

# ÉNERGIE

UN ÉQUILIBRE ENTRE  
INNOVATION ET SOBRIÉTÉ

14<sup>E</sup> CAHIER DE VEILLE





# ÉNERGIE

---

UN ÉQUILIBRE  
ENTRE INNOVATION  
ET SOBRIÉTÉ

14<sup>E</sup> CAHIER DE VEILLE



# ÉDITO

---

Odile Gauthier,  
directrice générale de l'IMT

---



À la croisée des problématiques environnementales, sociales, et géopolitiques, l'énergie rassemble des enjeux critiques. Si en France, elle a longtemps été perçue comme un bien abondant, la conjonction entre des crises internationales d'approvisionnements, un parc nucléaire vieillissant et une insuffisante diversification des sources a fait prendre récemment conscience au grand public de sa rareté. Or, de par son caractère hautement technologique et ses implications économiques et environnementales, la filière énergétique impose des choix délicats qui s'inscrivent dans le temps long.

Dans un contexte de transition écologique impérative pour faire face au changement climatique et à la finitude des ressources quelles qu'elles soient, quels seront alors les modes de production et leur mix ? Comment faudra-t-il adapter les réseaux ? Comment les usages en seront modifiés ? Quels coûts collectifs sont pris en charge par la puissance publique ?

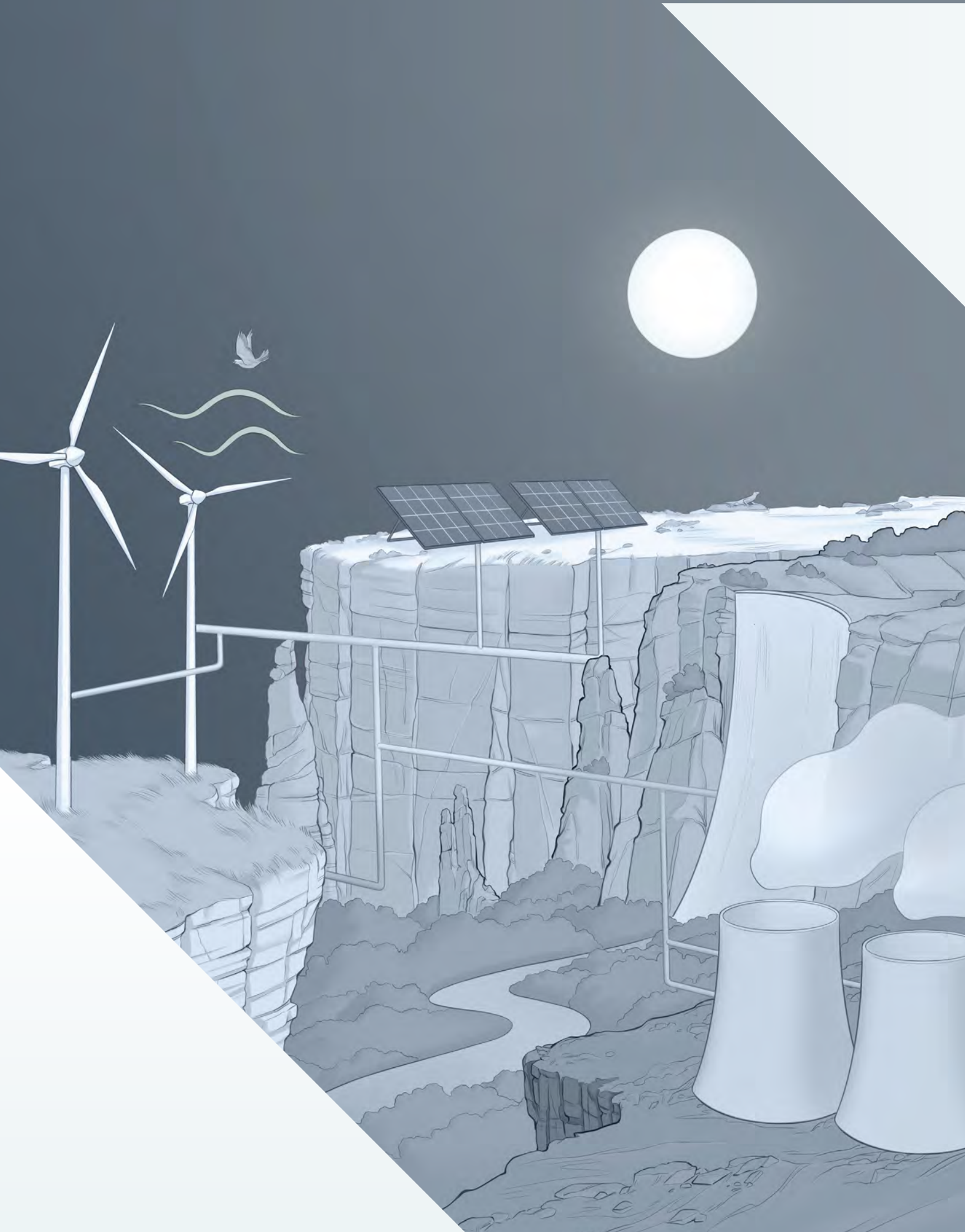
Autant de questions qui animent les équipes d'enseignement et de recherche des écoles de l'Institut Mines-Télécom, fortement engagé depuis sa création dans la transition écologique et énergétique. Du lien intime entre énergie et ressources naturelles, à la nécessaire sobriété, en passant par les nouveaux modes de production et leurs impacts sur les réseaux d'énergie, ce 14<sup>e</sup> cahier de veille présente les travaux en cours au sein des laboratoires de l'IMT et des partenaires de la Fondation Mines-Télécom pour préparer l'avenir de l'énergie. Un sujet qui touche aussi bien les professionnels de la filière, que les consommateurs finaux.



# SOMMAIRE

---

ÉDITO	5
<b>COMPRENDRE L'ÉNERGIE</b>	<b>9</b>
UN MONDE EN ÉTAT D'ÉBRIÉTÉ ÉNERGÉTIQUE	11
<b>LES ÉNERGIES DE L'AVENIR</b>	<b>19</b>
DES DÉCHETS DÉBORDANT D'ÉNERGIE	20
VERS UNE SOCIÉTÉ HYDROGÈNE ?	25
SOLAIRE : ÉNERGIE PHARE DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE	28
DE L'ÉNERGIE EN RÉSERVE	32
<b>ORGANISER LE RÉSEAU</b>	<b>39</b>
PILOTAGE ÉNERGÉTIQUE D'HIER, CHERCHE REMPLAÇANT INTELLIGENT	40
UNE ÉNERGIE <i>MADE IN TERROIR</i>	45
UNE PETITE DONNÉE POUR L'ÉNERGIE, UN PAS DE GÉANT POUR LA SOCIÉTÉ	50
<b>NOUVEAUX USAGES ET NOUVEAU PARADIGME</b>	<b>57</b>
L'ÉNERGIE D'AVENIR EST CELLE QUE NOUS NE CONSOMMONS PAS	58
À QUOI RESSEMBLERA LE MIX ÉLECTRIQUE DE DEMAIN ?	62
L'URGENCE ENVIRONNEMENTALE D'UN RENOUVEAU ÉNERGÉTIQUE	68





# I

# COMPRENDRE L'ÉNERGIE

---

1

UN MONDE  
EN ÉTAT D'ÉBRIÉTÉ  
ÉNERGÉTIQUE

---



# UN MONDE EN ÉTAT D'ÉBRIÉTÉ ÉNERGÉTIQUE

---

**La transition énergétique doit réduire l'impact environnemental du secteur de l'énergie. Plusieurs routes mènent à un avenir décarboné. Où se situe la France et où va-t-elle ? Quels sont les défis de cette transition aussi complexe que nécessaire ?**

Plus d'efficacité par-ci, amène à plus de consommation par-là. Notre société est de plus en plus gourmande en énergie. Mais pour continuer à prospérer à la surface de notre belle planète Terre, il serait temps de changer de régime. Pour cause, les énergies fossiles – 81 % du gâteau de l'énergie primaire mondiale – émettent une grande partie des gaz à effet de serre responsables du changement climatique. Et ces émissions ne cessent d'augmenter, comme le répète depuis six rapports le Groupe d'experts intergouvernemental du climat (GIEC). En conséquence, l'ensemble du système climatique est affecté, en témoigne un réchauffement global de 1,1 °C (par rapport à 1850-1900), l'acidification des océans ou encore la fonte accélérée des glaces.

Mais cela n'est que la couche de vernis qui masque une réalité moins perceptible à l'échelle temporelle de notre existence. Les océans se sont, par exemple, réchauffés plus rapidement lors du dernier siècle qu'au cours des 11 000 années précédentes. Pour sortir de ce Guinness sordide des records climatiques, trois recommandations majeures du dernier rapport du GIEC ciblent le secteur de l'énergie. À savoir :

adopter un mode de vie plus sobre, cesser d'utiliser des ressources fossiles et accélérer le développement des énergies renouvelables. Ces trois ambitions pavent déjà le chemin qui doit mener la France vers sa neutralité carbone d'ici à 2050. Reste à savoir comment y aller.

**« Les océans se sont réchauffés plus rapidement lors du dernier siècle qu'au cours des 11 000 années précédentes. »**

---

### Calcul d'itinéraire en cours

La transition énergétique a pour objectif de réduire nos consommations d'énergie et de décarboner leur production. Pour cela, elle ambitionne une refonte de nos systèmes de production et de nos modes de consommation. Le paysage et la trajectoire de cette transition dépendent d'une grande variété de choix sociétaux, en témoignent

les scénarios réalisés par des organismes comme l'ADEME, le gestionnaire du réseau de transport d'électricité français (RTE) ou encore l'association négaWatt.

L'intérêt de ces scénarios se trouve avant tout dans leurs conclusions consensuelles : l'électrification massive de nos usages et la sobriété sont les piliers de la transition énergétique. Pour commencer, l'électrification vise à remplacer une partie des énergies fossiles. Toutefois, les énergies renouvelables (ENR) ne pourront répondre à elles seules à notre état d'ébriété énergétique actuel. « *Une grande différence entre le fossile et le renouvelable est la dilution énergétique. Les ENR demandent plus d'espace et de ressources afin de produire autant d'énergie. Nous devons donc réduire dans un premier temps notre consommation globale, de sorte que ces nouvelles énergies prennent un pourcentage plus important dans nos consommations* », explique Natacha Gondran, chercheuse en évaluation environnementale à Mines Saint-Étienne.

## « Les politiques actuelles piochent un peu partout sans opter pour une trajectoire en particulier. »

Autre point commun : l'ensemble des scénarios tenant compte de la sobriété énergétique misent davantage sur le moindre risque et les changements de comportement. « *Ces scénarios s'appuient sur des solutions existantes pouvant être mises en place dès maintenant, plutôt que sur des innovations technologiques qui ne verront peut-être jamais le jour ou n'auront pas les performances escomptées* », ajoute Yasmine Lalau, chercheuse en énergétique et génie des procédés à IMT Mines Albi. Mais bien que ces scénarios visent à éclairer les

décisions publiques, les politiques actuelles piochent un peu partout sans opter pour une trajectoire en particulier qui serait proposée par l'un de ces outils.

### Les choix stratégiques de la France

Les choix de la transition énergétique française découlent de la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC) qui est réévaluée tous les cinq ans. Environ 46% de l'énergie utilisée par la France est d'origine fossile. L'État envisage bien de la remplacer grâce à l'électrification massive des usages. Par exemple, elle ambitionne une électrification de son parc automobile d'ici à 2035. Pour cela, notre pays dispose d'un avantage majeur : son électricité est déjà décarbonée, car issue à 87% des énergies nucléaire et renouvelables.

À quoi ressemblera alors le bouquet énergétique de demain ? Côté offre, la France mise donc sur davantage d'électricité décarbonée issue des énergies renouvelables et du nucléaire, ainsi que sur la transformation en biogaz de la biomasse et des déchets produits sur son territoire. L'hydrogène vert finirait de décarboner les secteurs les plus difficiles à électrifier. Elle s'oriente ainsi vers un système neutre en carbone et souverain. Côté demande, la SNBC met en exergue l'efficacité énergétique en perfectionnant ses réseaux et envisage la sobriété. Elle prévoit ainsi de réduire la consommation d'énergie finale de 40% au cours des trente prochaines années. La France retrouverait alors son niveau de consommation d'énergie de la fin des années 1960, tout en maintenant la qualité de vie actuelle.

Toutefois, l'énergie, qu'elle provienne de ressources fossiles ou renouvelables, est toujours intriquée à des problématiques environnementales. En effet, cette transition énergétique déplace les questions d'approvisionnement en ressources fossiles vers les ressources minières.

### D'une dépendance à une autre

Le comble de la transition énergétique est que pour consommer moins d'énergie à l'avenir, il va d'abord falloir en consommer plus. Car, bien qu'elle mène à une société plus écologique, elle est loin d'être neutre pour l'environnement. En témoigne son bilan matière. À puissance équivalente, les infrastructures des énergies renouvelables consomment plus de métaux qu'une centrale nucléaire. La dynamique de transition énergétique mondiale ne pourra donc se réaliser qu'à travers l'intensification des extractions minières et des impacts associés. « Généralement, les unités d'hydro-métallurgie permettant d'extraire les métaux sont alimentées par des énergies fossiles. Elles perdent également beaucoup d'énergie sous forme de chaleur fatale, polluent les sols et consomment énormément d'eau », décrit Christophe Coquelet, chercheur en génie des procédés à IMT Mines Albi.

Dans le cadre du développement des énergies renouvelables, des matériaux actuellement abondants deviennent critiques, comme le cuivre. « Il serait futile de baser une stratégie de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> sur des systèmes que nous ne pourrions pas construire. C'est pourquoi les scénarios commencent à prendre en compte les bilans matière des chemins qu'ils proposent et surtout qu'ils intègrent d'abord une réduction des consommations », ajoute Yasmine Lalau. Apparaissent aussi des tensions sur le sable, brique essentielle à toute construction.

À cela, s'ajoute le développement de batteries lithium-ion pour pallier l'intermittence des énergies renouvelables et alimenter des véhicules électriques. Résultats : les demandes en lithium, nickel, cobalt et en terres rares vont exploser. « Les mines de lithium actuellement ouvertes à travers le monde sont incapables de répondre à ce besoin. Il faut également compter entre 10

et 15 ans pour qu'une nouvelle mine soit opérationnelle. Enfin, les méthodes de recyclage doivent être optimisées afin de récupérer ces matériaux dans nos déchets et les réutiliser », précise Christophe Coquelet.

Par ailleurs, à l'image des ressources fissiles et fossiles, les minerais de la transition énergétique sont inégalement répartis à travers le monde. Leur approvisionnement pourrait ainsi générer de nouvelles tensions géopolitiques. Ne disposant ni de grandes réserves identifiées, ni d'une industrie de transformation, l'Europe est entièrement dépendante de ses voisins. De quoi mettre à mal son ambition de souveraineté énergétique, du moins lors de la phase de construction de ses nouvelles infrastructures énergétiques.

## « L'approvisionnement en ressources minérales pourrait générer de nouvelles tensions géopolitiques. »

### Anticiper les changements climatiques

Bâtir de nouveaux systèmes énergétiques durables et fiables ne saurait se faire sans anticiper les conditions climatiques de demain et les besoins associés. Ainsi, la demande en climatisation augmentera l'été, celle en chauffage baissera l'hiver. La sécurité des réseaux sera menacée par l'élévation générale des températures. « Les câbles électriques ne sont pas adaptés aux hautes températures. Enedis, distributeur de l'électricité en France, abaisse déjà la tension dans les câbles l'été pour réduire les risques liés à leur dilatation », explique Yasmine Lalau. De plus, les énergies renouvelables variables sont davantage sensibles aux aléas météorologiques. Les centrales nucléaires et la production hydroélectrique

seront tributaires des sécheresses. Sans parler du caractère imprévisible d'événements extrêmes et de tous les effets que nous ne connaissons pas encore. Un des principaux enjeux sera donc de renforcer l'adaptabilité et la flexibilité des systèmes de demain.

Pour l'historien Jean-Baptiste Fressoz, il n'y a jamais eu de transition énergétique par le passé<sup>1</sup>. Une transition implique le passage d'un état à un autre. Or, nous ne sommes pas passés du bois au charbon, du charbon au pétrole et au gaz et de ces derniers au nucléaire. Nous avons additionné ces sources d'énergie. Remplacer les énergies fossiles par les énergies renouvelables est par conséquent un immense défi pour l'humanité. ▲

**« Remplacer les énergies  
fossiles par les énergies  
renouvelables  
est un immense défi  
pour l'humanité. »**

---

---

1. Jean-Baptiste Fressoz. Pour une histoire désorientée de l'énergie. 25èmes Journées Scientifiques de l'Environnement - L'économie verte en question, 2014

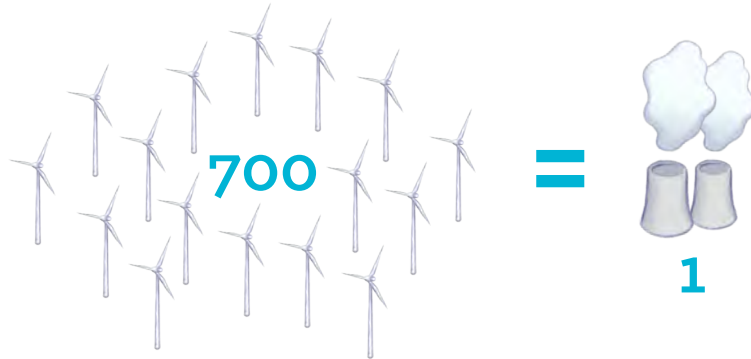
## VISION D'INDUSTRIEL – LE GROUPE BOUYGUES

---

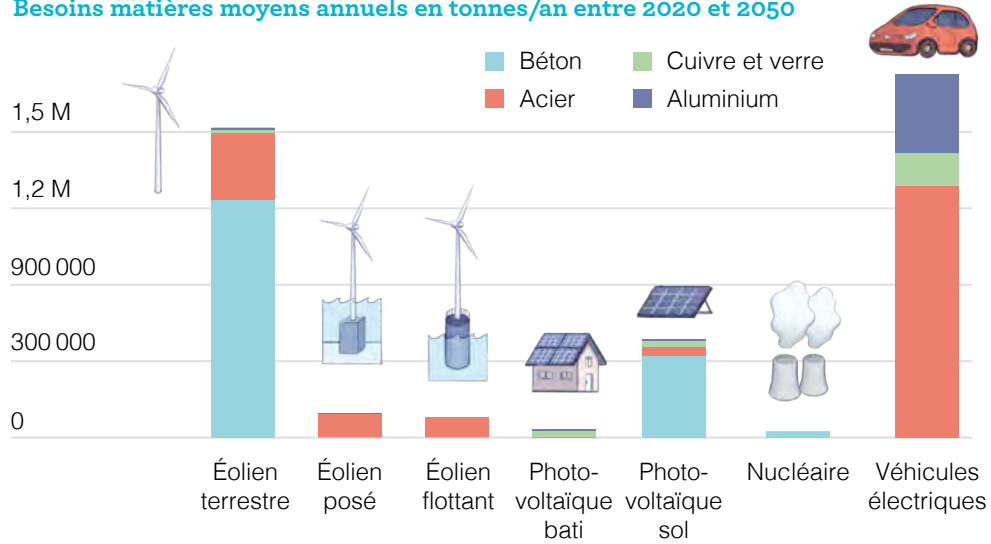
Un groupe Bouygues 100 % électrique d'ici à 2040, qu'est-ce que cela signifie ? Cette question est au cœur d'un exercice de Design Fiction mené par la direction de l'innovation de l'entreprise Bouygues. « *Pour atteindre notre objectif de décarbonation, nous devons déterminer dès maintenant les énergies que nous utiliserons, la manière d'électrifier nos usages et la façon dont nos activités vont être transformées par cette transition selon les contraintes et conditions très variées de nos différents métiers* », décrit Gustavo Boriolo, chef de projet innovation chez Bouygues.

Cette réflexion, matérialisée sous la forme d'un magazine fictif daté de 2040, vise à explorer l'avenir du groupe, ses activités et son positionnement pour atteindre un mix énergétique le plus décarboné possible. Par exemple, certaines activités plus faciles à électrifier, comme les télécommunications, ont pour défi de passer entièrement aux renouvelables. Cette énergie intermittente entraîne alors de nouvelles problématiques de stockage pour le groupe. Se pose également la question du raccordement d'éventuelles infrastructures renouvelables de Bouygues au réseau national. Les métiers liés à la construction sont, au contraire, plus difficiles à décarboner. L'hydrogène vert est alors envisagé comme un vecteur prometteur. Mais où l'obtenir et sous quelle forme le stocker ? Enfin, la transition énergétique est aussi créatrice d'opportunité. « *Parmi nos scénarios de 2040, Bouygues pourrait contribuer à la production et au stockage d'énergie en intégrant des solutions énergétiques dans ses bâtiments et infrastructures. Ces derniers devront davantage être mis en interaction avec la ville, être autonomes en énergie et, si possible, alimenter les quartiers qui les entoureront* », décrit Gustavo Boriolo. La suite ? Seul l'avenir nous le dira !

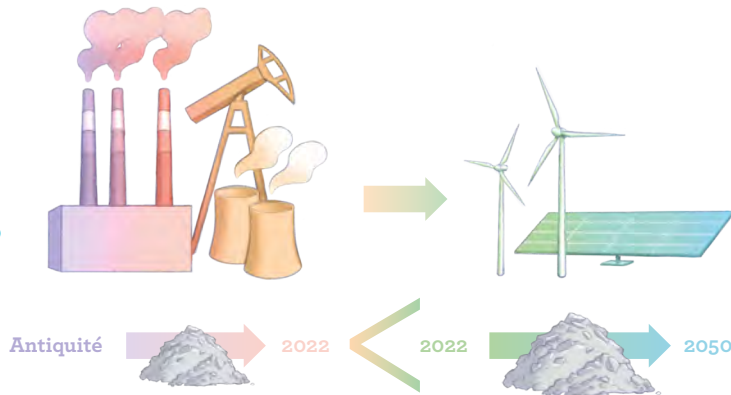
Il faut environ **700 éoliennes** d'une puissance de 6 mégawatts pour produire la même quantité d'énergie qu'**une centrale nucléaire** de 1300 mégawatts.



Besoins matières moyens annuels en tonnes/an entre 2020 et 2050



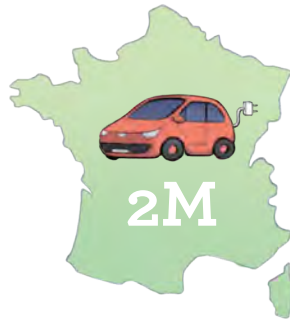
Un transfert complet vers les énergies renouvelables pour un taux de croissance constant de 5% par an fait que la **quantité cumulée de métaux à produire d'ici à 2050 (435 millions de tonnes)** pourrait dépasser la quantité cumulée produite depuis l'antiquité jusqu'à aujourd'hui.





Demande en lithium pour une production  
annuelle de 2 millions de véhicules  
électriques par an en France

Production mondiale  
en 2020



Lithium



46 milliers de tonnes



31 milliers de tonnes

Cobalt



111,5 milliers de tonnes



110 milliers de tonnes

Le développement d'un parc de véhicules **100 % électrique**  
dans le monde conduirait à une **augmentation totale** de...



**x 20**



Cobalt

**x 30**



Lithium

**+ 22%**



Cuivre



# II

## LES ÉNERGIES DE L'AVENIR

---

1

DES DÉCHETS  
DÉBORDANT D'ÉNERGIE

---

SOLAIRE :  
ÉNERGIE PHARE  
DE LA TRANSITION  
ÉNERGÉTIQUE

---

3

2

VERS UNE SOCIÉTÉ  
HYDROGÈNE ?

---

DE L'ÉNERGIE  
EN RÉSERVE

---

4

# DES DÉCHETS DÉBORDANT D'ÉNERGIE

**Transformés en gaz de synthèse, en biogaz ou en carburants alternatifs, les produits biosourcés dérivés de nos déchets organiques peuvent réduire notre dépendance aux énergies fossiles. À condition de trouver les bonnes recettes de transformation et d'application.**

Si l'heure énergétique pointe vers le zéro émission nette, elle ne s'est pas encore arrêtée sur le zéro déchet. Atteindre cette dernière ambition est un autre sujet, mais force est de constater que les résidus organiques sont encore pleins de ressources lorsqu'ils sont observés à travers la lunette de l'énergie. Ainsi, des composés biosourcés issus de nos déchets ont un rôle à jouer pour remplacer leurs cousins fossiles dans notre mix énergétique. Intégrer ce contexte dans une perspective d'économie circulaire et les déchets se retrouvent propulsés sur le podium (ou presque) des sources énergétiques d'avenir.

**« Les déchets se retrouvent propulsés sur le podium des sources énergétiques d'avenir. »**

## De la biomasse au biogaz

À IMT Mines Albi, Javier Escudero recherche des solutions techniques de transformation des déchets organiques. Le chercheur en

génie des procédés s'attaque en particulier à améliorer les rendements de procédés de gazéification. Ce mode de valorisation est plus vertueux que l'incinération puisqu'il vise à obtenir des produits d'intérêt comme des gaz de synthèse réutilisables. Pour ce faire, les ressources les plus en vue sont les déchets de biomasse. « *Nous travaillons notamment sur la vigne dont les racines sont polluées par des champignons. Tous les pieds doivent être arrachés de sorte à laisser le moins de racines en surface. Mais pour d'autres cas de déchets agricoles, tout n'est pas prélevé afin d'enrichir le sol en minéraux et assurer son équilibre* », explique Javier Escudero.

En pratique, la gazéification avec injection d'air brûle une partie de l'énergie stockée dans la biomasse (25 à 30 %) pour la décomposer en gaz de synthèse composé principalement d'hydrogène, de monoxyde de carbone, de CO<sub>2</sub>, de composés organiques volatils (COV), de méthane (CH<sub>4</sub>) et de polluants. « *Le désavantage d'injecter de l'air est que nous obtenons jusqu'à 50 % d'azote qui est très difficile à séparer des autres gaz, explique le chercheur. C'est pourquoi nous essayons de substituer l'air par un mélange d'oxygène et d'autres*

composés ». Pour le moment, le coût de production par ce procédé est compris entre 100 et 200 € pour 1 m<sup>3</sup> de biogaz, contre 20 € pour du gaz naturel fossile<sup>1</sup>. L'objectif majeur est donc de réduire les coûts de production et d'épuration du syngaz afin de le rendre attractif.

En ce sens, les chercheurs ont acquis un petit réacteur leur permettant de travailler sur un vrai gaz de synthèse au plus proche des conditions industrielles. De tels réacteurs ont une puissance pouvant atteindre 3 mégawatts adaptée à un usage à l'échelle locale. Il permettrait, par exemple, d'assurer l'autonomie énergétique d'une station de traitement de déchets tout en valorisant ces derniers de manière plus vertueuse.

#### Valoriser les déchets de nos déchets

À partir des résidus agricoles, mais aussi d'ordures ménagères, il est possible de générer un biogaz composé majoritairement de méthane (50 à 70 % en volume) et de dioxyde de carbone (30 à 50 % en volume). Il est produit par des micro-organismes digérant la matière organique de nos déchets dans un environnement dénué d'oxygène. C'est le principe de la méthanisation qui se déploie aussi bien à l'échelle d'une exploitation agricole qu'au niveau industriel. En France, ce type de bioréacteurs est en augmentation. À moyenne échelle, ils sont par exemple associés à des stations d'épuration afin de valoriser les eaux usées. Toutefois, si le biométhane qui compose ce biogaz peut directement être injecté au sein des réseaux de gaz national (500 sites d'injection en France), la part de CO<sub>2</sub> biogénique est, quant à elle, généralement rejetée dans la nature.

Dans un esprit d'économie circulaire, n'y aurait-il pas mieux à faire ? « En 2019, l'Association mondiale du Biogaz estimait que l'exploitation de toutes les ressources

offertes par le biogaz permettrait d'assurer 6 à 9 % de la consommation énergétique primaire mondiale et de réduire de 10 à 13 % nos émissions de gaz à effet de serre », rapporte Doan Pham Minh. En ce sens, le chercheur en génie des procédés d'IMT Mines Albi s'intéresse à de nouvelles façons de valoriser la part oubliée du biogaz qu'est le CO<sub>2</sub>. L'enjeu : permettre à cette filière de jouer un rôle majeur dans le mix énergétique du futur.

**« L'exploitation des ressources offertes par le biogaz permettrait de réduire de 10 à 13% les émissions de gaz à effet de serre. »**

À ce titre, il étudie la meilleure façon de faire réagir le CO<sub>2</sub> avec de l'hydrogène pour générer de nouveaux produits utiles. En résulte, par exemple, davantage de biométhane, du méthanol largement utilisé par l'industrie chimique ou encore des carburants liquides. « Séparer les molécules de CH<sub>4</sub> et de CO<sub>2</sub> coûte cher. C'est pourquoi nous étudions, avec des industriels, le principe d'hydrogénation directe du biogaz qui s'affranchit de cette étape. À terme, ce procédé permettrait d'obtenir 30 à 40 % de biométhane en plus », précise Doan Pham Minh.

Ces travaux s'avèrent d'autant plus prégnants que la loi française dite « anti-gaspillage » sur la gestion des biodéchets - qui entrera en vigueur au 1<sup>er</sup> janvier 2024 - impactera directement la filière du biogaz. Pour cause, elle imposera à tous les ménages un nouveau tri des déchets. Les poubelles organiques devraient alors conte-

1. Prix avant la guerre en Ukraine.

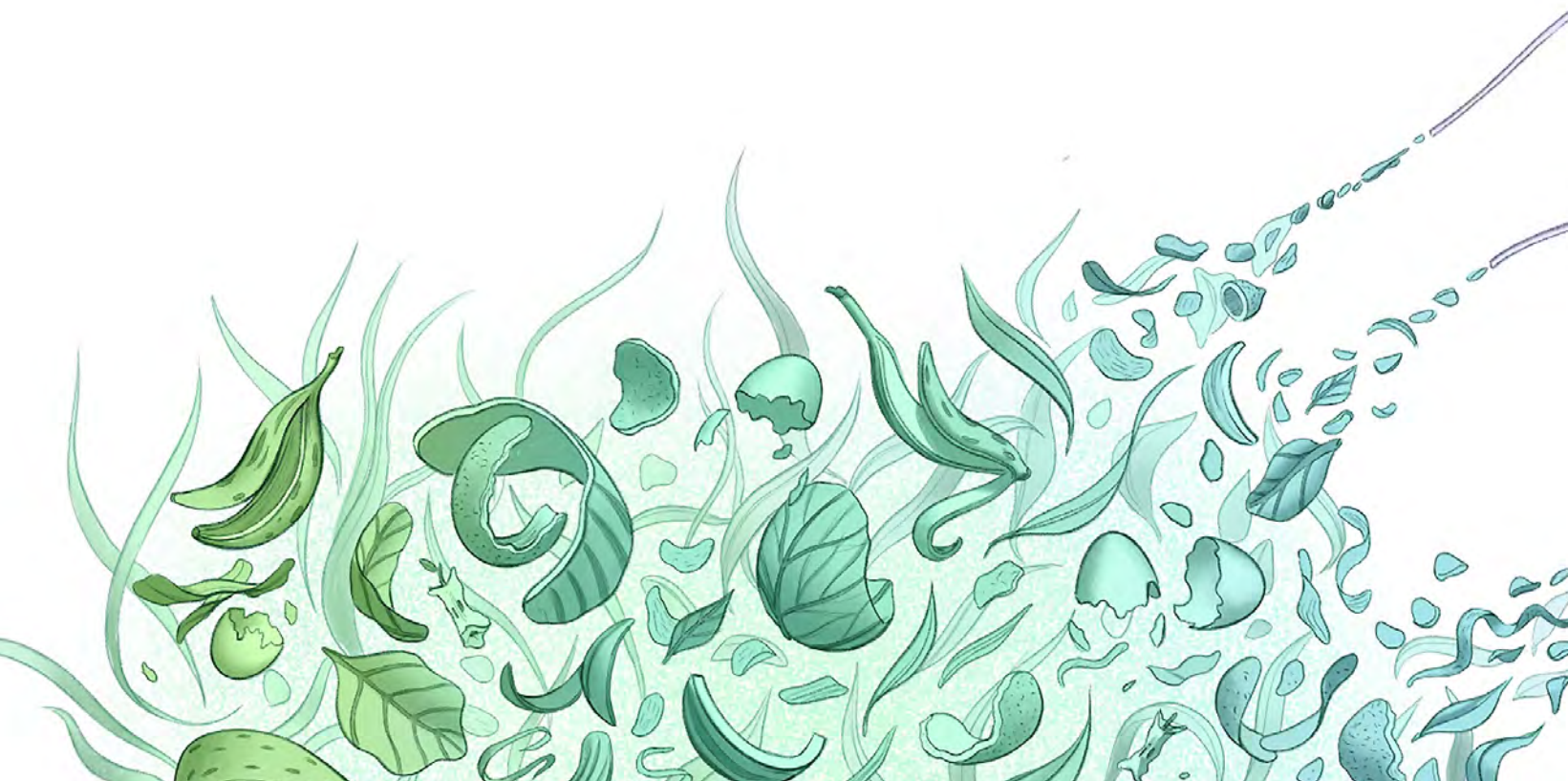
nir moins de mélanges à base de plastique difficiles à éliminer dans les bioréacteurs. « *Cela signifie une portion organique plus importante et donc des procédés de dégradation accélérés. Le modèle économique de la filière et la valorisation de ses produits vont donc être impactés* », précise le chercheur.

### Faire le plein d'énergie

Les déchets radiés des poubelles organiques par la loi anti-gaspillage ne vont pas se volatiliser. S'ils sont également recalés par le recyclage, ils seront alors à nouveau destinés à une valorisation énergétique. Mais avant d'atteindre la case incinération, ils peuvent passer par la case carburant. À IMT Atlantique, l'énergéticien Khaled Loubar cherche à transformer ces résidus, et bien d'autres, pour en faire des alternatives aux combustibles fossiles. Toutefois, au même titre qu'un véhicule à essence ne fonctionnerait pas avec du gazole, la plupart des déchets génèrent des gaz et des liquides que les moteurs actuels ne savent pas brûler.

## « Comment un moteur peut-il accepter un carburant différent que celui pour lequel il a été conçu ? »

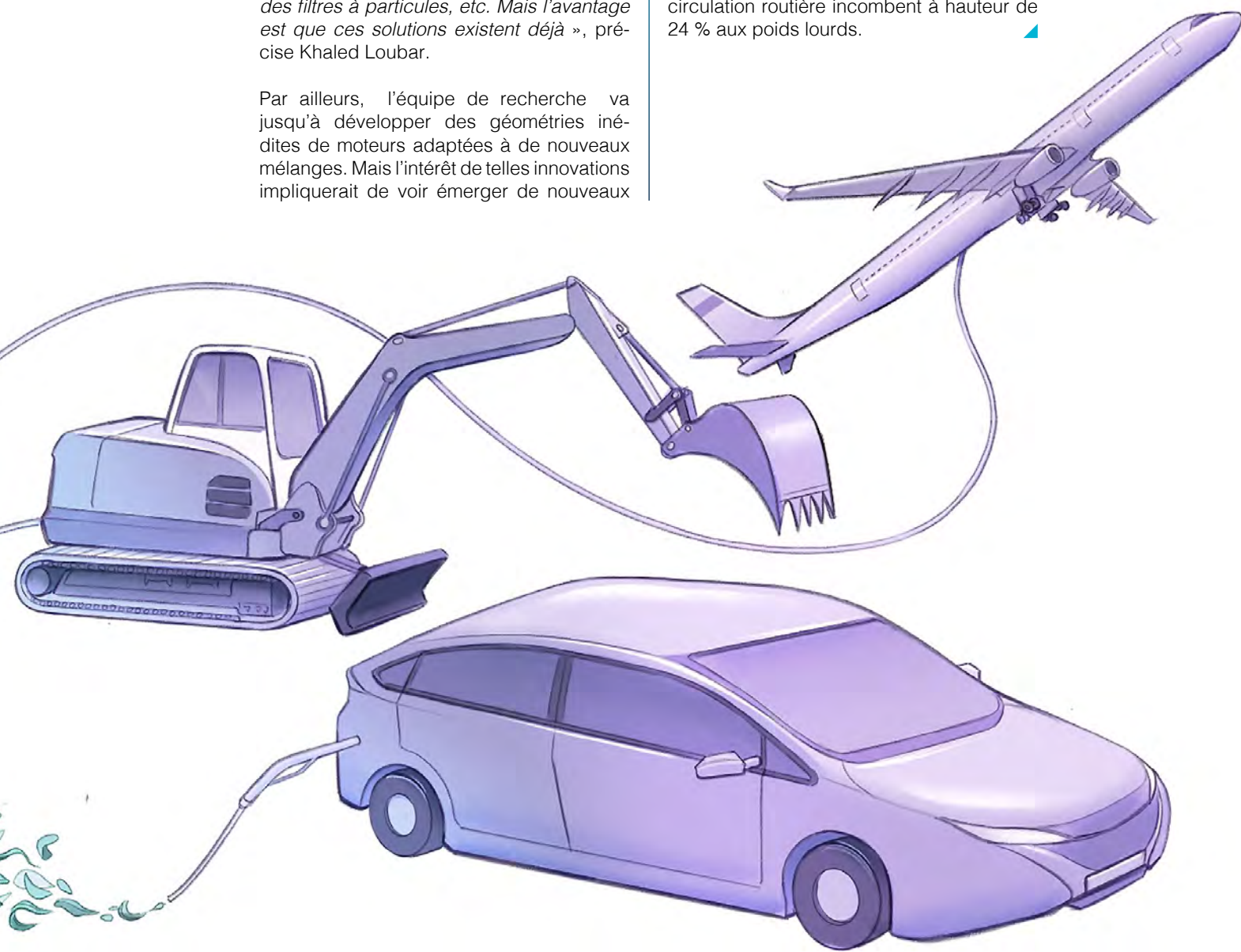
C'est pourquoi, le chercheur travaille conjointement sur la génération de nouveaux carburants issus de déchets et mesure l'impact de leur utilisation sur différents moteurs. Autrement dit, il se pose la question : comment un moteur à essence, diesel ou au gaz peut-il accepter un carburant différent que celui pour lequel il a été conçu ? « *Par exemple, nous étudions l'intégration d'hydrogène ou de biométhane dans la combustion d'un moteur diesel. Nous allons ensuite jusqu'à optimiser les réglages internes du moteur pour qu'il en accepte davantage* », explique Khaled Loubar. C'est le principe de la combustion dual-fuel (multi-carburant).

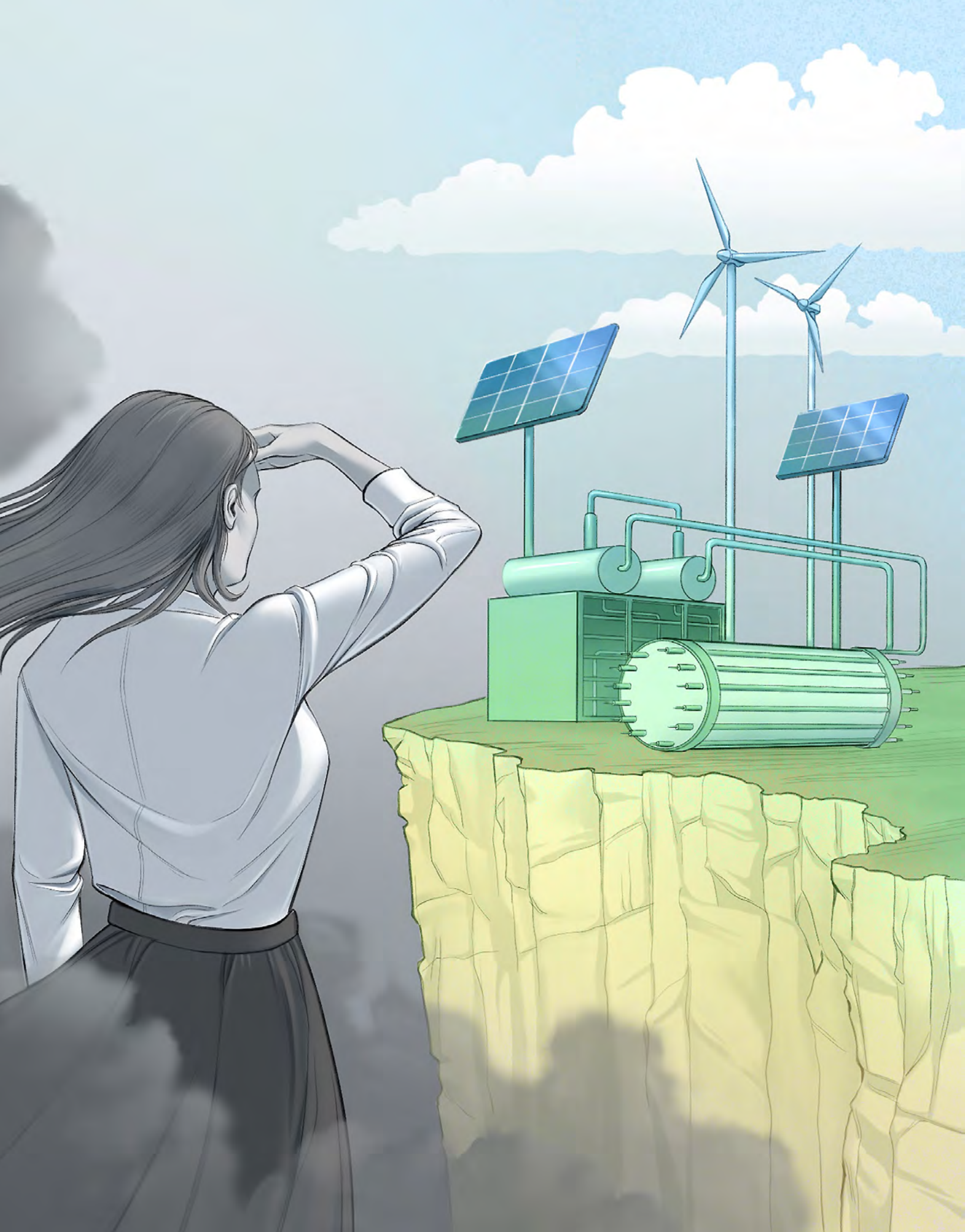


Résultat : l'équipe de recherche est parvenue à la limite critique d'un mélange composé à 80 % d'hydrogène sans altérer le fonctionnement d'un moteur diesel. Ce mix présente un avantage majeur. Premièrement : la réduction jusqu'à 80 % du nombre de particules fines rejetées par des véhicules lourds, voire la totalité sur des véhicules légers. Deuxièmement : la quantité de ressource fossile utilisée est réduite. Cependant, le recours à l'hydrogène augmente en contrepartie de 10 à 20 % les émissions d'oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ). « Cela nécessite d'ajouter des systèmes de post-traitement comme un pot catalytique, des filtres à particules, etc. Mais l'avantage est que ces solutions existent déjà », précise Khaled Loubar.

Par ailleurs, l'équipe de recherche va jusqu'à développer des géométries inédites de moteurs adaptées à de nouveaux mélanges. Mais l'intérêt de telles innovations impliquerait de voir émerger de nouveaux

marchés pour les motoristes. « Lorsqu'on parle de décarbonation des transports, il est généralement question d'électrifier les véhicules. Toutefois, si nous arrivons à utiliser une combinaison d'hydrogène et d'ammoniac par exemple - donc un mélange sans carbone - dans un moteur diesel, il est aussi possible de réduire considérablement les émissions de  $\text{CO}_2$  », souligne le chercheur. Une des pistes pour la reconversion des engins de chantier et des véhicules lourds, plus difficiles à électrifier, serait ainsi orientée vers la production de carburants mixtes. L'impact serait conséquent, sachant que les émissions de gaz à effet de serre liées à la circulation routière incombent à hauteur de 24 % aux poids lourds. ▲







# VERS UNE SOCIÉTÉ HYDROGÈNE ?

---

**L'hydrogène promet de décarboner l'industrie, soutenir une mobilité sans émission, stocker et compenser l'intermittence des énergies renouvelables. En pratique, sa production verte est pourtant difficile, son stockage problématique et son transport un véritable casse-tête pour les ingénieurs. Quel est alors l'avenir de ce vecteur dont la société espère tant ?**

L'hydrogène (H<sub>2</sub>) est-il vraiment l'Eldorado vertueux qui se substituera aux énergies fossiles ? En théorie, ce vecteur énergétique décarboné est présentée comme une des grandes révolutions de notre siècle<sup>1</sup>. Mais bien que la destination hydrogène brille à l'horizon de politiques publiques ambitieuses de l'Amérique du Nord à l'Asie, en passant par l'Europe, il n'y a pas vraiment l'ombre d'un chemin qui y mène. Pour le moment, l'élément le plus abondant dans l'univers reste indomptable pour une exploitation verte et à bas coût, et ce, à chaque maillon de sa chaîne de valeur. Plusieurs verrous doivent être levés en vue de passer d'une industrie de niche à la société.

## **Un arc-en-ciel hydrogène derrière un gros nuage gris**

Environ 95 % de la production mondiale d'hydrogène se fait à partir du reformage des ressources fossiles (gaz naturel, charbon, pétrole). C'est l'hydrogène gris qui, pour 1 kilogramme de H<sub>2</sub> fabriqué, émet environ 9 kilogrammes de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Capturer ce CO<sub>2</sub> et l'hydrogène devient bleu. S'il est dérivé d'une électricité issue de l'énergie nucléaire, il est alors jaune. Mais la couleur que tout le monde

veut est verte, à l'image des technologies loin d'être mûres qui permettent de l'obtenir sans émission de CO<sub>2</sub>.

**« Pour le moment, l'hydrogène reste indomptable pour une exploitation verte à bas coût. »**

---

Dans le cadre d'un partenariat industriel, l'équipe de Doan Pham Minh – chercheur en génie des procédés à IMT Mines Albi - a développé un mode de production d'hydrogène à partir de biogaz issu de déchets organiques (voir l'article Des déchets débordant d'énergie, Partie II.1). Les chercheurs ont mis en place une installation pilote capable de produire 10 kilogrammes de H<sub>2</sub> par jour. « *Nous avons complété nos recherches par une étude technico-économique qui a démontré qu'un réacteur produisant entre 100 et 800 kilogrammes de H<sub>2</sub> par cette technologie permettrait d'avoir un prix de vente compris entre 6 et 14 € le kg, y compris les coûts de production, transport et distribution à une pression de 350 bar. Un*

1. Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en France (2020)

*prix compétitif par rapport à celui de l'électrolyse de l'eau », souligne le chercheur.*

### De l'eau dans le gaz

L'électrolyse de l'eau reste néanmoins la méthode la plus envisagée pour produire de l'hydrogène vert. Son énergie électrique, provenant d'une source renouvelable telle que du soleil ou du vent, casse des molécules d'eau en oxygène et en hydrogène décarboné. Ce dernier peut être stocké, puis restitué sous forme d'électricité via une pile à combustible. Néanmoins, ces dernières perdent une partie de l'hydrogène stocké (environ 2,5 %<sup>2</sup>), tout comme l'électrolyseur. Dans une perspective de déploiement massif, ces fuites deviendront un enjeu environnemental.

De fait, l'hydrogène a un effet de serre indirect. « *Sa libération dans l'atmosphère perturbe la dégradation naturelle de puissants gaz à effet de serre dont le méthane, les composés fluorés et l'ozone* », précise Christophe Coquelet, chercheur en génie des procédés à IMT Mines Albi. Ainsi, le rejet d'une tonne de dihydrogène dans l'atmosphère est comparable à l'émission d'environ 13 tonnes d'équivalent CO<sub>2</sub>. Toutefois, une étude a montré qu'une économie basée sur de l'hydrogène entièrement vert resterait bénéfique en matière d'atténuation des émissions de CO<sub>2</sub> malgré les taux de fuite<sup>3</sup>.

Par ailleurs, bien que des solutions existent pour limiter ces pertes, comme les brûleurs catalytiques, leur intégration augmenterait le prix d'un hydrogène vert à bas coût qui est déjà plus cher que son homologue gris. L'électrolyse de l'eau reste une solution intéressante pour compenser les variations de la production renouvelable d'électricité. Mais cet atout repose sur des infrastruc-

tures de stockage et de transport d'hydrogène qui ne sont pas encore disponibles.

### Gaz, liquide, solide : le chifoumi du stockage

Généralement, les sites de production et de consommation de l'hydrogène ne sont pas les mêmes. Il doit donc être stocké et/ou transporté. Le conserver sous forme liquide demande beaucoup d'énergie pour le comprimer à de fortes pressions. Sa petite taille engendre à nouveau des taux de fuite élevés. « *De plus, l'hydrogène est une molécule quantique. Cela a pour conséquence qu'un abaissement de la pression, par exemple pour remplir un véhicule à hydrogène depuis une station, entraîne un réchauffement et des problèmes de sécurité qui limitent ses usages* », explique Christophe Coquelet. Le transport par pipeline présente des risques d'inflammabilité du fait des fuites. Avec les bons matériaux, ces taux sont néanmoins négligeables (inférieurs à 1 %).

## « L'hydrogène est une molécule quantique : cela entraîne des problèmes de sécurité qui limitent ses usages. »

Une autre opération consiste à liquéfier l'hydrogène, mais elle est gourmande en énergie. En effet, atteindre la température de -253 °C nécessaire à ce stockage consomme environ 40 % de l'énergie contenue dans le gaz. Si la forme liquéfiée est historiquement adaptée à la propulsion spatiale, elle semblerait plus limitée pour des usages quotidiens.

2. *Fugitive Hydrogen Emissions in a Future Hydrogen Economy* - Frazer-Nash Consultancy (2022)

3. Hauglustaine et al. - *Communications Earth & Environments* (2022)

Une dernière possibilité moins explorée en Europe consiste à stocker l'hydrogène sur des matériaux solides appelés hydrures métalliques, sans risque de fuites. Rémi Gautier et Daniel Bougeard, spécialistes des systèmes thermofluidiques à IMT Nord Europe, modélisent les réactions chimiques de surface lors de l'adsorption et désorption de l'hydrogène dans les pores de l'hydrure. « Nos modèles aident à concevoir des formes particulières de réservoirs qui optimisent ce stockage, mais aussi à évaluer le potentiel d'autres composants comme les clathrates qui permettraient d'augmenter le ratio d'hydrogène stocké », explique Daniel Bougeard. Pour l'heure, ces matériaux pèsent lourd ce qui limite leur éventuel transport.

#### Vecteur énergétique ou intermédiaire ?

Et si la solution de transport idéale était de transformer l'hydrogène ? Dans le cadre de travaux sur le *power-to-gas*, Khaled Loubar – spécialiste des procédés thermochimiques à IMT Atlantique, s'interroge aussi sur la logistique de l'hydrogène. Ses applications directes étant encore limitées, le chercheur explore l'intérêt de le transformer en d'autres produits utiles comme le méthane. « L'avantage de la brique de méthanation placée derrière un électrolyseur est d'aboutir à un gaz composé à 96 % de méthane qui peut être injecté sans problème dans le réseau national », explique Khaled Loubar. L'hydrogène offre ainsi une synergie entre les réseaux de gaz et d'électricité.

Il est aussi intéressant pour obtenir des carburants alternatifs dédiés, par exemple, au transport maritime. « Un autre moyen de stocker l'hydrogène est de le transformer en ammoniac. L'intérêt est que nous disposons déjà d'une logistique de transport pour ce gaz », ajoute le chercheur. Ici, l'enjeu est de savoir s'il est plus intéressant de reve-

nir à l'hydrogène une fois sur place, ou de brûler directement l'ammoniac bien que sa combustion soit longue. Globalement, cette question du « vaut-il mieux » se pose pour chaque usage. Le choix de l'hydrogène vacille donc au gré des impacts énergétiques et environnementaux de son utilisation.

#### Désembuer l'avenir de l'hydrogène

« Aucune méthode ne prend réellement le dessus sur les autres », résume Christophe Coquelet. La filière hydrogène permettrait pourtant de décarboner des secteurs difficiles, voire impossibles à électrifier sur le plan technique ou économique. Dans sa perspective de décarbonation, le groupe Bouygues mise notamment sur ce vecteur pour alimenter ses engins de chantiers. « Aujourd'hui, des engins commandés n'arrivent pas avant 2026 et l'hydrogène vert pour les alimenter n'est pas disponible, remarque Gustavo Boriolo, chef de projet innovation au ELAB Bouygues<sup>4</sup>. S'engager dans cette voie demande d'importants investissements. Une piste d'accélération pourrait ainsi s'appuyer sur le partage des risques via des incitations par les pouvoirs publics, mais celles-ci ne sont pas toujours évidentes à obtenir ».

Finalement, il semble de plus en plus clair que l'hydrogène ne sera pas le pétrole du 21<sup>e</sup> siècle, mais un vecteur parmi d'autres. Pour que son développement ait le plus d'impacts positifs, il est toutefois nécessaire de clarifier ses usages. « Jusqu'à présent, le plan hydrogène France finance beaucoup de projets sans réel fil directeur qui viennent parfois concurrencer des technologies plus avancées. Il est urgent de définir où intégrer l'hydrogène dans notre société et pour faire quoi, afin de voir émerger de réelles perspectives », conclut Christophe Coquelet. ▲

4. Direction centrale de l'innovation du groupe Bouygues.

## PARTIE II

# SOLAIRE : ÉNERGIE PHARE DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

---

Les investissements dans l'énergie solaire connaissent une croissance rapide à travers le monde. Idéale pour décarboner l'électricité, elle est également une solution de choix pour la production de chaleur renouvelable à bas coût. Le solaire offrirait enfin l'opportunité d'interconnecter des réseaux jusqu'à présent séparés en alimentant les centrales multi-énergies du futur.

L'avenir de l'énergie solaire semble plus que radieux ! Avec une projection à près de 380 milliards de dollars en 2023, les investissements dans le solaire devraient dépasser pour la première fois ceux du secteur pétrolier<sup>1</sup>. En 2022, la Chine ajoutait plus de 100 gigawatts à sa capacité solaire photovoltaïque, soit environ 70 % de plus qu'en 2021. L'Europe a, quant à elle, vu son nombre d'installations annuelles augmenter de 40 %. Si cette croissance fulgurante tient principalement de la filière photovoltaïque, le solaire pourrait voir d'autres technologies prometteuses briller dans les années à venir.

### Du soleil deux en un

D'un côté, un panneau photovoltaïque transforme le rayonnement du soleil en électricité. De l'autre, un panneau thermique récupère la chaleur du soleil à l'aide d'un capteur en contact avec un fluide caloporteur (liquide

**« En 2023, les investissements dans le solaire devraient dépasser ceux du secteur pétrolier. »**

---

ou gaz). Ce dernier circule ensuite à travers les canalisations d'un système de chauffage ou peut aussi restituer sa chaleur à un ballon d'eau chaude. À IMT Nord Europe, Ugo Pelay et ses collègues élaborent un panneau capable d'optimiser les deux. « Notre technologie s'appuie sur des composants intelligents à même d'adapter leur géométrie selon les usages de façon autonome et, in fine, d'améliorer le rendement des technologies existantes », explique le chercheur spécialisé en thermodynamique.

---

1. Rapport World Energy Investment 2023 - Agence internationale de l'énergie (AIE)

Selon les applications, il offre une chaleur allant jusqu'à 80 °C. Il cible donc aussi bien un usage particulier, qu'industriel à basse température. « *L'atout du système intelligent est justement qu'il adapte les niveaux de température en temps réel en fonction des besoins des utilisateurs qui varient dans le temps grâce à des systèmes de transferts d'informations* », ajoute Ugo Pelay. Ce panneau n'est pas juste réactif, mais anticipatif. Ainsi, il va jusqu'à prédire les besoins futurs des usagers en prenant en compte les prévisions météorologiques. Pour le moment, ces systèmes ont été validés par des jumeaux numériques et des simulations. Les chercheurs prévoient d'installer un premier démonstrateur sur les toits du campus d'IMT Nord Europe afin de confronter leur innovation à la réalité.

**« La production de la chaleur représente 45 % de l'énergie finale consommée en France, jusqu'à 70% pour l'industrie. »**

#### Une chaleur renouvelable à haute température

Si le solaire est largement utilisé pour décarboner l'électricité, ce gros plan éclipse souvent le besoin important de décarboner la production de la chaleur. En effet, celle-ci représente 45 % de l'énergie finale consommée en France (contre 14 % pour l'électricité)<sup>2</sup> et jusqu'à 70 % de l'énergie utilisée par l'industrie. Or, 65 % de la chaleur est générée à partir d'énergies fossiles. Le solaire thermique à concentration permettrait d'augmenter la part de chaleur renouvelable. Son avantage : il répond en théorie

à tous les niveaux de température allant de l'ambient jusqu'à 3 300 °C<sup>3</sup>. En pratique, il consiste à récupérer la chaleur du soleil en concentrant ses rayons sur un récepteur à l'aide d'imposants miroirs mobiles. Il permet également de stocker de grandes quantités d'énergie. Pour être le plus efficace possible, le solaire à concentration requiert néanmoins un ensoleillement direct qui contraint son implantation.

À IMT Mines Albi, l'énergéticien Simon Eibner développe des algorithmes d'évaluation des performances de centrales solaires à concentration. « *Nos modèles permettent de résoudre l'équation de transfert radiatif qui varie dans le temps selon l'ensoleillement ; ainsi que l'équation de la chaleur qui sont, toutes deux, au cœur du fonctionnement de ces infrastructures. Nous utilisons pour cela des méthodes de Monte Carlo, c'est-à-dire des algorithmes fondés sur le hasard capables de générer une multitude de trajectoires de photons réfléchis sur un miroir* », explique le chercheur. Ces travaux sont couplés à des expérimentations sur un prototype solaire du laboratoire. De ces allers-retours, les chercheurs arrivent à prévoir les capacités de production d'une centrale solaire avant d'en avoir posé la première pierre.

Mais l'objectif est d'aller encore plus loin en couplant ces simulations à des modèles climatiques. « *Cela nous permettrait de projeter les performances de ces dispositifs sur un temps long et adapté aux évolutions des conditions d'ensoleillement associées au changement climatique* », décrit Simon Eibner. Il serait ainsi possible de déterminer les meilleurs lieux d'implantation future. De quoi développer cette filière jusqu'à présent absente des débats français sur son mix énergétique de demain.

2. Scénario négaWatt 2022

3. *Le solaire à concentration*, par Gilles Flamant



### Des rayons concentrés sur le local

« Jusqu'à présent, nous avons eu des réseaux très sectorisés : électricité, chaleur et gaz. Le futur est de créer une interconnexion forte entre ces réseaux pour plus de flexibilité et une production plus en accord avec les besoins », défend Ugo Pelay. Les chercheurs d'IMT Nord Europe évaluent le potentiel du solaire à concentration pour alimenter des stations multi-énergies. Ces dernières viseraient à transformer l'énergie solaire concentrée en électricité, chaleur, froid ou en hydrogène. La variabilité du renouvelable serait ainsi compensée par le choix du vecteur le plus adapté à la demande (voir article Pilotage énergétique d'hier, cherche remplaçant intelligent, Partie III.1).

Actuellement, Ugo Pelay évalue les conceptions et les composants qui assureront l'efficacité énergétique de ces stations. Il cible notamment de nouvelles géométries de récepteurs qui absorbent et restituent la chaleur solaire. À terme, ces recherches pourront intégrer un micro-réseau à Lille dont le pilotage en temps réel de l'énergie sera automatique ou semi-automatique. Ces stations devraient atteindre une puissance de 3 mégawatts, équivalente à celle d'une éolienne.

Pour l'heure, ce mode de production est énergétiquement plus rentable dans des régions désertiques, bien éloignées du climat lillois. Mais pour Ugo Pelay, cela ne devrait pas l'exclure de la liste des solutions d'avenir : « Le solaire à concentration est développable sur notre territoire, mais avec un rendement moindre. Par contre, l'augmentation du coût de l'énergie le rend économiquement de plus en plus intéressant. Par ailleurs, il présente un temps de retour énergétique d'un an et demi, similaire à l'éolien, pour un impact environnemental plus faible ».

### Un solaire low tech

Adapté à l'échelle d'un procédé industriel ou d'une commune, le solaire à concentration est aussi une technologie suffisamment simple pour être construite par des particuliers. Certains artisans ont également déjà confectionné leurs propres fours solaires en France, compensés si besoin par une alimentation par biomasse. « Le solaire à concentration low-tech pourrait être à l'énergie, ce que le potager est à l'alimentation, sourit Simon Eibner. Tout le monde peut construire, réparer et améliorer son propre four solaire, cela permet de se réapproprier l'accès à l'énergie, notamment en période de hausse des prix ». Il est notamment intéressant comme complément énergétique pour la cuisson.

**« Le solaire à concentration low-tech pourrait être à l'énergie ce que le potager est à l'alimentation. »**

Mais comment l'expliquer ? Les *low-techs* n'utilisent aucun matériau rare, ni précieux. Elles s'appuient davantage sur des ressources disponibles en France : aluminium poli pour les miroirs, cuivre, acier et verre. Et des tutoriels de fabrication sont libres et accessibles en ligne. Des alternatives à l'échelle individuelle sont donc plus faciles à mettre en œuvre. Sa posture *low-tech* pourrait ainsi favoriser le futur développement d'un solaire à concentration durable et souverain à taille humaine. ▲

## PARTIE II

# DE L'ÉNERGIE EN RÉSERVE

---

**L'utilisation accrue des énergies renouvelables nécessite une diversité de technologies de stockage permettant d'aligner l'offre et la demande en énergie. Des solutions répondant à des contraintes énergétiques, écologiques et économiques sont en cours de développement pour l'électricité, la chaleur et des gaz à valeur ajoutée.**

L'habitude d'avoir instantanément la lumière lorsque nous appuyons sur l'interrupteur nous aurait-elle déconnectés de la réalité cachée derrière nos prises ? Adopter massivement les énergies renouvelables interroge cette simple action. « *De la même manière que nous avons besoin d'un mix de sources énergétiques, il nous faut un mix de technologies de stockage adapté à différents volumes et échelles de temps – quotidien, inter-saisonnier – dont le choix est corrélé aux usages* », souligne Yasmine Lalau, chercheuse à IMT Mines Albi en énergétique et génie des procédés. Un constat tout aussi vrai pour l'électricité que la chaleur renouvelable, ou encore des gaz à valeur ajoutée (hydrogène, biométhane, etc.).

### **Les voitures rêvent-elles de sodium électrique ?**

L'électricité produite par énergie renouvelable peut être stockée afin de la restituer au moment opportun. Il existe ainsi des systèmes de stockage mécaniques (barres hydrauliques), électromagnétiques (bobines supraconductrices), thermiques (chaleur latente ou sensible ou thermo-chimique) et électrochimiques. Les batteries lithium-ion font partie de cette dernière catégorie. Mais victime de son succès, la technologie la plus performante du moment

ne pourra pas répondre à l'ensemble des besoins de la société en lithium qui seraient multipliés par 40 d'ici à vingt ans d'après l'Agence internationale de l'énergie. « *L'enjeu est donc de basculer sur d'autres technologies proches, mais plus écologiques et moins coûteuses. Le sodium qui est abondant - car présent dans l'eau de mer - sera amené à remplacer le lithium au cours des prochaines décennies* », précise Thierry Djenizian, chercheur en microélectronique à Mines Saint-Étienne.

## **« Le sodium sera amené à remplacer le lithium au cours des prochaines décennies »**

---

Pour cela, il ne suffit pas de remplacer le lithium par un autre composé au sein des batteries existantes. L'ensemble des composants est à revoir. Dans le cadre de ses travaux, le chercheur imagine donc de nouvelles architectures de batterie. L'objectif : stocker toujours plus de charges et répondre rapidement à la demande d'énergie. « *Une fois que les bons matériaux et les organisations spatiales seront identifiés pour le sodium, il sera possible de développer des dispositifs de la plus petite à la*



*plus grande échelle* », résume Thierry Djenizian. Bien que leurs performances restent à améliorer, la Chine propose depuis 2023 ses premières batteries sodium-ion pour l'automobile.

### Défataliser les pertes de chaleur

Le stockage de la chaleur fait aussi l'objet d'une intense R&D. Yasmine Lalau s'intéresse à des solutions adaptées au stockage de chaleur fatale. D'après l'Ademe, cette énergie perdue représente 36 % de la consommation des combustibles de l'industrie française. La capter et la valoriser amélioreraient l'efficacité énergétique des procédés, réduiraient les émissions de CO<sub>2</sub> et le recours à des énergies fossiles.

## « Capter et valoriser la chaleur fatale réduiraient les émissions de CO<sub>2</sub> et le recours à des énergies fossiles »

Cependant, la production de chaleur fatale n'est pas synchronisée avec le moment où le besoin d'énergie se fait sentir. « Une solution de stockage permet d'équilibrer l'offre et la demande. Elle apporte aussi une chaleur à température constante, contrairement à une réinjection directe qui est tributaire de niveaux de températures erratiques », explique la chercheuse. Des échangeurs-stockeurs permettent, notamment, de récupérer et transférer la chaleur contenue dans les fumées vers un matériau de stockage, avant de restituer l'énergie (voir encadré : 3 questions à Daniel Bougeard).

Une unique solution ne serait toutefois pas envisageable. En effet, la composition des fumées varie selon le type d'industrie. En conséquence, des fumées peuvent être plus ou moins corrodantes et détériorer

les systèmes de stockage. « Nos travaux, menés dans le cadre d'un laboratoire commun avec l'entreprise Eco-Tech Ceram, étudient cet enjeu de compatibilité entre des matériaux de stockage à forte densité énergétique et la nature chimique des fumées à valoriser », rapporte Yasmine Lalau. L'objectif final : aboutir à des technologies à coût réduit et durables pour l'environnement afin d'inciter les industriels à emprunter cette voie décarbonée.

### Du CO<sub>2</sub> dans une cage de glace

Un hydrate de gaz est une sorte de glace poreuse capable de piéger différentes molécules dans ses cavités. Baptiste Bouillot, chercheur en thermodynamique à Mines Saint-Étienne, les utilise pour capter le CO<sub>2</sub> des fumées de l'industrie métallurgique. Le gaz peut alors être stocké définitivement ou restitué et valorisé à l'aide du procédé de méthanation qui produit du méthane.

Cette même technologie est aussi adaptée au traitement de l'eau et au stockage de froid. « Nous avons un démonstrateur basé sur un réservoir de 2 m<sup>3</sup> d'hydrates de gaz qui consomment l'électricité la nuit et redistribuent du froid le jour », décrit Baptiste Bouillot. Pourtant, chacune de ces trois briques individuelles n'est pas assez performante pour concurrencer des technologies plus matures. « Mes recherches visent donc à les combiner en un seul système multifonction et à coût énergétique réduit, ce qu'aucune autre technologie n'est capable de faire », décrit le chercheur.

Présentement, le défi est d'abaisser la consommation énergétique d'un tel dispositif tout en assurant une captation efficace du CO<sub>2</sub>. Des démonstrateurs seront ensuite installés sur le campus de l'école d'ingénieurs. L'ambition sera alors surtout de capter l'attention des industriels qui s'intéressent peu à cette solution, bien qu'elle réponde simultanément à des enjeux de décarbonation et de stress hydrique. Le contexte

futur pourrait toutefois lui être favorable. « Il y a déjà des régions du monde comme l'Arabie Saoudite qui sont confrontées à ces deux problèmes et qui pourraient bénéficier de climatisation décarbonée, remarque le chercheur. Le changement climatique et l'augmentation des sécheresses à travers le monde pourraient renforcer l'intérêt pour notre technologie ».

#### À la croisée des sciences

En définitive, un passage à l'échelle des solutions de stockage s'impose en vue de soutenir l'émergence des énergies renouvelables et d'accompagner la décarbonation. « Pour faire du stockage massif une réalité, il est essentiel que les travaux jusqu'à

présent séparés sur la gestion de réseaux énergétiques et sur le stockage d'énergie coïncident », assure Yasmine Lalau. En effet, d'un côté, le stockage a besoin de connaître les contraintes d'utilisation de la gestion de réseau : temps et vitesse de distribution, volume de la demande, etc. De l'autre, les réseaux, tant électriques que de chaleur, ont besoin de connaître les capacités et lieux de réserve afin de les intégrer dans leur planification. ▲



## 3 QUESTIONS À DANIEL BOUGEARD

### CHERCHEUR SPÉCIALISTE DES SYSTÈMES THERMOFLUIDIQUES À IMT NORD EUROPE

#### Qu'est-ce que des échangeurs-stockeurs ?

Des échangeurs sont des dispositifs assurant des transferts thermiques (chauds ou froids) comme les radiateurs, les systèmes de refroidissement pour les véhicules, les chaudières, etc. Ils reposent sur des transferts thermiques entre des fluides (liquides ou gaz). Des échangeurs peuvent également stocker l'énergie, on parle alors d'échangeur-stockeurs. C'est le principe des unités de stockage ou des ballons d'eau chaude qui récupèrent une énergie, la stockent et la restituent à une vitesse variable selon les besoins.

#### Quel est l'objectif des travaux de votre équipe sur le sujet ?

Pour assurer cette double fonction (échange et stockage), nous nous concentrons notamment sur l'intérêt des matériaux à changement de phase. Le passage solide-liquide permet par exemple de stocker de la chaleur. Dans l'équipe, Jules Voguelin Simo Tala conçoit des techniques adaptées d'intensification des échanges thermiques qui vont également agir sur la vitesse de transfert de l'énergie. Dans un autre registre, la gestion thermique des batteries des véhicules électriques met en œuvre des systèmes thermodynamiques avec une transition liquide-vapeur de fluides frigorigènes.

Pour optimiser la vitesse à laquelle l'énergie est stockée et restituée dans différents systèmes, nous nous appuyons également sur la modélisation des phénomènes physiques complexes survenant lors des changements de phase et des phénomènes de déclenchement de la turbulence dans les écoulements. L'enjeu est alors de maîtriser la mécanique de différents fluides et les échanges thermiques grâce à des techniques avancées de visualisation d'écoulement mises en œuvre par Tom Lacassagne et Souria Hamidouche. Une fois qu'un modèle physique sur un composant a été validé, il peut servir à tester les effets de différentes architectures sur les performances d'un nouveau système en amont d'un développement industriel.

#### Comment vos recherches pourraient impacter le futur paysage de l'énergie ?

L'intensification des échanges dans les échangeurs-stockeurs fait écho à ce qui se passe dans les réseaux. Par exemple, dans le cas d'un réseau reposant majoritairement sur les énergies renouvelables, les technologies de stockage doivent être capables de stocker et restituer de grandes quantités d'énergie sur des temporalités en phase avec la production et la consommation. Nos travaux contribuent à élaborer des solutions adaptées à ces besoins. Par ailleurs, nous avons pu voir ces 20 dernières années sur les fluides frigorigènes que les réglementations évoluent. Un fluide autorisé aujourd'hui ne le sera peut-être plus demain. Nos recherches sur les mesures des transferts thermiques de nouveaux fluides caloporteurs ou de nouveaux matériaux pour l'énergie visent à accompagner ces transitions.

## PARTIE II

# À QUOI RESSEMBLERA LE BALLON D'EAU CHAUDE DU FUTUR ?

Réduire la consommation énergétique d'un chauffe-eau sans altérer le service rendu, tout en réduisant le montant de la facture de l'utilisateur. Ce sont les objectifs de la chaire industrielle Corenstock<sup>1</sup> entre Mines Saint-Étienne, IMT Nord Europe et l'entreprise elm.leblanc, spécialiste de la construction de chaudière et de chauffe-eau. Les partenaires proposent donc de réinventer complètement le ballon d'eau chaude de demain. Pour l'heure, il est la deuxième source de dépense énergétique des foyers français après le chauffage. Selon l'Ademe, il représenterait ainsi 12 % de notre facture électrique. Zoom sur trois points clés de cette révolution technologique.

### Penser durabilité et responsabilité

Chaque étape du cycle de vie est analysée et optimisée via le prisme de la durabilité, depuis les ressources nécessaires à sa production jusqu'à sa valorisation en fin de vie. Un intérêt particulier est porté à des matériaux plus légers et plus isolants pour l'enveloppe du ballon. Des simulations et essais permettent également d'étudier le comportement de vieillissement de ces nouveaux ballons et ainsi de corriger toute faille qui limiterait ses performances en cours de route. Ces travaux pourront s'appliquer plus largement à l'ensemble de l'industrie.

### Intensifier les échanges thermiques

Les ballons d'eau chaude sont des échangeurs-stockeurs. Ils chauffent l'eau à l'aide d'un élément chauffant (résistance, échangeur...) et sont capables de la stocker

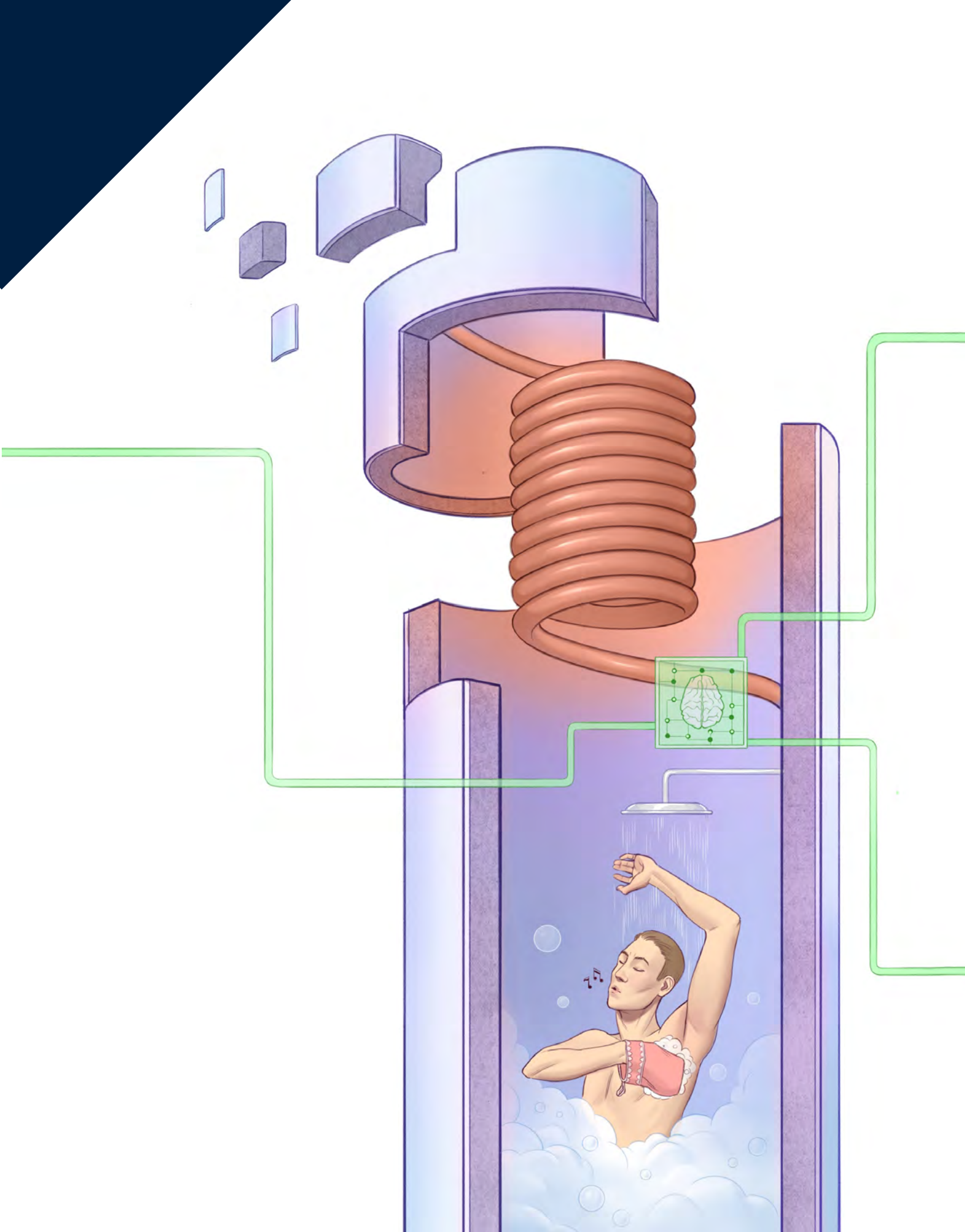
jusqu'à ce que l'utilisateur décide de l'utiliser. « À l'intérieur, il y a donc généralement un serpentин responsable des transferts de chaleur », décrit Tom Lacassagne, chercheur à IMT Nord Europe. *Les recherches de notre équipe visent à rendre les échanges thermiques plus efficaces en revisitant la géométrie de ce composant* ». Les chercheurs misent également sur des matériaux à changement de phase capables de changer d'état selon la température. Ces derniers permettront d'améliorer le stockage et la restitution de la chaleur.

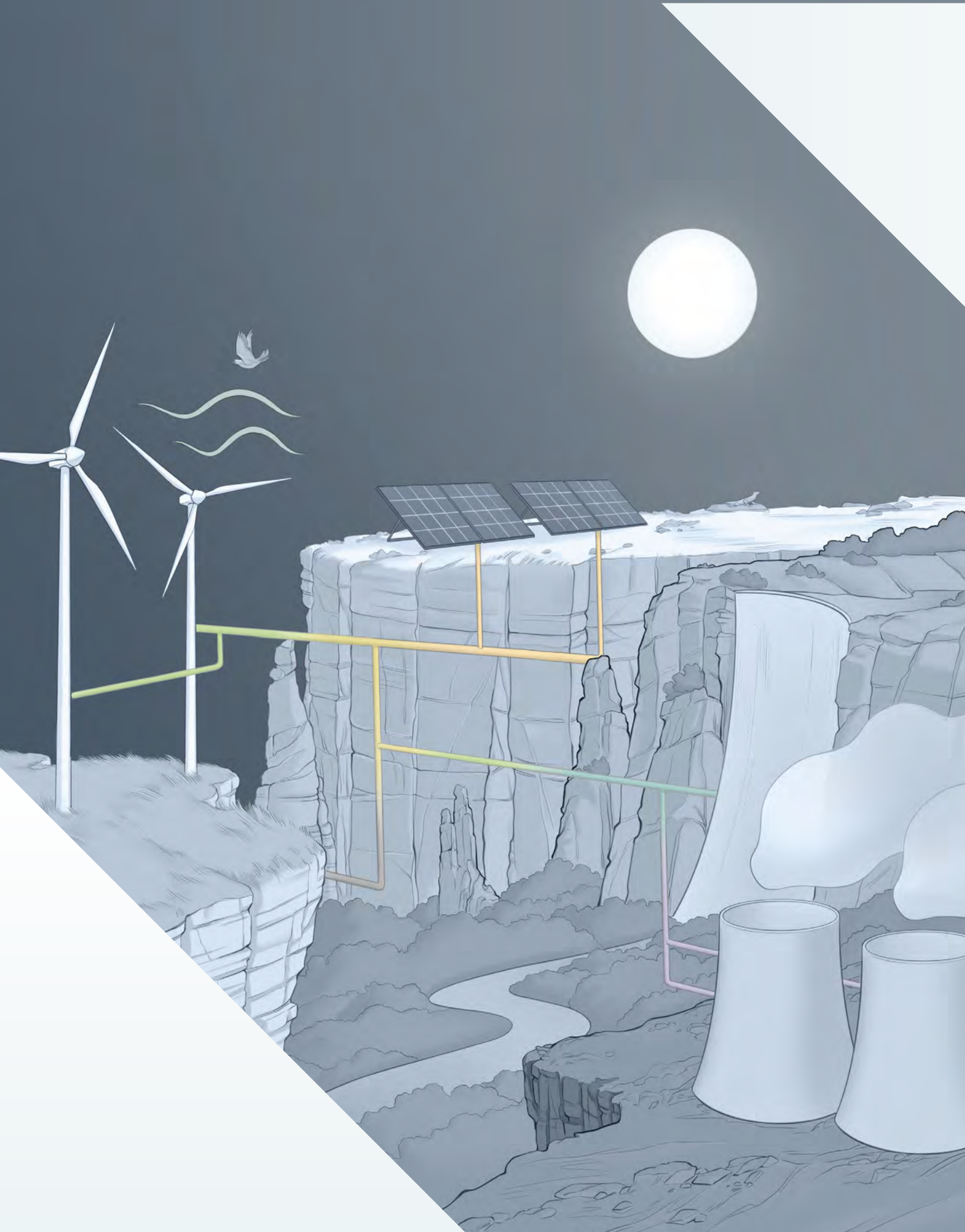
### Piloter avec intelligence

Pour être plus efficace, le ballon du futur prévoira la quantité d'eau à fournir et sa température en anticipant les besoins des usagers. Problème : deux foyers utilisant cette même technologie auront des habitudes différentes. Le ballon est donc d'abord pré-entraîné sur des profils de consommation identifiés par le partenaire industriel. « Nous mobilisons ensuite des techniques d'intelligence artificielle de reconnaissance de formes permettant au système de détecter et d'apprendre de lui-même les usages des habitants une fois en fonctionnement », explique Jacques Boonnaert, chercheur à IMT Nord Europe.

Attention toutefois aux comportements erratiques. Un tel produit ne saurait apporter des bénéfices, tant financiers qu'énergétiques, s'il était confronté à des modes de consommation irréguliers. L'intelligence a ses limites !

1. Conception orientée cycle de vie & approche systémique pour l'efficacité énergétique du stockage de systèmes de chauffage





# III

## ORGANISER LE RÉSEAU

---

1

PILOTAGE ÉNERGÉTIQUE  
D'HIER, CHERCHE  
REMPLAÇANT INTELLIGENT

---

UNE PETITE DONNÉE  
POUR L'ÉNERGIE,  
UN PAS DE GÉANT  
POUR LA SOCIÉTÉ

---

3

2

UNE ÉNERGIE  
*MADE IN TERROIR*

---

# PILOTAGE ÉNERGÉTIQUE D'HIER, CHERCHE REMPLAÇANT INTELLIGENT

---

**L'émergence des énergies renouvelables et l'interconnexion entre les vecteurs complexifient la gestion des réseaux d'aujourd'hui. Dans quelle mesure des outils basés sur des méthodes d'intelligence artificielle faciliteront leur pilotage selon différentes échelles géographiques et temporelles ?**

France 2050. Des stations multi-énergies réalisent en temps réel une production flexible, tantôt d'électricité, tantôt de chaleur ou de gaz, pilotée par une demande anticipée et ajustée. La démocratisation des solutions de stockage permet de lisser l'offre et la demande d'une énergie majoritairement renouvelable sans la moindre rupture d'approvisionnement. Parmi elles, les transports particuliers électriques apportent des solutions tampon distribuées et mobiles. À l'échelle locale, les consom-acteurs individuels et collectifs produisent leur propre énergie au sein de micro-réseaux, donnant ainsi un nouveau visage au système énergétique.

Ceci est un des futurs possibles pour l'énergie de demain. Elle donne la part belle à l'essor des *smart grids*, ou réseaux intelligents. Ces derniers s'appuient en grande

partie sur des solutions de communication (voir encadré). L'enjeu : favoriser des échanges bidirectionnels entre producteurs et consommateurs, anticiper et agir sur la demande ou encore limiter les pertes d'énergie. Y parvenir implique, entre autres, de décentraliser et d'interconnecter les réseaux qui sont aujourd'hui tout l'inverse. « À IMT Atlantique, nous avons pour parti pris que les interactions entre les réseaux les rendront plus efficaces. Notre rôle est de regarder l'intérêt de ce type de gestion et de développer les outils qui la rendront possible », décrit Bruno Lacarrière, chercheur en modélisation des systèmes énergétiques.

## **Des réseaux multi-énergies intelligents**

Un système multi-énergies s'appuie sur la coexistence de plusieurs vecteurs énergétiques qui peuvent également être convertis



d'une forme à une autre selon les besoins (voir article *Solaire : énergie phare de la transition énergétique*). Les équipes de recherche d'IMT Atlantique développent des modèles informatiques compatibles avec cette nouvelle complexité. « *Piloter finement ces systèmes - qui ont des dynamiques de l'ordre de la seconde pour l'électricité, un peu plus pour la chaleur - nécessite des modèles peu gourmands en temps de calcul, tout en restant physiquement fiables* », explique Bruno Lacarrière.

## « L'enjeu : permettre à des stations énergétiques de naviguer entre électricité renouvelable et nucléaire, biogaz et gaz naturel, etc. »

Dans le cadre du Programme et équipements prioritaires de recherche TASE<sup>1</sup>, le chercheur et ses collègues explorent le potentiel d'algorithmes hybrides. Ces modèles mêlent des méthodes de modélisation classiques explicables, à la rapidité d'outils d'intelligence artificielle. L'intelligence introduite dans ces modèles simplifie, par exemple, les nœuds et les branches qui composent un réseau existant. Certains d'entre eux sont alors remplacés par leur jumeau numérique. L'enjeu final : proposer des outils internes de supervision aux acteurs de l'énergie. Et surtout permettre à des stations énergétiques de naviguer avec flexibilité entre électricité renouvelable et nucléaire, biogaz et gaz naturel, etc. selon les besoins. « *Il est aussi urgent de transmettre au monde industriel des outils de projection pour les aider à prendre des décisions sur des investissements finan-*

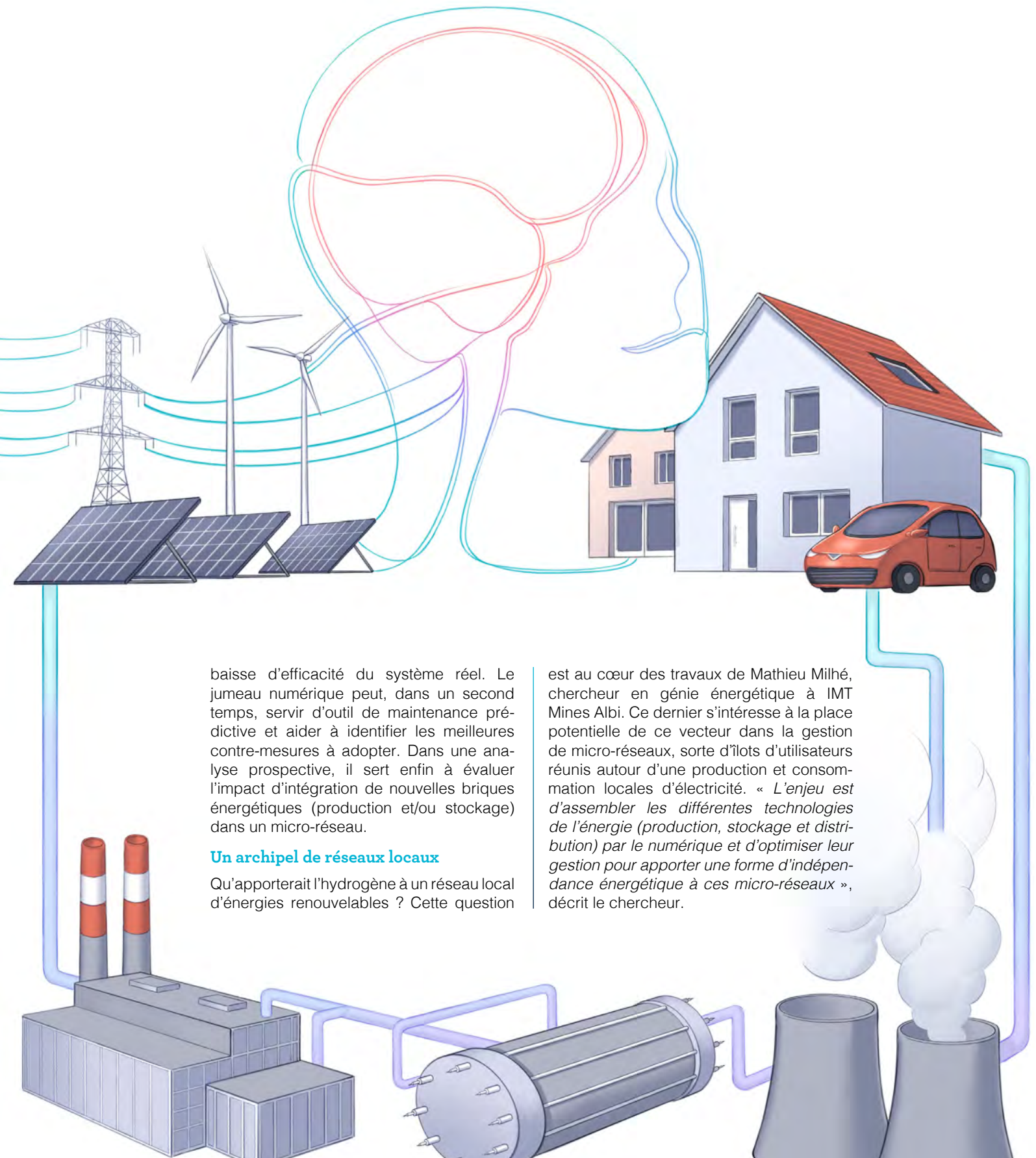
*ciers conséquents associés à la décarbonation de leur mix énergétique* », ajoute le chercheur.

### Du virtuel au réel

Dans la zone industrielle de Dunkerque, le projet « Reuze » (financé par l'Ademe) réalise les études préalables à la construction d'une station de production de carburant de synthèse. Celui-ci sera issu de la réaction entre de l'hydrogène produit par électrolyse de l'eau et du CO<sub>2</sub> émis et capté localement. À cet effet, Jacques Boonaert d'IMT Nord Europe, contribue à l'élaboration de jumeaux numériques de certaines briques qui composeront les futures installations. « *L'ambition est d'augmenter d'un facteur 10 les quantités qui ont été produites à l'aide de plateformes de test. Nos outils de simulation permettront d'assurer que le système industriel se comportera comme prévu en passant à l'échelle* », explique le chercheur en automatique. Cet outil permettra, notamment, d'évaluer comment le recours à une énergie éolienne impacterait la rentabilité. En cas de réussite, ce projet ambitionne de transformer 300 000 tonnes de CO<sub>2</sub> en plus de 100 000 tonnes de carburant propre. Il serait également à l'origine d'une dynamique locale intersectorielle inédite (voir article Une énergie made in terroir).

« *Plus largement, le jumeau numérique offre l'avantage de travailler en temps réel ou en temps accéléré. Ce sont donc des outils de choix pour apporter des pistes de réponse aux enjeux immédiats et projetés de la transition énergétique* », souligne le chercheur. Ce dernier développe notamment des modèles permettant d'assurer le bon fonctionnement d'infrastructures existantes, d'une station énergétique à un réseau tout entier. L'idée : mettre en compétition un système réel et son jumeau numérique équivalent au système parfait. Si leurs comportements divergent, il peut s'agir d'une

1. Technologies avancées des systèmes énergétiques



baisse d'efficacité du système réel. Le jumeau numérique peut, dans un second temps, servir d'outil de maintenance prédictive et aider à identifier les meilleures contre-mesures à adopter. Dans une analyse prospective, il sert enfin à évaluer l'impact d'intégration de nouvelles briques énergétiques (production et/ou stockage) dans un micro-réseau.

#### Un archipel de réseaux locaux

Qu'apporterait l'hydrogène à un réseau local d'énergies renouvelables ? Cette question

est au cœur des travaux de Mathieu Milhé, chercheur en génie énergétique à IMT Mines Albi. Ce dernier s'intéresse à la place potentielle de ce vecteur dans la gestion de micro-réseaux, sorte d'îlots d'utilisateurs réunis autour d'une production et consommation locales d'électricité. « L'enjeu est d'assembler les différentes technologies de l'énergie (production, stockage et distribution) par le numérique et d'optimiser leur gestion pour apporter une forme d'indépendance énergétique à ces micro-réseaux », décrit le chercheur.

Pour cela, Mathieu Milhé s'appuie sur des algorithmes de pilotage hybrides mêlant à nouveau des méthodes d'optimisation classiques à des techniques d'apprentissage automatique. Toutefois, selon lui, un des risques serait de vouloir innover en gardant les mêmes objectifs que sur les réseaux actuels. « *Par exemple, une donnée d'entrée classique en optimisation énergétique est d'anticiper la demande. Dans les réseaux de demain, la demande en énergie ne sera plus un objectif à atteindre, mais une variable sur laquelle nous pourrions intervenir* », précise le chercheur.

Avec leurs outils, les experts d'IMT Mines Albi veulent allier les temporalités présentes et futures dans la gestion des micro-réseaux. Autrement dit, avoir un modèle qui aura appris quelle sera la meilleure décision pour la journée – selon les réserves d'hydrogène, d'électricité, des prévisions météorologiques et des demandes – tout en gardant en tête un objectif à long terme. Ces solutions intéressent aussi bien des collectivités territoriales que des zones industrielles ; des start-ups que des grands énergéticiens, ou encore des producteurs d'équipement de l'énergie.

#### Gérer les demandes électriques de demain

Une autre inconnue des réseaux de demain est de déterminer comment l'adoption massive du véhicule électrique impactera la demande et la disponibilité en énergie. « *La connexion de ces véhicules au réseau risque de créer des problèmes de congestion. Par exemple, la recharge d'un véhicule électrique pourrait doubler la consommation d'énergie d'un ménage moyen* », témoigne Georgios Papadopoulos, chercheur spécialiste de l'internet industriel des objets à IMT Atlantique. Ces nouveaux usages vont engendrer des pics énergétiques pour lesquels les réseaux n'ont pas été dimensionnés. Comment l'énergie sera alors répartie équitablement à l'échelle d'un quartier entre

ces véhicules en phase de charge et les autres besoins ? Pour répondre à ces enjeux, le chercheur et ses collaborateurs développent des stratégies de contrôle intelligent soutenues par les technologies de l'information et de la communication.

## « Comment l'adoption massive du véhicule électrique impactera la demande et la disponibilité en énergie ? »

---

Par ailleurs, ces nouveaux véhicules vont aussi apporter de potentielles solutions mobiles de stockage au réseau local. Autrement dit, ils pourraient délivrer de l'énergie pour compenser l'absence de production par énergie renouvelable en cas de besoin. Cette dualité, consommateur et fournisseur d'énergie, fait des véhicules électriques une brique complexe à intégrer dans la gestion des futurs réseaux. Cela pose aussi de plus amples questions quant aux technologies de batteries qui permettraient de telles capacités de charge et décharge.

À Bruno Lacarrière de conclure : « *Nous ne savons pas à quoi ressembleront les réseaux énergétiques de demain, mais nos outils basés sur des contraintes industrielles permettront d'imaginer à quoi il serait bon qu'ils ressemblent* ». ▲

## VERS DES PROTOCOLES DE COMMUNICATION PLUS EFFICACES

---

« En plus d'interconnecter les réseaux d'énergie, un des défis est de développer un co-réseau informatique et énergétique », défend Georgios Papadopoulos. Imaginez une ossature informatique qui planerait parfaitement au-dessus des nœuds et des branches du réseau énergétique pour éviter les pannes et équilibrer la production et la demande en temps réel. Mais cela demande de faciliter les échanges d'informations entre les différents réseaux. « Une de nos questions de recherche est : quelles technologies et quels protocoles utiliser dans les futurs réseaux intelligents ? Par ailleurs, nous développons de nouveaux protocoles de réseau plus efficaces que ceux qui sont, par exemple, utilisés par les compteurs Linky pour signaler nos consommations quotidiennes d'énergie dans les logements », décrit le chercheur.

En résulte le cadre de travail SCHC (prononcé « chic ») qui a été normalisé par l'*Internet Engineering Task Force* (IETF). Son principal avantage repose sur un mécanisme générique de compression des en-têtes de protocole et de fragmentation des messages. Il est ainsi particulièrement adapté aux transferts d'informations dans les *smarts grids* et plus largement sur les réseaux sans fil contraints. Depuis son lancement, il a gagné la reconnaissance de différents acteurs industriels dont Cisco, Ericsson, Orange et Huawei pour sa large applicabilité.

# UNE ÉNERGIE MADE IN TERROIR

---

La décentralisation de la production de l'énergie appelle à une gestion délocalisée. Cette transformation majeure impose de repenser le rôle des acteurs au niveau des territoires et d'identifier des synergies nouvelles. Si davantage de projets d'autoconsommation collective sortent de terre, ils ont cependant la lourde tâche de se frayer un chemin dans un paysage bien installé d'acteurs et de normes.

« Les nouvelles questions énergétiques sont encore trop perçues à travers le prisme des grands vecteurs. On raisonne en production de gros avec des projets de champs photovoltaïques et éoliens, mais cette vision est inadaptée aux nouveaux systèmes énergétiques » soutient Christian Brodhag, chercheur émérite à Mines Saint-Étienne. Un système énergétique, concrètement, qu'est-ce que c'est ? Ce terme regroupe l'ensemble des systèmes techniques et sociaux de la chaîne de l'énergie. Autrement dit, les infrastructures et les acteurs présents à chaque maillon. Selon le chercheur, la gestion d'un tel système est caractérisée par les réponses à trois questions : où est produite et consommée l'énergie ? Quand en avons-nous besoin ? Et sous quelle forme ?

**« On raisonne avec des projets de champs photovoltaïques et éoliens, mais cette vision est inadaptée aux nouveaux systèmes énergétiques. »**

---

Que dire plus particulièrement des futurs systèmes basés en grande partie sur le renouvelable ? Ces modes de production exploitent des ressources locales (eau, soleil, vent, etc.). Leur énergie diluée est difficile à transporter, mais parfaitement adaptée à des besoins de faibles niveaux d'énergie de proximité. C'est le cas, par exemple, d'une habitation pour maintenir sa température et s'éclairer. De là, pour Christian Brodhag, il n'y a aucun doute : « Leur gestion doit se faire au niveau des territoires. C'est localement que se structurent les activités et que les actions sont les plus concrètes ».

## Des raisonnements de plus en plus micro

La dimension territoriale ou locale va jouer un rôle crucial dans la transition énergétique. Preuve en est, afin de réduire son impact climatique, l'Europe mise en grande partie sur la rénovation énergétique des bâtiments, responsables de 36 % de ses émissions de gaz à effet de serre. Elle ambitionne ainsi de réduire leurs émissions de 60 % pour contribuer la réduction globale de 55 % d'ici à 2030. Pour cela, les rénovations doivent être profondes, les bâtiments doivent être à énergie positive, intégrer des écoquartiers qui mutualisent des fonctions

énergétiques de production et de stockage, etc. Les objectifs sont clairs, mais comment faire ? C'est aux territoires qu'il incombe de créer le mode d'emploi qui transformera cette ambition en résultats.

Sous sa casquette de vice-président de la Commission « Villes et territoires durables » du Comité européen de normalisation), Christian Brodhag s'intéresse aux liens territoriaux entre le développement durable et l'énergie. « *Un premier enjeu est de déterminer comment organiser ces systèmes locaux dans une logique de commun et de durabilité et dans une perspective de justice sociale et écologique* », témoigne le chercheur. Son objectif : définir et normaliser ce qu'est un système énergétique durable et ainsi aider les territoires à le mettre en place.

## « Comment organiser ces systèmes locaux dans une logique de durabilité et de justice sociale et écologique ? »

Les normes établies devraient apporter un socle aux institutions locales, notamment aux collectivités. Toutefois, la floraison de ces systèmes énergétiques dépendra surtout d'approches coopératives. « *L'autre mission d'envergure est d'amener les différentes parties prenantes qui ont des enjeux sur ces territoires à mettre en synergie leurs activités. Nos travaux devraient les aider à identifier leur rôle et les informations auxquelles ils vont avoir accès pour le jouer* », détaille Christian Brodhag.

### L'énergie n'est pas plus verte ailleurs

Les systèmes énergétiques locaux observent déjà leurs balbutiements. De nouvelles dynamiques entre acteurs du territoire sont, notamment, encouragées avec la valorisation de nouveaux produits à valeur énergétique comme le CO<sub>2</sub>, les chaleurs fatales industrielles et plus largement les déchets (voir Partie II : *Des énergies d'avenir*). Dans le cadre du Programme et équipements prioritaires de recherche SPLEEN<sup>1</sup>, lancé en juin 2023, les chercheurs d'IMT Atlantique s'intéressent justement à la modélisation de ces nouveaux flux locaux. L'enjeu sera ensuite d'évaluer la meilleure façon d'orchestrer des dynamiques entre des acteurs qui n'avaient jusqu'alors aucun lien. Le modèle économique associé reste à inventer.

De nouvelles synergies peuvent également naître du partage d'informations. L'organisation territoriale de l'énergie est telle, qu'un ensemble d'acteurs distincts possèdent et produisent une grande diversité de données sur un même réseau. Notamment : leurs propriétaires, leurs gestionnaires, les producteurs d'énergie ou encore les usagers finaux. « *Mettre en commun toutes ces données apportera une connaissance fine de la chaîne énergétique territoriale*, défend Bruno Lacarrière, chercheur en modélisation des systèmes énergétiques à IMT Atlantique. *Pour le moment, ces partages n'existent pas, car les données sont au cœur de modèles économiques très différents* » (voir article *Une petite donnée pour l'énergie, un pas de géant pour la société*).

Depuis cinq ans, la chaire industrielle ValaDoE (Valeur ajoutée à la donnée énergie) réunit l'ensemble des propriétaires des informations susmentionnées. Son but :

1. PEPR SPLEEN, Décarbonation de l'industrie.



initier de nouvelles façons de collaborer autour de l'énergie locale. Par exemple, une collectivité lance un plan d'aménagement comme une extension urbaine. Dans un schéma classique, elle ferait appel à des aménageurs et questionnerait les réseaux pour assurer la desserte énergétique. « Ici, nous cherchons des alternatives au fait de simplement renforcer et produire plus d'énergie. Est-il possible d'intégrer en parallèle des sources renouvelables ou de stockage qui permettront d'absorber cette augmentation de la demande ? L'objectif est de définir de nouveaux modes de fonctionnement et cela prend du temps », expose le chercheur.

#### Unis par le lien sacré de l'énergie locale

Différents acteurs peuvent également se réunir autour d'un besoin commun. L'autoconsommation collective est un exemple de schéma organisationnel en émergence dans les territoires. Des personnes morales ou physiques s'associent pour produire ensemble, se répartir et facturer une énergie locale. En France, 95 % de ces projets reposent sur le photovoltaïque. La plupart sont portés par des communes. Le phénomène reste rare, mais la tendance s'accélère. C'est ce que constate une étude menée par le département *Sociology and Economics of Networks and Services* (SENSE) d'Orange Innovation. « De 149 opérations actives en France au dernier trimestre 2022, nous sommes passés à 183 en avril dernier. Néanmoins, nous avons trouvé peu de projets suffisamment matures pour avoir au moins une année de recul », constate un des co-auteurs de l'étude, Mathieu Sannié.

En pratique, deux points majeurs la dissocient du modèle d'autoconsommation individuelle. Premièrement, le surplus d'électricité produit n'est pas racheté par le réseau. Cela impose de bien dimensionner ces projets. Deuxièmement, ils sont redevables du TURP, le tarif d'acheminement de

l'électricité, qui finance le transport et la distribution de l'électricité sur les réseaux en France (soit 1/3 du montant de la facture). Le principal avantage est malgré tout économique. L'autoconsommation collective apporte une énergie à bas coût tout au long de la durée de vie des équipements utilisés. « La plupart des acteurs qui adoptent ce schéma le font aussi pour des raisons écologiques dans une idée de circuit court de l'énergie entre la source de production et le consommateur. Des raisons sociales sont aussi exprimées avec l'envie de créer de la coopération locale », décrit l'économiste. Cependant, plusieurs freins limitent son déploiement dans les territoires.

## « L'autoconsommation collective remet en question le paysage de l'électricité tel que nous le connaissons. »

#### Le long chemin sinueux du changement

L'autoconsommation collective remet en question le paysage de l'électricité tel que nous le connaissons. Elle est donc d'abord confrontée à un frein culturel. Puis des freins d'ordre technico-économique : « les délais et les prix des raccordements se font selon une grille qu'Enedis, distributeur de l'électricité en France, ne fournit qu'une fois les projets montés. Les prix alors affichés peuvent être très rédhibitoires. Un acteur nous rapportait un devis à 40 000 € », rapporte Mathieu Sannié.

Les freins peuvent aussi être très concrets du fait des règles d'aménagement du territoire. L'étude réalisée par les chercheurs d'Orange Labs note ainsi l'importance du code de l'urbanisme qui recale à son tour de nombreux projets. « Par exemple, en



*montagne, la loi interdit de placer des panneaux sur le toit d'une maison, car il faudrait retirer des rails briseurs de glace et de neige », illustre le chercheur. Enfin, l'étude sociologique a relevé un manque d'intérêt plus large pour le sujet de l'électricité : « Elle est invisible, inodore. C'est un bien commun qui ne passionne pas les foules et le sujet reste très technique pour des néophytes », rapportait notamment une personne interrogée par Orange Labs.*

Toutefois, l'électrification massive de la société et la décentralisation de l'énergie avec le renouvelable poussent la société dans le sens de l'autoconsommation collective. Des zones d'activités commencent d'ailleurs à s'en emparer. Leurs besoins énergétiques et leur puissance financière pourraient accélérer davantage la tendance. De quoi s'interroger sur les impacts d'une éventuelle adoption massive à plus long terme. Celle-ci permettrait notamment de réduire les pertes d'électricité sur le réseau quantifiées autour de 6 % (sans compter les pertes au niveau des centrales nucléaires). « *Si l'autoconsommation collective allait jusqu'à devenir majoritaire, le réseau national basculerait vers un rôle de soutien à des moments clé. Le TURP représenterait alors le coût de la sécurité énergétique* », projette Mathieu Sannié. D'ici là, une révision de la façon dont nous concevons et percevons les réseaux s'impose. ▲

# UNE PETITE DONNÉE POUR L'ÉNERGIE, UN PAS DE GÉANT POUR LA SOCIÉTÉ

---

Le partage des données de l'énergie optimisera la gestion des réseaux de demain et soutiendra l'émergence de nouveaux services aux consommateurs. Ces données permettront également à d'autres secteurs de réduire leurs consommations énergétiques.

Les données irriguent à travers les réseaux énergétiques au même titre que l'électricité et le gaz naturel. Seule, la donnée apporte des connaissances essentielles à son propriétaire. Partagée, elle contribue à l'émergence de réseaux interconnectés et optimisés. Toutefois, il n'existe pas de plateforme reliant l'ensemble des informations de la chaîne de valeur des différents vecteurs énergétiques. Le projet européen Omega-X d'espace partagé de la donnée d'énergie s'inscrit dans une série de programmes qui compte bien y remédier.

**« Partagée, la donnée contribue à l'émergence de réseaux interconnectés et optimisés. »**

---

Son but ? Mettre en place des mécanismes et des politiques adaptés qui garantissent un partage sûr, souverain et équitable entre les différentes parties prenantes. En soutenant les services énergétiques et en favorisant la collaboration entre tous ses acteurs, un tel espace aspire à être une pierre angulaire de la décarbonation de l'énergie.

## Des usages transformateurs

Omega-X réunit des partenaires industriels et académiques, dont l'IMT. Le projet s'inscrit dans l'ambition européenne de faire de la donnée un moteur d'innovation et de création d'emplois (Loi sur les données - Data Act). « *Les producteurs d'énergie européens sont les principaux intéressés et contributeurs d'Omega-X qui leur permettra d'améliorer leurs services en les reconnectant aux usages* », décrit Anne-Sophie Tailandier, directrice de TeraLab, plateforme d'analyse de données et d'intelligence artificielle de l'IMT. De nouvelles architectures et standards sont ainsi développés sur les cas d'usage et problématiques de demain comme l'électro-mobilité, le stockage des

énergies renouvelables, la production d'hydrogène ou encore les communautés énergétiques locales (voir articles *Pilotage énergétique d'hier cherche remplaçant intelligent* et *Une énergie made in Terroir*).

À terme, un tel espace vise donc, via les données, à accélérer le déploiement de solutions énergétiques bas carbone, aider leur intégration dans les réseaux et optimiser la gestion des systèmes énergétiques européens. « *Les espaces partagés ne signifient pas que les données sont centralisées, bien au contraire. Chacun garde la main sur ses informations et le contrôle sur qui peut y avoir accès* », précise Anne-Sophie Taillandier. En ce sens, Omega-X soutient le développement d'un marché de la donnée ouvert à d'autres secteurs que celui de l'énergie.

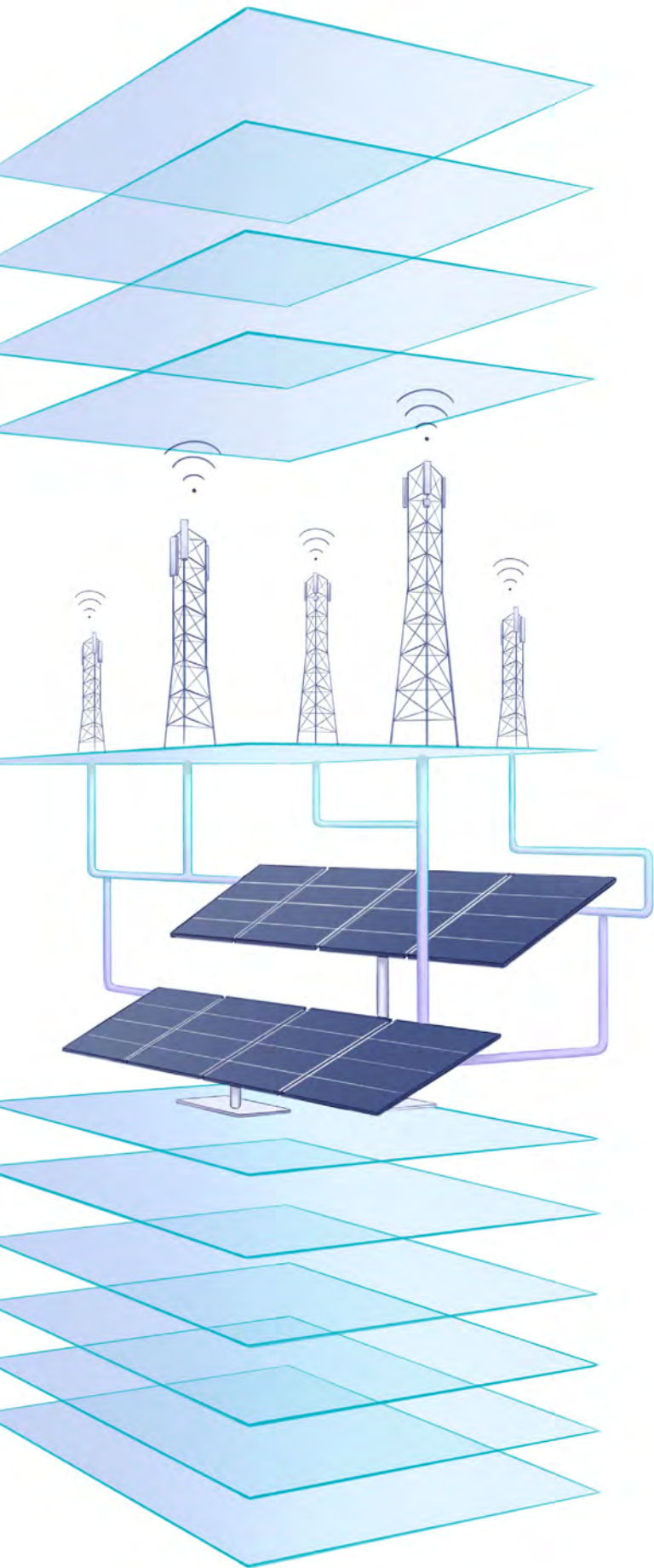
## « Les espaces partagés ne signifient pas que les données sont centralisées, bien au contraire. »

Et concrètement ? Pour l'électro-mobilité, de nouveaux services d'optimisation de trajet prenant en compte les bornes disponibles en chemin sont, par exemple, en cours d'étude. Les industriels EDF et Enedis auront alors besoin de connaître la nouvelle quantité d'énergie à produire et où la distribuer. Ils seront alors amenés à échanger des informations avec des entreprises de maintenance, des automobilistes ou encore un acteur comme Vinci qui gère les autoroutes. Mais pour rendre cela possible, tout part d'enjeux d'interopérabilité sémantique - ou comment traiter et présenter ses données aux autres utilisateurs ?

### Créer un « espéranto de la donnée »

Entrent en jeu les chercheurs et chercheuses de Mines Saint-Étienne, Lina Nachabe et Maxime Lefrançois. Commissionnés par EDF dans le cadre d'Omega-X, ils aident l'industriel français à définir de nouvelles méthodologies à partir de leur expertise du web sémantique. Celui-ci a notamment rendu l'Internet compréhensible par les machines grâce à la création d'un énorme graphe de connaissances réunissant l'ensemble des données contenues dans les pages web. Le web sémantique permet, par exemple, aux moteurs de recherche de comprendre les informations derrière une page et ainsi présenter les meilleurs résultats possibles aux utilisateurs. « *Cette manière de structurer et représenter les connaissances est particulièrement adaptée au cas de l'énergie. Elle permet de fusionner plusieurs bases de données sans avoir à renommer les entités de chacune d'elles. Elle utilise, à cet effet, un vocabulaire commun afin de décrire les données, c'est le principe de l'ontologie* », explique Lina Nachabe.

Les chercheurs et chercheuses veulent notamment adapter à l'énergie l'ontologie SAREF (*Smart Applications REFerence*) de l'Internet des objets (IoT). Pour cause, l'Internet des objets devrait jouer un rôle majeur dans les échanges entre le réseau et les nouvelles infrastructures de l'énergie telles que la production d'énergie *offshore* (éolien) ou au milieu de zones désertiques (champs photovoltaïques en Afrique). L'IoT assurera aussi les transferts d'informations de cas d'usage mobiles comme la voiture électrique. La première étape pour les chercheurs consiste donc à élaborer un modèle général d'ontologie pour l'énergie. Puis, d'adapter ces nouveaux outils aux différentes applications mentionnées plus haut. « *Nos travaux veulent créer une sorte d'espéranto de la donnée qui permettra à des utilisateurs qui n'avaient aucun lien jusqu'à*



*présent de discuter et de s'échanger des données au profit de nouveaux services », ajoute Maxime Lefrançois.*

### **Par-delà l'énergie : l'adaptabilité d'aujourd'hui...**

La transition énergétique est synonyme d'incertitude pour de nombreux acteurs économiques. Accéder aux données de ce secteur permettrait à ces derniers de mieux piloter leur propre transformation. Par exemple, Orange s'intéresse depuis peu à la résilience de ses réseaux mobiles dans un paysage énergétique changeant. « *L'économie d'énergie dans nos réseaux était vue jusqu'à présent sous la coupe de la qualité de service. Désormais, cette préoccupation devient secondaire et notre objectif est plutôt d'assurer un fonctionnement du réseau selon une contrainte énergétique* », décrit Stéphane Tuffin - chercheur spécialiste des réseaux mobiles du futur chez Orange Labs.

Quels usages prioriser lorsque l'énergie disponible impose une réduction des capacités du réseau ? Vaut-il mieux adopter une régulation par utilisateur ou zone géographique ? Afin de tester leurs hypothèses et identifier les meilleures mesures à mettre en place, les chercheurs d'Orange développent actuellement un jumeau numérique de leur réseau. À terme, cet outil de simulation pourrait se transformer en un système de pilotage automatique. « *Il nous faudra alors accéder aux données chiffrées de l'énergie et à la façon dont son équilibre national est géré. Ces informations impacteront directement le pilotage en temps réel de nos réseaux et nos échelles d'intervention pour réduire nos besoins en énergie* », explique Stéphane Tuffin.

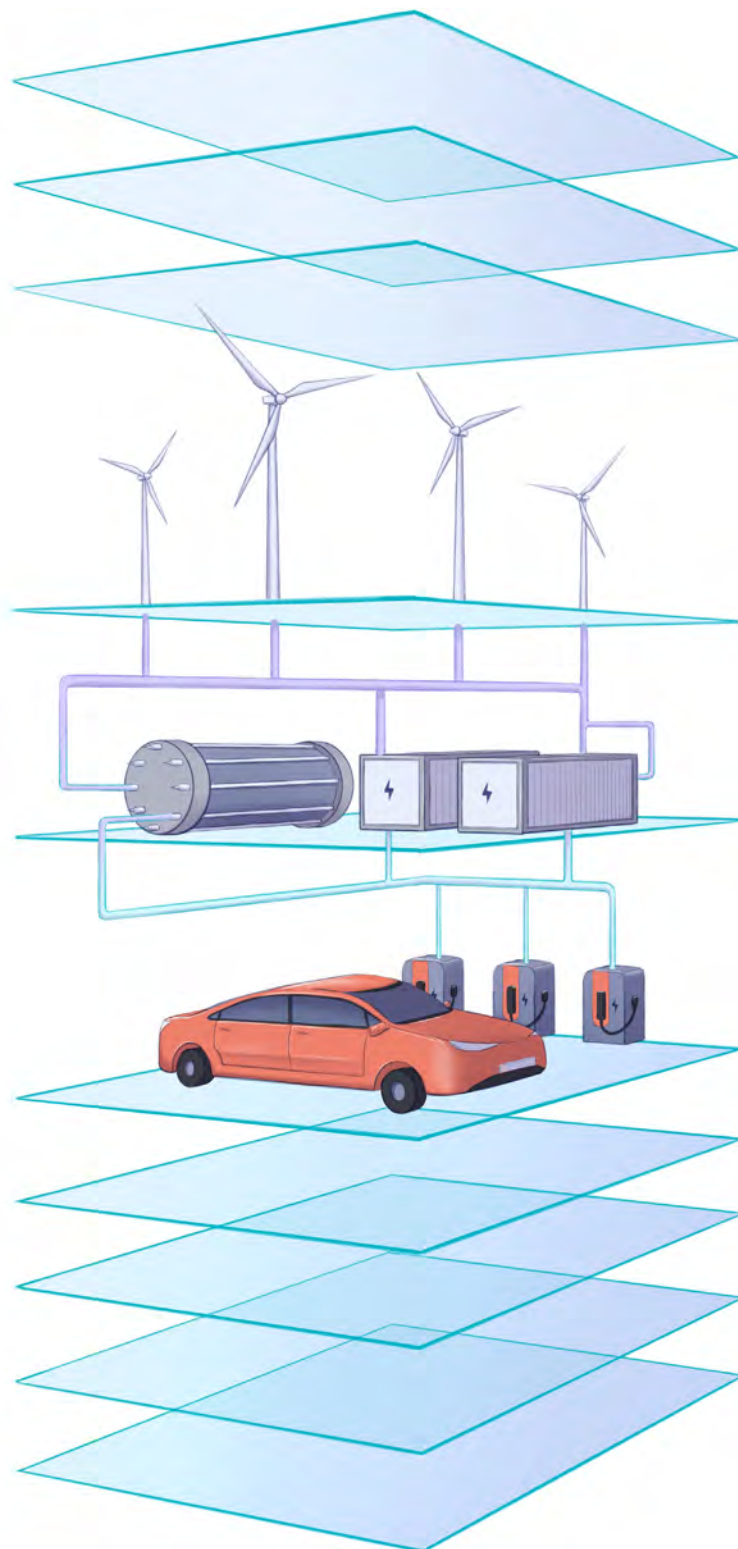
Plusieurs leviers d'action sont déjà identifiés. La désactivation de certains éléments d'antenne, de porteuses radios, voire d'antennes entières apporterait des économies d'énergie allant de l'échelle de quelques

microsecondes à plusieurs heures. « Nous jouons déjà sur ces aspects lorsque le trafic est faible. Toutefois, avant de généraliser leur mise en œuvre, nous devons mieux cerner leurs impacts sur la qualité de nos services », précise le chercheur. En plus de modifier son mode de gestion du réseau, Orange envisage également d'intervenir sur ses offres. L'opérateur réfléchit à des abonnements de nouvelle nature à l'image des offres Tempo d'EDF. Le prix des usages mobiles serait alors modulé selon le coût de l'énergie.

### ... la résilience de demain

Sur le long terme, Orange pourrait aller jusqu'à repenser ses infrastructures mobiles. Une action particulièrement intéressante consisterait à partager le réseau actif avec les autres opérateurs. « Pour le moment, nous partageons des mâts au pied desquels les différents opérateurs ont leurs éléments actifs qui consomment beaucoup d'énergie. L'idée serait de partager ces éléments, donc de réduire par quatre les consommations énergétiques des réseaux mobiles. Il serait également possible de mettre en commun nos bandes de fréquence », révèle Stéphane Tuffin.

Par ailleurs, le réseau mobile consomme plus d'énergie que celui de la fibre. Orange envisage ainsi de déporter une partie des usages mobiles vers le wifi. « Une approche potentielle serait alors d'arrêter le modèle d'hyper abondance des données. Nous envisageons un retour à des offres avec des volumes de données limités et un prix étagé en fonction de la quantité consommée », expose le chercheur. Et si l'avenir était d'avoir plus de données d'énergie pour consommer moins de données télécoms ? Ce serait, en tout cas, un pas vers de nouveaux usages plus sobres. ▲



## PARTIE III

# QUID D'UN SYSTÈME OFF-GRID ?

## ACCOMPAGNER LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN AFRIQUE

L'énergie alimente le moteur invisible qui fait tourner le monde. Il est économique pour certains, écologique pour d'autres. Pour Erwan le Quentrec, l'énergie est surtout un pilier d'un monde basé sur l'apprentissage. Depuis plus de dix ans, l'économiste de l'éducation au sein du département de « Sociologie et d'économie des usages » d'Orange Labs, œuvre à la digitalisation de l'éducation en Afrique. Derrière cette nouvelle pratique numérique, se cache un besoin électrique. Or, certaines zones rurales africaines ont un taux d'électrification très faible. C'est pourquoi, les projets du chercheur en éducation s'accompagnent toujours d'une réflexion sur l'énergie locale.

*« Des fermes solaires qui peuvent être installées dans certains villages sont souvent surdimensionnées par rapport aux consommations réelles. Le coût de l'énergie consommée est alors bien plus élevé que prévu et ces centrales produisent à perte »,* décrit Erwan Le Quentrec. L'enjeu est donc de mieux prévoir la demande et son évolution. En ce sens, les chercheurs et chercheuses d'Orange ont créé des modèles à partir de leurs données de télécommunications qui leur permettent de mieux estimer les densités de population et les capacités énergétiques requises. Ces informations aident ensuite à dimensionner des systèmes *off-grid*, ou hors réseau. *« De nombreux pays d'Afrique ne disposent pas d'infrastructures de transport d'électricité, décrit le chercheur. Il est donc plus intéressant de créer des mini-réseaux que de miser sur une production massive et centralisée comme chez nous ».*

Parmi les différentes solutions techniques, certains systèmes *off-grid* reposent sur une constellation de petits réseaux décentralisés reliés les uns aux autres. Chacun est dimensionné selon les besoins de sa zone d'implantation. Ils sont principalement alimentés par des panneaux solaires, voire des petits barrages hydrauliques selon les régions. Cette organisation, au plus proche de la demande, est également évolutive. Il est donc toujours possible d'ajouter de nouvelles unités de production d'électricité en cas d'augmentation des usages. Toutefois, il ne suffit pas simplement d'apporter cette énergie en zone rurale pour qu'elle soit adoptée. Les chercheurs et chercheuses soulignent ainsi le besoin d'accompagner les habitants dans une transformation de leurs usages et leur permettre de passer des énergies fossiles à l'électricité. Enfin, l'entretien et la maintenance de ces mini-réseaux apportent autant de défis que d'opportunités pour la montée en compétences, les gains de productivité et la création de nouveaux emplois locaux.

Actuellement, l'Afrique ne fait pas partie de ceux qui émettent le plus de gaz à effet de serre à travers le monde. Cependant, ces pays vont se développer dans les prochaines années et leur demande en énergie devrait augmenter. Pour Erwan Le Quentrec, cette évolution doit être anticipée : *« Je pense que la transition énergétique devrait être vue davantage à l'échelle de la planète. Il y aurait un grand intérêt, autant écologique qu'économique, à aider les pays africains à réduire leurs émissions de CO<sub>2</sub> au fur et à mesure que leur consommation d'énergie augmente ».* ▲







# IV

## NOUVEAUX USAGES ET NOUVEAU PARADIGME

---

1

« L'ÉNERGIE D'AVENIR  
EST CELLE QUE NOUS  
NE CONSOMMONS PAS »

---

L'URGENCE  
ENVIRONNEMENTALE  
D'UN RENOUVEAU  
ÉNERGÉTIQUE

---

3

2

À QUOI RESSEMBLERA  
LE MIX ÉLECTRIQUE  
DE DEMAIN ?

---

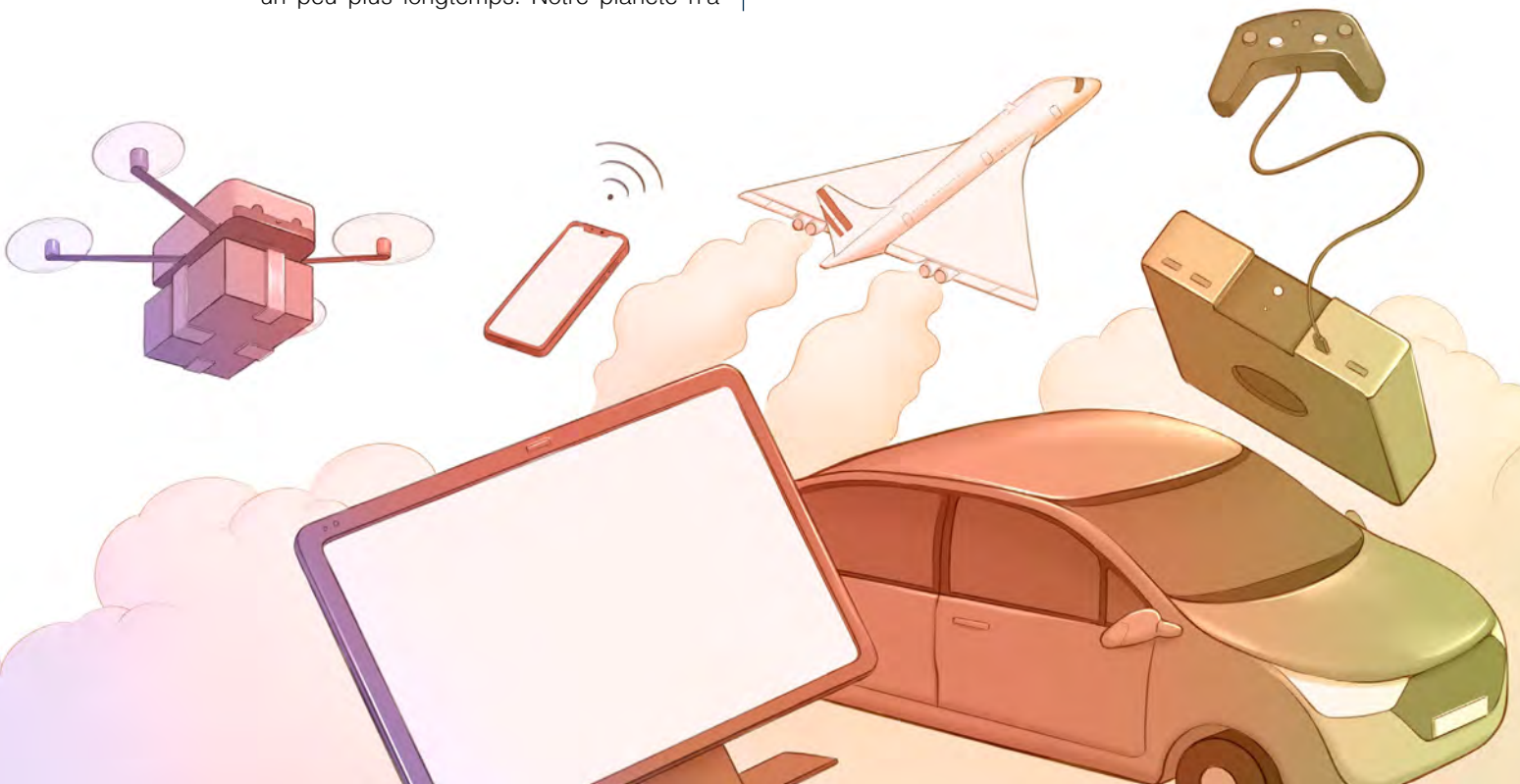
# L'ÉNERGIE D'AVENIR EST CELLE QUE NOUS NE CONSOMMONS PAS

---

Si l'efficacité permet de faire mieux en consommant moins d'énergie, elle est souvent rattrapée par des effets rebonds. L'énergie consommée n'est donc pas réduite, mais réinvestie ailleurs. La sobriété invite, au contraire, à repenser notre rapport à l'énergie, questionner nos usages et à revoir nos modes de vie pour un avenir plus viable.

« Notre maison brûle et nous regardons ailleurs », déclarait Jacques Chirac lors du IV<sup>e</sup> sommet de la Terre, en 2002. Plus de 20 ans plus tard, la maison brûle toujours et nous avec. Quand le corps humain se meurt, il a cette incroyable capacité à se mettre en mode économie d'énergie pour subsister un peu plus longtemps. Notre planète n'a

pas cette chance, car c'est l'humain qui pilote son capital énergétique. Libre à lui d'appuyer sur les bons interrupteurs pour qu'elle subsiste plus longtemps. Un premier bouton, actionné par les acteurs politiques et économiques, est celui de l'économie d'énergie.



**Rien ne se perd, tout se consomme**

Le numérique est un des plus mauvais élèves de la transition énergétique. Il consomme 10 % de l'électricité mondiale et ses besoins augmentent chaque année de 6 %. Mais pour améliorer l'efficacité d'un système quelconque, il faut d'abord mesurer où il consomme le plus d'énergie. En ce sens, Chantal Taconet, chercheuse en informatique à Télécom SudParis, développe des modèles d'estimation des consommations énergétiques de différentes briques du numérique. Elle s'est notamment intéressée aux intergiciels au cœur des échanges entre un objet connecté et le cloud.

Quel est alors le coût énergétique de ces interactions ? « Nous avons observé que réduire le nombre de ces échanges, plutôt que le volume de données envoyées, diminuait de moitié la consommation de ces

flux », rapporte la chercheuse. Ce résultat incite à se poser les questions du « quand » et du « pourquoi » des transferts de données qui alimenteront, par exemple, les smart grids. « Dans une perspective de réduction des consommations énergétiques, nos travaux montrent que des applications ont intérêt à calquer leur nombre d'interaction sur leur besoin réel d'information et non plus de vouloir exploiter l'ensemble des capacités du réseau utilisé », ajoute Chantal Taconet. Un résultat d'autant plus d'actualité alors que les capacités d'échanges de données seront accrues avec l'arrivée de la 5G.

Toutefois, les gains d'efficacité énergétique apportés par la technique sont de plus en plus marginaux. « Jusqu'à présent, l'efficacité ne parvient pas à réduire la consommation énergétique des usages, au contraire, elle entraîne des effets rebonds et donc des consommations plus grandes. S'impose un besoin plus conséquent de sobriété », constate la chercheuse. Et ce qui est vrai pour le numérique, peut être transposé à l'ensemble de la société.

**« Le numérique est un des plus mauvais élèves de la transition énergétique : il consomme 10 % de l'électricité mondiale. »**



### Passer de l'efficacité à la sobriété

« *Il sera impossible de remplacer entièrement les ressources fossiles par une autre énergie à une vitesse suffisante dans les vingt prochaines années. L'énergie d'avenir est donc celle que nous ne consommons pas* », affirme Fabrice Flipo philosophe des sciences à Institut Mines-Télécom Business-School. La sobriété ne s'appuie pas sur des technologies, mais sur la maîtrise des usages. Faudrait-il, par exemple, adapter les pics de production industrielle à ceux de la production d'énergie renouvelable ? La sobriété interroge donc notre rapport à l'énergie et remet en question notre organisation sociale et au travail.

## « La sobriété ne saurait se résumer à une simple volonté individuelle. »

Dans les débats publics, elle est souvent présentée à l'échelle du citoyen : baisser le chauffage, prendre le vélo, etc. Toutefois, elle ne saurait se résumer à une simple volonté individuelle. Sa dimension collective lui permettra, au contraire, d'avoir un impact à plus grande échelle. Car, s'il n'y a rien de plus efficace et sobre que de laisser sa voiture au garage. Encore faut-il que des réseaux de transport en commun existent ou que des aménagements urbains soient favorables à la circulation sécurisée des vélos. Une approche de sobriété collective ne signifie pas non plus d'exiger les mêmes efforts de la part de chacun. D'autant que la consommation d'énergie est liée au niveau de revenu. « *Même si les plus pauvres vivent dans des logements mal isolés, ce ne sont pas eux qui consomment le plus d'énergie. La notion d'équité doit être centrale à la transition sociale sous-jacente à un mode de vie plus sobre* », ajoute Fabrice Flipo.

### Apprendre à vivre différemment

L'éducation et la sensibilisation sur les impacts de nos actions seront des éléments moteurs de la sobriété. Par exemple, lorsqu'une personne achète un téléphone ou s'abonne à un réseau social, elle entre dans des modes de vie collectifs. « *L'enjeu est d'indiquer à une personne le mode de vie dans lequel elle entre au moment où elle prend cette décision. Il s'agit de lui montrer le monde qui va avec. La sobriété doit, en ce sens, permettre à chacun d'exercer sa capacité de choix de manière efficace et éclairée* », défend Fabrice Flipo.

Alors que la consommation énergétique du numérique tient à 50 % des usages, Chantal Taconet insiste sur le besoin d'afficher ces impacts en apparence dématérialisés. « *Nous cherchons par exemple à mesurer et à indiquer le coût énergétique d'un service de bout en bout, comme une requête internet. Il faudra ensuite un travail sociologique permettant de trouver les bons indicateurs afin de faire comprendre ces données aux individus et les inciter à modifier leur comportement* », décrit la chercheuse.

Plus globalement, c'est à l'échelle entre l'individu et l'État que se joue la sobriété. Celle qui alimente donc nos modes de vie. Sans que nous n'y prêtions attention, ces derniers sont modifiés en permanence par des acteurs comme les collectivités territoriales, les associations ou encore les entreprises. « *Un constructeur automobile ne fait pas une voiture par personne, mais plusieurs centaines de milliers de véhicules identiques pour des personnes aux usages similaires*, décrit Fabrice Flipo. *Agir sur les modes de vie, signifie agir sur des séries d'usages similaires* ». Dans le cadre de la sobriété, l'enjeu sera donc d'identifier les modes de vie minoritaires d'aujourd'hui qui pourraient devenir les majoritaires de demain. ▲

## QUELLES RÉGLEMENTATIONS POUR LA TRANSITION ?

---

La transition énergétique a la lourde tâche de supprimer les énergies fossiles de nos usages en les remplaçant par des énergies renouvelables et en réduisant nos consommations globales. « *Pour le moment, les sources d'énergie s'accumulent par rapport aux autres, il n'y a ni remplacement, ni diminution des consommations* », souligne Fabrice Flipo. Certes, les réserves de pétrole s'épuisent, mais pas assez rapidement pour sauver le climat. « *Il y a cinq à dix fois plus de carbone dans le sol que l'atmosphère ne peut en considérer. Autrement dit, la limite climatique sera atteinte avant l'épuisement des réserves de pétrole actuellement identifiées* », précise Christian Brodhag, chercheur émérite à Mines Saint-Étienne.

Des réglementations et des mécanismes financiers existent afin d'inciter à ne plus utiliser ces ressources. La taxe carbone aux frontières de l'Union européenne exerce ainsi une pression sur les pays qui n'ont pas de stratégie de réduction des gaz à effet de serre. Les grandes négociations ont également eu des effets notoires. Après la signature des Accords de Paris en 2015, 75 % des stations de charbons prévues n'ont pas été construites. Mais comment empêcher un acteur privé ou un État disposant de ces ressources de les utiliser ? Quel doit être le rôle de la réglementation dans cette transition ? Ces questions sont toujours en cours de débat. Toutefois, l'Histoire nous montre que les seules ressources que l'humanité a cessé d'utiliser sont celles qu'elle a finies par interdire.

### DÉFINITIONS

**Efficacité :** l'efficacité énergétique consiste à consommer moins, mais mieux en améliorant les performances des appareils et des installations. Le service ou l'usage est quant à lui inchangé. Par exemple : remplacer ses appareils par de l'électroménager de classe énergétique A, remplacer un véhicule thermique par un électrique.

**Sobriété :** la sobriété énergétique est une démarche volontaire de réduction des consommations d'énergie grâce à des modifications des modes de vie et des usages. Par exemple : baisser la température du chauffage, remplacer la voiture par le vélo.

# À QUOI RESSEMBLERA LE MIX ÉLECTRIQUE DE DEMAIN ?

---

Les scénarios du mix électrique peuvent éclairer les décisions quant au monde énergétique majoritairement électrique de demain. Mais comment les acteurs politiques et les différentes parties prenantes de l'énergie s'approprient-elles ces simulations ?

Avec l'électrification massive visée par la France, l'électricité devrait passer de 27 % de l'énergie finale consommée actuellement par les Français et les Françaises, à près de 55 % en 2050<sup>1</sup>. Les scénarios qui se concentraient jusqu'alors uniquement sur le système électrique - soit une brique mineure des scénarios énergétiques globaux - sont regardés d'un œil nouveau.

## Les ingrédients, mais pas la recette

Beaucoup d'incertitudes planent au-dessus du mix électrique de demain. En cause : les effets plus ou moins prévisibles du changement climatique, les politiques qui en découlent, la capacité à prolonger la durée de vie des centrales nucléaires ou encore celle des réseaux à absorber un développement massif des énergies renouvelables. En conséquence, les débats publics promeuvent deux schémas assez radicaux pour y répondre. Ainsi, les visions 100 %

nucléaires s'opposent à d'autres 100 % renouvelables. « *Dans le cadre de nos recherches, nous pensons au contraire que les deux sont complémentaires. La diversité apporte de la résilience qui permet, à son tour, de minimiser les risques associés aux incertitudes susmentionnées* », défend Nicolas Thiollière, physicien nucléaire à IMT Atlantique.

Ces deux sources d'électricité sont d'ailleurs au cœur de la stratégie du gouvernement français. Mais il est possible de faire une multitude de recettes avec ces deux ingrédients. Comment articuler l'un par rapport à l'autre pour répondre au mieux aux contraintes et aux besoins énergétiques de demain ? Les scénarios sur les systèmes électriques, comme ceux développés par Nicolas Thiollière, permettent justement d'explorer les assemblages possibles de ces deux pièces de puzzle.

---

1. Les Futurs énergétiques 2050, par RTE



### Une transition hypermétrape

L'avenir du nucléaire repose sur le lancement imminent de nouveaux réacteurs pressurisés européens (EPR2) qui produiront de l'électricité à partir de 2040. En ce sens, la loi du 22 juin 2023 vise à accélérer la construction de six nouveaux réacteurs. Mais, entre aujourd'hui et cette échéance, la situation électrique de la France reste floue. En effet, l'éolien et le photovoltaïque suivent une croissance lente. Et à compter de 2030, 80 % du parc nucléaire actuel aura atteint sa durée de vie initialement prévue de 40 ans. Passé ce délai, les arrêts pour maintenance seront plus longs et plus fréquents. Mais prolonger leur durée de vie sera incontournable afin d'assurer un avenir décarboné à l'énergie française.

## « Comment le nucléaire sera-t-il impacté par la vitesse de déploiement des énergies renouvelables ? »

Enfin, comment le nucléaire des vingt prochaines années sera-t-il impacté par la vitesse de déploiement des énergies renouvelables ? C'est le genre de questions que Nicolas Thiollière souhaite éclaircir à l'aide de son modèle technico-économique. Celui-ci est en cours de développement et s'appuie sur des expertises en physique, économie et sociologie. Au cœur de leurs réflexions, figure le concept de suivi de charge. Il consiste à faire varier la puissance d'une centrale nucléaire pour adapter sa production à la demande. « *Au départ, le nucléaire n'a pas été conçu pour cela, mais dans les scénarios d'avenir, cette capacité sera de plus en plus utilisée afin d'adapter la production du nucléaire en fonction de celle des énergies renouvelables. L'objectif de nos scénarios sera donc de calculer les*

*impacts de ces pratiques sur les coûts du système électrique* », décrit le chercheur.

Avec ces outils, les scientifiques pourront plus largement étudier la résilience d'un mix électrique lorsqu'il est soumis à une perturbation. « *Ils nous permettent d'envisager les effets des tensions qui nous attendent sur la stabilité du réseau et notamment l'indisponibilité d'une partie du parc nucléaire. Comment un mix électrique, majoritairement renouvelable, sera-t-il capable de les compenser ?* », interroge Nicolas Thiollière.

### Un poids plume dans la balance politique

Quelles sont les retombées réelles de ces scénarios en dehors de la recherche ? Pourquoi, alors qu'ils explorent diverses trajectoires de transition énergétique, ne sont-ils pas encore parvenus à enclencher la moindre transition énergétique ? Ces questions renvoient à des problématiques d'usage. « *Lors d'une étude menée en 2017, nous avons observé que les scénarios techniques n'aidaient pas à prendre des décisions. Ils pouvaient, au contraire, être totalement instrumentalisés pour justifier des décisions politiques déjà prises* », rapporte Stéphanie Tillement, sociologue à IMT Atlantique. La situation énergétique et les enjeux ont fortement changé depuis. Les expertises scientifiques mobilisées pour élaborer ces scénarios aussi. Toutefois, l'avenir de l'énergie est bien plus politique que technique. Comment les décideurs politiques s'approprient-ils alors ces nouveaux outils ?

Cette question est au cœur d'un nouveau projet de Stéphanie Tillement. À partir d'une série d'entretiens et d'ateliers avec des acteurs industriels, politiques et académiques, la chercheuse souhaite identifier les sources d'incertitude propres à chacun et la manière dont ils utilisent ou non les scénarios du mix électrique pour les appréhender. Autrement dit, ces différents



acteurs se préoccupent-ils des mêmes aspects ? « Une grande partie des incertitudes sont sociales ou socio-techniques, c'est-à-dire liées aux relations entre les parties prenantes autour des infrastructures techniques. Et nous constatons des situations très mouvantes sur l'énergie. Par exemple, l'industrie nucléaire, moribonde en 2021, a été totalement relancée avec la guerre en Ukraine et les enjeux plus prononcés de souveraineté énergétique », décrit la sociologue. Ces incertitudes liées aux interdépendances d'acteurs ne figurent pas dans les scénarios actuels. Mais selon les résultats de cette étude, il pourrait être intéressant de les ajouter. D'autant que les forces en présence ne sont pas les mêmes d'un scénario à l'autre.

#### Retour vers le futur

Les choix énergétiques sont associés à différentes organisations et relations de pouvoir. Ainsi, un système électrique nucléaire ne peut pas fonctionner sans l'État, contrairement aux énergies fossiles qui ont leurs propres capitaux. Les énergies renouvelables donnent plus de pouvoir aux acteurs locaux que dans le cas du nucléaire, etc. Ces mosaïques d'acteurs potentiels posent plus largement la question de : qui prend les décisions et à partir de quelles connaissances ? Et la réponse à cette question presse alors qu'il est question de débattre au niveau du Parlement de l'avenir du nucléaire. La formation des politiciens sur ces enjeux techniques devient tout aussi cruciale que les développements en ingénierie pour la transition énergétique

Une autre hypothèse des travaux de Stéphanie Tillement autour des usages des scénarios énergétiques porte sur les conflits de temporalités. « Le temps des grandes infrastructures électriques est incompatible avec celui d'un mandat politique. Il y a une absence de continuité qui pénalise jusqu'à présent les choix énergétiques. Il faut être capable aujourd'hui de prendre des déci-

sions et de s'y tenir sur le long terme pour l'intérêt général », souligne la chercheuse.

**« Il faut être capable aujourd'hui de prendre des décisions et de s'y tenir sur le long terme pour l'intérêt général. »**

Finalement, ces scénarios pourraient-ils davantage convaincre les décideurs s'ils mettaient en exergue les contraintes plutôt que les objectifs ? Par exemple, illustrer les vulnérabilités associées à un mix 100 % renouvelable et les sources de résilience qui permettraient de s'en prémunir. L'intérêt de la simulation est de pouvoir recalculer d'autres possibilités. De tester avant de décider. Mais cela nécessite de se les approprier et non pas simplement de considérer les résultats proposés comme quelque chose de figé. « Notre parti pris est de dire que la résilience se prépare. Avec un travail prospectif et le recours aux scénarios, on ne prédira jamais l'avenir, mais nous pouvons minimiser les risques. Plus l'ensemble des acteurs se seront intéressés aux incertitudes, aux réponses possibles et à la définition des intérêts à protéger en priorité, moins nous subirons au moment venu », conclut Stéphanie Tillement. ▲

## VISION D'INDUSTRIEL – BNP PARIBAS

---

En étant au cœur des financements de tous les secteurs de l'économie, les banques jouent un rôle crucial dans la transition énergétique et environnementale. Leurs stratégies de financement et d'investissement peuvent en effet contribuer à donner le ton. Première banque de la zone Euro, BNP Paribas mise sur ce rôle d'« arbitre » financier. « *Au sein de la direction RSE au niveau du Groupe, avec une douzaine d'experts ESG (environnement, société et gouvernance), nous réfléchissons secteur par secteur aux impacts de nos financements* » souligne Sébastien Soleille, responsable transition énergétique et environnement au sein de BNP Paribas. L'objectif ? Définir des stratégies globales de financement à l'échelle des secteurs d'activités les plus émetteurs. Ce levier permet ainsi d'orienter les financements des clients de la banque vers des actions contribuant à l'alignement de l'économie avec l'objectif de l'Accord de Paris sur le climat.

« *Nous accompagnons nos clients pour que leur stratégie soit compatible avec un objectif de neutralité carbone globale en 2050* » précise Sébastien Soleille. La banque développe ainsi des outils de finance durable pour soutenir la transition énergétique de ses clients. Par exemple, elle soutient la transition des flottes de véhicule de ses entreprises clientes, du thermique vers l'électrique. Dans le secteur de l'alimentaire et de l'élevage, elle souhaite accompagner sa clientèle dans des stratégies qui rendent la production alimentaire compatible avec une réduction de l'empreinte carbone, tout en conservant des critères positifs pour le bien-être animal et la biodiversité.

Cette sélection favorable des projets à faible impact environnemental s'accompagne de décisions radicales sur l'arrêt des investissements dans des secteurs à forte empreinte carbone. Ainsi BNP Paribas n'accorde plus de financements (crédits ou obligations) dédiés au développement de nouveaux champs pétroliers ou gaziers, quelles que soient les modalités de financement. Et depuis 2022, les financements pour les énergies bas-carbone sont devenus plus importants que ceux pour les énergies fossiles.

« *Certes, ces décisions peuvent être mal vues par certains clients, mais nous travaillons d'autant plus avec des clients engagés dans la transition* » pointe Sébastien Soleille. « *En investissant dans de nouveaux projets durables, nous parvenons à maintenir ou augmenter notre volume d'affaires* » insiste-t-il. Après les secteurs de l'énergie, de l'automobile, du ciment, de l'aluminium et de l'acier, la banque va prochainement annoncer ses objectifs pour les secteurs de l'agroalimentaire, de l'immobilier et du transport maritime et aérien. Dans les défis énergétiques qui attendent la société, les acteurs financiers contribuent ainsi à motiver les acteurs à faire évoluer leur approche, et à s'aligner sur les scénarios net-zéro de l'agence internationale de l'énergie.



# L'URGENCE ENVIRONNEMENTALE D'UN RENOUVEAU ÉNERGÉTIQUE

---

Se concentrer sur les effets climatiques de l'énergie ne suffira pas à assurer une transition énergétique réussie. Le cadre des limites planétaires veut reconnecter des politiques distinctes en se référant aux capacités de résilience de la Terre.

La transition énergétique est motivée par des enjeux climatiques. Ses actions visent à réduire les gaz à effet de serre. Sa réussite se mesure en empreinte carbone. Capté, stocké, transformé, celui-ci devient *persona non grata* de la société de demain actuellement en pleine décarbonation. Toutefois, l'environnement ne saurait se résumer aux simples manifestations du changement climatique. Aussi, regarder l'avenir de l'énergie uniquement au travers du prisme du climat ne suffira pas à assurer une transition énergétique et écologique efficace. Il devient urgent de prendre du recul pour observer l'ensemble des pressions qui mettent notre planète dans le rouge.

**« L'environnement ne saurait se résumer aux manifestations du changement climatique. »**

---

## La coupe est presque pleine

Les activités humaines du dernier siècle, et notamment le recours aux énergies fossiles, ont entraîné des dégradations de notre planète si fortes et si rapides que les dommages sont en passe d'être irréversibles. « *Nous sommes en train de basculer vers un nouvel état d'équilibre de la planète qui sera moins agréable à vivre que celui dans lequel nous sommes depuis 10 000 ans avec l'Holocène* », explique Natacha Gondran, chercheuse en impact environnemental à Mines Saint-Étienne. Au cœur de ce constat, se trouve le concept des limites planétaires. Les scientifiques en dénombrent neuf, dont le changement climatique, l'érosion de la biodiversité, les perturbations des cycles de l'azote et du phosphore ou encore de l'eau, pour ne citer que quelques exemples. En 2022, six d'entre elles étaient dépassées.

Autrement dit, se concentrer sur les seuls effets climatiques de la transition énergétique, c'est prendre le risque de transférer les pollutions de l'énergie ailleurs. Par exemple, les deux principaux modes de

production d'électricité en France en 2023 sont le nucléaire (63,4 %) et l'hydraulique (11 %). Tous deux sont « propres » d'un point de vue climatique. Pour autant, la gestion des déchets nucléaires reste problématique. Alors que l'augmentation des sécheresses place l'hydroélectricité au cœur de conflits d'usage de l'eau. Et cela dépasse le cadre de la France puisque l'hydraulique est le mode qui produit la plus grande quantité d'électricité décarbonée à travers le monde, juste devant le nucléaire. Se pose ainsi la question : quel outil adopter afin d'appréhender la complexité des transferts d'impact dans le cadre de la transition énergétique ?

#### Revoir le partage du gâteau

Les analyses de cycle de vie aident à orienter les politiques publiques dans leurs choix technologiques. À travers ses recherches, Natacha Gondran explore des alternatives et de nouveaux indicateurs avec les méthodes d'évaluation absolue de la soutenabilité environnementale (EASE). « Leur objectif est d'avoir une référence qui n'est plus basée sur une comparaison entre deux solutions comme avec l'analyse de cycle de vie, mais plutôt sur les capacités de charge de la planète et ce qu'elle peut « accepter de recevoir » *comme polluants* », explique la chercheuse. Elle permet de définir ce qui est « potentiellement acceptable » afin de conserver l'état d'équilibre défini par les limites planétaires.

Plusieurs verrous sont à lever pour démocratiser ces méthodes au-delà de la recherche. Le principal étant sur le principe de partage. Pour rester dans les limites planétaires, l'ensemble de l'humanité dispose d'un capital d'émissions de CO<sub>2</sub> bien défini qui diminue très vite. La question est de savoir comment partager ce gâteau d'émission entre les pays et les acteurs. « Si nous partons des données de l'économie existante pour définir ce partage, nous allons appliquer à un monde, que nous voudrions

*soutenable, une grille de répartition basée sur celui d'aujourd'hui qui n'est justement pas soutenable !* décrit Natacha Gondran. *Cela pose de nombreuses questions de recherche qui nous ramènent souvent à la sobriété et à la suffisance ».*

## « Réduire les émissions et les consommations pose de nombreuses questions de justice sociale. »

Quelles activités avoir, sachant que tout retour en arrière est impossible ? Lesquelles sont non essentielles ? Cette approche oblige à se poser davantage la question du « pourquoi » nous faisons les choses et non plus seulement « comment ». « *C'est contradictoire à nos modèles économiques qui sont basés sur le partage dans un contexte de croissance perpétuelle. Réduire les émissions et les consommations pose ainsi de nombreuses questions de justice sociale* », ajoute la chercheuse. En ce sens, le cadre des limites planétaires propose un espace de fonctionnement avec en son cœur la notion de justice.

#### Anticiper pour ne pas subir

Prendre en compte les enjeux environnementaux vise aussi à anticiper les crises futures. Dans la théorie des limites planétaires, il est question de signaux avant-coureurs. La Covid-19, l'augmentation des prix de l'énergie, la multiplication des sécheresses et des incendies, ne sont pas juste un enchaînement malencontreux d'événements négatifs. « *Notre planète est en mutation et nous devons nous adapter. Les enjeux de nos travaux sont bien de limiter les crises et d'atténuer leurs effets en amenant les acteurs à réduire leurs émissions à*

*travers ces nouvelles méthodes* », soutient Natacha Gondran.

La chercheuse travaille, pour cela, avec différents acteurs locaux (collectivités territoriales, agences d'urbanisme, énergéticiens, etc.) conscients du besoin d'anticiper les risques par des mesures d'adaptation. Anticiper sera d'ailleurs la meilleure façon de ne pas subir les changements à venir. À nouveau, le meilleur exemple est en train de se produire : les sécheresses et les tensions sur les usages de l'eau. À l'avenir, il nous faudra peut-être importer de l'eau, la désaliniser et donc consommer davantage d'énergie. À Natacha Gondran de conclure : « *Le cadre des limites planétaires permet de reconnecter des problèmes que nous gérons actuellement par des politiques distinctes* ». Cela appelle plus largement à l'ouverture de la question de l'énergie à un cadre qui ne saurait se limiter aux frontières de ses réseaux. ▲

**« Le cadre des limites planétaires permet de reconnecter des problèmes que nous gérons actuellement par des politiques distinctes. »**

---









## Directrice de la publication

Odile Gauthier

## Rédacteur-en-chef

Benjamin Vignard

## Rédaction

Anais Culot

## Création graphique et illustrations

Diane Rottner

## Comité éditorial consultatif

Zoélie Adam-Maurizio, Dominique Balbi, Guillaume Poupy, Benjamin Vignard.

## L'Institut Mines-Télécom et la Fondation Mines-Télécom tiennent à remercier l'ensemble des experts et expertes ayant apporté leurs témoignages dans ce cahier de veille :

Jacques Boonaert, Gustavo Boriolo, Daniel Bougeard, Baptiste Bouillot, Christian Brodhag, Christophe Coquelet, Thierry Djenizian, Simon Eibner, Javier Escudero-Sanz, Fabrice Flipo, Natacha Gondran, Bruno Lacarrière, Tom Lacassagne, Yasmine Lalau, Erwan Le Quentrec, Maxime Lefrançois, Khaled Loubar, Mathieu Milhé, Lina Nachabe, Georgios Papadopoulos, Ugo Pelay, Doan Pham Min, Mathieu Sannié, Sébastien Soleille, Chantal Taconet, Anne-Sophie Taillandier, Nicolas Thiollière, Stéphanie Tillement, Stéphane Tuffin.



**Institut Mines-Télécom**

19 place Marguerite Perey  
91 120 Palaiseau  
communication@imt.fr



**FONDATION  
Mines-Télécom**

La Fondation de l'IMT

17 rue de l'Amiral Hamelin  
75016 Paris

contact@fondation-mines-telecom.org

**Imprimé en janvier 2024 par Imprimerie Escourbiac  
sur papier 100 % recyclé.**

ISBN : 978-2-9574278-2-6



**Institut Mines-Télécom**

19 place Marguerite Perey  
91 120 Palaiseau



**FONDATION  
Mines-Télécom**

La Fondation de l'IMT

17 rue de l'Amiral Hamelin  
75 016 Paris



**RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

Avec le soutien des grands partenaires  
de la Fondation Mines-Télécom :



**BNP PARIBAS**



**StreamWIDE**

Avec le soutien du **Groupe Bouygues**

ISBN 978-2-9574278-2-6