

# I'MTech.

LE MEILLEUR DE 2024



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*



Institut Mines-Télécom

**I'MTech.**

---

**LE MEILLEUR DE 2024**

---

# ÉDITO

---

Cette année encore, le média d'actualités scientifiques de l'Institut Mines-Télécom, l'MTech, ouvre une fenêtre sur les travaux de recherche passionnants menés au sein des écoles de l'IMT. À travers ce best of 2024, nous explorons des thématiques cruciales pour répondre aux grands défis de notre époque : la souveraineté numérique, la transition énergétique, la santé et l'industrie du futur.

L'IA, en prenant de plus en plus de place dans nos vies professionnelles et personnelles, soulève autant d'espoirs que de défis. Derrière les prompts des modèles génératifs ou dans la protection des sites sensibles, elle questionne les notions de souveraineté numérique et de sobriété technologique. Dans le domaine de la santé, elle promet des avancées majeures, mais pose des dilemmes éthiques cruciaux, notamment sur la gestion des données sensibles.

Au-delà de l'IA, ce best of illustre d'autres réponses aux défis actuels : les nouvelles formes de production d'énergie, la valorisation des ressources ou encore l'industrie du futur responsable. Des biodéchets transformés en énergie aux lignes d'assemblage circulaires, ces recherches démontrent que l'innovation peut rimer avec durabilité.

Cette sélection témoigne d'une science en dialogue avec le monde, où chercheurs et chercheuses imaginent les solutions pour demain.

Bonne lecture,

**Benjamin Vignard**  
**Rédacteur en chef**





---

# SOMMAIRE

---

ÉDITO	3
<b>SOUVERAINETÉ NUMÉRIQUE ET SOBRIÉTÉ</b>	<b>7</b>
DERRIÈRE LES PROMPTS, LES RISQUES INATTENDUS DE L'IA GÉNÉRATIVE	8
L'IA AU RADAR POUR LA PROTECTION DES SITES SENSIBLES	14
MICHÈLE WIGGER, EXPLORER LES LIMITES FONDAMENTALES DES SYSTÈMES D'INFORMATION	18
<b>ÉNERGIE, ÉCONOMIE CIRCULAIRE ET SOCIÉTÉ</b>	<b>23</b>
CINQUANTE NUANCES D'EAU PROPRE	24
PLUIES TORRENTIELLES, LA POLLUTION D'UN LONG FLEUVE TRANQUILLE	30
VALORISATION DES BIODÉCHETS : LA MÉTHANISATION MET LES GAZ	34
<b>INGÉNIERIE SANTÉ ET BIEN-ÊTRE</b>	<b>39</b>
STÉPHANE AVRIL, LA MÉCANIQUE DES TISSUS HUMAINS	40
STRESSID, UNE BASE DE DONNÉES POUR DÉTECTER LE STRESS	46
VIE PRIVÉE OU ÉQUITÉ ? LE CRUEL DILEMME DES DONNÉES DE SANTÉ À L'ÈRE DE L'IA	50
<b>INDUSTRIE DU FUTUR RESPONSABLE</b>	<b>57</b>
QUAND LES LIGNES D'ASSEMBLAGE DEVIENNENT CIRCULAIRES	58
QUÈSACO LA FABRICATION ADDITIVE ?	62
ALGIFOAM, HISTOIRE D'UNE MOUSSE EN EXPANSION	66



# I

---

## SOUVERAINETÉ NUMÉRIQUE

---

### 1

**DERRIÈRE LES PROMPTS,  
LES RISQUES INATTENDUS  
DE L'IA GÉNÉRATIVE**

---

### 2

**L'IA AU RADAR POUR LA  
PROTECTION DES SITES  
SENSIBLES**

---

### 3

**MICHÈLE WIGGER,  
EXPLORER LES LIMITES  
FONDAMENTALES  
DES SYSTÈMES  
D'INFORMATION**

---

---

# DERRIÈRE LES PROMPTS

---

## LES RISQUES INATTENDUS DE L'IA GÉNÉRATIVE

---

L'AI Act récemment adopté par l'UE établit un cadre juridique pour une utilisation sûre et éthique de l'IA. Mais qu'en est-il de l'IA générative ? À Institut Mines-Télécom Business School, une chercheuse et son doctorant étudient à partir d'incidents réels les risques associés à l'IA générative, et en particulier ChatGPT. Ces travaux mettent en lumière les enjeux éthiques très forts et l'émergence de risques multifacettes liés aux nouveaux usages de cette technologie révolutionnaire



**C**hatGPT s'est rapidement intégré dans la vie quotidienne de tout un chacun, facilitant des tâches variées comme la rédaction d'emails professionnels, la compréhension de concepts techniques et scientifiques, ou encore la génération de contenus créatifs. Pourtant, la maîtrise de l'outil développé par OpenAI reste souvent limitée, et beaucoup ne saisissent pas l'étendue de son potentiel. Quelle proportion d'utilisateurs et utilisatrices sait vraiment comment cette intelligence artificielle opère derrière le prompteur, ou même plus simplement ce que signifie « ChatGPT » ?

GPT – pour Generative Pre-trained Transformer — littéralement Transformer génératif pré-entraîné – est l'un des grands modèles de langage (ou LLM) les plus connus. Les LLM sont des algorithmes de traitement du langage naturel (NLP) qui utilisent des réseaux de neurones, souvent de type Transformer, pour générer du langage humain. Ils sont entraînés sur des corpus de textes gigantesques et apprennent à prédire le mot suivant dans une séquence, ce qui leur permet de générer du texte cohérent et contextuellement pertinent.

Les LLMs font partie d'une nouvelle forme d'IA, appelée « IA générative » car capable de générer du contenu : du texte, mais aussi de l'image (avec des systèmes comme DALL-E), de la musique ou encore du code. « L'IA générative s'inscrit dans la continuité des technologies d'IA sauf qu'elle amène des usages différents, avec de nouvelles opportuni-

tés, mais aussi de nouveaux risques avec des enjeux éthiques très conséquents », souligne Christine Balagué. Avec son doctorant, Ahmad Haidar, cette Professeure en Sciences de Gestion, experte en IA et management à Institut Mines-Télécom Business School étudie la nature des risques de l'intelligence artificielle générative. Leurs travaux feront l'objet d'une publication scientifique.

### ChatGPT, AI Act, ... les grands chamboulements de l'IA

Christine Balagué bénéficie initialement d'une expertise étendue dans les domaines du numérique et des réseaux sociaux. Il y un an et demi, la chercheuse

---

## « L'IA générative suscite beaucoup d'imaginaire et de peurs. »

---

commence à s'intéresser à l'IA générative et participe à de nombreux travaux pluridisciplinaires sur le sujet. Parmi ses récentes publications, deux rapports parus fin 2023 et début 2024 pavent particulièrement la voie à ses recherches actuelles : « ChatGPT: research evidence-based controversies, regulations and solutions » et Un an après l'arrivée de ChatGPT: Réflexions de l'Obvia sur les enjeux et pistes d'action possibles face à l'IA générative (lire encadré plus bas). « L'IA générative, notamment ChatGPT, suscite beaucoup d'imaginaire et de peur. C'est pourquoi nous avons procédé à une

---

## DERRIÈRE LES PROMPTS, LES RISQUES INATTENDUS DE L'IA GÉNÉRATIVE

---

revue de littérature dans différentes disciplines, afin de bien cerner, sur la base de données, les enjeux de la technologie, ses risques et ses opportunités », retrace la chercheuse.

Alors qu'elle mûrit la suite de ces travaux, le projet d'une loi européenne sur l'intelligence artificielle, plus connue sous le nom d'EU AI Act, émerge. Cette proposition législative, officiellement adoptée le 21 mai 2024 par le Conseil européen, vise à établir un cadre juridique pour réglementer l'utilisation des technologies d'IA. L'objectif : garantir que l'IA utilisée dans l'UE soit sûre, transparente, éthique et respectueuse des droits fondamentaux.

L'AI Act propose une approche classant les systèmes d'IA en quatre niveaux de risque : inacceptable, élevé, limité et minimal. Ce contexte, ainsi que le financement d'une thèse par le réseau de recherche Good In Tech – celle d'Ahmad Haidar sur l'IA responsable – constituent un terrain fertile aux explorations autour des risques spécifiques de l'IA générative, notamment de ChatGPT.

### Un cadre de classification des risques fondé sur des incidents réels

Comme pour les précédentes études, ces recherches vont au-delà du prospectif : « Il ne s'agit plus à ce stade de soutenir vaguement que l'IA générative a des conséquences sur la désinformation », étaye Christine Balagué. « Nous essayons de le prouver par des données réelles d'analyse des risques. » Pour cela, Ahmad Haidar s'appuie sur une base d'incidents liés à l'IA, fournie par l'Organisation de coopération et de développe-





ment économiques (OCDE). Il en extrait les incidents liés spécifiquement à l'IA générative recensés au cours de l'année suivant le lancement de ChatGPT.

À partir de 858 événements collectés, le doctorant et son encadrante identifient trois grandes classes de risques : ceux liés aux données, à la gouvernance et au respect de la vie privée, ceux relatifs au contenu, et ceux relatifs à l'usage. L'impact et les conséquences de ces risques sont évalués à des échelles distinctes : individuelle, sociétale, organisationnelle, et sociale et environnementale. Ce cadre de classification fondé sur des données réelles permet aux deux chercheurs d'entrevoir des risques jusque-là non-identifiés.

« La génération de fausses informations par l'IA est bien sûr un risque très important pour la cohésion sociale, la sécurité nationale, la stabilité politique ou économique, mais cette nouvelle recherche démontre qu'il y en a beaucoup d'autres », pointe Ahmad Haidar. « Notamment à l'échelle individuelle, autour de la psychologie et du bien-être, mais aussi, à l'échelle des organisations, en matière de réputation, ce qui n'avait pas encore été démontré. » Les deux scientifiques mettent également en évidence que le risque environnemental de l'IA générative est très peu répertorié, « parce qu'il est peu perçu par les acteurs économiques, alors qu'il est réel ». Difficile en effet pour les utilisateurs et utilisatrices de prendre conscience des ressources computationnelles requises pour le fonctionnement de ces systèmes.

### Un outil de masse, livré sans notice

Pour Christine Balagué, qui a longuement travaillé sur les réseaux sociaux, l'IA générative suit un modèle d'acceptation de la technologie (TAM) similaire. « Les usages sont totalement différents mais ce sont deux produits gratuits, simples et accessibles. Même si la version gratuite de ChatGPT est limitée et qu'il faut rapidement payer pour avoir une version plus performante, des offres très compétitives se développent comme Gemini ou Llama », analyse la chercheuse.

---

## « Très peu de gens sont formés aux risques potentiels. »

---

En s'appuyant sur deux facteurs, la facilité d'usage et le bénéfice perçu, le TAM prédit une adoption massive de l'IA générative par les entreprises et le grand public. « Sauf que très peu de gens sont formés aux risques potentiels ! », alerte Christine Balagué. La chercheuse fait un parallèle avec la prise en main d'une voiture : « Sans formation, il est très probable d'avoir un accident, voire même de tuer, mais en apprenant à conduire et à respecter les règles, c'est un outil formidable qui offre énormément de possibilités. Le problème c'est que pour le moment, l'IA générative n'a pas encore son code de la route... »

### Apprendre à « prompter »

Même si l'AI Act va imposer des régulations assez strictes sur l'IA, les LLM bénéficient encore d'un contexte favorable,

soutenus, selon les deux chercheurs, par une vision « techno-solutionniste ». Seule issue en attendant d'éventuelles mesures plus ciblées sur l'IA générative : sensibiliser les usagers aux risques, et les éduquer, en particulier à l'art subtil du prompt.

Point d'entrée de ChatGPT, le prompt est loin d'être objectif et guide la réponse fournie. « Selon les prompts, il est possible d'obtenir des résultats très différents pour une même demande. C'est pourquoi il y a vraiment des techniques pour 'prompter' et contourner les hallucinations [ndlr : lorsque le modèle produit des réponses qui semblent crédibles, mais qui sont en réalité fausses ou sans fondement, comme des faits erronés ou des citations inventées...] », argumente Christine Balagué. Pour que l'IA comprenne précisément une requête, une possibilité est de lui « apprendre », en l'alimentant par exemple avec du contenu vérifié.

La chercheuse salue ainsi l'introduction de cours de prompt dans les grandes écoles, mais déplore néanmoins que rien de semblable ne s'esquisse à l'échelle du grand public. « Nous ne voulons pas non plus être pessimistes par rapport à l'IA générative », nuance-t-elle. « ChatGPT nous aide et améliore de manière incroyable la productivité d'une multitude de métiers. Les opportunités sont très nombreuses mais il faut aussi – à tous les niveaux : individus, entreprises... – avoir conscience des risques, les évaluer et se préparer à les gérer. »

## GOOD IN TECH, LA TECHNOLOGIE POUR LE MEILLEUR, PAS POUR LE PIRE

---

Christine Balagué est la fondatrice et coordinatrice de Good In Tech, un réseau de recherche partenariale entre l'Institut Mines-Télécom et Sciences Po. Son objectif : repenser l'innovation et la technologie comme moteurs d'un monde meilleur, pour et par les humains. Le programme de recherche, interdisciplinaire et prolifique, se concentre sur deux axes : algorithmes, données et société, et la responsabilité numérique des entreprises. La chercheuse est également membre de l'observatoire Obvia, qui étudie l'impact de l'IA sur la société au Canada.

Rédigé par Ingrid Colleau.

---

# L'IA AU RADAR

---

## POUR LA PROTECTION DES SITES SENSIBLES

---

Sûrs et robustes, les radars sont utilisés pour faire de la détection mais aussi de la surveillance. Ils délivrent en revanche des signaux, et non des images, dont l'interprétation peut s'avérer complexe. L'utilisation d'intelligence artificielle pour compléter les algorithmes actuels se présente comme une solution technologique à ce problème. Le laboratoire RadaR-IO, commun à IMT Mines Albi et à l'entreprise EPSI, cherche à développer et à industrialiser cette solution.





n ne les trouve pas qu'aux abords de la route ! Discrets, les radars assurent également la surveillance infailible des sites sensibles ou des grands événements. Les avantages de ce système, basé sur l'émission d'ondes électromagnétiques, sont nombreux comparés à la vidéosurveillance : détection d'objets non visibles – dissimulés derrière des buissons ou des arbres par exemple – efficacité quelles que soient les conditions météorologiques (pluie, neige, brouillard), longue portée ou encore protection de la vie privée.

Les ondes électromagnétiques émises par radar se propagent dans l'espace et, lorsqu'elles entrent en contact avec un objet, sont renvoyées vers l'émetteur. Celui-ci détecte les signaux réfléchis (aussi appelés écho) et calcule ensuite la distance, la direction et la vitesse de l'objet en fonction du temps mis par l'écho pour revenir. L'interprétation de ces informations permet de repérer et de suivre des objets dans l'espace. Des algorithmes existants exploitent ensuite ces résultats pour émettre des diagnostics, mais ils pourraient être encore plus performants. « Les systèmes actuels sont très déterministes et atteignent clairement leurs limites en termes de flexibilité et d'adaptabilité à de nouvelles intrusions, comme les drones par exemple », illustre Frédérick Benaben, chercheur spécialisé dans les systèmes d'information à IMT Mines Albi.

C'est pourquoi la société EPSI, qui fournit des radars de surveillance pour la protec-

tion d'activités et de sites sensibles, a sollicité l'expertise d'IMT Mines Albi dans les technologies d'intelligence artificielle (IA), pour les exploiter et les intégrer à ses systèmes. Cette collaboration se concrétise par un laboratoire commun, RadaR-IO, qui a été inauguré le 6 décembre 2023 pour une durée de cinq ans.

### Une structure de recherche complémentaire et flexible

Un laboratoire commun est une structure privée-publique qui résulte du besoin exprimé par une entreprise – en l'occurrence EPSI – autour d'un sujet de recherche. Plutôt que de construire une équipe dédiée en interne, l'entreprise s'associe avec un laboratoire déjà expert du sujet, ici, le centre Génie Industriel d'IMT Mines Albi. Le laboratoire commun RadaR-IO se positionne donc à l'intersection de ces deux entités, et de leurs compétences et limites respectives : l'entreprise EPSI qui fabrique des radars performants mais est limitée dans l'interprétation des signaux, et inversement, l'équipe d'IMT Mines Albi qui ne capte pas de données mais sait les interpréter.

« Notre expertise est d'utiliser l'IA pour analyser des données complexes, textuelles, images, ou bien issues de capteurs, de météo, de trafic..., mais jamais en provenance de radars », contextualise Frédérick Benaben. « C'est donc un champ d'investigation intéressant pour nous, qui vient élargir le panel de données que nos outils d'IA sont capables d'interpréter. » La co-construction devrait se matérialiser à toutes les phases du projet, tant sur des aspects techniques qu'applicatifs, portée notamment « par la

connaissance-métier d'EPSI – de l'état de l'art, des protocoles expérimentaux... – et par nos idées, parfois hors de leur périmètre. » Le laboratoire commun facilite surtout le transfert vers l'industrialisation.

### Fausse données pour vrai diagnostic

« Notre proposition scientifique est de compléter les algorithmes d'EPSI, basés sur des règles, par des réseaux de neurones », expose Frédérick Benaben. L'intérêt de ces réseaux ? Plus on leur fournit de données, plus ils sont précis et efficaces. « Le problème, c'est justement de les alimenter », tempère le chercheur. « Car EPSI œuvre sur des sites sensibles, sur lesquels il est compliqué de partager des données. » La première contribution d'IMT Mines Albi sera donc de générer des données de synthèse pour entraîner les réseaux neurones : d'abord sur des objets indéformables (drones, véhicules...), puis sur des objets « déformables » (humains, animaux...) plus complexes à interpréter.

Une manière de « fabriquer » des données pour un objet indéformable est d'enregistrer la signature radar de l'objet sous plusieurs angles, comme une photographie, de générer une trajectoire fictive et d'y associer les signatures correspondant aux points de vue du radar sur cette trajectoire. Une grande quantité de fausses données peut ensuite être obtenue en simulant informatiquement des combinaisons de trajectoires possibles et de signatures radar. Une autre manière est de faire de « l'augmentation », c'est-à-dire de générer des données à partir de données existantes « comme une photo manipulée sous plusieurs angles, zoomée

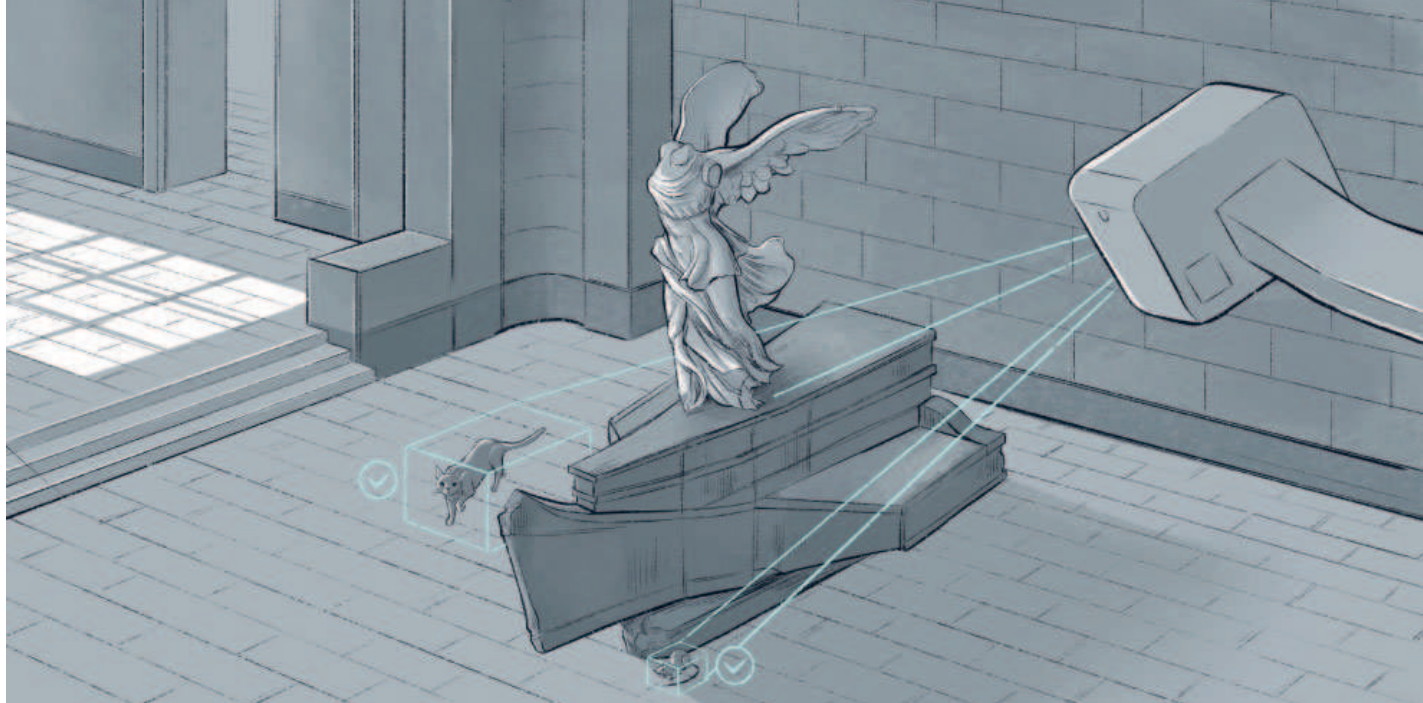
ou décalée sur un côté, qui donnerait d'autres photos ».

Pour la représentation des objets déformables, les scientifiques explorent notamment la piste de l'addition de mouvements diagnostiqués, en clair : est-ce que la signature d'une personne qui marche correspond à la superposition de la signature d'un bras en mouvement, d'une jambe, de deux jambes, etc. ? « Il y a à priori peu de variabilités entre les individus, donc nous espérons que la signature est sensiblement identique entre deux personnes qui font la même chose. » L'expertise d'EPSI sera particulièrement précieuse sur cette étape.

### Des réseaux de neurones spécialisés

Plutôt que de créer un seul système de détection généraliste, à priori complexe à entraîner, les équipes de recherche de RadaR-IO envisagent de développer plusieurs types de réseaux de neurones, avec des compétences différentes et complémentaires. La mise en parallèle de plusieurs réseaux de neurones plus ou moins spécialisés augmenterait la précision des diagnostics.

Seul hic. « On peut imaginer développer un réseau de neurones spécialisé sur les petits animaux ou sur les véhicules par exemple. Le problème, c'est que nous ignorons comment ils fonctionnent et quelles sont leurs règles de classification ! », révèle Frédérick Benaben. « Difficile donc d'anticiper si la taille ou la façon de se déplacer sera un critère de classification. » Cette étape d'entraînement pose aussi la question du niveau de précision : est-il pertinent que le système sache dif-



férencier un lapin d'un chat par exemple ?

Les données de synthèse seront donc soumises aux différents réseaux de neurones développés et le défi des scientifiques, sous la coupe d'Aurélien Montarnal, également chercheuse à IMT Mines Albi, sera de comprendre ou d'interpréter ce qui en sort. L'efficacité des systèmes développés in fine devra être comparée à celles des outils de diagnostics dont dispose actuellement EPSI.

### Place à l'action !

Une fois les données des radars récupérées et interprétées, l'ambition de RadaR-IO est de proposer une offre complémentaire de recommandations, voire de mesures déclenchées en direct, en fonction de ce qui est détecté. « Ce qui nous intéresse, au-delà du simple diagnostic, c'est l'automatisation, la semi-automatisation et la proposition d'actions qui sont également dans notre domaine de compétences », soutient Frédéric Benaben. L'intégration d'aides à la gestion de crise doit logiquement prendre en compte le marché d'EPSI et les besoins de ses clients.

Une alerte sur un site surveillé peut impliquer une procédure simple et directe : lancer des ultrasons si des oiseaux sont détectés dans un aéroport, ou établir un périmètre de sécurité autour d'une œuvre d'art par exemple. « En revanche, dans le cas d'un établissement pénitencier, l'éventail d'options est beaucoup plus élaboré. Ce n'est pas parce que le système identifie une personne qui rampe, qu'il faut lui tirer dessus », relève le chercheur. « Ces bâtiments sont soumis à un ensemble de règles auxquelles nos outils doivent également se soumettre. »

Ces règles sont généralement prescrites dans une documentation dense et complexe, mais depuis laquelle des outils d'IA peuvent extraire des données exploitables en consignes. Celles-ci viendraient ensuite alimenter des mécanismes d'exploitation et de réponse au diagnostic radar. « Nous n'en sommes pas encore là, mais ce sont des travaux que nous explorons par ailleurs et qu'il nous semble vraiment intéressant d'intégrer dans ce contexte-là », projette Frédéric Benaben.

Rédigé par Ingrid Colleau.

---

# MICHÈLE WIGGER

---

## EXPLORER LES LIMITES FONDAMENTALES DES SYSTÈMES D'INFORMATION

---

Après une première bourse ERC, reçue en 2017, Michèle Wigger reçoit une seconde bourse européenne pour soutenir ses travaux en théorie de l'information. La chercheuse de Télécom Paris continue d'étudier les limites fondamentales de systèmes de communication mais va principalement concentrer ses efforts sur les outils théoriques.

**L**a « théorie de l'information » fournit un cadre mathématique pour comprendre comment mesurer et optimiser le transfert d'informations. Quoique développée par Claude Shannon en 1948, elle pose les jalons de nombreux travaux actuels dans de multiples domaines comme les communications numériques, la compression de données, la cryptographie, ou encore l'apprentissage. « Les champs d'application sont très vastes, donc on peut naviguer dans le sujet, on ne s'ennuie pas ! », confirme avec enthousiasme Michèle Wigger.

---

## « L'évolution permanente des télécommunications est un moteur pour moi. »

---

Dès sa thèse, la chercheuse de Télécom Paris fait de la théorie de l'information son sujet de prédilection. Après une thèse de master et une thèse de doctorat saluées à l'ETH de Zurich – toutes deux récompensées par une médaille de l'ETH – elle poursuit un post-doctorat à l'université de Californie à San Diego, et rejoint fin 2009 le département Communications et électronique de Télécom Paris.

Une grande partie de ses travaux portent sur les télécommunications, un secteur qui a énormément évolué depuis quelques décennies. « Aujourd'hui les 'télécom' vont au-delà de la simple transmission de données d'un point à l'autre.

Elles servent des buts très précis et variés, et pour en augmenter l'efficacité, elles doivent être adaptées à ces buts. La coordination entre des véhicules autonomes pour qu'ils n'aient pas d'accident en est un exemple typique. C'est pourquoi on parle désormais de 'task-oriented' ou 'goal-oriented communication' », contextualise la chercheuse. « Cette évolution permanente des télécommunications est vraiment un moteur pour moi et pour les projets que je mène »

### Tendre vers l'optimum

En 2017, le projet « Context- and Task-Oriented Communications » porté par Michèle Wigger bénéficie d'une bourse d'excellence européenne (ERC Starting Grant). Le projet, sur cinq ans, consiste à établir les limites fondamentales de différents scénarios de communication, par exemple sur les réseaux avec caches : des mémoires de stockage côté utilisateur. Le principe est de modéliser mathématiquement un système et d'établir ses limites, en démontrant à la fois qu'elles sont atteignables, et qu'elles ne peuvent pas être dépassées. Cela peut être le débit le plus élevé, le réseau de compression le plus grand, ou encore la probabilité d'erreur de détection la plus faible.

Au cours de ce projet, la chercheuse et son équipe se concentrent notamment sur les schémas de codage pour diverses applications. Ils conçoivent et mettent donc en pratique de nouveaux schémas, capables d'envoyer plus d'information que des codes de communication traditionnels. Leur efficacité est vérifiée par leur implémentation dans une plateforme de démonstration. Pour certains sys-

tèmes, l'équipe prouve aussi théoriquement, par des méthodes mathématiques, la structure du code optimal et le débit associé. « En identifiant le débit optimal, nous cherchons à voir à quel point les codes améliorés que nous avons développés s'en rapprochent », argumente la chercheuse.

L'équipe du projet travaille également sur les réseaux de calcul distribué, des systèmes dans lesquels les données sont distribuées entre plusieurs ordinateurs connectés, permettant d'exécuter un calcul plus efficacement. Or ces calculs distribués sont soumis à des contraintes rigoureuses en matière de puissance et d'énergie : les ordinateurs doivent pouvoir communiquer entre eux de manière peu énergivore. Les scientifiques de Télécom Paris se penchent donc sur les limites relatives aux différents scénarios de com-

munication de ces systèmes.

### Démontrer l'infranchissable

Si Michèle Wigger s'efforce de pousser ses recherches mathématiques et théoriques vers des systèmes pratiques, elle ne cache pas sa préférence. « Pour le premier projet, nous sommes allés assez loin dans l'implémentation, mais ce qui m'intéresse dans l'étude des limites, c'est vraiment l'aspect fondamental, les théorèmes, les techniques de preuve... Pour cela, un papier et un crayon suffisent », précise-t-elle en souriant.

Fin 2023, elle revient donc à ses amours théoriques et reçoit une seconde bourse européenne (ERC Consolidator Grant) pour explorer les limites fondamentales des systèmes de détection (Fundamental Limits of Sensing Systems). Le projet – également sur cinq ans, à dater de juin





2024 – va se concentrer essentiellement sur les techniques de preuve mathématiques pour démontrer qu'il n'est pas possible de dépasser les limites d'un système. Un défi théorique puisque, comme le développe la chercheuse, « à l'analyse d'un système, il est plus simple de montrer qu'on peut atteindre une valeur spécifique – par exemple, un meilleur débit – que de montrer qu'on ne peut pas aller au-delà d'une certaine valeur. C'est beaucoup plus abstrait. »

Ces recherches théoriques s'inscrivent tout de même dans le cadre pratique de la détection et la communication intégrées – plus connu sous l'acronyme ISAC (Integrated sensing and communication) – et un objectif d'application aux capteurs automobiles et aux robots industriels. Une technique de preuve relativement nouvelle, appelée « change of measure converse », sera particulièrement explorée par la chercheuse et sa future équipe, car adaptée à l'analyse de ces systèmes.

### Explorer de nouveaux territoires

Dans ce projet, la chercheuse prévoit également un axe de recherche quantique. L'inspiration lui vient tout droit de sa récente année sabbatique, à cheval entre le département de physique de l'ETH et le département de mathématiques de l'université de Zurich. Au cours de cette expérience, la scientifique se familiarise avec les outils de théorie de l'information nécessaires à l'attaque de systèmes de communication de nature quantique, ainsi qu'avec le codage dit « post-quantique ». Ce dernier est destiné à des applications cryptographiques, afin de résister à de futures attaques quantiques.

L'attrait de Michèle Wigger pour la cryptographie et le quantique remonte à ses études. « Si je devais refaire une thèse, je la ferais sur un de ces domaines. Le problème c'est que la théorie de l'information me passionne trop ! J'ai plein d'envies, mais je n'arrive jamais à passer à autre chose », plaisante-t-elle. La chercheuse relate néanmoins avoir fait le point sur sa carrière : « Je suis à mi-parcours et je n'avais jamais pris de congé sabbatique. Donc je me suis dit que c'était le moment et je me suis lancée ! »

L'intégration de la discipline quantique dans ses travaux invite la chercheuse à envisager de nouvelles collaborations. « Il y a énormément d'équipes quantiques sur le plateau de Saclay avec lesquelles j'espère pouvoir travailler, sur ce projet et à l'avenir ». Des collaborations qui occupent une place importante dans le parcours de la scientifique, elle-même très impliquée dans la communauté de recherche autour de la théorie de l'information. Actuellement Michèle Wigger participe à l'organisation de l'édition 2025 de l'IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), la plus grande conférence dans son domaine. « Ce n'est pas un très grand milieu donc il est aisé de créer des liens lors de sommets ou de conférences. » Ces rencontres, la chercheuse les compare à un fleuve, car « on se laisse emporter par les idées et problématiques soulevées par d'autres membres de la communauté, par les techniques présentées... ». Nul doute que pour cette exploratrice des limites, la croisière réserve encore de nombreuses découvertes.

Rédigé par Ingrid Colleau.



# II

---

## ÉNERGIE ET SOCIÉTÉ

---

### 1

CINQUANTE NUANCES  
D'EAU PROPRE

---

### 2

PLUIES TORRENTIELLES,  
LA POLLUTION  
D'UN LONG FLEUVE  
TRANQUILLE

---

### 3

VALORISATION DES  
BIODÉCHETS : LA  
MÉTHANISATION  
MET LES GAZ

---

---

# CINQUANTE NUANCES D'EAU PROPRE

---

La reconnaissance croissante de l'impact des rejets polluants sur les écosystèmes aquatiques fait émerger l'urgence d'une gestion plus rigoureuse des eaux traitées. À IMT Mines Alès, deux chercheurs développent des méthodes de caractérisation pour les milliers de micropolluants existants. Une tâche colossale qui constitue une première étape vers l'élaboration de systèmes de remédiation pour ces milieux dégradés.

Quelle satisfaction d'arriver au bout d'une corvée de nettoyage ! Mais vous êtes-vous déjà demandé où partait l'eau de lavage grise et sale que vous videz généralement dans votre évier ou vos toilettes ? À la station d'épuration, me direz-vous. Oui, mais voilà : les systèmes de traitement actuels, conçus pour éliminer les principaux contaminants issus de la matière organique (carbone, phosphore, azote) peinent à filtrer d'autres composés comme les métaux et les micropolluants. Typiquement, les composés pharmaceutiques que nous ingérons ne sont pas toujours bien métabolisés : ils finissent dans les eaux usées et, faute de traitement adéquat, dans les rivières.

Ces composés résiduels, bien que présents en quantités infimes, ont des effets néfastes sur les milieux naturels, et en particulier les écosystèmes aquatiques. Ils perturbent notamment le système endocrinien des espèces locales, entraînant des déséquilibres comme une large prédominance de poissons femelles dans certaines rivières. De nouvelles directives visent cependant à mieux régler le traitement de l'eau afin que les micropolluants soient éliminés plus efficacement.

Depuis le 20 juin 2023, un arrêté impose aux installations industrielles un suivi strict des rejets de substances per- et polyfluoroalkylées, plus connues sous le nom de PFAS. De nouveaux amendements, proposés dans le cadre d'une directive sur la qualité des eaux destinées à la consommation humaine, devraient également

fixer des objectifs seuils pour ces composés ; tandis que les substances pharmaceutiques, parmi bien d'autres, sont en cours d'intégration dans une directive cadre sur la qualité environnementale de l'eau. De telles dispositions laissent imaginer que des normes de traitement rafforzées pourraient être introduites pour les substances les plus préoccupantes... à condition de les avoir identifiées au préalable !

### **Polluants domestiques, industriels, agricoles : tous à l'eau !**

Nos activités quotidiennes introduisent effectivement à elles-seules une multitude de polluants dans le cycle de l'eau : médicaments, détergents, cosmétiques, insecticides... Et les rejets domestiques ne sont évidemment pas les seuls en cause. L'industrie et l'agriculture déversent également leur lot de polluants : produits de combustion, perfluorés, anti-corrosifs, pesticides... Toutes ces substances représentent des dizaines de milliers de composés qui sont peu ou mal traités par les systèmes de retraitement.

Afin d'évaluer les performances de ces systèmes, il faut être en mesure de suivre les polluants dans les eaux, en entrée et en sortie. Mais il faut savoir quoi chercher, et les possibilités sont vastes ! Andrés Sauvêtre et François Lestremau, tous deux chercheurs sur la plateforme Diagnostic de polluants Organiques, Ressources en Eau et Environnement (DOREE) d'IMT Mines Alès, dédient une partie de leurs travaux à la caractérisation des innombrables contaminants dans les environnements aquatiques. Accompagné de Marine Bertrand, techni-





cienne de la plateforme, le duo travaille sur ces thématiques en partenariat avec l'UMR HydroSciences Montpellier (HSM). « Les pesticides sont bien connus car suivis depuis de nombreuses années, mais c'est loin d'être le cas de toutes les familles de substances. La famille des perfluorés par exemple regroupe près de 4 500 composés distincts dont nous suivons quelques-uns depuis 2015 seulement », expose François Lestremau. « Il reste donc beaucoup d'incertitudes. »

En plus d'identifier le maximum de polluants, un des enjeux de ces travaux analytiques est de caractériser aussi les produits de dégradation. « On peut mesurer un polluant en entrée et constater qu'il a disparu à la sortie, sauf que le produit s'est dégradé et que les sous-produits de dégradation sont peut-être tout aussi toxiques », alerte François Lestremau. « C'est un défi monumental compte tenu de toutes les possibilités de transformation », complète Andrés Sauvêtre.

---

**« Une substance bénigne à des niveaux faibles, peut être très préoccupante pour le milieu. »**

---

#### Des diagnostics au croisement de la chimie et de la biologie

Les deux chercheurs participent donc au développement de méthodes de caractérisation pour des familles de composés qui n'étaient pas suivies jusqu'alors, mais aussi au développement d'outils, comme des échantillonneurs passifs. Déployés dans l'eau pour quelques semaines, ils accumulent les résidus qui sont ensuite extraits pour évaluer les niveaux moyens d'exposition. Ils s'opposent aux techniques d'échantillonnage ponctuel qui mesurent à un instant précis. « Dans le cas de pics exceptionnels de pollution par exemple, si les mesures ne sont pas réalisées au moment-même, elles ne rendent pas compte de l'état chimique de l'environnement. Alors que les échantillonneurs passifs permettent d'avoir une vision plus globale », argumente Andrés Sauvêtre.



Les chercheurs ont expérimenté ces dispositifs en Martinique pour mesurer les niveaux de chlordécone, ou encore dans le cadre d'un projet régional, pour faire le bilan de la pollution des cours d'eau locaux. « Nous avons ainsi identifié une trentaine de pesticides et plus de cinquante produits pharmaceutiques », relate François Lestremau. Ce projet particulier, porté par des biologistes, a mis en évidence des effets d'adaptation de certains poissons à cette pollution, notamment des effets épigénétiques.

La collaboration transdisciplinaire est une composante forte des travaux d'Andrés Sauvêtre et François Lestremau, car elle permet de faire le lien entre la présence de polluants et l'impact sur le milieu et les écosystèmes. « Nous n'avons pas de compétences en écotoxicologie, c'est pourquoi nous faisons appel à des partenaires extérieurs. Une substance a priori bénigne car identifiée à des niveaux très faibles, peut en réalité être très préoccupante pour le milieu », développe François Lestremau.

#### La nature au secours de l'eau

Les deux collaborateurs dédient également une part importante de leurs recherches au développement de systèmes de remédiation. Ces travaux sont complémentaires aux premiers car si l'analyse est indispensable pour rendre compte des niveaux de pollution des eaux de rejet, elle permet également de vérifier a posteriori l'efficacité et la performance des traitements. Les chercheurs explorent ainsi via plusieurs projets diverses technologies de remédiation, en

particulier des solutions d'origine naturelle.

Parmi elles, des bases membranaires biologiques, couplées à des systèmes électrochimiques, ou encore des filtres plantés. Ces derniers décomposent les polluants et purifient l'eau grâce à l'interaction entre des plantes aquatiques (type roseaux, joncs, ...), un substrat (gravier ou sable) et les microorganismes qui s'y développent. « Notre rôle est d'essayer de comprendre les mécanismes en jeu – d'absorption, de dégradation, de transformation des produits... – pour proposer une solution optimisée de traitement », détaille Andrés Sauvêtre

---

**« Nous essayons d'implanter des microorganismes susceptibles de dégrader des polluants plus efficacement. »**

---

#### Booster les filtres plantés

Une des limites du filtre planté est que pour en augmenter la performance, il faudrait augmenter le temps de séjour de l'eau dans le système ou avoir une surface de filtre plus importante. Concrètement, quand le filtre planté est utilisé pour traiter les eaux usées domestiques, il est conçu pour gérer un certain volume d'eau avec une charge polluante donnée. Comme le volume d'eaux usées généré par un foyer ou un groupe de foyers est généralement constant (ou peut augmenter lors de périodes de forte utilisation),

le temps de séjour de l'eau dans le filtre ne peut pas facilement être allongé sans compromettre la gestion des eaux usées. D'un autre côté, augmenter la surface du filtre – c'est-à-dire augmenter la surface de plantes dans le milieu – n'est pas non plus une solution durable.

Les chercheurs étudient donc des pistes pour améliorer l'efficacité des filtres plantés : l'aération forcée par exemple, ou la bio-augmentation avec des microorganismes. « Nous essayons d'implanter dans le milieu des microorganismes susceptibles de dégrader certaines familles de polluants plus efficacement que les colonies microbiennes déjà présentes, en particulier des souches de champignons », explicite Andrés Sauvêtre. Les chercheurs essaient également de booster ces systèmes avec des adsorbants comme le biochar (charbon issu de la pyrolyse de biomasse), qui permet notamment de capturer et de stocker durablement le carbone.

### Choisir sa qualité d'eau traitée

En dépit de ces limites, les filtres plantés constituent une solution écologique, durable, et moins coûteuse que de nombreuses technologies plus avancées. En comparaison de certains systèmes qui génèrent des concentrats qu'il faut retraiter derrière, ils produisent moins de déchets, et les déchets produits sont souvent moins nocifs et plus facilement réutilisables dans un contexte agricole ou énergétique. De même, l'eau en sortie n'est pas ultrapure, mais elle est adaptée à une réutilisation à des fins agricoles par exemple.

« Pour chaque usage, il y a des réglementations et des seuils plus ou moins exigeants à respecter. Pour une eau destinée à l'irrigation de cultures non alimentaires (par exemple cultures industrielles, énergétiques), il n'est pas nécessaire d'avoir une qualité très élevée », pointe Andrés Sauvêtre. Un procédé appelé « osmose inverse » donne par exemple de meilleurs résultats, mais coûte cher à mettre en œuvre, et produit une quantité non-négligeable de déchets. « Il faut donc trouver, suivant les besoins, le meilleur compromis technologique entre performance, coût et déchets produits. C'est pourquoi il est indispensable d'analyser de manière pluridisciplinaire le cycle de vie des produits et leur impact sur les écosystèmes », conclut le chercheur. ▲

Rédigé par Ingrid Colleau.

---

# PLUIES TORRENTIELLES

---

## LA POLLUTION D'UN LONG FLEUVE TRANQUILLE

---

Les épisodes de pluies intenses liés au changement climatique génèrent du ruissellement dynamique qui, par érosion, arrache des matières du sol, y compris des contaminants. À IMT Nord Europe, des équipes de recherche mènent des travaux complémentaires de mesure et de modélisation pour comprendre comment ces transferts de matières s'inscrivent dans le cycle de l'eau, et mieux gérer les territoires.

**L**e changement climatique se traduit par des modifications de la température globale, mais aussi du régime des pluies. L'intensification des pluies, en hiver notamment, entraîne du ruissellement et le drainage de polluants dans les bassins versants — les surfaces qui reçoivent naturellement les eaux circulantes. Les charges en suspension ou dissoutes dans l'eau en détériorent la qualité : en témoignent les difficultés autour de l'assainissement de la Seine pour les prochains Jeux Olympiques et Paralympiques de Paris 2024.

L'étude des transferts de matières, et en particulier des contaminants, au sein des bassins versants intéresse de nombreux scientifiques dont Claire Alary, chercheuse en Géosciences au Centre d'enseignement, de recherche et d'innovation matériaux et procédés (CERI MP) d'IMT Nord Europe. Un peu plus au nord de la Seine, c'est sur les confluent de la Canche, un fleuve côtier du Pas-de-Calais, que la chercheuse mène ses travaux. Son but : comprendre comment la matière solide arrachée des sols, et susceptible de contenir des contaminants, est acheminée vers l'exutoire, ou inversement, déposée dans les milieux aquatiques pour former ce que les géologues appellent le « compartiment sédimentaire ».

#### « L'eau est bonne ? »

Pour appréhender les phénomènes qui s'opèrent, Claire Alary déploie des réseaux de mesure sur des bassins versants à plusieurs échelles, afin d'observer la dynamique des flux, hydrique et sédimentaire. Parmi les affluents de la Canche,

la Planquette constitue un sous-bassin versant d'une cinquantaine de kilomètres carrés, qui peut lui-même être découpé en bassins versants élémentaires. La chercheuse et son équipe ont ainsi instrumenté à petite échelle un bassin versant élémentaire de la Planquette de 54 hectares (soit 0,54 kilomètres carrés), et à plus grande échelle, la Planquette elle-même à son proche exutoire.

Ces dispositifs captent le débit et l'opacité de l'eau, grâce à des sondes de turbidité, et permettent ainsi de suivre la dynamique de ruissellement et la charge en matières. Ces instrumentations de mesures continues sont complétées par des prélèvements automatiques de la matière en sus-

---

### « Les facteurs qui conditionnent le type de ruissellement ou le transport de matière sont très nombreux. »

---

pension, sur laquelle diverses analyses physico-chimiques sont réalisées, pour qualifier la qualité du milieu ou caractériser des charges polluantes.

« Cette approche très fine des dynamiques hydro-sédimentaires dans les bassins versants est ensuite reliée au contexte des territoires comme la typologie du sol – et de ses éventuels pesticides, dans le cas de bassins versants agricoles – ou encore les types de pluie », explique Claire Alary. En partenariat avec Voie navigables de France (VNF), la chercheuse étudie égale-



---

## PLUIES TORRENTIELLES, LA POLLUTION D'UN LONG FLEUVE TRANQUILLE

---

ment, la présence de contaminants dans les couches de sédiments, et les sources d'apport de la matière en suspension qui se dépose et s'enfonce dans les rivières canalisées du Nord.

### Modélisation numérique : une complémentarité qui coule de source

À partir de toutes ces mesures, les scientifiques tentent de modéliser les transferts, en œuvre et à venir. Claire Alary utilise certains modèles au sein de son équipe, mais les bassins versants sont des environnements complexes à décrire. « Les facteurs qui conditionnent le type de ruissellement ou le transport de matière sont très nombreux : la nature du sol, l'intensité des pluies, mais aussi la saison par exemple », illustre la chercheuse. « Ce sont des systèmes à très large échelle. Même les bassins versants élémentaires.

», complète Éric Duviella, chercheur en automatique au CERI Systèmes numériques (CERI SN) d'IMT Nord-Europe.

Depuis plusieurs années, ce spécialiste de la modélisation et du pilotage des systèmes, collabore avec Claire Alary sur des applications à la gestion de l'eau. Éric Duviella utilise les données récoltées sur le terrain pour contribuer à la création de jumeaux numériques des écosystèmes, en utilisant notamment des modèles « boîte noire » puissants et discriminants, complémentaires à ceux utilisés par l'équipe du CERI EE. « Notre volonté est de fournir des modèles simples à mettre en œuvre, qui dépendent de l'endroit où les mesures ont été réalisées, mais néanmoins assez génériques pour être déployés sur d'autres systèmes, comme d'autres lacs ou d'autres rivières », pré-





cise le chercheur. Ces modèles sont ensuite simulés pour rejouer des scénarios passés, et éventuellement anticiper des scénarios futurs de diffusion des polluants.

### Drones aquatiques, la mesure au fil de l'eau

Cela dit, la mesure de la diffusion en un point donné montre la dynamique temporelle, mais pas spatiale. En plus de déployer des outils de mesure et de pilotage des environnements aquatiques, Éric Duviella utilise avec son équipe une solution robotique complémentaires aux capteurs fixes : des drones aquatiques ! Ces robots fournissent une image de la pollution aquatique à l'échelle de l'ensemble du milieu dans lequel ils sont déployés, définissant ainsi des cartographies temporelles et spatiales.

Ces « laboratoires mobiles », fournis par la start-up Bathy drone solution (BDS), sont munis de capteurs qui peuvent être adaptés en fonction des problématiques de recherche et des types de mesures à réaliser. Toujours en collaboration avec Claire Alary, Éric Duviella a ainsi réalisé à l'aide de ces drones des expérimentations au niveau de la confluence de la Planquette et de la Canche, permettant de visualiser les lignes de diffusion de l'affluent dans le sous-bassin versant. Récemment, le chercheur et son équipe ont aussi réalisé une carte caractérisant l'état qualitatif de l'eau sur le lac du Héron, à l'est de Lille. « Comme l'exutoire qui se jette dans le lac est très chargé, nous pouvons visualiser la diffusion des charges grâce au gradient de mesure », détaille-t-il.

### Pluridisciplinarité, les petites rivières qui font les grands fleuves

Actuellement ces drones aquatiques sont téléopérés, c'est-à-dire guidés par un opérateur humain, mais Éric Duviella et son équipe ambitionnent de développer des flottes de robots automatisés et autonomes pour cartographier encore plus efficacement. Les drones réalisent également leur maillage de mesure en surface – à environ 30 cm en dessous de l'eau – mais pourraient opérer plus bas dans la colonne d'eau, autrement dit, plus en profondeur. « En captant toujours mieux ces évolutions, spatiales et temporelles, nous souhaitons bien sûr améliorer la connaissance des phénomènes en jeu et nos prévisions, tout en maintenant la simplicité de nos modèles. L'étape suivante serait de proposer, sur la base de ces modèles prédictifs, une aide à la décision et au pilotage pour les acteurs territoriaux », projette Éric Duviella.

Un dialogue auquel croit également Claire Alary. Tous deux sont impliqués dans un consortium de recherche régional regroupant des scientifiques de nombreuses disciplines – sociologie, chimie, toxicité... – pour apporter des réponses sociétales à la question de la ressource en eau à l'échelle du territoire du Nord. La collaboration entre les deux collègues d'IMT Nord Europe est donc loin d'être terminée. « Ce sont des travaux que nous souhaiterions vivement poursuivre », confirment-ils en chœur.

Rédigé par Ingrid Colleau. ▲

---

# VALORISATION DES BIODÉCHETS

---

## LA MÉTHANISATION MET LES GAZ

---

Stations d'épuration, centres d'enfouissement, fermes agricoles ou collectivités. Pour de nombreux acteurs, la méthanisation se présente comme une solution opportune de traitement des déchets organiques, tout en produisant de l'énergie. À IMT Atlantique, une équipe de recherche s'intéresse à la viabilité de ces installations, ainsi qu'au biogaz qui y est produit. Des travaux avec une dimension applicative forte, mais qui font aussi appel à des outils complexes, au croisement de plusieurs disciplines.

**L**es biodéchets sont nombreux dans notre quotidien : restes de nourriture, mais aussi feuilles mortes, déjections animales... Jusqu'à récemment, ces déchets étaient principalement incinérés ou entassés en déchetterie produisant, dans un cas, du dioxyde de carbone issu de la combustion ; dans l'autre, du biogaz (dont du biométhane) par fermentation. Deux gaz participant fortement au réchauffement climatique en cours. Or depuis le 1er janvier 2024, et la mise en application de la réglementation sur la collecte séparée des biodéchets, la gestion et le traitement de ces détritrus soulève de nombreuses interrogations.

Pour certains rebus organiques riches en lignine (une molécule présente dans le bois) et peu biodégradables, les traitements thermo-chimiques – qui consistent grosso modo à brûler la matière pour produire de la chaleur – restent le moyen de gestion en vigueur. Pour les déchets organiques fermentescibles en revanche, le compostage ou la méthanisation offrent des voies de valorisation bien plus intéressantes.

Le compostage repose sur la dégradation des déchets organiques en milieu humide et en présence d'oxygène. Inversement pour la méthanisation, la fermentation des déchets en milieu « anaérobie » (sans oxygène) favorise la formation de biogaz, essentiellement constitué de biométhane et de dioxyde de carbone. Ces deux voies permettent ainsi de retourner à la terre des résidus fertilisants, sous forme de compost ou de digestat (les résidus de

la méthanisation), et de capitaliser sur le biogaz, dans le cas de la méthanisation, pour faire un vecteur d'énergie.

### Des biodéchets qui roulent

Les utilisations du biogaz issu de la méthanisation sont nombreuses : de simple vecteur de chaleur à un biométhane purifié, débarrassé de son dioxyde de carbone, et injectable dans le réseau de gaz naturel. Moyennant un certain traitement, le biométhane peut aussi servir comme carburant. Certains bus parisiens font la démonstration d'un fonctionnement au biométhane, en provenance de décharges. Khaled Loubar, chercheur sur le campus nantais d'IMT Atlantique, travaille spécifiquement sur la valorisation du biogaz dans les machines thermiques. Il cherche à améliorer les rendements des moteurs actuels, mais étudie également de nouveaux procédés de combustion, dont celui des moteurs multi-carburants comme le dual-fuel.

L'intérêt de ces moteurs est que leur rendement est beaucoup plus élevé que sur les moteurs à allumage commandé (les moteurs à essence classique). Ils consomment moins de gaz pour produire la même quantité d'énergie, et sont aussi moins sensibles à la variabilité de la composition du gaz. « En-dessous d'un certain pourcentage de méthane, les moteurs classiques à allumage commandé ne fonctionnent pas ou s'arrêtent », illustre le chercheur. « À l'inverse la technologie dual-fuel s'adapte, y compris pour des taux de méthane assez faibles dans le gaz. »

En laboratoire, Khaled Loubar et son

équipe ont réussi à convertir avec un minimum de modifications des moteurs diesel afin qu'ils soient en mesure de fonctionner à partir d'un mélange diesel-biogaz contenant jusqu'à 80 % de biogaz. Ce prototype ouvre la voie au développement d'un démonstrateur qui, dans le cadre du projet COGEPRO, sera déployé sur le site industriel d'une brasserie. Celui-ci exploitera le biogaz issu du traitement des eaux de procédés.

### **Alors, ça gaze ?**

Si l'utilisation de biogaz offre de nombreuses perspectives dans la production d'une énergie bas-carbone, reste néanmoins à assurer une production efficace et compétitive de ce vecteur énergétique. Au sein du même laboratoire d'IMT Atlantique, le chercheur Yves Andrès explore différents procédés de traitement des déchets issus de biomasses. En croisant plusieurs expertises (microbiologie, énergétique, génie des procédés...), les deux chercheurs et leur équipe étudient les filières de valorisation les plus adaptées, compte tenu des déchets ou résidus disponibles sur un territoire et du bilan énergétique de la solution choisie. Leurs travaux portent en particulier sur l'intégration de la méthanisation dans ces filières de valorisation, et sur l'exploitation du biogaz produit.

Le choix de la méthanisation s'appuie avant tout sur un bilan énergétique positif ou nul. Les scientifiques d'IMT Atlantique disposent d'outils complexes de calculs et de modélisation pour étudier la viabilité et le dimensionnement des équipements. Ces derniers dépendent de la capacité de production de biogaz et donc, prin-

cipalement, de la nature et de la disponibilité des intrants, les déchets qui vont alimenter le méthaniseur. « Notre but est d'estimer le minimum d'intrants nécessaire pour qu'il n'y ait pas à fournir plus d'énergie à l'installation qu'elle n'en produit », explique Yves Andrès. Si le bilan énergétique est favorable, la modélisation des futures quantités de biogaz récupérées permet de déterminer la taille des installations, pour produire de manière fonctionnelle : avec un bon rendement et une qualité stable dans le temps.

Les scientifiques accompagnent ainsi la mise en place d'installations à différentes échelles. De la micro-méthanisation à l'échelle d'un écoquartier ou d'une petite ferme, pour qu'elle soit autonome en énergie, à des réacteurs biologiques pour des volumes très importants. « Nous avons notamment accompagné une entreprise gérant un centre d'enfouissement technique dans le renouvellement de ses installations de valorisation », relate Khaled Loubar. « Afin de dimensionner les nouveaux équipements, nous avons typiquement dû modéliser les quantités de gaz que le centre allait produire sur 15 ou 20 ans ! »

### **Des déchets aux cultures dédiées, les déviations de la productivité**

Cela dit, comme dans toute industrie, la problématique de l'exploitation n'est pas seulement de connaître sa capacité de production, mais aussi comment l'augmenter. La méthanisation ne s'en tient donc pas aux seuls déchets disponibles ? La réponse est non. D'une part, parce que dans le cas des installations agricoles, l'approvisionnement en continu



des réacteurs implique parfois d'utiliser des intrants « extérieurs », qui ne sont pas soumis à la saisonnalité par exemple. D'autre part, parce que mélanger différents intrants influe directement sur la composition et la qualité du biogaz. « Un déchet peut apporter par exemple trop de carbone et pas assez d'azote lors de sa dégradation. Il est alors intéressant de compléter par un intrant plus riche en azote, afin d'équilibrer et d'améliorer le rendement de production de biogaz », développe Yves Andrès. Cela implique d'utiliser, en certains cas, des cultures ou des matières premières qui ne sont pas nécessairement des déchets.

Le chercheur alerte néanmoins sur certaines dérives. Un exploitant peut augmenter significativement le rendement de son méthaniseur s'il l'alimente d'une biomasse fortement productrice d'énergie, avec des amidons, des farines, des sucres... « Ce n'est pas dans cette démarche que s'inscrivent nos travaux », souligne Yves Andrès. « Mais, en Alle-

magne par exemple, des producteurs de lait qui faisaient au départ de la méthanisation avec du lisier de vache se sont rendus compte qu'ils gagnaient beaucoup plus à ne produire que du maïs pour faire de la méthanisation. Ils ont donc arrêté de produire du lait. »

En France, le recours à des cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE) est toléré car il n'entre pas en concurrence avec des cultures destinées à l'alimentation. La pratique permet au contraire de réhabiliter des sols pauvres, surexploités ou avec de l'intrusion saline par exemple. Les CIVE font alors office de cultures de « remédiation », en alimentant des méthaniseurs, tout en redonnant une qualité agronomique à ces sols. « Notre objectif n'est pas que ce genre de cultures soit pérenne. C'est pourquoi dans notre laboratoire, nous ne nous concentrons pas forcément sur le meilleur rendement pour les réacteurs, mais essentiellement sur la valorisation des déchets et des résidus », complète le chercheur.

Rédigé par Ingrid Colleau.





# III

---

## INGÉNIERIE SANTÉ ET BIEN-ÊTRE

---

1

STÉPHANE AVRIL, LA  
MÉCANIQUE DES TISSUS  
HUMAINS

---

2

STRESSID, UNE BASE  
DE DONNÉES POUR  
DÉTECTER LE STRESS

---

3

VIE PRIVÉE OU ÉQUITÉ ?  
LE CRUEL DILEMME DES  
DONNÉES  
DE SANTÉ À L'ÈRE DE L'IA

---

---

# STÉPHANE AVRIL

---

## LA MÉCANIQUE DES TISSUS HUMAINS

---

Stéphane Avril est mécanicien, mais ses recherches portent sur l'élasticité des artères, leur résistance, et comment ces dernières changent avec les maladies ou la vieillesse. Passionné de biologie, ce chercheur de Mines Saint-Étienne est pour la troisième fois récipiendaire d'une prestigieuse bourse European Research Council (ERC). Ce financement vient soutenir son prochain projet à l'objectif ambitieux : repousser les effets du vieillissement des artères en contrôlant l'usure mécanique. Une nouvelle étape dans un parcours à la frontière de deux disciplines.

**E**nseignant-chercheur à Mines Saint-Étienne, Stéphane Avril étudie la mécanique de la matière qui constitue le corps humain. Une discipline entre la physique et la biologie qui consiste à comprendre comment les tissus humains résistent aux déformations et aux forces qui leur sont appliquées, combien de temps, et dans quelle mesure leurs fonctions s'en trouvent modifiées. Le chercheur s'intéresse en particulier à un type de tissus, celui des artères qui distribuent le sang du cœur vers le reste du corps.

Dans le cadre de ses travaux, le chercheur collabore avec des hôpitaux pour récupérer des prélèvements à partir desquels, avec son équipe, il développe des jumeaux numériques. En d'autres mots, il modélise virtuellement les artères de personnes malades dans le but de simuler des opérations chirurgicales préalables, et d'aider ainsi les praticiens.

#### Une révélation toute en transparence

Rien ne prédestinait pourtant cet ingénieur de formation généraliste à travailler sur ce domaine médical. Spécialisé en mécanique du solide, Stéphane Avril étudie d'abord la résistance des matériaux composites utilisés dans la structure des avions notamment. Le déclic survient au cours d'un séjour sabbatique à l'université de Loughborough, en Angleterre : « Je travaillais avec une équipe qui développait des techniques d'imagerie pour analyser les déformations de la matière. Le problème c'est que les matériaux composites étaient trop opaques pour expérimenter ces nouvelles techniques, donc

nous les avons d'abord utilisées sur des matériaux semi-transparents, en l'occurrence des tissus biologiques. »

Très vite, il se passionne pour la mécanique de ces matériaux bien à part. « La biologie et la mécanique sont intimement liées. Contrairement aux matériaux que j'étudiais auparavant, chaque fois que des forces s'appliquent dessus, les tissus humains changent et leurs fonctions biologiques également », explique le chercheur. Impossible dès lors de faire marche arrière.

De retour du Royaume-Uni, Stéphane Avril intègre Mines Saint-Étienne où un laboratoire de biomécanique est en cours de développement. « En termes de mécanique du solide, il y avait encore tout à découvrir et à comprendre dans les tissus biologiques », se remémore-t-il. Depuis maintenant quinze ans, le chercheur se forme au contact des biologistes, jusqu'à prendre en 2016 la codirection d'une unité de recherche sous cotutelle de l'Inserm : SAINBIOSE. Une alliance de disciplines vertueuse à la croisée des mondes de la santé et de l'ingénierie, qui a demandé au chercheur d'apprendre les codes, les méthodes, les termes d'une autre science. « C'est comme parler une langue étrangère. Aujourd'hui j'en maîtrise juste assez pour me débrouiller dans le pays », plaisante-t-il.

#### Des jumeaux numériques pour suivre l'évolution des artères

En 2017, ses travaux l'amènent co-fonder une start-up, PrediSurge. Cette dernière fournit des outils numériques aux médecins et aux fabricants de dispositifs



médicaux. Leur but : améliorer la sûreté des interventions chirurgicales, et la conception des endoprothèses, qui sont des dispositifs médicaux endovasculaires composés de stents recouverts d'un textile. Elle s'appuie notamment sur la technologie des jumeaux numériques pour proposer une prévisualisation « à l'instant » de l'artère d'un patient donné, et de la pose d'une endoprothèse.

Mais le chercheur ne s'arrête pas là, et s'intéresse à la possibilité d'utiliser les jumeaux numériques pour des prévisions à long terme. « Il y a tout un ensemble de processus biologiques qui se mettent en place dans nos cellules et nos artères, directement liés aux forces mécaniques qui s'y appliquent. », constate Stéphane Avril. Il soumet à la même période BIOLOCHANICS, un projet de jumeau numérique prenant en compte cette synergie entre force mécanique et propriétés des tissus pour une pathologie particulière : l'anévrisme de l'aorte.

La rupture d'anévrisme, généralement mortelle, est liée à un étirement trop important des parois artérielles. Cette dilatation localisée est un phénomène naturel et irréversible, intimement lié au vieillissement, mais qui peut être aggravé par d'autres facteurs, comme le tabagisme ou la consommation d'alcool. Financé par une bourse ERC Consolidator de 2 millions d'euros, le projet BIOLOCHANICS s'appuie sur les examens d'imagerie médicale (scanner, IRM) pour paramétrer un jumeau numérique sur mesure de l'aorte, capable de prédire à long-terme l'impact des forces en action sur l'anévrisme.

Au terme de ce projet en 2020, le chercheur s'accorde un congé sabbatique en Autriche, qui coïncide avec le confinement conséquent à la pandémie de

---

### **« Il est toujours bénéfique pour un chercheur de sortir de son quotidien. »**

---

Covid-19. Face au bilan mitigé de sa première année, il décide de prolonger son séjour. Il passe finalement deux ans entre les universités techniques de Vienne et de Graz, à explorer entre deux équipes complémentaires des approches moléculaires et biomécaniques. Un entracte décisif en matière de collaborations, mais aussi ressourçant. « Lorsqu'on fait de la recherche, il est toujours très bénéfique de sortir de son quotidien pour y revenir avec de nouvelles idées », assure le chercheur.

Preuve à l'appui, Stéphane Avril obtient à son retour une seconde bourse ERC Proof of concept pour son projet MECHANOMICS-POC. Ce financement, plus modeste (150 000 €), vient soutenir le transfert technologique d'une technique d'imagerie utilisée sur BIOLOCHANICS, la tomographie en cohérence optique (OCT), jusqu'à la création d'une start-up. L'OCT, utilisée pour observer les déformations des tissus et les forces qui s'appliquent à l'échelle des cellules, est ainsi intégrée dans une plateforme nommée KaomX. La start-up fournit des cartographies de l'élasticité autour des cellules

dans les tissus : une information clé pour l'industrie pharmaceutique car les effets des médicaments dépendent de la mécanique des tissus propre à chaque individu.

### Les ingrédients de l'ERC : prenez un risque, ajoutez-y une idée

Dans le flot de ses recherches, Stéphane Avril s'interroge sur le déclenchement des pathologies comme l'anévrisme, et comment les éviter. « Toutes ces maladies résultent essentiellement du vieillissement des artères et de l'usure mécanique. J'ai alors imaginé que si nous pouvions maintenir les bonnes forces sur les cellules, nous pourrions repousser les effets du vieillissement », relate-t-il. Après trois ans de maturation, le chercheur se décide à soumettre un projet révolutionnaire : empêcher le vieillissement des artères en contrôlant les forces qui s'appliquent sur les cellules. Il l'appelle JuvenTwin, un nom qui évoque la jeunesse, mais dont le chercheur ne cache pas le clin d'œil sportif, « j'aime beaucoup le foot », confie-t-il en souriant.

En avril 2024, le projet obtient une bourse ERC Advanced, la troisième pour Stéphane Avril. Un succès dont le chercheur nous livre sa recette : « Dans mon entourage, beaucoup perçoivent l'ERC comme inaccessible, mais il faut se lancer avec une idée et, surtout, oser la prise de risque ». Une approche peu répandue dans le milieu de la recherche où la garantie de résultats est souvent préférée. Le chercheur reconnaît également l'influence bénéfique d'autres lauréats autour de lui, notamment lors de son expérience en Autriche, avec qui échanger et demander

conseil. Avant d'ajouter que la chance a peut-être aussi été de son côté. « La première fois que j'ai déposé une ERC il y a 14 ans, je ne l'ai pas eue, et il m'a fallu trois essais avant de l'obtenir. Pour JuvenTwin, je ne pensais pas que la demande passerait du premier coup mais le mot 'rajeunir' a dû faire son effet ! »

### Un saut dans l'inconnu

Si cela semble relever de la science-fiction, le rajeunissement est pourtant un sujet de recherche émergent. De nombreuses études montrent qu'il est possible de ralentir le vieillissement mais de façon non maîtrisée. JuvenTwin s'inscrit ainsi dans un ensemble de travaux menés au niveau mondial autour du vieillissement des artères et de la régénération, privilégiant des approches cliniques et biologiques, mais pas du tout mécaniques.

---

## « L'influence de la mécanique sur le vieillissement est un sujet nouveau et peu connu. »

---

Pour soutenir ce sujet très pointu du vieillissement des tissus artériels, Stéphane Avril a développé des collaborations avec deux équipes spécialisées en la matière, à l'université de Yale, aux États-Unis, et à Nancy, en France — l'unité DCAC, sous tutelles de l'Inserm et de l'université de Lorraine. Cette dernière a mis en place une biobanque humaine unique de tissus et cellules vasculaires, provenant d'individus sains et de patients d'âges variés, et de profils d'athérosclérose précoce et





tardive, permettant l'étude de leur comportement mécanique.

« L'influence de la mécanique sur le vieillissement est un sujet de recherche relativement nouveau et encore peu connu. Même si nous avons un parachute, cela reste un vrai saut dans le vide ! », mesure le chercheur. « Mais c'est une piste complémentaire qui devrait apporter de nou-

veaux éléments, et nous espérons que l'impact de nos recherches sera très fort » conclut-il.

▲  
**Rédigé par Ingrid Colleau.**



---

# STRESSID, UNE BASE DE DONNÉES POUR DÉTECTER LE STRESS

---

StressID désigne une base de données multimodale pour l'identification du stress. Le projet constitue l'un des plus grands ensembles de modalités audios, vidéos et physiologiques récoltées sur de nombreux participants. Il vise à délivrer un protocole expérimental simple à reproduire. Maria Zuluaga, chercheuse au département Data Science à EURECOM, et sa doctorante Hava Chaptoukaev nous dévoilent toutes les facettes de StressID.

**C**omment le stress est-il lié aux émotions ? Quels en sont les déclencheurs ? Ce sont ces questions qui motivent les travaux de Maria Zuluaga, chercheuse en sciences de la donnée à EURECOM. En particulier, elle travaille sur la constitution d'une base de données, pour la détection du stress, appelée StressID. Celle-ci a pour but « de comprendre ce qui déclenche le stress, mais surtout de savoir ce qui se passe à l'intérieur », souligne la chercheuse.

Pour ce faire, des analyses poussées de données physiologiques et physiques sont nécessaires afin d'observer les comportements des individus stressés. « La base de données permet ainsi d'étudier les fonctionnements du stress, les relations entre le stress et l'émotion ou même celles entre les signes physiques et les signes physiologiques du stress », illustre Hava Chaptoukaev, doctorante de Maria Zuluaga impliquée sur le projet.

StressID utilise plusieurs types de données, comme des enregistrements vidéos ou audios de personnes soumises à une activité stressante, mais aussi des données physiologiques issues d'enregistrements de l'activité cardiaque, respiratoire, ou sous-cutanée. « La base de données est donc composée de 5 modalités différentes qui sont toutes capturées simultanément chez les sujets », indique Hava Chaptoukaev.

Le projet met en jeu des capteurs portables pour récolter les réponses physiologiques issues d'un électrocardio-

gramme (ECG), d'un capteur d'activité électrodermal (EDA) et d'un capteur de respiration. Ces données sont associées à des enregistrements audios et vidéos synchronisés sur le visage des participants.

À terme, les résultats fournis par l'analyse des données de StressID pourraient être utilisés dans des applications santé. La détection poussée du stress a en effet de nombreux intérêts dans le secteur médical. « Par exemple, les patients autistes peuvent être sensibles au stress lors des examens médicaux, et il est important de pouvoir le détecter rapidement pour anticiper et mieux gérer l'état du patient », précise la doctorante.

---

**« Comptez à rebours à partir de 1011 en soustrayant 7 pendant 1 minute. »**

---

Hava Chaptoukaev a d'ailleurs remporté le prix NeurIPS 2023 Scholar Award lors de la 37e Conférence Neural Information Processing Systems qui s'est tenue en décembre 2023 aux États-Unis. StressID constitue une base de données pour l'identification du stress à partir de données unimodales et multimodales. Sa force est d'une part de pouvoir collecter l'ensemble des modalités (vidéo, audio, signaux biologiques) de manière synchronisée et en haute qualité. D'autre part, StressID a pour atout de comporter les enregistrements d'un nombre élevé de participants.



### Données et protocole de l'expérience

StressID est issu de l'analyse de 65 sujets ayant permis d'obtenir 39 heures de données annotées. Les participants volontaires, 18 femmes et 47 hommes âgés de 21 à 55 ans, sont des étudiants et des travailleurs du domaine de la science, de la technologie, de l'ingénierie et des mathématiques. Une maîtrise suffisante de l'anglais est indispensable pour effectuer les 11 tâches proposées aux participants pour évaluer leur niveau de stress et de relaxation.

Parmi les tâches à réaliser : des exercices de prise de parole en public, de lecture, ou encore des tests de couleur et des comptages. L'exercice qui est considéré à l'issue des analyses comme

le plus stressant est d'ailleurs celui du comptage. Sa consigne : « Commencez à compter à rebours à partir de 1011 en soustrayant 7 pendant 1 minute (aussi vite que possible) ».

Hava Chaptoukaev pointe que « les tâches utilisées sont établies cliniquement et les protocoles existent déjà. Nous les avons sélectionnées de façon à constituer une liste d'exercices les plus variés possibles. Elles sont aussi validées par une psychologue qui a aiguillé leur sélection. »

Différents déclencheurs sont utilisés dans l'identification du stress. Ils sont exploités à travers une tâche de respiration guidée (pour obtenir une référence de base de

l'état de stress des sujets), 2 clips vidéo émotionnels, 7 exercices interactifs différents, et une tâche de relaxation finale.

Grâce à son protocole, StressID vient combler les lacunes des nombreuses bases de données existantes sur l'émotion et sa classification. Les bases de données sur le stress sont en effet rares, et celles qui existent ont pour inconvénient leur nombre très limité de participants. Les données sont accessibles sur demande comme le souligne Maria Zuluaga : « Il y a simplement une vérification pour accéder à l'ensemble des données. Il faut au préalable signer un accord sur leur bonne utilisation, car elles sont destinées à des recherches. »

#### Contributions fournies par StressID

Parmi les contributions du projet StressID figure d'abord un nouvel ensemble de données multimodal centré sur les tâches stressantes. Il présente ensuite des modalités synchronisées et annotées ainsi que des auto-évaluations des participants sur leurs niveaux de relaxation, de stress, d'excitation, mais aussi de valence qui traduit en psychologie un état émotionnel positif ou négatif.

Le protocole expérimental fourni est facile à reproduire pour l'enregistrement des réponses comportementales et physiologiques à divers déclencheurs par le biais de capteurs portables et globaux. Des instructions pour l'exploitation de l'ensemble de données sont également accessibles. Plusieurs modèles de base sont disponibles en open source pour la reconnaissance du stress grâce aux signaux vidéos, audios et physiologiques,

ainsi que des modèles multimodaux associant ces trois entrées.

« Les participants nous disent s'ils ont ressenti des sensations négatives ou positives, mais aussi à quel point ils se sont impliqués dans la tâche. Peu de personnes se sont senties en colère ou tristes en faisant nos expériences, mais bon nombre les trouvaient amusantes », signale Hava Chaptoukaev.

« StressID est le fruit de la collaboration entre plusieurs universités. Il fait intervenir des experts du traitement de données, des vidéos et de l'audio », révèle Maria Zuluaga. Elle ajoute que « le projet sera élargi pour se pencher davantage sur les données physiologiques » avec pour ambition à long terme de prédire le stress en utilisant des dispositifs et des capteurs non invasifs.

Rédigé par Dimitri Tenlep.

---

# VIE PRIVÉE OU ÉQUITÉ ?

---

## LE CRUEL DILEMME DES DONNÉES DE SANTÉ À L'ÈRE DE L'IA

---

Article rédigé par Nesrine Kaaniche (Télécom SudParis) et  
Aymen Boudguiga (CEA) pour The Conversation France.



---

**VIE PRIVÉE OU ÉQUITÉ ?  
LE CRUEL DILEMME DES DONNÉES DE SANTÉ À L'ÈRE DE L'IA**

---

**L**'intelligence artificielle (IA) se diffuse partout dans notre quotidien, transformant des domaines comme les diagnostics médicaux, les transports, la finance ou la sécurité. Elle s'imisce de plus en plus dans nos prises de décision grâce à la collecte massive et à l'analyse de nos données, alimentant des algorithmes décisionnels et permettant d'influencer nos choix. Cette omniprésence soulève des questions éthiques et sociales importantes et impose une question complexe sans réponse facile : doit-on lui faire confiance ?

Avec le projet EQUIHid, nous étudions le potentiel de l'apprentissage fédéré pour rendre les services de santé plus équitables et respectueux de la vie privée. L'apprentissage fédéré permet d'entraîner un modèle d'intelligence artificielle de manière collaborative. Cela dans le but de répondre à un problème spécifique, comme l'analyse des images mammographiques pour la détection précoce du cancer ou l'évaluation de la présence du mélanome dans les images de lésions cutanées. Le modèle est entraîné sur une multitude de données de patientes, provenant de différents hôpitaux.

**Des modèles d'IA qui reproduisent les inégalités**

Imaginons un modèle conçu pour diagnostiquer le cancer de la peau, qui les détecte avec une précision remarquable chez les patients à la peau claire, mais dont l'efficacité s'effondre lorsqu'il s'agit de peaux plus foncées. On dit alors que le modèle n'est pas équitable, car il favorise

injustement un groupe de patients par rapport à un autre. Comment ce phénomène peut-il se produire ?

La réponse réside dans les données utilisées pour entraîner ce modèle. Si ces données sont biaisées, en surreprésentant un certain type de patients, le modèle sera plus performant avec ce groupe, reproduisant ainsi le biais présent dans les données.

Si la base de données d'entraînement est majoritairement composée d'images de patients à la peau claire, le modèle sera moins exposé aux variations de pigmentation et aux formes de cancer qui se manifestent plus fréquemment sur les peaux foncées. En conséquence, il sera

---

**« Les biais renforcent les inégalités du système de santé. »**

---

moins performant pour diagnostiquer le mélanome chez les patients à la peau foncée. Les conséquences d'un tel biais peuvent être graves. Un patient victime d'un diagnostic erroné ou retardé pourrait voir son pronostic de santé sérieusement compromis. De plus, ces biais renforcent les inégalités existantes dans le système de santé, défavorisant les groupes déjà marginalisés.

De tels biais s'intensifient notamment si les grands volumes de données, sur lesquels ces modèles sont entraînés, ne sont pas

**RETROUVEZ AUSSI  
L'EXPERTISE  
DE NOS  
CHERCHEURS  
SUR  
THE CONVERSATION**



représentatifs de la population générale. En effet, les données médicales pour l'entraînement proviennent de consultations hospitalières. Or, chaque établissement n'ayant qu'une vision partielle du problème via sa population locale, il rencontrera des difficultés à obtenir un modèle équitable. Une solution à ce problème consiste à croiser différentes sources de données pour les enrichir, et assurer ainsi un apprentissage fédéré équitable.

### **Équité, vie privée et apprentissage décentralisé**

Le principe ? Plusieurs entités communiquent directement entre elles, avec l'objectif de coopérer, sans partager de données potentiellement sensibles et sans avoir à les centraliser dans un site commun géré par un tiers. La souveraineté des données est ici assurée, mais elle n'est pas suffisante pour garantir le respect de la vie privée des patientes dans les bases d'apprentissage. En effet, même si leurs données ne sont pas directement exposées, les modèles qu'elles ont permis d'entraîner peuvent dévoiler des informations de santé sensibles en cas d'attaque informatique.

Reprenons l'exemple précédent d'un modèle de diagnostic du cancer de la peau. Un attaquant pourrait interagir avec le modèle pour essayer de deviner des détails personnels sur un patient donné, notamment la probabilité que celui-ci développe cette maladie. Si le modèle répond avec une grande certitude, cela indique que le patient en question était probablement présent dans l'ensemble d'entraînement, révélant ainsi sa prédisposition à cette maladie, sans accès

direct à ses données médicales.

Le projet EQUIHid vise à concevoir de nouveaux algorithmes d'apprentissage fédéré, à la fois respectueux de la vie privée et capables d'entraîner de manière décentralisée des modèles qui ne soient pas discriminatoires. Outre les développements algorithmiques, une particularité du projet est la volonté d'étudier le problème de façon théorique, afin d'évaluer comment l'équité impacte-t-elle la performance des modèles. Comment l'équité interagit-elle avec l'apprentissage fédéré ? Comment interfère-t-elle avec l'apprentissage respectueux de la vie privée ? Enfin, comment les trois concepts interagissent ensemble ?

Si les domaines de l'équité, du respect de la vie privée et de l'apprentissage fédéré ont largement été étudiés individuellement, leurs interactions ne sont que rarement considérées dans la littérature scientifique actuelle. Ainsi, il faut trouver le bon équilibre pour résoudre cette équation à trois paramètres.

### **Vers une implémentation de modèles plus équitables**

Des chercheurs de l'Université nationale de Singapour (NUS) ont démontré que l'équité dans les modèles d'apprentissage automatique a un coût en matière de respect de la vie privée. Ce coût n'est d'ailleurs pas réparti de manière égale : la fuite d'informations liée aux modèles d'apprentissage est nettement plus importante pour les sous-groupes défavorisés, ceux-là mêmes pour lesquels l'apprentissage équitable est crucial. Dans le cadre d'EQUIHid, nous avons démontré

que plus les données d'entraînement sont biaisées, plus le coût en matière de vie privée pour atteindre l'équité pour ces sous-groupes sera élevé.

Pendant la première phase du projet, nous avons exploré une solution existante, Fair-Fed, qui construit un modèle d'apprentissage à partir de plusieurs modèles plus ou moins équitables dans le but de créer un modèle global plus équitable que ceux qu'il agrège. Nous avons cherché à

publication de statistiques agrégées.

### Une IA centrée sur l'humain

Notre solution s'appuie sur ces concepts et permet d'entraîner un modèle commun à partir de plusieurs modèles chiffrés provenant de différentes entités. Tout en les agrégeant, elle pondère leur participation en fonction de leur niveau d'équité. Cela permet d'assurer une meilleure confidentialité des données d'entraînement et de développer un modèle global plus équitable.

---

## « La question de l'IA et de l'équité est devenue prioritaire pour les institutions. »

---

étendre cette approche à des contraintes supplémentaires, en particulier le respect de la vie privée. Pour ce faire, nous avons introduit une première proposition basée sur des techniques de chiffrement homomorphe et de confidentialité différentielle.

Le chiffrement homomorphe est une technique cryptographique qui permet d'effectuer des opérations mathématiques sur des données chiffrées, sans avoir besoin de les déchiffrer au préalable. Cela permet de garantir la confidentialité des données pendant leur traitement. La confidentialité différentielle, quant à elle, est une propriété mathématique des données statistiques qui garantit qu'il est très difficile de déduire si un individu spécifique est présent ou non dans un ensemble de données, même après la

Durant la deuxième phase du projet, nous nous pencherons sur la question de l'intégrité de l'apprentissage fédéré pour assurer le bon déroulement de l'entraînement du modèle et éviter toute déviation dont les conséquences pourraient être importantes, notamment la génération d'un modèle biaisé menant à des diagnostics médicaux erronés ou une fuite massive de données sensibles.

La question de l'IA et de l'équité est devenue prioritaire pour les institutions européennes et internationales. L'Artificial Intelligence Act (AI Act), adopté par le Parlement européen en mars 2024, insiste sur les droits fondamentaux en matière de protection des données, de dignité humaine et de non-discrimination. Ainsi, mener des recherches sur la détection et la réduction, voire la suppression, des biais des modèles d'apprentissage est un enjeu essentiel pour promouvoir une IA plus équitable et centrée sur l'humain. ▲

Rédigé par Nesrine Kaaniche  
et Aymen Boudguiga.







# IV

---

## INDUSTRIE DU FUTUR

---

### 1

QUAND LES LIGNES  
D'ASSEMBLAGE  
DEVIENNENT CIRCULAIRE

---

### 2

QUÈSACO LA  
FABRICATION ADDITIVE ?

---

### 3

ALGIFOAM, HISTOIRE  
D'UNE MOUSSE EN  
EXPANSION

---

---

# QUAND LES LIGNES D'ASSEMBLAGE DEVIENNENT CIRCULAIRES

---

Le marché de la récupération gagne du terrain, y compris dans les usines d'assemblage ! Grâce à un écosystème de logiciels, le projet européen ALICIA souhaite favoriser la circulation des ressources de production. Des scientifiques d'IMT Atlantique impliqués dans le projet œuvrent ainsi au développement d'une plateforme pour optimiser les lignes de production, en minimisant les changements de machines et en poussant l'utilisation de ressources de seconde main.

**D**ans un monde où la technologie évolue à une vitesse fulgurante, et où le smartphone incarne l'outil ultime et essentiel du quotidien, il est tentant d'en attendre les fonctionnalités technologiques les plus récentes, les plus performantes, les plus spectaculaires... C'est ainsi que tous les six mois, de nouveaux modèles de téléphones sont fabriqués et mis sur le marché.

Cette cadence effrénée de production pose évidemment des défis majeurs en matière de durabilité et de gestion des déchets électroniques, mais également au niveau des chaînes de production. La fabrication d'un nouveau modèle de téléphone s'accompagne généralement du changement de la ligne d'assemblage et des équipements. « Beaucoup de ressources de production et d'outils sont ainsi jetés à la poubelle avant leur fin de vie, alors qu'un équipement industriel peut durer jusqu'à 20 ans », pointe Simon Thevenin, chercheur en recherche opérationnelle à IMT Atlantique et impliqué dans le projet européen ALICIA.

Face à ce problème, ce projet propose de fournir un écosystème de différents logiciels afin de favoriser l'utilisation de ressources de seconde main dans les lignes d'assemblage. Démarré en janvier 2023 pour une durée de trois ans, le projet ALICIA s'inscrit dans le cadre d'un appel à projets du programme Horizon Europe, autour du développement d'outils numériques pour soutenir l'économie circulaire. Les cas d'usage sont essentiellement centrés sur l'industrie automobile,

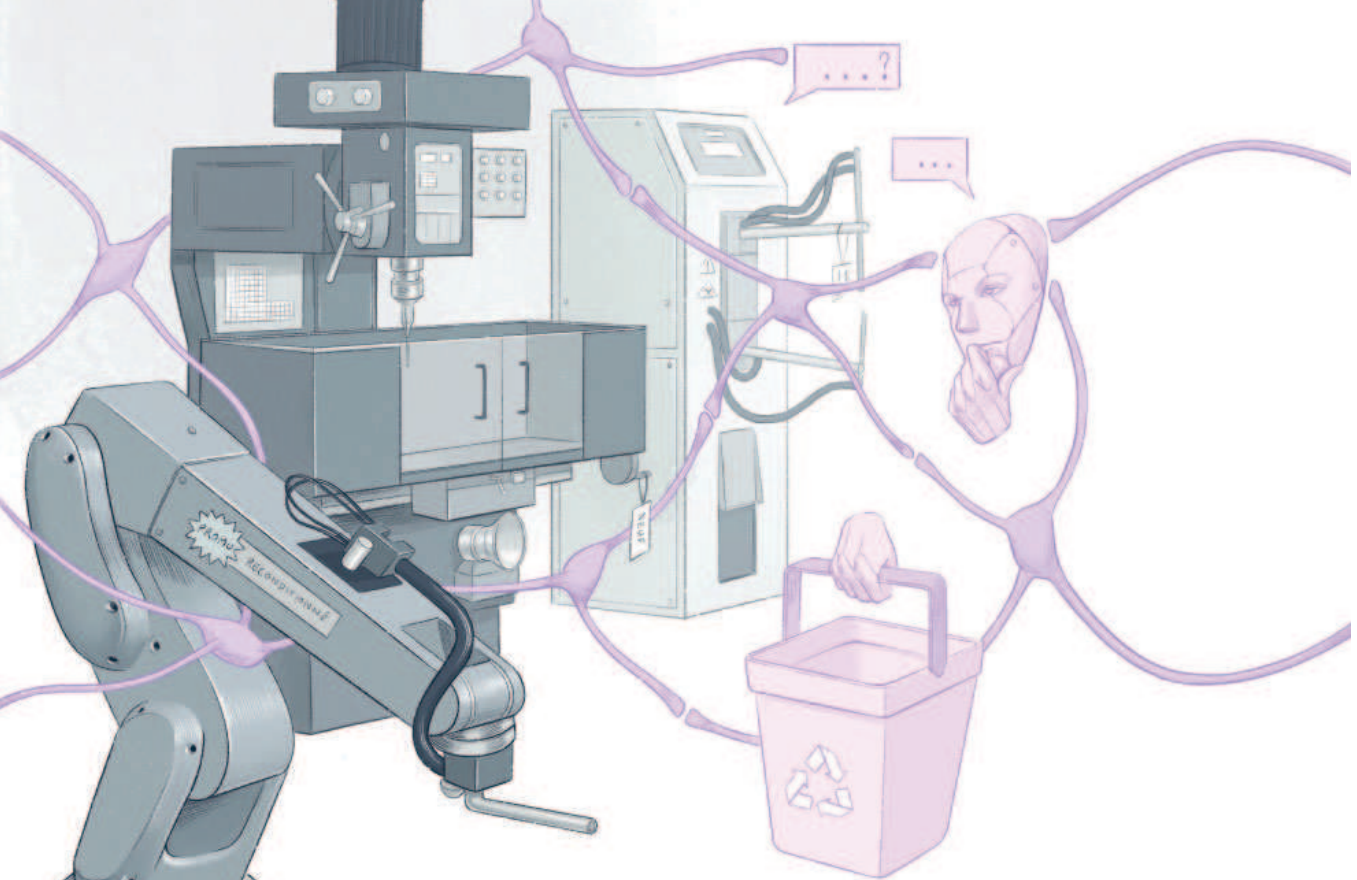
du fait de la participation d'industriels du secteur, dont Continental et Comau.

### Une boucle vertueuse pour les équipements de production

Le marché de seconde main pour l'équipement industriel n'est pas chose nouvelle, mais « il y a de plus en plus de ressources donc c'est un marché qui grossit, dans lequel nous venons implémenter de nouveaux outils et de nouvelles technologies », introduit Simon Thevenin. Pour répondre à la demande d'une usine désireuse de créer une nouvelle ligne d'assemblage, le projet ALICIA prévoit ainsi un écosystème de fabrication circulaire (CME) composé de plusieurs briques de logiciels.

La première consiste à analyser et identifier les besoins en ressources de la nouvelle ligne. Une e-plateforme, développée pour le projet, cataloguera les équipements d'occasion en provenance d'autres usines, à l'échelle européenne. Ces équipements seront mis en balance avec les actifs de production déjà en place dans l'entreprise commanditaire, et les appareils neufs, commandables aux fabricants. Un outil d'appariement intelligent développé par IMT Atlantique, l'AI-Matchmaking Engine, viendra alors faire le lien entre les besoins de l'usine et les ressources disponibles, neuves ou d'occasion.

La future ligne d'assemblage sera ensuite simulée numériquement par un outil appelé Digital Shadow. « Cela permettra au commanditaire de visualiser sa ligne et, à partir de là, de décider d'acquérir, ou non, des équipements de seconde



main », développe Simon Thevenin. Le cas échéant, un intergiciel (un logiciel tiers utilisé pour faire communiquer différentes applications informatiques entre elles), appelé Plug & Produce, facilitera la mise en service des équipements dans la ligne d'assemblage grâce à des jumeaux numériques. À la mise hors service, les actifs pourront soit être recyclés s'ils sont en fin de vie, soit (ré)intégrer la place de marché développée pour le projet, et ainsi alimenter l'écosystème circulaire d'ALICIA.

### Une configuration à l'épreuve des évolutions

Une ligne d'assemblage est un ensemble de stations auxquelles sont affectées des ressources qui répètent les mêmes tâches en séquence. Le produit à fabriquer se déplace d'une station à une autre jusqu'à sa finalisation. En fonction des industries, une ligne peut aller d'une vingtaine de tâches à 500, voire 1 000 tâches (pour

l'assemblage d'une voiture par exemple). La conception d'une ligne d'assemblage repose sur le croisement entre les différentes tâches nécessaires à la fabrication du produit, et les différentes ressources qui exécutent ces tâches en un temps donné. Classiquement, une ligne est élaborée compte tenu du produit qu'elle doit fabriquer, et reste fixe pendant une génération (de six mois, un an...). Chaque fois que la ligne est reconçue, de nouvelles tâches et ressources sont réaffectées à chaque station.

L'objectif de Simon Thevenin et de son équipe est de développer des outils qui vont déterminer quels équipements placer à chaque station, s'il faut les acheter neuf ou de seconde main, à quel moment les remplacer, s'il faut attendre leur fin de vie ou les remplacer par une nouvelle technologie plus efficace, etc. « Cela implique de prendre en compte l'ensemble du cycle de vie de la ligne,

et d'imaginer comment les produits fabriqués dans le présent vont évoluer dans le futur », explique le chercheur.

À partir d'une ligne de production en cours, les scientifiques imaginent donc plusieurs scénarios, dans lesquels apparaissent de nouvelles tâches impliquant de nouvelles ressources ; ainsi que les évolutions possibles de ces nouveaux scénarios. Dans le cadre du projet ALICIA, les scénarios sont générés aléatoirement « mais nous pourrions demander au commanditaire quels sont les changements les plus probables », complète Simon Thevenin. En prenant en compte ces scénarios et les futures modifications possibles, le chercheur et son équipe espèrent concevoir une ligne d'assemblage plus robuste au changement : pour qu'à chaque nouveau produit, il soit plus simple de changer les ressources.

#### **Une recherche opérationnelle, entre contraintes de coûts et réemploi**

La ligne d'assemblage est alors considérée comme un problème d'optimisation combinatoire, c'est-à-dire qu'elle nécessite de trouver, parmi un nombre de configurations fini, la meilleure option. Celle-ci est un arbitrage entre différents types de coûts : liés à l'achat et l'installation des équipements, au nombre de stations, à la formation du personnel technique lorsque les machines sont changées... Un ordinateur pourrait tester toutes les combinaisons possibles et retenir la plus optimale, « le problème, c'est que le nombre de combinaisons est généralement très grand, et en pratique ce n'est pas réalisable », souligne Simon Thevenin.

Les scientifiques d'IMT Atlantique font donc appel à des modèles mathématiques qui respectent certaines logiques et contraintes. Bien sûr, plus il y a de scénarios, plus le modèle est long et compliqué à résoudre. « On se fixe généralement une limite de temps – par exemple, une heure – et on regarde combien de scénarios le modèle est capable de résoudre dans ce temps, si c'est plutôt 100 ou 1 000 », détaille Simon Thevenin. Des techniques d'intelligence artificielle, notamment l'apprentissage par renforcement, sont également mobilisées pour essayer de résoudre ces problèmes, aussi qualifiés de « stochastiques dynamiques ». « Stochastiques » du fait de l'incertitude sur les scénarios futurs, et « dynamiques » car, à chaque génération, le produit change et la ligne d'assemblage avec.

Le logiciel développé in fine sera capable, à partir des données d'entrées (stations, tâches, ressources), de sortir des propositions pour une ligne d'assemblage optimisée, incluant le remplacement, lorsqu'un équipement est détérioré, par une ressource en meilleur état issue de la place de marché. Les équipes d'IMT Atlantique en achèvent actuellement une première version et doivent prochainement passer à l'application des cas d'usage définis par le projet. « L'étape suivante est d'amener la ligne d'assemblage optimale identifiée vers un ordinateur pour que l'industriel voie à quoi elle ressemble, et décide s'il franchit le pas de la seconde main ou non », résume Simon Thevenin.

**Rédigé par Ingrid Colleau.**

---

# QU'EST-CE QUE LA FABRICATION ADDITIVE ?

---

La fabrication additive, aussi dénommée impression 3D, est un procédé qui possède de multiples applications dans divers secteurs comme l'aéronautique, l'automobile, la santé, voire même le bâtiment. De nombreux développements sont en cours pour optimiser ses performances. Patricia Krawczak, chercheuse en matériaux et procédés à IMT Nord Europe nous dit tout ce qu'il faut savoir sur la fabrication additive.



## Quelle différence existe entre la fabrication additive et l'impression 3D ?

**Patricia Krawczak** : La fabrication additive et l'impression 3D renvoient exactement au même procédé ; le premier terme est plutôt utilisé par les industriels, tandis que le second est privilégié par le grand public. Certains parlent aussi, plus rarement, de fabrication libre ou freeforming dans laquelle la fabrication peut se réaliser sans outillage. Initialement, il était aussi question de prototypage rapide pour fabriquer de manière accélérée des maquettes et des prototypes.

### Que désignent ces deux termes ?

**PK** : La fabrication additive désigne un procédé de fabrication de pièces de volume, tridimensionnelles, par ajout ou agglomération de matière, à partir d'un modèle 3D numérique. Il s'agit d'un procédé qui transforme un objet virtuel en un objet physique en assemblant des couches successives d'un ou plusieurs matériaux. Elle est considérée comme étant une technologie de rupture par rapport aux méthodes de fabrication traditionnelles telles que l'usinage, qui supprime de la matière pour créer un produit fini. C'est un procédé qui s'affranchit de l'utilisation d'un outillage spécifique (moule) pour la réalisation d'objets de géométries complexes.

### Quels sont les matériaux et procédés utilisés dans la fabrication additive ?

**PK** : Mêmes si les polymères représentent environ  $\frac{3}{4}$  du marché, ce sont les métaux qui sont majoritaires dans les applications

industrielles les plus matures. Au-delà, il est aussi possible d'imprimer en 3D des céramiques, du verre, du sable, de la terre (argile, géopolymères), ou encore des aliments (sucre ...) et des matières vivantes (bioprinting). Si la normalisation distingue officiellement 7 catégories de procédés selon la nature et la forme (liquide, poudre, fil ou ruban) du matériau utilisé, la technique de dépôt, et la manière dont la matière est fondue ou solidifiée (grâce à un laser, un faisceau d'électrons, une lumière visible, des rayons ultra-violets ou infra-rouges, un arc électrique ou une source de chaleur), en pratique il existe dans chaque famille beaucoup de variantes.

### Quelle est l'origine de la fabrication additive ?

**PK** : Dans les années 60, la fabrication additive relevait du domaine de la science-fiction et de la littérature futuriste qui évoquent des machines à répliquer et des photocopieuses tridimensionnelles. L'épopée industrielle commence véritablement dans les années 80. C'est peu connu, mais ce sont 3 français – Jean-Claude André, Olivier de Witte et Alain Le Méhaut – qui ont déposé en juillet 1984 la première demande de brevet sur un procédé de fabrication additive pour le compte de la Compagnie Industrielle des Lasers CILAS ALCATEL. Le trio est tombé dans l'oubli tandis que le brevet a ensuite été abandonné faute de perspectives industrielles.

Au contraire, l'américain Charles Hull, qui avait déposé deux semaines plus tard un brevet sur la stéréolithographie, l'un des multiples procédés de fabrication

additive, est passé à la postérité. Il est le co-fondateur de 3D Systems et aussi l'inventeur du format de fichier STL toujours utilisé actuellement pour les échanges des fichiers 3D.

Les principaux procédés de la fabrication additive, ceux les plus utilisés aujourd'hui, ont émergé il y a 30 à 40 ans, avec notamment le frittage sélectif par laser en 1986, le procédé de dépôt de fil fondu en 1989, et celui de la fusion sélective par laser en 1996.

### Quels sont les usages de la fabrication additive ?

**PK :** Trois grands domaines d'utilisation de la fabrication additive se sont dégagés au fil du temps. Le premier est le prototypage de forme ou fonctionnel. Il s'agit dans ce cas de valider un design ou un concept rapidement. Le deuxième est la réalisation d'outillages de mise en forme. Il est ainsi possible de réaliser les moules ou des empreintes de moules permettant, par exemple, la fabrication de très grandes pièces en matériaux composites en petites ou moyennes séries à tarif compétitif. Le troisième domaine qui a émergé, il y a environ une dizaine d'années, est la production directe – c'est-à-dire sans outillage – de pièces en petite série.

### Quels sont les avantages de la fabrication additive ?

**PK :** L'atout de la fabrication additive est la flexibilité, notamment la possibilité de produire des géométries complexes infaisables autrement, de faire de l'intégration de fonctions, ou encore de personnaliser des produits. Ce procédé permet aussi

de gagner de l'agilité dans l'industrialisation et la mise sur le marché de pièces en réduisant les temps de cycle de développement (prototypage rapide). On peut aussi accéder à de nouvelles solutions de réparation en fabriquant à partir d'un simple scan des pièces de rechange unitaires dont les plans ou moules ne sont plus disponibles.

Un autre avantage est l'allègement extrême atteignable grâce à l'optimisation topologique, une méthode mathématique qui permet d'optimiser la répartition de la matière dans un volume donné qui est soumis à un champ de contraintes.

Enfin, la fabrication additive ouvre des perspectives de production sur site, au plus proche du besoin, pour éviter les transports d'un bout à l'autre de la planète et réduire les délais de livraison. C'est une solution à considérer par exemple dans les zones de conflits ou encore dans l'espace. La NASA s'y intéresse pour des programmes de missions spatiales comme l'ISAM (In-Space Servicing, Assembly, and Manufacturing) pour fabriquer directement dans l'espace ce dont les équipages ont besoin.

### Quels sont les secteurs d'application de la fabrication additive ?

**PK :** Le marché le plus mature et demandeur est celui de l'aéronautique et du spatial, toujours en quête d'allègement. Airbus a déjà plus d'un millier de pièces opérationnelles malgré la lourdeur des processus de validation et de certification dans ce secteur industriel. Et le groupe Safran a inauguré un nouveau site industriel, Safran Additive Manufacturing

Campus, le pôle d'excellence dédié à la fabrication additive, près de Bordeaux en 2022.

Au niveau du ferroviaire, la multinationale française Alstom s'intéresse également beaucoup à la fabrication additive, notamment pour fabriquer des pièces de rechange, avec l'ambition de constituer une banque de pièces imprimables.

Le domaine du médical et du biomédical est aussi fortement demandeur. Des taux de croissance à deux chiffres y sont annoncés pour la fabrication de prothèses, d'orthèses, d'exosquelettes et d'implants personnalisés, fabriqués sur mesure.

Les industriels de l'automobile, quant à eux, ont surtout recours à la fabrication additive pour faire du prototypage. Des concepts de voitures imprimées en 3D sont apparus, notamment chez l'américain Local Motors avec son modèle Strati lancé en 2015. En revanche, le procédé n'est à ce stade pas compatible avec les exigences de hautes cadences – de l'ordre d'une pièce par minute – de la production de véhicules en très grandes séries. Michelin a de son côté mis en avant son concept VISION pour fabriquer un pneu à structure alvéolaire imprimée 3D avec sa bande de roulement, sans air, et donc increvable.

Le secteur de l'électronique fait également appel à la fabrication additive pour des applications d'alimentation d'objets connectés. L'impression 3D de polymères électroactifs peut conduire à la création de micro-générateurs autonomes en

énergie, souples, le cas échéant intégrables à des vêtements.

Le domaine du bâtiment émerge aussi avec des démonstrateurs de maisons ou immeubles (initialement en Chine, en Russie et plus récemment en France) ou encore des passerelles ou ponts s'affranchissant d'échafaudages (en Espagne et aux Pays-Bas). La diminution drastique des temps de construction est ici recherchée.

### Quels sont les enjeux actuels de la fabrication additive ?

**PK :** Parmi les principaux enjeux actuels figurent les cadences de fabrication à augmenter, la fabrication de pièces de très grandes dimensions, la précision et l'absence de défauts à garantir en mettant par exemple en place des systèmes de contrôle, de monitoring et de pilotage auto-adaptatif des machines, ou encore l'amélioration de l'état de surface des pièces pour éviter les opérations de post-traitement de type polissage et ponçage. Un dernier enjeu est celui de la sécurisation des transferts de données et la propriété intellectuelle. Celui-ci peut trouver une solution avec la blockchain qui garantit le contrôle des fichiers d'impression 3D et leur processus de transmission.

**Propos recueillis par Dimitri Tenlep.**

---

# ALGI FOAM

---

## HISTOIRE D'UNE MOUSSE EN EXPANSION

---

Des chercheurs d'IMT Mines Alès ont mis au point un nouveau matériau innovant, écologique et biodégradable, AlgiFoam. Son mode de production, à partir de billes de biopolymère expansé, le rapproche des exigences du monde industriel et offre de plus grandes possibilités de mise en forme. Ce projet prend rapidement de l'ampleur et doit bientôt donner naissance à une start-up. De la paille aux étals du luxe, retour sur l'ascension industrielle d'un concept exploratoire.



**A**rriver à une start-up depuis un développement laboratoire, ce n'est pas classique dans le milieu des matériaux ! », lance Éric Guibal, chercheur à IMT Mines

Alès. C'est pourtant l'histoire d'AlgiFoam, un matériau polymère innovant à base d'alginate, parti « d'un coin de paillasse » du Centre des matériaux des mines d'Alès (C2MA). Une trajectoire insolite pour ce biomatériau créé ex nihilo, développé en interne et fabriqué dans un premier temps à l'aide de robots de cuisine. Le chercheur, revient avec Thierry Vincent, « l'inventeur », et Benjamin Gallard, « la relève », sur la recette de ce succès.

#### D'ALGIMEL à AlgiFoam

Au point de départ de ce projet, il y a l'étroite collaboration entre Éric Guibal et l'ingénieur de recherche Thierry Vincent qui, ensemble, étudient depuis de nombreuses années les biopolymères d'origine marine. À la faveur de leurs travaux exploratoires autour de l'alginate, un polymère naturel issu des algues brunes, ils développent un premier matériau moussé, ALGIMEL.

Thierry Vincent en explore les possibilités mais le matériau présente deux inconvénients majeurs : il ne peut se produire que sous forme de plaques, et avec des temps de séchage importants. Un mode de fabrication incompatible avec la réalité industrielle des processus de production. Les deux chercheurs envisagent alors de nouvelles pistes, afin de libérer le matériau de ce « carcan de forme », et surtout de diminuer les temps de séchage. Lar-

gement inspirée de l'industrie de production du polystyrène, leur solution consiste à fabriquer des billes de biopolymère expansé de différentes densités, AlgiFoam, et de les agglomérer sans colle afin d'obtenir des objets structurés.

Face au potentiel de cette alternative non toxique et biodégradable au polystyrène, ils décident de monter un micro-pilote pour standardiser la production et mieux en caractériser les propriétés. Entre les mains de l'ingénieur, ce nouveau matériau se révèle « évolutif » : il se teinte à l'aide de colorants naturels, il peut être associé à des résines thermodurcissables, et former, par adhésion à divers matériaux tels que du bois, du papier, du cuir, ou encore du tissu, des matériaux composites.

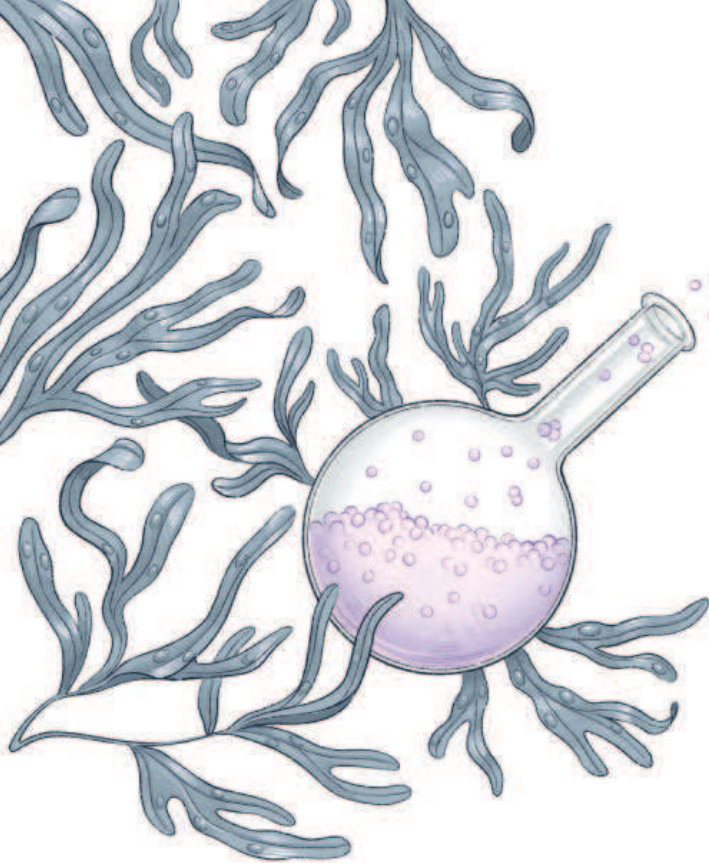
---

**« Il faut le dire, nous sommes très performants. »**

---

#### Des débuts artisanaux

Le lancement est rudimentaire. « Nous n'avons répondu à aucun appel à projet, or les développements en matériaux nécessitent généralement beaucoup d'investissement », souligne Éric Guibal. La chaîne de production du micro-pilote est donc constituée de matériel de récupération, des concepts originaux faits « de bouts de matériel existant – parfois même des appareils de cuisine ! – mis à notre sauce », complète Thierry Vincent. L'essai est pourtant probant et en 2020, Benjamin Gallard, également ingénieur de



recherche au C2MA, rejoint le duo pour prendre en charge le passage à l'échelle du pilote.

Le trio se lance dans la recherche de financements, en commençant par leur propre institution et la contribution d'une entreprise du secteur du luxe, Gainerie 91. « Ce genre de projet est inhabituel, d'une certaine façon nous étions à la fois trop avancés et pas assez », constate Éric Guibal. « Nous avons déjà le soutien de l'Institut Mines-Télécom, mais dès lors que nous avons convaincu IMT Mines Alès, il y a eu ruissellement. »

Le passage à l'échelle au pilote bénéficie alors de financements de la région Occitanie et se réalise avec le concours d'entreprises industrielles du bassin : le projet se met sur rail et les développements autour du produit se contractualisent. Au-delà de la passion qui les unit visiblement, les



trois chercheurs se complètent sur les différents aspects du projet, « chacun prend sa part en apportant son énergie et ses compétences », rapporte Benjamin Gallard. « Et il faut le dire, nous sommes très performants ! », ajoute-t-il avec humour.

### Objectif spin-off

Le travail et la persévérance paient, et le projet s'accélère : l'équipe envisage alors le montage d'une start-up. Le chercheur alsésien Arnaud Regazzi rejoint le projet en renfort, notamment sur la partie conception mécanique, et la caractérisation et modélisation des propriétés du matériau. Éric Guibal et Thierry Vincent proposent à Benjamin Gallard de lancer et structurer la start-up : une nouveauté et un défi pour cet ingénieur technique qui doit désormais s'initier à l'entrepreneuriat. « L'escalade en compétences est aussi rapide que le projet », plaisante ce dernier.



Avec le dépôt de la marque AlgiFoam, les missions de l'équipe évoluent : « Nous avons commencé à aborder des questions de propriété intellectuelle, de mise sur le marché... c'est un changement de prisme radical par rapport à nos compétences de travail. Nous nous formons au fil des discussions, mais nous avons aussi démarché des étudiants de formation managériale pour nous aider », reconnaît Benjamin Gallard.

---

## « Nous avons le pied à la fois sur l'accélérateur et sur le frein. »

---

### Les algues brunes, une ressource limitée

Si les planètes s'alignent remarquablement pour AlgiFoam, les chercheurs n'en sont pas au bout de leurs peines. « Pour le moment, nous avons le pied à la fois sur l'accélérateur et sur le frein : nous ne pouvons pas encore nous engager sur des volumes par exemple », tempère Eric Guibal.

L'algue brune qui fournit l'alginate est effectivement une ressource limitée, gérée de manière raisonnable et raisonnée, « et c'est très bien ainsi ». La production actuelle est soumise à des quotas de collecte mais majoritairement absorbée par des applications à forte valeur ajoutée, pour l'alimentaire, la cosmétologie ou encore la pharmacologie.

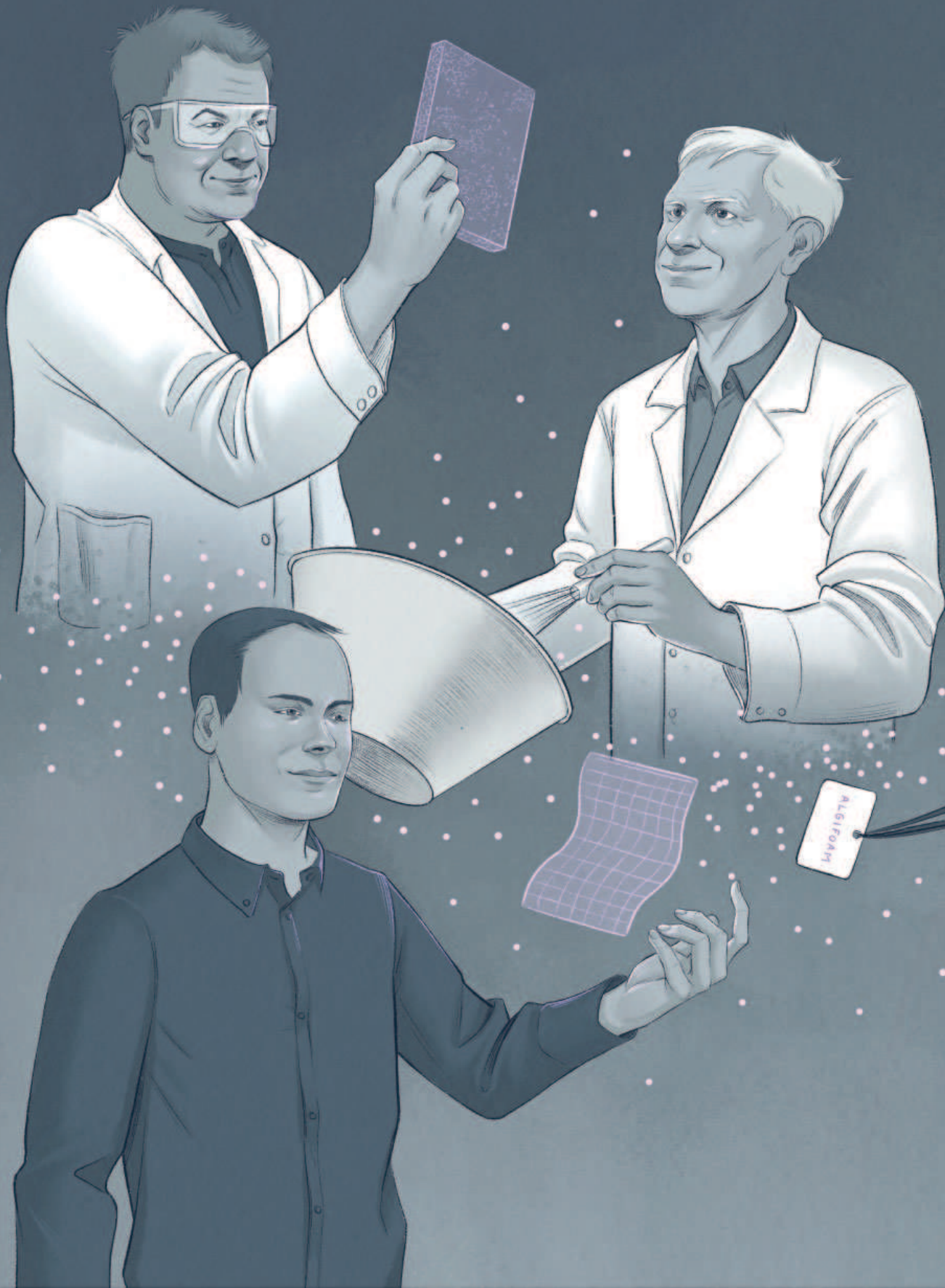
Des solutions se profilent néanmoins : des fermes d'algues en Norvège ont

développé des techniques pour produire des algues brunes en bassin. Les chercheurs se sont également rapprochés de producteurs français, comme Algaia ou JRS Rettenmaier, « dans une logique de production locale », avec une expectative commune que d'ici 5 à 10 ans la production d'alginate techniques augmente et que le coût de cette matière première diminue.

### Séchage et mise en forme, les dernières barrières

La chaîne de production, low-tech, basse consommation et sans solvant, requiert encore quelques optimisations, notamment sur l'étape de séchage qui posait déjà problème sur ALGIMEL. Si la production des billes d'AlgiFoam se fait en continu, ce n'est pas encore le cas du séchage. L'équipe recherche donc actuellement des financements pour lever ce verrou technologique, indispensable « pour avoir un procédé continu à 100% à des échelles intéressantes », affirme Thierry Vincent.

En fin de chaîne, la mise en forme se révèle aussi parfois problématique. AlgiFoam est un biopolymère sensible à l'eau et les techniques conventionnelles ne peuvent s'y appliquer, au risque d'en altérer les propriétés. Thierry Vincent multiplie donc les essais de mise en forme et d'assemblage, dans le but évidemment d'explorer les applications possibles du matériau. « Dans un premier temps, j'ai fait évoluer ce produit afin qu'il « sorte » du laboratoire. Aujourd'hui, mon objectif est de faire en sorte qu'il séduise un maximum de personnes », explique la cheville ouvrière du projet.



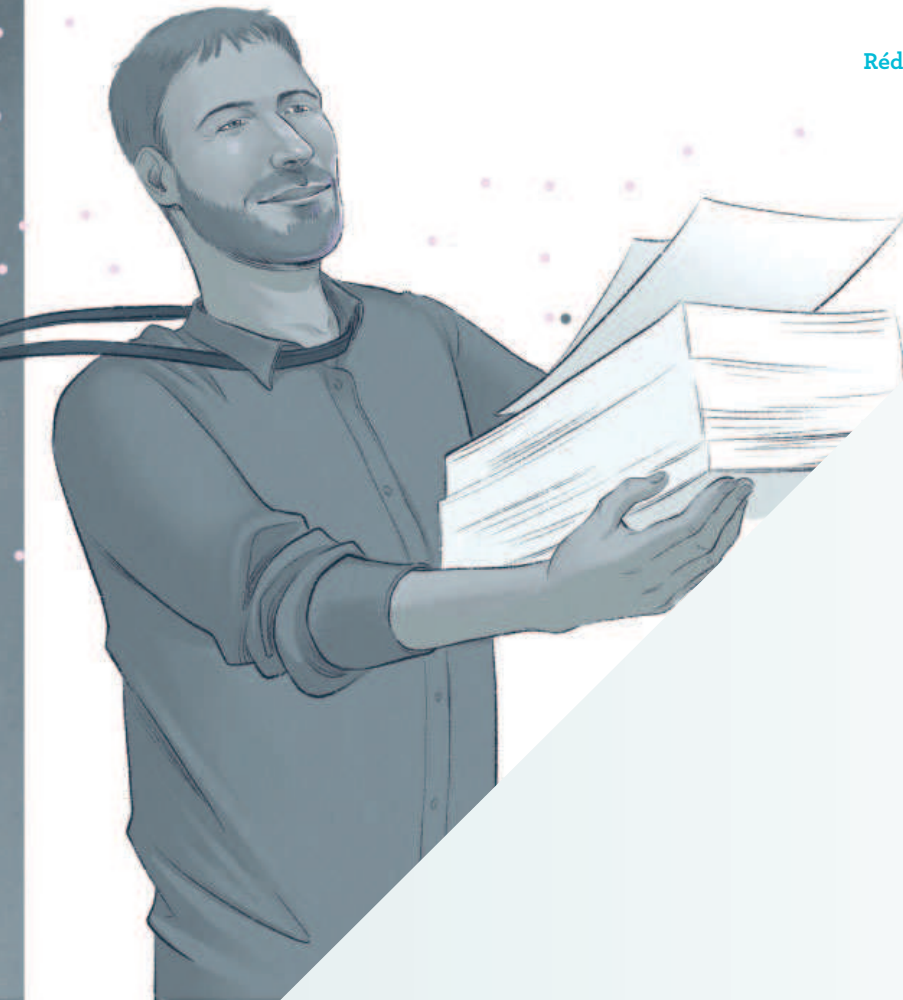
### Vers des applications dans le luxe, et au-delà

Dans leur ligne de mire, l'industrie du packaging de luxe. « La matière première est relativement couteuse par rapport aux produits pétrosourcés donc nous devons nous adresser à des gens capables de l'acheter », justifie l'ingénieur. Un surcout acceptable pour ce type de prospects pour lesquels la multifonctionnalité du produit et sa biodégradabilité sont de vraies valeurs ajoutées. Afin de mettre toutes les chances de leur côté, l'équipe se fait accompagner par un cabinet de designers, avec lequel ils ont déjà manufacturé « de très belles boîtes, à la limite de l'art. Nous regardons d'ailleurs éga-

lement du côté de la muséologie pour le transport des œuvres d'art », ajoute Thierry Vincent.

Les acolytes ne se ferment aucune porte, à raison. Benjamin Gallard, lui, s'étonne encore d'un tel succès : « toutes les étapes que nous imaginions il y a 8 mois ont été franchies sans difficulté, tant dans les aspects techniques que dans le partenariat ». Pour Éric Guibal, comme pour Thierry Vincent, la concrétisation de cette innovation représente « l'acmé de 40 ans de recherche. » « Aujourd'hui, nous sommes dans une position à la fois confortable, ambitieuse et optimiste », conclut-il avec satisfaction.

Rédigé par Ingrid Colleau.



**Rédacteur en chef** : Benjamin Vignard

**Rédacteurs** : Ingrid Colleau, Dimitri Tenlep

**Illustratrice** : Diane Rottner

**<https://imtech.imt.fr/>**

**Instagram** : @imt.france

**LinkedIn** : Institut Mines-Télécom



19 place Marguerite Perey  
91 120 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

