

> (c'est-à-dire non restreinte à un seuil) parmi d'autres éléments de preuve. Par ailleurs, ils plaident pour renommer les intervalles de confiance «intervalles de compatibilité» – un terme qui refléterait mieux leur sens: la compatibilité avec les données, et non la confiance dans le résultat. Après un appel lancé à la communauté scientifique sur Twitter, les chercheurs ont reçu le soutien de 800 collègues, dont Daniel Benjamin.

Par ailleurs, des méthodes statistiques meilleures ou au moins plus simples existent. Andrew Gelman lui-même n'emploie pas le test de l'hypothèse nulle. Il préfère la méthodologie bayésienne, une approche statistique plus directe dans laquelle on part de présupposés sur l'issue de l'expérience, on ajoute les nouveaux résultats et on met à jour les présupposés. Sander Greenland, lui, encourage l'utilisation de la «surprise», une quantité mathématique qui ajuste la valeur-*p* pour produire des bits (similaires aux bits des ordinateurs) d'information.

Dans cette approche, une valeur-*p* de 0,05 ne représente que 4,3 bits d'information par rapport à l'hypothèse nulle. «Si on lance une pièce de monnaie, cela revient à obtenir 4 faces d'affilée, explique Sander Greenland. Est-ce une preuve suffisante pour démontrer que la pièce est éventuellement truquée? Non. Cette combinaison se produit souvent. C'est pourquoi 0,05 est une norme si faible.» Selon lui, si les chercheurs accompagnaient chaque valeur-*p* de sa traduction en bits, ils s'astreindraient à des standards plus élevés. Tenir plus compte de l'importance de l'effet aiderait également.

Enfin, améliorer l'éducation aux statistiques à la fois des chercheurs et du public rendrait davantage accessible le jargon des lois du hasard. Au début du xx^e siècle, quand Fisher a adopté le concept de significativité, ce mot avait une connotation moins forte qu'aujourd'hui. «Il relevait plus de la signification que de l'importance», rappelle Sander Greenland.

VIVRE AVEC L'INCERTITUDE

L'heure semble être venue de vivre dans l'inconfort de l'incertitude. Si l'on relève ce défi, la littérature scientifique changera de visage. Rapporter une découverte importante devrait «nécessiter un paragraphe, pas une phrase», déclare Ronald Wasserstein. Et ne pas se fonder sur une seule étude.

Les lignes commencent à bouger. «Nous sommes d'accord sur le fait que la valeur-*p* est parfois galvaudée ou mal interprétée, déclare Jennifer Zeis, porte-parole du *New England Journal of Medicine*. Conclure à l'efficacité d'un traitement si $p < 0,05$ et à son inutilité si $p > 0,05$ est une vision étroite de la médecine et ne reflète pas toujours la réalité.» Jennifer

Améliorer l'éducation aux statistiques rendrait davantage accessible le jargon des lois du hasard

Zeis affirme que les travaux publiés dans son journal recourent moins aux valeurs-*p*, voire s'appuient sur des intervalles de confiance sans valeurs-*p*. Sa revue a aussi adopté les principes de la science ouverte – des règles de bonne conduite qui obligent les auteurs à détailler davantage leurs protocoles de recherche et à respecter certains canons d'analyse, tout écart devant être dûment signalé.

De son côté, l'Agence américaine des produits alimentaires et médicamenteux n'impose aucune modification aux essais cliniques, d'après John Scott, qui dirige sa division de biostatistiques. «Il est très improbable que la valeur-*p* disparaisse dans un futur proche du développement des médicaments, mais à long terme les approches alternatives se multiplieront», prédit-il. L'inférence bayésienne, en particulier, suscite un intérêt grandissant.

Blair Johnson, qui vient d'être nommé rédacteur en chef du *Psychological Bulletin*, y promet des changements: «J'ai l'intention d'imposer des règles strictes sur la façon de rapporter une découverte. Afin que les lecteurs sachent ce qui s'est passé et pourquoi. Ils jugeront ainsi plus facilement si les méthodes sont fiables ou présentent des failles.» Il souligne aussi l'importance des métaanalyses et des articles de revue (qui dressent un bilan des découvertes dans un domaine) comme moyens de limiter les répercussions des études uniques.

La valeur-*p* «ne devrait être la clé d'aucune découverte», selon Blakeley McShane, qui prône une approche plus holistique et nuancée, davantage fondée sur l'évaluation. Une position que même les contemporains de Ronald Fisher auraient soutenue. En 1928, deux autres géants des statistiques, Jerzy Neyman et Egon Pearson, écrivaient à propos de l'analyse statistique: «Les tests eux-mêmes ne livrent aucun verdict, mais sont des outils d'aide à la décision.» ■

BIBLIOGRAPHIE

F. Masquettiaux, **Le grand ménage de la psychologie**, *Pour la Science*, n° 504, pp. 46-51, 2019.

R. L. Wasserstein et al., **Moving to a world beyond "p < 0.05"**, *American Statistician*, vol. 73, Suppl. 1, pp 1-19, 2019.

C. F. Camerer et al., **Evaluating the replicability of social science experiments in Nature and Science between 2010 and 2015**, *Nat. Hum. Behav.*, vol. 2, pp. 637-644, 2018.



Résilience ET DIVERSITÉ ÉNERGÉTIQUE

DOSSIER RÉALISÉ EN PARTENARIAT AVEC ENGIE



DIDIER HOLLEAUX,
Directeur Général
Adjoint d'ENGIE

Pendant des années notre système énergétique a su tirer sa force de la combinaison des vecteurs énergétiques et notamment de l'électricité et du gaz. Pourquoi au moment où se développe la vision d'une transition énergétique fondée sur la complémentarité des énergies progressivement décarbonées et décentralisées, devrions-nous opposer l'électricité et le gaz ?

En dehors de l'énergie contenue dans les liaisons moléculaires, les principes de la physique et de la chimie n'ont à ce stade pas identifié d'autres moyens de stocker l'énergie qui soient à la fois denses énergétiquement et aisément mobilisables et transportables. C'est pourquoi les produits pétroliers ont eu un tel succès au cours du siècle dernier. Mais, condamnés notamment par leur empreinte carbone, ils sont amenés à être progressivement remplacés par le gaz (naturel puis vert). L'essor des énergies renouvelables et intermittentes pour la production d'électricité verte accentue le besoin de développer

des solutions de production, de stockage et de transport, flexibles et fiables pour répondre aux demandes du réseau électrique.

Si la neutralité carbone à l'horizon 2050 pousse naturellement à une plus forte électrification des usages et si la maîtrise de la demande (efficacité énergétique et pilotage dans le temps) a assurément un rôle à jouer, elles ne doivent pas écarter les différents vecteurs décarbonés (hydrogène, biogaz...) tout aussi indispensables à un mix énergétique à la fois décarboné et économique. Pour répondre aux différents besoins de transition vers le « zéro carbone » de nos clients (citoyens, industries et collectivités locales) ces solutions performantes sont également primordiales.

Le présent cahier a pour ambition de montrer toute la diversité des solutions qui vont rendre effective la réduction des émissions de gaz à effet de serre et rendre réaliste l'objectif de la neutralité carbone en tirant le meilleur parti de toutes les ressources et vecteurs disponibles. Comme la biodiversité, la diversité énergétique rend notre monde plus résilient : elle doit être préservée. ■



La recherche, un accélérateur nécessaire vers la neutralité carbone

Selon la définition classique forgée au début de l'ère industrielle, l'énergie est la capacité d'un système à produire un travail. Aujourd'hui, dans nos sociétés modernes, cette définition semble bien limitée par rapport à ce que l'énergie offre réellement. Dans une perspective plus large et actualisée, nous pourrions la redéfinir comme la capacité à produire des biens à haute valeur ajoutée. De fait, grâce à l'énergie nous bénéficions de l'éclairage, de chaleur, d'eau propre, de nourriture abondante, de mobilité, d'information... En somme d'une simple pression sur un interrupteur ou d'une ouverture de vanne, nous profitons de tout le confort nécessaire, et bien plus encore, dans nos maisons et nos usines. Nous lui devons nos récoltes, leur conservation par le froid, leur transport, mais aussi l'éducation, la santé et la sécurité. Notre civilisation

repose sur l'accès à l'énergie. Le corollaire est qu'en son absence, tout s'effondre.

Absence ne signifie pas disparition, car, les lois de la thermodynamique sont formelles, l'énergie se conserve. Nous ne pouvons pas en fabriquer plus, nous ne pouvons que la déplacer et surtout la transformer. Le cœur de notre relation avec l'énergie se situe à ce niveau : exploiter à notre avantage ces transformations et contenir leurs impacts environnementaux. Or étendre à tous les bénéfices de l'énergie sans réchauffer l'atmosphère, acidifier les océans ni éroder les terres exige de réfléchir au développement de nouvelles solutions.

LA COMPLEXITÉ DU MONDE

Dans notre monde moderne, nous avons chacun un rapport ambivalent avec l'énergie, entre exaltation et culpabilité : c'est un sérieux dilemme. Comment pouvons-nous retirer tous

SOMMAIRE

II LA RECHERCHE, UN ACCÉLÉRATEUR NÉCESSAIRE VERS LA NEUTRALITÉ CARBONE

Michael E. Webber

IV LES MOLÉCULES DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Ronnie Belmans et Jan Mertens

VIII POUR UNE DÉCARBONATION OPTIMALE

*Hugues de Peufelhous, Gauthier de Maere d'Aertrycke
et Pierre-Laurent Lucille*

X LA RÉVOLUTION ATTENDUE DES BATTERIES

Rafael Jahn, Dominique Corbisier et Paulo Torres

XII UN MARIAGE DE RAISON

Carole Le Henaff, Grégoire Hévin, Christian Huet et Delphine Patriarche

XIV UNE MOBILITÉ ÉLECTRIQUE RÊVÉE

Laurent De Vroey

XVI VERS DES CROISIÈRES PLUS PROPRES

Frédéric Legrand et Gabrielle Menard

XVIII POUR UNE INDUSTRIE ZÉRO CARBONE

Ludovic Ferrand, Philippe Buchet et Jean-Pierre Keustermans

XX L'AVENIR DES POMPES À CHALEUR

Akim Rida et Jean-Yves Druillenec

XXII CHAUFFER SANS RÉCHAUFFER... LE CLIMAT !

Benjamin Haas et Mures Zarea

XXIV UN MONDE DÉCARBONÉ... ET CLIMATISÉ

Rodolphe Desbois et Cristian Muresan

XXVI VERS UNE AGRICULTURE NEUTRE EN ÉMISSIONS

Elodie Le Cadre Loret et Bérengère Genouvillat

XXVIII POUSSER À L'OMBRE DU SOLAIRE

*Jöran Beekkerk Van Ruth, Stijn Scheerlink, Rob Kursten et
Claire Du Colombier*

XXX TRANSITION ÉNERGÉTIQUE, L'INDISPENSABLE COMPLÉMENTARITÉ

Adeline Dutierque, Luc Goossens et Jan Mertens

les bienfaits de l'énergie sans les inconvénients associés de la pollution, de la volatilité des prix et des risques pour la sécurité nationale ?

La réponse est de reconnaître que chaque carburant ou technologie a ses avantages et ses inconvénients. La consommation d'énergie dans le monde est un système complexe qui comporte un grand nombre d'éléments. Le secteur de l'énergie est étroitement connecté à la société par de nombreux liens, évidents ou non.

S'il est une leçon que nous devons garder à l'esprit pour relever les défis associés à l'énergie, c'est qu'il n'existe pas de solutions universelles et immédiates. Nous avons besoin d'un ensemble de solutions adaptées à chaque territoire, car aucune option unique ne peut nous conduire vers un avenir décarboné sans un inconvénient majeur : un coût très élevé, un déploiement à une échelle insuffisante ou une faible fiabilité.

Cela signifie que nous avons besoin d'architectes énergétiques innovants pour développer davantage d'options, réduire le coût de celles existantes et optimiser la façon dont elles s'articulent. L'un des enjeux d'avenir pour les pouvoirs publics sera de soutenir financièrement le monde de la recherche, dans le domaine de l'énergie, pratiquée en laboratoires industriels, nationaux et universitaires à travers le monde afin d'accélérer le rythme de l'innovation. Et parce que le défi est complexe et trop important pour qu'une entreprise ou un gouvernement puisse le relever seul, nous devons collaborer par-delà les secteurs, les disciplines universitaires et les frontières.

La solution passe par l'abandon des vieux clichés qui opposent les combustibles fossiles aux énergies renouvelables, l'électricité au gaz et bien d'autres conflits stériles. Nous avons besoin d'une vision plus précise. Les anciennes stratégies qui nous ont conduits là où nous en sommes – forer plus, construire plus de routes, consommer plus – ne nous seront d'aucun secours. Une ferveur technologique dépassée en des gadgets plus « intelligents » ne sera pas d'une plus grande utilité. L'efficacité énergétique est une manière de réduire notre empreinte carbone sans réduire notre qualité de vie mais ce n'est pas assez.

Le moyen le plus rapide, le moins cher et le plus fiable d'atteindre la neutralité carbone des énergies repose sur un mix d'électricité et de combustibles à faible teneur en carbone. Nous avons besoin, d'une part, de nouvelles formes d'énergie plus propres et, d'autre part, d'une réduction des émissions des formes d'énergie conventionnelles avec, par exemple, la capture et le stockage du carbone, afin de maintenir et même d'élargir l'accès à l'énergie sans « brûler notre maison ».

Les domaines sur lesquels nous pouvons agir rapidement sont nombreux. Citons la production d'électricité à faible teneur en carbone issue de l'éolien, du solaire et de la géothermie, les gaz à faible teneur en carbone comme le biométhane, le méthane synthétique, l'hydrogène et les

vecteurs d'hydrogène (l'ammoniac, l'acide formique et le méthanol). D'autres leviers importants résident dans les technologies diminuant les quantités de CO₂ dans l'atmosphère par le biais du piégeage du carbone, le captage direct de l'air et la séquestration du carbone dans le sol, ainsi que dans les outils transversaux, notamment les drones, les robots, les capteurs et l'intelligence artificielle. On peut enfin compter sur les utilisations intelligentes et efficaces de l'énergie s'appuyant sur le stockage de l'énergie, les appareils intelligents et l'éducation des utilisateurs pour modifier les comportements et les habitudes.

Chez ENGIE, les programmes de recherche portés par nos équipes de chercheurs sont organisés autour de ces thèmes, et notre analyse des travaux des principaux laboratoires nationaux et des plus grandes entreprises internationales du secteur révèle que nous ne sommes pas les seuls à envisager l'avenir de cette façon. De fait, nous sommes tous confrontés aux mêmes problématiques. Peut-être pourrions-nous agir collectivement et donc plus rapidement ?

L'adoption d'un ensemble de solutions plus propres tout en améliorant l'accès à l'énergie et en fermant nos actifs les plus polluants est le chemin que nous devons emprunter vers l'avenir. Le changement est une chose souhaitable, et nous devons nous y atteler, mais sa mise en place est lente. Il est largement temps de nous y mettre. C'est ici que le besoin de recherche est le plus prégnant : accélérer la transition.

LE TEMPS PRESSE

Des décennies, voire des siècles, sont le plus souvent nécessaires pour passer d'un combustible ou d'une technologie dominante à un autre. Aux États-Unis, le charbon est devenu la source d'énergie la plus populaire en 1885 et n'a été dépassé par le pétrole que soixante-cinq ans plus tard, en 1950. Le pétrole est toujours en tête aujourd'hui, mais pourrait bien être dépassé par le gaz naturel dans la prochaine décennie, ce qui mettrait fin à quatre-vingts ans de règne.

Si le gaz naturel présente des avantages notables en termes d'environnement et de performance, nous n'aurons pas quatre-vingts ans pour le remplacer par des options plus propres, comme l'électricité sans carbone ou d'autres gaz à faible empreinte environnementale. La course est lancée, à vive allure, et notre tâche, dans le monde de la recherche, est d'atteindre la dimension industrielle de ces alternatives et d'en diminuer les coûts afin qu'elles puissent être adoptées à grande échelle le plus rapidement possible.

Maintenant la mission de nos équipes est d'accélérer le rythme afin de relever les défis énergétiques aux côtés de nos partenaires scientifiques et académiques et de contribuer à développer les solutions énergétiques d'avenir qui permettront de préserver la biodiversité, le climat et l'inclusion sociale. ■

Les molécules de la transition énergétique

Quel que soit le chemin emprunté vers un monde zéro carbone, l'offre énergétique ne pourra pas compter que sur l'électricité : des molécules comme l'hydrogène, le méthane, l'éthanol... resteront longtemps indispensables.

LES AUTEURS

RONNIE BELMANS, PROFESSEUR À L'UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN, EN BELGIQUE, DIRECTEUR GÉNÉRAL D'ENERGYVILLE, ET JAN MERTENS, PROFESSEUR À L'UNIVERSITÉ DE GAND, EN BELGIQUE, DIRECTEUR SCIENTIFIQUE D'ENGIE

LES AUTEURS REMERCIENT LE CONSEIL SCIENTIFIQUE D'ENGIE POUR LES DISCUSSIONS RICHES ET PERTINENTES SUR LE SUJET.

Pendant longtemps, la décarbonation de l'électricité a été perçue comme un élément clé de la transition énergétique, notamment *via* l'essor massif des énergies renouvelables produisant de l'électricité. Malgré leur intermittence, le développement des technologies de l'information et celles de la gestion des données devraient assurer un fonctionnement stable et fiable de l'ensemble. La demande variant, l'offre devra également s'adapter notamment grâce à des batteries stockant le surplus ponctuel d'énergie. Mais au final, le client pourra compter sur l'électricité pour bénéficier des meilleurs services énergétiques. Ce modèle « électrique », même s'il sera à coup sûr au cœur du futur système énergétique, n'en suscite pas moins des questions et des préoccupations.

LA PART DE L'ÉLECTRICITÉ

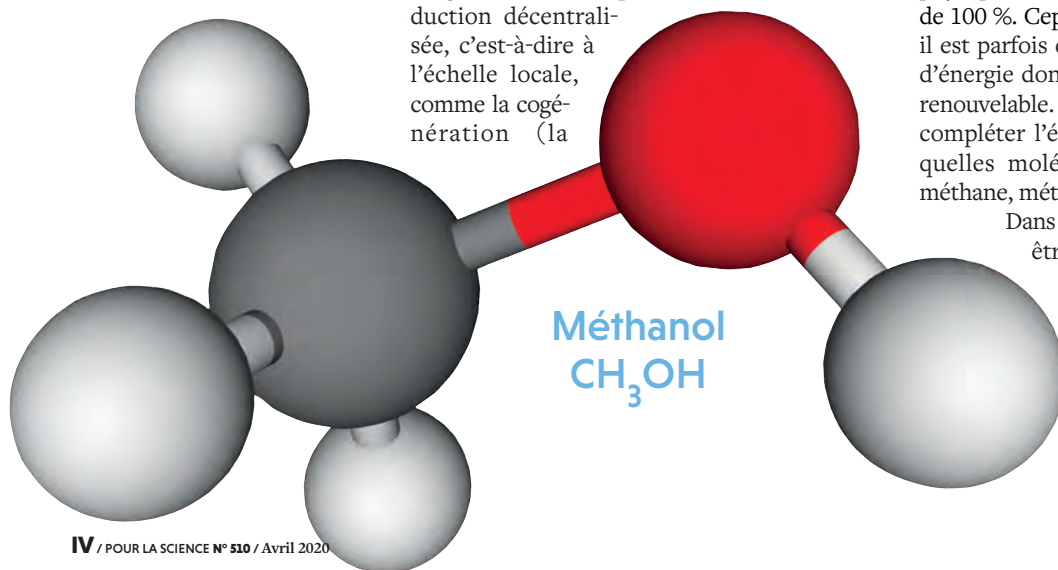
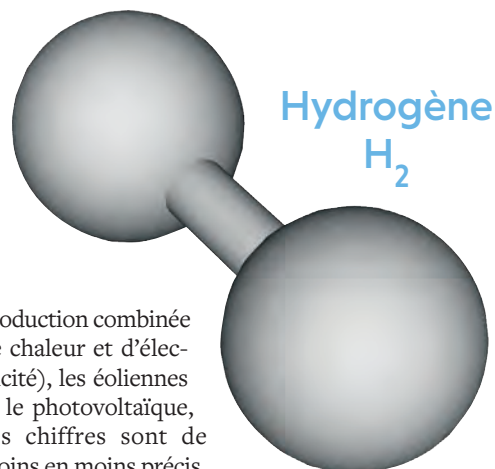
D'abord, il convient de bien distinguer le système énergétique dans son ensemble de la seule production électrique, qui n'en représente qu'une petite part. En Belgique, par exemple, en 2016, 81,4 térawattheures d'électricité ont été fournis (pour une production de 85,4). Notons qu'avec l'augmentation de la production décentralisée, c'est-à-dire à l'échelle locale, comme la cogénération (la

production combinée de chaleur et d'électricité), les éoliennes et le photovoltaïque, ces chiffres sont de moins en moins précis.

Quant à la consommation finale d'énergie globale (électricité, gaz, pétrole, charbon, biomasse, déchets), elle fut de 489 térawattheures. Plus encore, la consommation d'énergie primaire, qui mesure la demande totale en énergie d'un pays, était de 657 térawattheures. L'écart s'explique par l'énergie consommée par l'industrie chimique, la sidérurgie, la filière nucléaire... En revanche, le transport maritime et l'aviation internationale ne sont pas pris en compte. En fin de compte, on estime que l'électricité représente 16,6 % de la consommation finale d'énergie en Belgique. À l'échelle du continent européen, ce chiffre atteint 17,9 % (3 255 térawattheures d'électricité contre 18 154 d'énergie primaire).

Les lois de la thermodynamique indiquent que l'utilisation directe de l'énergie électrique est toujours à privilégier, car la transformer, par exemple en énergie chimique ou calorifique, diminue sa capacité à fournir du travail : en termes physiques, on dit que son indice exergétique est de 100 %. Cependant, selon les services requis, il est parfois difficile de remplacer une source d'énergie donnée par une électricité d'origine renouvelable. C'est là que les molécules peuvent compléter l'électron, voire s'y substituer. De quelles molécules parle-t-on ? Hydrogène, méthane, méthanol, éthane, éthanol...

Dans tous les cas, ces molécules devront être produites à partir d'électricité décarbonée, ou de biogaz neutre en carbone, faute de quoi la transition vers un monde sans carbone échouera. Une alternative, ou plutôt une solution intermédiaire, serait la capture et le stockage du CO₂, voire sa



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.

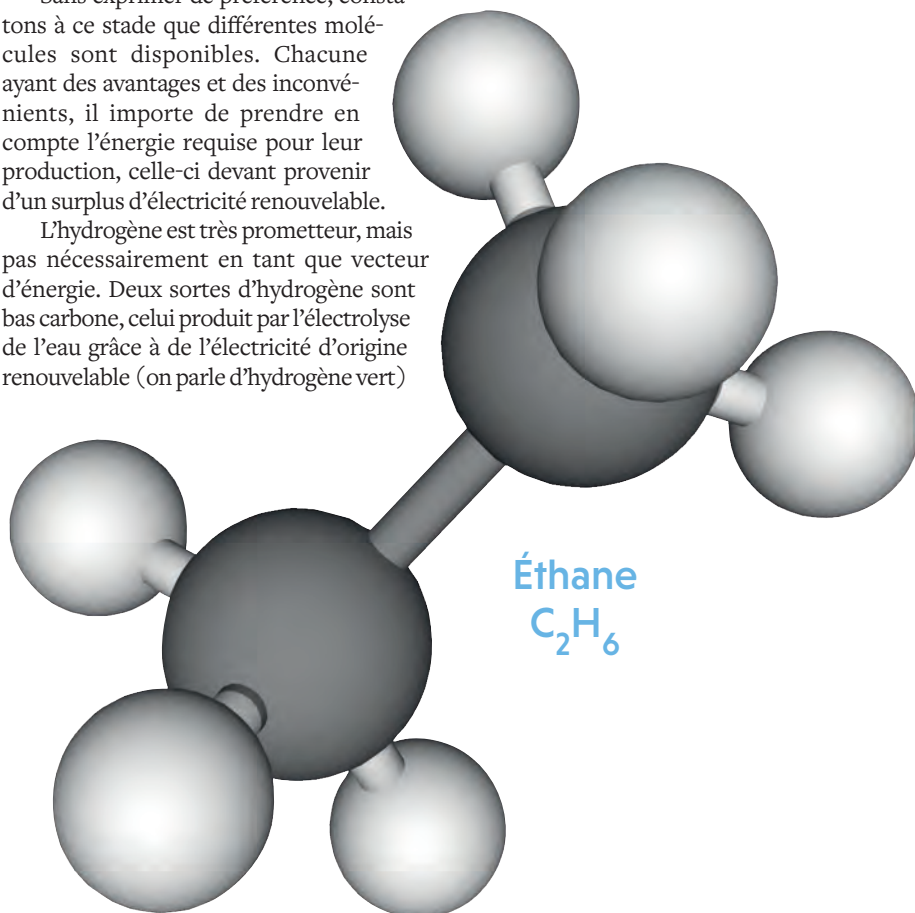
Le futur du transport de marchandises sur route est encore flou. Certes, des camions électriques équipés de batteries roulent déjà. Et Siemens expérimente de son côté une autre approche : équiper une voie d'autoroute de caténaires pour que les camions hybrides puissent rouler grâce à l'énergie électrique 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.

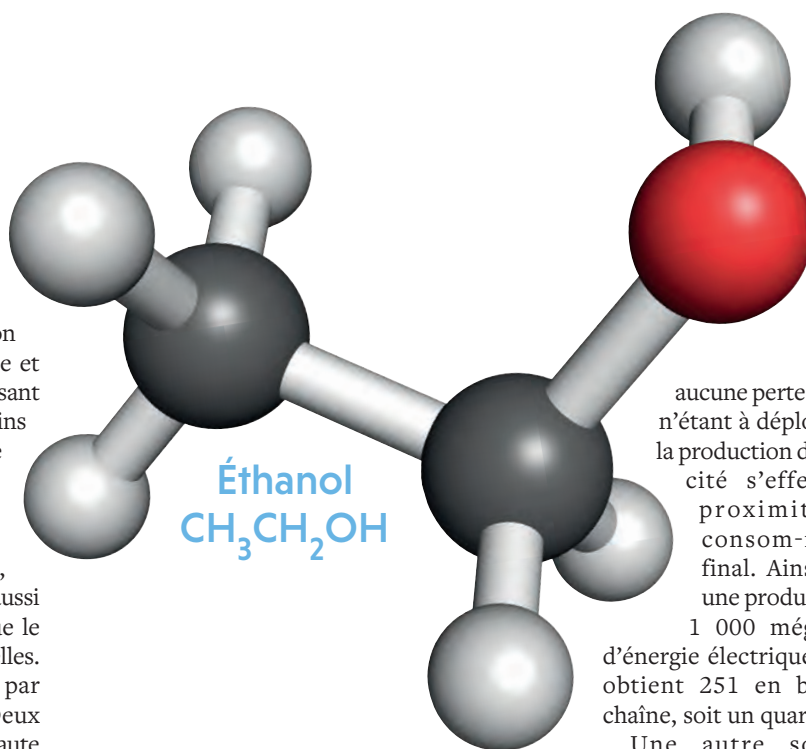
L'AVANTAGE DU MÉTHANE

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.

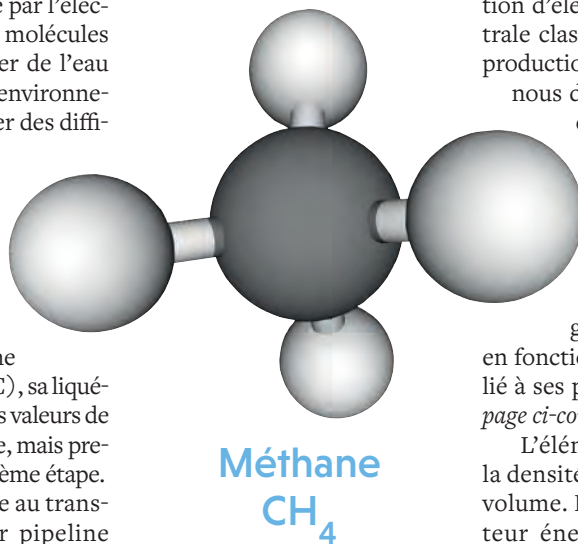
La consommation d'énergie liée au transport, y compris celui du gaz par pipeline jusqu'au site de liquéfaction situé sur la côte, est estimée à 10 % : le rendement de cette troisième étape est donc de 90 %. L'évaporation nécessite 5 % d'énergie supplémentaire. Le bilan global à ce stade est d'environ 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.

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.

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



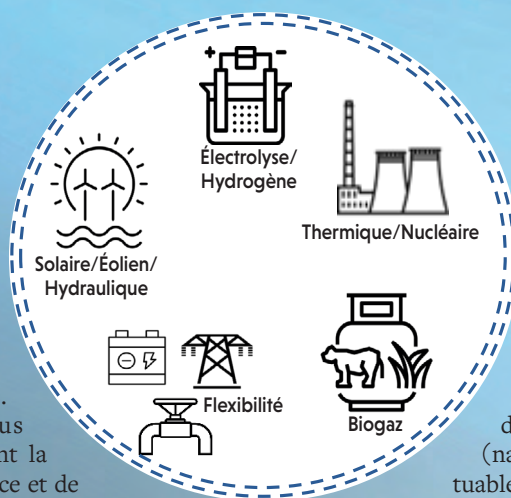
Les pays de l'étude « Decarbonizing Central Western Europe »,

pas horaire, est un progrès décisif. Grâce à cette étude, on a désormais accès à l'impact réel des contraintes techniques et économiques, comme la saisonnalité de la consommation et de la production, les pics de consommation, ainsi qu'à l'interdépendance économique des sources de production.

Cinq scénarios ont été modélisés. Intéressons-nous aux deux plus représentatifs de ceux qui réussissent la transition : ceux d'électrification précoce et de transition multivecteurs équilibrée. Dans le premier, l'Europe substitue son mix actuel essentiellement par de l'électricité verte, en comptant uniquement sur ses ressources domestiques pour des questions d'indépendance. L'Europe électrifie tôt et fortement l'ensemble des usages finaux pour atteindre la décarbonation complète. Ce scénario requiert une électrification intense, supérieure à 60 % des besoins énergétiques contre 25 % aujourd'hui.

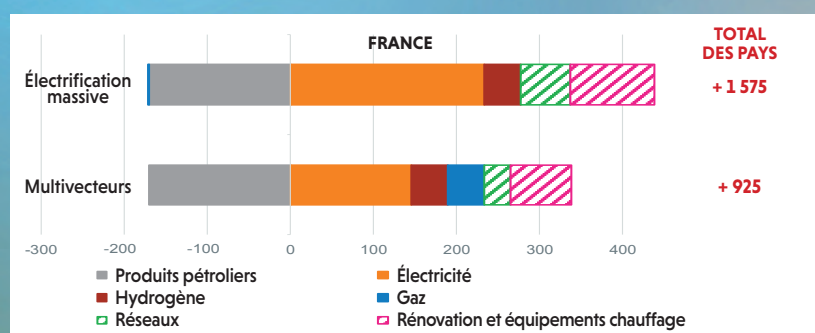
Dans le second scénario, l'Europe promeut le développement de l'électricité verte et celui des gaz verts (biométhane, hydrogène vert...). Le continent peut cette fois importer du gaz vert de certains partenaires commerciaux. Les importations concerneraient en majeure partie du méthane de synthèse élaboré à partir d'électricité verte destiné aux pays du Nord. Mais même dans ce scénario ouvert aux importations, l'indépendance de la zone Europe étudiée serait bien supérieure (82 % à 2050 contre 17 % aujourd'hui).

Dans les deux scénarios, la flexibilité du système électrique est analysée, résultant de la mobilisation optimale de chacune des ressources, des batteries disponibles jusqu'aux centrales thermiques alimentées par des gaz verts. La tension maximale n'est plus comme aujourd'hui l'heure de plus forte demande absolue, mais la période où la différence entre cette demande et la contribution des ressources renouvelables intermittentes est la plus forte, ce qui correspond par exemple à plusieurs jours sans vent en hiver. Le scénario d'électrification précoce est plus sensible à ces effets et doit déployer davantage de ressources de flexibilité pour y faire face. Quels sont les principaux enseignements ?



Les contributeurs de la transition énergétique.

Selon le scénario, électrification massive ou multivecteurs, le surcoût (ici pour la France, en milliards d'euros, et en rouge pour l'ensemble des pays de l'étude) par rapport à une trajectoire inchangée dite « business as usual » diffère.



D'abord, et c'est rassurant, la neutralité carbone est possible selon plusieurs scénarios plus ou moins électrifiés. Dans tous les cas, la transition repose sur trois piliers : l'efficacité énergétique, le développement massif des énergies renouvelables électriques et une répartition optimisée des usages par vecteur. Ce dernier point conduit à l'utilisation du gaz (naturel, puis vert) là où il est peu substituable et plus compétitif.

DES COÛTS IDENTIFIÉS EN DÉTAIL

Autre enseignement, la décarbonation selon le scénario multivecteurs bénéficie de coûts plus optimisés (voir la figure ci-dessous) qu'avec l'électrification. L'écart s'élève à 650 milliards d'euros, les coûts étant calculés en valeur nette actualisée de l'ensemble du système énergétique. Comment expliquer ce surcoût ? Parce que le scénario multivecteurs n'impose ni de développer de nouvelles capacités de production flexibles ni de surdimensionner le réseau de transport et de distribution électriques pour compenser l'intermittence de l'électricité renouvelable.

L'étude montre également que les ressources européennes en biométhane sont pleinement valorisées dans tous les scénarios de décarbonation, associées à 500 térawattheures d'hydrogène vert, soit un peu plus que la consommation française actuelle en gaz naturel. Le complément est apporté soit par des importations de gaz verts dans le scénario multivecteurs, soit par une production supplémentaire d'hydrogène en Europe dans le scénario d'électrification.

La France dispose en Europe d'un avantage concurrentiel sur les ressources renouvelables – vent, soleil et biomasse – et devra toutes les solliciter. S'appuyer sur seulement deux des trois ressources conduirait à surdimensionner inutilement le système électrique européen, alors même que les besoins en développement annuel de capacités renouvelables s'élèvent déjà à 44 gigawatts (27 pour le solaire et 17 pour l'éolien) pendant trente ans, ce qui constitue un défi majeur tant en termes d'investissement que d'acceptabilité.

Au final, si l'électrification de certains usages est indispensable, le curseur ne doit sans doute pas être poussé trop loin au risque d'une transition énergétique excessivement brutale sur le plan technique sans aucun gain environnemental. Utiliser pleinement les différents vecteurs décarbonés (dont les gaz verts) permet une transition plus résiliente et moins chère lorsqu'on mesure les effets tout au long de la chaîne de valeur, et pas seulement à la production ou à la consommation d'énergie. Transmis à la Commission européenne ! ■

La station belge
Princesse Élisabeth,
en Antarctique.

La révolution attendue des batteries

L'essor des énergies renouvelables réclame un large déploiement de solutions de stockage de l'électricité. Les technologies actuelles sont performantes, mais encore insuffisantes. La recherche s'active pour y remédier.

Ancrée sur un éperon rocheux, la station Princesse Élisabeth trône en Antarctique. Cette base scientifique belge, inaugurée le 15 février 2009, a la particularité d'utiliser exclusivement les énergies renouvelables grâce à l'énergie solaire fournie par des panneaux photovoltaïques et des panneaux thermiques, complétée par neuf éoliennes. Cette prouesse a été rendue possible par les nombreuses batteries installées pour stocker l'électricité et en gérer les intermittences.

De fait, ces dispositifs seront incontournables pour réussir la transition énergétique vers le zéro carbone. Celle-ci requiert un essor important des sources renouvelables dont l'intermittence dépassera les limites de stabilité du système électrique actuel, au moins de façon locale. L'intermittence est une caractéristique plus complexe à gérer qu'on ne le pense. Aujourd'hui, le réseau électrique, les

LES AUTEURS
RAFAEL JAHN ET
DOMINIQUE CORBISIER,
ENGIE LABORELEC.
PAULO TORRES, ENGIE

productions classiques interconnectées et les réserves de production contractées par l'opérateur du réseau sont souvent suffisamment développés pour atténuer les intermittences rapides (de la seconde jusqu'au quart d'heure). Par ailleurs, la question se pose également pour les intermittences plus longues, pendant quelques heures nuageuses, durant la nuit et lors des journées sans vent ni grand soleil. Augmenter les productions classiques mises en attente ne peut être la seule solution.

PALIER LES INTERMITTENCES

Dans un monde idéal engagé dans la transition énergétique, nous aurons besoin de stockage bon marché, sécurisé et suffisamment performant pour atténuer des fluctuations tant rapides que lentes, favoriser le développement des productions individuelles locales, soutenir la stabilité du réseau par des moyens non carbonés, stocker massivement l'électricité pour une mise à disposition modulable de l'électricité verte... Dans cette gamme de besoins, le stockage par batteries a un rôle important à jouer, mais plusieurs défis restent à relever.

Aujourd'hui, le stockage de l'énergie électrique par batterie est essentiellement fondé sur la technologie lithium-ion. Cette technologie est assurément mature, mais pas complètement

industrialisée en pratique. Il importe donc de développer un savoir-faire autour de ce type de batterie. ENGIE s'y emploie et s'attache à relever les défis technologiques et opérationnels qui ralentissent son expansion : vieillissement de la cellule électrochimique, sécurisation du système de stockage complet, recrutement en mode stationnaire des batteries automobiles, pilotage de batteries en « flotte » ou isolées...

Toutefois, pour certains usages, comme le stockage massif ou saisonnier, la technologie lithium-ion ne sera pas toujours optimale ni abordable. En effet, fournir une puissance électrique (les watts) satisfaisante est actuellement relativement bon marché, mais ce n'est pas le cas pour l'énergie électrique (les wattheures). D'autres technologies sont indispensables, et plusieurs font d'ores et déjà l'objet de grands efforts de développement. Outre les performances, on espère améliorer la sécurité tout en diminuant les coûts. Ainsi, les batteries lithium-soufre, redox à flux, à électrolyte solide, les batteries sodium-ion ou métal-air... sont évaluées ou testées par ENGIE en laboratoire, voire en démonstrateur. Certaines de ces technologies combinent longue durée de vie à coût réduit et cycle de vie durable par rapport aux technologies actuelles qui ne font qu'ouvrir la voie. La route sera-t-elle longue ?

ANTARCTIQUE ET LITHIUM-ION

Les batteries qui équipent la station Princesse Élisabeth, installées par Engie en 2008, relèvent d'une technologie centenaire (plomb-acide avec un électrolyte sous forme de gel, permettant de coucher la batterie, plutôt que de devoir la garder debout). Ce ne fut pas une mince affaire de manipuler manuellement des tonnes de matériel dans des conditions de gel intense ! Mais tout fonctionna correctement : la base zéro émission profita dès sa mise en service d'une énergie totale de 400 kilowattheures.

À cette époque, il était trop tôt pour envisager l'utilisation du lithium-ion. En Antarctique comme dans les applications spatiales, le prix n'était pas le facteur limitant. Prévalait plutôt le retour sur expérience en termes de durée de vie (dans un tel environnement) et plus encore de sécurité. Aujourd'hui, plus de quarante ans après ses balbutiements, le lithium-ion a finalement pris sa place dans les applications mobiles et de mobilité, où la taille et le poids de la batterie sont clés. Pour les applications stationnaires, en revanche, ces contraintes sont moindres et

UNE VICTOIRE AU SOLEIL !



© agoriasolarteam

Gagner une course, c'est bien gérer son capital énergie... L'équipe qui a remporté l'édition 2019 du World Solar Challenge (la « coupe du monde des véhicules solaires »), en Australie, en a apporté la preuve en faisant confiance à ENGIE pour la conseiller sur ce point. Les atouts pour prétendre à la victoire sont un véhicule économe, une bonne production solaire embarquée... et une batterie dont on connaît parfaitement les caractéristiques. Il s'agit de l'exploiter au mieux en fonction du vent contraire, du relief, de la température... sans tomber à court en vue de la ligne d'arrivée, mais également sans marge de sécurité trop importante. Grâce au Storage Lab d'ENGIE, qui a testé les cellules pressenties et a prodigué des conseils de mise en œuvre, les gagnants ont profité d'un pack de batteries homogène sans cellules en surexploitation. Ils étaient informés à tout moment de l'état de charge réelle de la batterie et pouvaient optimiser les batteries avant chaque étape. Cette gestion précise de l'énergie fut décisive.

“ Pour certains usages, la technologie lithium-ion ne sera pas toujours optimale ni abordable ”

doivent nous permettre de choisir une technologie faisant appel à des matériaux plus communs, moins controversés, et par conséquent encore moins chers en théorie.

Faudra-t-il attendre encore quatre décennies pour remplacer le lithium-ion ? Probablement pas, mais au moins une

décennie devra s'écouler avant qu'on ne trouve et améliore le bon candidat. La circonspection sera de mise, car l'intensité de la recherche dans ce domaine et la chasse aux soutiens financiers peuvent générer bon nombre d'annonces de « résultats sensationnels », mais finalement non confirmés, et propres à semer le doute.

En attendant, malgré les imperfections du lithium-ion, ENGIE continue à parfaire son intégration chez les utilisateurs, dans le réseau électrique ou les territoires encore non électrifiés. Tout un programme qui devient concret à grande vitesse. ■

RÉFÉRENCE

Le site de l'équipe gagnante du World Solar Challenge 2019 : www.solarteam.be/

Un mariage de raison

Les opérateurs devront disposer d'importantes capacités de stockage de longue durée pour garantir la résilience du système électrique. Le stockage de gaz sera en mesure d'assurer ce rôle en convertissant l'excédent d'électricité d'origine renouvelable en hydrogène.

LES AUTEURS

CAROLE LE HENAFF,
GRÉGOIRE HÉVIN,
CHRISTIAN HUE ET
DELPHINE PATRIARCHE,
STORENGY

Depuis le lancement du *Green New Deal*, en décembre 2019, l'Union européenne est engagée dans un agenda positif, tourné vers l'avenir, avec des propositions propices à faire de la transition écologique un relais de croissance, dans l'intérêt de ses citoyens et entreprises.

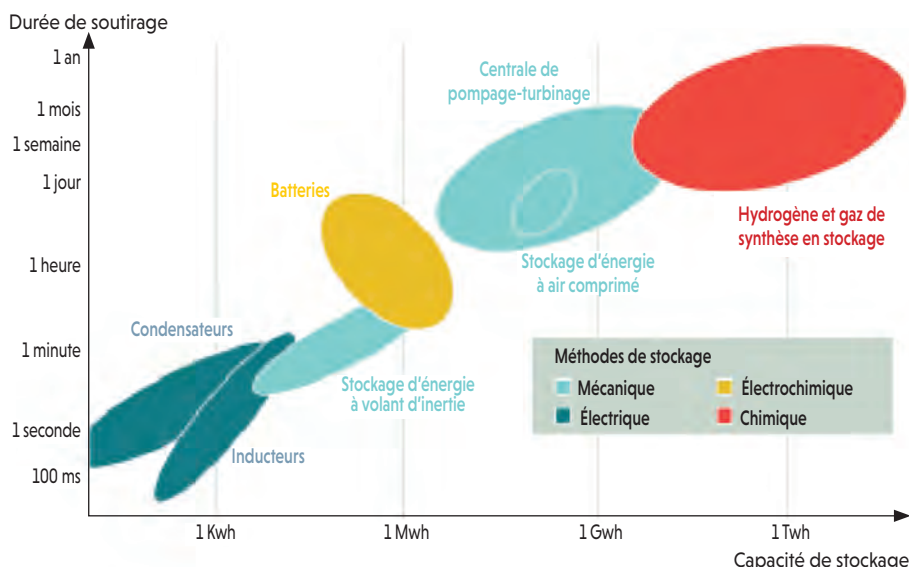
Dans ce mouvement irrésistible, les réseaux gaz et électricité ne peuvent plus être considérés isolément. Ils doivent au contraire être vus comme deux éléments indissociables d'un ensemble plus vaste – le système énergétique –, où le stockage de gaz, en tant que principal outil de flexibilité intersectoriel, relie intimement les deux secteurs. Ces liens se sont particulièrement renforcés ces dernières années.

En effet, l'intégration des énergies renouvelables accroît le besoin de flexibilité en électricité pour répondre à leur intermittence, alors même que l'équilibre du réseau se retrouve fragilisé par l'abandon progressif des autres sources ajustables à la demande (nucléaire, charbon, pétrole...). Par ailleurs, l'électrification d'une partie de la demande finale en énergie amène le réseau électrique à devoir répondre à une demande fluctuante, avec des fortes variations incluant des pics. Ce besoin d'adaptabilité, qui épargnait jusqu'alors le réseau électrique, car la demande était plutôt stable, implique de disposer de suffisamment de capacité de stockage pour soutenir la production électrique de plus en plus imprévisible et fluctuante.

La question de la flexibilité en électricité devient un enjeu clé pour la stabilité du système. Tous les types de stockage ont un rôle à jouer, mais la plupart sont limités en termes de niveau de capacité de stockage et de durée de soutirage (voir la figure ci-dessous). Ce n'est pas le cas du stockage de gaz, appelé à devenir le principal lien entre gaz et électricité.

Aujourd'hui, la flexibilité repose essentiellement sur le stockage de gaz naturel. Demain, elle devra se tourner vers les renouvelables. C'est notamment le sens du concept « Power to Gas ». L'idée est de transformer l'électricité issue d'énergies renouvelables en hydrogène pour fournir à terme la flexibilité nécessaire aux réseaux énergétiques. Plus précisément, grâce à l'électricité, de l'eau est scindée par électrolyse pour produire de l'hydrogène (H_2) qui sera utilisé soit directement, soit, dans une deuxième étape, pour produire du méthane (CH_4) par combinaison avec du CO_2 par un procédé catalytique.

COMPARAISON DES TECHNOLOGIES DE STOCKAGE D'ÉNERGIE



Les diverses techniques de stockage de l'électricité se distinguent en termes de capacité de stockage ou de durée de soutirage. Le stockage sous la forme de gaz représente la meilleure solution.

HYDROGÈNE EN SOUS-SOL

Le gaz renouvelable devient ainsi un complément à l'électricité renouvelable. ENGIE, à travers sa filiale Storengy, investit dans les technologies qui permettront d'adapter ses actifs de stockage à cette transition vers le zéro carbone. On pourra dès lors stocker massivement tout excès d'électricité renouvelable, actuellement perdu et délesté pour éviter de contraindre davantage les équipements et perturber l'équilibre du réseau.

Ces principes sont au cœur du projet *STOPIL H₂*. Il s'agit de la réalisation d'un pilote de stockage d'hydrogène en cavité saline à Étrez, dans l'Ain, à 20 kilomètres au nord de Bourg-en-Bresse. Le sous-sol aux alentours de la commune recèle 25 cavités

en exploitation creusées dans une couche de sel de 650 mètres d'épaisseur entre 1 250 et 1 900 mètres de profondeur. Les grandes quantités de gaz ainsi confinées, facilement disponibles, permettront de répondre à des besoins de consommation de base ou de pointe.

Cette technologie, mature et performante, bénéficie d'un retour d'expérience de plus de cinquante ans avec le gaz naturel. Elle offre des avantages intrinsèques environnementaux et en termes de sécurité (faible espace occupé en surface, confinement du produit, inaccessibilité du fait de la profondeur, absence d'oxygène à proximité...).

Le projet *STOPIL H₂*, financé par l'Agence nationale de la recherche (ANR), fédère des acteurs français reconnus (Storengy, Geostock, Air Liquide, BRGM, Ineris, Brouard Consulting et Armines représentant l'École des mines de Paris et Polytechnique). Il vise à totalement maîtriser les défis techniques spécifiques du stockage d'hydrogène en cavité saline.

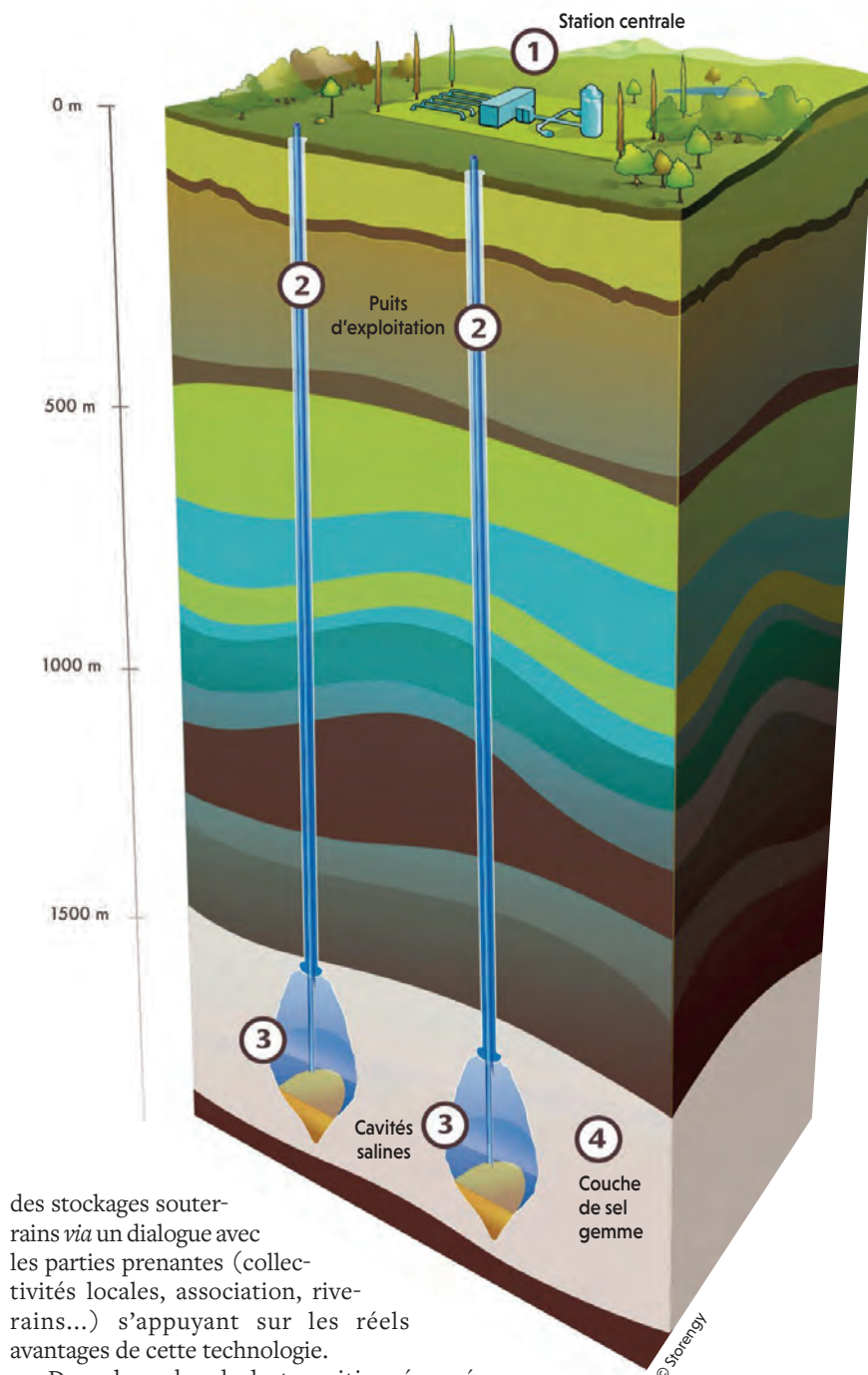
La première phase du projet, l'étude de faisabilité, consiste d'ici fin 2020 à répondre à deux questions. Une cavité de stockage dans le sel est-elle imperméable à l'hydrogène ? Des cycles fréquents d'injection et de soutirage d'hydrogène et de grande amplitude peuvent-ils porter atteinte à la stabilité mécanique d'une cavité ?

Concernant la première, l'étanchéité de la cavité et du puits est en effet une préoccupation essentielle du point de vue de la sécurité et de l'efficacité du stockage. Avec des hydrocarbures, dont il existe des milliers de cavités de stockage dans le monde, cette étanchéité est vérifiée. Dans le cadre de *STOPIL H₂*, un essai d'étanchéité à l'hydrogène sera effectué dans une cavité à environ 1 000 mètres de profondeur à Étrez (voir la figure ci-contre). L'objectif est d'obtenir des informations en vue d'industrialiser les tests d'étanchéité des futures cavités d'hydrogène.

EXPLOITATION DES CAVITÉS

Quant à la deuxième question, il est prévu un essai lors duquel l'hydrogène au sein de la cavité sera porté à une pression maximale (de l'ordre de 150 bars), celle-ci variant ensuite rapidement avant de revenir à sa valeur initiale. On saura alors si l'exploitation d'une cavité peut se faire sans désordre significatif de performance avec des cycles de pression courts et intenses, à l'instar de ce qui est aujourd'hui maîtrisé pour le stockage de gaz naturel. Une fois le concept validé, la cavité pourrait au final stocker jusqu'à 40 tonnes d'hydrogène, soit de l'ordre de 1,5 gigawattheure, destinées à court terme à une consommation locale.

Le principe acquis et étayé par de solides études scientifiques, les acteurs devront veiller à l'acceptabilité sociétale du développement



des stockages souterrains *via* un dialogue avec les parties prenantes (collectivités locales, association, riverains...) s'appuyant sur les réels avantages de cette technologie.

Dans le cadre de la transition énergétique, le stockage souterrain de gaz, autres que le gaz naturel, sera alors primordial et essentiel au développement des nouvelles sources et consommations électriques. La performance des stockages devra répondre aux caractéristiques de l'intermittence des sources de production électrique. Pour réussir un mix électrique 100% renouvelable demain, il est nécessaire d'investir dès à présent dans l'innovation technologique pour réduire les coûts d'investissement et rendre le cadre réglementaire plus propice à l'intégration des gaz renouvelables et à leur stockage. Alors seulement on pourra répondre positivement aux échéances fixées par l'Union européenne. ■

La cavité expérimentale de Storengy, à Étrez, dans l'Ain, aidera à étudier le stockage d'hydrogène en cavité saline.

Une mobilité électrique rêvée

L'AUTEUR

LAURENT DE VROEY,
ENGIE RESEARCH

L'essor de la mobilité électrique des véhicules légers passe par le déploiement d'une infrastructure performante et de flux énergétiques maîtrisés. Les solutions existent.



2020 Lundi matin. Au sortir d'une nuit trop courte, le point info trafic est sans appel : ma journée commencera dans les bouchons, et je dois en plus faire le plein ! Sur le réseau routier saturé, je suis entouré de véhicules, anonymes, avec un unique occupant. L'horloge et les moteurs tournent, mais les roues... En ville, nouveau défi : trouver une place. Enfin, le bruit des moteurs et les gaz d'échappement accompagnent les derniers mètres à pied. Vivement le bureau !

2035. Lundi matin. Après une nuit toujours trop courte, mais plus longue d'une heure. Mon appli préférée m'indique la meilleure option de mobilité du jour : voiture électrique partagée jusqu'à la gare, train puis deux-roues électrique en libre accès. En ville, l'effervescence est la même, mais quel bonheur pour les oreilles et le nez depuis la fin des moteurs thermiques en agglomération ! La multimodalité et la mobilité électrique ont vraiment changé la donne. Comment a-t-on pu attendre si longtemps ?

Pour gérer un parc de voitures électriques, une gestion intelligente des recharges s'impose.

Besoin pratique ou vecteur de liberté, la mobilité et le transport sont des piliers de nos sociétés. L'indispensable réduction significative des émissions de CO₂ dans le secteur des transports incite un nombre croissant d'acteurs publics et privés à favoriser la mobilité électrique. Toutefois, l'essor de cette dernière impose que de nombreuses questions pratiques pour l'utilisateur et pour la société soient résolues. Elles se posent notamment en termes de recharge des véhicules électriques, tant au niveau des infrastructures requises que des flux énergétiques mis en jeu.

UNE INFRASTRUCTURE OPTIMISÉE

Plusieurs options s'offrent aux concepteurs pour déployer une infrastructure de recharge à même de satisfaire les besoins. D'abord, un premier paramètre est celui de la rapidité de recharge. Une simple prise murale ajoute à une voiture 10 à 15 kilomètres d'autonomie par heure de recharge. Une borne de recharge normale délivre dans le même temps jusqu'à

100 kilomètres d'autonomie. Une borne de recharge rapide (plus volumineuse et plus complexe) fait de même en seulement 15 minutes. Cependant, la rapidité de la recharge pose des questions de puissance, nous y reviendrons. Autre critère, la technologie de recharge : elle peut être conductive ou inductive selon que le véhicule est alimenté par un câble électrique ou sans fil (dans le premier cas, le rendement est meilleur, mais la seconde option est plus pratique). Diverses architectures de recharge sont également disponibles selon les utilisations : sur borne, par pantographe, ce bras articulé qui se déploie par exemple au-dessus des bus électriques... En fonction des choix, la recharge a lieu lorsque le véhicule est à l'arrêt ou même en mouvement.

MATURITÉ ET VIEILLISSEMENT

Pour s'y retrouver dans ce champ des possibles, ENGIE étudie ces différentes solutions et s'intéresse en particulier à leur maturité, leur impact sur le vieillissement des véhicules, leur interopérabilité et leur potentiel de déploiement à moyen et long termes. Pour ce faire, les chercheurs procèdent à des évaluations régulières et approfondies des solutions et technologies de recharge, que ce soit lors de tests en laboratoire ou en environnement ouvert, ou bien dans le cadre d'analyses approfondies de solutions déployées aux quatre coins du monde.

Ont ainsi été testés, par exemple, l'impact sur le vieillissement des batteries de la recharge rapide par rapport à la recharge normale et la possibilité pour la voiture de renvoyer de l'énergie au bâtiment ou au réseau. La facilité d'installation et d'usage de différentes solutions de recharge a aussi été évaluée en conditions réelles.

PLUS VITE, MOINS CHER ET SANS SOUCI

En limitant les investissements, en réduisant les puissances et le nombre de chargeurs nécessaires, la recharge dite « intelligente » offre de nombreux avantages aux utilisateurs ainsi qu'aux gestionnaires de sites de recharge et de réseau électrique. Elle consiste à adapter la recharge des véhicules aux autres consommations du site et à maximiser l'utilisation de l'énergie produite localement, par exemple par des panneaux solaires. Un nombre croissant de solutions commerciales proposent une partie de ces fonctionnalités. Elles se retrouvent toutes dans SMATCH, la solution de recharge de véhicules électriques d'ENGIE. En outre, SMATCH prend en compte les besoins spécifiques de chaque utilisateur, anticipe les productions locales, les consommations et les besoins des véhicules. Elle tient également compte des contraintes du réseau, des tarifs du marché de l'énergie et de la production de CO₂ par le mix énergétique, variable dans le temps.



L'autre ressort du déploiement de la mobilité électrique concerne la quantité d'électricité nécessaire pour alimenter l'ensemble des véhicules et sa disponibilité. Cette question est directement liée au nombre et à la taille des batteries mises en fonction. En Europe, une mobilité et un transport entièrement électrifiés entraîneraient une augmentation de 15 à 20 % des besoins en énergie électrique. Cet accroissement est certes significatif, mais il restera gérable s'il est étalé dans le temps.

UN BESOIN DE PUISSANCE

Autre facteur essentiel, la rapidité de la recharge pose, nous l'avons vu, des problèmes de puissance. Le rechargement d'une seule voiture électrique dans un temps équivalent à celui d'un traditionnel plein de carburant nécessiterait la puissance délivrée par une éolienne tournant à plein régime. C'est inimaginable en pratique. Qui plus est, le réseau électrique n'est pas partout suffisamment dimensionné pour permettre les appels de puissance simultanés d'un grand nombre de véhicules électriques. Dans ce cas, une gestion intelligente des recharges est essentielle.

De plus, la façon dont les véhicules sont rechargés peut occasionner des anomalies sur le réseau électrique (chutes de tension, surcharge de transformateurs, variation de fréquence, etc.). Au-delà de certaines limites, ces perturbations requièrent des interventions coûteuses. Pour y faire face, ENGIE évalue, avec différents gestionnaires de réseau électrique, les impacts qualitatifs et quantitatifs de ces perturbations, par des mesures détaillées de cycles de charge, pour différents types de chargeurs et véhicules électriques.

Répondre à ces problématiques est d'autant plus important que la mobilité électrique, appelée à se développer, est aujourd'hui bien accueillie. Des études montrent que 95 % des utilisateurs de voitures électriques ne voudraient pas revenir à une motorisation thermique.

De nouvelles opportunités s'ouvrent alors. Selon les besoins, on peut imaginer les véhicules fournir de l'énergie aux bâtiments ou au réseau. Ces nouvelles perspectives d'usage des batteries aideraient à maximiser la consommation locale des productions renouvelables intermittentes. Le même concept peut s'étendre à des communautés locales d'énergie, où la production électrique d'un foyer participerait à la recharge du véhicule d'un voisin, et où le véhicule d'un autre alimenterait la maison d'un quatrième. Le développement de telles communautés impose de réels changements de paradigmes, dont la mobilité électrique n'est qu'une première étape. En vous impliquant dans de tels projets, le rêve de 2035 deviendra réalité, et vous dormirez plus longtemps ! ■

Vers des croisières plus propres

Afin de répondre aux nouvelles exigences environnementales qui lui sont imposées, l'industrie maritime peut compter, à court et moyen termes, sur de nouveaux carburants.



L'AIDAnova est le premier paquebot de croisière fonctionnant au gaz naturel liquéfié (GNL).

En 2018, l'AIDAnova fut mis en service par la compagnie Aida Cruises. Ce navire, construit par les chantiers Meyer Werft, était inédit : il s'agissait du premier paquebot de croisière fonctionnant au gaz naturel liquéfié (GNL). Cet exemple illustre l'engagement de l'industrie maritime vers une diminution de son empreinte écologique. Le chemin sera long, mais la tendance est irrémédiable...

Historiquement, le transport maritime utilise des fiouls lourds pour sa propulsion. Issus des fractions lourdes de la distillation du pétrole brut, ces carburants renferment les résidus les plus polluants, et notamment des composés soufrés. Leur combustion libère du CO₂, des oxydes de soufre (SO_x) ainsi que des oxydes d'azote (NO_x) et des particules fines. Le transport maritime serait responsable d'un peu moins de 3 % des émissions globales de CO₂ en 2018, soit l'équivalent des émissions de l'Allemagne.

L'Organisation maritime internationale a décidé de réagir et a fixé des objectifs ambitieux de réduction des émissions de gaz à effet de serre (50 % d'ici à 2050 par rapport à 2008) et impose depuis 2015 une diminution progressive du taux maximal de soufre autorisé (de 3,5 % en 2015 à 0,5 % en 2020) dans les soutes de quelque 50 000 navires en circulation et dans toutes les mers du globe. Dans les zones à émissions contrôlées (dites SECA pour *Sulfur emissions controlled area*) qui comprennent les côtes nord-américaines et les mers d'Europe du Nord, la limite est encore plus restrictive avec un taux maximal de soufre de 0,1 %, appliqué dès 2015.

Pour répondre à ce défi, différentes solutions s'offrent aux armateurs. La première consiste à remplacer les fiouls lourds par du

LES AUTEURS
FRÉDÉRIC LEGRAND ET
GABRIELLE MENARD,
ENGIE LAB CRIGEN

gasoil marin ou des fiouls bas soufre, moyennant des modifications mineures des moteurs. Toutefois, les surcoûts opérationnels (les carburants de substitution sont sensiblement plus chers) de cette option sont importants et la question clé sur ce nouveau produit reste sa disponibilité et son prix qui va croître sous l'effet d'une demande plus importante. Dans un premier temps, ce sera par défaut la solution la plus massivement adoptée, car elle ne requiert pas d'investissement important.

LE CHOIX DES SOLUTIONS

Une autre piste est de rendre plus propre l'utilisation des fiouls lourds en mettant en place de nouveaux systèmes de récupération et de nettoyage des fumées. Cependant, cette solution n'est pas forcément adaptée à tous les navires et surtout, elle ne traite qu'une partie du problème en éliminant le soufre sans enlever les NO_x et les autres polluants. Cette solution offre le meilleur retour sur investissement, mais elle n'est pas sans risque sur la durée, car elle soulève la question du traitement des déchets soufrés. En outre, son bilan carbone est mitigé. En effet, le fonctionnement des dispositifs installés (des absorbeurs-neutralisateurs) augmente la consommation du navire et donc ses émissions de gaz à effet de serre. Au 1^{er} mai 2019, moins de 2 400 navires étaient concernés.

Dernière option, le changement complet de carburant. Il implique le plus souvent d'investir dans un nouveau navire, pour les armateurs ayant une stratégie à long terme. Les fiouls lourds sont alors remplacés par du GNL, voire, nous y reviendrons, par du bio-GNL ou de l'hydrogène. Aujourd'hui, le GNL est le plus largement utilisé, l'AIDAnova en témoigne. En effet le GNL répond à l'ensemble des exigences