

environnementales puisqu'il supprime les émissions de soufre et de particules fines, réduit de 80 % celles de NO_x et de 20 % celles de CO_2 . 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_2 et de NO_x . Deux nouveaux carburants pourraient y remédier. Le premier est le bio-GNL (ou biométhane liquide). Il permet de réduire les émissions de CO_2 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_x , SO_x 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.

Autour de vous, pour peu que vous soyez citoyen, 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 CO₂, 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



© CALIX

Usine pilote LEILAC1.

L'industrie du ciment et du béton compte parmi les plus larges émetteurs de CO₂, 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 CO₂ proviennent de la combustion de fuel pour lequel des carburants alternatifs décarbonés peuvent être une solution, 60 à 70 % des émissions CO₂ proviennent du procédé de calcination du CaCO₃, 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 CO₂. 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 CO₂.

DE LA VIGNE AU VERRE



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

© Gabard

Si 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_2 , CH_4 ...) 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_2 , 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_2 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

En 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.

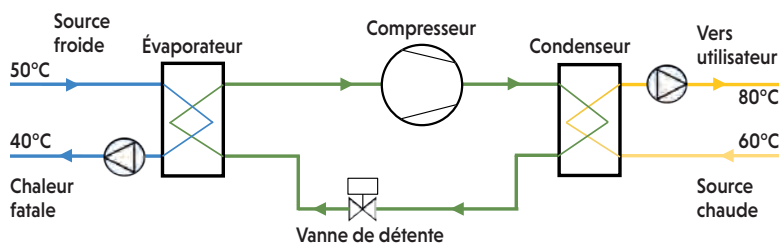
Ce dispositif fait subir un cycle de transformations à un fluide de travail ou réfrigérant : il absorbe de la chaleur dans un évaporateur, chauffe dans un compresseur et libère de la chaleur dans un condenseur. Le tout est complété par un appareil de détente.

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 CO₂ 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

ANATOMIE D'UNE POMPE À CHALEUR



Une pompe à chaleur (PAC) transfère de l'énergie thermique d'un milieu à basse température (en bleu) vers un milieu à haute température (en jaune).



© 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 CO₂ 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

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.

“ 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 CO₂ 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

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 graphique 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.

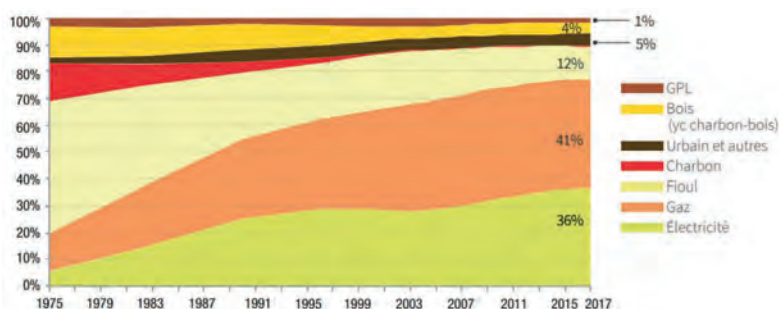
UNE QUESTION D'ÉQUILIBRE

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 utilisés 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 ». ■

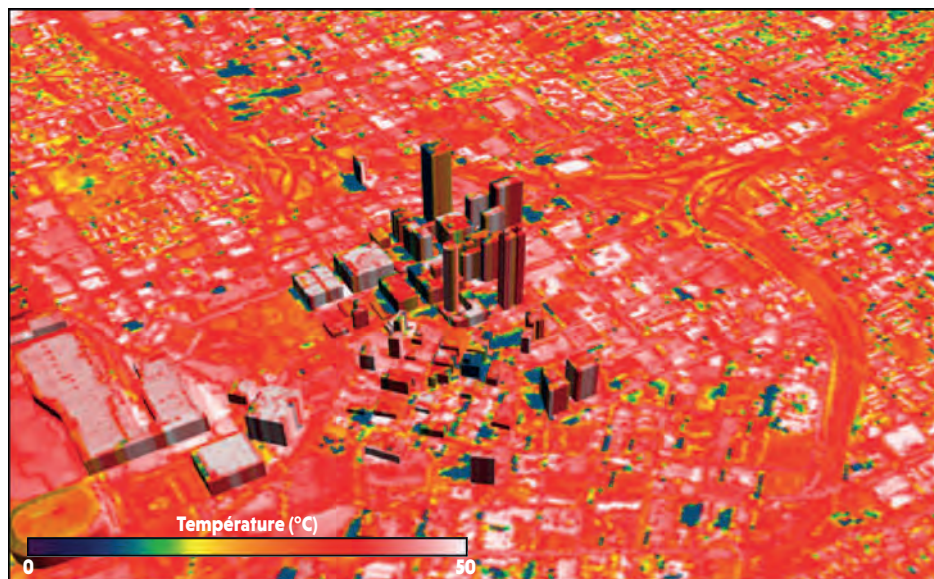
Un monde décarboné... et climatisé

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...

Aux 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-oléfinés...

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

recupérer 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 frugivores sans pour autant réchauffer la planète. ■



Vers une agriculture neutre en émissions

© Stocker/shutterstock.com

Selon 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 citadins 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

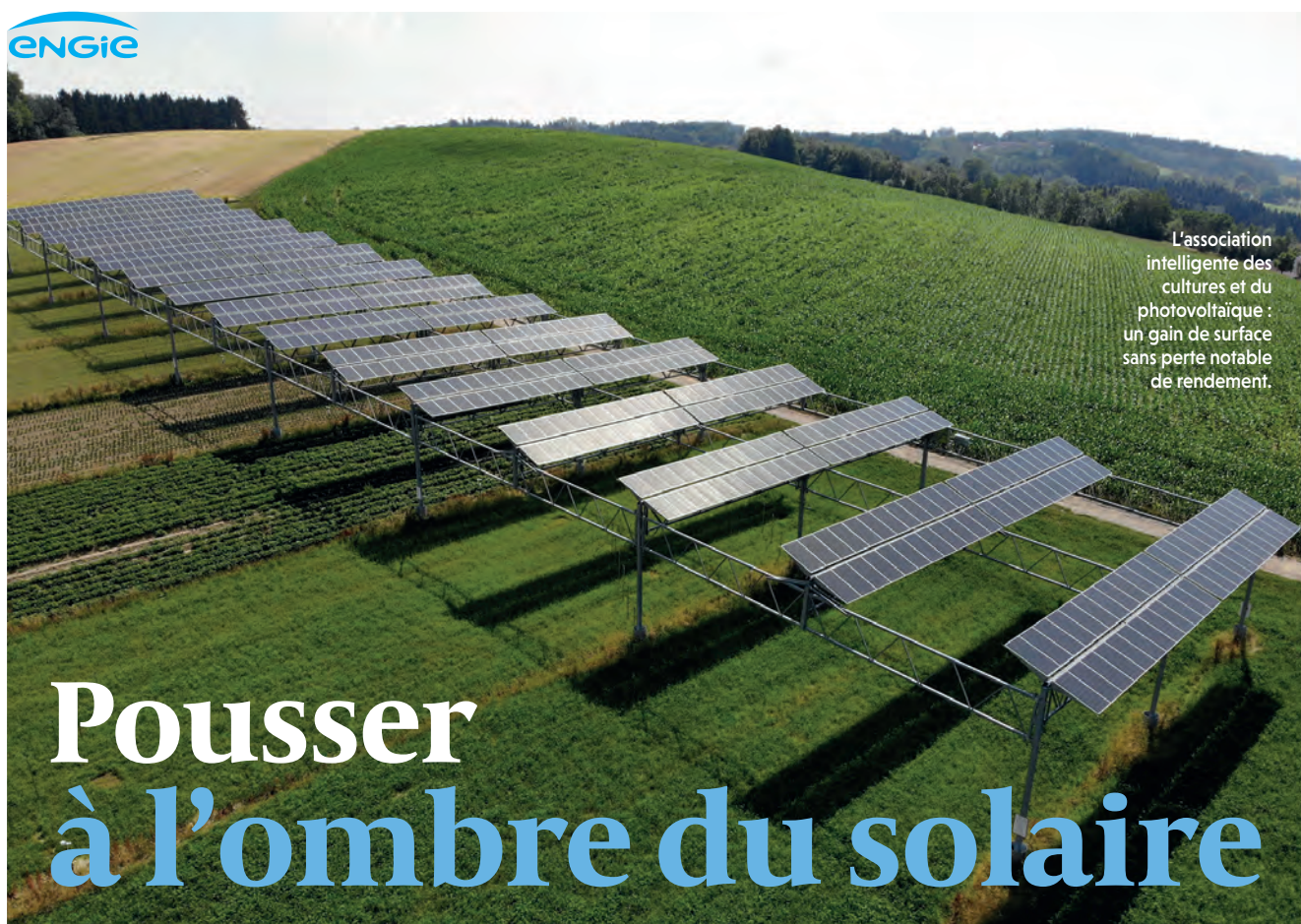
selon les régions. Cette énergie représente en moyenne 22 % des charges de production directes des exploitations de cultures sous serres chauffées. Pour ce projet, un partenariat a été monté avec l'université Wageningen, aux Pays-Bas, pour concevoir une serre autonome, notamment en énergie. Une serre test est équipée en capteurs d'eau, d'humidité du sol, de lumière, d'oxygène, de CO₂,... afin d'optimiser la culture sous contrainte de niveau d'émission de CO₂ 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 CO₂, 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.

Dans 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 agrivoltaiques 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 Hawaï, 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. Clandestino

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

Agrophotovoltaics : 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.

Fin 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 des 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 ! ”

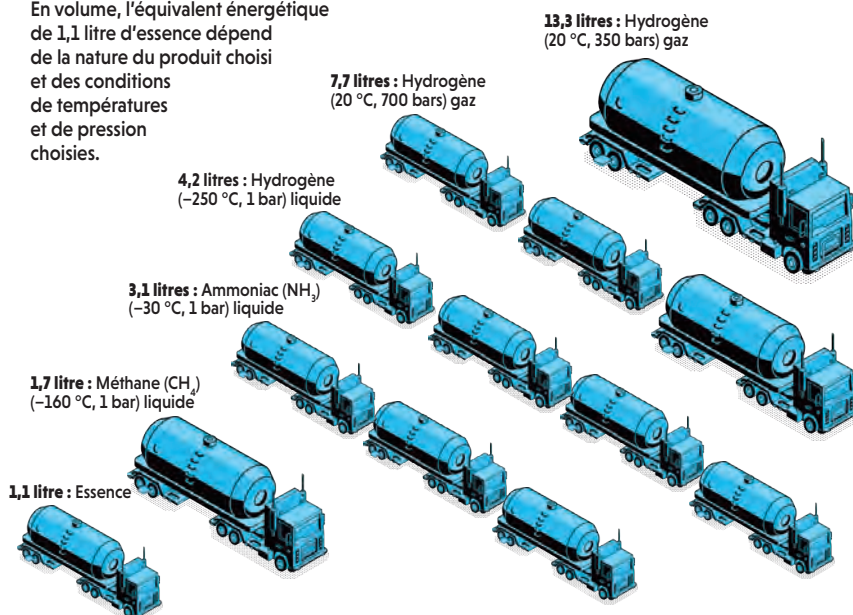
lignes à courant continu haute tension feront partie de la solution, mais à mesure que la distance augmentera, d'autres moyens de transport entreront en jeu. Ces derniers impliqueront la conversion de l'électricité en d'autres vecteurs énergétiques, comme l'hydrogène, l'ammoniac ou les hydrocarbures 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

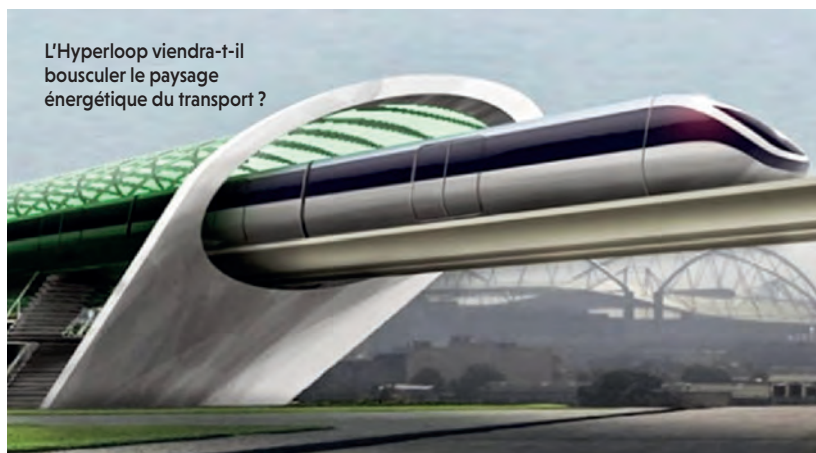
COMMENT TRANSPORTER 10 KILOWATTHEURES D'ÉNERGIE ?

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 tra-
vaillerons avec les deux !

LES SURPRISES DU FUTUR

L'éventuel impact sur la transition éner-
gétique de technologies en rupture reste dif-
ficile à prévoir. Assurément, certaines ne
manqueront pas d'apparaître dans les années
à venir et changeront la donne. La photosyn-
thèse 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 CO₂
en carburant peuvent s'avérer d'une aide pré-
cieuse 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 organi-
sations publiques et privées pour les dévelo-
per, 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 nou-
velles 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 Meyssonnier



POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

**COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION
DÈS MAINTENANT !**



N° 509 (mars 20)
réf. PL509



N° 508 (fév. 20)
réf. PL508



N° 507 (jan 20)
réf. PL507



N° 506 (déc. 19)
réf. PL506



N° 505 (nov. 19)
réf. PL505



N° 504 (oct. 19)
réf. PL504



N° 503 (sept. 19)
réf. PL503



N° 502 (août 19)
réf. PL502



N° 501 (juillet 19)
réf. PL501



N° 500 (juin 19)
réf. PL500



N° 499 (mai. 19)
réf. PL499



N° 498 (avr. 19)
réf. PL498

À retourner accompagné de votre règlement à :

Pour la Science – Service VPC – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email : pourlascience@abopress.fr



OUI, je commande des numéros de Pour la Science, au tarif unitaire de 9,90 €.

1 / JE REPORTE CI-DESSOUS LES RÉFÉRENCES à 5 chiffres correspondant aux numéros commandés :

1^{re} réf. _____ 01 x 9,90 € = 9,90 €
 2^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
 3^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
 4^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
 5^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
 6^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €

TOTAL À RÉGLER _____ €

Groupe Pour la Science – Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

Offre valable jusqu'au 31/12/2020 en France Métropolitaine uniquement. Pour l'export, rendez-vous sur notre site internet boutique.pourlascience.fr. Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques. Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Téléphone _____

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Carte bancaire

N° _____

Date d'expiration _____

Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) _____

Signature obligatoire :



**RETROUVEZ TOUS LES ANCIENS NUMÉROS SUR
BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR**

L'ESSENTIEL

> Les corvidés, perroquets et autres oiseaux ont des aptitudes cognitives de haut niveau, comme le raisonnement, la flexibilité mentale, la planification, la cognition sociale et l'imagination.

> Or leur cerveau est minuscule et dénué de cortex, contrairement à celui des mammifères, qui est plus

gros et dont le cortex assure justement ces capacités cognitives complexes.

> La taille du cerveau des oiseaux est compensée par une grande densité de neurones et des signaux neuronaux qui circulent plus vite entre les réseaux cérébraux.

L'AUTEUR



ONUR GÜNTÜRKÜN
professeur
de biopsychologie
à l'université de la Ruhr,
à Bochum,
en Allemagne



Une corneille noire
(*Corvus corone*).
Comme d'autres corvidés,
cet oiseau a de bonnes
aptitudes cognitives.