



Les défis technologiques du nouveau mix énergétique

Isabelle Moretti, Gwénaëlle Huet, Michael Webber, Michèle Azalbert, Cécile Prévieu

► To cite this version:

Isabelle Moretti, Gwénaëlle Huet, Michael Webber, Michèle Azalbert, Cécile Prévieu. Les défis technologiques du nouveau mix énergétique. 2019. hal-02188497

HAL Id: hal-02188497

<https://univ-pau.hal.science/hal-02188497>

Submitted on 18 Jul 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**CAHIER SPÉCIAL**

réalisé en partenariat avec



LES DÉFIS TECHNOLOGIQUES du nouveau mix énergétique

Développement ET NOUVEAU MIX ÉNERGÉTIQUE



© Engie / Galabru Florence

ISABELLE KOCHER
Directrice Générale
d'ENGIE

L'accès à une énergie décarbonée à bas coût et dont la consommation est optimisée et efficace est la clé d'un développement économique durable et harmonieux. Alors que les besoins énergétiques de l'humanité ne cessent de croître, le défi de l'énergie verte ne peut être relevé que si le progrès scientifique et l'innovation technologique sont mobilisés pour créer de nouvelles solutions. Chez ENGIE, nous avons la conviction que ces outils peuvent être mis à la disposition du plus grand nombre pour que chaque foyer, chaque entreprise mène à bien sa transition énergétique.

Nous partageons avec vous lecteurs, la passion et les prouesses scientifiques et technologiques de nos experts. Nous avons souhaité vous faire découvrir

comment, chez ENGIE, nous utilisons les avancées de la science pour répondre très concrètement à la question de l'énergie verte. Pour cela, nous vous invitons à un tour du monde, d'un campus universitaire de l'Ohio à une petite ville brabançonne, en passant par les geysers islandais et le désert d'Atacama, au Chili.

Vous le verrez, il n'y a jamais d'innovation s'appuyant sur une énergie ou une technologie unique. Il s'agit toujours d'une alliance entre plusieurs types d'énergie, des infrastructures de transport et de stockage adaptées, du numérique, de l'intelligence artificielle et, surtout, de l'intelligence humaine. Ces solutions doivent en outre toujours se fonder sur une analyse fine de la situation locale pour être plus pertinentes encore.

De notre position privilégiée d'innovateur de la transition énergétique, nous avons acquis la certitude que le monde de demain ne pourra assurer ses besoins qu'à travers d'un système plus décentralisé, plus adapté aux territoires et à leurs habitants et, *in fine*, plus respectueux de la planète. Chez ENGIE, nous avons l'ambition et l'envie de contribuer à un progrès harmonieux. ■



© Austin Business Journal

L'énergie

LE GRAND DÉFI DU XXI^E SIÈCLE

L'énergie apporte la lumière dans les ténèbres et la chaleur dans la froideur. Elle préserve nos aliments, assainit notre eau, rend nos villes plus sûres et nous fait parcourir le monde. L'énergie est le bâtisseur invisible de nos civilisations. Presque toutes les révolutions sociales, politiques, scientifiques et culturelles de ces derniers siècles sont, au moins partiellement, reliées à une meilleure maîtrise de l'énergie.

C'est encore le cas aujourd'hui. Nous sommes au milieu d'une révolution énergétique à plusieurs visages. Certains la pensent en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre; d'autres veulent surtout améliorer leur accès à l'énergie.

Les enjeux de cette transition sont majeurs sur la santé, les écosystèmes, l'économie et même les libertés individuelles. Prendre les bonnes décisions impose donc un regard lucide sur leurs possibles conséquences pour des milliards de personnes.

Parce que les problèmes comme le réchauffement climatique ignorent les frontières, le monde doit faire face collectivement. Il ne s'agit rien moins que de choisir comment et où investir les milliards de dollars nécessaires à la réinvention d'un système énergétique propre, abordable et fiable. Ces décisions sont urgentes, pour espérer limiter les effets du changement climatique qui aura, lui, des effets sur des milliards de personnes pendant des dizaines d'années. C'est le grand défi du XXI^e siècle.

Pour le relever, nous devons tenir compte des aspects démographiques, technologiques et environnementaux qui façonnent le monde de l'énergie. Ceux liés à la démographie (augmentation de la population, croissance économique,

urbanisation...) concourent tous à une demande accrue en énergie. Les technologies seront-elles au rendez-vous ?

Trois évolutions majeures le laissent espérer. D'abord, nos sociétés deviennent plus sobres: nous utilisons moins d'énergie pour le même résultat que ce soit pour éclairer nos maisons, nous déplacer, fondre l'acier... Ensuite, l'information, désormais omniprésente, et peu chère améliore l'efficacité énergétique, en particulier des bâtiments. Enfin, la troisième tendance lourde est la décentralisation. L'électricité n'a plus besoin d'être produite par de grandes et lointaines centrales; elle peut l'être par des panneaux solaires sur notre toit. Notre système énergétique devient plus intelligent, plus rapide et meilleur marché. Une bonne nouvelle!

CHANGER DE RECETTES

Ensemble, ces tendances répondent aux objectifs en matière de baisse des émissions de carbone. Mais rendre l'énergie accessible à tous est aussi important que de la rendre propre et durable. C'est un problème complexe, à nombreuses facettes, et tout effort pour le résoudre nécessitera du temps et beaucoup d'innovation.

Les vieilles recettes qui nous ont mis au pied du mur – produire plus, bétonner plus, consommer plus – sont obsolètes. Nous avons besoin d'une énergie propre pour l'offrir à tous sans polluer la planète. Nous devons aussi faire évoluer notre modèle et le faire passer de la «production d'énergie» à un «service énergétique»: nous voulons nous éclairer, nous chauffer, nous déplacer, et non plus acheter – ou vendre – de l'énergie.

En fin de compte, nous avons besoin d'une combinaison de nouveaux modes de production, d'un meilleur accès à l'énergie, de solutions plus intelligentes en phase avec les besoins humains et environnementaux. C'est seulement à ces conditions que nous pourrons changer de paradigme énergétique et apporter plus... à plus.

Nous sommes engagés dans cette voie. Ce changement est indispensable. Il sera lent, mais nous avons tous un intérêt dans le résultat. Il y a beaucoup de travail à faire, tout doit être mis en œuvre et tout le monde a un rôle à jouer! ■



Se réappropri l'énergie

Depuis la découverte du feu, l'énergie accompagne de façon déterminante le développement de l'activité humaine. Elle est désormais omniprésente dans notre quotidien : on ne parle presque plus que par téléphone et, même quand on pédale, c'est sur un vélo... électrique ! Mais en parallèle, et à cause de cette importance, les médias bruissent de prévisions, parfois sombres, concernant justement l'énergie et notre façon de l'utiliser.

Il y a quelques années, les premiers signaux d'alerte ont retenti et attiré l'attention sur la consommation effrénée d'énergie. D'abord, ce fut sur la finitude des réserves naturelles d'énergie fossile : les annonces répétées de « oil peak » et le « gas peak » à des horizons assez proches, assorties des augmentations des prix de l'énergie attendues, n'ont pourtant pas ralenti notre consommation. Même les chocs pétroliers successifs n'ont pas

freiné la demande. Le pétrole n'est pas très cher, la population mondiale augmente et une partie d'entre elle sort de la précarité ; les voitures consomment moins, mais elles sont plus nombreuses.

Puis vinrent les alertes sur la précarité énergétique, nos déchets, la qualité de l'air... L'augmentation du CO₂ atmosphérique... Autant de problèmes pointés du doigt. La diminution de nos émissions anthropiques paraît nécessaire à beaucoup, en particulier à la communauté scientifique, mais certains opposent « énergie peu polluante » et « énergie peu chère », voire « énergie pour tous » et « énergie propre ».

PROPRE ET ACCESSIBLE

Notre défi est donc de rendre accessible (enjeu social et économique) une énergie propre (enjeu environnemental). Un milliard d'humains ne peuvent toujours pas s'éclairer quand la nuit tombe, des millions de femmes passent leur journée à ramasser du bois de chauffage, des milliers d'étudiants

SOMMAIRE

4 SE RÉAPPROPRIER L'ÉNERGIE

Isabelle Moretti, Gwénaëlle Huet, Cécile Prévieu,
Michèle Azalbert et Michael Webber

6 POUR ÉVITER LES DÉPLACEMENTS DE POLLUTION

Jan Mertens, Anne Prieur-Vernat et Isabelle Moretti

8 UN CAMPUS PLUS SOBRE EN ÉNERGIE

Olivier Racle, Béatrix de la Bretesche et Mures Zarea

10 UNE FÊTE DES VOISINS... ÉLECTRIQUE

Cathy Crunelle et Étienne Gehain

12 LES DÉFIS DE LA GÉOTHERMIE

Laurent Escaré, Marc Perreux et Delphine Patriarche

15 PASSER DU DIESEL AUX ÉNERGIES RENOUVELABLES

Pietro Raboni et Matteo Ferraro

18 DE L'OR VERT DANS LE PURIN

É. Le Cadre, C. Richard, Ph. Calvez, O. Guerrini, M. Kouas, S. Vaneph,
S. Frédéric, O. Renvoisé et D. Terrié

20 LILIBOX : LA BATTERIE DE STOCKAGE DU GAZ VERT

Laurent Benoît, Philippe Garrec, Damien Van Oost,
Claudio Bucella et Delphine Patriarche

22 L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE AU SERVICE DE L'ÉOLIEN

Philippe Calvez

24 DES ÉOLIENNES HORS-SOL

Olivier Van Oost, Thomas Lasserre, Raphaël Genin et Dominique Moniot

26 ÉNERGIE ET QUALITÉ DE L'AIR PEUVENT-ELLES FAIRE BON MÉNAGE ?

Manon Cottet-Providence et Martial Archenault

28 PACA, UNE RÉGION IDÉALE POUR L'HYDROGÈNE RENOUVELABLE

Olivier Machet

30 CES DÉFIS QUE NOUS ALLONS RELEVER !

Jan Mertens



MICHÈLE AZALBERT
Directrice de la BU Hydrogène



CÉCILE PRÉVIEU
Directrice de Storengy

travaillent à la lueur des réverbères... Les villages isolés et les îles restent dépendants de groupes électrogènes fonctionnant au diesel et produisant une électricité chère et carbonée. La qualité de l'air, en particulier dans les grandes villes encore dépendantes du charbon, est mauvaise et, tout comme Londres et l'Angleterre au siècle dernier, Pékin et la Chine cherchent à émettre moins de particules.

Sommes-nous prêts à réviser nos modèles de consommation et de production d'énergie? Comment produire une énergie plus propre pour tous?

Pour compliquer le débat, certains confondent «pollution» et «émission de CO₂». Les images des conditions d'exploitation dans les mines dont sont extraits les matériaux nécessaires à la transition écologique évoquent plus *Germinal* que la Silicon Valley. Au milieu de ces controverses, la presse se fait souvent l'écho de solutions révolutionnaires qui rendraient caduques tous ces débats en transformant soleil, vent et marée en énergie infinie, propre et quasi gratuite...

DÉMÊLER LE VRAI DU FAUX

Difficile pour les citoyens, même bien informés, de démêler le vrai du faux, les utopies et les fictions des solutions opérationnelles aujourd'hui et de celles qui compteront demain. Ce cahier, fruit d'une nouvelle collaboration entre *Pour la Science* et ENGIE se propose non pas de faire le tour de la question, c'est impossible en quelques pages, mais de montrer quelques-unes des solutions qui existent et que nous implantons et améliorons au quotidien. Elles couvrent plusieurs domaines d'activités: la production d'énergie, son acheminement et son stockage, mais aussi son utilisation optimale.

À côté de l'énergie, les outils digitaux font aussi désormais partie de notre quotidien. Ils aident grandement à améliorer l'efficacité de nos systèmes et à les rendre plus sobres en évitant, entre autres, de tout surdimensionner faute d'une bonne connaissance de l'usage. Mais de la «connaissance des usages» à celle «des usagers», la frontière est ténue et nourrit beaucoup de suspicions. L'information a une valeur, pour les consommateurs comme pour les marchés. Comment vendre, ou donner, à son voisin l'électricité que l'on produit en surplus, sans capacité de stockage, si l'on ne connaît ni ses besoins ni sa consommation?

Diminuer notre impact environnemental, c'est d'abord le connaître et avoir des outils pour le quantifier, que ce soit pour un objet ou un service. Et surtout, cette évaluation ne doit pas se limiter au

simple usage, mais bien couvrir l'ensemble des impacts, du «berceau à la tombe».

Les énergies renouvelables rassemblent l'électricité hydroélectrique, encore prépondérante même si elle stagne, l'éolien et le solaire, tous deux en forte croissance, les énergies de la mer (vagues, marées...) qui pour certaines peinent à décoller, la géothermie, la biomasse et les gaz verts, biométhane et hydrogène en tête. Certaines de ces sources d'énergie, mais pas toutes, sont intermittentes, et augmenter leur production est important. Par exemple, pour l'éolien, c'est en s'éloignant des côtes maritimes, voire en s'envolant, qu'on améliorera ce rendement. Prendre la chaleur dans le sol semble une bonne idée... oui mais... la chaleur ne suffit pas. Pour en faire de l'électricité, de la vapeur, en grande quantité, est indispensable au fonctionnement des turbines. Et *quid* des fluides exploités, souvent très corrosifs?

Au-delà de la production d'énergie et des améliorations des rendements techniques, des actions concrètes du côté des usages sont nécessaires. Ainsi, comment concilier qualité de l'air et facture énergétique des bâtiments du tertiaire, comme les piscines municipales et les écoles? Avec une meilleure compréhension des phénomènes en jeu et surtout de l'usage de ces bâtiments!

UN GUIDE AU PAYS DE L'ÉNERGIE

Les cerises en hiver... beaucoup y ont renoncé et privilégient les circuits courts et la saisonnalité. On peut en faire autant pour l'énergie, en consommant l'électricité que l'on produit soi-même ou bien celle de ses voisins. C'est désormais aussi possible avec le gaz dont la production à partir de déchets végétaux peut être accélérée grâce à un peu de *high-tech* dans les méthaniseurs. Ce gaz est aussi stockable, sous forme liquéfiée, pour un usage différé.

Les transports sont souvent présentés comme le secteur le plus dépendant des hydrocarbures, mais la situation évolue vite avec des solutions propres qui se développent: biogaz, électricité, hydrogène... Ariane a toujours décollé à l'hydrogène. Aujourd'hui, des trains circulent grâce à ce carburant et complètent les voitures à hydrogène ou à gaz (liquéfié ou comprimé) qui sont devenues une banalité dans certains pays. Des flottes entières de bateaux fonctionnent maintenant au gaz et n'émettent plus de particules fines. Quant à la mobilité électrique, douce ou moins douce, on ne la présente plus, elle prospère!

Ce cahier spécial est une sorte de guide pour votre appropriation des solutions, celles existantes et celles en développement. Bonne lecture! ■

Pour éviter les déplacements de pollution

L'analyse du cycle de vie est un outil indispensable pour évaluer de façon complète la durabilité des technologies de la transition énergétique. L'exemple du stockage de l'électricité le démontre.

Récemment, vous avez acheté un nouveau smartphone et avez confié l'ancien pour qu'il soit recyclé. Savez-vous que le temps qu'il a passé dans vos mains n'est qu'une petite partie de son cycle de vie ? Et que ce n'est pas celle qui a le plus fort impact environnemental ? Ce qui est valable pour un smartphone l'est aussi pour tous les objets qui nous entourent, et même pour les services que nous utilisons.

Aussi, en parallèle du désir de modes de vie durables, a-t-on assisté au développement d'un grand nombre d'outils d'évaluation environnementale. Ils mesurent la performance environnementale et révèlent les possibles améliorations. Certains prennent en compte tous les impacts environnementaux (réchauffement climatique, santé humaine, disponibilité des ressources...) générés durant tout le cycle de vie des produits ou des procédés, d'autres se concentrent sur quelques-uns.

La méthode d'évaluation des impacts environnementaux la plus utilisée, dans le monde académique et industriel, est l'analyse du cycle de vie (notée ACV). Elle intègre les consommations de ressources ainsi que les émissions (les rejets de matières, les modifications de l'environnement...) « du berceau à la tombe ». En outre, l'ACV prend en compte une grande diversité d'impacts (changement climatique, acidification, toxicité...). Ces deux caractéristiques de l'ACV évitent les « déplacements de pollution ». De quoi s'agit-il ? Ils consistent à réduire un impact environnemental à une étape du cycle de vie pour créer ou aggraver un autre

LES AUTEURS

JAN MERTENS,
ANNE PRIEUR-VERNAT
ET ISABELLE MORETTI,
ENGIE

problème à une autre étape du cycle de vie et/ou sur un autre impact. C'est le cas lorsqu'un pays délègue à d'autres l'extraction de certains matériaux car les procédés sont polluants. On ne fait alors que déplacer les problèmes. Afin de garantir une transition énergétique durable, l'identification des déplacements de pollution est donc cruciale pour évaluer les nouvelles technologies. L'étude que nous avons menée avec Luis Miguel Oliveira, alors à la Vrije Universiteit Brussel, en Belgique, l'illustre.

En 2015, nous avons évalué la performance environnementale de plusieurs technologies de stockage d'électricité (mécanique, électrochimique, hydrogène...) pour des applications connectées au réseau. À l'aide de la méthodologie standardisée de l'ACV, nous avons analysé les impacts de la construction, de la fin de vie et de l'usage de chacun des

L'analyse du cycle de vie (ACV) prend en compte l'ensemble du cycle de vie d'un produit ou d'un service ainsi que plusieurs catégories d'impacts environnementaux. On évite ainsi les déplacements de pollution.

L'OBJECTIF

est d'évaluer tous les impacts environnementaux d'une technologie, d'un produit, d'un service...

TOUTES LES ÉTAPES
du cycle de vie sont prises en compte.

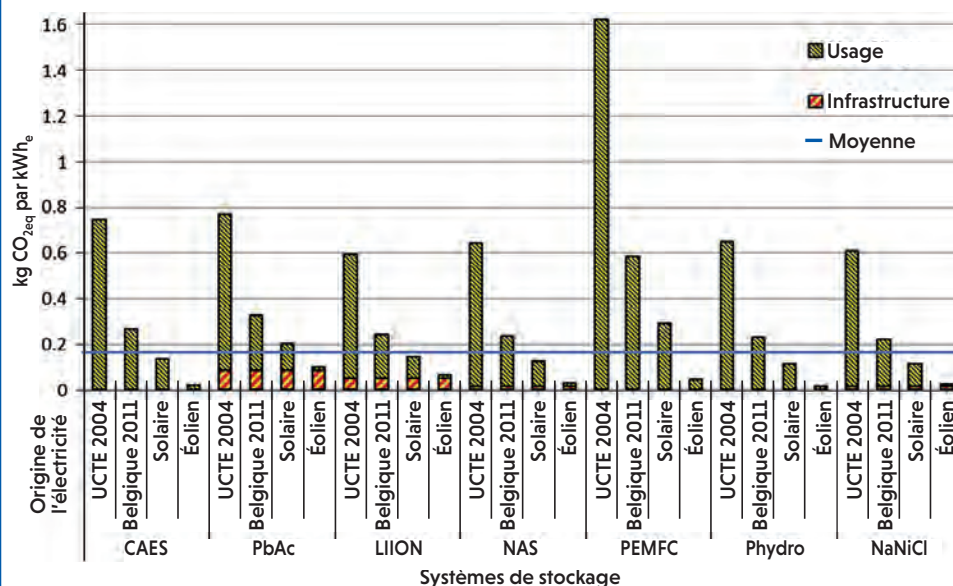
TOUTES LES CATÉGORIES D'IMPACT
sont évaluées.

UNE MÉTHODOLOGIE NORMALISÉE

(ISO 14040 et 14044) permet de répondre aux attentes croissantes des parties prenantes (clients, pouvoirs publics, ONG...), vis-à-vis des résultats d'ACV.



QUEL IMPACT ENVIRONNEMENTAL POUR LE STOCKAGE DE L'ÉLECTRICITÉ ?



Les contributions au changement climatique (en kilogrammes d'équivalent CO₂ par kilowattheure) du stockage d'énergie, que ce soit pour les infrastructures (en rouge), y compris la fin de vie, ou la phase d'usage (en vert) varient selon la technologie (air comprimé, CAES; batteries au plomb PbAc, lithium-ion LIION, sodium-soufre NAS et sodium chlorure de nickel NaNiCl; hydrogène produit par électrolyse et son usage dans une pile à combustible à membrane échangeuse d'ions, PEMFC; pompage hydraulique, Phydro) et l'origine de l'électricité stockée (le mix de production moyen dans l'Union européenne en 2004 UCTE 2004, le mix belge en 2011, le solaire et l'éolien).

© L. Oliveira et al.

systèmes (voir la figure ci-dessus). Les systèmes de stockage d'électricité sélectionnés représentent des installations réelles en termes de capacités, puissance nominale, durée de vie, technologie et application.

UNE ÉTUDE DE CAS

Pour les impacts environnementaux évalués sur le changement climatique, la toxicité humaine, la formation de particules et l'épuisement des ressources fossiles, que constate-t-on? Pour toutes les technologies et les scénarios de mix électriques (sauf le stockage d'électricité d'origine éolienne dans des batteries au plomb ou lithium-ion), les effets sur le changement climatique lié à l'usage sont bien supérieurs à ceux dus à la fabrication des infrastructures. Les systèmes de stockage par pompage hydraulique (Phydro sur la figure ci-dessus), par air comprimé (CAES), et dans les batteries sodium-soufre (NAS) et sodium chlorure de nickel (NaNiCl) sont les plus performants avec de faibles conséquences quelles que soient les catégories d'impacts lorsqu'ils sont alimentés par des éoliennes.

Bien sûr, la performance environnementale des systèmes de stockage d'énergie rechargeables est principalement dépendante de leur efficacité et est directement reliée au mix énergétique associé à son usage. La moins bonne performance des piles à combustible à membrane échangeuse d'ions (PEMFC), dans le cas des mix européen et belge, est liée au faible rendement de conversion de l'électricité (carbonée) vers l'hydrogène, puis de nouveau vers l'électricité. Lorsque des mix de production d'énergies renouvelables comme l'éolien sont utilisés, la pertinence d'aspects techniques comme la capacité,

la durée de vie, le rendement et la capacité de redistribution sur le réseau se révèlent les plus importants. Par exemple, l'hydrogène permet de stocker l'électricité sur une plus longue durée que les systèmes utilisant des batteries.

ENGIE accorde une grande importance à l'évaluation des impacts d'une technologie donnée au moyen de l'ACV, ce qui est un prérequis incontournable pour espérer réduire les effets environnementaux de ses activités.

Tous les projets pilotes testant de nouvelles technologies de l'énergie impliquent une ACV, par ailleurs indispensable pour être éligible à un financement européen. Dans ce cadre, il convient de démontrer que la technologie considérée présente une amélioration significative d'un point de vue environnemental. L'impact sur le changement climatique, c'est-à-dire l'effet de la technologie développée sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, N₂O...) est un aspect important, mais n'est pas le seul!

C'est la raison pour laquelle la méthodologie de l'ACV doit être appliquée, car elle inclut nombre d'autres impacts environnementaux (toxicité, usage des sols, empreinte eau, épuisement des ressources minérales...). Par ailleurs, nous l'avons dit, elle révèle les possibles déplacements d'impacts environnementaux.

Enfin, une comparaison de l'ordre de grandeur des contributions des différents procédés à chaque étape du cycle de vie d'une technologie à l'impact total est particulièrement intéressante. En effet, les efforts de réductions de l'impact environnemental total pourront (au moins dans un premier temps) se concentrer sur ces étapes ou procédés au plus fort impact environnemental. ■

RÉFÉRENCE

L. Oliveira et al., *Environmental performance of electricity storage systems for grid applications, a life cycle approach, Energy Conversion and Management, vol. 101, pp. 326-335, 2015.*

Un campus plus sobre en énergie

À Columbus, États-Unis, l'université a décidé d'améliorer la gestion de l'énergie de son campus. Un immense chantier prévu sur 50 ans.

LES AUTEURS
OLIVIER RACLE,
BÉATRIX DE LA BRETESCHE
ET MURES ZAREA
ENGIE

Bienvenue à Columbus, capitale de l'État de l'Ohio, dans le nord-ouest des États-Unis. À quelques blocs du quartier italien, vous ne pourrez manquer l'un des établissements les plus imposants de la ville, l'université d'État de l'Ohio, l'un des plus grands campus des États-Unis. Fondé en 1870, l'établissement rassemble des centaines de bâtiments, d'âges divers. Au niveau énergétique, ce n'est donc pas ce qui se fait de mieux. Les autorités ont donc décidé de réagir!

Ainsi, au terme de deux ans d'appel d'offres impliquant une quarantaine de parties prenantes, ENGIE associé à parts égales avec Axiom Infrastructure US, une société de gestion de placements à long terme, a remporté au printemps 2017 une concession de 50 ans d'une valeur de 1,165 milliard de dollars (environ 1,1 milliard d'euros) pour assurer la gestion durable de l'énergie de l'université. Le recours à un consortium issu du secteur privé est une première dans le monde académique américain. Concrètement, que va-t-il se passer?

UN PLAN D'ACTION AMBITIEUX

Le contrat signé recouvre quatre volets. Le premier est le déploiement de systèmes de comptage communicants pour l'ensemble des bâtiments. L'objectif est d'obtenir des renseignements sur la consommation énergétique de chacun d'entre eux. ENGIE implante en outre la solution Claradomus qui permettra à l'administration de bénéficier d'un tableau et d'indicateurs par bâtiment de façon à disposer d'informations de qualité sur le profil énergétique du campus.

Le deuxième volet est l'exploitation, la maintenance, la rénovation et l'optimisation de l'ensemble des infrastructures de production et de distribution d'énergie (vapeur, eau réfrigérée, gaz et électricité).



L'UNIVERSITÉ EN CHIFFRES

- 490** bâtiments
- 100 000** personnes par jour, dont environ **60 000** étudiants
- 1 300** lits d'hôpital
- 14 000** lits en résidence universitaire
- 3** stades, soit **120 000** sièges
- 3** sous-stations à haute tension
- 676** gigawattheures d'électricité consommées chaque année
- 113** milliards de mètres cubes de gaz naturel consommés par an
- 110** mégawatts en demande de pointe
- 849** millions de kilowattheures de vapeur produits par an
- 115** millions de dollars de dépenses annuelles



© Engie

Ensuite viendra le temps du déploiement d'un ambitieux plan d'action pour l'amélioration de l'efficacité énergétique devant conduire à une réduction de la consommation de 25% dans les 10 premières années du contrat.

Enfin, un nouveau centre d'innovation et de recherche sera construit. Il inclura un laboratoire où les professeurs, les étudiants, les anciens élèves, les entrepreneurs, les experts du secteur de l'énergie et les chercheurs d'ENGIE collaboreront dans des domaines comme les systèmes intelligents d'énergie, les énergies renouvelables et la mobilité verte.

UN PROJET PIONNIER

Les mécanismes de décision d'investissement prévoient qu'ENGIE proposera des actions que l'université évaluera avant de les avaliser. En choisissant de s'appuyer sur un acteur privé et sur son expertise pour orienter ses investissements d'efficacité et de sobriété énergétique, l'université peut ainsi se concentrer sur sa mission académique. Pour ENGIE, c'est l'opportunité d'optimiser la gestion de l'énergie avec une vision globale du territoire et de ses possibilités.

Le parc Oval, face à la bibliothèque Thompson de l'université d'État de l'Ohio, à Columbus, est traversé en tous sens de nombreuses allées. Une allégorie du réseau énergétique d'ENGIE entend améliorer ?

MODE D'EMPLOI

Comment réduire d'un quart la consommation énergétique d'un campus universitaire en dix ans et en trois étapes ?

1. LE DIAGNOSTIC

Dès l'appel d'offres, un audit a été conduit sur l'un des bâtiments significatif et représentatif de l'université (le laboratoire Dreese) pour identifier près d'une trentaine d'actions (éclairage par LED, récupération de l'eau de pluie...) propres à réduire la consommation énergétique (gaz, vapeur, eau glacée et électricité). L'université a pris en compte cet audit dans le cadre du processus de sélection.

2. L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

À partir de ce diagnostic, les équipes d'ENGIE et de l'université ont commencé à mettre en œuvre des actions concrètes pour réduire la consommation énergétique, en agissant tant sur la consommation que sur la production d'énergie (rénovation, récupération de la chaleur...). Cet engagement d'ENGIE repose également sur un principe de bonus/malus financier calculé sur le respect des délais et l'atteinte des performances chiffrées. C'est une incitation à faire vite et bien !

3. RÉDUIRE L'EMPREINTE CARBONE

Une fois l'efficacité énergétique du campus améliorée de façon significative, ENGIE pourra proposer l'introduction d'énergies renouvelables afin de réduire l'empreinte carbone du campus.

À ce titre, l'approche de l'université est un précurseur d'une tendance de fond. En effet, les problématiques auxquelles font face les territoires sont de plus en plus complexes et interdépendantes. À ces défis ne peuvent répondre que des solutions systémiques, dont la mise en œuvre est facilitée par le numérique, les technologies de connectivité et les traitements de données.

La devise de l'université est *Disciplina in civitatem*, soit « éducation pour la citoyenneté ». Ses choix en matière énergétique le prouvent ! ■

Une fête des voisins... électrique

Et si vous collaboriez avec vos voisins en matière d'électricité ? À l'instar du partage de voiture ou de logement, vous pourriez le faire avec vos panneaux solaires, ou la voiture électrique de votre voisin ! Une idée folle ? Pas vraiment ! Explication...



Plantons le décor: une rue, des maisons... Sur le toit de l'une d'elles sont installés des panneaux solaires. Le propriétaire bénéficie pleinement de l'énergie au moment où elle est produite. Mais que faire de cette énergie en son absence, ou lorsqu'elle excède ses besoins ? Le surplus est le plus souvent injecté dans le réseau électrique, mais ne pourrait-il par profiter à la voisine, sans installation solaire ? Et à d'autres encore ? De la sorte, une communauté d'énergie se créerait. Ce type d'initiative n'est pas une utopie : elle est de plus en plus fréquente.

De fait, de telles communautés d'énergie sont un formidable moyen de faire participer les citoyens à la transition énergétique, sans qu'ils soient forcément propriétaires ou en capacité d'investir dans une installation de production d'énergie. Autre avantage : l'augmentation de la pénétration des systèmes de production d'énergie renouvelable décentralisés.

Seul problème, ces communautés d'énergie ne sont pas légalement autorisées... Cependant, les choses bougent. L'Europe a en effet clos fin 2018 les négociations sur tous les aspects du nouveau cadre législatif sur l'énergie (le pack *Clean Energy for All Europeans*) et les nouvelles règles seront formellement adoptées début 2019. Y sont notamment définis les concepts, droits et devoirs, des communautés d'énergie locales ou renouvelables. En France, l'application de ces concepts, sous la forme

d'autoconsommation collective, est en débat à l'heure où nous écrivons ces lignes.

Notre exemple est une communauté purement solaire. Or, d'autres éléments seraient utiles pour apporter de la flexibilité énergétique et optimiser les flux. Il s'agirait de rendre la communauté la plus autonome possible, en favorisant l'autoconsommation et en stockant l'excédent d'énergie produite pour la restituer en cas de besoin. C'est ce qu'ENGIE a voulu démontrer par le biais du projet pilote *Peer2Peer Energy Communities* démarré en 2016.

DEVANCER LA RÉGLEMENTATION

Au moment des premières réflexions sur ce concept, ce projet visait à créer et gérer des communautés d'énergie avec comme critère d'optimisation la maximisation de l'utilisation directe de l'énergie solaire produite au sein de la communauté et ce, sans contraindre le réseau électrique. L'élément apportant de la flexibilité était, en première instance, la batterie stationnaire, équipant une série de participants.

Ce projet s'est déroulé en Belgique. L'absence de cadre légal autorisant les communautés d'énergie dans ce pays n'a alors pas entravé le projet, car la validation recherchée était sur le plan de la faisabilité technique.

Au total, ce sont environ 70 participants qui ont été recrutés dans deux communautés d'énergie distinctes. La première consiste en une quinzaine de voisins, habitant la même rue d'Oud-Heverlee, une commune rurale dans la

campagne flamande. Cette rue, initialement occupée par trois fermes, s'est progressivement peuplée d'une quarantaine de maisons, dont certaines, modernes, sont équipées de pompes à chaleur, d'autres de véhicules électriques. Faute de renforcement du réseau électrique, la qualité de la fourniture d'énergie est limitée. Le concept de communauté d'énergie s'applique tout naturellement ici, fort de l'ancrage local et de la proximité physique des participants.

UNE COMMUNAUTÉ VIRTUELLE

La deuxième communauté est constituée de participants dispersés sur le territoire belge. Le choix a été fait de renoncer à la proximité géographique pour recruter des maisons disposant pour moitié d'entre elles d'une installation solaire afin d'obtenir une production conséquente, à l'image de ce que pourrait représenter le futur du paysage énergétique résidentiel. Dans ce cas, le flux d'énergie est regardé à la frontière entre la maison et l'extérieur, et l'optimisation est réalisée comme si les maisons étaient sur la même portion de réseau électrique: la communauté créée est virtuelle.

Dans ces deux communautés, on distingue trois types de membres: de simples consommateurs, des consommateurs équipés d'une installation photovoltaïque (ou consommateurs) et des consommateurs équipés d'une batterie stationnaire. Près de dix batteries différentes ont été testées, de capacités et de marques diverses.

Point important: le «simple» consommateur, dans une communauté qui maximise l'autoconsommation collective, a un rôle au moins aussi important que le producteur d'énergie solaire. En effet, pour maximiser l'autoconsommation et éviter d'injecter de l'électricité d'origine solaire sur le réseau, il est nécessaire de la consommer au moment où elle est produite. C'est la coïncidence entre la production et la consommation qui est la clé du succès.

Peu d'équipement fut nécessaire: des capteurs connectés à un petit dispositif communicant tenant dans la paume de la main. Ces capteurs recueillent l'information utile de la maison. Faute de compteur intelligent, les consommateurs ont été équipés d'un petit module de lecture optique posé sur leur compteur d'électricité, afin de renseigner en

LES AUTEURS
CATHY CRUNELLE,
LABORELEC
ET ÉTIENNE GEHAIN,
ENGIE

temps réel l'état de consommation de la maison. Les consommateurs disposent du même dispositif agrémenté d'un capteur complémentaire posé sur leur installation photovoltaïque. Sont dès lors disponibles l'information de l'état énergétique de la maison (en production d'énergie excédentaire ou en consommation nette du réseau électrique) ainsi que la production solaire brute. Bien que cette dernière ne soit pas indispensable pour gérer les flux d'énergie, elle est appréciée des participants. Enfin, pour les consommateurs disposant de batteries, un module pour les contrôler a dû être développé spécifiquement.

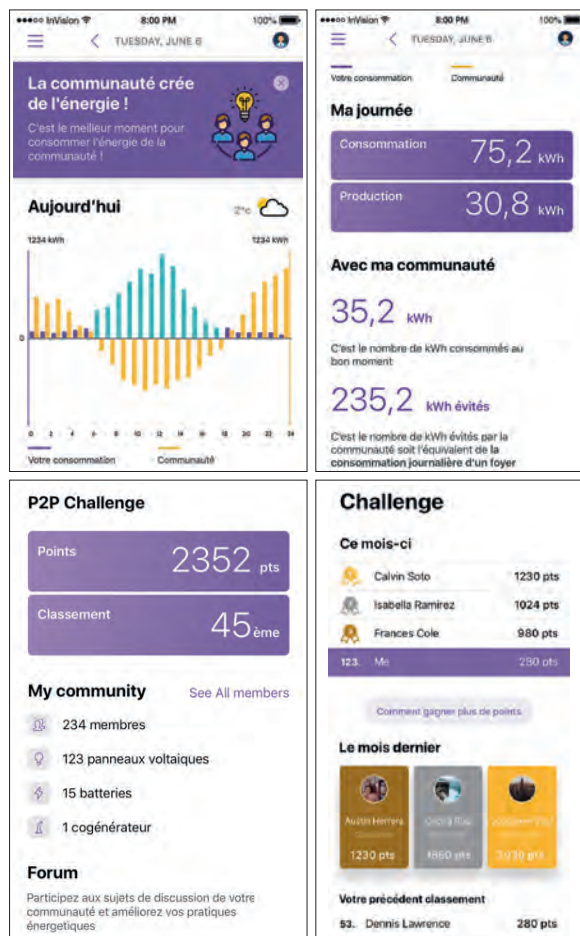
En complément, une application mobile permet aux participants de vivre pleinement l'expérience et de suivre la vie (énergétique) de la communauté.

Quelles leçons retenir de cette expérience? Simple de prime abord, elle a révélé beaucoup de détails à régler, ne serait-ce qu'administrativement. En premier lieu, une haute qualité de remontée des données est cruciale afin de prendre les bonnes décisions de pilotage des équipements flexibles. Ensuite,

l'interopérabilité avec les divers équipements risque d'être un facteur limitant de création de communauté (ou d'acceptation de participants). Beaucoup de solutions seront proposées et une sélection naturelle s'ensuivra alors inévitablement fondée sur des aspects techniques mais aussi sur les fonctionnalités de gestion de la communauté.

Les communautés d'énergie sont balbutiantes. Partager, produire ou consommer de l'énergie locale sera à l'avenir une évidence. Ces communautés participeront au renversement des rôles traditionnels dans le paysage énergétique, en le tonifiant et en l'ouvrant au plus grand nombre. Être acteur de la transition est l'affaire de toutes et tous.

C'est pour se préparer au rôle de gestionnaire de flux d'énergie au sein de communautés et soutenir le mouvement qu'ENGIE travaille sur ce type de projet, d'autres étant également à l'étude, fondés sur des éléments de flexibilité différents ou certains facilitateurs, comme la Blockchain. Préparez-vous : dans une fête des voisins, on apporte aujourd'hui une bouteille et quelques victuailles, demain on viendra aussi avec son électricité! ■



Grâce à une application mobile ludique, vous suivez votre activité énergétique et celle de la communauté au quotidien (l'énergie fournie aux voisins, celle récupérée...). Un forum de discussion et un concours, mensuel, du meilleur membre met de l'animation dans la communauté autour de questions énergétiques... ou d'autres !

Les défis de la géothermie

L'exploitation de la chaleur du sous-sol bénéficie de nouvelles innovations. Grâce à elles, la géothermie a de beaux jours devant elle.

© Loïc Mangin

A 60 kilomètres à l'est de Reykjavik, en Islande, près de Bláskógabyggð, on peut admirer Geysir (*voir la photographie ci-dessus*), le geyser qui a donné son nom à tous les autres. Par intermittence, de l'eau chaude et de la vapeur, à hautes températures et pressions, sont projetées à plusieurs dizaines de mètres de hauteur. On peut utiliser cette énergie venue des tréfonds du sous-sol, une ressource que l'on peut qualifier de renouvelable, car *a priori* abondante et inépuisable : c'est l'objectif de la géothermie.

Dans la croûte terrestre, la température augmente avec la profondeur, selon un gradient moyen de l'ordre de 30 °C par kilomètre. Exploiter cette chaleur n'est pas une idée nouvelle : les thermes romains et grecs étaient parfois chauffés et alimentés par géothermie. Aujourd'hui, on cherche toujours à exploiter au mieux l'énergie thermique de cette ressource, notamment par la création de réseaux de chauffage urbain, mais aussi pour la production d'électricité lorsque la chaleur disponible est élevée (supérieure à 150 °C).

De l'électricité d'origine géothermale a été obtenue pour la première fois en 1913, en Italie. De fait, ce pays est particulièrement favorable : la croûte terrestre y est mince et le magmatisme important. De telles caractéristiques géologiques expliquent un gradient hors normes de l'ordre de 100 °C par kilomètre ! La première centrale avait une capacité de 20 kilowatts (kW). Elle a bien grandi, la production atteignant désormais 770 mégawatts (MW). Par comparaison, un réacteur nucléaire produit en moyenne 860 MW.

LES AUTEURS

LAURENT ESCARÉ,
MARC PERREAUX ET
DELPHINE PATRIARCHE,
STORENGY

Au cours du XX^e siècle, la mise en valeur de cette ressource dans les régions les plus propices a bénéficié de l'amélioration des techniques de forage et de conversion électrique. La géothermie est devenue une énergie de premier plan, avec une capacité de production électrique mondiale installée de 13,2 gigawatts (GW) en 2016.

UNE RESSOURCE INDISPENSABLE

Outre son caractère renouvelable, l'avantage de la géothermie est sa disponibilité. On parle d'une énergie de « base load » (« charge de base »), c'est-à-dire qu'elle peut aider à fournir le minimum requis pour un réseau électrique en continu. La géothermie a donc toute sa place dans le mix énergétique : la constance de sa production est un atout capital au regard des autres sources renouvelables qui sont souvent intermittentes comme l'éolien, le solaire ou les énergies marines.

Cependant, l'exploitation de la chaleur du sous-sol (sous forme d'eau chaude ou de vapeur) requiert la mise en œuvre de moyens importants. La viabilité technico-économique des projets repose par conséquent sur un ensemble de défis à relever, de la phase d'exploration jusqu'à l'exploitation.

L'exploration géothermale doit aboutir à la quantification de la ressource, et à l'estimation du degré d'incertitude que l'on a sur les paramètres du système étudié, en l'occurrence la température et la productivité de la formation géologique. On pourra alors dimensionner une future centrale géothermique et limiter aux mieux les investissements à risque. Comment réduire les incertitudes sur la ressource ?

Les techniques employées pour l'exploration géothermale sont similaires à celles

développées de longue date par l'industrie pétrolière. Elles fournissent une «image» du sous-sol et permettent d'en appréhender la géométrie voire d'en cartographier la densité et la résistivité (sa capacité à s'opposer à la circulation du courant électrique), autant d'indications sur la présence de fluides chauds.

SISMIQUE PASSIVE

Ce défi de l'exploration a profité d'innovations récentes dans des techniques relativement peu onéreuses et non intrusives. Ainsi, une nouvelle méthode d'analyse des ondes sismiques à basse fréquence (notée LFPS, pour *Low Frequency Passive Seismic*), en développement à Storengy, une filiale d'ENGIE, a été brevetée en 2017 (voir l'encadré ci-contre). Grâce à elle, on cartographie les zones du réservoir présentant un fluide géothermal sous forme de vapeur.

La géochimie permet d'analyser les manifestations du système géothermal en surface, telles que fumerolles, sources chaudes ou altérations chimiques des roches. On en déduit parfois des informations sur la composition des fluides du réservoir ainsi que sur la température qui y règne.

Les investigations de terrain (voir la photographie ci-dessous) permettent aussi de suggérer les types de fractures et leur rôle dans la circulation des fluides chauds. On construit alors un modèle conceptuel incertain décrivant l'étendue et l'écoulement des fluides dans le réservoir géothermal. On décide ensuite de la poursuite, ou non, de l'exploration, notamment en forant un premier puits d'exploration, qui atteint généralement plus de 1 500 mètres de profondeur.

À L'ÉCOUTE DES ONDES

La *Low Frequency Passive Seismic* (ou *Sismique passive à basse fréquence*) est une méthode d'écoute des ondes sismiques générées naturellement par la houle, le volcanisme... et se propageant dans le sous-sol. Lorsque de telles ondes traversent une zone qui contient une phase gazeuse, une anomalie d'amplitude est détectée à la verticale de cette zone par des capteurs. Son interprétation, grâce à des techniques poussées de traitement du signal, permet de cartographier les accumulations de vapeur propices à une exploitation géothermique.

Ce forage est capital, car il livre des informations directes et tangibles sur la géologie du réservoir. Le lieu est judicieusement choisi à l'aide du modèle conceptuel. Dès lors, on calibre les modèles géophysiques pour donner un sens aux images qu'ils produisent. Sur tout, le puits donne accès, d'une part, au réservoir, informant sur sa capacité à fournir les débits attendus à travers des tests de production et, d'autre part, au fluide lui-même, confirmant sa température et sa composition chimique.

Progressivement, le modèle conceptuel s'affine et devient plus quantitatif. Une fois formulée la nouvelle estimation des capacités, on réfléchit aux futures installations. Les incertitudes associées au modèle aident à définir un niveau de risque, une «probabilité de succès» pour le projet. De cette probabilité dépendra la poursuite du projet, et notamment sa phase exploratoire. On s'interrogera sur les données complémentaires qui doivent être obtenues, et à quel coût, pour augmenter cette probabilité.

Un projet de géothermie est validé quand le risque d'échec est suffisamment faible et la faisabilité technico-économique satisfaisante. Au stade exploratoire, la quantité d'informations sur le sous-sol est encore limitée, et seule la phase d'exploitation confirmera le modèle d'écoulement des fluides dans le système géothermal. On comprendra et quantifiera alors la recharge naturelle du système, c'est-à-dire le renouvellement du réservoir par les eaux pluviales ou souterraines.

Dans les faits, le développement d'une centrale géothermique électrique est «découpé» en tranches de production. En effet, chaque forage de production réalisé pour le développement participe à la réévaluation des propriétés du réservoir; pendant les premières années d'exploitation, on confronte le modèle du sous-sol aux données réelles, dont la collecte est primordiale afin d'optimiser l'exploitation.

Le défi durant l'exploitation porte sur la pérennité du réservoir géothermal, c'est-à-dire le maintien de la pression et de la température de l'eau produite. Souvent, la recharge naturelle d'un réservoir géothermal doit être >

Mesure de la température et prélèvement de gaz en surface.



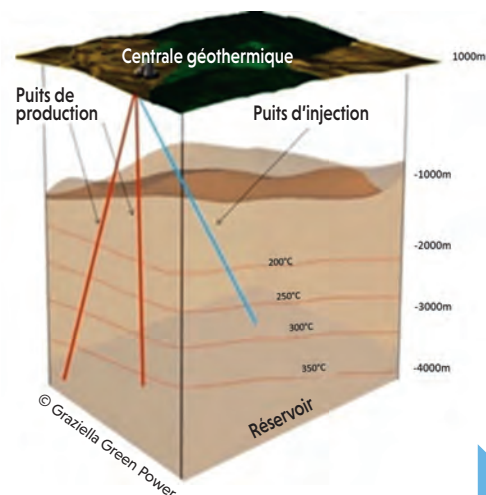
UNE CENTRALE GÉOTHERMIQUE « ZÉRO ÉMISSION »



Le projet pilote de Castelnuovo di Val di Cecina, près de Pise, vise à construire, d'ici 2021, une centrale géothermique de 5 mégawatts.

Actuellement, il est envisagé de forer à près de 3 500 mètres de profondeur, deux puits de production (à droite,

en rouge) du fluide géothermal (contenant de la vapeur d'eau à environ 180 °C et des gaz non-condensables) et un puits de réinjection (en bleu), où le fluide sous forme liquide entraînera ces gaz. Le fluide géothermal sera ainsi maintenu



en boucle fermée permettant la réinjection totale des gaz non-condensables dans le réservoir, évitant ainsi l'émission de 40 000 tonnes de CO₂ par an. Dépourvue de tours d'échappement de vapeur, la centrale (à gauche) s'intégrera dans le paysage.

> complétée par la réinjection d'eau, par exemple celle récupérée au niveau de la centrale électrique par la condensation de la vapeur refroidie, afin de maintenir une pression suffisante. C'est essentiel car, lorsque la pression du réservoir diminue de façon trop importante, le débit et la température du fluide géothermal en surface diminuent également, ce qui réduit *in fine* la production électrique.

L'étape de la réinjection est délicate. Si la zone d'injection ne communique pas suffisamment avec la zone de production, l'injection restera sans effet pour soutenir la production. Au contraire, de l'eau injectée circulant trop rapidement vers un puits producteur, par exemple à travers une fracture, ne maintiendra pas suffisamment de pression: l'eau n'aura pas le temps de se réchauffer au contact de la roche. Le puits producteur risque alors de produire un fluide à trop basse température.

Outre ceux liés à l'exploration et à l'exploitation, un autre défi de l'industrie géothermique est d'ordre environnemental. Il réside dans la récupération des gaz contenus dans les fluides exploités dont on souhaite épargner l'atmosphère et qui ne se condensent pas, comme le dioxyde de carbone CO₂ et le sulfure d'hydrogène H₂S; le premier est un gaz à effet de serre et le second est toxique. Pour ce faire, ENGIE, par le biais de ses filiales Storengy et ENGIE Italia, développe le projet pilote de Castelnuovo di Val di

Cecina, en Italie, en partenariat avec la société italienne Graziella Green Power (voir l'encadré ci-dessus).

PROTÉGER L'ATMOSPHÈRE

L'innovation consiste ici en la réinjection totale dans le réservoir de l'eau condensée et des gaz non-condensables grâce au maintien du fluide géothermal dans une boucle fermée: les gaz réinjectés participent au maintien de pression et améliorent la production!

Cette avancée est attendue grâce à une conception nouvelle de puits proposée par Storengy et l'IFP Énergies nouvelles (IFPEN). Le dépôt de brevet est en cours. La gestion de cette usine pilote, et en particulier la partie dédiée à la réinjection, impliquera l'optimisation des procédés et des installations de surface. Outre la réduction drastique des émissions, constituant un progrès certain pour l'industrie géothermique, la centrale s'intégrera harmonieusement dans le paysage.

Pour d'autres installations géothermales, le défi réside dans l'exploitation des richesses des fluides produits, notamment les terres rares dissoutes dans l'eau, comme le lithium, qu'il s'agira d'extraire. Avec de tels projets novateurs, portés par Storengy au sein d'ENGIE, et malgré des investissements lourds durant les phases d'exploration et de développement, la géothermie a des atouts indéniables pour apporter sa contribution au verdissement du mix énergétique. ■

RÉFÉRENCES

World Energy Resources. Geothermal report, World Energy Council, 2016 : <http://bit.ly/WER-Gr2016>

A. Kazantsev et al., An innovative methodology based on Low Frequency Passive Seismic data analysis to map geothermal reservoir steam saturated areas, *Proceedings of the 5th IIGCE*, 2017.

À Cerro Pabellon, dans le désert d'Atacama, au Chili, l'électricité est fournie par un réseau hybride combinant hydrogène, batteries et solaire. De tels réseaux peuvent aider à diminuer la consommation de diesel.



© Engie EPS

Passer du diesel aux énergies renouvelables

Pour une large part de la population mondiale, l'électricité est fournie par des groupes électrogènes polluants fonctionnant au diesel. Peut-on s'en passer, au moins partiellement ?

LES AUTEURS

PIETRO RABONI ET
MATTEO FERRARO,
ENGIE EPS

Nous ne sommes pas tous égaux devant la transition énergétique. Dans beaucoup de pays, elle correspond le plus souvent à l'abandon progressif des centrales au charbon. Mais que faire des groupes électrogènes, ces générateurs d'électricité fonctionnant au diesel ? De fait, ces dispositifs, très polluants, sont souvent la seule

source fiable d'électricité pour les petites communautés isolées, non seulement dans les pays en développement, mais partout où la connexion à un réseau électrique d'envergure est instable, trop chère ou simplement inexistante. L'enjeu est d'importance. Par exemple, on estime que le Nigeria consomme chaque mois 300 millions de litres de diesel à seule fin de produire de l'électricité.

Plus largement, depuis des décennies, des dizaines de milliers des microréseaux électriques fondés sur le diesel ont fleuri partout dans le monde. On les retrouve dans les villages des régions arctiques, dans des communautés installées en montagne, dans des déserts, sur des îles, par exemple en >

> Méditerranée, ainsi que disséminés sur l'ensemble du continent africain.

Néanmoins, ce système de production électrique reste très coûteux. Et dans beaucoup d'endroits, l'électricité reste inabordable pour une grande part de la population locale.

SE PASSER DU DIESEL ?

Dans ce contexte, l'avènement des énergies renouvelables réduit la dépendance de ces communautés à l'égard du diesel. Mais il est impossible aujourd'hui de bâtir un réseau électrique exclusivement sur de telles énergies vertes (à

Au-delà des installations traditionnelles hydrauliques, où l'eau est pompée en quelques heures à faible coût d'électricité et libérée aux heures de pointe, on dispose aujourd'hui de nouvelles techniques de stockage (électrochimique, c'est-à-dire les batteries, et sous forme d'hydrogène) qui s'adaptent à tous les sites. Les batteries actuelles, très variées, sont compétitives pour couvrir les besoins de stockage à court et moyen terme. Elles forment le cœur de systèmes de stockage (notés BESS, pour *Battery Energy Storage System*). L'hydrogène est lui plus adapté au stockage saisonnier de l'énergie. En outre, il peut alimenter des véhicules fonctionnant à l'hydrogène.

Dès lors, avec des EMS et des BESS performants, un accès à l'énergie uniquement grâce au soleil, au vent et au stockage deviendrait-il possible pour des millions de personnes ? D'un point de vue technique, oui. Mais aujourd'hui, en pratique, la couverture à 100% des besoins par des sources d'énergie verte reste un rêve inabordable, qui n'est une réalité que dans quelques complexes touristiques de luxe et des projets pilotes.

Certes, les installations hydroélectriques et géothermiques augmenteraient le taux de pénétration des énergies renouvelables, mais elles ne sont exploitables que dans des endroits spécifiques. Pour l'essentiel des collectivités, la solution la plus rentable reste donc l'association de groupes électrogènes avec les énergies renouvelables et des BESS. À cet égard, le déploiement massif des batteries lithium-ion (en particulier dans le secteur des véhicules électriques), comme ce fut le cas durant la dernière décennie pour les panneaux photovoltaïques et les éoliennes, devrait permettre de réduire les coûts de 46% au cours des sept prochaines années. Ce n'est qu'à cette condition que le taux de pénétration des énergies renouvelables dans les microréseaux augmentera.

BIENVENUE À GAROWE

À cette aune, le microréseau installé à l'automne 2015 par ENGIE-EPS (*Electro Power Systems*) à Garowe, la capitale du Puntland, une région du nord de la Somalie (voir la carte page suivante), et exploité par NECSOM, l'opérateur local, est emblématique. En effet, grâce à l'hybridation du parc de groupes électrogènes avec une centrale photovoltaïque de 1 mégawatt et un BESS de 1,44 mégawatt-heure, la consommation de diesel a diminué de plus de 2000 litres par jour ! Cela a conduit NECSOM à baisser le prix de l'électricité (17% en moins) au détail le 1^{er} avril 2016. Dans les 20 jours qui ont suivi, le pic de consommation a grimpé de 36%, révélant la forte sensibilité au prix des utilisateurs desservis, essentiellement des particuliers.

“
L'hybridation de groupes électrogènes avec une centrale solaire et des batteries a fait baisser la consommation de diesel de plus de 2000 litres par jour
”

l'exception de l'énergie hydroélectrique), car sa stabilité serait trop aléatoire. Ce mouvement vers toujours plus de renouvelable est freiné par deux impératifs : le déploiement d'un système de gestion de l'énergie (noté EMS, pour l'anglais *Energy Management System*) approprié et l'installation de dispositifs de stockage pour pallier l'intermittence.

L'EMS est dédié à la coordination des groupes électrogènes avec les autres sources d'électricité, à la minimisation des dépenses d'exploitation et à la stabilité du système. Quant aux appareils de stockage, ils pourvoient aux besoins nocturnes en libérant l'énergie accumulée la journée grâce aux panneaux photovoltaïques. Dans des microréseaux, ils jouent également un rôle crucial dans le maintien de la stabilité de l'offre à court terme.

Une architecture de stockage pertinente doit donc être adaptée aux profils, quotidiens et saisonniers, de consommation et de production d'électricité d'origine renouvelable.

SE DISPENSER DES GROUPES ÉLECTROGÈNES



© ENGIE EPS

A Garowe, la capitale du Puntland, dans le nord de la Somalie (à gauche), ENGIE EPS (Electro Power Systems) a installé un microréseau hybride (ci-dessus) géré par NECSOM et comprenant trois éoliennes (une seule est visible), des panneaux solaires, des batteries de stockage... et des groupes électrogènes fonctionnant au diesel. Ensemble, ils alimentent la ville de quelque 50 000 habitants (à l'arrière-plan).

Cette tendance s'est poursuivie et a connu trois phases d'expansion supplémentaires. Lors de la dernière, en août 2017, d'autres groupes électrogènes ont été installés, ainsi qu'un parc de trois éoliennes d'une capacité totale de 750 kilowatts, pour profiter du vent (marqué par une forte saisonnalité), couplées à un BESS supplémentaire de 500 kilowatt-heures. Fait notable, l'extension du microréseau a été installée et mise en service en moins de 30 jours ! L'énergie éolienne s'est intégrée sans difficulté ni besoin de la moindre modification du microréseau existant.

EXTENSIONS À LA DEMANDE

Aujourd'hui le microréseau a atteint une puissance totale installée de 5,9 mégawatts. Énergies renouvelables et stockage fournissent de l'énergie aux quelque 50 000 habitants de Garowe.

L'expérience somalienne souligne l'importance de l'adaptabilité et de la flexibilité des installations. Toutefois, des obstacles restent à surmonter. La planification d'un réseau est un défi, car les communautés isolées tiennent rarement le compte de la consommation et des

besoins réels de leurs membres, ce qui fragilise les infrastructures. En outre, les limites liées à l'investissement entravent la planification à long terme. Enfin, on doit tenir compte du fait que pour les opérateurs de réseaux dans des régions isolées, le délestage aux heures de pointe (la suppression de l'alimentation pour éviter la saturation du réseau) est encore une mesure quotidienne pour éviter l'instabilité.

Pour surmonter ces écueils, et faciliter la transition énergétique et la gestion des microréseaux, les outils modernes d'analyse des données seront d'une aide appréciable. Par exemple, la « maintenance prédictive » permet d'anticiper les pannes de composants du réseau et donc d'échapper à des réparations coûteuses. En outre, les algorithmes prescriptifs, qui peuvent évoluer de façon autonome en fonction des données observées sur le terrain, éviteront une refonte récurrente de l'EMS. Enfin, la coopération avec les communautés locales et les techniciens sera cruciale pour des déploiements réussis de microréseaux. D'ailleurs, ENGIE-EPS et NECSOM entendent poursuivre leur coopération dans cette direction. ■

De l'or vert dans le purin

Le biogaz, essentiellement issu de l'agriculture, est au cœur d'une filière qui se développe en France. Cet essor passe par des innovations importantes : le suivi en direct des microorganismes et l'arrivée du *big data*.

François-Xavier Letang, agriculteur en Île-de-France et pionnier de la méthanisation agricole, est formel : «le biogaz est l'avenir de l'agriculture et un atout pour la France dans la transition énergétique.» Le biogaz ? Ce gaz est produit à partir de déchets organiques issus de l'agriculture (déjections animales, débris végétaux...), de l'industrie et de nos poubelles, digérés par des bactéries.

Il représente une opportunité unique de créer un cycle durable entre la production de denrées alimentaires pour nourrir les hommes et produire massivement une énergie renouvelable transportable dans nos réseaux de gaz. Son potentiel est évalué aujourd'hui à près de 180 térawattheures en France, soit environ la moitié de la consommation annuelle de gaz naturel actuelle. De quoi nous chauffer, alimenter les bus de nos villes et nos transports lourds en France de façon durable avec une énergie verte stockable dans nos réseaux de gaz.

Avec plus de 90% du potentiel français en production de biogaz, les agriculteurs sont en première ligne pour le développement de la filière biogaz. Ils sont accompagnés par les opérateurs gaziers qui soutiennent le développement des projets et investissent dans la recherche et l'innovation pour améliorer la compétitivité du biogaz.

Le chemin est encore long. Avec moins de 700 unités industrielles (78 produisent du biométhane, c'est-à-dire du biogaz purifié), contre plus de 15 000 en Europe, la France fait figure de débutant sur ce secteur. Néanmoins, l'écosystème français s'est bâti autour d'un modèle industriel unique au monde, basé sur un mélange de résidus agricoles et industriels. Cette particularité a amené les acteurs à innover et créer des équipements spécifiques pour prétraiter et accueillir une large variété de déchets organiques.

L'ensemble de la profession travaille activement à améliorer la performance industrielle et

LES AUTEURS

ÉLODIE LE CADRE,
CHARLOTTE RICHARD
ET PHILIPPE CALVEZ
ENGIE Lab CRIGEN
OLIVIER GUERRINI,
MOKHLES KOUAS ET
SANDRINE VANEPH
ENGIE
SYLVAIN FRÉDÉRIC
GRDF,
OLIVIER RENVOISÉ
ET DAMIEN TERRIÉ
ENGIE DIGITAL

la compétitivité de la filière. La recherche occupe à différents niveaux un rôle clé pour atteindre cet objectif. La France est sur cette question parmi les plus avancées en Europe, grâce notamment à l'INRA.

PRENDRE LE POULS DE LA BIOLOGIE

L'un des objectifs cruciaux est de comprendre et maîtriser la biologie d'un système vivant formé d'un consortium de près de 300 à 400 espèces de microorganismes. Plusieurs start-up et instituts de recherche développent actuellement des capteurs de nouvelle génération, fondés sur des technologies optiques, afin de procéder à des analyses *in situ* et en temps réel dans les immenses réacteurs de fermentation. Ces capteurs mesurent l'état de santé des microorganismes et identifient rapidement les dérives à corriger sur l'installation.

La pépite française GreenTropism propose par exemple des capteurs infrarouges à fibre optique mesurant par spectrométrie divers paramètres clés de la biologie (acides gras volatils, taux de matière sèche...) et en continu au cœur de la réaction. L'appareil de mesure ainsi que l'ensemble des composants de traitement du signal, de son interprétation et de sa transmission tiennent dans une «boîte à chaussures». Cet encombrement minimal est un atout. Cette technologie est déjà utilisée sur des sites industriels pharmaceutiques, automobiles... Elle l'est désormais pour la méthanisation.

Capter l'information n'est pas le seul défi à relever. Il convient également d'interpréter les informations recueillies et de guider les opérateurs vers les bonnes décisions à prendre. La

DE L'INTELLIGENCE DANS LE BIOGAZ

Le projet **MAPPED**, lancé en 2016 et soutenu par l'ADEME, les investissements d'avenir et BPI France, ambitionne de lever les principaux verrous techniques de la filière méthanisation par l'intégration d'outils digitaux intelligents à l'échelle des unités et du territoire. Le projet coordonné par ENGIE Lab CRIGEN rassemble cinq partenaires dont les acteurs de référence de la recherche institutionnelle en méthanisation française : l'INRA, l'IRSTEA et les start-up BionEnTech et AkaJoule.



Les méthaniseurs et le biogaz qu'ils produisent sont l'avenir de l'agriculture.

© Rudmer Zwerwer/Shutterstock

start-up lyonnaise BioEnTech a créé un outil d'intelligence artificielle fondé sur des modèles corrélatifs dynamiques permettant d'interpréter en temps réel les résultats des mesures et d'accompagner les exploitants industriels dans leurs opérations quotidiennes (doser les entrants, plus de lisier, moins de fumier...). L'enjeu est de pousser à leur maximum les réactions de dégradation des matières organiques introduites afin de maximiser la production de biogaz. Ces outils sont testés dans le cadre du projet de recherche MAPPED (voir l'encadré page ci-contre) financé par l'ADEME et coordonné par l'ENGIE Lab CRIGEN. Ils sont déployés sur près d'une dizaine d'unités aujourd'hui, l'objectif étant de passer en phase industrielle dès 2019.

UN SOUPÇON D'INTELLIGENCE

La filière se mobilise également à plus grande échelle et prépare la construction d'une plateforme industrielle dans les Hauts-de-France sur la commune d'Arras. L'installation hébergera une unité de production de biogaz mixte (déchets municipaux et agricoles) et un centre d'innovation industriel destiné à soutenir des start-up et à tester des nouveautés issues de la recherche.

Au sein d'ENGIE et de ses divisions «Digital» et «Industrielle», le biogaz suscite l'intérêt avec le développement d'une plateforme de collecte de données issues du parc de centrales biogaz. L'enjeu est de connecter ces unités industrielles et de récupérer toutes les données d'exploitation, biologiques, mais

BIG DATA ET RENOUVELABLES

Darwin
ENGIE'S DIGITAL RENEWABLE SOLUTIONS

DARWIN est une infrastructure digitale innovante, une plateforme, développée par ENGIE afin de connecter les unités de production d'énergie renouvelable décentralisées à travers le monde : 20 pays, 5,4 GW connectés soit environ 230 fermes éoliennes et 100 parcs solaires... La plateforme collecte et stocke les informations et propose des outils d'analyse de données afin d'identifier des profils de comportement des équipements, prédire les incidents et proposer aux opérateurs des pistes d'amélioration dans l'exploitation et la maintenance.

RÉFÉRENCES

Mix de gaz 100 % renouvelable en 2050 ?
ADEME, GRDF
et GRTgaz, 2018 :
www.ademe.fr/mix-gaz-100-renouvelable-2050

EBA Statistical Report 2017,
European Biogas
Association : <http://european-biogas.eu/2017/12/14/ebs-statistical-report-2017-published-soon/>

également sur les machines de compression, les agitateurs, les stockages, les membranes de purification des gaz... Ces données précieuses, traitées par des *data scientists* et recoupées sur plusieurs unités aideront à optimiser l'exploitation d'une unité en réalisant par exemple une maintenance prédictive des équipements.

L'objectif est de gagner en compétitivité, améliorer la production et prévenir les arrêts liés à des erreurs humaines. Pour ce faire, ENGIE développe la plateforme de données DARWIN (voir l'encadré ci-dessus) qui est déjà en production pour ses parcs éoliens, solaires et hydrauliques à travers le monde, elle a été reliée en 2018 la première unité biogaz. François-Xavier Letang a sans doute raison! ■

LiLiBox, la batterie de stockage du gaz vert



La première installation pilote du projet LiLiBox (à gauche), à proximité d'une unité de production de biométhane (au fond).

La réinjection du biométhane produit par les méthaniseurs dans le réseau de transport de gaz est soumise à plusieurs aléas. Pour les surmonter, une solution consiste à stocker temporairement le gaz sous forme liquide.

LES AUTEURS

LAURENT BENOIT,
PHILIPPE GARREC,
DAMIEN VAN OOST,
CLAUDIO BUCELLA ET
DELPHINE PATRIARCHE,
STORENGY

Depuis quelques années, près des fermes de nos campagnes, on voit fleurir de plus en plus de chapiteaux au toit bombé. Ce sont des méthaniseurs, des installations dans lesquelles du gaz est produit à partir des résidus agricoles (déjections animales, débris végétaux...) par des bactéries. Le gaz récupéré, décarboné et renouvelable – on parle de biogaz – est ensuite purifié (il devient du biométhane) et injecté dans les infrastructures gazières existantes. Dans un contexte de transition énergétique, ce type de processus est appelé à se développer, car le gaz est pertinent pour stocker l'énergie. Mais peut-on l'améliorer? Oui, en liquéfiant localement le gaz produit pour ensuite le transporter.

Outre la méthanisation, on dispose de deux autres moyens pour produire du gaz renouvelable: le *Power-to-Gas* consiste à convertir des surplus d'électricité en gaz; la méthanation, c'est-à-dire la synthèse de méthane à partir de dioxyde ou monoxyde de carbone et d'hydrogène. Avec ces trois filières, 682 gigawattheures de biométhane ont été produits en 2017, c'est 67% de plus par rapport à 2016. La transition vers des gaz renouvelables est en cours!

L'objectif à l'horizon 2030 pour la France est d'atteindre 10% de gaz renouvelable dans la consommation. Pour cela, deux cibles ont été fixées. En 2023 : 8 térawattheures (TWh) par an de biométhane injecté. En 2028 : produire de 24 à 32 TWh par an de biogaz.

LEVER LES FREINS

Pour la méthanisation, l'objectif de 8 TWh par an en 2023 représente concrètement l'installation de près de 360 unités sur le territoire. Aujourd'hui, seules 70 unités injectent dans le réseau. Ces premières installations de méthanisation font apparaître plusieurs contraintes qui, si elles n'étaient pas levées, pourraient freiner l'essor de la filière.

Ainsi, des limitations d'injection issues du réseau viennent du fait que, la principale source de biométhane étant d'origine agricole, de nombreuses installations de biométhane se trouvent en zone rurale, là où la consommation gazière est restreinte (principalement du chauffage résidentiel) et la saisonnalité marquée. Le réseau peut fréquemment être saturé empêchant l'injection du biométhane. D'autres limitations d'injection sont liées à l'installation productrice de biométhane. Ce peut être des ralentissements voire des arrêts de production, planifiés ou non, pour maintenance ou réparation.

Ces aléas, difficiles à prévoir précisément, sont brefs. À l'inverse, le «moteur biologique» qu'est le méthaniseur vit au rythme du cycle bactérien et réagit sur des temps longs, typiquement un mois (voir *De l'or vert dans le purin*, page 18). En conséquence, l'optimisation de la production

de biométhane sur l'année en fonction des contraintes d'injection rencontrées durant cette période est, en l'état, physiquement impossible.

Ces limitations à l'injection représentent, selon les années et le lieu, jusqu'à 20% de la quantité annuelle de gaz produite par les installations actuelles de méthanisation (le surplus est libéré dans l'atmosphère). Comment empêcher que cette situation ne s'étende à une majorité des futurs projets d'injection ?

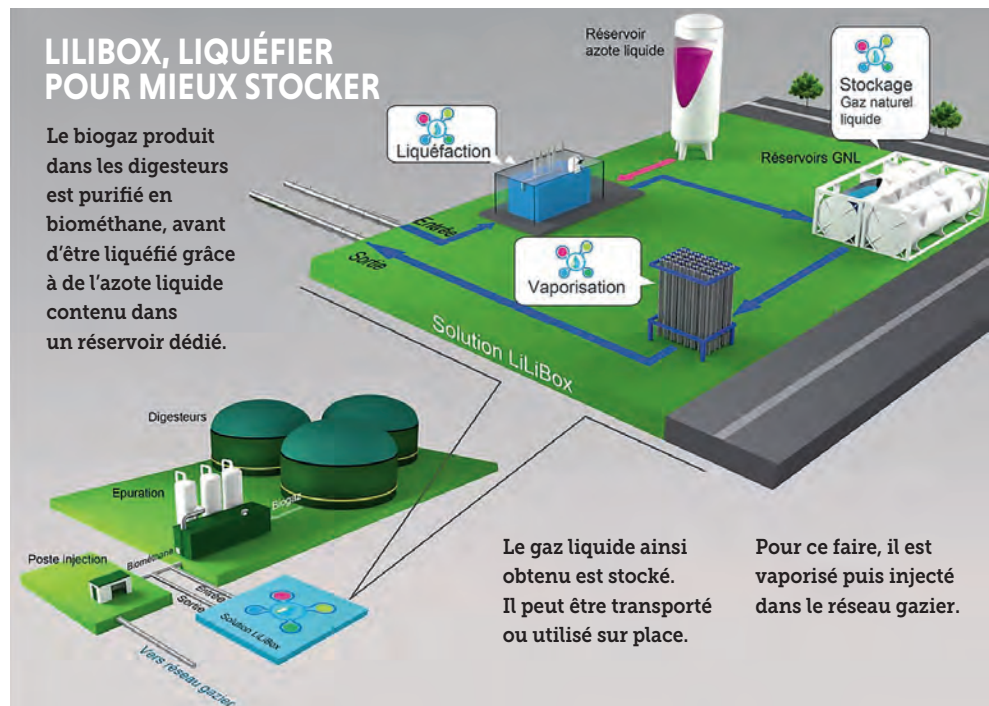
Pour pallier ces limitations, LiLiBox Solutions, filiale de Storengy, propose « Little Liquefaction Box » (LiLiBox). Cette solution consiste en un stockage tampon du biométhane sous forme liquide, afin de minimiser le volume occupé (voir le schéma ci-contre), entre le producteur et le réseau d'injection.

En effet, liquéfier le biométhane permet de réduire son volume de stockage d'un facteur 550. Un réservoir de biométhane liquide de la taille d'un conteneur ou d'un semi-remorque permet de stocker une semaine de production continue d'une installation actuelle. Concrètement, le biométhane est stocké à une pression proche de celle du réseau, entre 1 et 12 atmosphères et à une température comprise entre -120 et -160 °C.

Une fois stocké, il peut être réinjecté de façon différée à l'endroit même où il a été conditionné. Le biométhane est alors stocké le temps nécessaire pour que le réseau puisse à nouveau en absorber un flux important, puis vaporisé avant sa réinjection sur le réseau. Le biométhane liquide stocké peut aussi être transporté en camion-citerne vers un autre endroit non engorgé. C'est particulièrement intéressant pour les installations agricoles situées à distance des réseaux de transport et de distribution de gaz.

Le biométhane liquide pourrait même servir de carburant aux véhicules agricoles (adaptés au GNL) de l'installation, ce qui réduirait encore l'impact environnemental.

Un premier prototype de LiLiBox a été conçu et testé en 2016 en laboratoire, celui d'ENGIE Lab CRIGEN. Cette étape a permis de valider les principes et le fonctionnement du cœur du procédé à savoir le système d'épuration et liquéfaction du biométhane. Une unité pilote à échelle 1/4 et regroupant l'ensemble des fonctionnalités, à savoir l'épuration, la liquéfaction, le stockage et la réinjection, a ensuite été installée près d'un site de méthanisation et testée en conditions réelles. Depuis avril 2018, Storengy, dans le cadre de la diversification de



© Storengy

ses activités de stockage du gaz, poursuit le développement du système LiLiBox et a initié la phase d'industrialisation. La pleine fonctionnalité du pilote est prévue à l'été 2019.

UN GISEMENT D'INNOVATIONS

La flexibilité apportée par LiLiBox et ses multiples débouchés reposent sur l'étape de liquéfaction, étape qui concentre les principales innovations (cinq brevets déposés ou en cours). Pour liquéfier le biométhane, le refroidissement doit s'accompagner d'une purification poussée afin d'éviter tout risque de cristallisation notamment du CO₂, sous forme de carboglace. Pour ce faire, LiLiBox utilise un concept inédit de combinaison épuration-refroidissement à l'aide d'un médium de froid flexible, l'azote liquide, réduisant ainsi considérablement les équipements peu adaptés aux fonctionnements intermittents et nécessitant une maintenance régulière. Autre avantage, le système est transportable, modulaire et donc évolutif.

LiLiBox libère ainsi l'installation de méthanisation de ses contraintes liées à l'état du réseau et d'une partie de ses contingences techniques, tout en maximisant le potentiel d'injection annuel de cette même installation. LiLiBox est donc tout à la fois un outil d'aide à l'exploitation des producteurs de biométhane et un moyen de réduire leurs risques financiers en maximisant la rentabilité de leurs installations.

LiLiBox sera aussi une brique essentielle des réseaux gaziers intelligents de demain en participant à leur équilibrage. C'est donc un levier important de développement de la filière des gaz renouvelables. Préparez-vous à les voir à leur tour fleurir dans nos campagnes ! ■

L'intelligence artificielle au service de l'éolien

L'AUTEUR
PHILIPPE CALVEZ
ENGIE Lab CRIGEN

Les éoliennes
seront-elles supervisées
par des algorithmes ?

© Engie / Miro / Antoine Meysonnier

La surveillance et la maintenance des éoliennes sont aujourd'hui coûteuses, longues, fastidieuses... L'intelligence artificielle promet d'améliorer ces opérations.

Depuis les années 2010, nous vivons à l'ère de l'intelligence artificielle et de ses hauts faits : reconnaissance des visages, aide au diagnostic en médecine, voitures autonomes, art, champion de go... Ces exploits sont certes très impressionnants, mais il est un domaine où ces compétences seraient très appréciées : celui de la transition énergétique rendue nécessaire par la situation d'urgence climatique. L'intelligence artificielle pourrait-elle nous aider à réduire les émissions de gaz à effet de serre et augmenter la part des énergies renouvelables dans notre consommation ? En réalité, vous l'ignorez, mais c'est déjà le cas, notamment pour l'exploitation et la maintenance des parcs éoliens !

L'énergie éolienne représente aujourd'hui 12,4% de la production d'énergies renouvelables dans l'Europe des 28, et cela ne fait qu'augmenter. La production de ces énergies renouvelables a progressé de 66,6% entre 2006 et 2016, ce qui équivaut à une augmentation moyenne d'environ 5,3% par an.

ENGIE gère un grand nombre de champs d'éoliennes en France et à l'étranger. Ces équipements, très complexes du point de vue technique, nécessitent un suivi rigoureux tant pour l'exploitation que pour la maintenance. Ce dernier point est critique et fait l'objet de toutes les attentions. Nous surveillons de près les avancées technologiques concernant la numérisation et l'automatisation des procédés. Et surtout, nous utilisons de plus en plus d'outils s'appuyant sur l'intelligence artificielle pour mieux optimiser ces opérations de maintenance.

Ces dernières s'attachent particulièrement aux pales. En effet, l'état de ces éléments influe directement sur le rendement d'un parc éolien. Or les causes de défaillances sur les pales sont nombreuses (impacts de foudre, craquelures, fissures...). Elles dépendent des conditions de production, des lieux d'utilisation et plus généralement de l'environnement de l'éolienne.

LES ÉOLIENNES VUES DU CIEL

Aujourd'hui les opérations de maintenance, notamment l'inspection de l'éolienne et de ses composants principaux comme les pales, la nacelle... ou encore des fondations se font essentiellement sur le terrain. Des experts se déplacent et inspectent les équipements. Des analyses poussées, effectuées hors site, suivent ces premières inspections.

Des approches inédites sont désormais à l'étude, comme l'inspection par prise de vue à partir du sol (il n'y a plus besoin de monter au sommet de l'éolienne), mais aussi l'utilisation prometteuse de drones pour effectuer ce type d'opération. L'ensemble des éléments (vidéos et images) capturés sont exploités dans un processus d'identification de défauts aujourd'hui manuel. Ces tâches, très coûteuses et chronophages, sont aussi foncièrement fastidieuses bien que hautement nécessaires. C'est là que les nouvelles technologies numériques et l'intelligence artificielle apportent leur lot d'innovations pour accompagner les experts dans le suivi opérationnel et la maintenance.

Sur la base de photographies en haute définition prises soit depuis le sol soit par un drone (piloté, voire semi-autonome), des algorithmes

développés par ENGIE Lab CRIGEN, l'un des centres de recherche d'ENGIE, aident les experts dans la détection et l'analyse de défauts. Comment les algorithmes apprennent-ils ?

Plusieurs approches dites de *machine learning*, supervisées ou non (on indique à la machine les éléments clés à identifier pour résoudre le problème ou bien, de façon plus autonome, la machine se débrouille par elle-même à partir des données fournies) sont employées. Elles sont actuellement mises en œuvre en post-traitement, c'est-à-dire que les programmes analysent les informations une fois la mission d'inspection terminée. Les outils ainsi conçus réduiront de façon drastique le temps de traitement aujourd'hui évalué en heures pour chaque éolienne à seulement quelques minutes.

UNE INTELLIGENCE EMBARQUÉE

Cette étape qui est aujourd'hui effective en interne chez ENGIE est la première d'une série visant à automatiser au maximum ces processus de maintenance. La prochaine consistera à embarquer dans les équipements (caméras, drones...) l'intelligence nécessaire, en l'occurrence les algorithmes et les modèles optimisés pour ce type d'environnement : le traitement se fera au fil de l'inspection.

Avec un retour et une qualification des défauts beaucoup plus rapides, les opérateurs techniques se trouvant sur site pourront intervenir au plus vite pour traiter les défauts détectés par les machines d'inspection.

Les avantages d'un temps d'intervention réduit sont nombreux : les coûts des opérations de maintenance diminués, la production d'énergie optimisée et la sécurité liée à ce type d'interventions renforcée.

“ Sur la base de photographies, des algorithmes aident les experts dans la détection et l'analyse de défauts ”

La combinaison de drones embarquant des programmes intelligents d'inspection avec des opérateurs (sur site ou à distance) ayant accès en temps réel aux observations dans des environnements en réalité augmentée laisse augurer de nouvelles formes et processus de maintenance. Par exemple, les dysfonctionnements sur certaines pièces seraient mis au premier plan sur des vues en réalité augmentée. Des simulations sur un jumeau numérique de l'éolienne indiqueraient le résultat de telle ou telle action de maintenance. Ces innovations augmenteraient la sécurité des collaborateurs, la performance et le suivi des interventions.

Les premiers résultats de ces approches sont prometteurs. Ils s'ajoutent aux travaux en cours sur l'utilisation de l'intelligence artificielle pour le pilotage des champs éoliens (nouveaux capteurs, représentations numériques avancées des équipements...). Les innovations possibles dans ces domaines sont nombreuses et poussent les opérateurs à saisir ces opportunités pour mieux répondre à leurs enjeux internes, mais aussi pour fournir des sources d'énergie renouvelable plus fiables et performantes.

On peut alors espérer respecter les engagements nationaux et internationaux en matière de transition énergétique, notamment les objectifs ambitieux et contraignants prévus par le paquet sur le climat et l'énergie à l'horizon 2020 : la réduction d'émissions de gaz à effet de serre de 20% (par rapport à 1990); atteindre 20% d'énergies renouvelables dans le mix européen; enfin améliorer l'efficacité énergétique de 20%.

Ce serait un nouveau fait d'armes à ajouter au palmarès déjà bien fourni de l'intelligence artificielle! ■



Les drones aident à détecter les défaillances des éoliennes. Ils embarqueront bientôt des algorithmes pour améliorer la maintenance.

Des éoliennes hors sol

Les éoliennes terrestres ou celles en mer ancrées ont fait leurs preuves, mais atteignent vite leurs limites. D'où des projets de modèles plus ambitieux : les éoliennes flottantes et même volantes !

LES AUTEURS

DOMINIQUE MONIOT,
ENGIE GREEN,
THOMAS LASSERRE,
ENGIE GREEN,
OLIVIER VAN OOST,
LABORELEC ET
RAPHAËL GENIN,
ENGIE

En train ou en voiture, vous avez déjà aperçu des parcs éoliens qui ponctuent la plupart des régions françaises. C'est normal, car depuis la fin des années 1980, la propagation des éoliennes a été fulgurante. Fin 2017, elles représentaient 538 000 mégawatts (MW) de puissance installée. Aujourd'hui, 30 pays disposent d'une puissance supérieure à 1 000 MW (14 000 en France), soit l'équivalent d'un réacteur nucléaire. L'essentiel des éoliennes est installé sur terre, pour des raisons de simplicité, mais la situation évolue. Elles conquièrent désormais les mers et, bientôt, les airs !

Situées en grande majorité en mer du Nord, les éoliennes marines représentent seulement 3,5% de la puissance totale installée. Néanmoins, le secteur de l'éolien en mer est amené à croître fortement. Pour quelles raisons ?

La technologie des éoliennes en mer posées (sur des fondations fixées sur le fond marin) est mature avec 5 000 éoliennes en exploitation. La filière s'est industrialisée et produit de l'électricité à un prix compétitif. Mais aujourd'hui, la fixation d'éoliennes en mer posées est restreinte à des profondeurs inférieures 60 mètres, une limite vite atteinte. Afin d'élargir l'espace d'exploitation, le développement de l'éolien en mer passe par un nouveau défi à relever, celui des éoliennes installées sur des fondations flottantes.

Plusieurs prototypes, et même une ferme pilote (en Écosse) sont opérationnels. Ainsi, le prototype Wind Float 1 (WF1), installé en octobre 2011 au large du Portugal par Energias de Portugal (EDP), utilise un flotteur conçu par le bureau d'études *Principle Power* supportant une éolienne de 2,2 MW connectée au réseau électrique. Le prototype, testé pendant cinq ans, a résisté à des houles de 17 mètres.

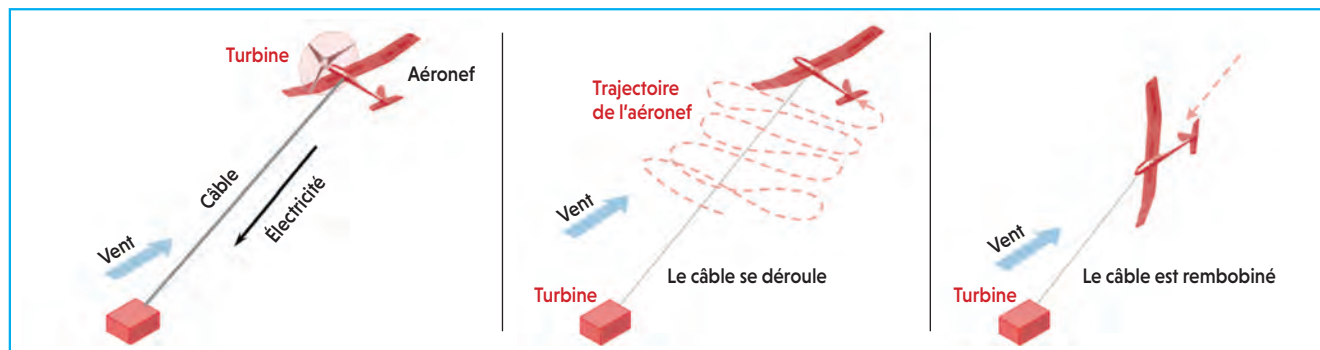
DES ÉOLIENNES FLOTTANTES

L'éolien flottant reste une technologie en cours de développement. Le principal enjeu consiste à trouver le bon compromis entre la stabilité d'un flotteur et son coût. C'est sur ce point que travaillent de nombreux industriels.

En 2019, Wind Float Atlantic, une seconde ferme précommerciale réunira des éoliennes flottantes les plus puissantes jamais installées, égalant les capacités des éoliennes en mer posées. Porté par un consortium incluant notamment ENGIE et EDP, ce projet constitue d'une certaine façon la suite du projet WF1 de 2011 dont les enseignements ont aidé à optimiser la taille des flotteurs, leur stabilité, les systèmes de communication, la fiabilité du raccordement...

Quatre projets précommerciaux similaires (trois ou quatre éoliennes sur différents types de flotteurs) sont également en cours au large des côtes françaises et devraient rentrer en service en 2020 et 2021.

Le prototype WindFloat 1 flotte au large du Portugal. Il préfigure le déploiement de fermes de ce type d'éoliennes flottantes.



© A. Cherubini et al.

Cette démarche de maturation et de fiabilisation par étapes est nécessaire avant de passer au stade commercial compétitif et «prêt à l'emploi». Grâce aux projets pilotes et à l'industrialisation de la production des flotteurs, on peut penser que les coûts de l'éolien flottant seront équivalents à ceux du posé d'ici 2030.

Dès lors, de nouvelles zones pourront être équipées d'éoliennes flottantes. En Méditerranée et en Bretagne, l'éolien flottant viendra compléter les autres énergies renouvelables, et facilitera, par sa régularité, l'équilibre entre la production et la consommation. La seule limite sera la distance de raccordement à la côte, pour limiter les pertes sur le trajet. Des solutions existent néanmoins pour aller au-delà de 100 kilomètres : on envisage par exemple de produire de l'hydrogène grâce aux éoliennes flottantes. Verront-elles bientôt fleurir au-dessus de leurs pales des cousines volantes ?

KITESURFS ET ÉOLIENNES

ENGIE, ainsi que d'autres grands groupes (Google, E.ON, Shell, EnBW...) investissent d'ores et déjà dans le développement d'une technologie tout aussi prometteuse que l'éolien flottant, l'éolien aéroporté, ou AWES (pour *Airborne Wind Energy Systems*). De quoi s'agit-il ?

Les AWES sont des appareils volants (drone, aile, voile...) reliés au sol par des câbles (voir la figure ci-dessus) et naviguant dans les vents de hautes altitudes (de 200 à 400 mètres). Ces dispositifs, qui évoquent pour certains le kitesurf, utilisent 90% de matériaux de moins que les éoliennes conventionnelles. Grâce à ces systèmes plus légers et fonctionnant avec des vents puissants et réguliers, le taux de charge est significativement augmenté : l'aile fonctionne presque en permanence à sa puissance maximale. La diffusion des énergies renouvelables en sera accrue puisque les besoins en infrastructures de stockage et de réseau seront réduits, l'AWES contrebalançant l'intermittence des énergies renouvelables classiques.

Plusieurs systèmes de décollage existent : drone en vol stationnaire, hélice de propulsion, catapulte ou lancement rotatif. Le lancement et l'atterrissage entièrement automatisé de ces deux dernières solutions

restent une des barrières techniques importantes à lever. La sécurité, autre point majeur pour un objet volant, est la principale priorité de l'ensemble de cette industrie naissante, et ce, dès la conception.

Dès 2015, l'institut Fraunhofer, en Allemagne, a démontré le potentiel important de cette technologie. En 2016, Google a confirmé la pertinence de ce concept avec un drone de 600kilowatts.

De son côté, ENGIE a décidé d'évaluer le potentiel des AWES en France métropolitaine, en lançant une étude avec une des start-up les plus avancées dans ce domaine. Celle-ci a développé une aile passive, moins complexe et conçue pour atteindre un facteur de capacité maximal sur les sites de vents faibles, cible première d'ENGIE en France.

L'étude a compté trois phases. D'abord, une analyse géographique a montré que 10% du territoire français (environ 56000 kilomètres carrés) seraient disponibles pour les AWES, auxquels pourraient éventuellement s'ajouter 4% supplémentaires si les zones militaires de bas vol étaient autorisées. Ensuite, il s'est agi d'estimer la ressource en vent et le potentiel énergétique associé. À 100 mètres d'altitude, le vent souffle en moyenne à près de 23 kilomètres par heure et un EFLOH (*equivalent full load hours*, soit nombre équivalent d'heures à pleine charge) de 5300 heures (environ 221 jours) par an. En déployant ces AWES sur les 10% de surface disponible, ce produit répondrait à la demande énergétique française avec seulement... quatre unités par kilomètre carré.

Enfin, nous avons calculé les coûts énergétiques attendus. Une aile de 100 kilowatts fournirait de l'électricité à prix inférieur à celui des parcs solaires ou éoliens de même échelle. Une aile de 500 kilowatts concurrencerait les éoliennes deux fois plus puissantes, avec plus de flexibilité.

Les AWES doivent encore surmonter d'importants défis, techniques ou non. Cependant, la technologie intéresse, en particulier ENGIE. Un projet pilote prévu en 2019 validera le potentiel mis en évidence par l'étude. Ce n'est plus seulement en train ou en voiture que l'on crociera des éoliennes, mais aussi en bateau et même en avion ! ■

Les AWES (*Airborne Wind Energy Systems*) sont des dispositifs aéroportés flottants au vent à haute altitude. L'électricité est générée soit par des turbines embarquées (à gauche) soit par des turbines au sol actionnées via le câble lorsqu'il est étiré (au centre). Dans ce dernier cas, on doit régulièrement rembobiner le câble (à droite).

RÉFÉRENCE

A. Cherubini et al., *Airborne Wind Energy Systems : A review of the technologies, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 51, pp. 1461-1476, 2015.



Dans une piscine municipale, comment concilier qualité de l'air et dépense énergétique ?

© Vereshchagin Dmitry/Shutterstock

Énergie et qualité de l'air peuvent-elles faire bon ménage ?

À l'école et à la piscine, l'air n'est pas toujours aussi sain qu'il devrait l'être. Rassurez-vous : on sait aujourd'hui améliorer la qualité de cet air intérieur sans renoncer à la maîtrise de la dépense énergétique !

LES AUTEURS
MANON COTTET-
PROVIDENCE ET
MARTIAL ARCHENAUT,
ENGIE Lab CYLERGIE

L'une de vos bonnes résolutions de l'année 2019 est d'aller régulièrement à la piscine. Bravo, faire des longueurs, c'est bon pour la santé ! Certes, mais l'atmosphère au parfum de chlore des piscines est-elle sans danger ? Il y a matière à s'interroger. Après le réchauffement climatique, la qualité de l'air est l'une des principales priorités environnementales des Français. Ils ont probablement en tête les épisodes de pollution en ville, au cœur de l'actualité. L'air intérieur des bâtiments est tout aussi important. Celui-ci est souvent davantage pollué que l'air extérieur. Cependant, très peu de mesures concrètes sont pourtant prises pour mesurer la qualité de l'air intérieur (notée QAI) et, si nécessaire, l'améliorer.

Toutefois, certains types de bâtiments sont précurseurs en matière de QAI en raison, soit de l'occupation des espaces par un public reconnu sensible aux polluants (écoles et crèches), soit de la présence dans l'air d'un polluant spécifique et identifié (piscines). Ces exemples illustrent parfaitement les antagonismes auxquels se heurte la conduite des espaces intérieurs.

SOUFFLER LE CHAUD ET LE FROID

De façon générale, pour améliorer la QAI dans un bâtiment, on doit augmenter le débit d'air neuf du système de ventilation car, sauf cas particulier, l'air extérieur filtré est plus sain que l'air intérieur. On peut ainsi diluer la pollution intérieure. Mais augmenter la ventilation, c'est

aussi augmenter la consommation d'énergie, qu'elle soit thermique pour mettre en température l'air neuf ou électrique pour le mettre en mouvement grâce à un ventilateur.

L'efficacité énergétique d'un bâtiment étant devenue cruciale, la tentation est grande de diminuer l'apport d'air neuf. Le cadre réglementaire et normatif évite les excès en imposant un débit minimum d'air neuf par type de local. La gageure est d'ajuster finement la quantité d'air neuf nécessaire en fonction des besoins de l'espace considéré, ceci en veillant au maintien d'une QAI acceptable, gage de confort pour l'occupant et de limitation des risques sur sa santé : cela reste la meilleure solution pour concilier efficacité énergétique et QAI.

LES PISCINES GOURMANDES

La meilleure illustration possible de ces enjeux, *a priori* contradictoires, entre QAI et efficacité énergétique est celui des piscines et autres centres aquatiques. Très gourmande en énergie, la « piscine municipale » est souvent le bâtiment le plus consommateur en énergie du parc immobilier d'une commune. On pense aussitôt au chauffage de l'eau, mais l'essentiel de cette énergie est en réalité utilisé pour compenser son évaporation dans l'atmosphère du hall, ce qui impose des taux de renouvellement d'air importants et énergivores.

Des stratégies existent pour déshumidifier l'atmosphère en limitant ce renouvellement. Mais on se confronte alors à un autre problème. Le chlore nécessaire au traitement de l'eau provoque parfois, par une série de réactions chimiques, l'apparition dans l'eau d'une famille de molécules (les chloramines) qui s'évaporent dans l'air autour des bassins *via* l'évaporation. En forte concentration chronique, la trichloramine, qui donne à la piscine son odeur de chlore, a un impact sur le confort des baigneurs, devient source potentielle de maladies professionnelles reconnues pour les maîtres-nageurs et peut même dégrader sur le long terme le bâtiment.

Que faire? Surventiler implique des surconsommations parfois très importantes. Sous-ventiler ne permet pas d'assurer une QAI correcte. Une expertise est donc nécessaire pour s'adapter à chaque piscine.

Cette quête de l'équilibre est un champ de recherches très actives autour de la métrologie, la conduite du système chauffage-ventilation, le traitement de l'eau... Cylergie (centre de recherche des services à l'énergie d'ENGIE) travaille sur le sujet depuis plusieurs années. En collaboration avec l'Institut national de recherche et de sécurité (INRS), des objectifs communs ont été dressés : identifier les origines du problème, développer les moyens de mesure adaptés et optimiser les systèmes de traitement d'air. Ces sujets de recherche sont

L'AIR DES ÉCOLES



© Monkey Business Images/Shutterstock

La rénovation énergétique des bâtiments anciens les rend de plus en plus performants, mais aussi de plus en plus étanches. Supprimer les fuites par les menuiseries des fenêtres et des portes permet d'importantes économies d'énergie, mais les stratégies d'aération sont parfois négligées. C'est notamment vrai dans les écoles et les crèches. Or le public accueilli est particulièrement sensible aux différentes formes de pollution présentes dans l'air : la QAI doit donc être l'objet d'attentions toutes particulières. Pour s'en assurer, une réglementation spécifique aux établissements accueillant des enfants est applicable depuis le 1^{er} janvier 2018. Elle impose une surveillance de la QAI, en premier lieu, par une évaluation globale des aérations (ouvrants, systèmes de ventilation mécanique...). Deux voies sont ensuite possibles : soit une campagne de mesure, soit une démarche d'audit plus globale des sources et des pratiques mises en œuvre dans le bâtiment (stratégie d'aération manuelle, organisation du site, choix de peintures, de mobiliers et de produits ménagers), accompagnée de la mise en place d'un programme d'action de prévention de la QAI. La deuxième option, adoptée par ENGIE, permet la mise en conformité de l'école avec la réglementation par une démarche vertueuse vis-à-vis de la QAI. Les recommandations données suite à l'audit placent le gestionnaire du bâtiment et ses occupants au cœur du dispositif de prévention. Ce schéma est valable POUR tout type de bâtiment. La réglementation va d'ailleurs progressivement s'étendre à d'autres bâtiments (collèges, lycées puis EPHAD).

valables pour la plupart des bâtiments, les piscines étant simplement en avance sur l'intégration des enjeux QAI.

Si la prise de conscience de l'importance d'une bonne QAI reste encore en retrait par rapport à celle sur les économies d'énergie, elle ne doit pas être négligée pour autant. C'est un réel enjeu de santé publique qui fait l'objet de recherches de plus en plus nombreuses, sur les deux domaines principaux que sont la mesure (détecter le polluant) et le traitement d'air (garantir des concentrations en polluant acceptables tout en maintenant une consommation aussi basse que possible).

Vous n'avez donc plus d'excuses pour ne pas respecter votre bonne résolution. Allez à la piscine la plus proche! ■

Marseille, en région PACA.



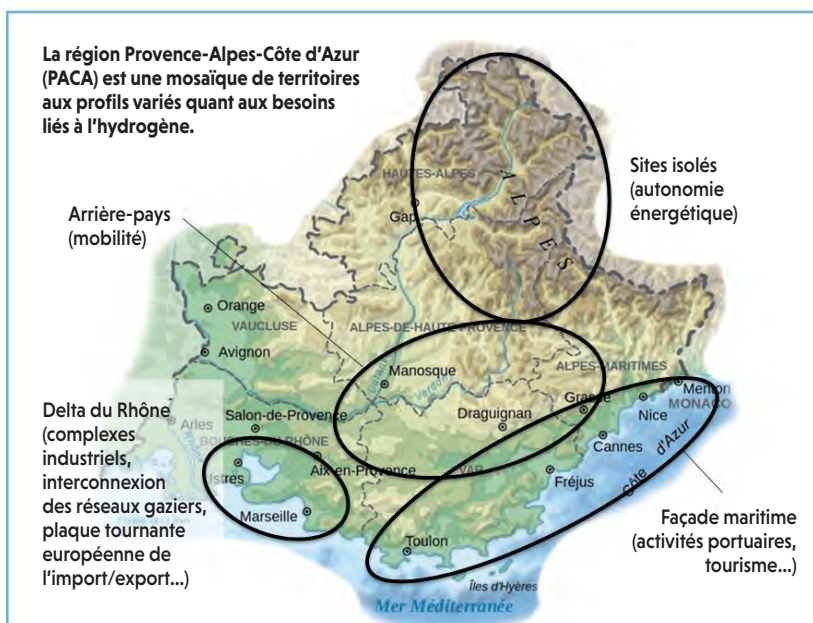
PACA, une région idéale pour l'hydrogène renouvelable

Devenir autonome du point de vue énergétique? Un rêve qui peut devenir réalité grâce à l'hydrogène vert. Démonstration dans le sud de la France.

Bienvenue en Région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA), dans le sud de la France. Tout y est pour vous plaire: les plages de la Côte d'Azur, la gastronomie, l'ensoleillement, les villages typiques, les massifs montagneux... et la filière d'hydrogène renouvelable en cours d'implantation!

Pourquoi l'hydrogène renouvelable? Parce qu'il est la clé de voûte de la transition énergétique. La part des énergies renouvelables dans le mix énergétique mondial ne cesse de croître et atteindra 50% en 2050. Les nouveaux systèmes énergétiques reposeront davantage sur des sources intermittentes (vent, soleil...). L'enjeu sera donc de stocker massivement l'énergie décarbonée et de la transporter des zones de production vers les consommateurs. Aujourd'hui, les batteries électriques couvrent les besoins à court

La région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) est une mosaïque de territoires aux profils variés quant aux besoins liés à l'hydrogène.



© Capenergies, 2018

L'AUTEUR
OLIVIER MACHET,
ENGIE BU Hydrogène

terme, mais comment, demain, utiliser en hiver l'énergie solaire produite l'été?

Grâce à l'hydrogène renouvelable qui, produit par électrolyse de l'eau, permet de faire briller le soleil la nuit. Mais pas seulement, il peut aussi aider les industries consommatrices



© Loïc Mangin

ENSEMBLE POUR L'HYDROGÈNE

• **CAPENERGIES** catalyse la dynamique de l'écosystème hydrogène et œuvre aux synergies entre près de 150 acteurs du secteur (industries lourdes, grands groupes, PME, start-up, laboratoires, écoles...). Depuis 2015, près de 20 projets « hydrogène » ont émergé en PACA pour un budget supérieur à 150 millions d'euros. Le développement de l'hydrogène s'inscrit particulièrement dans les actions et ambitions du programme.

FLAVIEN PASQUET

• Le projet **HYGREEN PROVENCE** vise à faire de la Région PACA un site exemplaire d'un point de vue écologique. Il s'agit de construire un système de production d'électricité renouvelable local, et de valoriser cette électricité soit directement auprès d'acheteurs d'énergie, soit dans une chaîne de production d'hydrogène vert stocké massivement, par exemple dans des cavités salines près de Manosque, et servant des usages locaux. Il couvre les applications de mobilité collective (hydrogène), d'injection d' H_2 dans le réseau de gaz naturel et d'électricité. À pleine puissance, 600 gigawattheures (GWh) électriques pourraient être dédiés à l'hydrogène pour une production de 13 000 tonnes par an (450 GWh).

• Chez **TRACTEBEL**, filiale d'ENGIE en conseil et en ingénierie, on analyse la mise en œuvre technique, à l'horizon 2030, d'un système 100 % renouvelable en PACA. Nous avons modélisé l'ensemble des systèmes électriques locaux en prenant en compte les actifs électriques de production, de stockage... Les résultats montrent que nous sommes à même de répondre à 100 % du profil de consommation régionale en s'appuyant pour plus de 70 % sur de l'énergie solaire, et en mobilisant des unités de stockage par hydrogène sur des échelles de temps journalière et saisonnière.

VINCENZO GIORDANO

d'hydrogène à améliorer leur bilan carbone, ou bien être utilisé pour alimenter des véhicules.

La région PACA s'est engagée fortement dans le développement d'une filière hydrogène renouvelable. Plus particulièrement, autour de Fos-sur-Mer, l'adoption du vecteur hydrogène, en apportant des solutions innovantes, permettrait de s'attaquer aux problèmes de pollution, notamment industrielle et portuaire.

DE L'HYDROGÈNE PARTOUT

Pour ce faire, ENGIE étudie l'implantation d'un électrolyseur à grande échelle près de cette ville pour fournir aux clients industriels de l'hydrogène renouvelable. Les réglementations européenne (la directive RED II) et française (le Plan Hulot) favorisent ce type d'initiative.

Nous menons également de nombreux projets avec les collectivités locales et des partenaires (voir l'encadré ci-contre) pour développer des transports verts n'émettant aucun gaz à effet de serre. Ainsi, ENGIE étudie la conversion de réseaux de bus vers l'hydrogène et la mise en circulation de trains à hydrogène ne nécessitant pas d'électrification des lignes. Autre exemple, le projet « Hynovar », dont Cofely (filiale d'ENGIE) est partenaire, consiste à déployer des solutions de mobilité terrestre (véhicules légers, bus) et maritime (navette à passagers) non polluantes dans le Var. D'où viendrait l'hydrogène nécessaire à ces solutions ?

La région PACA présente plusieurs atouts pour produire massivement de l'hydrogène renouvelable. Rappelons que la région bénéficie du taux d'ensoleillement le plus élevé de France métropolitaine. Cette électricité verte abondante, d'origine solaire, mais aussi potentiellement éolienne, est essentielle pour produire localement de l'hydrogène renouvelable compétitif.

Par ailleurs, de nombreux producteurs et consommateurs d'hydrogène sont présents dans la région de Fos-sur-Mer. Les raffineries et les gaziers industriels ont toutes les cartes en main pour opérer une transition souple vers de l'hydrogène renouvelable. Nous y sommes historiquement présents, notamment avec un terminal méthanier (Elengy), des centrales combinées à gaz (CombiGolfe et Cycofos) et un site de stockage souterrain de gaz à Manosque.

Préparer l'avenir, c'est aussi développer la filière académique. À ce titre, la région possède de nombreuses écoles d'ingénieurs et de techniciens pour favoriser l'adoption de cette nouvelle énergie par les générations futures. Par ailleurs, l'école des pompiers ENSOSP, en collaboration avec ENGIE, travaille sur les risques et l'acceptabilité des solutions.

Bientôt, à côté du sel de Camargue, des santons de Provence, des citrons de Menton, nous devons ajouter l'hydrogène à la liste des spécialités de la région PACA! ■



JAN MERTENS
Directeur scientifique
ENGIE

Ces défis que nous allons relever!

En 2018, plusieurs rapports (de l'Organisation des Nations unies, du GIEC, de l'Agence internationale de l'énergie...) ont alerté les décideurs: la réduction actuelle de nos émissions de gaz à effet de serre est insuffisante pour limiter le réchauffement climatique à +2 °C. Le seuil de +1,5 °C négocié lors des accords de Paris à l'occasion de la COP21 semble d'autant plus hors d'atteinte. Selon les projections fondées sur les efforts consentis aujourd'hui, la température moyenne de l'atmosphère augmentera de +3 °C d'ici la fin du siècle. Cependant, ces rapports ne tiennent pas compte des évolutions de la science et des technologies qui pourraient faire mentir ces prédictions.

Dans le passé, les prédictions ne prévoyaient pas, par exemple, le déploiement massif du solaire. Cette technologie est loin d'être une rupture, mais sa diffusion rapide a changé la donne dans le domaine des énergies décarbonées. Ce cahier vous a donné un aperçu des technologies émergentes qui vont paver la route vers un monde plus durable.

D'autres encore, émergentes, pourraient bouleverser nos modes de production et de consommation de l'énergie (la photosynthèse artificielle, la mobilité réellement verte, la conversion du CO₂ en carburants, produits chimiques ou matériaux...). Leur aboutissement reste néanmoins difficile à prédire: il dépend de nombreux facteurs, des avancées en recherche fondamentale jusqu'aux modèles économiques à penser.

Pour mettre toutes les chances du bon côté, l'investissement dans le développement de ces technologies doit être important et s'appuyer sur une collaboration entre la recherche publique, le privé et les citoyens. On ne passe pas de la feuille ou du laboratoire au déploiement massif. Des projets pilotes et des installations précommerciales sont indispensables pour

tester ces technologies et consolider leur aspect financier. Du temps et un environnement politique stable sont nécessaires. Le soutien des citoyens l'est tout autant. Pour construire ensemble le nouveau monde de l'énergie, nous ne devons pas avoir peur de l'avenir!

“

**Nous avons besoin
de technologies
innovantes pour
faire mentir les
prédictions actuelles
sur le climat !**

”

ENGIE a l'ambition d'être un des leaders de la transition énergétique et d'aider à gagner cette course vers un monde où l'accès à une énergie non polluante sera mieux partagé. L'avenir en dépend. Cela se fera par un mix énergétique adapté à chaque région et à chaque besoin. Nous nous sommes engagés pleinement dans cette direction, et nous comptons sur vous pour nous accompagner sur ce chemin! ■

RÉFÉRENCE

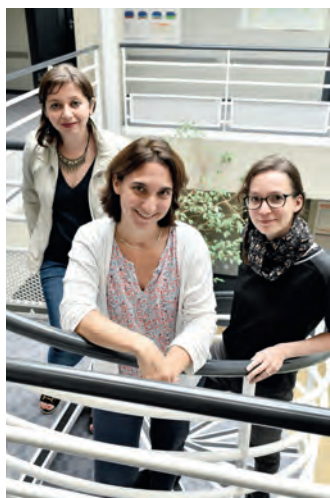
Retrouvez ENGIE Green : <http://www.engie.fr/green/>



Photos: © Franck Dunouau / ENGIE Lab CRIGEN, 2018

TOUS ENSEMBLE POUR UN NOUVEAU MIX!

L'AUTEURE
ISABELLE MORETTI



La transformation du monde de l'énergie ne va pas se faire en quelques jours. Elle ne sera pas non plus le fait de quelques ingénieurs. Au contraire, tous les collaborateurs d'ENGIE, dans 70 pays, sont impliqués. Quels que soient les profils, les métiers, les parcours... cette diversité est un élément clé de la réussite de cette transformation. Tous les niveaux de compétences sont mobilisés, des experts, mais pas seulement, des hommes et des femmes, aux plus hauts postes managériaux comme à des postes techniques.

site de cette transformation. Tous les niveaux de compétences sont mobilisés, des experts, mais pas seulement, des hommes et des femmes, aux plus hauts postes managériaux comme à des postes techniques.

LES EXPERTS CLÉS

400 Experts clés et une quinzaine de Top experts sont réunis en une communauté qui, au sein d'ENGIE, répond à toute question pointue. Elle a aussi une mission de représentation du groupe à l'extérieur.



Pour relever ces défis, nous nous associons à des acteurs académiques et industriels de haut niveau, *via* de nombreux programmes communs de recherche. Nous travaillons également avec des PME ainsi que des *start-up* que nous incubons et qui grandissent avec nous.

Nous travaillons avec la société civile et avec nos clients pour chercher et trouver des solutions. Nous sommes ouverts au monde, et à toute personne souhaitant s'engager avec nous pour contribuer au progrès harmonieux. Pourquoi pas vous ? ■

LES COMMUNAUTÉS D'ENGIE

Écosystème ouvert, catalyseur d'idées et de business, les communautés d'ENGIE rassemblent celles et ceux qui, à l'intérieur et en dehors d'ENGIE, ont choisi d'imaginer les solutions innovantes de demain. Elles constituent un réseau international de partage de connaissances et d'expériences pour faire émerger des idées neuves au service de la performance et de l'innovation.



Découvrez les communautés d'ENGIE :
<https://publications.clients-prod.fr/engie/fr/>

Proposer vos innovations sur :
innovation.engie.com

POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr
170 bis boulevard
du Montparnasse 75014 Paris
Tél. 01 55 42 84 00

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:
Capucine Jahan

Marketing & diffusion:
Arthur Peys & Charline Buché

Direction du personnel:
Olivia Le Prévost

Fabrication: Marianne Sigogne et Olivier Lacam

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



Et si vous changiez le monde ?

À vous qui êtes ouverts sur le monde.
À vous qui pensez aux autres.
À vous pour qui l'audace est une évidence
et l'exigence une nécessité.
À vous qui posez mille questions pour
mieux pouvoir y répondre.

Ensemble, rendons le progrès plus harmonieux.

*Les Imaginative Builders**



Rejoignez la communauté des Imaginative Builders.



L'énergie est notre avenir, économisons-la !

*Les femmes et les hommes qui imaginent et construisent un progrès harmonieux.