

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 ! ”

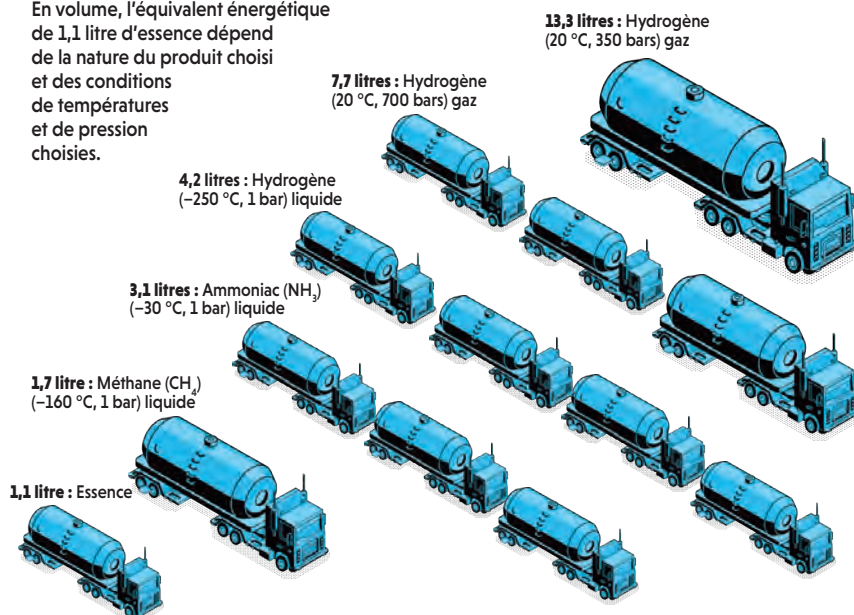
lignes à courant continu haute tension feront partie de la solution, mais à mesure que la distance augmentera, d'autres moyens de transport entreront en jeu. Ces derniers impliqueront la conversion de l'électricité en d'autres vecteurs énergétiques, comme l'hydrogène, l'ammoniac ou les hydrocarbures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

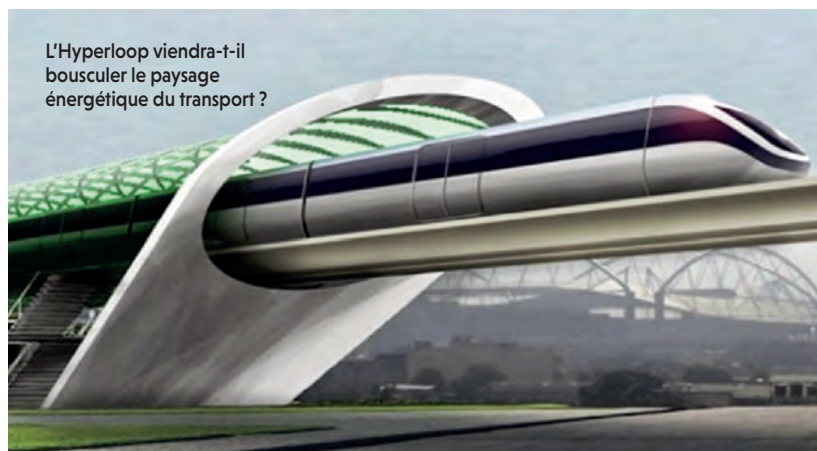
COMMENT TRANSPORTER 10 KILOWATTHEURES D'ÉNERGIE ?

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-
pper, 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