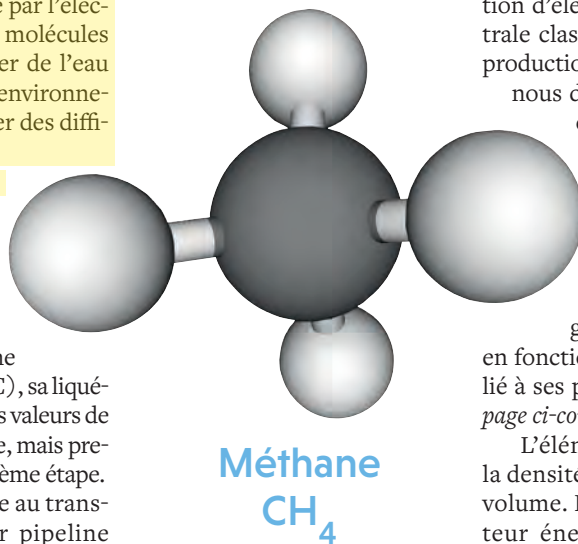
La consommation d'énergie liée au transport, y compris celui du gaz par pipeline jusqu'au site de liquéfaction situé sur la côte, est estimée à 10 % : le rendement de cette troisième étape est donc de 90 %. L'évaporation nécessite 5 % d'énergie supplémentaire. Le bilan global à ce stade est d'environ 40 %. L'hydrogène peut ensuite être injecté directement dans le réseau de distribution de gaz naturel et livré au consommateur final en tant que tel.

L'hydrogène peut être transformé en électricité sur le lieu de consommation par une pile à combustible (avec un rendement de 60 %),



aucune perte en ligne n'étant à déplorer, car la production d'électricité s'effectue à proximité du consommateur final. Ainsi, pour une production de 1 000 mégawatts d'énergie électrique, on en obtient 251 en bout de chaîne, soit un quart.

Une autre solution consiste à convertir l'hydrogène en méthane à l'aide de CO_2 capté dans l'air ou transporté par des canalisations. L'efficacité du procédé est estimée à 60 %. La liquéfaction ainsi que le transport du méthane sont nettement plus efficaces que l'hydrogène, avec respectivement 95 % de rendement et environ 0,1 % de perte par jour (soit 3 % par voyage). En termes d'évaporation, nous pouvons compter sur un rendement de 99 %, ce qui conduit à une efficacité globale à cette étape de 54,7 %. En ce qui concerne la production d'électricité, on peut recourir à une centrale classique à haut rendement (65 %). La production d'électricité étant alors centralisée, nous devons prendre en compte les pertes en ligne (92 %), ce qui donne un rendement global de 32,7 %.



LA BONNE MOLÉCULE POUR LE BON USAGE

Dans cet exemple, le méthane apparaît plus avantageux. Plus largement, le choix de la bonne molécule en fonction de son utilisation est étroitement lié à ses paramètres physiques (voir le tableau page ci-contre).

L'élément de comparaison pertinent est la densité d'énergie par unité de masse ou de volume. Plus la valeur est élevée, plus le vecteur énergétique est utile, transportable, facile à stocker et, dans ce cas, adapté aux applications mobiles.

Dans des conditions normales, la densité énergétique volumique de l'hydrogène est extrêmement faible, ce qui pose des problèmes de stockage et de transport. Nous pouvons atténuer quelque peu ces contraintes en augmentant la pression, mais la densité énergétique restera au mieux six fois inférieure à celle de l'essence. Cela constituera toujours un inconvénient majeur pour le secteur des transports.