

**CAHIER SPÉCIAL**

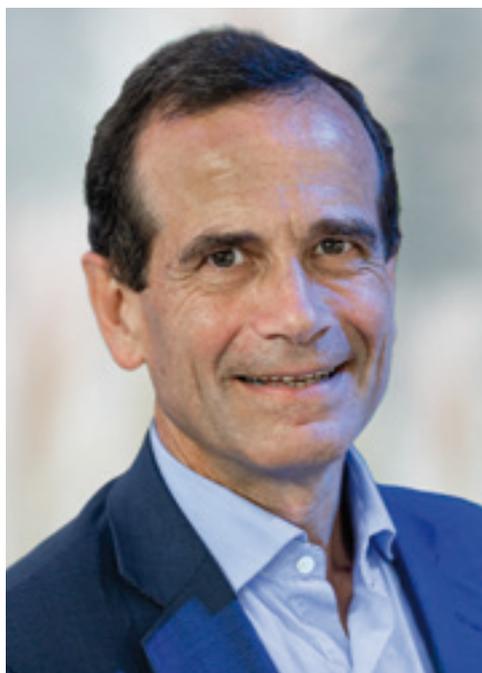
réalisé en partenariat avec



## GAZ OU ÉLECTRICITÉ ?

**Quelles solutions  
pour un avenir énergétique  
zéro carbone ?**

# Résilience et DIVERSITÉ ÉNERGÉTIQUE



© ENGIE / Vincent Breton

**DIDIER HOLLEAUX,**  
Directeur Général  
Adjoint d'ENGIE

**P**endant 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. ■

**Groupe POUR LA SCIENCE****Directrice des rédactions:** Cécile Lestienne**Rédacteur en chef:** Maurice Mashaal**Édition de ce cahier réalisé en partenariat avec ENGIE:** Loïc Mangin**Direction artistique et réalisation:**

Ghislaine Salmon-Legagneur

**Correction:** Maud Bruguère**Marketing & diffusion:**

Charline Buché &amp; Elena Delanne

**Direction du personnel:** Olivia Le Prévost**Fabrication:** Marianne Sigogne et Zoe Farre Vilalta**Directeur de la publication et Gérant :**

Frédéric Mériot

**Presse et communication:** Susan Mackie

susan.mackie@pourlascience.fr Tél: 01 55 42 85 05

Imprimé en France -

Dépôt légal: Février 2019

Commission Paritaire n°0917K82079

© Pour la Science S.A.R.L.

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays.

La marque et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific American, Inc.

Licence accordée à

« Pour la Science S.A.R.L. ».

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20 rue des Grands-Augustins - 75006 Paris).

Photos de couverture:

AdobeStock

# De la complémentarité indispensable des solutions technologiques

**D**epuis 200 ans, l'humanité a prospéré grâce à la disponibilité d'énergies facilement stockables et transportables. La crise climatique nous impose la décarbonation de nos économies et de nos sociétés en moins de deux générations. Tous les scénarios de la transition comprennent la baisse des volumes d'énergie et sa décarbonation. Il nous faut donc à la fois consommer moins d'énergie et une énergie plus verte, qui présente autant que possible les mêmes qualités de disponibilité que les énergies fossiles. Ce cahier spécial de *Pour la Science* explore la diversité indispensable des solutions technologiques pour parvenir à résoudre ce triple défi : moins d'énergie, plus verte et facilement disponible. Les solutions se situent tout au long de la chaîne de valeur. Au niveau de la production, avec le biogaz, dans l'intégration des parcs solaires aux exploitations agricoles, dans le stockage avec les batteries et l'hydrogène ou au point de consommation avec des systèmes de chaud et de froid efficaces et optimisés. Nous vous invitons à les découvrir.

## SOMMAIRE

- 4 LA RECHERCHE, UN ACCÉLÉRATEUR NÉCESSAIRE VERS LA NEUTRALITÉ CARBONE**  
*Michael E. Webber*
- 6 LES MOLÉCULES DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE**  
*Ronnie Belmans et Jan Mertens*
- 10 POUR UNE DÉCARBONATION OPTIMALE**  
*Hugues de Peuffeilhoux, Gauthier de Maere d'Aertrycke et Pierre-Laurent Lucille*
- 12 LA RÉVOLUTION ATTENDUE DES BATTERIES**  
*Rafael Jahn, Dominique Corbisier et Paulo Torres*
- 14 UN MARIAGE DE RAISON**  
*Carole Le Henaff, Grégoire Hévin, Christian Huët et Delphine Patriarche*
- 16 UNE MOBILITÉ ÉLECTRIQUE RÊVÉE**  
*Laurent De Vroey*
- 18 VERS DES CROISIÈRES PLUS PROPRES**  
*Frédéric Legrand et Gabrielle Menard*

- 20 POUR UNE INDUSTRIE ZÉRO CARBONE**  
*Ludovic Ferrand, Philippe Buchet et Jean-Pierre Keustermans*
- 22 L'AVENIR DES POMPES À CHALEUR**  
*Akim Rida et Jean-Yves Druillennec*
- 24 CHAUFFER SANS RÉCHAUFFER... LE CLIMAT !**  
*Benjamin Haas et Mures Zarea*
- 26 UN MONDE DÉCARBONÉ... ET CLIMATISÉ**  
*Rodolphe Desbois et Cristian Muresan*
- 28 VERS UNE AGRICULTURE NEUTRE EN ÉMISSIONS**  
*Elodie Le Cadre Loret et Bérengère Genouville*
- 30 POUSSER À L'OMBRE DU SOLAIRE**  
*Jöran Beekkerk Van Ruth, Stijn Scheerlink, Rob Kursten et Claire Du Colombier*
- 32 TRANSITION ÉNERGÉTIQUE, L'INDISPENSABLE COMPLÉMENTARITÉ**  
*Adeline Duterque, Luc Goossens et Jan Mertens*



# La recherche, un accélérateur nécessaire vers la neutralité carbone

**S**elon 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 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 CO<sub>2</sub> 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

## “ Nous sommes confrontés aux mêmes problématiques. Peut-être pourrions-nous agir collectivement ? ”

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.

**P**endant 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

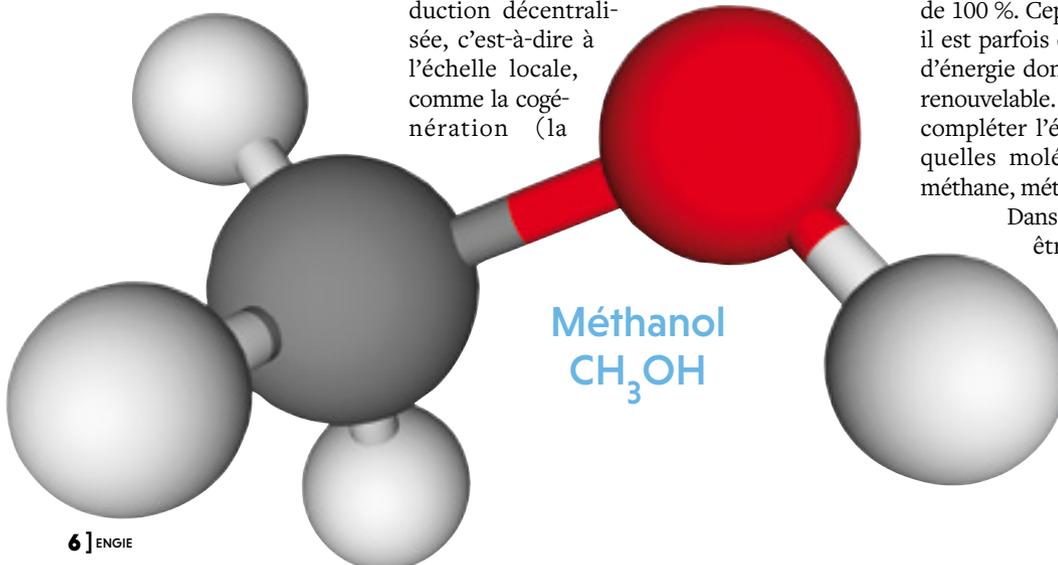
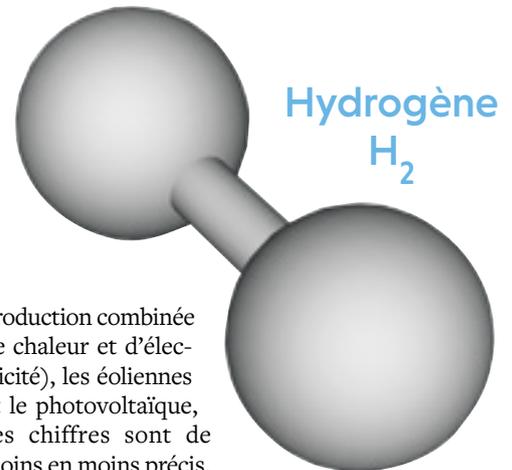
D'abord, il convient de bien distinguer le système énergétique dans son ensemble de la seule production électrique, qui n'en représente qu'une petite part. En Belgique, par exemple, en 2016, 81,4 térawattheures d'électricité ont été fournis (pour une production de 85,4). Notons qu'avec l'augmentation 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 exergetique 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 CO<sub>2</sub>, voire sa



réutilisation. Autrement, seules deux sources de molécules sont neutres en carbone : celles produites à partir d'eau et de  $\text{CO}_2$  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 ( $\text{CH}_4$ ) ou de méthanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) à partir de  $\text{CO}_2$  et de  $\text{H}_2\text{O}$  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  $\text{C}_2\text{H}_6$  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.

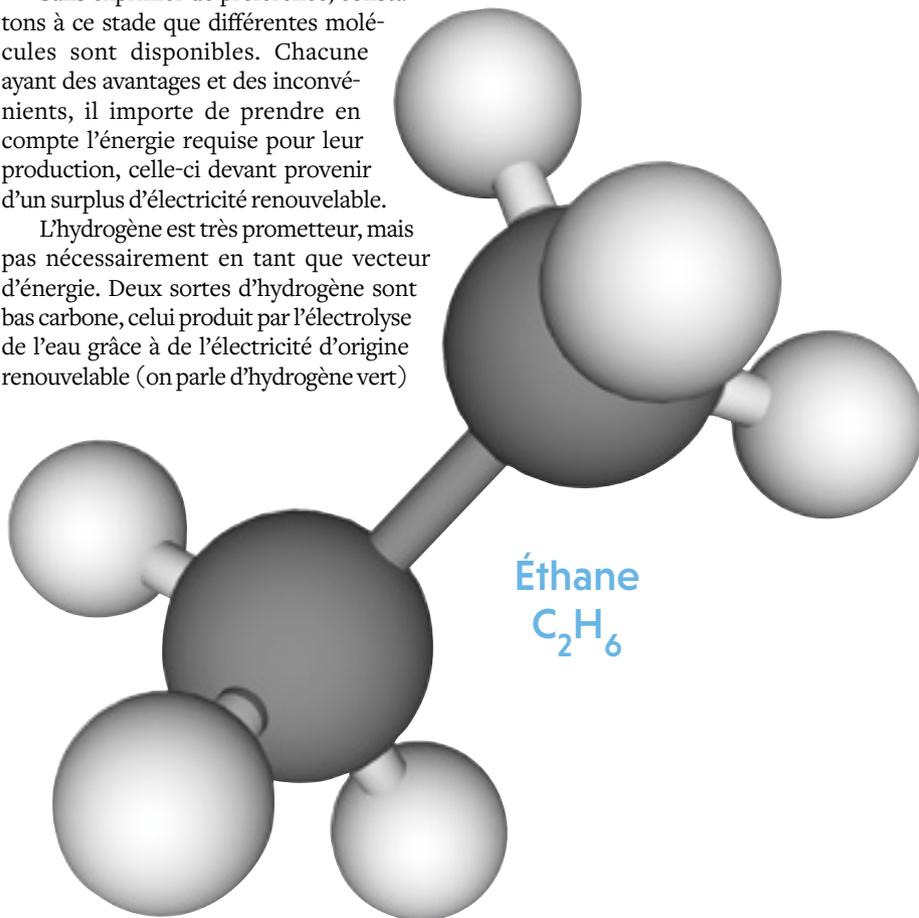
Le futur du transport de marchandises sur route est encore flou. Certes, des camions électriques équipés de batteries roulent déjà. Et Siemens expérimente de son côté une autre approche : équiper une voie d'autoroute de caténaires pour que les camions hybrides puissent rouler grâce à l'énergie électrique 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<sub>2</sub> 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.

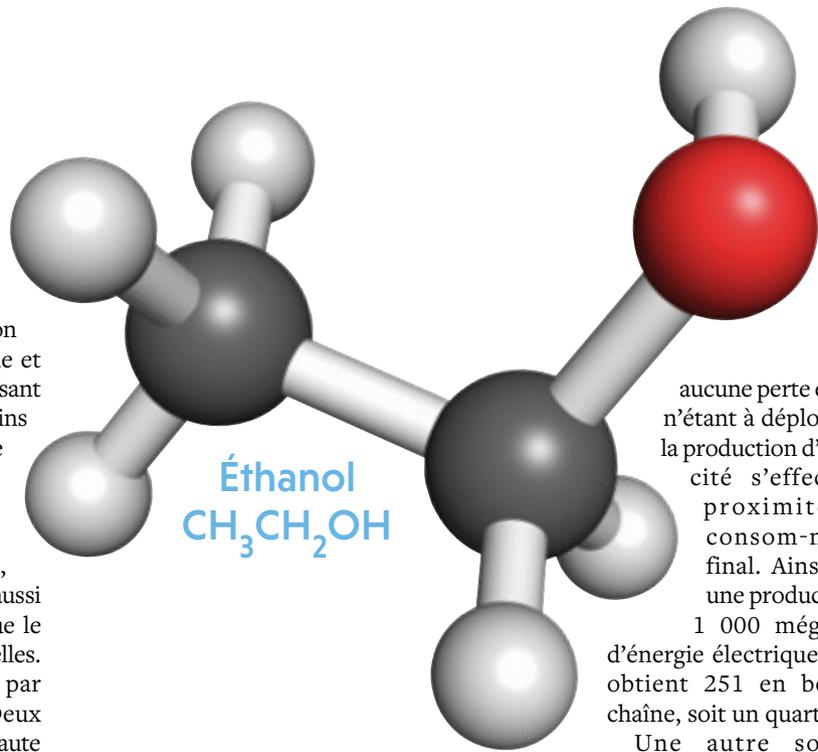
## L'AVANTAGE DU MÉTHANE

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<sub>2</sub>O) en H<sub>2</sub> 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 °C), sa liquéfaction est très énergivore. Différentes valeurs de rendement existent dans la littérature, mais prenons là encore 70 % pour cette deuxième étape.

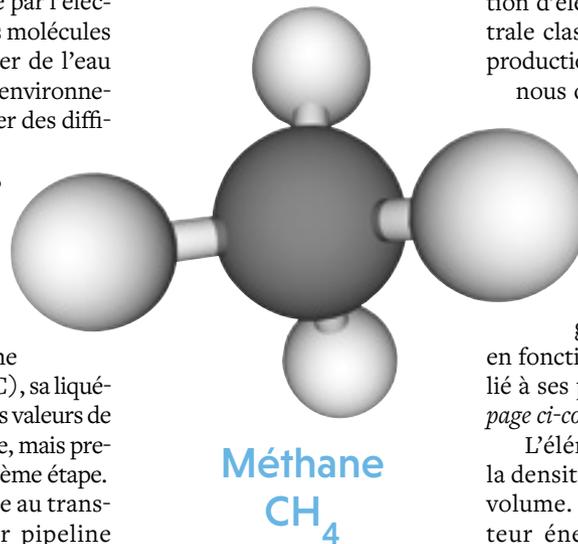
La consommation d'énergie liée au transport, y compris celui du gaz par pipeline jusqu'au site de liquéfaction situé sur la côte, est estimée à 10 % : le rendement de cette troisième étape est donc de 90 %. L'évaporation nécessite 5 % d'énergie supplémentaire. Le bilan global à ce stade est d'environ 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<sub>2</sub> 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 <sup>3</sup>
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 <sub>2</sub> et de l'eau H <sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> se posera.

L'option consistant à capturer et stocker le CO<sub>2</sub> 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

**E**n 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 CO<sub>2</sub>. Plus précisément, l'idée est de tester la faisabilité de la décarbonation en Europe de l'Ouest des secteurs électrique, chaleur et transport d'ici à 2050 et d'identifier un chemin économiquement optimal qui s'appuie sur les atouts de chacun des vecteurs énergétiques.

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



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

Pour des raisons d'acceptabilité et de disponibilité en sites, le développement de la séquestration du CO<sub>2</sub> 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.

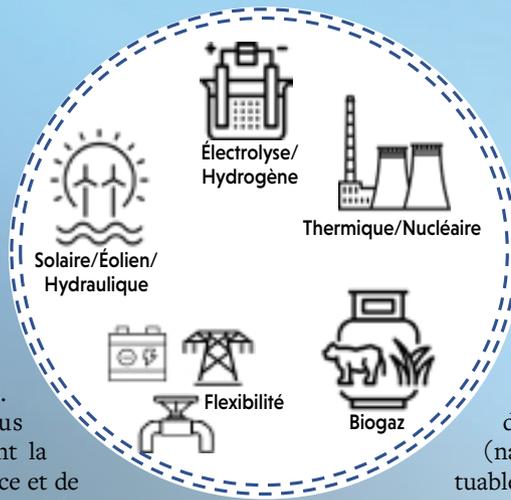
Par rapport à la plupart des études disponibles qui simulent des chiffres annuels, voire uniquement l'image finale en 2050, ou bien ne se focalisent que sur un sous-secteur, l'optimisation combinée de tous les usages énergétiques, à un

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.

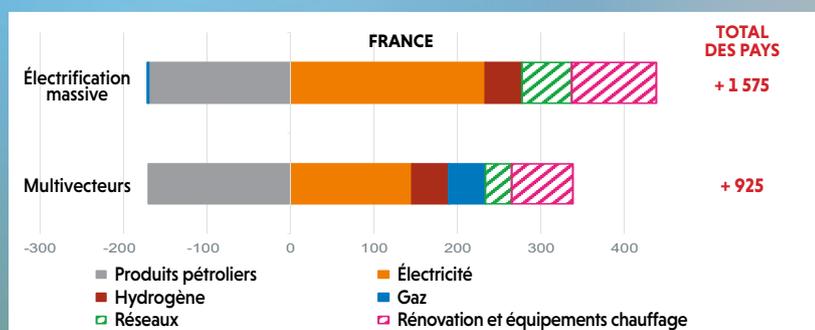
Dans le second scénario, l'Europe promeut le développement de l'électricité verte et celui des gaz verts (biométhane, hydrogène vert...). Le continent peut cette fois importer du gaz vert de certains partenaires commerciaux. Les importations concerneraient en majeure partie du méthane de synthèse élaboré 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.

**A**ncrée 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 !



Le vainqueur du World Solar Challenge.

© agoriasolarteam

**G**agner 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/](http://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

**D**epuis 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.

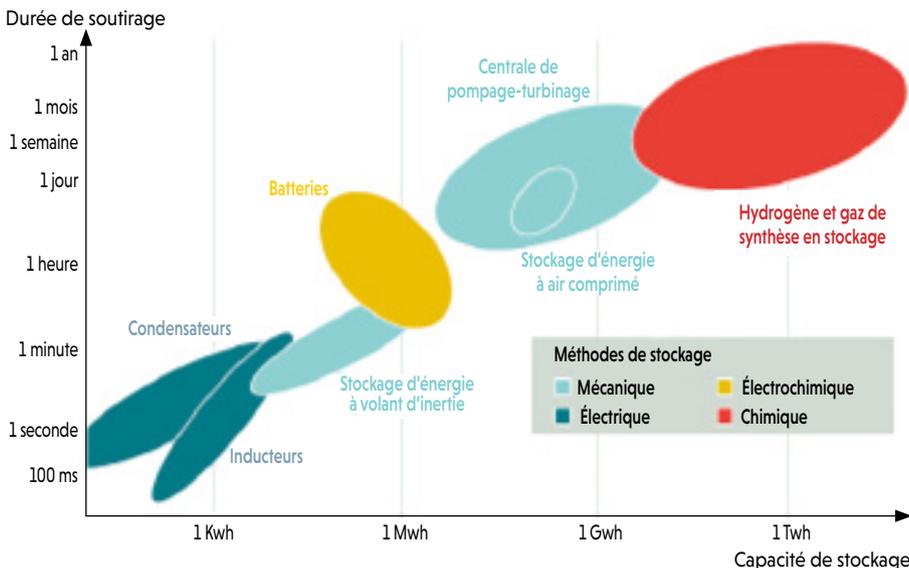
Dans ce mouvement irrésistible, les réseaux gaz et électricité ne peuvent plus être considérés isolément. Ils doivent au contraire être vus comme deux éléments indissociables d'un ensemble plus vaste – le système énergétique –, où le stockage de gaz, en tant que principal outil de flexibilité intersectoriel, 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 H<sub>2</sub>*. 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 H<sub>2</sub>*, 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.

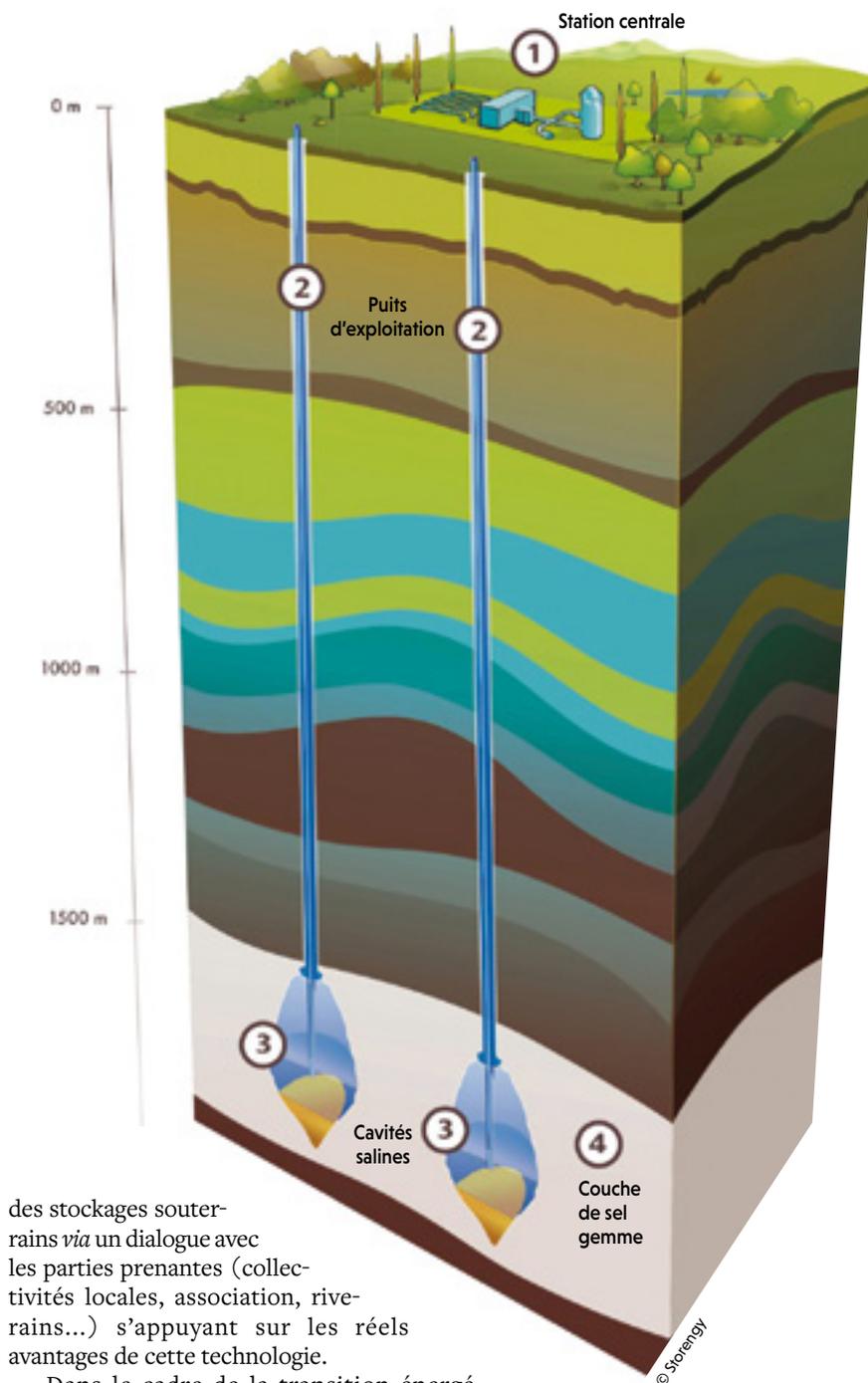
La première phase du projet, l'étude de faisabilité, consiste d'ici fin 2020 à répondre à deux questions. Une cavité de stockage dans le sel est-elle imperméable à l'hydrogène ? Des cycles fréquents d'injection et de soutirage d'hydrogène et de grande amplitude peuvent-ils porter atteinte à la stabilité 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 H<sub>2</sub>*, 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 CO<sub>2</sub> 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

**E**n 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 CO<sub>2</sub> 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).

**E**n 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 CO<sub>2</sub>, des oxydes de soufre (SO<sub>x</sub>) ainsi que des oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) et des particules fines. Le transport maritime serait responsable d'un peu moins de 3 % des émissions globales de CO<sub>2</sub> 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<sub>x</sub> 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<sup>er</sup> 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

environnementales puisqu'il supprime les émissions de soufre et de particules fines, réduit de 80 % celles de NO<sub>x</sub> et de 20 % celles de CO<sub>2</sub>. Il est par ailleurs disponible en grandes quantités et les motorisations GNL pour des navires de différents tonnages sont disponibles. Son développement reste néanmoins limité, car la chaîne logistique de distribution du produit n'est pas encore adaptée à cet usage. Le retour sur investissement est aussi plus long.

Avec moins de 400 navires fonctionnant au GNL en service ou en commande, le marché est encore une niche, mais certaines études annoncent un potentiel de 35 millions de tonnes par an pour le GNL à l'horizon 2035, soit approximativement 10 % de part de marché. En 2017, ENGIE a lancé conjointement avec Mitsubishi, NYK line et Fluxys, l'armement du navire avitailleur *Engie Zeebrugge* (voir ci-dessous). Avec une capacité en GNL de 5 000 mètres cubes, il peut alimenter en carburant tout type de navire opérant en Europe du Nord à partir du port de Zeebruges, ce qu'il fera à partir de 2020, sous la marque Gas4Sea.

## MIEUX QUE LE GNL

Pour répondre à ce nouveau marché, ENGIE a lancé des programmes de recherche ambitieux sur la production et l'utilisation des gaz verts pour le transport maritime. L'un d'eux répond au comportement thermodynamique complètement différent du GNL par rapport aux autres carburants. Le GNL est un liquide cryogénique dont la composition chimique évolue à mesure qu'il s'évapore en gaz naturel, celui qui est brûlé par les moteurs. Ces changements au cours du voyage se traduisent par l'évolution de paramètres primordiaux pour le fonctionnement des moteurs, dont l'indice de méthane (cet indice, lié à la composition du gaz, rend compte de la qualité de sa combustion). On pourrait installer un chromatographe pour suivre en continu la composition du GNL, mais l'appareil est cher. On peut désormais faire autrement : ENGIE Lab CRIGEN a développé Smart Gauge, un algorithme calculant la composition du GNL dans les soutes du navire tout le long du trajet à partir de la pression et de la température mesurées en temps réel et de la composition initiale.

Malgré son faible impact environnemental, le GNL ne permet pas d'éliminer complètement les émissions de CO<sub>2</sub> et de NO<sub>x</sub>. Deux nouveaux carburants pourraient y remédier. Le premier est le bio-GNL (ou biométhane liquide). Il permet de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> de 90 % par rapport aux fiouls lourds et ne nécessite aucun investissement supplémentaire pour un navire fonctionnant au GNL. Le développement du bio-GNL reste toutefois limité à cause de son coût de production. Fort de son expertise dans le GNL depuis plus de soixante ans, ENGIE Lab CRIGEN

a lancé un programme de recherche visant à réduire de 40 % le coût de liquéfaction du biogaz par des procédés innovants. En 2020, des tests seront réalisés sur le site du CRIGEN à Stains puis sur le terminal méthanier de Montoir-de-Bretagne pour valider le fonctionnement de la nouvelle technologie. L'objectif en 2021 est de pouvoir installer la solution chez un partenaire ENGIE. Le bio-GNL pourrait remplacer le GNL à l'horizon 2030.

À plus long terme, l'hydrogène liquide serait un carburant adapté à la mobilité maritime. De fait, à condition qu'il soit produit de façon renouvelable, son utilisation n'émet aucun gaz à effet de serre, ni NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> ou particules. Les solutions actuelles pour produire, stocker et transporter de l'hydrogène liquide restent limitées. ENGIE a lancé un programme de

# “ Le transport maritime a largement entamé sa transition vers le zéro carbone ”



L'Engie Zeebrugge peut alimenter en GNL tout type de navire fonctionnant avec ce carburant.

recherche pour diviser par deux les coûts de production et de transport de ce liquide en développant de nouveaux procédés de liquéfaction. Des projets sont également en cours en Amérique du Sud pour proposer à des industriels des solutions de transport maritime à base d'hydrogène.

Contredisant sa réputation de secteur plutôt conservateur, le transport maritime a largement entamé sa transition vers le zéro carbone. Plusieurs solutions sont disponibles, et ENGIE accompagne les acteurs de cette filière pour réduire l'empreinte environnementale. Un jour, la croisière s'amusera avec bonne conscience. ■

# Pour une industrie zéro carbone

Les industries gourmandes en énergie (les IEI) ont très tôt cherché à améliorer l'efficacité énergétique de leurs procédés. Les efforts se poursuivent, mais des ruptures technologiques sont nécessaires.

**A**utour de vous, pour peu que vous soyez citadin, quelques matériaux dominent le paysage : acier, ciment, verre... Ces produits omniprésents sont élaborés par les industries dites « énergie-intensives » (IEI) dont les émissions de gaz à effet de serre sont majeures, car fondées sur de nombreuses opérations très énergivores. Les puissances installées peuvent dépasser 200 mégawatts sur une seule installation, ce qui équivaut à une centaine de terrains de football équipés en panneaux photovoltaïques ! Au total, les secteurs acier-ciment-chimie représentent à eux seuls 5,4 gigatonnes de CO<sub>2</sub>, soit plus de 15 % des émissions globales anthropiques. Dans ce contexte, comment parvenir à la neutralité carbone en 2050 ?

## UNE COURSE DE VITESSE

Nous sommes à un point de bascule. Atteindre la neutralité carbone en 2050 implique à la fois de déployer des solutions allant bien plus loin que les meilleures techniques disponibles actuellement, et de s'engager dans une course de vitesse, l'horizon temporel étant proche au regard du temps nécessaire à de tels changements. À titre d'exemple, la durée d'exploitation d'un procédé cimentier ou sidérurgique dépasse souvent quarante ans. La recherche et le développement ont donc un rôle majeur à jouer, et ce dans plusieurs grandes thématiques.

L'une d'elles est l'efficacité des matériaux. Il s'agit de repenser le matériau pour lui conférer de meilleures performances. Le développement d'aciers plus légers par exemple réduit la consommation des véhicules.

Autre axe, l'intensification a pour but de tendre vers le « minimum d'énergie requis » (le MER) pour une transformation de la matière (chauffage, fusion, évaporation...). ENGIE accompagne les industriels dans cette démarche. On peut citer les travaux désormais à maturité industrielle dans le domaine des brûleurs à haute performance énergétique. Les rendements atteignent plus de 90 % grâce à un

### LES AUTEURS

LUDOVIC FERRAND,  
PHILIPPE BUCHET ET  
JEAN-PIERRE KEUSTERMANS,  
ENGIE

meilleur couplage entre le système de combustion et l'enceinte.

La piste de l'électrification est aussi intéressante. Les systèmes électriques des grands pays industriels sont en pleine mutation pour atteindre la neutralité carbone. Les infrastructures tendent à se complexifier avec la diversification et la décentralisation des sources.

Le premier avantage de l'électrification est la conversion directe en énergie verte (solaire, éolien, marine...). D'autre part, l'interaction avec

## DÉCARBONER LE CIMENT



Usine pilote  
LEILAC1.

© CALIX

**L'**industrie du ciment et du béton compte parmi les plus larges émetteurs de CO<sub>2</sub>, contribuant à près de 5 % des émissions mondiales. Poussé par la croissance démographique et l'urbanisation, la demande en ciment a explosé sur les dix dernières années et cette tendance ne semble pas près de s'inverser. Cependant, la mise en place d'une solution décarbonée pour cette industrie est complexe. En effet, si 30 à 40 % de ses émissions CO<sub>2</sub> proviennent de la combustion de fuel pour lequel des carburants alternatifs décarbonés peuvent être une solution, 60 à 70 % des émissions CO<sub>2</sub> proviennent du procédé de

calcination du CaCO<sub>3</sub>, et dans ce cas, une technologie de rupture sera nécessaire. On peut penser au développement de ciment et de matériaux alternatifs, ou bien à la capture du CO<sub>2</sub>. Dans ce dernier cas, le découplage de la combustion et de la réaction de calcination dans le four à chaux réduit considérablement les coûts énergétiques liés à cette capture. Une telle approche a été développée dans LEILAC, un projet collaboratif mené par Heidelberg Cement et Calix. La suite, LEILAC2, a déjà été annoncée et ENGIE est partenaire, de 2020 à 2025, pour la partie électrification de ce procédé novateur et celle de la valorisation du flux de CO<sub>2</sub>.

## DE LA VIGNE AU VERRE



À partir des sarments de vigne, on peut produire du biométhane exploitable par l'industrie verrière.

© Cabard

**S**i le verre peut être facilement recyclé après usage (50 % du verre d'emballage est constitué de verre recyclé), sa fabrication à très haute température requiert beaucoup d'énergie. Comment réduire cette

empreinte écologique notable ? Trois options sont envisageables. Augmenter l'électrification des procédés de production de verre et utiliser de l'électricité renouvelable. Convertir les

fours, notamment de fusion de verre, à des combustibles renouvelables. Repenser et intensifier énergétiquement les procédés de production. ENGIE et un consortium d'industriels, notamment le verrier Verallia et la société

Xilowatt, se sont engagés dans la deuxième voie avec le projet *BioVive*. L'objectif, en trois ans, jusqu'en 2015, était de parvenir à alimenter un four de fusion de verre creux par un gaz de synthèse renouvelable (CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>...) issu de la gazéification de la biomasse. Un pilote industriel a démontré la faisabilité de cette solution décarbonée. ENGIE poursuit par ailleurs ces travaux avec la mise en œuvre d'un procédé de production décentralisée de biométhane (le projet *Gaya*), vrai gaz naturel renouvelable, à partir de déchets ligneux issus de la taille de la vigne. D'autres solutions à base d'hydrogène vert produit de façon décentralisée sont à l'étude.

les IEI est évidente, tant ils seront des acteurs importants, de par leur capacité à jouer un rôle actif dans l'équilibrage des réseaux.

L'électrification peut être directe ou non. Dans le premier cas, on imagine en fonction des matériaux un chauffage par rayonnement effet Joule, par infrarouge, par induction... ENGIE est ainsi impliqué dans le projet de recherche européen *Destiny* pour les applications en céramique, ciment et acier, et dont l'objectif est de développer un nouveau concept de chauffage par microondes de matériaux granulaires.

### HYDROGÈNE, BIOMASSE...

L'électrification indirecte regroupe les solutions où l'électron est transformé en un vecteur intermédiaire, comme l'hydrogène dans le « Power to Hydrogen », pour l'usage final, tel un chauffage à haute température. ENGIE a participé à la validation du concept pour les procédés industriels dans le cadre du Plan d'action national sur l'hydrogène. D'autres initiatives, tel le projet européen *Hybrit*, visent à remplacer le coke par de l'hydrogène dans les aciéries.

Les combustibles issus de la biomasse ont aussi un rôle à jouer dans la transition énergétique, et de fait, certains hauts-fourneaux sidérurgiques fonctionnent déjà avec de l'eucalyptus transformé en un équivalent de coke. Ce principe, encore difficilement transposable

partout, est un champ de recherche actif. Le projet *BioVive* mené par ENGIE est à ce titre emblématique (voir l'encadré ci-dessus).

La symbiose industrielle peut aussi aider à atteindre la neutralité carbone. Elle consiste à convertir les flux sortants (matière ou énergie) d'un acteur en ressources pour un autre. L'idée rencontre des difficultés à se déployer largement, même si de grands succès existent. ENGIE, via son outil *Be-Circle*, contribue à identifier et optimiser le potentiel des circularités sur un territoire géographique donné en modélisant les flux des industries d'une zone industrielle.

Dernière thématique, les IEI se prêtent bien à la capture du CO<sub>2</sub>, car par exemple les sources sont souvent concentrées sur un émetteur principal. Les travaux de recherche et les pilotes de démonstration se multiplient. L'objectif est à la fois de déterminer les procédés de captation les plus efficaces, et d'identifier les voies de réutilisation du CO<sub>2</sub> pour éviter son rejet dans l'atmosphère.

Ce panorama, loin d'être exhaustif, montre la diversité des approches et l'ambition allant au-delà de l'efficacité énergétique pour se tourner résolument vers la neutralité carbone. L'effort global à fournir reste immense, mais de nombreuses pistes sont prometteuses, pour qu'un jour, nous portions un nouveau regard sur les matériaux qui nous entourent. ■

# L'avenir des pompes à chaleur

Pour fournir de la chaleur à basse et moyenne températures dans l'industrie, des pompes à chaleur innovantes aideront à tenir les objectifs imposés par la transition énergétique.

**LES AUTEURS**  
AKIM RIDA ET  
JEAN-YVES DRUILLENNEC,  
ENGIE

**E**n 2019, le gouvernement a promu le dispositif « Coup de Pouce Chauffage ». Il s'agissait d'aider financièrement les ménages à remplacer leur ancien équipement de chauffage par un matériel plus performant, et notamment des pompes à chaleur. Qu'en est-il des entreprises ?

Elles ont aussi pris la mesure des problématiques environnementales, et cherchent à réduire leur empreinte carbone. Cela passe entre autres par la décarbonation de la chaleur industrielle. L'enjeu est significatif, car à l'échelle mondiale, 32 % de l'énergie finale (celle consommée concrètement par les utilisateurs) est captée par l'industrie, les trois quarts répondant à des besoins de chaleur. Et la moitié de ces derniers correspond à des basses (moins de 100 °C) et moyennes températures (moins de 400 °C). Il y a donc là un levier important sur lequel jouer pour décarboner le monde industriel.

Deux des pistes essentielles sont l'amélioration de l'efficacité énergétique et la biomasse solide (bois, déchets verts, résidus agricoles...) avec notamment le verdissement des réseaux de gaz naturel. D'autres sont attentivement étudiées, liées notamment aux symbioses industrielles (les déchets ou les sous-produits d'un processus industriel deviennent les matières premières d'un autre) ou à des procédés innovants.

Au-delà, beaucoup de scénarios envisagent le déploiement de chaudières électriques ou hybrides et surtout, avec un meilleur rendement espéré, des pompes à chaleur (PAC) à l'instar de ce qui se passe chez les particuliers. Cependant, de tels dispositifs restent à développer pour des températures comprises entre 120 et 200 °C. Les travaux sont en cours !

## LES PAC AUJOURD'HUI

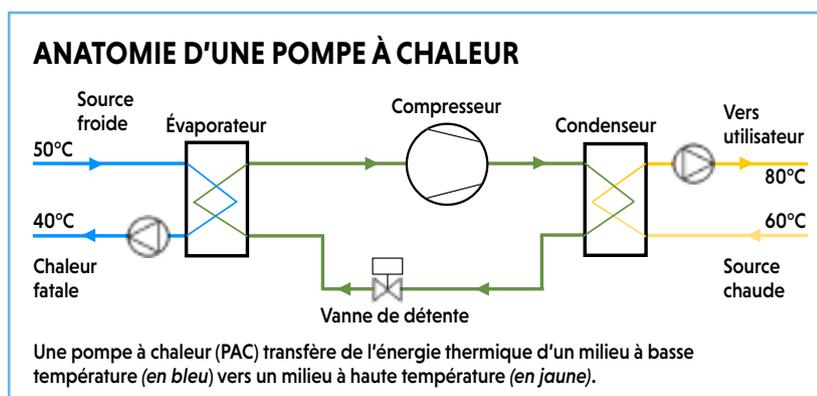
Rappelons que la pompe à chaleur est un dispositif qui permet d'effectuer un transfert de chaleur d'une source telle que l'air, le sol, l'eau souterraine ou, très souvent dans l'industrie, un rejet de chaleur qui aurait été autrement perdu (chaleur fatale), vers un utilisateur, par exemple pour alimenter un procédé industriel.

Ce dispositif fait subir un cycle de transformations à un fluide de travail ou réfrigérant : il absorbe de la chaleur dans un évaporateur, chauffe dans un compresseur et libère de la chaleur dans un condenseur. Le tout est complété par un appareil de détente.

Le coefficient de performance (COP) rend compte de l'efficacité du pompage. Il correspond au rapport de la chaleur fournie par la PAC sur l'énergie consommée, souvent l'électricité, par le compresseur.

Dans les PAC commercialement disponibles, les cycles contiennent en général soit un compresseur mécanique de vapeur soit un système à absorption. Dans ce dernier, une vapeur est dissoute dans une solution, celle-ci étant ensuite pompée à une pression plus élevée où un corps volatil est séparé par évaporation (désorption). L'énergie consommée par la pompe est beaucoup plus faible qu'avec un compresseur, mais il faut fournir une chaleur de bonne qualité au désorbeur. Des PAC dites « hybrides » combinent la compression de vapeur et l'absorption.

Dans la famille des PAC à compression mécanique ou hybride, plusieurs solutions technologiques émergent et sont désormais capables de fournir de la chaleur à plus de 110 °C. En particulier, la PAC Thermeco2 de Engie fonctionne avec une source de chaleur comprise entre 8 et 40 °C pour élever la température d'un fluide jusqu'à 110 °C. Elle utilise le CO<sub>2</sub> comme fluide de travail qui a l'avantage d'être non toxique, non inflammable, pas cher, sans impact sur la couche d'ozone et avec un potentiel de réchauffement climatique





© ENGIE

Début 2018, la pompe à chaleur hybride Green PAC a été installée à la Compagnie des Fromages & RichesMonts à Vire (14). En exploitant la chaleur fatale rejetée par les installations de production de froid, elle fournit annuellement sept gigawattheures d'eau chaude à 85 °C pour les besoins de nettoyage, de stérilisation et production. Les émissions de CO<sub>2</sub> liées à la production de chaleur ont radicalement chuté de 90 %.

peut être chauffée jusqu'à 120 °C pour une pression du fluide de travail réduite à 25 bars, là où une PAC utilisant de l'ammoniac pur serait limitée à 50 °C. Au point de fonctionnement de 40/100 °C, le COP est de 4,5.

Produire et distribuer de la chaleur sous forme d'eau chaude là où on utilise souvent

## “ La décarbonation de la chaleur basse et moyenne températures dans l'industrie est à la croisée des chemins ”

comparativement très faible par rapport à la plupart des réfrigérants utilisés aujourd'hui. Le cycle, dit « transcritique », est original, car il se déroule en partie en phase supercritique : en sortie de compresseur, le fluide de travail est à une pression supérieure à sa pression critique, point au-delà duquel, pratiquement, le CO<sub>2</sub> peut être refroidi, mais ne se condense pas. Le condenseur classique est donc remplacé par un refroidisseur de gaz.

Autre exemple, la PAC hybride Green PAC a été développée en Norvège par l'Institut des technologies énergétiques, puis par la société Hybrid Energy. Après un accord de partenariat conclu en 2015, ENGIE Solutions assemble ces systèmes sur mesure à Montauban-de-Bretagne en Ille-et-Vilaine. Cette PAC combine les principes de l'absorption et de la compression et fonctionne avec un mélange d'eau et d'ammoniac. Ce fluide naturel est zéotropique, c'est-à-dire que sa température varie lorsqu'il change d'état : grâce à lui, par rapport à une PAC classique, les échanges de chaleur au condenseur et à l'évaporateur sont améliorés, conduisant à un meilleur COP. Grâce à cette approche, de l'eau

de la vapeur est un vrai frein au déploiement parce qu'une modification significative des procédés utilisateurs est nécessaire, notamment l'installation d'un nouvel échangeur de chaleur. Des PAC autorisant la production de vapeur entre 150 et 200 °C ouvriraient de nombreuses opportunités. Les développements actuels des PAC visent à améliorer le COP et à augmenter le niveau de température à 200 °C. Le manque de réfrigérants avec un faible impact environnemental est la principale barrière.

### LES PAC DE DEMAIN

Une application directe des PAC très haute température consiste à exploiter des sources de chaleur renouvelable basse température (solaire, géothermie, chaleur fatale...) pour produire de la vapeur en parallèle d'une chaudière existante. Une PAC générant de la vapeur doublerait au moins le rendement d'une chaudière électrique. L'utilisation d'électricité verte rendrait ce système entièrement décarboné. Ce principe fait l'objet d'un produit commercialisé pour de la vapeur à une température encore modeste de 120 °C (la SGH120 de Kobe Steel). Un COP de 3,5 est annoncé avec une source de chaleur fatale à 65 °C. Kobe Steel propose d'aller plus loin en ajoutant une étape de compression de la vapeur d'eau de 120 à 165 °C. Le COP est supérieur à 2.

La décarbonation de la chaleur basse et moyenne températures dans l'industrie est aujourd'hui à la croisée des chemins. Il n'y a pas de solution universelle. C'est que la chaleur est plurielle et que la température a un coût. L'idée d'un bouquet de solutions paraît la plus adaptée à la diversité des situations rencontrées. L'efficacité énergétique en fait partie, c'est peut-être la seule certitude aujourd'hui. ■

## ■ CHAUD OU FROID, MÊME COMBAT

L'objectif de la réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur des bâtiments résidentiels et tertiaires est ambitieux (17 % en France). C'est un défi tant il faut tenir compte du faible taux de renouvellement des bâtiments, des dizaines

de millions de propriétaires et autres parties prenantes, des divers regroupements en villages, quartiers, villes... Néanmoins des solutions existent, et que ce soit pour le chauffage (*ci-dessous*) ou à l'inverse pour la climatisation

(voir page XXIV), elles ont étonnamment beaucoup en commun, notamment lorsqu'il s'agit de répondre aux pointes de consommation, journalières et saisonnières. Toutes passent par la diminution de la demande, l'utilisation de

ressources renouvelables, la mise à disposition de solutions techniques, organisationnelles et financières innovantes... La convergence des réseaux électrique, de gaz, de chaleur et de froid sera également un acteur clé de la réussite.

# Chauffer sans réchauffer... le climat !

On ne parviendra à réduire l'empreinte carbone du chauffage qu'en associant électricité et gaz plutôt qu'en les opposant.

« **B**ataille des radiateurs », « les esprits s'échauffent »... Les médias rivalisent d'esprit quand ils rendent compte des négociations entourant l'élaboration de la nouvelle réglementation environnementale, dite « RE 2020 », qui doit définir le mode de chauffage privilégié dans les bâtiments neufs. De fait, le débat fait rage entre les défenseurs du tout électrique et ceux du gaz, chacun espérant faire pencher les arbitrages en faveur de sa solution. Quels sont les tenants et les aboutissants de cette question ?

Ces trente dernières années, la performance du chauffage s'est fortement améliorée avec le remplacement progressif du fioul et du charbon par le gaz naturel et l'électricité, la production de cette dernière ayant par ailleurs évolué vers le nucléaire, l'hydraulique et le gaz naturel. Selon l'Ademe, les émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage, à surface équivalente, ont été divisées par trois depuis 1975. Cependant, avec

400 térawattheures, le chauffage correspond tout de même à un quart de l'énergie finale globale consommée en France. C'est donc un secteur clé pour atteindre la neutralité carbone.

Aujourd'hui, le gaz naturel et l'électricité dominent largement les énergies dédiées au chauffage (*voir le graphe ci-dessous*). L'électricité n'est pas une énergie primaire et n'est donc pas disponible dans la nature : c'est un vecteur énergétique issu de la transformation d'énergies primaires (gaz naturel, uranium, vent, rayonnement solaire...). L'examen des sources d'énergie primaires sollicitées par le chauffage électrique montre une tout autre répartition, certes dominée cette fois par le nucléaire (environ 50 %), mais avec une part fossile loin d'être faible.

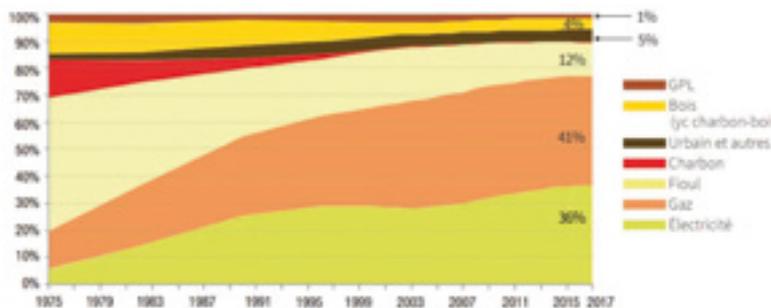
### UNE QUESTION D'ÉQUILIBRE

La place des énergies dans le mix de demain n'est donc pas tant une question de gaz naturel et d'électricité, mais plutôt d'équilibre entre différentes énergies primaires. Une partie des ressources renouvelables sont par nature uniquement valorisables en électricité (éolien, photovoltaïque...), et d'autres, comme les gaz renouvelables et le solaire thermique, peuvent être utilisées directement pour le chauffage.

Cependant, l'électricité se heurte à ses limites lorsqu'il s'agit de composer avec les variations de consommation journalières et surtout saisonnières. La difficulté pour le système électrique est à la fois de pouvoir démarrer des moyens de production électrique dédiés à l'hiver, et d'assurer le dimensionnement des réseaux autour d'une pointe somme toute brève.

Faisons un petit calcul. En 2019, la « pointe » énergétique des bâtiments a été estimée à 280 gigawatts, dont 85 ont été fournis par le réseau électrique. Leur demande énergétique minimale est de 80 gigawatts. Ainsi, dans une

### LA RÉPARTITION DES ÉNERGIES DÉDIÉES AU CHAUFFAGE



Le gaz naturel et l'électricité dominent largement les énergies dédiées au chauffage. On constate une prépondérance de l'électricité dans le secteur des bâtiments neufs, mis à part en logements collectifs chauffés majoritairement au gaz naturel.



© Carlos Castilla/shutterstock.com

Dans les bâtiments,  
quel chauffage choisir ?  
Au gaz ou électrique ?

année 2019 virtuelle où tous les bâtiments seraient équipés en chauffage électrique, 200 gigawatts devraient être mis en réserve, et sollicités uniquement lors d'une pointe hivernale. C'est l'équivalent de 120 EPR ou 250 centrales à gaz dernier cri... qu'il faudrait éteindre l'été.

À cette aune, quelle trajectoire peut-on imaginer pour atteindre la neutralité carbone en 2050 ? D'abord, l'ampleur du problème de la pointe hivernale de chauffage doit être attaquée à la racine. Répétons-le, la première étape est la réduction drastique et rapide de la demande énergétique des bâtiments : la chasse aux fuites thermiques est ouverte depuis quelques années et doit s'intensifier.

Deuxième front, les systèmes de production de chaleur doivent être aussi efficaces que possible lorsqu'ils s'appuient sur des ressources pilotables, qu'elles soient renouvelables (biomasse, gaz renouvelables) ou non (mais bas-carbone, comme le nucléaire de type EPR). Par ailleurs, il est nécessaire d'adosser au solaire, à l'éolien et à l'hydraulique des capacités de stockage. En effet, des moyens de production peu pilotables sont peu utiles pour suivre l'évolution des demandes en particulier lors de la pointe hivernale. Parmi les capacités de stockages, chacune a ses défauts et ses qualités. Citons les batteries (dont le bilan environnemental peut poser question), les stockages mécaniques, les stockages thermiques (dans de l'eau, ou d'autres matériaux plus complexes), ou sous forme d'hydrogène, qui est alors un gaz renouvelable.

L'enjeu suivant est l'échelle à laquelle installer ces divers moyens pilotables. C'est ici que se situe le vrai débat sur « la place de l'électricité et du gaz dans le chauffage » que l'on peut reformuler ainsi : « quels sont et où sont les moyens de production de chaleur les plus

**LES AUTEURS**  
**BENJAMIN HAAS,**  
**ENGIE LAB CRIGEN**  
**ET MURES ZAREA,**  
**ENGIE RESEARCH**

appropriés lors de la pointe hivernale ? » La question est d'arbitrer entre des moyens électriques pilotables centralisés et des moyens plus décentralisés, plus proches des usagers et valorisant des cycles courts et circulaires (pompes à chaleur électriques dotées d'appoint au gaz renouvelable, stockage thermique du solaire thermique, récupération de la chaleur fatale...). Ce peut être à l'échelle des territoires avec des logiques de communautés énergétiques s'appuyant sur les réseaux en place, ou bien à celle des bâtiments avec des systèmes hybrides faisant appel à des appoints pilotables et décarbonés au niveau des bâtiments.

### TROIS ÉCHELLES

Chacune de ces échelles (centralisée, territoire et bâtiment) offre des avantages et des inconvénients que l'on pourrait résumer ainsi : plus la production pilotable est à forte puissance (et donc centralisée), plus sa gestion est aisée techniquement, mais moins elle est performante énergétiquement du fait des pertes lors de la transformation d'une énergie en une autre. Arbitrer entre la part de chacune de ces échelles est complexe et, alors qu'il s'agit d'un problème brûlant d'actualité, il est essentiel de ne pas perdre de vue que parier sur un seul et unique avenir (souvent vu comme tout électrique) sans s'accorder une capacité de résilience et d'évolution, c'est prendre le risque d'échouer. Pour atteindre le zéro carbone, il est urgent de ne pas se fermer d'option, de travailler sur les trois échelles et de ne pas cacher des émissions de carbone dans la production électrique centralisée et enfin d'aller chercher la performance énergétique et l'efficacité économique. C'est ce sur quoi planchent les équipes d'ENGIE. Et d'espérer d'autres manchettes, du type « Une alliance pour un chauffage vertueux ». ■

# Un monde décarboné... et climatisé

Les défis à relever dans le domaine du bâtiment, et plus particulièrement en matière d'équipements frigorifiques de climatisation, afin de lutter efficacement contre le réchauffement climatique sont immenses. Mais pas insurmontables...

**A**ux États-Unis, la consommation d'énergie liée à l'air conditionné et à la climatisation serait supérieure à la consommation globale de... l'Afrique ! Et la tendance n'est pas à la baisse. De fait, les systèmes frigorifiques adaptés au traitement d'air des locaux résidentiels et tertiaires sont promis à un fort développement commercial. Cela tient principalement à la volonté d'améliorer le confort des occupants de ces locaux en période estivale, particulièrement lorsque les épisodes de chaleur s'accroissent. Que faire face à l'augmentation inéluctable de la demande de « froid » ?

Un grand nombre d'équipements (climatiseurs, pompes à chaleur réversibles, groupes refroidisseurs d'eau...) sont disponibles, mais l'offre commerciale regroupe quasi exclusivement des machines électriques à compression mécanique et quelques produits fonctionnant au gaz. Certains de ces équipements ont de bonnes performances énergétique et environnementale grâce, d'une part, à l'utilisation systématique d'énergie renouvelable associée parfois à un dispositif de récupération de chaleur, et, d'autre part, à l'emploi de fluides frigorigènes naturels ou à faible potentiel de réchauffement planétaire, comme le dioxyde de carbone, l'ammoniac, le propane, les hydrofluoro-oléfines...

Toutefois, nul doute que les fabricants de systèmes de climatisation vont poursuivre leurs efforts, notamment pour respecter les échéances réglementaires en matière d'émissions de gaz à effet de serre, par exemple l'amendement de Kigali prévoyant une baisse drastique de la production et consommation des fluides frigorigènes de type HFC (hydrofluorocarbure) beaucoup plus réchauffants que les gaz réfrigérants précités. Un autre objectif est l'amélioration,



Les îlots de chaleur (ici à Atlanta) se traduisent par des pics de température (en blanc) dans les endroits les plus urbanisés.

entre autres, des coefficients de performance saisonniers de ces équipements. En complément de ces mesures, il est essentiel de réduire au maximum le besoin de « froid » en favorisant les bâtiments bioclimatiques, nous y reviendrons.

## LES DÉFIS À RELEVER

En matière de développement de produits, il est fondamental de faire preuve d'innovation en améliorant les performances globales des systèmes existants et en proposant de nouvelles fonctionnalités, voire des technologies de rupture. Elles concernent, entre autres, les systèmes thermodynamiques utilisant la vaporisation de fluides frigorigènes (systèmes à compression mécanique ou thermique, à éjection, à sorption, thermochimiques...), des gaz actifs ayant de bonnes capacités à transférer de la chaleur, l'évaporation de l'eau, ainsi que les systèmes à effet « thermoacoustique » (des ondes sonores extraient la chaleur d'un environnement à refroidir) et « thermoélectrique ».

La plupart de ces technologies sont adaptées aux différentes typologies de bâtiments grâce à leur large plage de puissance, à leur mode d'utilisation (individuel ou collectif) et à leur intégration possible à des réseaux de chaleur. À titre d'exemple, les systèmes « thermofrigorifiques », produisant simultanément du chaud et du froid, intégrés aux réseaux de chaleur, sont probablement promis à un bel avenir s'ils sont en mesure de

récupérer une part importante de la quantité d'énergie inéluctablement perdue lors de la production de froid. C'est d'autant plus important que ces pertes contribuent à la création d'îlots de chaleur dans les zones urbaines (voir la figure page ci-contre).

Il est important de souligner que les conditions de mise en œuvre de ces systèmes sont essentielles pour obtenir les résultats escomptés : importance du stockage, de la gestion fine des niveaux de production et de consommation, ainsi que des outils de communication, par exemple dans les « smart grid ».

Autre défi, favoriser l'utilisation de sources d'énergie propre aux dépens des énergies traditionnelles (fossiles et nucléaire). Parmi les sources d'énergie susceptibles d'être valorisées par les systèmes frigorifiques liés au bâtiment, citons les ressources aquifères, le solaire car en phase avec le besoin de climatisation, la biomasse, l'hydrogène... La politique énergétique du Danemark est un exemple de cette transition puisqu'elle vise une autonomie énergétique « renouvelable » d'ici à 2050. C'est aussi le cas de Helsinki, en Finlande (voir la figure ci-dessous).

Le développement de l'infrastructure « cloud » et celui de la gestion intelligente des équipements de climatisation sont aussi des axes de recherche incontournables. L'architecture décentralisée sera vraisemblablement utilisée massivement par les entreprises en charge de l'exploitation et de la maintenance de ces équipements afin de traiter puis d'analyser les données de fonctionnement. Le croisement de ces informations, avec d'autres de nature technique ou administrative, aidera à améliorer la qualité des services proposés.

**LES AUTEURS**  
**RODOLPHE DESBOIS ET**  
**CRISTIAN MURESAN, ENGIE**

La ville de Helsinki organise ses réseaux de chaleur et de refroidissement de façon à atteindre la neutralité carbone en 2050.

La raison d'être d'un bâtiment est la création d'un « intérieur », d'une ambiance maîtrisée. En gérant les rapports entre cet intérieur et le climat extérieur, l'enveloppe du bâtiment et le système de traitement d'air ont un rôle primordial en matière d'efficacité énergétique. La règle actuelle consiste fondamentalement à isoler l'intérieur du bâtiment de son environnement proche. Pourtant, le sol, l'air, le soleil, le ciel, le vent, offrent des sources potentielles d'énergie, en hiver comme en été. Peut-on exploiter ces éventuelles sources d'énergie en les faisant pénétrer dans les bâtiments ?

## LA CONCEPTION BIOCLIMATIQUE

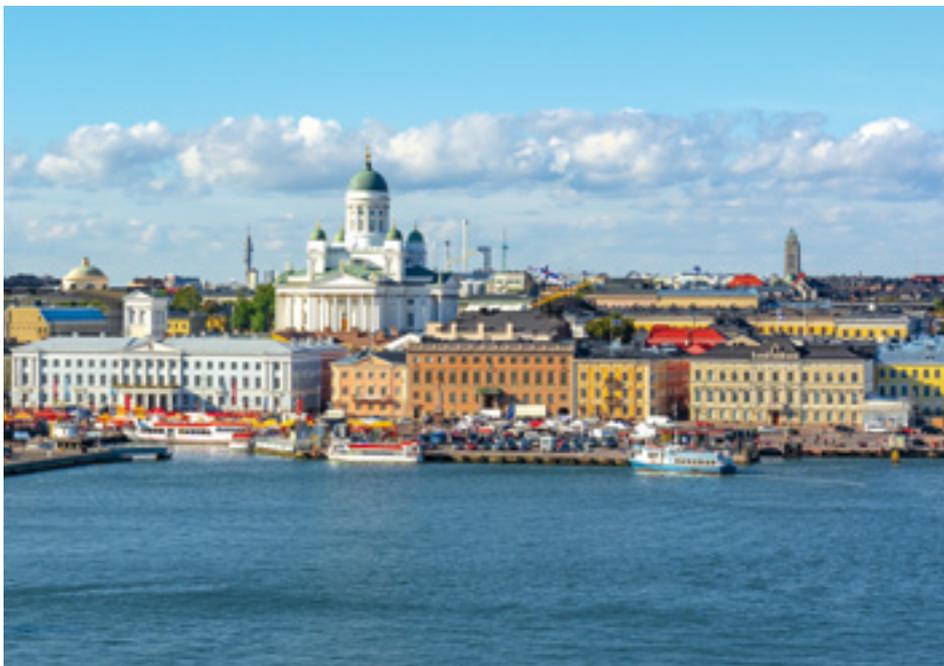
C'est le sens de la conception bioclimatique destinée à réduire les besoins de chauffage et surtout de refroidissement. Des bâtiments résidentiels et tertiaires pourraient réduire drastiquement le recours aux équipements de refroidissement en récupérant des frigories (qui sont au froid ce que les calories sont au chaud) disponibles dans l'environnement.

Parmi les solutions bioclimatiques les plus prometteuses, les équipes d'ENGIE Research en explorent de nombreuses. Ainsi, des revêtements avec des propriétés radiatives sélectives contrôlent les apports solaires ou bien augmentent les déperditions du bâtiment et des équipements associés par rayonnement sur des bandes de fréquences bien définies, et diminuent alors la température intérieure (on parle de « skycooling »).

On peut augmenter l'inertie thermique des bâtiments en intégrant des matériaux à changement de phase dans leur enveloppe et donc utiliser pendant la journée les frigories accumulées pendant la nuit.

Les solutions de « freecooling / géocooling » exploitent quant à elles les différents gisements de froid à disposition comme les eaux profondes marines et lacustres, les courants d'air froids, la neige en montagne, les nuits ou journées fraîches, les eaux souterraines.

Le secteur du bâtiment semble aujourd'hui suffisamment bien structuré pour répondre au défi de la transition énergétique. Concernant le froid, l'évolution technologique des méthodes de construction et de fabrication des systèmes frigorifiques se poursuit à grands pas même si le modèle économique associé peut se révéler « complexe » en fonction du cadre réglementaire du pays concerné. Au bout du compte, les États-Unis pourront peut-être rester toujours aussi frivores sans pour autant réchauffer la planète. ■



# Vers une agriculture neutre en émissions



© Stockrr/shutterstock.com

**S**elon le département des affaires économiques et sociales de l'ONU, les villes en 2050 accueilleront plus de 66 % des 9 milliards d'habitants contre 43 % aujourd'hui. C'est près de 3 milliards de citoyens de plus qu'en 2020. Cet accroissement démographique en milieu urbain imposera de produire plus de nourriture au plus près des villes, et ce avec une énergie toujours plus propre. Or la consommation énergétique du secteur agroalimentaire représente déjà plus de 30 % de la consommation globale d'énergie primaire et plus de 20 % des émissions de gaz à effet de serre.

Offrir une nourriture et une eau de bonne qualité et en quantité suffisante est un défi qui nous concerne tous : producteurs, transformateurs, transporteurs, distributeurs comme consommateurs. Sur notre Terre l'usage du sol, la biodiversité et les ressources souffrent déjà du dérèglement climatique. Ici, les périodes de sécheresse s'allongent et s'intensifient. Là, des gelées tardives ponctuent un printemps de plus en plus précoce. Dans ces conditions, comment produire plus et mieux en respectant les limites de la planète et en réduisant la compétition entre agriculture et production d'énergie, par exemple

**LES AUTRICES**  
**ELODIE LE CADRE LORET ET**  
**BÉRENGÈRE GENOUVILLE,**  
**ENGIE RESEARCH**

à partir de panneaux solaires pouvant occuper de grandes surfaces ? ENGIE s'intéresse de près à ces problématiques. Pourquoi ?

Parce qu'il accompagne les consommateurs d'énergie au quotidien pour leur fournir une énergie plus verte et plus efficace au sein des villes et des territoires. Et justement, les agriculteurs et le secteur de l'agroalimentaire ont besoin d'énergie pour les véhicules agricoles, de chaleur pour sécher les récoltes avant le stockage, de froid pour conserver les produits bruts ou transformés, d'électricité pour irriguer, de matière organique pour la production de biogaz... ENGIE peut donc naturellement proposer des solutions intégrées pour fournir une énergie plus verte, améliorer l'efficacité énergétique de toute la chaîne de production d'aliments et même celle de fertilisants plus verts.

Néanmoins, chaque territoire ayant ses particularités, les technologies sont à adapter aux différents secteurs agricoles, aux différentes zones géographiques et aux différentes parties de la chaîne agroalimentaire. Pour répondre à cette diversité des situations, nous élaborons des projets sur le terrain en partenariats avec les agriculteurs et les agronomes pour répondre au plus près à leurs besoins.



Les secteurs de l'agriculture et de l'agroalimentaire, appelés à croître en raison de la démographie, ne pourront diminuer leur empreinte carbone qu'au prix de plusieurs changements d'habitudes de production. Les solutions existent.

L'électricité d'origine renouvelable peut aider à rendre plus verte l'agriculture.

Quelques exemples de projets pilotes montrent que l'on peut notablement diminuer l'impact carbone de notre alimentation. Ils répondent à trois questions. Quelles sont les technologies les plus prometteuses ? En quoi notre alimentation en sera-t-elle changée ? Polluerons-nous moins en mangeant des produits fabriqués à partir d'énergie locale ?

## ENTRE CHAMP ET SERRE

Le premier projet porte sur la compétition entre différents usages de la terre. Il vise à produire plus de nourriture et d'énergie solaire sur une même surface en étudiant la meilleure combinaison de technologies de panneaux photovoltaïques et de cultures vivrières qui nécessitent de l'ombre pour favoriser leur croissance et ce dans plusieurs types de climat.

Le second pilote a pour objectif la réduction des émissions des cultures sous serres qui concernent en France une superficie d'environ 10 000 hectares, dont les deux tiers sont affectés aux cultures légumières. Il s'agit d'améliorer l'efficacité énergétique jusqu'à atteindre la neutralité carbone de ce type de cultures, sachant qu'aujourd'hui, elles consomment selon l'Ademe de 270 à 330 kilowattheures par mètre carré

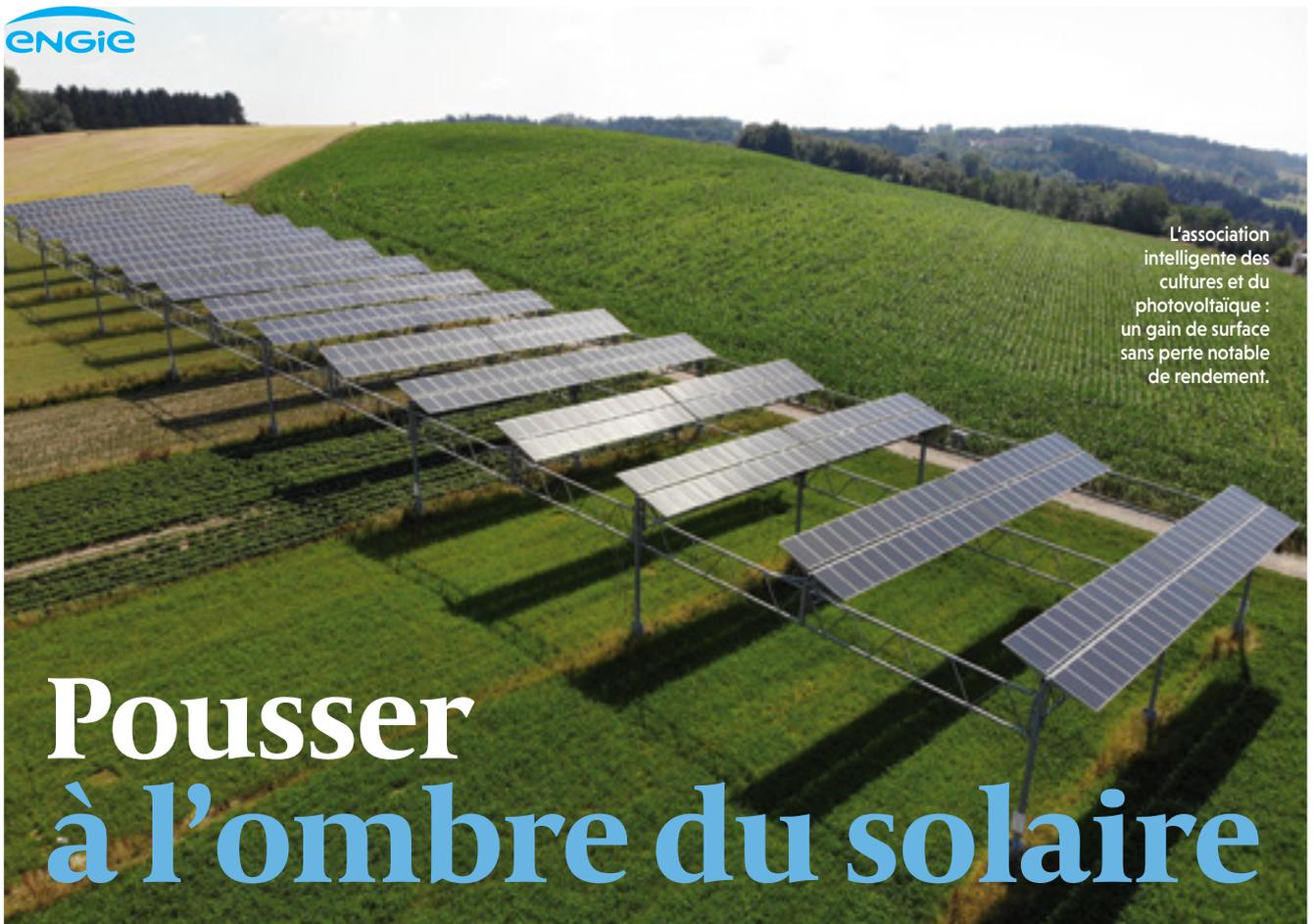
selon les régions. Cette énergie représente en moyenne 22 % des charges de production directes des exploitations de cultures sous serres chauffées. Pour ce projet, un partenariat a été monté avec l'université Wageningen, aux Pays-Bas, pour concevoir une serre autonome, notamment en énergie. Une serre test est équipée en capteurs d'eau, d'humidité du sol, de lumière, d'oxygène, de CO<sub>2</sub>... afin d'optimiser la culture sous contrainte de niveau d'émission de CO<sub>2</sub> et de consommation énergétique.

## VERS L'HYDROGÈNE VERT

Le troisième axe concerne la production d'engrais verts. Une culture a besoin d'eau et de CO<sub>2</sub>, mais aussi de nutriments comme l'azote, le phosphore et le potassium. L'azote est apporté par divers composés synthétiques élaborés à partir d'ammoniac aujourd'hui synthétisé *via* le procédé Haber Bosch : l'hydrogénation d'azote atmosphérique gazeux par de l'hydrogène gazeux avec un catalyseur. L'hydrogène est le plus souvent produit à partir d'hydrocarbures. ENGIE développe de nouveaux procédés de production d'hydrogène vert sur la base de l'électrolyse de l'eau avec de l'électricité verte excédentaire. Ce procédé, qui serait utile pour concevoir des engrais verts, est aujourd'hui centralisé dans des usines de très grandes capacités. Un des enjeux est d'étudier l'intérêt technico-économique de délocaliser cette production au plus près de sa consommation. De la sorte, non seulement nous baisserions la pollution des sols, mais aussi celle de l'air en diminuant le transport des fertilisants. Ces solutions, déployées seules ou combinées, n'influenceront pas sur la qualité des produits consommés, mais diminueront leur empreinte carbone.

Ces initiatives ne sont pas isolées. Elles complètent un panel de solutions high-tech (agriculture de précision, agriculture urbaine...) et low-tech (le non-labour par exemple). Elles se développeront en parallèle à travers les villes du monde entier selon la taille des exploitations et la capacité des producteurs à adopter ces nouvelles technologies. À moyen terme, les changements technologiques les plus abordables et les plus matures, comme l'utilisation de nouveaux capteurs pour optimiser la production et les procédés, vont largement se généraliser. En parallèle, les consommateurs devront s'organiser et faire pression pour diminuer les émissions liées au transport des aliments, le gaspillage alimentaire et améliorer le traçage des produits.

Selon le dernier panorama des technologies émergentes du cabinet DNV GL, les citoyens tendront vers un partage des ressources locales sous forme de coopératives alimentaires basées sur des productions plus locales à faible impact carbone. C'est ainsi qu'une empreinte carbone totale minimale sera envisageable, de la fourche à la fourchette. ■



L'association intelligente des cultures et du photovoltaïque : un gain de surface sans perte notable de rendement.

# Pousser à l'ombre du solaire

© Fraunhofer ISE

Que ce soit sous les climats tempérés ou dans des régions plus arides, les cultures combinées aux panneaux solaires sur une même surface forment un duo gagnant.

**D**ans le monde entier, le photovoltaïque est devenu un élément clé de la transition énergétique. Pourtant, certains pays fortement urbanisés, tels la Belgique ou les Pays-Bas, manquent d'espace pour installer de grandes centrales solaires. Dans ce contexte, ne serait-il pas logique d'utiliser le sol de manière plus judicieuse ?

Une solution serait de combiner intelligemment l'activité agricole et la production d'électricité solaire sur une même parcelle : on parle alors d'agrivoltaïque (contraction d'agriculture et de photovoltaïque). C'est le pari d'ENGIE Bénélux, dont les équipes mettent en œuvre un projet de ce type à grande échelle, aux Pays-Bas. Il s'agit d'installer d'ici 2021 une centrale photovoltaïque d'une puissance de 45 mégawatts, cohabitant avec des cultures agricoles.

## CÉLERI OU FRAMBOISES ?

La première étape consiste en un champ d'essai d'un hectare où différentes options seront testées, afin d'engranger une expérience indispensable au déploiement du démonstrateur en entier sur 50 hectares. Quelles cultures

### LES AUTEURS

JÖRAN BEEKERK VAN RUTH  
ET STIJN SCHEERLINCK,  
LABORELEC,  
ROB KURSTEN,  
ENGIE BENELUX,  
CLAIRE DU COLOMBIER,  
ENGIE SOLAR

mettre en place, valorisables mais supportant l'ombrage ? Céleri ? Framboises ? Quelle technologie solaire choisir ? Classique ou bifaciale ? Quelle configuration adopter ? Quelle est la densité optimale de panneaux photovoltaïques à installer, afin de produire assez d'électricité sans trop assombrir le champ sous-jacent ? Pour y répondre, ENGIE coopère avec un partenaire local, Green Meteor, spécialisé à la base dans la construction de structures de protection des cultures contre la grêle ou le soleil. Cette association présente également l'avantage de créer des liens avec le secteur horticole, indispensable à la bonne conduite du projet.

Les rendements sont-ils affectés ? Les conclusions du projet APV-RESOLA mené par

## L'AGRIVOLTAÏQUE, UNE HISTOIRE MONDIALE

**L'**agrivoltaïque associant photovoltaïque et agriculture sur une même surface a été proposé en 1981 par Adolf Goetzberger et Armin Zastrow. Au Japon, il s'est développé à partir de 2004 sous l'impulsion d'Akira Nagashima. De nombreux types de cultures en profitent, comme les agrumes, les concombres, le riz, les vignes... La technique a ensuite essaimé dans diverses régions du monde : Chine, Inde, Malaisie, Autriche, Chili... Au Vietnam, dans le delta du Mékong, l'institut Fraunhofer ISE a déployé un système agrivoltaïque pilote dans une ferme de crevettes en 2017.

l'institut allemand Fraunhofer ISE en 2018 montrent que les systèmes agrivoltaïques peuvent atteindre une production agricole satisfaisante. En effet, certaines cultures tolèrent assez bien l'ombre et peuvent s'accommoder d'une réduction du rayonnement photosynthétiquement actif (le PAR : lumière utile aux végétaux entre 400 et 700 nanomètres de longueur d'onde), sans perte importante de rendement. Les effets dépendent également du niveau d'ombrage fourni par les panneaux solaires.

Dans le projet APV-RESOLA, une parcelle expérimentale où poussaient des pommes de terre (voir la figure page ci-contre) a été partiellement couverte de panneaux photovoltaïques, entraînant une diminution annuelle de 30 % de l'irradiation solaire. Verdict : le rendement en pommes de terre a augmenté de 3 % ! Le résultat s'exprime globalement par un ratio d'équivalence du sol (*land equivalent ratio*) : il est ici de 186 %, c'est-à-dire 103 % d'efficacité relative des pommes de terre et 83 % d'efficacité relative de la production photovoltaïque.

Si les pommes de terre semblent profiter de l'ombre, ce n'est pas le cas de toutes les plantes. Dans les mêmes conditions, la production de trèfle a diminué de 8 %... Le choix du type de culture est donc primordial !

## FAVORISER LA BIODIVERSITÉ

Les synergies entre agriculture et photovoltaïque vont bien au-delà des cultures et du rendement énergétique. Les sites solaires peuvent être bénéfiques pour la biodiversité locale, tout en créant un habitat indispensable aux espèces pollinisatrices. Ainsi, aux États-Unis, ENGIE NORAM plante de la végétation locale sur ses sites solaires et s'associe à différents acteurs (le Laboratoire américain des énergies renouvelables (NREL) dans le Colorado, le Bee Lab de l'université du Minnesota...) afin de créer des habitats pour les pollinisateurs, dont les abeilles, et de favoriser la biodiversité à l'échelle nationale. Un exemple en particulier est le projet InSPIRE du NREL, qui tente de quantifier les bénéfices des plantations locales d'un point de vue environnemental, mais aussi économique.

Autre exemple : pour un projet en cours de développement à Hawaii, ENGIE s'est allié à Agicon LLC afin d'identifier des synergies possibles entre photovoltaïque et agriculture. Une recommandation a été d'intégrer au projet solaire une plante native coupe-vent, le seringat.

En France, ENGIE Green a également développé cinq projets solaires comportant des ruches et des plantes à fleurs, soutenant ainsi la biodiversité.

L'agrivoltaïque peut-il être utile ailleurs que dans les régions tempérées ? Pour y répondre, rejoignons le désert d'Atacama, au Chili. Pour ce qui est de l'ensoleillement et de la chaleur, on peut difficilement faire mieux ! Les niveaux



© ENGIE Laborelec, F. Clandesino

Dans la région d'Arica (ici, la vallée de Ljulia), au Chili, ENGIE envisage le développement d'un projet agrivoltaïque.

élevés d'irradiation sont une bonne nouvelle pour la production photovoltaïque, même si les températures excessives et la poussière peuvent nuire aux performances. Cependant, la chaleur et la sécheresse n'offrent pas toujours de bonnes conditions à la croissance des cultures.

## POUSSER DANS LE DÉSERT

C'est là qu'intervient l'agrivoltaïque : à la faveur de l'ombre prodiguée par les structures solaires, les cultures pourraient prospérer dans des conditions microclimatiques favorables (humidité du sol plus élevée et températures ambiantes plus basses) et, s'il existe une source d'eau disponible, être irriguées à l'aide de l'électricité verte produite sur place. Encore mieux : sous ces climats, les cultures auraient tendance à atténuer la température sous les panneaux photovoltaïques, améliorant les performances de ces derniers.

En fin de compte, grâce à l'agrivoltaïque, les communautés locales bénéficieraient d'une activité économique inédite. Par rapport aux installations des régions tempérées, le gain potentiel du rendement global (solaire et agriculture) est plus important, principalement en raison de l'augmentation significative du rendement des cultures. ENGIE envisage le développement d'un projet pilote en collaboration avec les agriculteurs de la région d'Arica, dans le désert d'Atacama, l'une des villes les plus arides au monde.

Où que ce soit, l'intrication des cultures et du photovoltaïque ouvre la voie vers une agriculture encore plus intelligente et résiliente. Cette combinaison se doit d'être étudiée à un stade précoce de chaque projet, afin de bénéficier des meilleures expertises et ainsi d'optimiser les solutions agricoles et énergétiques. Preuve de l'intérêt porté à l'agrivoltaïque, la première conférence internationale dédiée à ce sujet aura lieu en août 2020, à Perpignan, à l'initiative de l'INRA et de l'institut Fraunhofer ISE. ■

### RÉFÉRENCES

**Agrophotovoltaïcs : High Harvesting Yield in Hot Summer of 2018**, institut Fraunhofer ISE, 2019.

**H. Marrou, Co-locating food and energy**, *Nature Sustainability*, vol. 2, pp. 793-794, 2019.

**G. Barron-Gafford et al., Agrivoltaics provide mutual benefits across the food-energy-water nexus in drylands**, *Nature Sustainability*, vol. 2, pp. 848-855, 2019.

**R. Davis, Solar and pollinators : A photo essay**, *PV Magazine*, 2019.

**ADELINE DUTERQUE,**  
Directrice de l'ENGIE LAB CRIGEN



**LUC GOOSSENS,**  
Directeur de la technologie, ENGIE



**JAN MERTENS,**  
Directeur scientifique d'ENGIE



# Transition énergétique : l'indispensable complémentarité

Lorsque l'on parle de transition énergétique, on a souvent tendance à opposer les solutions. Chez ENGIE, nous cherchons plutôt à les mettre en synergie.

**F**in 2019, deux experts en énergie déjeunaient ensemble et discutaient : l'un est une référence internationale en matière de pompes à chaleur et l'autre une sommité dans le domaine de la combustion de la biomasse. Il est frappant de constater à quel point même des personnes très intelligentes tombent dans le piège du « noir ou blanc ». Le spécialiste en pompes à chaleur affirmait qu'il était « évident » que l'avenir du chauffage domestique serait entièrement électrique et que les pompes à chaleur étaient la meilleure (et la seule) solution. L'autre habitait dans une maison rénovée dont l'isolation n'était pas aux normes actuelles, ce qui imposait un système de chauffage à haute température ; il soutenait qu'une pompe à chaleur ne serait pas efficace dans ce type de logement. Et d'ajouter que les nouvelles chaudières à biomasse utilisant une combustion à deux, voire à trois phases et équipées d'un système intégré de traitement de fumées, seraient très bien adaptées au chauffage domestique, même dans les zones densément peuplées, car leurs émissions étaient négligeables.

Le plus intéressant dans une discussion sur l'énergie est qu'il n'est pas nécessaire d'être un expert pour avoir une opinion tranchée. Ça tient évidemment au fait que l'énergie est omniprésente dans notre quotidien et au rôle essentiel qu'elle joue dans le monde aujourd'hui. Selon Michael Webber, elle est le gage d'une vie de qualité et, bien utilisée, elle offre aux humains santé, richesse et liberté. C'est grâce à elle que nous

avons accès à l'eau potable et à une nourriture saine. Dans beaucoup de ces discussions sur l'énergie, très divertissantes par ailleurs, la plupart des interlocuteurs semblent réfléchir de façon binaire à des solutions opposées : réacteurs nucléaires ou turbines à gaz pour pallier l'intermittence des énergies renouvelables électriques, électricité ou gaz pour produire de la chaleur, batteries lithium-ion ou batteries redox à flux pour équilibrer le réseau de distribution, mobilité électrique ou hydrogène, biogaz ou gaz de synthèse... Après avoir lu les articles de ce cahier, vous aurez compris que chez ENGIE, nous ne raisonnons pas en ces termes. Nous n'opposons pas les technologies, nous réfléchissons plutôt à la façon dont elles peuvent se compléter.

## QUELLES SOLUTIONS POUR LE TRANSPORT ?

L'un des débats les plus courants est de savoir si l'avenir de la mobilité sera électrique ou hydrogène, à base de biogaz ou d'hydrocarbures de synthèse. Cette façon de poser la question suppose de faire un choix, alors qu'il serait plus juste de se demander où chaque solution de mobilité sera la plus pertinente. Ainsi, pour les courts déplacements et les véhicules légers, la voiture électrique à batterie possède une telle longueur d'avance qu'il sera difficile pour les autres technologies de rattraper leur retard. Cependant, pour les transports plus lourds (bus, camion, transport maritime...), on aura très probablement un mix énergétique

diversifié, la part respective des différents carburants restant difficile à prévoir.

L'installation d'un réseau étendu de distribution d'hydrogène-carburant semble peu probable dans un avenir proche, mais pour les trajets où les véhicules font la navette entre des lieux où il est produit localement, l'hydrogène représente une bonne alternative. De même pour la partie du réseau ferré qui n'est pas encore électrifiée : les trains à hydrogène sont une option intéressante lorsque l'on cherche des solutions pour décarboner ce mode de transport. Pour l'aviation, les chercheurs travaillent au développement de solutions électriques ou à hydrogène, mais il est peu probable que celles-ci remplaceront le kérosène pour les vols long-courrier dans l'immédiat. La raison en est simple : la faible densité énergétique (la quantité d'énergie pour un volume ou une masse donnée) des batteries actuelles et de l'hydrogène. Mais là encore, des solutions à base d'électricité et d'hydrogène pourraient voir le jour pour de petits avions et les vols court courrier, ou pour les avions à propulsion hybride, qui utiliseront l'électricité ou l'hydrogène pour le roulage au sol et un hydrocarbure de synthèse neutre en carbone pour voler. L'accès à des carburants synthétiques est vital pour l'avenir des vols long-courrier.

Un autre débat aussi intéressant qu'animé concerne le transport de l'énergie sur de longues distances. En effet, tout le monde ne vit pas dans une zone où les énergies renouvelables bon marché sont abondantes. Dans notre transition vers un monde sans carbone, cette question se pose avec plus d'acuité. Les

“ Dans une discussion sur l'énergie, il n'est pas nécessaire d'être un expert pour avoir une opinion tranchée ! ”

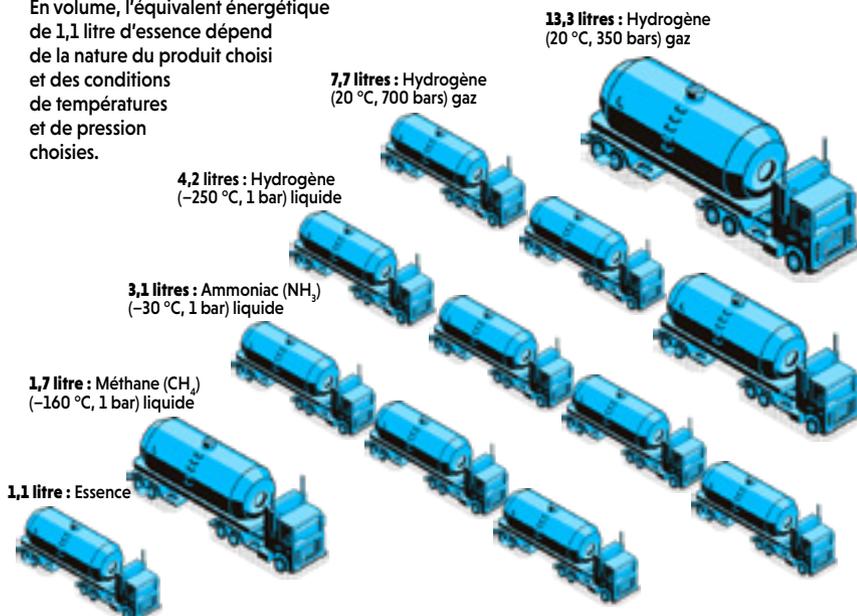
lignes à courant continu haute tension feront partie de la solution, mais à mesure que la distance augmentera, d'autres moyens de transport entreranno en jeu. Ces derniers impliqueront la conversion de l'électricité en d'autres vecteurs énergétiques, comme l'hydrogène, l'ammoniac ou les hydrocarbures de synthèse. Aujourd'hui des solutions encore plus innovantes émergent, par exemple les liquides organiques porteurs d'hydrogène ou les « *metal fuels* ». Encore une fois, toutes ces technologies contribueront sans doute ensemble à transporter l'énergie, cette question du transport de l'énergie sur de longues distances est donc une priorité pour la recherche chez ENGIE.

## GAZ ET ÉLECTRICITÉ À TOUS LES ÉTAGES

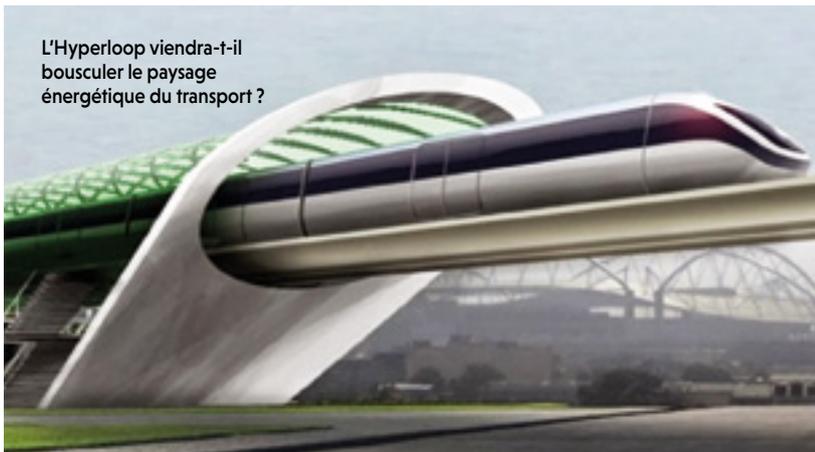
Un autre débat intéressant dominé par la question du « *ou exclusif* » est de savoir, dans le cadre d'une transition vers un monde neutre en carbone, si nous devrions miser sur l'électrification de l'industrie ou plutôt sur l'utilisation de gaz verts. Là encore, et ce cahier le montre, chez ENGIE, nous pensons que la bonne stratégie est de faire les deux simultanément. L'électricité offre des avantages importants par rapport au gaz. Qui plus est, la transformation de l'électricité en gaz est moins efficace et plus coûteuse que l'inverse. Cependant, le gaz reste indispensable pour le stockage saisonnier de l'énergie ou pour augmenter la densité d'énergie avant de la transporter. L'utilisation de gaz verts permet de surcroît de profiter des infrastructures de transport existantes. En fait, lors de l'introduction de technologies telles que le « *Power to Gas* » (la transformation de l'énergie électrique en énergie chimique, par exemple en hydrogène, pour la stocker) et le « *Power to Gas to Power* », la distinction entre l'électricité et le gaz tend à s'effacer et la transformation dans les deux sens devient facile. Ainsi, la discussion sur la

### COMMENT TRANSPORTER 10 KILOWATTHEURES D'ÉNERGIE ?

En volume, l'équivalent énergétique de 1,1 litre d'essence dépend de la nature du produit choisi et des conditions de températures et de pression choisies.



L'Hyperloop viendra-t-il  
bousculer le paysage  
énergétique du transport ?



© Hyperloop

question du choix entre l'électricité et le gaz n'a plus beaucoup de sens puisque nous travaillerons avec les deux !

## LES SURPRISES DU FUTUR

L'éventuel impact sur la transition énergétique de technologies en rupture reste difficile à prévoir. Assurément, certaines ne manqueront pas d'apparaître dans les années à venir et changeront la donne. La photosynthèse artificielle, le remplacement de vols

court courrier pour le transport de personnes ou de marchandises par des solutions de type Hyperloop, ces trains ultrarapides circulant dans des tubes à basse pression (*voir la photo ci-contre*), l'énergie éolienne aérienne et la transformation (biologique ou non) du CO<sub>2</sub> en carburant peuvent s'avérer d'une aide précieuse sur la voie de la neutralité carbone.

C'est pourquoi l'investissement dans la recherche sur ces nouvelles technologies est si important et la collaboration entre organisations publiques et privées pour les développer, essentielle. ENGIE s'est engagé à travailler avec ces partenaires pour codévelopper ces technologies émergentes par le biais de projets pilotes et de démonstrateurs. Outre les aspects environnementaux et économiques des nouvelles technologies, le soutien des citoyens sera déterminant. L'acceptation sociale et le rythme d'adoption des nouvelles technologies détermineront la percée d'une innovation donnée.

La transition énergétique se fera donc selon deux axes, c'est une histoire de « et », plutôt que de « ou ». Nous aurons besoin de toutes ces technologies émergentes et soutenables, car aucune ne pourra relever à elle seule le défi. L'objectif est si ambitieux qu'il impose à tous, particuliers, entreprises, secteurs d'activité, de travailler ensemble. Alors rejoignez-nous dans notre voyage vers un monde sans carbone. ■

La synergie des solutions,  
pour une utilisation la plus  
adaptée des énergies.



© ENGIE / MIRO / Antoine Meyssonmier



© ENGIE

# ENGIE ET LA FONDATION SOLAR IMPULSE

**D**epuis 2017, ENGIE est partenaire de la Fondation Solar Impulse, co-fondée par Bertrand Piccard. L'objectif de la Fondation est de réduire notre impact sur l'environnement tout en favorisant le développement économique. La Fondation s'est donnée comme défi d'identifier 1 000 solutions plus responsables, efficaces et rentables pour inciter les autorités institutionnelles et les autres décideurs à fixer des objectifs environnementaux et des politiques énergétiques plus ambitieux.

## UN IMPACT POSITIF

**Des valeurs communes** en font une opportunité majeure pour accélérer la transition zéro carbone, l'innovation, l'action... par le développement de solutions propres qui concilient préservation de l'environnement et rentabilité économique.

**Des bénéfices individuels et collectifs** : ce partenariat encourage à la fois les industries et les collectivités dans leur transformation vers

## AVIS D'EXPERTS

“ Chez ENGIE, nous avons une large palette de métiers et d'expertise que nous mettons à disposition pour identifier les solutions efficaces et durables. Mon rôle, coordonner les experts du Groupe pour développer des solutions zéro carbone, efficaces d'un point économique mais également environnemental. ”

**ELODIE LE CADRE LORET,**  
ENGIE RESEARCH,  
expert ENGIE depuis octobre 2019

“ Au sein d'ENGIE Innovation, je source des solutions les plus innovantes et efficaces sur un large spectre de métiers. Avec Solar impulse, l'enjeu est d'évaluer celles qui sont efficaces rapidement et qui ont un impact durable pour la planète. Nous sommes 20 experts ENGIE dans le monde et parmi ceux qui évaluons le plus de solutions. ”

**JEAN-MICHEL REYNAUD,**  
ENGIE INNOVATION, expert ENGIE  
depuis 2018

la neutralité carbone et la jeune génération vers un avenir sur une planète plus verte.

## DES SOLUTIONS LABELLISÉES

La Fondation Solar Impulse délivre un label « Efficient Solution » aux projets ayant un impact positif sur l'environnement avec un potentiel de rentabilité. L'objectif est d'offrir un soutien aux entrepreneurs afin d'accélérer la mise en œuvre et la visibilité de ces solutions.

Parmi les solutions ENGIE labellisées :

- **PowerCorner** propose des services énergétiques fiables, durables et abordables via des mini-réseaux autonomes desservant des clients ruraux dans des pays en développement.
- **Community Solar** est une centrale solaire dont l'électricité est partagée : les clients peuvent louer une « part » d'énergie solaire sans avoir à équiper leur toit, ni même avoir un toit.
- **District cooling systems.** Depuis 1991, ENGIE exploite à Paris l'un des plus grands systèmes de refroidissement urbain au monde, CLIMESPACE. Grâce à l'électricité renouvelable, le système livre de l'eau réfrigérée à plus de 600 clients (hôtels, bureaux...).
- **Vertuoz Pilot** optimise la consommation énergétique. Des objets connectés envoient des informations à une intelligence artificielle qui pilote en retour le chauffage, l'éclairage... ■



**Développer les énergies  
renouvelables  
c'est aussi valoriser l'agriculture  
dans les campagnes.**

**ENGIE, des solutions qui accompagnent  
votre transition zéro carbone.**

**engie**

**#Act  
With  
ENGIE\***

\*J'agis avec ENGIE.  
L'énergie est notre avenir, économisons-la!