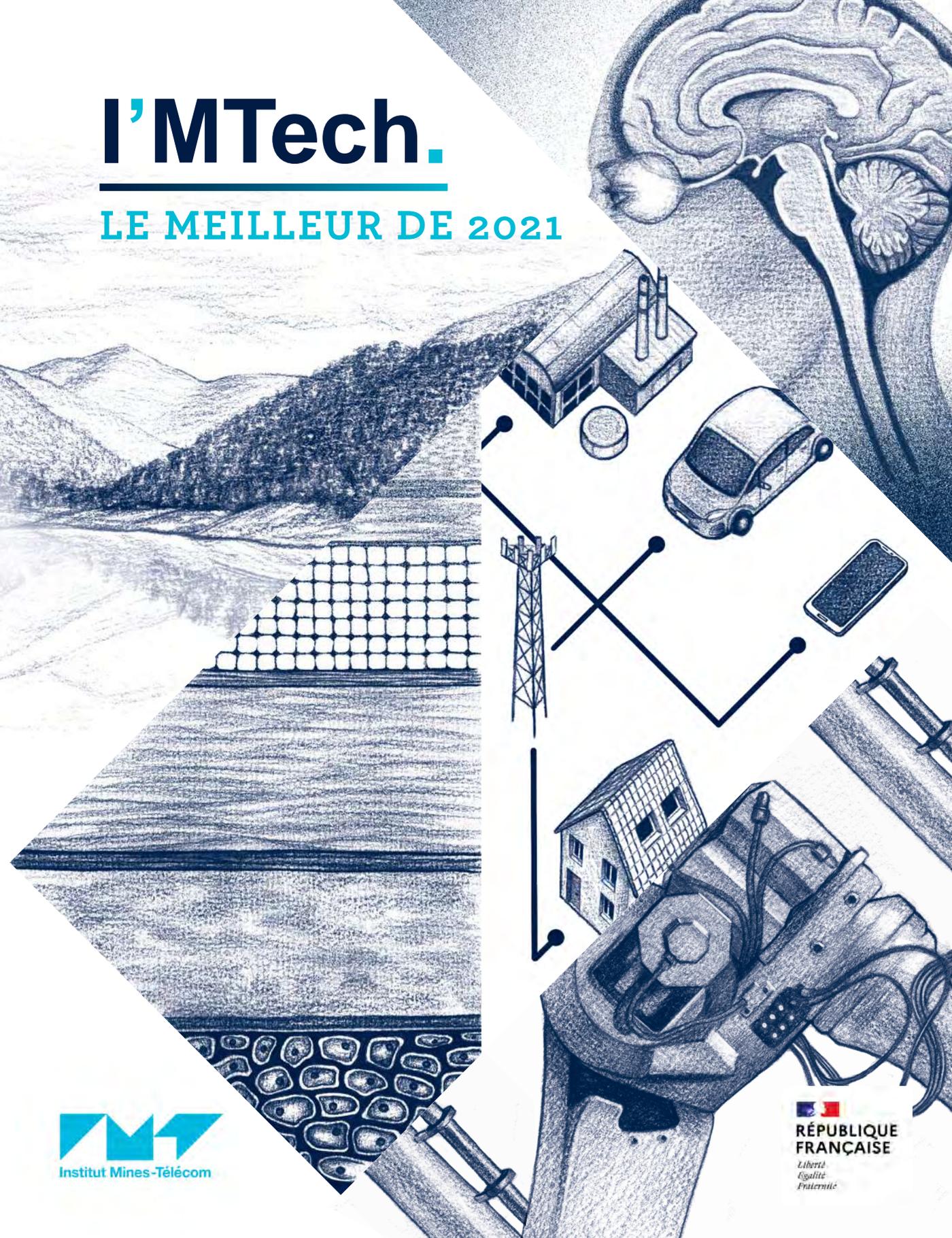


# I'MTech.

LE MEILLEUR DE 2021





**I'MTech.**

---

**LE MEILLEUR DE 2021**



---

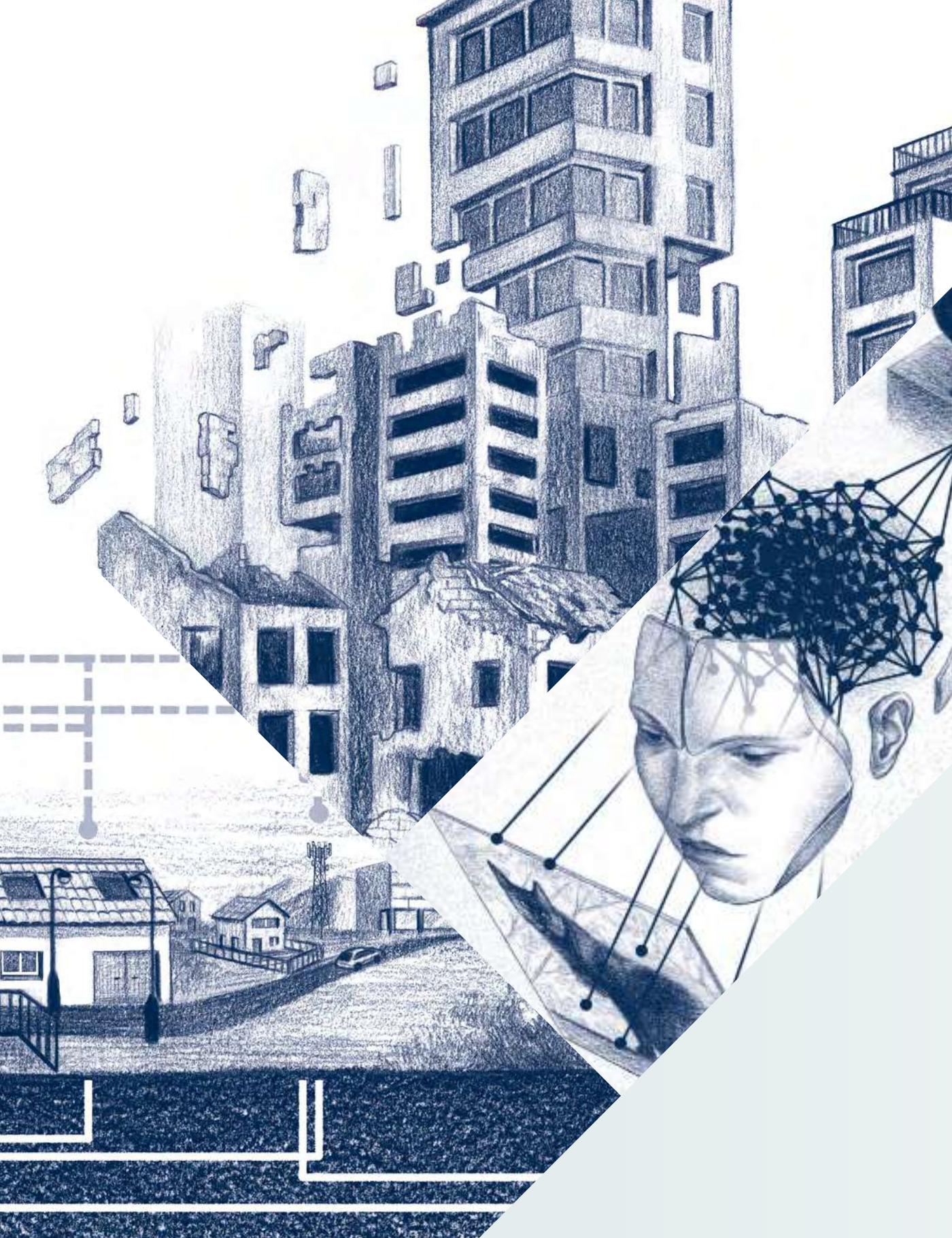
# ÉDITO

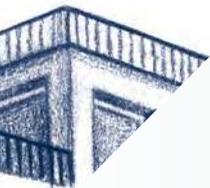
---

2021 aura été marquée par de nombreuses questions posées à l'avenir des technologies numériques. Où vont-elles ? Pour qui ? Pour quoi ? De ces interrogations à la fois futures et abstraites, le métaverse et le pass sanitaire en sont des incarnations récentes bien réelles. Derrière ces illustrations se joue l'orientation de briques technologiques colossales : la simulation du réel, la cybersécurité des biens et des personnes, l'explicabilité des algorithmes... Autant de sujets qui transparaissent dans cette sélection des meilleurs articles parus sur l'MTech en 2021.

Comme chaque année, le média d'actualité scientifique et technologique de l'IMT publie une sélection de ses publications représentant les grandes tendances de l'année. En plus de mettre en exergue les problématiques précédemment citées au travers d'exemples comme la sécurité des drones autonomes, ou la modélisation des réseaux énergétiques, ce « best of » illustre également les récents travaux de recherche en économie circulaire, valorisation des déchets industriels, et diminution de l'empreinte des matériaux. Des sujets portant sur les grandes transitions de notre temps qui méritent une place dans un débat public déjà tourné vers les élections présidentielles de 2022.

**- La rédaction d'IMTech.**



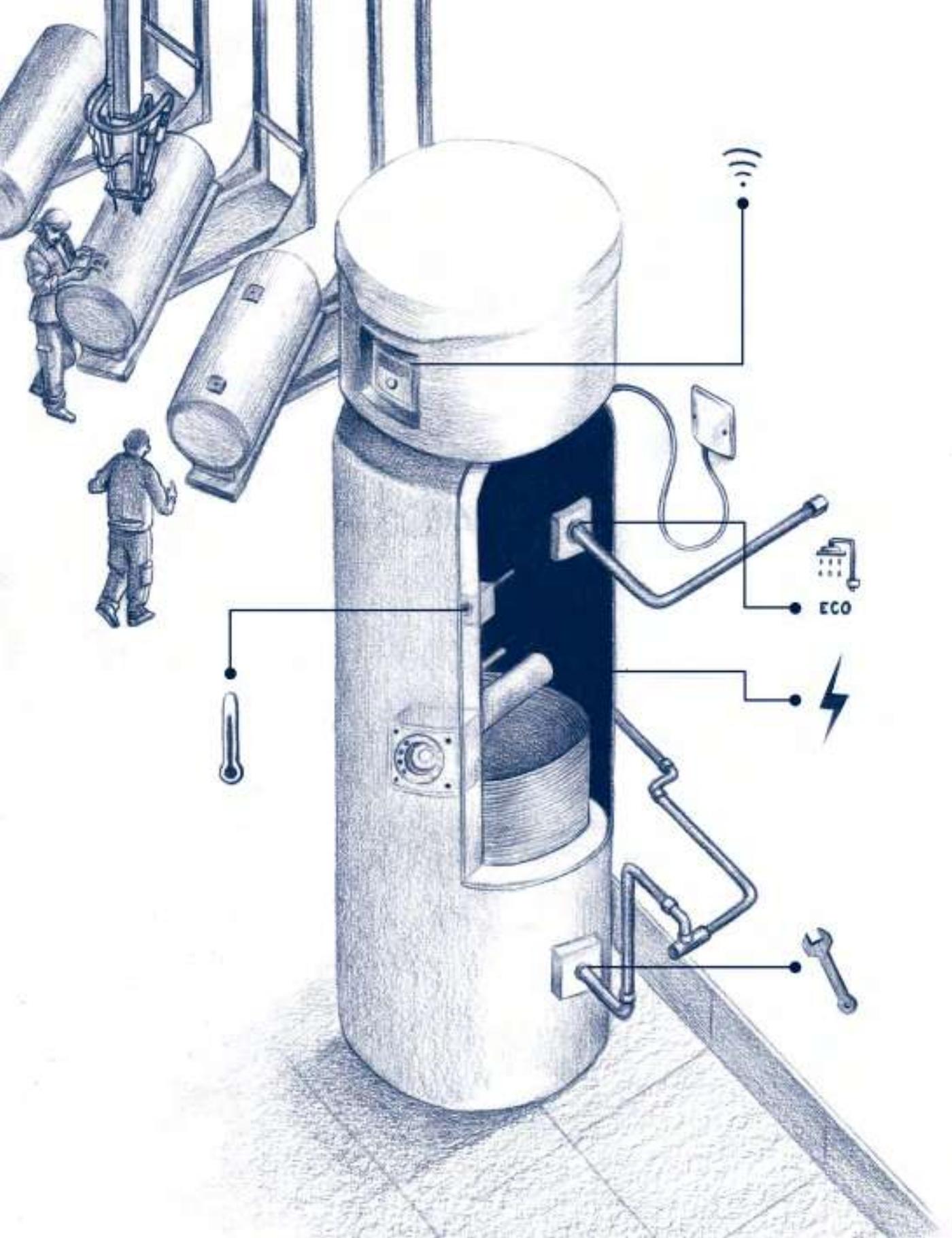


---

# SOMMAIRE

---

ÉDITO	3
CHAIRE CORENSTOCK BALLON D'ESSAI DE L'INDUSTRIE DU CHAUFFAGE	7
SIMULATION NUMÉRIQUE DES APPLICATIONS, DE LA MÉDECINE À L'ÉNERGIE	12
LA TECHNOLOGIE PEUT-ELLE RÉPONDRE AU STRESS CHRONIQUE ?	16
HACK EN PLEIN VOL COMMENT DÉTECTER LES ATTAQUES SUR LES DRONES ?	21
SONATA UNE APPROCHE POUR MIEUX FAIRE SONNER LES DATAS	26
ÉCLAIRER LA BOITE NOIRE DES ALGORITHMES	33
LA VIRTUALISATION DES RÉSEAUX OPTIQUES AU SERVICE... DE LA 5G	38
ÉCONOMIE: CIRCULEZ, IL Y A TOUT À VOIR !	44
UNE OASIS DE DÉCHETS RECONVERTIE EN MATÉRIAUX CÉRAMIQUES	52
QUE SAIT-ON DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES BIOCOMPOSITES ?	58
ET AUSSI DES PODCASTS !	64



---

# CHAIRE CORENSTOCK

---

## BALLON D'ESSAI DE L'INDUSTRIE DU CHAUFFAGE

---

L'IMT et elm.leblanc lancent en ce début 2021 la chaire industrielle Corenstock pour répondre aux problématiques des transitions énergétique et numérique de l'industrie du chauffage. Son objectif ? Présenter en 4 ans un démonstrateur pour le ballon d'eau chaude du futur : plus résistant, efficient et durable. Derrière ce prototype se joue le développement de nouveaux modèles économiques industriels s'inscrivant dans une transformation globale d'un secteur industriel.

**P**rendre un objet commun du quotidien, l'optimiser et s'en servir de base de réflexion pour transformer toute une industrie : voilà le cœur du projet de la chaire Corenstock (Conception orientée cycle de vie & approche systémique pour l'efficacité énergétique du stockage de systèmes de chauffage) lancée en ce début 2021. L'objectif annoncé est de présenter en 4 ans un démonstrateur pour un ballon d'eau chaude intelligent, plus performant d'un point de vue énergétique, plus durable et plus responsable. Mais le projet ne se limite pas à la mise en place concrète d'un nouveau ballon d'eau chaude sanitaire : il représente un chantier conséquent pour l'industrie du chauffage dans son ensemble. En effet, l'intérêt sous-jacent est de redéfinir les méthodes de conception de cette industrie et de généraliser une production durable et une valorisation en fin d'usage, s'inscrivant dans de nouveaux *business models*.

La chaire, co-financée à parts égales par l'ANR et elm.leblanc, entreprise spécialisée dans la construction de chauffe-eaux et chaudières, s'appuie sur les compétences complémentaires de chaque partenaire. « *Nous avons deux voies essentielles : d'une part l'innovation technologique, donc des questions sur la conception, les matériaux utilisés, le pilotage intelligent...* », déclare Mylène Lagardère, chercheuse à IMT Lille Douai. Elle est titulaire de la chaire Corenstock dont Xavier Boucher, chercheur à Mines Saint-Étienne, est le co-coordonateur. Il assure la direction opérationnelle, et complète, « *d'autre part nous travaillons sur les méthodes de conception, l'aide à la prise de décision, la transformation de l'entreprise et de l'ensemble de la chaîne*

*de production* ». Les deux chercheurs mentionnent qu'ils ont « *instauré un partenariat de confiance et de longue durée avec elm.leblanc, avec l'ambition de continuer de futurs projets en ce sens* ».

---

## « Le but est d'améliorer l'efficacité énergétique d'un produit que tout le monde a chez soi. »

---

### Quel ballon pour le futur ?

« *Le but est d'améliorer l'efficacité énergétique d'un produit que tout le monde a chez soi* », indique Mylène Lagardère. De plus, il s'agit d'un outil au cœur des différents systèmes thermiques ; que nous nous chauffions au gaz, au fuel ou à l'électricité, nous avons tous besoin de stockage. Cela engage un nombre conséquent de recherches pour trouver des voies d'amélioration au niveau des performances thermiques, ou de questionnement sur les matériaux pour rendre le ballon le plus efficace possible. De fait, la chaire s'accompagne de l'ouverture de 5 thèses, 4 post-docs et 3 ingénieurs.

La durabilité du produit est un des axes principaux d'amélioration. En ce sens, la maintenance prédictive est une piste prometteuse. L'utilisation de capteurs intelligents se retrouve essentielle, à la fois pour mieux évaluer les performances du ballon et pour prévenir des réparations nécessaires avant d'en arriver à la panne. Mylène Lagardère précise que l'objectif est d'avoir « *le meilleur compromis*

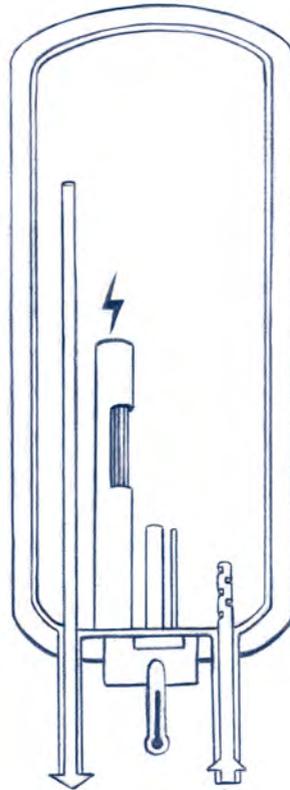
*entre chaque organe, chaque fonction du ballon, tout en prenant compte de son intégration dans l'environnement et les questions de gestion de fin d'usage ».*

Derrière le produit phare du projet se dégagent alors des réflexions plus globales sur l'ensemble du cycle de vie du produit. Elles concernent les ressources nécessaires à sa production, la durabilité du produit ou encore la gestion et la valorisation en fin d'usage. Ces pistes d'amélioration de la chaîne de production permettront ensuite de généraliser les résultats à l'ensemble de l'industrie. Elles ouvrent de nouvelles discussions sur les chaînes de valeur. « *Ce ballon est le point d'entrée d'un travail plus global sur le modèle économique lui-même* », insiste Xavier Boucher, et ces interrogations sont partie intégrante du programme de la chaire Corenstock.

---

**« Derrière le produit phare du projet se dégagent alors des réflexions plus globales sur l'ensemble du cycle de vie du produit. Elles concernent les ressources nécessaires à sa production, la durabilité du produit ou encore la gestion et la valorisation en fin d'usage. »**

---



#### Évolution de l'industrie

Xavier Boucher souligne que « *ces ballons sont au centre d'un système variable, et une transformation de ce secteur implique les acteurs, les clients mais aussi la maintenance par exemple* ». La relation client s'en trouvera naturellement modifiée. Les deux chercheurs mentionnent que « *cela s'inscrit dans une phase de transition assez forte des métiers de l'industrie. Il ne s'agit plus seulement de vendre un ballon d'eau chaude, mais d'inscrire le ballon dans un contrat de performance* ».

Du point de vue des entreprises, le besoin est désormais de fidéliser et pérenniser

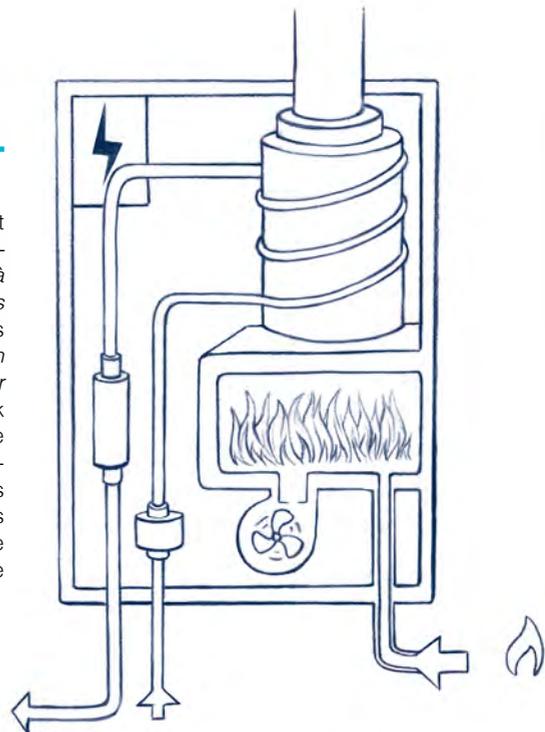
les clients. « *Ces différents leviers sont nécessaires à la mise en place d'une relation gagnant-gagnant entre le client et le fabricant* », précise Xavier Boucher. Le pilotage intelligent offre des possibilités d'amélioration du coût énergétique, de réduction du coût de maintenance, et dans la finalité de réduction du montant de la facture. Cela se retrouve aussi en interne pour réduire le coût des fabricants et des acteurs en charge de la maintenance.

**« Le pilotage intelligent offre des possibilités d'amélioration du coût énergétique, de réduction du coût de maintenance, et dans la finalité de réduction du montant de la facture. »**

Mylène Lagardère rapporte qu'ils visent « à éclairer les décideurs sur cette transformation économique, notamment à travers la recherche d'indicateurs plus durables ». Son collègue stéphanois ajoute à son tour que « la virtualisation se révèle un outil clé pour scénariser cette transition ». La chaire Corenstock endosse le rôle de simulateur de cette transformation en observant le comportement des usagers et des différents partenaires. Le projet regroupe plusieurs directions d'évolution, que ce soit vers le numérique, vers le networking ou encore

ce qu'on appelle la servicisation numérique. Il s'agit là d'une stratégie convergente vers une relation client sur le long terme grâce aux services numériques. « *L'enjeu se cristallise sur l'évolution des mécanismes de création de valeur* », synthétise Mylène Lagardère.

La chaire est également poussée par la transmission des avancées et des connaissances acquises. À la fois vers les étudiants, futurs ingénieurs du domaine, mais également à travers des formations professionnelles pour les acteurs représentés par elm.leblanc. Xavier Boucher note « *qu'il y a deux aspects de la formation : des modules courts pour monter en compétence, et un master spécialisé pour intégrer les solutions dans le cadre industriel* ». Un des objectifs du master spécialisé est de s'appuyer sur les compétences de chaque école pour faire interagir les différents domaines.

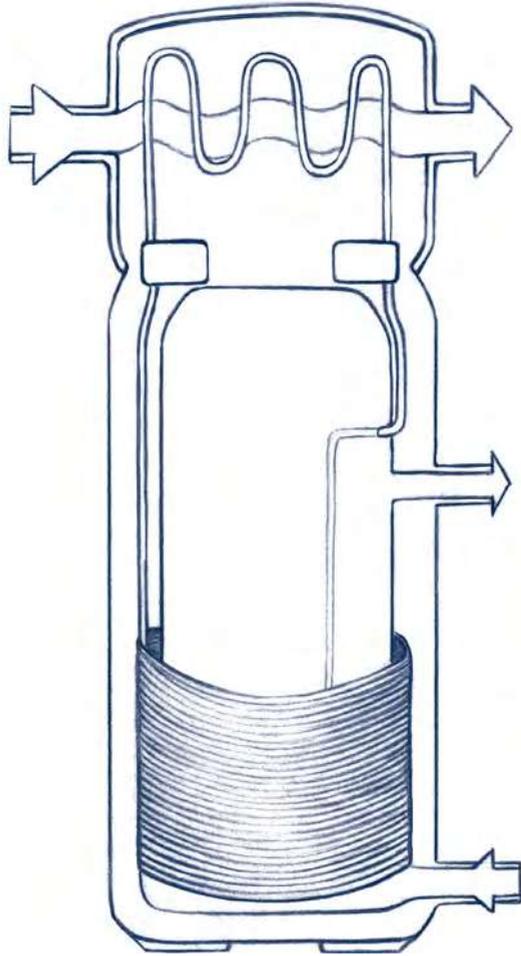


---

**« La chaire marque ce que elm.leblanc construit avec l'IMT : une nouvelle manière d'aborder ces processus d'innovation, à travers une collaboration forte et une relation de confiance pour décupler la capacité d'innovation. »**

---

*« Dans l'ensemble cela s'inscrit dans une réflexion de ce qu'est l'industrie du futur, qui ne saurait se réduire à la question technologique », insiste Xavier Boucher. Il s'agit notamment de faciliter la collaboration et l'ouverture entre des acteurs de différents secteurs industriel, technologique, économique. Cette collaboration est indispensable pour inscrire durablement ces transformations dans l'industrie. « La chaire marque ce que elm.leblanc construit avec l'IMT : une nouvelle manière d'aborder ces processus d'innovation, à travers une collaboration forte et une relation de confiance pour décupler la capacité d'innovation », conclut Xavier Boucher. ▲*



---

# SIMULATION NUMÉRIQUE

---

## DES APPLICATIONS, DE LA MÉDECINE À L'ÉNERGIE

---

À Mines Saint-Étienne, Yann Gavet utilise la simulation d'images afin d'étudier les caractéristiques d'un objet. Une méthode plus économe en temps et en coût qui permet de s'affranchir de mesures expérimentales. Ce domaine, à la frontière entre les mathématiques, l'informatique et l'algorithmique, sert à des applications variées allant du médical à l'étude des matériaux.

**Q**uel est le point commun entre une cornée humaine et une électrode de pile à combustible ? Yann Gavet, chercheur en mathématiques appliquées à Mines Saint-Étienne<sup>1</sup> est capable de modéliser ces deux objets sous forme d'images 2D ou 3D afin d'étudier leurs caractéristiques. Pour cela, il utilise une méthode basée sur des champs aléatoires. « Cette approche consiste à générer une image synthétique représentant une surface ou un volume aléatoire, c'est-à-dire dont les propriétés vont varier d'un point à l'autre dans le plan ou l'espace », explique le chercheur. Dans le cas d'une cornée, par exemple, cela correspond à visualiser un assemblage de cellules dont la densité diffère selon que l'on regarde le centre ou bien le bord. L'objectif du chercheur ? Créer des simulations aux propriétés les plus proches possible de la réalité.

### Modèles synthétiques et détection de cornée malade

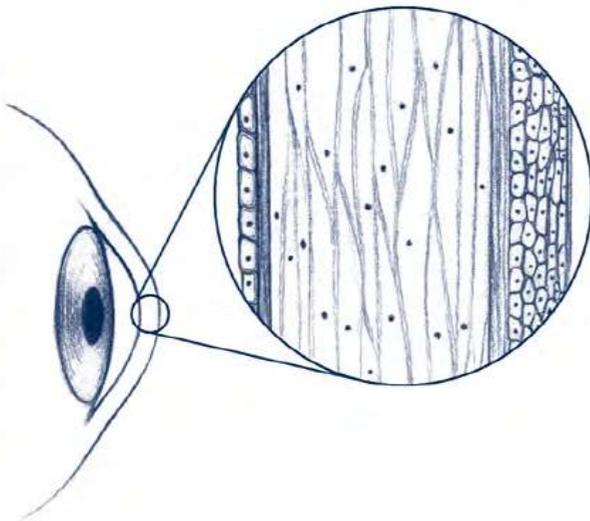
La densité de cellules qui composent notre cornée – la partie transparente à l'avant de l'œil – et son endothélium, renseigne sur son état de santé. Pour réaliser ces analyses, des algorithmes de détection et de comptage automatique de cellules sont développés à l'aide de réseaux de neurones profonds. Les entraîner demande ainsi l'accès à de grandes bases de données de cornées. Problème : celles-ci n'existent pas en quantité suffisante. « Toutefois, nous avons montré qu'il était possible de réaliser l'apprentissage sur des images synthétiques, donc simulées par des modèles », précise Yann Gavet.

---

**« À l'aide du *deep learning*, le chercheur crée des simulations graphiques à partir de critères clés : la taille, la forme, la densité cellulaire ou encore le nombre de cellules voisines. »**

---

Comment ça marche ? À l'aide du *deep learning*, le chercheur crée des simulations graphiques à partir de critères clés : la taille, la forme, la densité cellulaire ou encore le nombre de cellules voisines. Il est capable de simuler des agencements de cellules, ainsi que des images complètes de cornées proches de la réalité. Cependant, il souhaite combiner

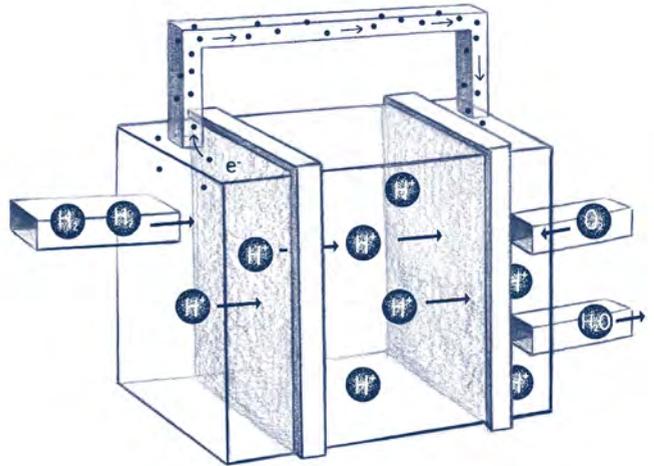


les deux. En effet, cette étape est essentielle pour la création de bases d'images qui permettront d'entraîner les algorithmes. Il focalise notamment ses efforts sur le réalisme des résultats de simulations en matière de géométrie cellulaire, de niveaux de gris ou encore de la variabilité « naturelle » des observations.

Bien qu'il ait démontré que l'apprentissage sur des données synthétiques de cornée n'exigeait pas des représentations parfaitement réalistes pour être performant, gagner en précision servira à d'autres applications. « *En effet, nous transposons cette méthode à la simulation d'agencements de matériaux composant les électrodes de piles à combustible, ce qui nécessite davantage de précision* », explique le chercheur.

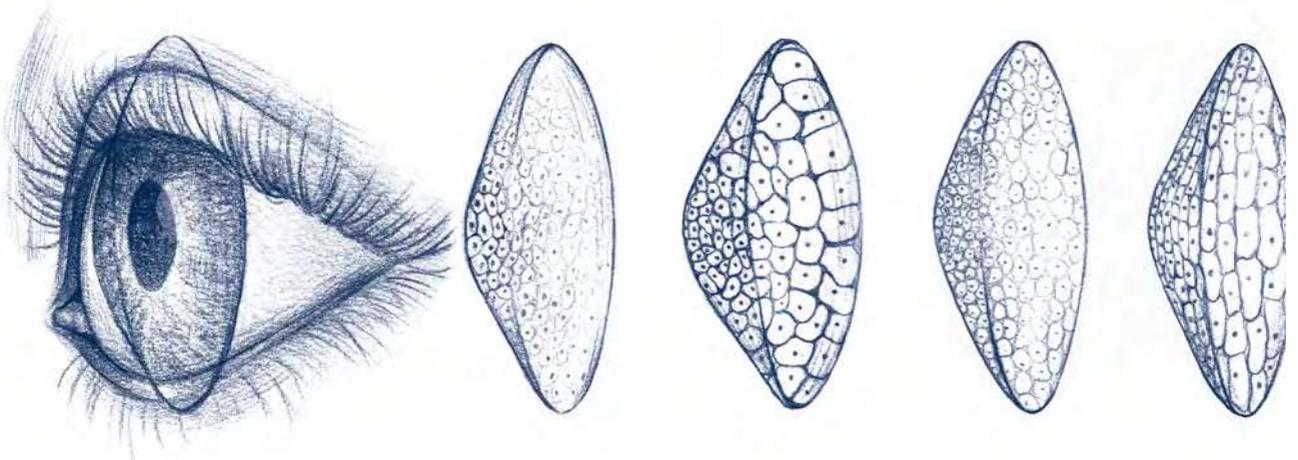
### Simuler l'impact de microstructures sur la performance d'une pile à combustible

La microstructure des électrodes d'une pile à combustible impacte les performances et la durabilité des cellules à oxyde solide. Afin d'améliorer ces paramètres, les chercheurs veulent identifier l'agencement idéal des matériaux composant les électrodes. C'est-à-dire comment ils doivent être répartis et organisés. Pour cela, ils jouent sur la géométrie « de



base » d'une électrode : sa porosité et sa distribution de la taille des particules de matière. Il cible ainsi les paramètres morphologiques sur lesquels interviennent les fabricants lors de la conception des électrodes.

Pour identifier les structures les plus performantes, une première méthode consisterait donc à fabriquer et tester une multitude de configurations. Une pratique qui coûte cher et prend du temps. L'autre approche repose sur la simulation et l'optimisation d'un grand nombre de configurations. Par la suite, un deuxième groupe de modèles simulant la physique d'une pile permet à son tour de désigner quelles structures impactent au mieux la performance de la pile.



---

**« L'avantage des simulations est de cibler des zones particulières au sein des électrodes afin de mieux comprendre leur fonctionnement et leur impact global sur la pile. »**

---

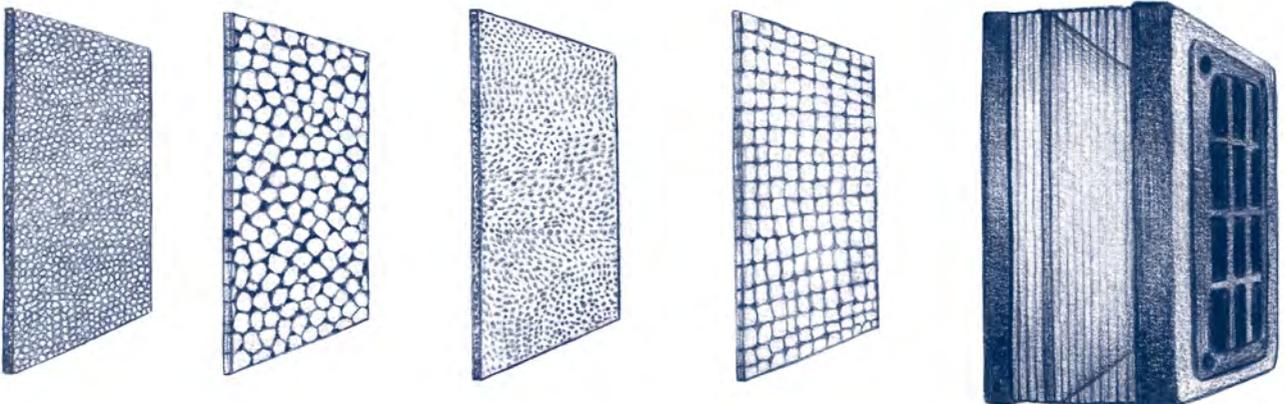
L'avantage des simulations est de cibler des zones particulières au sein des électrodes afin de mieux comprendre leur fonctionnement et leur impact global sur la pile. Par exemple : les zones d'échange telles que des points dits « de phase triple » où les phases ioniques, électroniques et gazeuses se rencontrent, ou encore les échanges effectués entre les surfaces de matériaux. « *Notre modèle permet notamment d'évaluer la meilleure configuration, mais aussi d'identifier le procédé de fabrication associé qui offre le meilleur rendement énergétique à la pile* », décrit Yann Gavet.

À moyen terme, le chercheur souhaite poursuivre ses travaux sur un modèle dont les dimensions sont similaires aux

observations menées en tomographie X. Un défi algorithmique en perspective qui demandera davantage de temps de calcul, mais aboutira également à des résultats toujours plus proches de la réalité de terrain. ▲

---

1. Yann Gavet est chercheur au laboratoire Georges Friedel, UMR CNRS/Mines Saint-Étienne.



---

# LA TECHNOLOGIE PEUT-ELLE RÉPONDRE AU STRESS CHRONIQUE ?

---

Les facteurs de stress chez les individus peuvent survenir régulièrement, en particulier dans des contextes incertains comme la situation sanitaire actuelle. Afin d'éviter que l'état de stress ne devienne chronique et conduise à des problèmes de santé mentale, des approches impliquant des technologies positives permettraient aux individus de développer leur résilience. Anuragini Shirish, chercheuse à Institut Mines-Télécom Business School, détaille ses travaux menés sur le sujet.

**P**ourquoi est-il important de réduire le stress chez les individus de manière générale ?

**Anuragini Shirish :** Selon les dernières estimations datant de 2017, 792 millions de personnes dans le monde sont diagnostiquées comme ayant des problèmes de santé mentale, dont 284 et 264 millions qui souffriraient respectivement d'anxiété et de dépression. Or, l'état physiologique de stress chronique est un facteur de risque important pour le développement de ces maladies. Éviter — ou du moins limiter — cet état de stress chronique chez les individus pourrait donc nettement réduire le risque de développer ces maladies, et améliorer leurs conditions de vie de manière générale.



**Comment s'installe l'état de stress chronique chez les individus ?**

---

**« Selon les dernières estimations datant de 2017, 792 millions de personnes dans le monde sont diagnostiquées comme ayant des problèmes de santé mentale, dont 284 et 264 millions qui souffriraient respectivement d'anxiété et de dépression. »**

---

**AS :** La manière de comprendre les mécanismes qui induisent du stress a beaucoup évolué. Auparavant, il était considéré que le stress provenait de l'exposition répétée à des facteurs stressants. Mais à présent, notamment au regard des théories en neurobiologie de l'évolution, il est plutôt admis que le stress est une réponse par défaut afin de faire face aux situations de danger, et que cela est inhibé par le cortex préfrontal lorsque les individus perçoivent un sentiment de sécurité. La théorie récente "*Generalized Uncertainty Theory of Stress*" [théorie de l'incertitude généralisée au stress] stipule que le stress provient plutôt d'un sentiment d'insécurité permanente chez les individus.



### Comment la pandémie de Covid-19 a-t-elle influencé les situations individuelles et collectives de stress chronique ?

**AS:** La pandémie de Covid-19 a provoqué un sentiment d'insécurité générale sur beaucoup d'aspects, comme par exemple la santé personnelle et celle des proches, la stabilité financière, la sécurité de l'emploi. Beaucoup d'individus ont été affectés par des situations de stress chronique qui ont provoqué une hausse importante des maladies mentales. Les incertitudes et le stress poussent les individus à chercher des réponses. Seulement, les informations sont parfois inadéquates, voire dangereuses à des échelles individuelles et collectives. Il s'agit donc de réfléchir au moyen de guider ces réponses, d'autant plus dans le contexte de la pandémie.

---

**« La technologie dite positive a pour objectif d'améliorer les conditions de vie individuelles et collectives. Dans ce cas, cette technologie peut être conçue pour améliorer l'état mental des personnes. »**

---

### Vous suggérez d'utiliser la technologie pour réduire le stress de manière globale ?

**AS:** La technologie dite positive a pour objectif d'améliorer les conditions de vie individuelles et collectives. Dans ce cas, cette technologie peut être conçue pour

améliorer l'état mental des personnes. Il y a plusieurs types de technologies positives, et beaucoup consistent aujourd'hui en des applications mobiles, ce qui permet de les rendre accessibles à une grande partie de la population.

### Concrètement, quels outils technologiques permettraient de réduire le stress ?

**AS:** C'est précisément l'objet de la réflexion que nous cherchons à porter. Nous avons défini trois types de comportements face au stress. Selon les individus et le contexte, certains comportements peuvent être favorisés.

Le comportement dit hédonique cherche à réduire le stress par une distraction immédiate. Il s'agit de se faire plaisir momentanément. Les technologies positives hédoniques permettent de répondre au stress de manière très rapide. C'est le cas par exemple des jeux vidéo ou des séries télévisées. Mais les effets de diminution de stress sont en général assez limités dans le temps: ces approches ont un effet momentané et n'apprennent généralement que très peu aux individus à limiter le stress futur.

Le comportement dit social permet de réduire le stress via des interactions sociales. Les effets ont une durée plus importante que les comportements hédoniques car les personnes peuvent partager leurs émotions, s'aider et se conseiller sur des objectifs communs. Cependant les effets restent transitoires. Durant les confinements, les réunions d'amis ou de famille en visioconférence sont des exemples de la façon dont la technologie positive sociale a permis de répondre au stress individuel et collectif.

Le comportement dit eudémoniste est lié à la recherche de sens et de but. Il se base sur un principe de croissance personnelle et d'évolution. C'est le comportement qui permet de mieux répondre au stress dans le temps. Celui-ci est aussi le plus difficile à atteindre, car il se base sur un investissement plus conséquent de temps et d'énergie. C'est ce vers quoi nous aimerions que la technologie positive tende de plus en plus. En facilitant l'accès à des comportements eudémonistes, il serait possible de mieux lutter contre le stress et les problèmes de santé mentale à l'échelle de la société.

**« Beaucoup d'applications actuelles concernent par exemple des accompagnements à la méditation, dont les bénéfices sur la santé mentale ne sont plus à démontrer. »**

#### Comment fonctionne une technologie positive eudémoniste ?

**AS :** Les technologies positives eudémonistes peuvent avoir différentes approches. Beaucoup d'applications actuelles concernent par exemple des accompagnements à la méditation, dont les bénéfices sur la santé mentale ne sont plus à démontrer. Les applications liées à un processus d'apprentissage avec de la réalisation personnelle peuvent être considérées comme des technologies eudémonistes. Nous pouvons aussi développer des technologies avec des utilisations



hédoniques ou sociales en premier lieu afin de faciliter leur accès, et qui puissent mener dans un second temps à des utilisations eudémonistes. L'application récente Heartintune est un exemple de ce type d'approche.

#### Quelles sont les perspectives du développement de technologies positives à l'échelle de la société ?

**AS :** Les technologies positives de différents types existent déjà, mais il s'agirait de promouvoir leur développement et leur utilisation à grande échelle dans des optiques de résilience. Nous pensons donc que la stratégie adéquate serait de favoriser davantage les comportements eudémonistes à travers les technologies.

Ce sujet serait notamment important à souligner durant le sommet mondial de la santé qui a lieu fin octobre 2021 à Berlin, dont un des aspects concerne la manière de comprendre comment les innovations et les technologies peuvent résoudre des problèmes de santé. ▲

---

# HACK EN PLEIN VOL

---

## COMMENT DÉTECTER LES ATTAQUES SUR LES DRONES ?

---

Différentes attaques peuvent être réalisées sur un drone autonome en vol. À Télécom SudParis, Alexandre Vervisch-Picois travaille sur une méthode pour détecter les attaques consistant à leurrer le drone sur sa position. Une recherche qui pourrait aussi bien concerner le secteur militaire que les applications civiles.

**U**n matin, il est parti pour une livraison mais n'est jamais arrivé jusque chez vous. Pas de panique, il n'est pas question de la disparition de votre facteur, mais de drones autonomes. Ces petits véhicules volants capables de suivre une trajectoire sans pilote sont aujourd'hui en tête de la course à la livraison la plus rapide que se mènent les entreprises.

Bien que techniquement possibles, les livraisons par drones relèvent encore de la science-fiction en France. Cela s'explique par des raisons juridiques, mais aussi par certaines vulnérabilités de ces systèmes. À Télécom SudParis, l'équipe d'Alexandre Vervisch-Picois, chercheur spécialiste des systèmes de localisation par satellite (GNSS), travaille avec Thales sur la détection d'attaques dites de « leurrage ». Afin de prévenir ces dernières, les chercheurs étudient comment elles fonctionnent en vue d'établir des protocoles permettant de les détecter.

#### Comment leurrer un drone ?

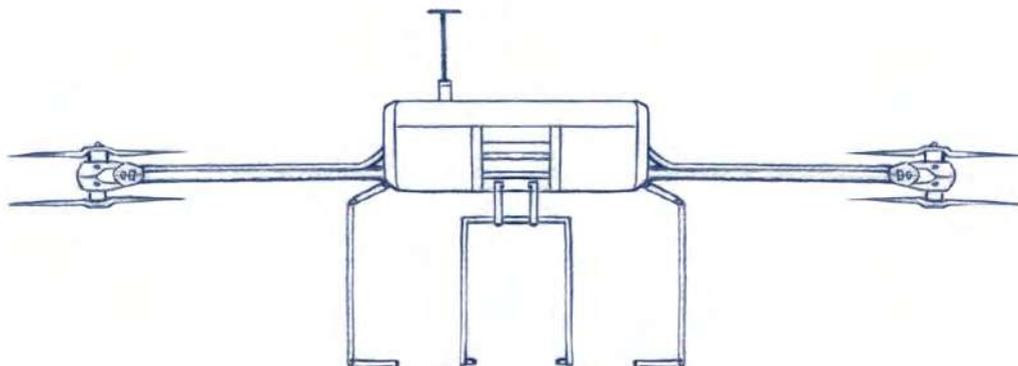
Pour se déplacer de façon autonome, le drone a besoin de connaître sa position et la direction dans laquelle il se déplace. Il reçoit donc en permanence

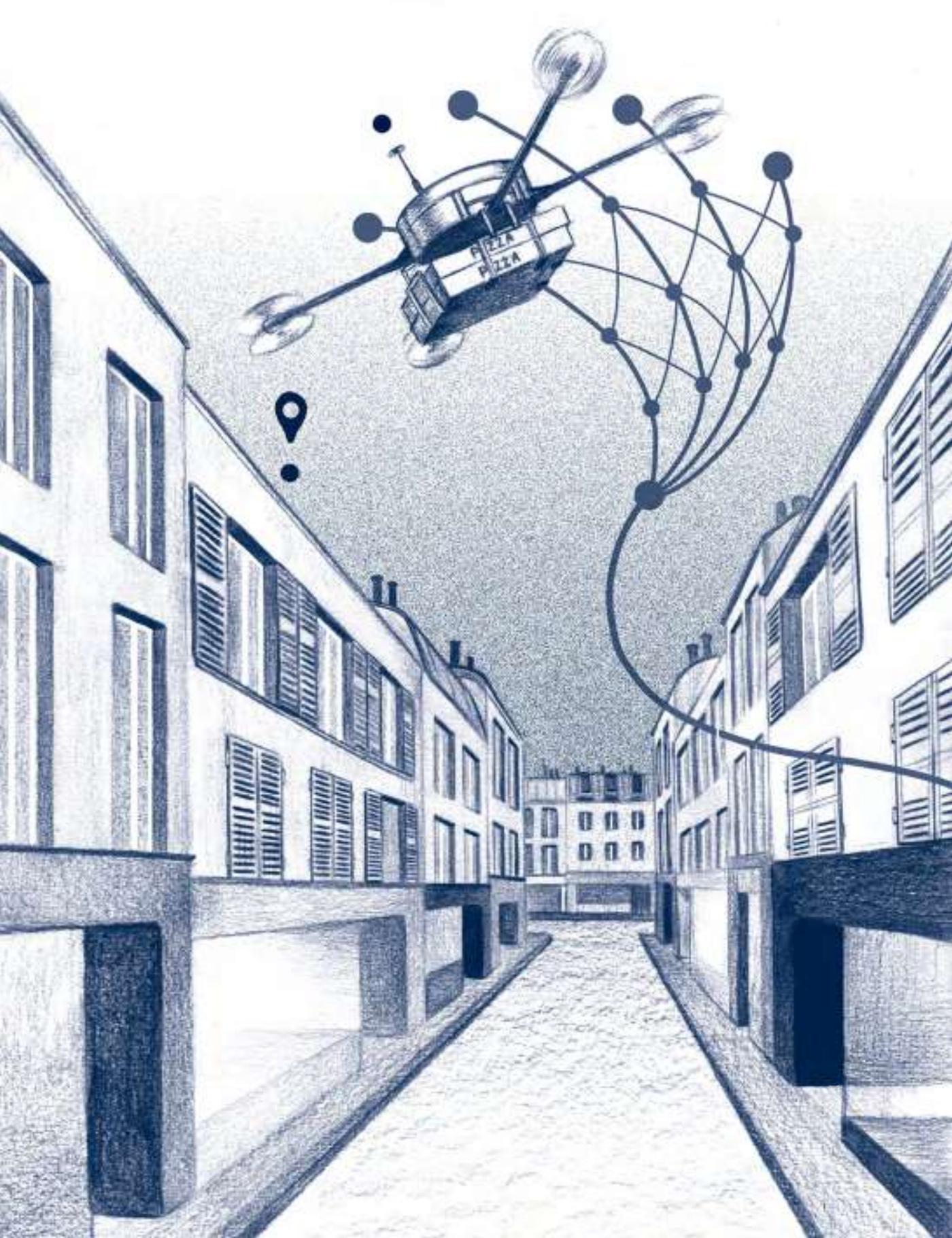
les signaux issus d'une constellation de satellites qui lui permettent de calculer les coordonnées de sa position. Celles-ci lui permettent ensuite de suivre une trajectoire prédéfinie en passant par une succession de points de cheminement jusqu'à ce qu'il atteigne sa destination. Toutefois, sa forte dépendance à la géolocalisation par satellites pour se repérer le rend vulnérable à des cyber-attaques. « Si l'on parvient à lui faire croire qu'il est ailleurs que sa position réelle, alors on peut indirectement contrôler sa trajectoire », explique Alexandre Vervisch-Picois. Une faille d'autant plus importante sachant que les récepteurs GPS de ces drones sont facilement dupés par de faux signaux émis à la même fréquence que ceux des satellites.

---

**« Les récepteurs GPS de ces drones sont facilement dupés par de faux signaux émis à la même fréquence que ceux des satellites. »**

---





C'est ce que les chercheurs appellent une attaque de leurre. Ce type de cyber-attaque n'est pas nouveau. Il aurait notamment permis à l'armée iranienne de capturer un drone furtif américain survolant sa frontière en 2011. Il consiste à reconstruire un faux signal radiofréquence suffisamment puissant qui vient prendre la place du signal satellite capté par le drone. Le leurre n'annule pas les capacités de géolocalisation de l'appareil volant comme le ferait un brouilleur. À la place, il force le récepteur GPS du drone à réaliser un calcul de position erronée ce qui dévie sa trajectoire. « *Par exemple, si un attaquant parvient à identifier le prochain point de cheminement, alors il peut déterminer la fausse position à envoyer pour emmener le drone exactement où il veut et le capturer* », décrit le chercheur.

---

**« Si un attaquant parvient à identifier le prochain point de cheminement, alors il peut déterminer la fausse position à envoyer pour emmener le drone exactement où il veut et le capturer. »**

---

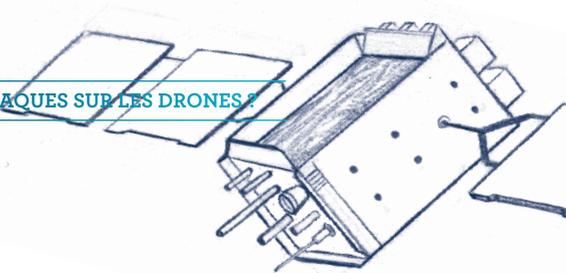
#### Remettre les pendules à l'heure

Plusieurs techniques permettent d'identifier ces attaques, mais elles demandent généralement des coûts supplémentaires à la fois matériels et énergétiques. Dans le cadre du projet DIGUE (Détection d'interférences GNSS pour UAV autonome) en collaboration avec Thales Six, l'équipe

d'Alexandre Vervisch-Picois a développé une méthode de détection de leurre. « *Notre approche exploite les récepteurs GPS déjà présents sur les drones ce qui en fait une solution bas coût* », décrit le chercheur. Il s'agit de la méthode dite du « biais d'horloge ». Le temps est un paramètre essentiel au calcul de position par satellites. Les satellites ont leur base de temps et le récepteur GPS du drone a la sienne. Ainsi, lorsque ce dernier calcule sa position, il mesure notamment la différence entre ces deux bases de temps, c'est le « biais ». Or, lorsqu'une attaque de leurre est menée, les chercheurs observent des variations dans ce calcul qui se présentent sous la forme d'un saut. Cette variation s'explique par le fait que le leurre a sa propre base de temps différente de celle des satellites. « *En pratique, il est impossible pour le leurre d'utiliser la même horloge qu'un satellite. Il ne peut que se rapprocher de sa base de temps, mais nous observons toujours un saut* », explique Alexandre Vervisch-Picois. Pour simplifier : les satellites et le leurre ne sont pas réglés sur la même heure.

Cette méthode a l'avantage de ne nécessiter aucun ajout de composants, ni l'allocation de puissance de calcul supplémentaire pour récupérer les données, puisqu'elles sont déjà présentes dans le drone. Elle s'affranchit également d'analyses coûteuses de traitement du signal pour étudier les informations reçues par le drone — une autre méthode de détection permettant de distinguer ce qui provient des satellites ou non.

Toutefois, l'attaquant ne pourra contourner ce problème en se synchronisant sur le temps de ces derniers. « *C'est encore rare mais possible avec un leurre très sophistiqué. Cela s'inscrit*



dans une réflexion classique de mesures et contre-mesures illustrée par la dialectique de l'épée et du bouclier. En réponse à une attaque, nous mettons en place des défenses et les menaces se sophistiquent afin de les contourner », remarque le chercheur. Une des raisons pour lesquelles les recherches sur le sujet ont encore beaucoup à offrir.

Suite au succès des résultats obtenus en laboratoire, les chercheurs envisagent désormais le développement d'un algorithme basé sur le contrôle du biais d'horloge. Celui-ci pourrait être implémenté sur un drone volant pour un test en conditions réelles.

#### Attaque détectée et après ?

Une fois l'attaque détectée, les chercheurs souhaitent localiser la source du faux signal afin de remonter à l'attaquant.

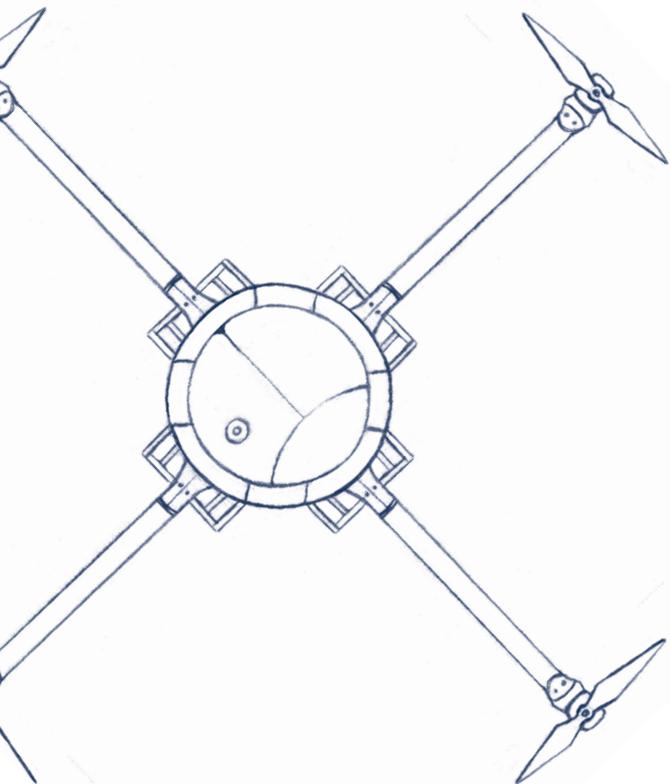
Pour cela, ils proposent une approche utilisant une flotte de drones communicants. L'idée serait alors de programmer des mouvements au sein de la flotte afin de déterminer l'angle d'arrivée du faux signal. Un des drones enverrait ensuite un message aux autorités concernées afin de neutraliser le leurre. Cette méthode

---

**« Une fois l'attaque détectée, les chercheurs souhaitent localiser la source du faux signal afin de remonter à l'attaquant. »**

---

encore à ses balbutiements devrait être approfondie avec Thales dans un contexte militaire et des problématiques de champ de bataille qui nécessiteraient l'élimination du leurre. Toutefois, dans la perspective de livraison de colis, quel serait alors le contre possible pour un drone solitaire ? « Nous pourrions envisager un protocole de montée en altitude afin de sortir du rayon d'action du leurre qui peut atteindre plusieurs kilomètres, mais il ne serait sûrement pas si simple d'échapper à son influence », imagine le chercheur. Une autre alternative pourrait être le recours à des méthodes de traitement du signal, mais ces solutions augmenteraient les coûts associés à l'appareil. « Si une trop grande quantité d'énergie du drone doit être dédiée à sa protection, alors il faut s'interroger sur l'utilité de ce mode de transport et peut-être envisager d'autres modes plus classiques et moins contraignants à mettre en place », tempère finalement Alexandre Vervisch-Picois. ▲



---

# SONATA

---

## UNE APPROCHE POUR MIEUX FAIRE SONNER LES DATAS

---

Pour être adaptées aux nécessités des technologies modernes, les télécommunications doivent acheminer les données de plus en plus rapidement. Seulement, ces dernières sont parfois lourdes et complexes à transporter. Les canaux de communication sont encombrés et des limites de transmission sont rapidement atteintes. Marios Kountouris, chercheur en télécommunications à EURECOM, a récemment obtenu un financement ERC pour le lancement de son projet SONATA. Il vise à changer le paradigme du traitement des informations afin d'accélérer leur transmission et améliorer l'efficacité des futurs réseaux.

« **N**ous sommes proches de la limite fondamentale de la

transmission des données, d'un point à un autre », introduit Marios Kountouris, chercheur en télécommunications à EURECOM. Dans cette discipline, la plupart des recherches actuelles portent sur la manière d'organiser les réseaux complexes, et l'amélioration des algorithmes qui optimisent ces réseaux. En revanche, peu de projets portent sur l'amélioration du transfert des données entre les transmetteurs et les récepteurs. C'est précisément sur ce sujet que porte le projet SONATA de Marios Kountouris, financé par une bourse européenne ERC *consolidator grant*.

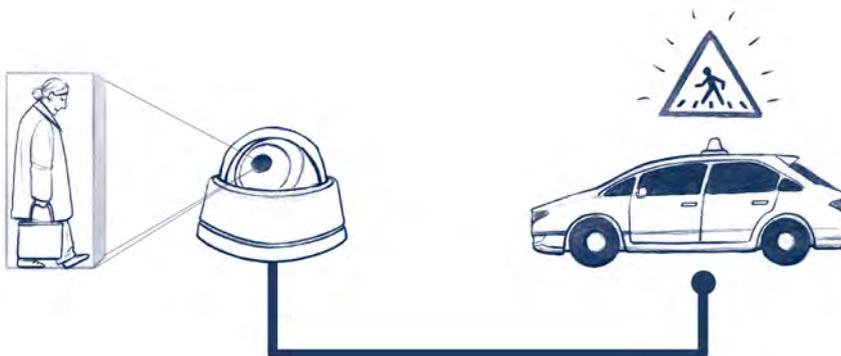
« Les télécommunications se basent généralement sur la théorie de l'information de Shannon, qui a été établie dans les années 1950 », indique le chercheur. Dans cette théorie, un transmetteur envoie simplement des informations dans un canal de transmission, qui les modélise et les transfère à un récepteur qui les reconstitue. Le principal obstacle à contourner concerne le bruit qui accompagne le signal lors de son passage par le canal de transmission. Cette contrainte

peut être levée avec du traitement du signal par algorithmes, et par l'augmentation du débit. « Cela se déroule globalement de la même manière, quel que soit le message transmis. A l'époque et jusqu'à récemment, c'était la bonne approche », précise le chercheur.

**« Certains messages nécessitent d'être transmis rapidement, sinon ils perdent leur intérêt. »**

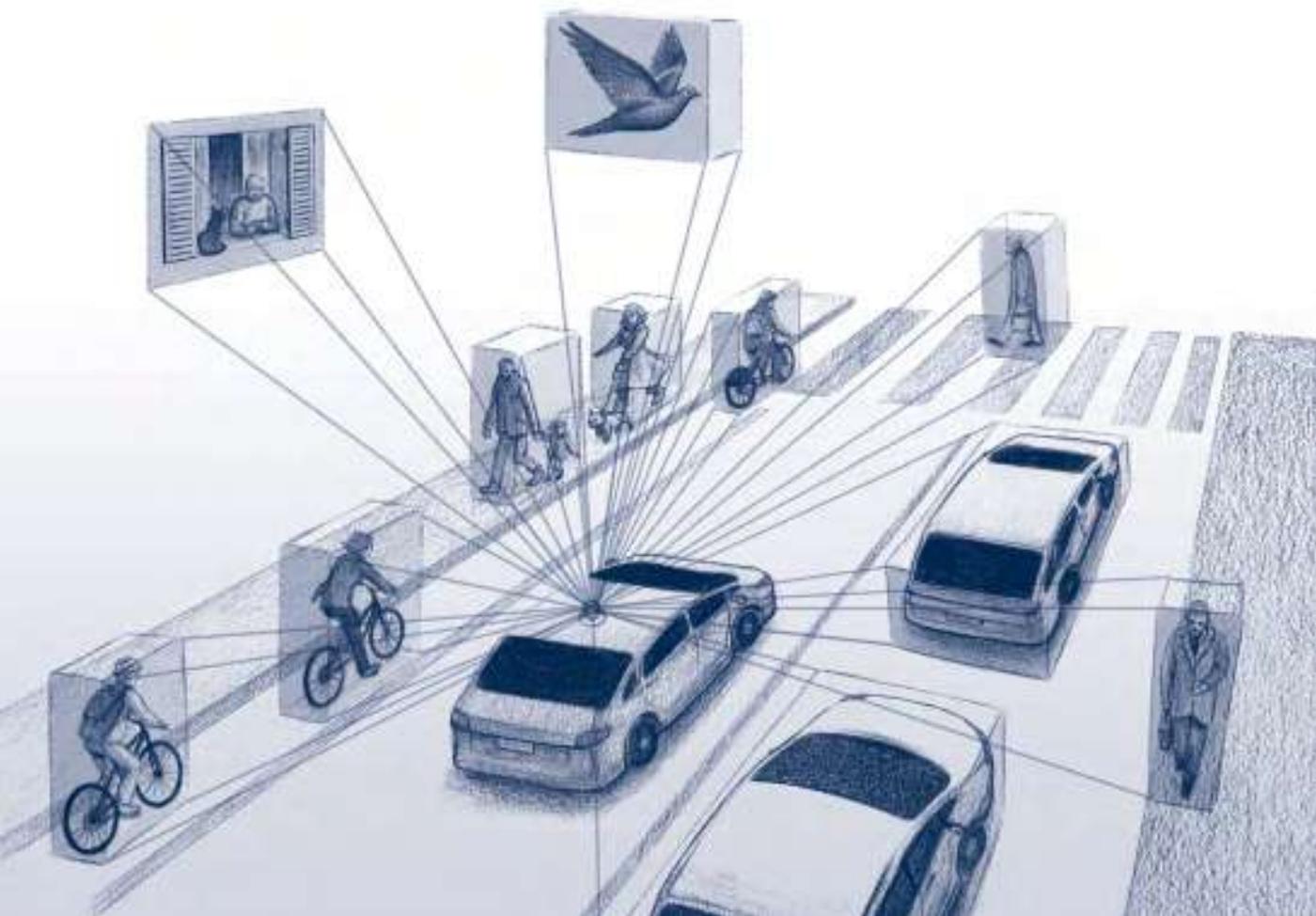
**La vitesse de transmission pour les communications en temps réel**

Aujourd'hui, il y a de plus en plus de communications entre des machines qui raisonnent à l'échelle de la milliseconde. « Certains messages nécessitent d'être transmis rapidement, sinon ils perdent leur intérêt », souligne Marios Kountouris. Par exemple, dans le développement des voitures autonomes : si le message collecté concerne la détection d'un piéton sur la chaussée afin de freiner la voiture, alors il n'est utile que pendant un temps très court. « C'est ce que nous appelons l'âge, ou la fraîcheur des informations, qui dans certains cas est un paramètre très important », explique Marios Kountouris.



**« La plupart  
des transmissions  
et des reconstructions  
sont ralenties par  
des informations en surplus  
qui accompagnent  
le message. »**

Or, la plupart des transmissions et des reconstructions sont ralenties par des informations en surplus qui accompagnent le message. Dans l'exemple précédent, si le système pour détecter le piéton est une caméra qui capte des images avec des détails sur tous les objets environnants, alors de nombreuses informations dans la transmission et dans le traitement ne serviront pas l'objectif. Pour le chercheur, « *il faut que l'échantillonnage, la transmission et la reconstruction du message cessent de s'ignorer.*



*Si des données en excès, redondantes ou inutiles accompagnent ce procédé, alors il peut y avoir des encombrements de communication et des problèmes de sécurité ».*

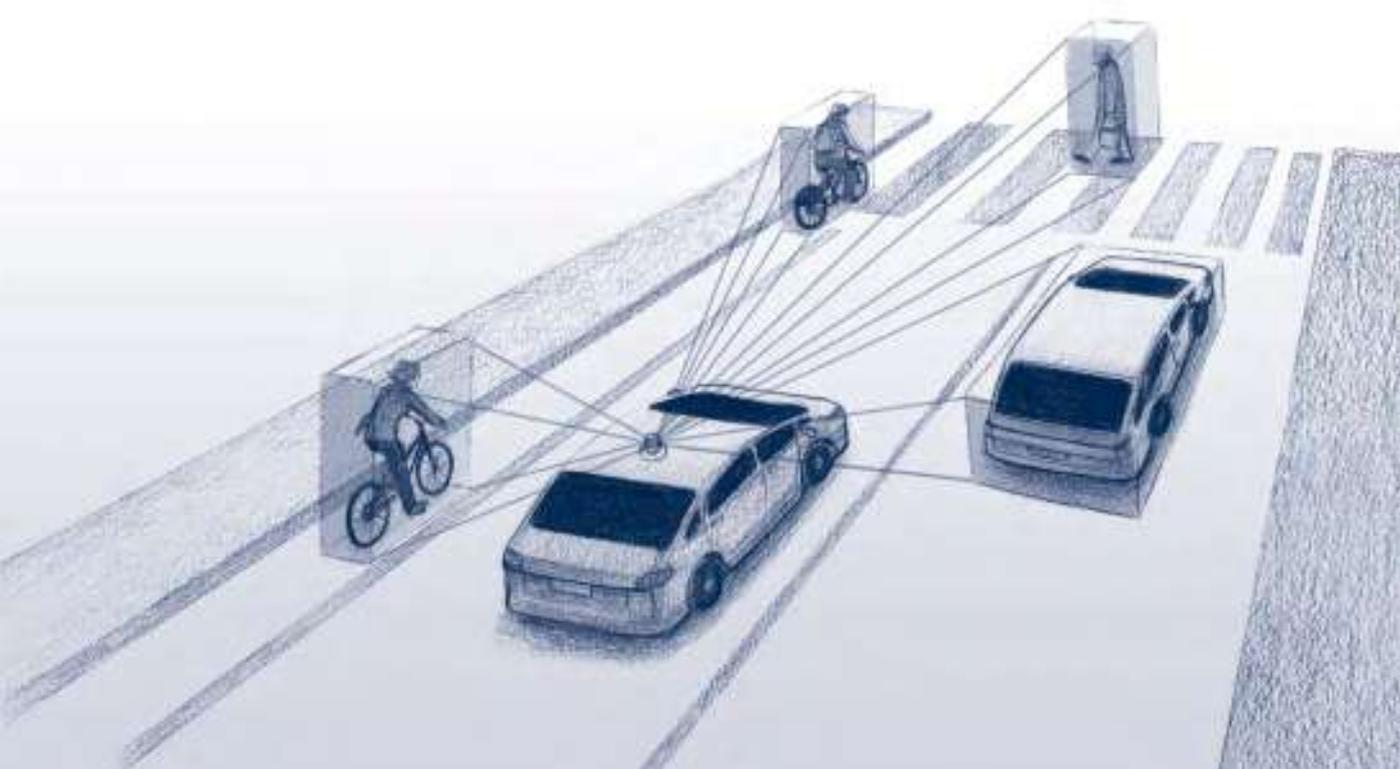
---

**« Si des données en excès, redondantes ou inutiles accompagnent ce procédé, alors il peut y avoir des encombrements de communication et des problèmes de sécurité »**

---

### La sémantique des messages

Pour les communications en temps réel, la sémantique du message — c'est-à-dire sa signification et sa pertinence — devient particulièrement importante. La sémantique permet de prendre en compte les attributs du message et d'adapter le format de sa transmission en fonction de son but. Par exemple, si un capteur de température doit permettre d'activer automatiquement le chauffage si la température ambiante est au-dessous de 18° C, alors l'attribut du message transmis est simplement une répartition binaire de la température : au-dessus ou au-dessous de 18°C.



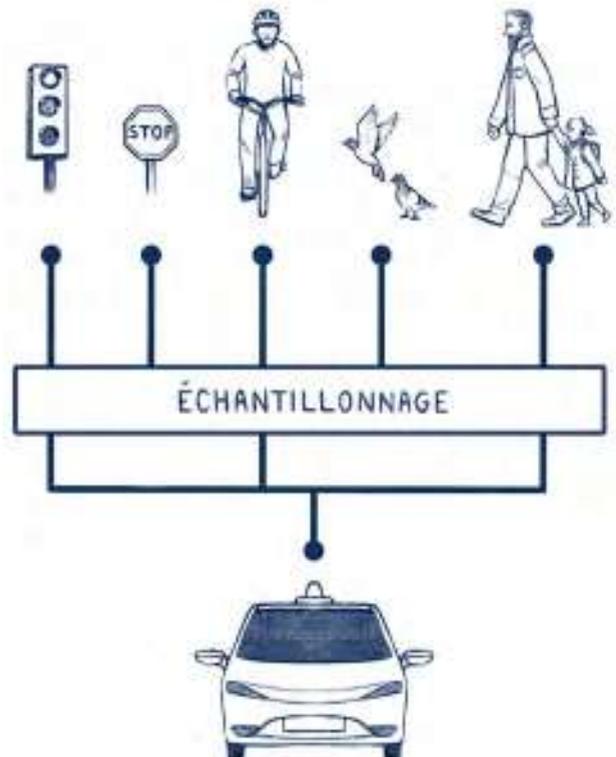
Au travers du projet SONATA, Marios Kountouris souhaite justement développer un nouveau paradigme de communication qui prenne en compte la valeur sémantique de l'information. Grâce à cela, il serait possible de synchroniser différents types d'informations captées au même moment par différents échantillonnages, et de prendre des décisions plus optimales. Cela permettrait également de réduire significativement le volume de données transportées, de réduire l'énergie et les ressources nécessaires qui y sont associées.

**« Établir la sémantique du message implique un prétraitement de l'échantillonnage par le transmetteur en fonction de l'utilisation qu'en fait le récepteur. »**

*« Le succès de ce projet dépend de l'établissement de métriques sémantiques qui sont concrètes, informatives et traçables »,* pointe le chercheur. En effet, établir la sémantique du message implique un prétraitement de l'échantillonnage par le transmetteur en fonction de l'utilisation qu'en fait le récepteur. Il s'agit donc de définir l'information la plus importante, significative ou utile pour déterminer les attributs qualificatifs du message. *« Différents attributs sémantiques peuvent être pris en compte pour avoir une représentation conforme de l'information, mais il faut*

*trancher à l'avance et faire attention à ne pas implémenter trop d'attributs à la fois »,* poursuit-il.

Il s'agit donc de constituer des réseaux de communication avec des étapes clés pour traiter la sémantique associée aux informations. Il faudrait premièrement utiliser des filtres sémantiques pour éviter les redondances inutiles lors de la collecte d'informations. Il s'agirait ensuite d'effectuer un prétraitement sémantique, grâce auquel il serait possible d'associer les données avec leurs objectifs. La reconstitution du



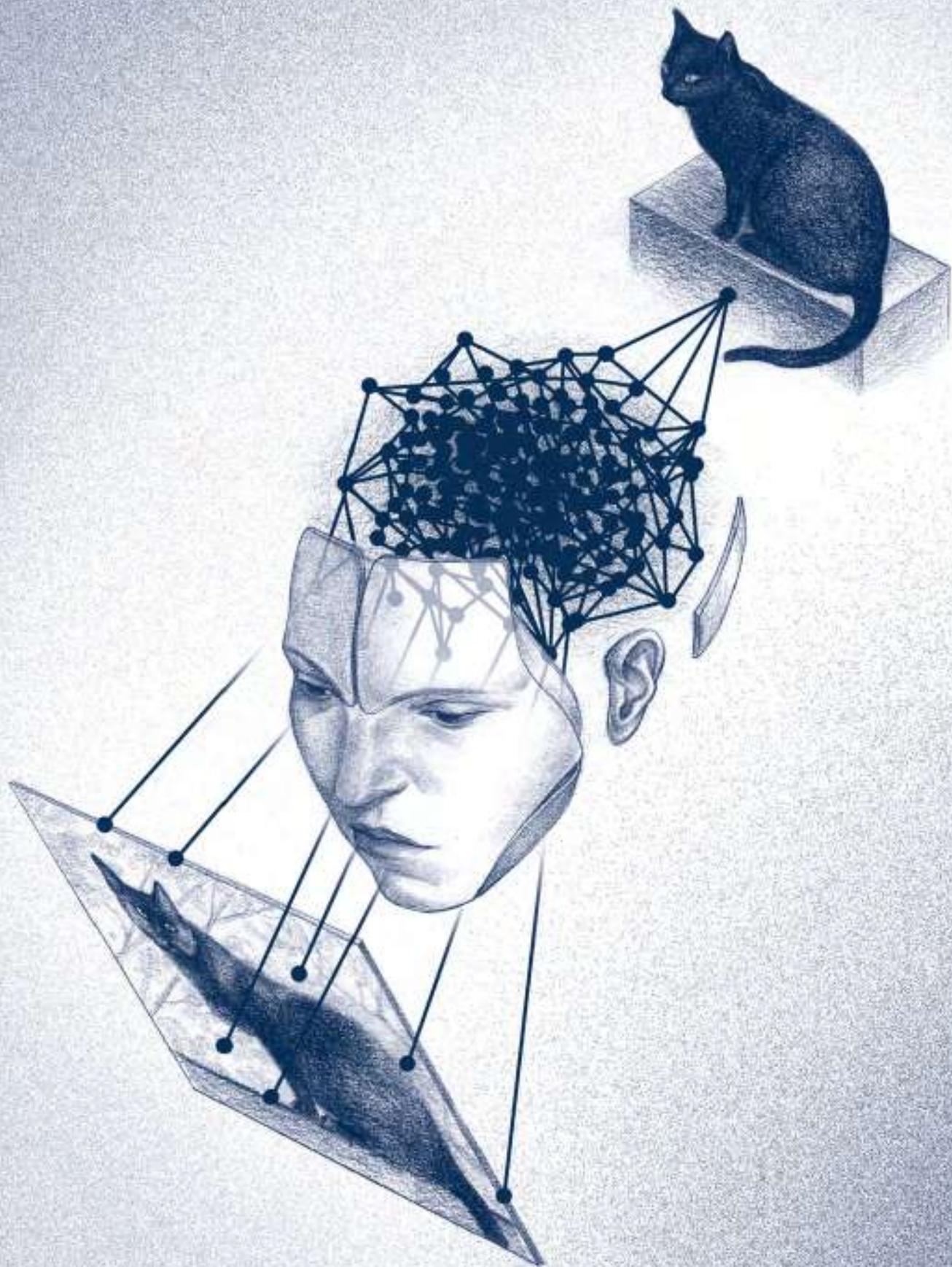
signal par le récepteur serait aussi adaptée aux objectifs. Tout cela serait sous un contrôle sémantique qui permettrait d'orchestrer de manière agile l'information récoltée et de la réutiliser de manière efficace, ce qui devient particulièrement important lorsque les réseaux se complexifient.

---

**« Cette approche structurellement nouvelle favoriserait la création des connexions entre la théorie de la communication, l'échantillonnage, et les prises de décision optimales. »**

---

Cette approche structurellement nouvelle favoriserait la création des connexions entre la théorie de la communication, l'échantillonnage, et les prises de décision optimales. Les ERC *consolidator grants* financent les projets de type *high risk, high reward*, qui visent à révolutionner un domaine et c'est pour cela que SONATA a reçu un financement de ce type. « *La sonate était la forme la plus élaborée de la musique classique et déterminante pour son évolution, j'espère que SONATA sera une nouvelle étape majeure dans l'optimisation des télécommunications* », conclut Marios Kountouris. ▲



---

# ÉCLAIRER LA BOÎTE NOIRE DES ALGORITHMES

---

Ces dernières décennies, les algorithmes sont devenus de plus en plus complexes, notamment par le déploiement des architectures de type *deep learning*. Cela s'est accompagné d'une difficulté croissante à expliquer leur fonctionnement interne, qui est devenu un enjeu important, tant au niveau juridique que sociologique. Winston Maxwell, chercheur en droit, et Florence d'Alché-Buc, chercheuse en *machine learning*, tous deux à Télécom Paris, nous décrivent les enjeux actuels de l'explicabilité des algorithmes.

## Quelles sont les compétences nécessaires pour aborder la problématique de l'explicabilité des algorithmes ?

**Winston Maxwell :** Afin de savoir comment expliquer les algorithmes, il est nécessaire d'avoir des réflexions qui croisent différentes disciplines. Notre équipe pluridisciplinaire, Éthique opérationnelle de l'IA, se concentre non seulement sur les aspects mathématiques, statistiques et computationnels, mais également sur les aspects sociologiques, économiques et juridiques. Nous sommes par exemple en train de travailler sur un système d'explicabilité pour les algorithmes de reconnaissance d'image utilisés entre autres pour la reconnaissance faciale dans les aéroports. Notre travail se situe donc à l'interface de ces différentes disciplines.

### Pourquoi les algorithmes sont-ils devenus difficiles à comprendre ?

**Florence d'Alché-Buc :** Au départ, l'intelligence artificielle utilisait principalement des approches symboliques, c'est-à-dire qu'elle simulait la logique des raisonnements humains. Des règles logiques, appelées systèmes experts, permettaient à l'intelligence artificielle de prendre une décision en exploitant des faits observés. Ce cadre symbolique la rendait plus facilement explicable par nature. À partir du début des années 1990, l'IA s'est basée de plus en plus sur les apprentissages statistiques, comme les arbres de décision ou les réseaux de neurones, car ces structures permettent d'avoir une meilleure performance, une meilleure flexibilité d'apprentissage et une meilleure robustesse.

Ce type d'apprentissage se base sur des régularités statistiques et c'est la machine qui établit quelles règles permettent de les exploiter. L'humain donne des fonctions d'entrée et une sortie attendue et le reste est déterminé par la machine. Un réseau de neurones est une composition de fonctions. Même si nous pouvons comprendre les fonctions qui le constituent, leur accumulation devient rapidement complexe. Il y a donc une boîte noire qui se crée, dans laquelle il est difficile de savoir ce que la machine calcule.

---

**« Un réseau de neurones est une composition de fonctions. Même si nous pouvons comprendre les fonctions qui le constituent, leur accumulation devient rapidement complexe. »**

---

### Comment rendre les intelligences artificielles plus explicables ?

**FAB :** La recherche actuelle se concentre sur deux approches principales. Il y a l'explicabilité par construction où, pour toute nouvelle constitution d'algorithme, il y a une implémentation de fonctions de sortie explicatives, c'est-à-dire qui permettent de décrire au fur et à mesure les étapes réalisées par le réseau de neurones. Mais cela a un coût et impacte la performance de l'algorithme et c'est pour cela que ce n'est pas encore très répandu. En général, et c'est l'autre approche, lorsqu'il faut expliquer un algorithme existant, ce

sont des explications *a posteriori* qui sont effectuées, c'est-à-dire qu'après qu'une IA a établi ses fonctions de calculs, nous allons chercher à décortiquer les différentes étapes de son raisonnement. Pour cela il y a plusieurs méthodes, qui cherchent en général à fragmenter le modèle entier complexe en un ensemble de modèles locaux moins compliqués à traiter individuellement.

---

**« Après qu'une IA a établi ses fonctions de calculs, nous allons chercher à décortiquer les différentes étapes de son raisonnement. »**

---

**Quels sont les raisons et les enjeux qui poussent la nécessité d'expliquer les algorithmes ?**

**WM:** Il existe deux raisons principales pour lesquelles le droit stipule qu'il y a un besoin d'explicabilité des algorithmes. Premièrement, les individus ont le droit de comprendre et de contester une décision algorithmique. Deuxièmement il faut garantir qu'une institution de contrôle comme la Commission nationale informatique et libertés (CNIL), ou un tribunal, peut comprendre le fonctionnement de l'algorithme, à la fois dans l'ensemble et dans un cas particulier. Par exemple, pour être sûr qu'il n'y a pas de discrimination raciale. Il y a donc un aspect individuel et un aspect institutionnel.

**Faut-il adapter le format des explications selon les cas ?**

**WM:** Les formats dépendent de l'entité à qui il faut que cela soit expliqué : par exemple, certains formats seront adaptés aux régulateurs comme la CNIL, d'autres à des experts et d'autres à des citoyens. Depuis 2015, il existe un service expérimental pour déployer des algorithmes qui détectent d'éventuelles activités terroristes en cas de menaces graves. Pour que cela soit correctement encadré, il faut qu'un contrôle externe des résultats soit facilement effectué, et donc que l'algorithme soit suffisamment transparent et explicable.



**Existe-t-il des difficultés particulières pour fournir une explication appropriée ?**

**WM:** Il y a de nombreux aspects à prendre en compte. Par exemple, la fatigue de l'information : lorsque la même explication est fournie de manière systématique, l'humain va avoir tendance à ne plus y faire attention. Il est donc important d'avoir des formats qui varient dans la manière dont

l'information est présentée. Aussi, des études ont montré que les humains ont tendance à suivre une décision donnée par un algorithme sans la questionner. Cela s'explique notamment par le fait que l'humain va considérer d'emblée que l'algorithme se trompe statistiquement moins souvent que lui. C'est ce que nous appelons le biais d'automatisation. C'est pour cela que nous voulons fournir des explications qui permettent à l'agent humain de comprendre et de prendre en considération leur contexte et leurs limites. C'est un véritable défi d'utiliser des algorithmes pour rendre les humains plus éclairés dans leurs décisions, et non l'inverse. Il faut que l'algorithme soit une aide à la décision mais ne remplace pas l'humain.

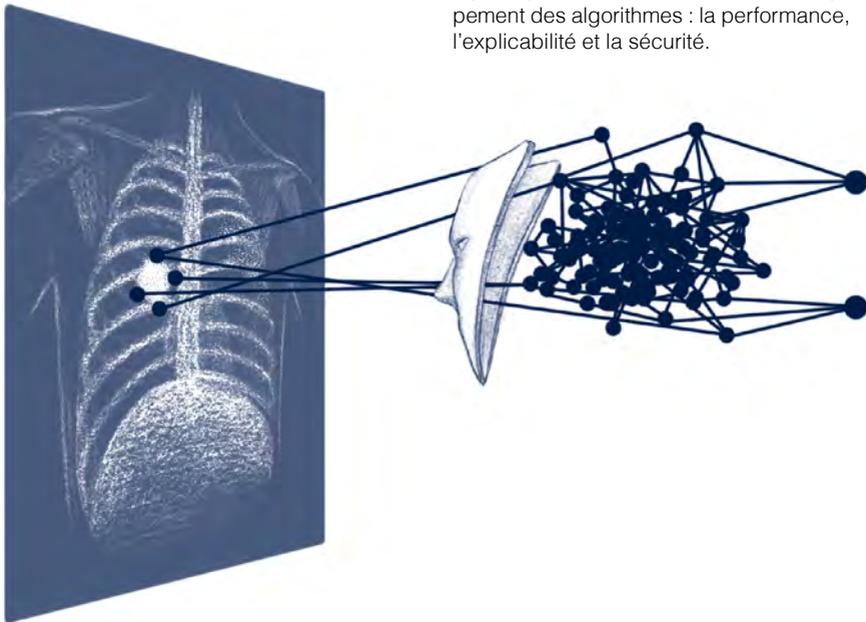
---

**« Des études ont montré que les humains ont tendance à suivre une décision donnée par un algorithme sans la questionner. »**

---

#### Quels sont des obstacles associés à l'explicabilité de l'IA ?

**FAB :** Un aspect à considérer lorsque nous voulons apporter des explications à un algorithme est la cybersécurité. Il faut faire attention à la potentielle mise à profit des explications par des pirates informatiques. Il y a donc pratiquement un triple équilibre à trouver dans le développement des algorithmes : la performance, l'explicabilité et la sécurité.



### Est-ce aussi un enjeu de protection de la propriété industrielle ?

**WM :** Oui, il y a également l'aspect de la protection des secrets d'affaire : certains développeurs peuvent être réfractaires à communiquer sur leurs algorithmes de peur d'être copiés. Un autre pendant de cela est la manipulation des scores : si les individus comprennent le fonctionnement d'un algorithme de classement, par exemple celui de Google, alors il leur serait possible de manipuler leur position au sein du classement. La manipulation est un enjeu important non seulement pour les moteurs de recherche, mais également pour les algorithmes de détection de fraude ou de cyberattaques.

redéfinir le *machine learning*. Les algorithmes se sont rapidement propagés et ils ont des effets énormes sur l'évolution de la société, mais ils sont très rarement accompagnés de leurs modes d'emploi. Il faut qu'un ensemble d'explications adaptées aillent de pair avec leurs usages afin de pouvoir maîtriser leur place. ▲

---

« Dans les prochaines décennies, nous allons devoir passer d'un objectif unique de performance des algorithmes à de multiples objectifs additionnels comme l'explicabilité, mais aussi l'équitabilité et la fiabilité. »

---

### Comment pensez-vous que l'IA va devoir évoluer ?

**FAB :** Les enjeux associés à l'IA sont multiples. Dans les prochaines décennies, nous allons devoir passer d'un objectif unique de performance des algorithmes à de multiples objectifs additionnels comme l'explicabilité, mais aussi l'équitabilité et la fiabilité. Tous ces objectifs vont

---

# LA VIRTUALISATION DES RÉSEAUX OPTIQUES AU SERVICE... DE LA 5G

---

Les réseaux mobiles ne sont pas complètement sans fil. Ils reposent également sur un maillage de fibres optiques, reliant notamment les antennes au cœur de réseau. Avec l'arrivée de la 5G, les réseaux optiques doivent être capables de suivre la montée en puissance du reste du réseau mobile, afin d'assurer la qualité de service promise. Deux chercheurs d'IMT Atlantique tentent de répondre à cette problématique, en rendant les réseaux optiques plus flexibles et intelligents.

**L**orsqu'on évoque les enjeux liés à la 5G, on cite généralement l'implantation d'un grand nombre d'antennes ou la nécessité de disposer de terminaux compatibles. Mais on oublie souvent un aspect crucial des réseaux mobiles : l'infrastructure de fibre optique sur laquelle ils reposent. À l'instar des précédentes générations, la 5G ne peut s'affranchir d'une connexion filaire dans la plupart des cas. En effet, la technologie intervient également au niveau du « dernier kilomètre ». Elle permet ainsi de relier les antennes aux équipements du cœur de réseau, qui fait le lien avec l'ensemble des machines connectées dans le monde. Elle peut également servir à relier divers dispositifs au sein d'un même site antennaire.

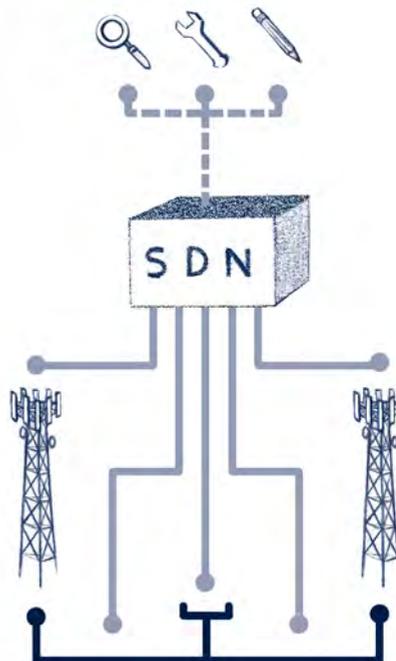
**« À l'instar des précédentes générations, la 5G ne peut s'affranchir d'une connexion filaire dans la plupart des cas. »**

En réalité, la 5G dépend plus fortement encore de cette infrastructure que ses aînées. Car la technologie de nouvelle génération s'accompagne de nouvelles exigences, liées notamment aux nouveaux usages, tels que l'Internet des objets (IoT). Par exemple, une application comme la voiture autonome nécessite une disponibilité élevée, une fiabilité irréprochable, une latence très faible, etc. Autant de contraintes qui pèsent sur l'ensemble de l'architecture, y compris sur la fibre optique. Si dans le dernier kilomètre,

celle-ci ne parvient pas à s'adapter aux nouvelles demandes, c'est donc toute la promesse de la 5G qui sera remise en cause. Et les nouveaux services (industrie 4.0, ville connectée, téléchirurgie...) ne pourront simplement pas être fournis de façon fiable et sécurisée.

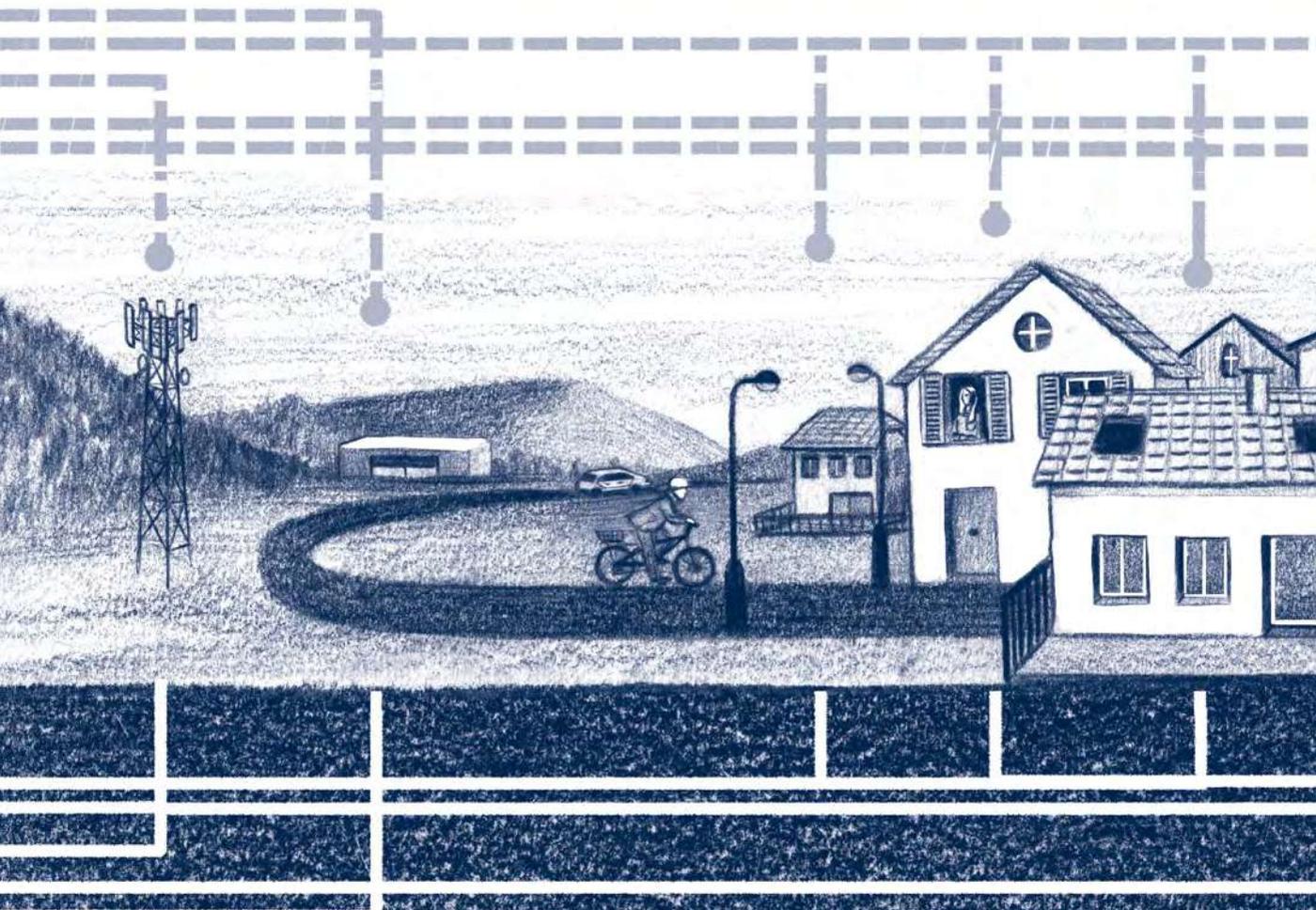
### Faciliter le pilotage des réseaux grâce à une meilleure interopérabilité

Aujourd'hui, le réseau optique est généralement surdimensionné par rapport aux besoins moyens actuels en débit. Il est en effet conçu pour pouvoir absorber les pics de charge en 4G, et n'est donc ni optimisé, ni capable de s'adapter intelligemment à une demande variable. La nouvelle donne, induite par la 5G, représente alors aussi bien une menace sur l'infrastructure quant à sa capacité à répondre aux nouveaux enjeux, qu'une opportunité de revoir sa gestion.



**« La nouvelle donne, induite par la 5G, représente alors aussi bien une menace sur l'infrastructure quant à sa capacité à répondre aux nouveaux enjeux, qu'une opportunité de revoir sa gestion. »**

Isabel Amigo et Luiz Anet Neto, chercheurs à IMT Atlantique en télécommunications, mènent des travaux dans ce domaine, conjointement avec une équipe de chercheurs et de doctorants. Leur objectif : rendre les réseaux optiques plus flexibles, intelligents et indépendants des systèmes propriétaires imposés par les constructeurs. Une tendance dans laquelle s'inscrivent de plus en plus les opérateurs. « *Chez Orange, auparavant, il était courant de rencontrer des spécialistes des syntaxes de configuration et de la gestion d'équipements propres à un ou deux équipementiers uniquement* », explique Luiz Anet Neto, qui a travaillé pendant cinq ans au sein

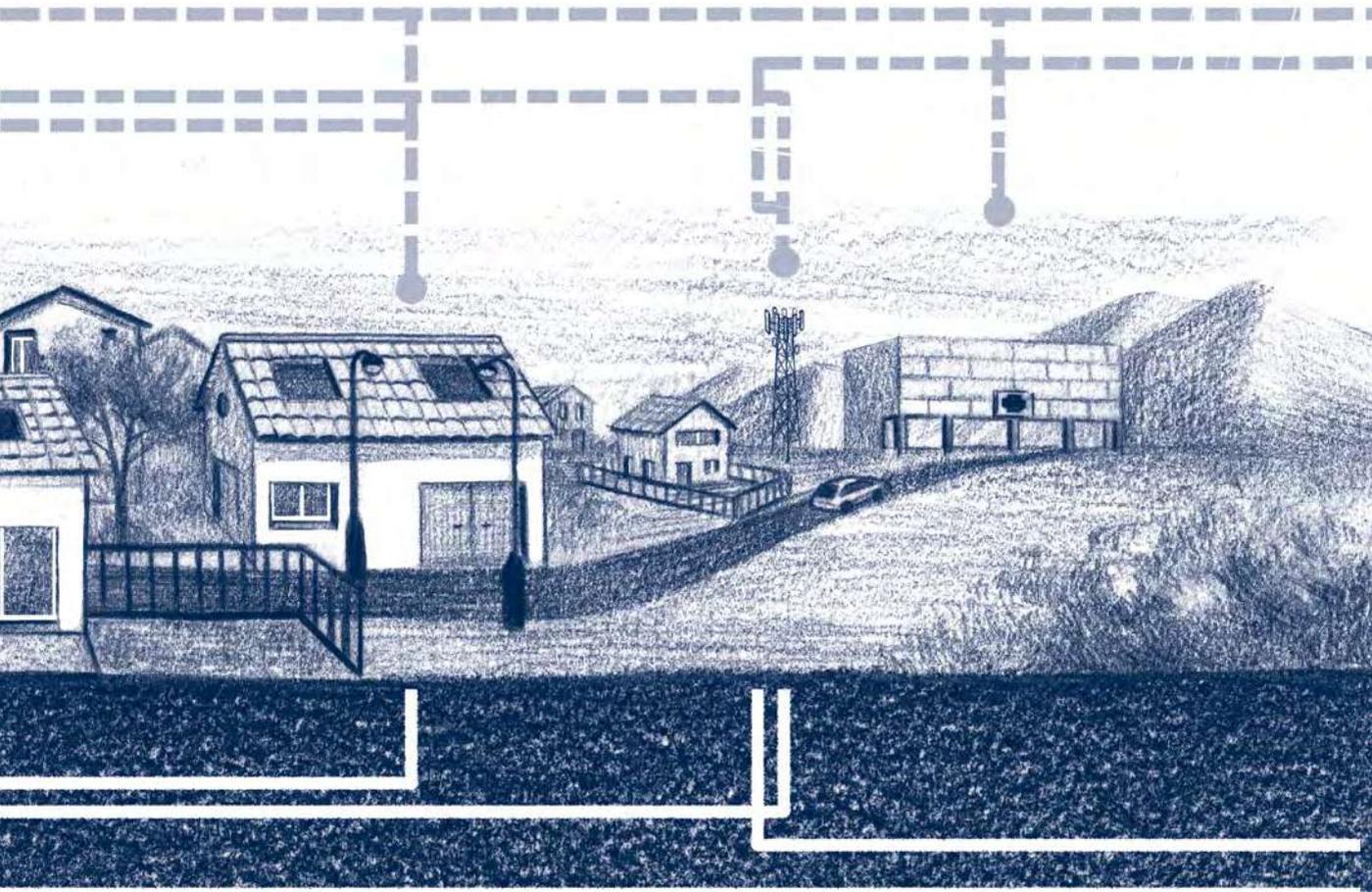


du groupe français. « À présent, les équipes commencent à mettre en place une "couche de traduction", transformant les différentes configurations, spécifiques à chaque fabricant, en un langage commun, plus simple et abstrait. »

Cette « couche de traduction », sur laquelle travaillent conjointement les chercheurs, porte le nom de SDN, pour *Software-Defined Networking*. Traduction : réseau défini par le logiciel. Ce modèle, déjà utilisé sur la partie sans fil du réseau, consiste à décharger de certaines fonctions les équipements réseau. Traditionnellement, ceux-ci assurent plusieurs missions : le traitement des don-

nées (réception et renvoi des paquets vers la destination), mais aussi une série de tâches de contrôle (protocoles de routage, interfaces de transmission...). Avec le SDN, les équipements se voient exemptés de ces tâches de contrôle, qui sont centralisées au sein d'une entité « chef d'orchestre », capable de contrôler plusieurs dispositifs à la fois .

Une telle approche possède de multiples bénéfices. Elle offre ainsi une vision globale du réseau, alors plus facile à piloter, tout en permettant de contrôler tous les équipements, quel que soit leur fabricant, sans avoir besoin de connaître un quelconque langage propriétaire.

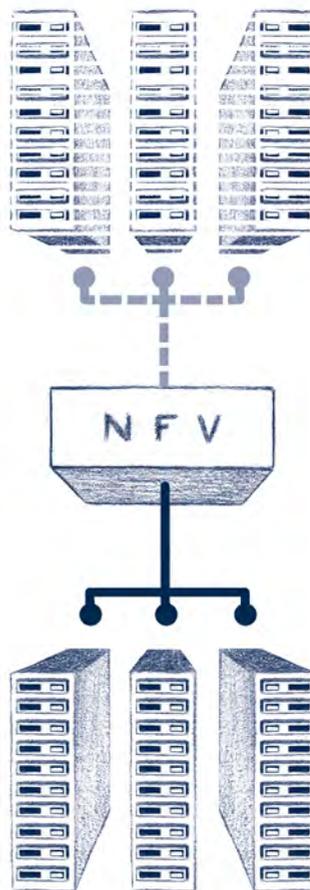


« Pour bien comprendre l'apport d'un SDN, on peut procéder par analogie avec les ordinateurs, avance Isabel Amigo. Aujourd'hui, il paraîtrait inconcevable d'avoir un ordinateur qui ferait tourner uniquement des applications utilisant un langage spécifique. Les machines possèdent donc une couche supplémentaire, le système d'exploitation, qui s'occupe de "traduire" les différents langages, mais aussi de gérer les ressources, la mémoire, les disques... Le SDN vise ainsi à agir à la façon d'un système d'exploitation, mais pour le réseau. » De la même manière, il s'agit donc de pouvoir y installer des applications, en mesure de fonctionner sur tout équipement, quel que soit le fabricant du matériel. Ces applications pourraient, par exemple, répartir la charge en fonction de la demande.

#### S'affranchir de la dépendance aux constructeurs de matériel

Le SDN va souvent de pair avec un autre concept, inspiré de la virtualisation dans les *data centers* : la NFV (*Network Functions Virtualization*, ou « Virtualisation des fonctions réseau »). Son principe : pouvoir exécuter toute fonctionnalité réseau (pas uniquement de contrôle) sur des serveurs génériques, via des applications logicielles. « Habituellement, ces fonctions nécessitent d'avoir un équipement dédié, décrit la chercheuse d'IMT Atlantique. Par exemple, si on souhaite disposer d'un pare-feu, il faut acheter un appareil spécifique chez un fournisseur. Avec la NFV, ce n'est plus nécessaire : on peut implémenter la fonction sur n'importe quel serveur, via une application. »

Au même titre que le SDN, l'apparition de la virtualisation dans les réseaux optiques encourage une meilleure interopérabilité. Les constructeurs peuvent moins imposer



leurs systèmes propriétaires, liés à leurs équipements. Le marché tend ainsi à évoluer, en laissant davantage de place aux développeurs de logiciels. « Il reste cependant du chemin, tempère Luiz Anet Neto. Les éditeurs peuvent, eux aussi, chercher à rendre leur clientèle captive, via des systèmes fermés. Ce sera aux opérateurs de rester vigilants et de proposer de plus en plus d'interopérabilité. »

---

## « Au même titre que le SDN, l'apparition de la virtualisation dans les réseaux optiques encourage une meilleure interopérabilité. »

---

C'est notamment dans cet objectif que ces acteurs collaborent avec le monde académique. Ils bénéficieraient en effet pleinement d'une normalisation, qui simplifierait la gestion de leurs réseaux optiques. Les tests réalisés en laboratoire par les chercheurs d'IMT Atlantique, en partenariat avec Orange, leur donnent ainsi des éléments techniques et des pistes à explorer, en vue de leurs échanges avec les fabricants et les organismes de standardisation.

### La 6G déjà en point de mire

Du côté des équipes de recherche, les axes de développement sont nombreux. En premier lieu, les scientifiques visent à renforcer la démonstration de l'utilité de leurs travaux, via des tests autour d'un service spécifique 5G (jusqu'ici, les expérimentations ne s'appliquaient pas à une application en particulier). Avec l'objectif d'aboutir à des préconisations sur le dimensionnement des liens optiques connectant les équipements du réseau mobile.

Ensuite, il s'agirait de se rapprocher d'une optimisation intelligente des réseaux optiques. Aujourd'hui, à titre d'exemple d'application des résultats obtenus par les chercheurs d'IMT Atlantique, il est possible d'ajouter une « sonde » qui

détermine si un chemin est surchargé et de basculer certains services vers un autre lien, le cas échéant. L'idée serait désormais d'approfondir la modélisation mathématique des phénomènes rencontrés, afin d'automatiser la résolution d'incidents, via des algorithmes d'intelligence artificielle.

Enfin, il est déjà temps de se tourner vers l'avenir de la technologie. « *Les réseaux mobiles se renouvellent à un rythme effréné, les générations se succédant tous les dix ans*, note Luiz Anet Neto. *Il faut donc déjà réfléchir à la façon de répondre aux futures exigences de la 6G !* »

---

# ÉCONOMIE

---

CIRCULEZ, IL Y A  
TOUT À VOIR !

---

Pour déployer efficacement des politiques d'économie circulaire sur un territoire, entreprises et décideurs doivent disposer d'outils d'évaluation et de simulation. La conception de ces outils, encore au stade de la recherche, passe nécessairement par une meilleure prise en compte de l'impact des activités humaines, tant à l'échelle locale que planétaire.

« L'économie circulaire permet d'optimiser les ressources à disposition, afin de les préserver et de réduire la pression sur l'environnement », introduit Valérie Laforest, chercheuse à Mines Saint-Étienne. La conscience de la nécessité de préserver la planète a commencé à se développer véritablement dans les années 1990. Elle s'est accompagnée progressivement de différentes réglementations importantes. Par exemple, la directive IPPC (*Integrated Pollution Prevention and Control*) de 1996, à laquelle Valérie Laforest a contribué via ses recherches sur la mise en œuvre de cette directive, vise à prévenir et réduire les différents types d'émissions polluantes. Plus récemment, des lois comme la loi sur la transition énergétique pour la croissance verte (2015) et la loi anti gaspillage sur l'économie circulaire (2021) ont traduit la volonté croissante de prendre en compte l'environnement dans la réflexion des activités anthropiques. Seulement, afin que les industries puissent s'adapter à ces réglementations, il est fondamental de pouvoir les doter d'outils issus d'une recherche approfondie sur les impacts de leurs activités.

« L'économie circulaire permet d'optimiser les ressources à disposition, afin de les préserver et de réduire la pression sur l'environnement », introduit Valérie Laforest, chercheuse à Mines Saint-Étienne. La conscience de la nécessité de préserver la planète a commencé à se développer véritablement dans les années 1990. Elle s'est accompagnée progressivement de différentes réglementations importantes. Par exemple, la directive IPPC (*Integrated Pollution Prevention and Control*) de 1996, à laquelle Valérie Laforest a contribué via ses recherches sur la mise en œuvre de cette directive, vise à prévenir et réduire les différents types d'émissions polluantes. Plus récemment, des lois comme la loi sur la transition énergétique pour la croissance verte (2015) et la loi anti gaspillage sur l'économie circulaire (2021) ont traduit la volonté croissante de prendre en compte l'environnement dans la réflexion des activités anthropiques. Seulement, afin que les industries puissent s'adapter à ces réglementations, il est fondamental de pouvoir les doter d'outils issus d'une recherche approfondie sur les impacts de leurs activités.

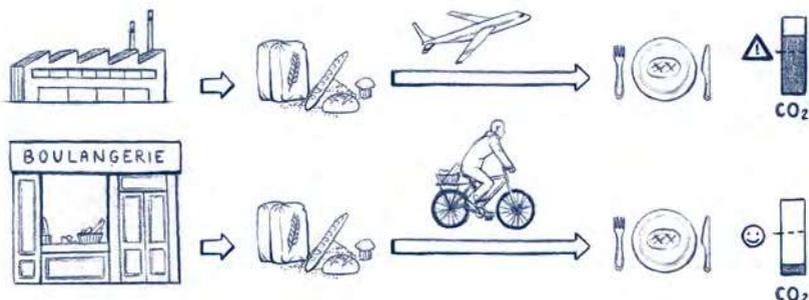
#### Des outils pour aider la décision des acteurs

Afin de permettre aux acteurs de suivre les réglementations et de réduire leurs impacts sur l'environnement, il est nécessaire de leur fournir des outils adéquats à des problématiques qui sont à la fois planétaires et locales. Une partie de la recherche en économie circulaire concerne donc la construction de ces outils. Il s'agit de concevoir des modèles qui soient suffisamment précis pour pou-

voir caractériser et évaluer un système à l'échelle d'un territoire, mais qui soient également suffisamment larges pour être adaptés à des territoires avec d'autres caractéristiques. Des cadres méthodologiques assez généraux peuvent donc être développés, à l'intérieur desquels il est possible de déterminer des critères et des indicateurs spécifiques à certains cas ou secteurs. Ces outils doivent permettre aux décideurs d'avoir les informations nécessaires pour implémenter leurs infrastructures.

**« Afin que les industries puissent s'adapter à ces réglementations, il est fondamental de pouvoir les doter d'outils issus d'une recherche approfondie sur les impacts de leurs activités »**

À Mines Saint-Étienne et en collaboration avec MACEO, une équipe de chercheurs se concentre sur le développement d'un outil appelé ADALIE, qui a pour but de caractériser le potentiel des territoires. Cet outil présente notamment une cartographie de différentes zones géographiques avec différents critères, comme des critères économiques ou environnementaux des territoires, ainsi que des industries y étant déjà implantées et leurs impacts. Les décideurs peuvent donc se baser sur cette cartographie pour choisir leur zone d'activité prioritaire. « *La question sous-jacente est pouvoir assurer qu'un territoire possède les aspects pour*



mettre en place des stratégies d'économie circulaire, et que cela réussisse », précise Valérie Laforest. L'outil ADALIE visera dans un second temps à archiver les expériences de pratiques territoriales efficaces pour constituer des bases de données.

Pour chaque étude de territoire, les recherches permettent d'obtenir un maximum d'informations de différentes natures. Ces données génèrent des modèles qui peuvent ensuite être testés sur d'autres territoires, ce qui permet aussi de vérifier la robustesse des modèles selon les indicateurs choisis. Les outils de ce type aident la décision des acteurs locaux sur les aspects d'économie industrielle et territoriale. « *Cela permet de réfléchir à comment développer des stratégies qui rassemblent plusieurs acteurs avec des enjeux et des problématiques différentes sur un territoire* », indique Valérie Laforest. Pour cela, il est fondamental de disposer de méthodologies qui permettent de mesurer les différents impacts environnementaux. Deux grandes méthodes existent.

#### Mesures d'impact en économie circulaire

L'analyse du cycle de vie (ACV) vise à estimer des impacts environnementaux ayant une couverture géographique et temporelle importante, et prenant notamment en compte les problématiques de

**« La question sous-jacente est pouvoir assurer qu'un territoire possède les aspects pour mettre en place des stratégies d'économie circulaire, et que cela réussisse. »**

distance de transport. L'ACV cherche à modéliser l'ensemble des consommations et des émissions potentielles sur toute la durée de vie d'un système. Les modèles sont construits à partir d'une compilation de données issues d'autres systèmes et permettent de comparer différents scénarios afin de déterminer celui qui aurait le moins d'impact.

L'autre approche est celle des meilleures techniques disponibles (MTD). Cette pratique a été implémentée avec la directive européenne sur les émissions industrielles (IPPC puis IED) dès 1996. Elle vise à aider les entreprises européennes à obtenir des performances équivalentes à des valeurs de référence sur leurs flux de consommations et d'émissions. Ces références sont définies à partir d'échantillons d'entreprises européennes. La comparaison de leur performance avec l'échantil-

lon de référence permet d'aboutir ou non à une autorisation d'exploitation. Les MTD se basent donc sur des référentiels européens et ont une finalité réglementaire.

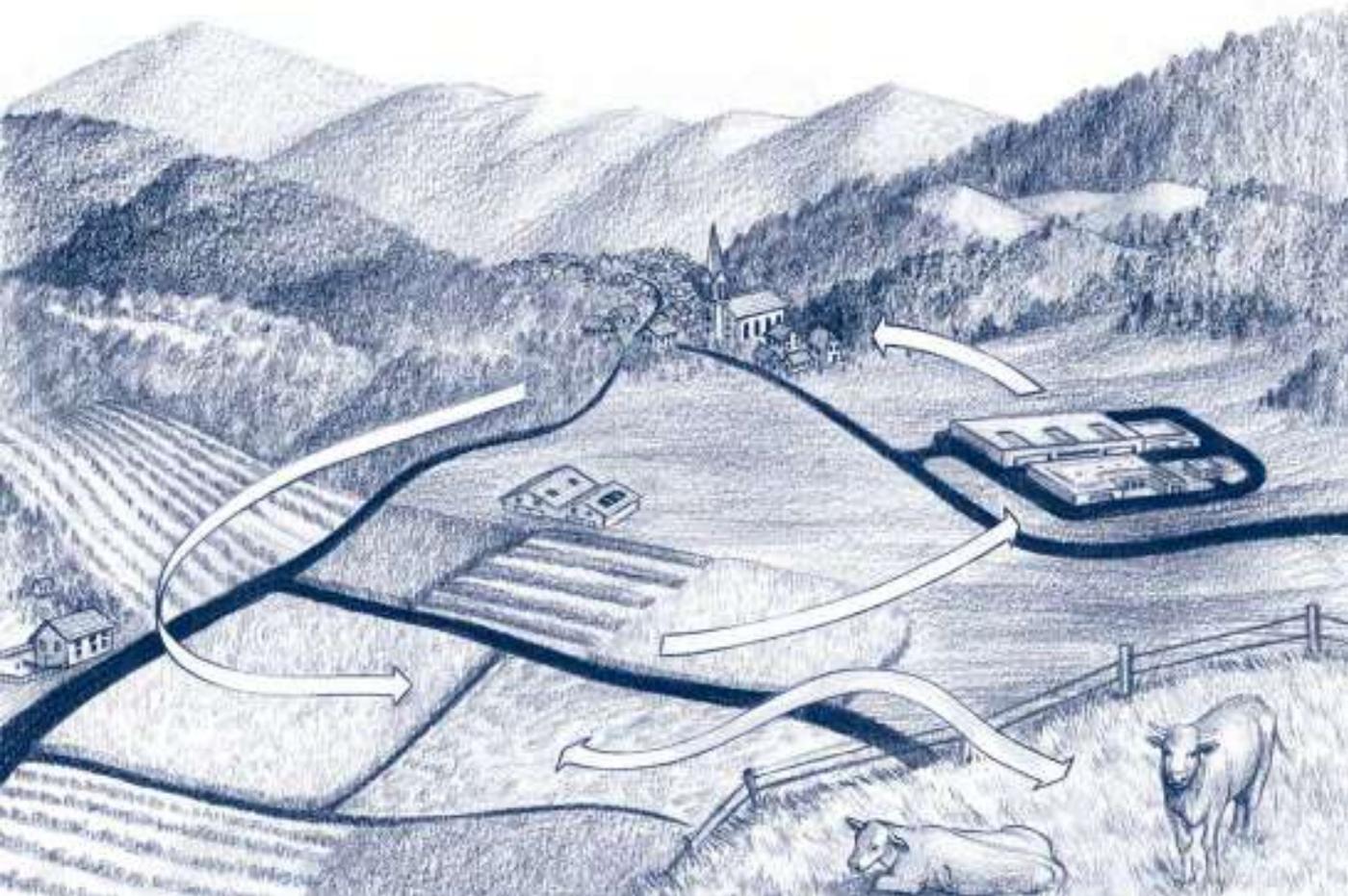
Les MTD sont relatives à leur performance en phase d'usage, c'est-à-dire que les performances des techniques sont regardées à la loupe des flux entrants et sortants durant la phase d'utilisation. L'ACV, quant à elle, s'appuie sur des données réelles ou modélisées intégrant celles en amont et en aval de cette phase. Les approches MTD et ACV sont donc complémentaires et non exclusives. Par exemple, entre deux MTD applicables à un système afin que celui-ci puisse être aligné avec les réglementations, il serait possible de mener différentes modélisa-

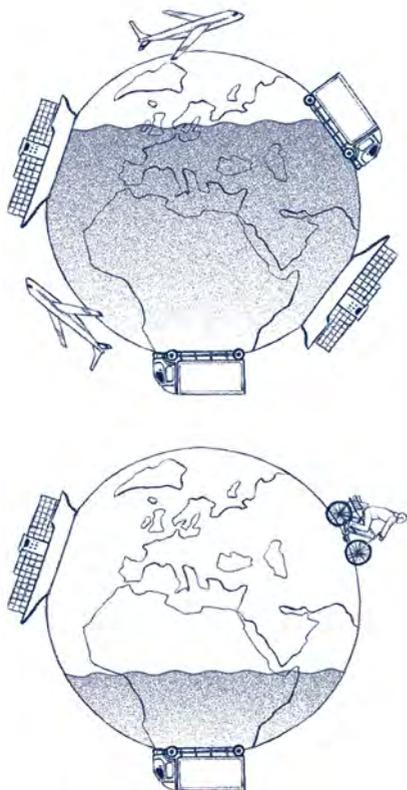
tions des systèmes par des ACV afin de déterminer la technique qui a le moins d'impact sur l'ensemble de son cycle de vie.

### Les limites planétaires

Au-delà de la quantification des flux générés par les entreprises, les mesures d'impacts doivent également intégrer l'effet de ces flux sur l'environnement à l'échelle de la planète.

Pour ce faire, des recherches et des pratiques sont également orientées vers l'effet des activités par rapport aux différentes limites planétaires. Ces limites traduisent la capacité de la planète à absorber les impacts, au-delà desquelles ils sont considérés comme ayant des effets irréversibles.





**« Si l'Humanité dépasse ces seuils, les conditions de vie sur Terre deviendront moins stables qu'elles ne le sont aujourd'hui. »**

Les travaux de Natacha Gondran à Mines Saint-Étienne s'inscrivent dans le cadre du développement de méthodes d'évaluation absolue de la durabilité

environnementale, basées sur les limites planétaires. « Nous travaillons à partir des limites planétaires, définies dans la littérature, et qui correspondent à des catégories d'impacts qui font l'objet de seuils au niveau planétaire. Si l'Humanité dépasse ces seuils, les conditions de vie sur Terre deviendront moins stables qu'elles ne le sont aujourd'hui. Nous essayons d'implémenter cela dans des outils d'évaluation d'impacts à l'échelle de systèmes tels que les entreprises », explique la chercheuse. Ces impacts, comme les émissions de gaz à effet de serre, l'utilisation des sols, ou l'eutrophisation des eaux ne sont pas directement visibles. Il s'agit donc de les représenter afin de pouvoir identifier les actions à mettre en place afin les réduire.

**« Aujourd'hui, de nombreuses filières dépassent déjà les limites, par exemple l'industrie agroalimentaire associée à l'alimentation carnée. Le défi consiste à trouver des systèmes locaux alternatifs à ces circuits afin de passer en deçà des limites. »**

Les limites planétaires sont définies au niveau mondial par une communauté de scientifiques. Grâce à des outils de modélisation, elles permettent de définir des budgets écologiques qui correspondent, en quelques sortes, à la quantité maximale de polluants qui peuvent

être émis pour ne pas dépasser ces limites planétaires. L'enjeu est ensuite de réfléchir à différentes méthodes qui permettent d'assigner ces budgets, planétaires, au niveau des territoires ou systèmes productifs. Il est ainsi possible d'estimer l'impact d'industries ou de territoires au regard des limites planétaires. « *Aujourd'hui, de nombreuses filières dépassent déjà les limites, par exemple l'industrie agroalimentaire associée à l'alimentation carnée. Le défi consiste à trouver des systèmes locaux alternatifs à ces circuits afin de passer en deçà des limites* », indique la chercheuse. Il serait par exemple judicieux de rapprocher géographiquement la production issue de l'élevage avec la production maraîchère, les effluents d'élevage pouvant servir d'engrais pour les produits maraîchers. Cela pourrait réduire l'impact global des différentes filières agro-alimentaires sur les cycles de l'azote et du phosphore, les émissions associées au transport, ainsi que d'avoir une meilleure gestion des déchets au niveau des territoires.

---

**« Il serait par exemple judicieux de rapprocher géographiquement la production issue de l'élevage avec la production maraîchère, les effluents d'élevage pouvant servir d'engrais pour les produits maraîchers. »**

---

---

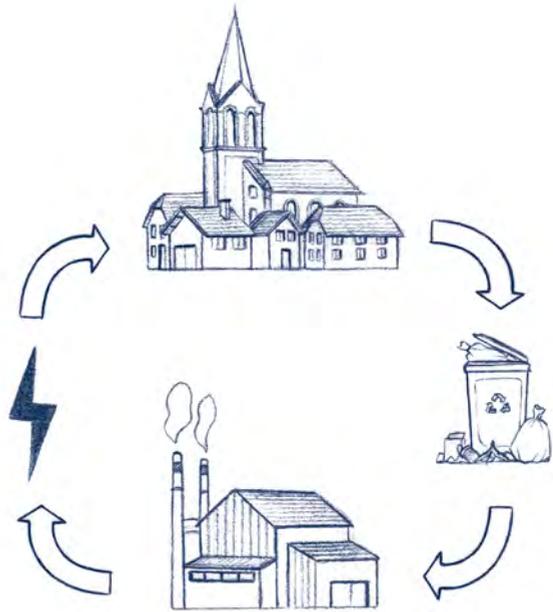
**« Le principe est de caractériser les ressources renouvelables et locales afin de définir comment elles peuvent être traitées directement sur le territoire. »**

---

#### **Application à la gestion territoriale des déchets**

La gestion territoriale des déchets est un des aspects fondamentaux de l'économie circulaire. Audrey Tanguy, également chercheuse à Mines Saint-Étienne, réalise une partie de ses travaux sur ce sujet. Elle se concentre sur la mise au point d'approches qui permettent de gérer les déchets de manière optimale en fonction de leur nature et des caractéristiques des territoires. « *Le principe est de caractériser les ressources renouvelables et locales afin de définir comment elles peuvent être traitées directement sur le territoire* », explique Audrey Tanguy. Par exemple, les déchets organiques doivent être traités avec les circuits les plus courts possibles car ils se dégradent rapidement. Les approches actuelles tendent à centraliser au maximum les déchets afin de les traiter, tandis que les approches circulaires tendent vers plus de circuits locaux, décentralisés. La décentralisation peut être appuyée par des technologies low tech, optimisant le recyclage local ou le compostage dans le cas des déchets organiques, et notamment dans le milieu urbain.

Les recherches associées au traitement des déchets visent donc à trouver des manières de relocaliser les flux. Les outils de modélisation peuvent aider à spatialiser ces flux pour ensuite aiguiller les décideurs sur la manière de s'insérer dans les filières locales. « *Les outils traditionnels d'évaluation d'impact du traitement des déchets évaluent des systèmes industriels centralisés, et il s'agit donc de les régionaliser* », explique Audrey Tanguy. Les outils doivent prendre en compte la répartition territoriale des ressources, réutilisables ou non, c'est-à-dire de déterminer quels sont les principaux flux qui peuvent être engagés pour récupérer et transformer des matières. « *Il s'agit donc d'utiliser une méthode adéquate pour prioriser les collectes de matières, et pour cela il est nécessaire de faire l'inventaire des flux d'émission et de consommation sur le territoire* », souligne la chercheuse.



**« Au-delà des outils, les chercheurs et les structures en place ont aussi un rôle d'accompagnement pour aider les décideurs à mener des investigations plus approfondies sur les différentes activités présentes dans le territoire choisi. »**

### Implémentation des stratégies sur les territoires

Afin de mettre en place des stratégies d'économie circulaire à l'échelle des territoires, la collaboration des différents types d'acteurs locaux est fondamentale. Au-delà des outils, les chercheurs et les structures en place ont aussi un rôle d'accompagnement pour aider les décideurs à mener des investigations plus approfondies sur les différentes activités présentes dans le territoire choisi. Cela permet de définir des stratégies de collaboration où certains acteurs centraux dynamisent les autres acteurs. Par exemple, des associations d'entreprises ou des syndicats mixtes locaux permettent de promouvoir des politiques qui appuient les stratégies industrielles. Un bon exemple est l'implication de l'association Macéo, en par-

tenariat avec Mines Saint-Étienne, dans l'implémentation de stratégies pour le recyclage et la valorisation des déchets plastiques dans le Massif Central. Elle agit comme un acteur central au niveau de ce territoire et coordonne les différentes actions grâce à la mise en place de projets collaboratifs entre les entreprises et les collectivités.

---

**« Nous partons sur l'hypothèse qu'afin de réduire nos impacts, une des stratégies à mettre en place consiste à procéder à une réindustrialisation des territoires afin de privilégier les circuits courts. »**

---

Les outils donnent aussi accès à des données quantitatives sur l'intérêt des échanges potentiels entre les entreprises, et leur permettent de comparer différents scénarios basés sur des échanges. Cela peut s'appliquer sur des aspects de mutualisation des transports, des fournisseurs ou des infrastructures. Même si ces stratégies ne touchent pas au cœur des productions industrielles, elles amorcent des stratégies futures de plus grande envergure en établissant de la confiance entre différents acteurs.

#### Réindustrialisation des territoires

*« Nous partons sur l'hypothèse qu'afin de réduire nos impacts, une des stratégies à mettre en place consiste à procéder à*

*une réindustrialisation des territoires afin de privilégier les circuits courts, explique Natacha Gondran. Cela peut passer par des compromis, comme d'accepter parfois certaines dégradations locales des impacts mesurés, en contrepartie d'une réduction plus importante de l'impact général », poursuit la chercheuse.*

Réindustrialiser les territoires favoriserait donc la mise en place des dynamiques circulaires. La collaboration entre différents acteurs à l'échelle locale apporterait ainsi des réponses appropriées aux enjeux planétaires concernant la pression sur les ressources et les émissions liées aux activités humaines. *« Cela fait partie des stratégies à mettre en place pour l'avenir, mais il est également important de repenser notre rapport à la consommation afin de la réduire et de se placer dans une optique de sobriété », conclut Natacha Gondran.* ▲

---

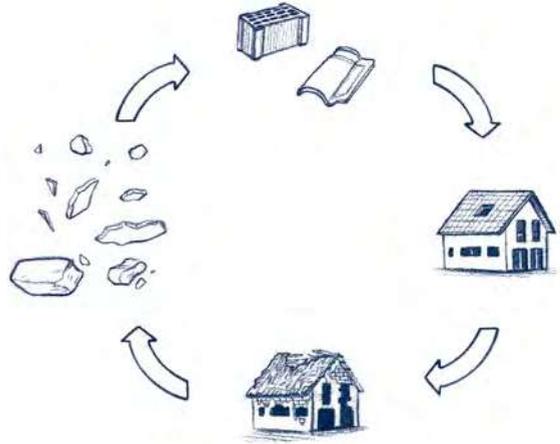
# UNE OASIS DE DÉCHETS RECONVERTIE EN MATÉRIAUX CÉRAMIQUES

---

Transformer des déchets et des coproduits non utilisés par les industriels permettrait de répondre à des problématiques d'accès aux ressources du génie civil, de recyclabilité et même de réduire la consommation d'énergies fossiles. Doan Pham Minh, chercheur en génie des procédés à IMT Mines Albi, expose quelques pistes de valorisation explorées par ses travaux.

**P**arfois, les déchets des uns font le bonheur des autres. Transformer les débris en ressources, c'est l'ambition de l'économie circulaire. C'est aussi la problématique au cœur du projet Matériaux céramiques innovants pour le stockage d'énergie et le bâtiment (MACISEB)<sup>1</sup> démarré en 2019 auquel participent des chercheurs d'IMT Mines Albi<sup>2</sup>. « Notre objectif est de transformer des déchets et coproduits inorganiques industriels, disponibles autour de nous, en quelque chose d'utile pour la société », décrit Doan Pham Minh, chercheur en génie des procédés. Les solutions identifiées dans le cadre du projet seront ensuite transférées à des entreprises de la région Occitanie. De la valorisation de déchets non recyclables, au remplacement de matières premières en voie de disparition, la seconde vie s'applique à un important panel d'applications insoupçonnées.

**« L'idée n'est pas de bouleverser les modes de fabrication, mais de remplacer une matière première critique dans une démarche d'économie circulaire »**



### Réserve de sable cherche remplaçant le temps de se refaire une santé

L'Agence de la transition écologique (Ademe) rapporte qu'entre 27 et 40 milliards de tonnes de sable sont extraites chaque année à travers le monde. Nous le retrouvons dans nos bâtiments, nos vitres, mais aussi nos ordinateurs. « La demande de cette ressource est plus critique encore que celle en métaux nobles. Et les réserves s'épuisent si vite qu'elles arrivent à un point de rupture », souligne Doan Pham Minh. Extrait des carrières ou récupéré dans les lits de rivière, le sable naturel se forme par un long processus d'érosion. Trop long donc pour répondre aux besoins de la société. Car ce matériau est

1. Projet financé par le fonds européen de développement régional (FEDER) de la politique européenne qui vise à renforcer la cohésion économique, sociale et territoriale dans l'Union européenne en soutenant des développements au sein des régions comme ici en région Occitanie.

2. Le projet regroupe des chercheurs du centre RAPSODEE, du laboratoire Procédés matériaux et énergie solaire (PROMES), du laboratoire Acteurs, ressources et territoires dans le développement (ART-DEV) et l'entreprise Eco-Tech Ceram.

indispensable au secteur du génie civil qui en est le principal consommateur, et donc à la stabilité économique de nombreux pays.

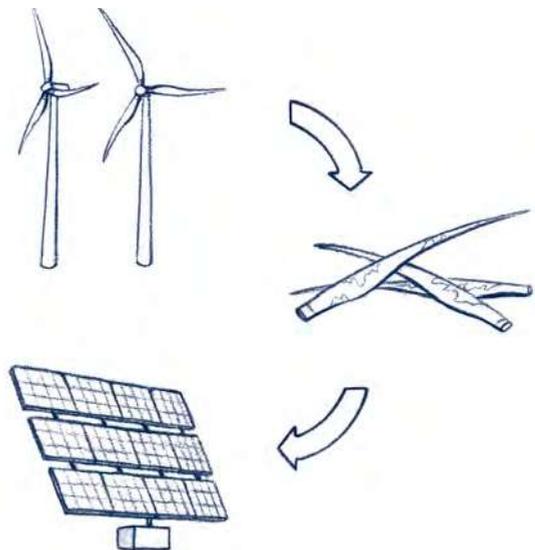
**« Lors de son recyclage, le verre est broyé afin d'obtenir des granulométries nécessaires à sa réutilisation par les verreries. Toutefois, une fraction de ce verre, trop fine, trop grossière ou polluée, n'est pas réexploitée. »**

C'est pourquoi le projet MACISEB cherche des remplaçants au sable parmi les coproduits inorganiques, c'est-à-dire des déchets industriels qui ne sont pas valorisés actuellement. « *L'idée n'est pas de bouleverser les modes de fabrication, mais de remplacer une matière première critique dans une démarche d'économie circulaire* », précise Doan Pham Minh. Avec son équipe, le chercheur réalise des cartographies de ressources sur l'ensemble du territoire occitan. Il identifie et localise des gisements à fort potentiel ayant des propriétés similaires au sable. Il s'assure également de la pérennité qu'offrent ces produits en notant la quantité et la disponibilité de ces déchets. Plusieurs candidats ont ainsi été retenus tels que les résidus de verres.

En effet, lors de son recyclage, le verre est broyé afin d'obtenir des granulométries nécessaires à sa réutilisation par les

verreries. Toutefois, une fraction de ce verre, trop fine, trop grossière ou polluée, n'est pas réexploitée. « *Nous récupérons ces restes pour remplacer en partie ou la totalité du sable nécessaire à la conception de briques et de tuiles céramiques* », précise Doan Pham Minh. Les sables de fonderie, les laitiers de hauts fourneaux, et les cendres des centrales thermiques biomasse, sont également prometteurs.

À partir de ces matières, les chercheurs proposent des recettes de conception aboutissant à des briques et à des tuiles ayant les mêmes propriétés mécaniques et thermiques que celles fabriquées à partir d'argile et de sable naturel. De plus, ces formulations suivent le cahier des charges des industriels. Les produits sont ainsi assurés de pouvoir être fabriqués avec les équipements déjà détenus par les entreprises sans investissement complémentaire. Des premières briques seront fabriquées en 2022 avant d'être testées par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB).



### Du vent à la chaleur : la reconversion des pales d'éoliennes

La durée de fonctionnement d'une éolienne est estimée à une vingtaine d'années. Les premières installations françaises arrivent donc à échéance et ces

démantèlements devraient se multiplier dans les prochaines années. En somme, le recyclage devient un défi majeur du secteur éolien. Si les parties métalliques (le mat et le rotor) et béton (le socle) se recyclent bien, les pales - constituées de fibre de verre mêlées à des résines organiques - n'ont pas cette chance. Toujours dans le cadre du projet MACISEB, les chercheurs proposent donc de valoriser ces déchets au sein de matériaux de stockage thermique. « *Notre objectif est de réutiliser la fibre de verre des pales afin de développer des céramiques utilisées par les centrales solaires à concentration (CSP)* », explique le chercheur. Ce mode de production énergétique transforme l'énergie solaire d'abord en

---

**« Notre objectif est de réutiliser la fibre de verre des pales afin de développer des céramiques utilisées par les centrales solaires à concentration. »**

---



---

**« Les chercheurs développent des matériaux capables de supporter des cycles de réchauffement-refroidissement intenses et répétés pendant plusieurs années. »**

---

chaleur puis en électricité. Pour ce faire, il s'appuie sur des systèmes composés de miroirs qui concentrent les rayons du soleil en un point jusqu'à générer des températures très élevées (de 200 à 1 500°C). La chaleur est transportée par un fluide pour faire tourner des turbines et produire. Elle peut être stockée au sein de « batteries thermiques » capables de la restituer pendant la nuit afin d'assurer une continuité de service.

Or, actuellement les centrales thermiques stockent la chaleur grâce à du sel fondu - un mélange de nitrate de potassium et de nitrate de sodium. « *Ces composés sont également présents dans les engrais agricoles. Il y a donc un conflit d'utilisation entre les deux secteurs. Or, il n'existe actuellement pas d'alternative commerciale viable économiquement et environnementalement* », précise Doan Pham Minh. Transformer les pales d'éolienne en céramiques apporterait ainsi une nouvelle solution à ce secteur. En ce sens, les chercheurs développent des matériaux capables de supporter des cycles de réchauffement-refroidissement intenses et répétés pendant plusieurs années. Cette solution permettra à terme de valoriser un déchet dont la quantité s'accroît.

Mais elle apportera également un coup de pouce technologique au solaire thermodynamique qui pourrait lui permettre de s'installer sur le marché des énergies renouvelables. Dans le cadre du projet MACISEB, cette recherche est notamment menée par le laboratoire PROMES, partenaire du projet, et acteur académique de référence dans le domaine du stockage thermique. Art-dev, partenaire et laboratoire en sciences sociales, s'intéresse également aux conditions sociales du recyclage des pales d'éoliennes et aux possibilités de mise en œuvre d'une écologie du recyclage de ces pales à l'échelle régionale.

---

**« Actuellement, l'industrie gaspille plus de 30 % de l'énergie qu'elle consomme sous forme de chaleur dite fatale rejetée dans l'atmosphère au sein des fumées industrielles. »**

---

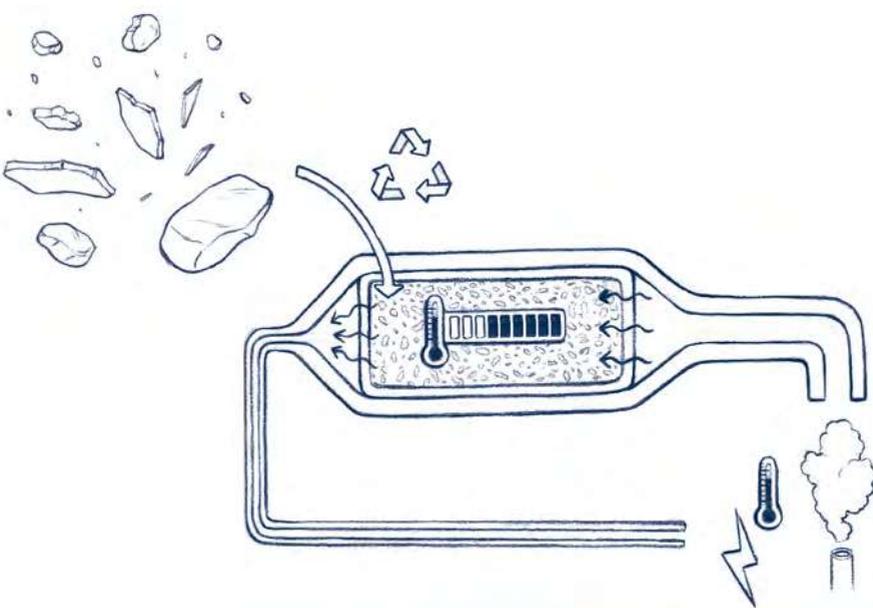
**Fumées industrielles : une idée qui réchauffe les turbines**

Une autre application pourrait bénéficier de matériaux céramiques fabriqués à partir de déchets inorganiques pour capter de la chaleur. Actuellement, l'industrie gaspille plus de 30 % de l'énergie qu'elle consomme sous forme de chaleur dite fatale rejetée dans l'atmosphère au sein des fumées industrielles. Les chercheurs d'IMT Mines Albi collaborent avec l'entreprise Eco-Tech Ceram spécialiste

du stockage thermique, en vue de récupérer cette énergie, la stocker et la restituer pour alimenter des procédés industriels. Par exemple, les céramistes et les usines de métallurgie utilisent des fours à haute température souvent alimentés au gaz naturel. Restituer la chaleur captée au sein de leurs fumées permettrait de chauffer en partie leurs équipements et donc de réduire leur consommation d'énergies fossiles.

Comme pour le solaire thermodynamique, l'enjeu est donc de développer des matériaux céramiques adaptés aux

conditions d'utilisation par les entreprises. « Néanmoins, se pose ici une autre problématique : les fumées industrielles contiennent des polluants. Ces gaz acides et corrosifs accélèrent le vieillissement des céramiques et altèrent donc leurs performances », explique le chercheur. De plus, la composition des fumées est différente selon l'activité de l'industriel. Un premier travail consiste donc à caractériser les types de fumées, leurs températures, etc., par secteur en vue de développer des matériaux durables et à coût maîtrisé<sup>3</sup>. ▲



3. Cela fait partie des objectifs des projets : Solutions Eco-Stock® pour la valorisation des chaleurs fatales industrielles complexes (SOLUTEC, démarré en 2021), et Développement des matériaux monolithiques à base de mélanges argileux locaux pour la valorisation de la chaleur fatale industrielle en Occitanie (CHATO, démarré en 2021), qui sont portés par IMT Mines Albi.

---

# QUE SAIT-ON DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES BIOCOMPOSITES ?

---

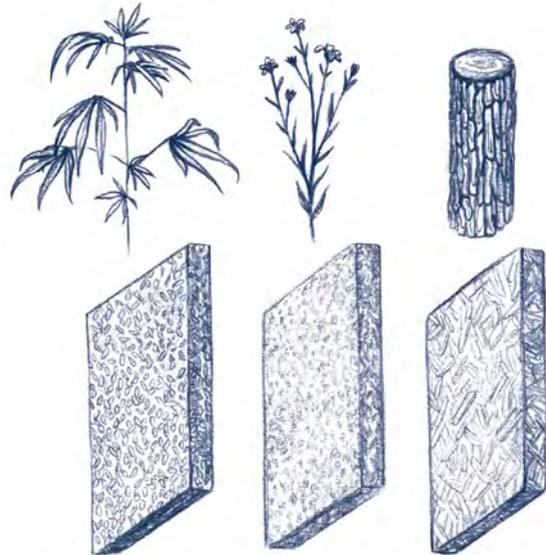
Les matériaux biosourcés sont une alternative à ceux issus de ressources fossiles de plus en plus mise en avant ces dernières années. Cependant, de par le développement récent de ce secteur, leur impact environnemental réel est encore peu connu. Joana Beigbeder, chercheuse à IMT Mines Alès en analyse environnementale, fait le point sur l'analyse du cycle de vie (ACV) de ces matériaux émergents.

**B**ien que les matériaux biosourcés se présentent comme une alternative efficace à leurs aînés pétrosourcés, le détail de leur impact environnemental est encore mal connu. Les matériaux issus de fibres végétales sont très certainement une amélioration concernant certains impacts, comme l'empreinte carbone, mais cela peut être plus délicat concernant l'utilisation ou la pollution des sols par exemple. Pour en avoir le cœur net, l'analyse de cycle de vie est un outil indispensable.

Joana Beigbeder, chercheuse à IMT Mines Alès sur les impacts environnementaux, travaille sur l'analyse de cycle de vie de ces nouveaux matériaux biosourcés, et notamment des biocomposites. L'objectif est de comparer l'impact de différents scénarios, que cela soit entre des matériaux biosourcés ou pétrosourcés, ou bien en fonction des différentes étapes du cycle de vie d'un même matériau. La chercheuse rappelle que « *l'intérêt de l'analyse de cycle de vie est d'étudier en parallèle plusieurs impacts environnementaux et d'identifier d'éventuels transferts de pollution sur tout le cycle de vie d'un produit* ».

#### Des sources d'impact différentes

Au regard de l'impact environnemental, certains points semblent couler de source. Si nous ne regardons que l'empreinte carbone, il paraît évident que les matériaux biosourcés sont plus bénéfiques que leurs cousins pétrosourcés. Mais la réalité est plus complexe car de nombreuses variables sont à considérer. « *L'impact carbone est un indicateur bien connu, mais il faut aussi prendre en*



*compte différents impacts de pollution, de toxicité humaine, de pollution des sols ou milieux aquatiques ou encore le réchauffement climatique* », souligne Joana Beigbeder. Prenons l'exemple du secteur automobile. Si pour une fonction équivalente, une pièce en matériau biosourcée a un poids supérieur, elle demandera plus

---

**« L'impact carbone est un indicateur bien connu, mais il faut aussi prendre en compte différents impacts de pollution, de toxicité humaine, de pollution des sols ou milieux aquatiques ou encore le réchauffement climatique. »**

---

d'énergie à l'usage et ne sera pas forcément bénéfique. « *Ce sera peut-être une meilleure solution d'un point de vue environnemental, mais c'est justement grâce à l'ACV que nous pourrons le confirmer* », précise-t-elle.

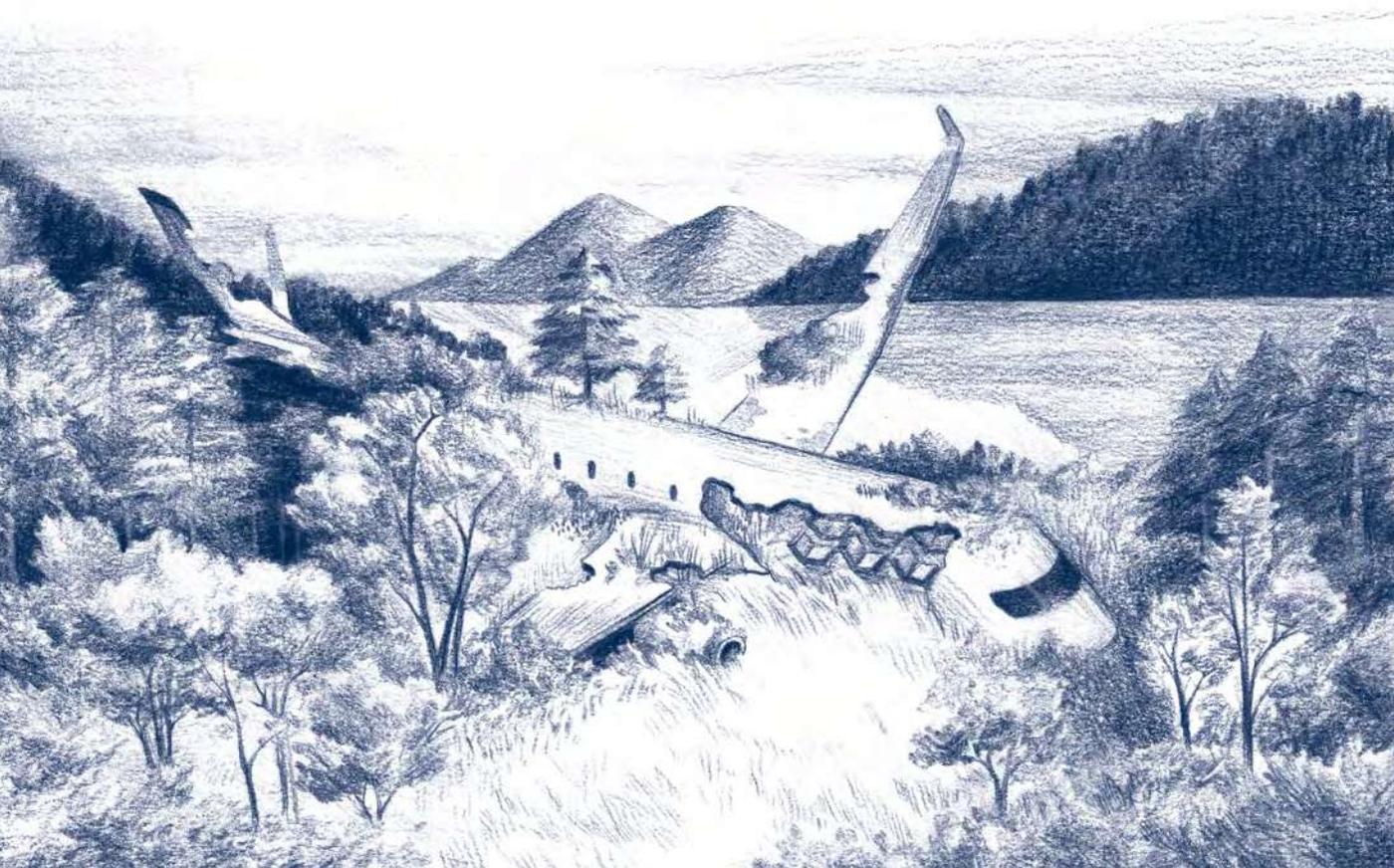
Certains points semblent plus évidents, c'est le cas de la consommation des ressources fossiles et d'une manière générale de l'impact sur le réchauffement climatique. Les matières végétales ont une action de captage du CO<sub>2</sub> lors de leur croissance, ce qui leur donne un atout indéniable. Cela dit, leur croissance implique dès lors un impact agricole, notamment sur l'utilisation des sols. « *Selon le type de culture, cela peut*

*engendrer une pollution des sols. Dans l'ensemble, plus les engrais et additifs seront nécessaires à la croissance, moins certains impacts seront bénéfiques* », mentionne Joana Beigbeder. Cela fait ressortir une question nouvelle, inexistante avec les matières issues du pétrole.

---

**« Pour réduire les impacts  
d'un produit, alléger son poids  
et allonger sa durée de vie  
sont des points clés. »**

---

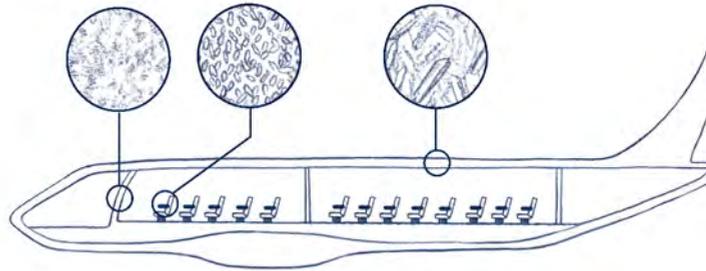


« C'est toujours une histoire de compromis et nous cherchons des pistes pour améliorer le procédé ou le produit, indique la chercheuse. Les végétaux, comme le lin ou le chanvre, demandent très peu d'intrant, voire aucun, et sont donc une piste privilégiée. Mais le matériau n'est qu'une piste d'amélioration dans une démarche d'écoconception », note-t-elle. Pour réduire les impacts d'un produit, alléger son poids et allonger sa durée de vie sont des points clés. Cela peut prendre en compte les aspects de réparabilité du produit, ou même de nouveaux concepts comme privilégier l'usage plutôt que l'achat du produit.

« Il y a une question de bon sens écologique également, si nous étudions un produit jetable, il y aura tout intérêt à privilégier des matières réutilisables ou compostables », illustre Joana Beigbeder. Un sujet de recherche porte notamment sur le développement de couches ou de pansements compostables, un élément prometteur pour réduire la pollution plastique.

#### Prédire les impacts possibles

« L'étude d'analyse de cycle de vie se fait vraiment au cas par cas en fonction du service rendu par un produit », précise Joana Beigbeder. Pour estimer la consommation des solvants ou la synthèse chimique de matériaux, la chercheuse utilise des publications scientifiques antérieures et des modèles mathématiques. Mais sur certains points, les données manquent. « Nous sommes parfois obligés de passer par des approximations assez fortes sur certains impacts, mais cela permet tout de même de donner des tendances et des pistes d'améliorations », soutient-elle. Cela peut être le cas pour la production des fibres végétales autant que pour leur traitement en fin d'usage.



**« Ces matériaux n'étant pas encore développés sur le marché, il n'existe pas aujourd'hui de filières pour traiter les déchets qui en découlent. »**

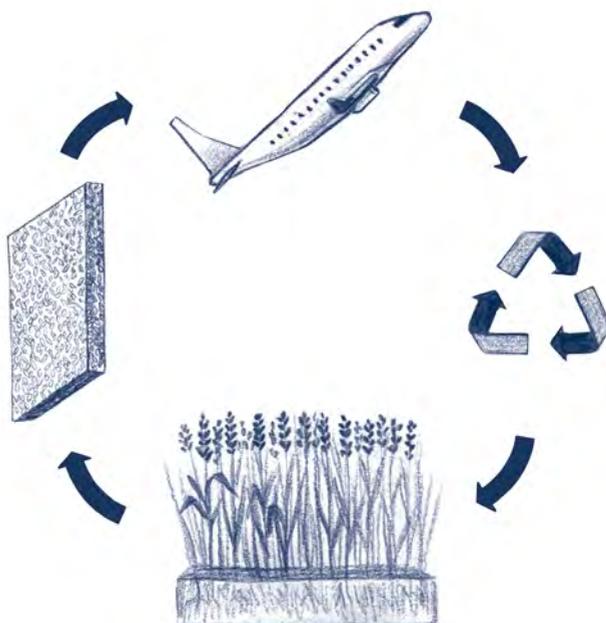
Ces matériaux n'étant pas encore développés sur le marché, il n'existe pas aujourd'hui de filières pour traiter les déchets qui en découlent. De fait, il n'y a pas de données sur l'impact environnemental de l'incinération, l'enfouissement ou encore la pollution dégagée par ces jeunes matériaux. « Pour estimer ces impacts, nous les assimilons à d'autres matériaux proches mieux connus, sur lesquels nous avons des données, pour mettre au point nos hypothèses », explique la chercheuse. Ces travaux génèrent également de nouvelles données pour l'ACV tels que des simulations de recyclage pour le traitement en fin de vie.

« Certains matériaux biosourcés sont aujourd'hui à l'échelle du laboratoire, et il est encore difficile de s'imaginer ce qui se passerait à l'échelle industrielle », rapporte Joana Beigbeder. La chercheuse travaille alors sur du prédictif : elle imagine

des scénarios pour des matériaux qui ne sont pas encore mis sur le marché et analysés si cela est intéressant au niveau environnemental. Aussi, le secteur des biomatériaux étant récent, leur production sera moins optimisée que celle de matériaux pétrosourcés classiques qui ont évolué et se sont améliorés. « *Cela joue en défaveur des matériaux plus récents, car leur développement va nécessiter plusieurs étapes* », souligne-t-elle.

**« Le secteur des biomatériaux étant récent, leur production sera moins optimisée que celle de matériaux pétrosourcés classiques qui ont évolué et se sont améliorés. »**

Ces recherches sont alors essentielles pour développer des alternatives durables aux matériaux classiques, et s'inscrivent dans une vision d'ensemble pour répondre aux enjeux de la pollution plastique. « *Beaucoup de recherches se focalisent sur le développement de nouveaux matériaux moins impactants au niveau environnemental. Le projet VOICE par exemple, lancé en 2018 en partenariat avec Innovation Plasturgie Composites, Silvadec, IMT Mines Alès et financé par l'ADEME, s'intéresse au recyclage de lames de terrasses en biocomposites. Ou encore le projet Agrobranche regroupant 8 partenaires français<sup>1</sup>, qui s'intéresse, entre autres, à l'étude de ren-*



*forts biosourcés issus de l'agroforesterie*», conclut-elle. Ces deux projets reflètent la floraison de nouveaux matériaux émergents et le développement actuel de la recherche pour dégager des alternatives durables au problème du plastique. ▲

1. Scop Agrofoot (coordinateur), IMT Mines Alès, CIRAD BiowooEB, LERMAB, FRD, CRA Bretagne, CIRAD AMAP, INRA SPO







## L'APOSTROPHE

Le podcast scientifique qui interroge les chercheurs et les experts sur les grands enjeux sociotechniques de notre époque.



En 2021, I'MTech a lancé  
deux séries audio...



## LA MINUTE I'MTECH

---

Une dose de science chronométrée  
pour découvrir un sujet  
scientifique en accéléré.

**Rédacteur-en-chef :** Benjamin Vignard

**Rédacteurs :** Tiphaine Claveau, Bastien Contreras,  
Antonin Counillon, Anaïs Culot.

**Secrétaire de rédaction :** Véronique Charlet

**Conception et illustrations :** Diane Rottner

[www.imtechnews.fr](http://www.imtechnews.fr)

**Twitter :** @IMTechfr

**LinkedIn :** IMTech



Institut Mines-Télécom

19 place Marguerite Perey

91120 Palaiseau





# I'MTech.

---

L'actualité scientifique  
et technologique de l'IMT.

[www.imt.fr](http://www.imt.fr)

**Twitter :** @IMTFrance

**LinkedIn :** IMT

19 place Marguerite Perey,  
91120 Palaiseau

