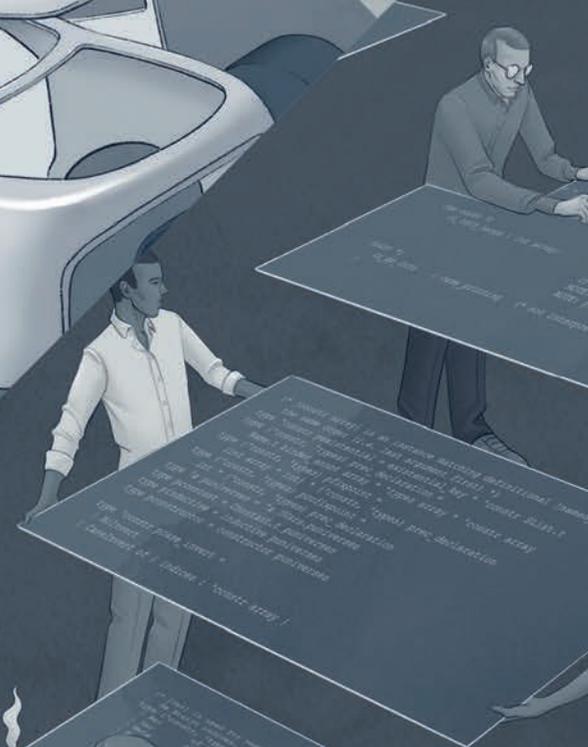
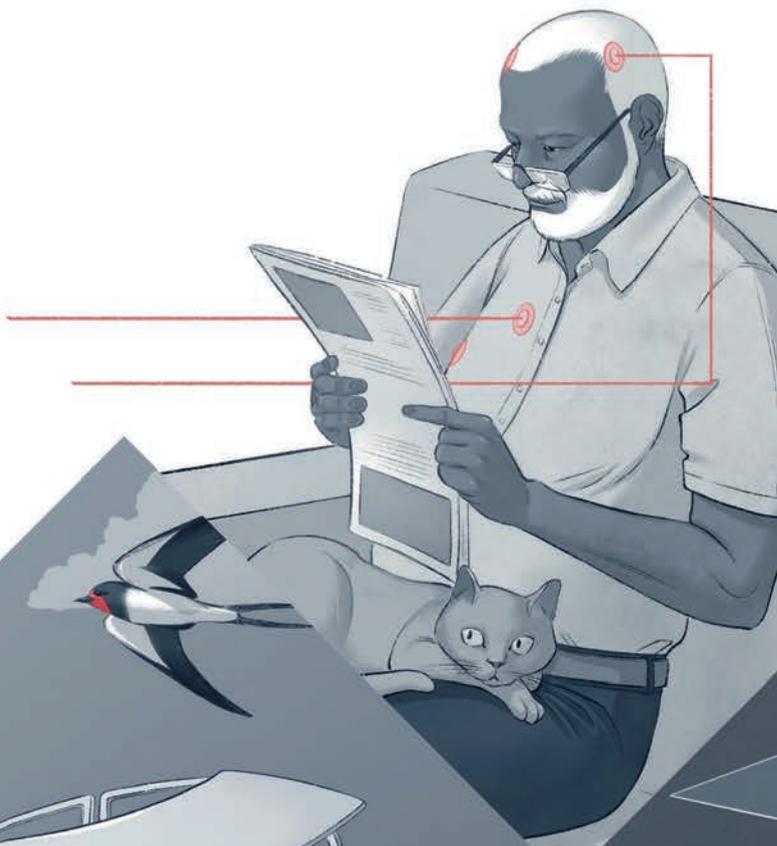




I'MTech.

LE MEILLEUR
DE 2023

Les Grandes Écoles des grands défis





I'MTech.

LE MEILLEUR DE 2023



SOMMAIRE

INDUSTRIE DU FUTUR RESPONSABLE	7
OBJECTIF LUNE GRÂCE À LA FABRICATION ADDITIVE DE POUDRE LUNAIRE	8
LA SOUTENABLE LÉGÈRETÉ DE L'AUTOMOBILE	14
SOUVERAINETÉ NUMÉRIQUE ET SOBRIÉTÉ	21
IA À BORD : DES ALGORITHMES AU SERVICE DE LA SÉCURITÉ ROUTIÈRE	22
VILLES CONNECTÉES : COMMENT METTRE L'ÉTHIQUE AU CŒUR DE LA SÉCURITÉ ?	26
NEW NORMAL AU TRAVAIL : LE COLLECTIF EN PÉRIL	30
FAKE NEWS, L'IMAGE D'UN SYSTÈME COMPLEXE	34
ENVIRONNEMENT & ÉCONOMIE CIRCULAIRE	39
POLLUANTS À LA DÉRIVE : COMMENT PROTÉGER LES OCÉANS ?	40
DES MATHÉMATIQUES POUR GÉRER L'ESPACE MARIN	46
L'AGROFORESTERIE, UNE OPPORTUNITÉ POUR LES MATÉRIAUX ET LA CHIMIE	50
INGÉNIERIE SANTÉ ET BIEN-ÊTRE	55
BAYFLEX : L'ÉLECTRONIQUE VERTE AU SERVICE DE LA SANTÉ	56
RESORB : LE CAPTEUR DANS LA PEAU	62
PODCASTS	68



I

INDUSTRIE DU FUTUR RESPONSABLE

1

OBJECTIF LUNE GRÂCE
À LA FABRICATION
ADDITIVE DE POUDRE
LUNAIRE

2

LA SOUTENABLE LÉGÈRETÉ
DE L'AUTOMOBILE

OBJECTIF LUNE

GRÂCE À LA FABRICATION ADDITIVE DE POUDRE LUNAIRE

Fabriquer des objets par impression 3D à partir d'un matériau lunaire ne relève pas de la science-fiction. Afin de faciliter l'établissement d'une base sur la Lune, des chercheurs d'IMT Mines Albi étudient très sérieusement cette possibilité. Dans les laboratoires de l'Institut Clément Ader (ICA), ils travaillent à mettre en œuvre un procédé de fabrication additive à partir d'une roche terrestre présentant des propriétés similaires à celles de la poussière lunaire. Objectif : plus d'autonomie pour les premiers habitants de la Lune.

Douze êtres humains ont posé le pied sur la Lune depuis le premier, Neil Armstrong, en 1969. La dernière sortie extravéhiculaire sur le satellite naturel de la Terre remonte toutefois à plus de cinquante ans : le 14 décembre 1972. Néanmoins, l'attente devrait prendre fin prochainement : le programme Artemis de la NASA prévoit de nouvelles expéditions humaines sur le sol lunaire à l'horizon 2025. Et l'agence spatiale américaine entend aller plus loin, en y installant une base autonome permanente à partir de 2026, qui pourrait notamment servir de station intermédiaire en vue de missions d'exploration de Mars.

Une telle ambition s'accompagne évidemment d'innombrables défis : alimentation en eau, en nourriture, en énergie, en oxygène... Une fois sur place, les équipes auront également besoin d'objets tels que des briques de construction, des outils ou des pièces mécaniques. Or, le coût d'une mission spatiale étant très élevé, il est primordial d'alléger au maximum le matériel importé depuis la Terre. C'est pourquoi les agences spatiales privilégient l'utilisation des ressources in situ, c'est-à-dire l'exploitation des matériaux présents sur le sol lunaire. Une approche qui permet aussi de répondre aux besoins de réparation auxquels peuvent être confrontés les astronautes.

Fusion laser sur lit de poudre

C'est dans ce contexte que s'inscrivent les travaux de recherche d'une équipe d'IMT Mines Albi, équipe dont Thierry Cutard est membre. « Le procédé de fabrication additive apparaît comme un candidat naturel pour cette production lunaire », souligne-t-il. « Plus précisément, notre étude porte sur les objets techniques de petite taille, comme des outils ou des filtres, fabriqués dans un premier temps via la fusion par laser. » Un procédé mature, déjà couramment utilisé sur Terre, notamment dans l'industrie.

Il consiste à étaler un lit de poudre – souvent polymère ou métallique – et à l'exposer localement à un faisceau laser, qui va fusionner totalement ou partiellement les grains et solidifier la partie visée. L'opération est ensuite répétée, couche après couche, de sorte à réaliser in fine le modèle 3D préalablement conçu sur ordinateur. Il ne reste alors plus qu'à aspirer la poudre non fondue, afin d'obtenir l'objet ainsi produit.

À terme, l'objectif de l'équipe de recherche est d'adapter ce processus aux matériaux lunaires, pour fabriquer des objets techniques satisfaisant notamment des critères de géométrie et de résistance mécanique. « Nos travaux comportent une part d'expérimentations, mais pas seulement », précise le chercheur. « Nous opérons également par modélisations et simulations numériques, à des fins de prédiction et d'optimisation du procédé. »



Une roche analogue au régolithe lunaire trouvée dans le Massif central

Concrètement, quel matériau la Lune peut-elle fournir ? Il s'agit principalement de « régolithe » lunaire, nom donné à la poussière recouvrant la surface du satellite. Cependant, les chercheurs d'IMT Mines Albi ne peuvent pas le manipuler directement : seuls quelques échantillons ont été rapportés par des missions spatiales, en quantité limitée. La première mission des équipes de recherche consistait donc à identifier un analogue reproduisant les propriétés chimiques et minéralogiques de la poudre lunaire.

Or, le régolithe de la Lune fait partie de la famille des oxydes, associant sous forme complexe des atomes d'éléments métalliques et de l'oxygène. Une caractéristique bienvenue, puisque cela le rapproche de plusieurs roches présentes sur Terre. « Comme le sol lunaire provient surtout de coulées volcaniques, les meilleurs candidats terrestres sont à chercher autour des volcans », ajoute Thierry Cutard. « Nous nous sommes donc intéressés à un analogue issu d'une coulée basaltique du Massif central, au niveau du Pic d'Ysson, identifié par des chercheurs de l'Institut de recherche en astrophysique et planétologie (IRAP). »

Faire parler la poudre

La roche prélevée doit ensuite être réduite à l'état de poudre, avec des grains de taille semblable à ceux trouvés sur la Lune, avant de vérifier la concordance des compositions chimique et minéralogique avec celles de référence. « Il est néanmoins impossible d'imiter à 100 % le régolithe lunaire, qui est soumis en permanence à des rayonnements », concède le chercheur. « Ce n'est, de toute façon, pas notre but. Nous visons uniquement à nous en approcher suffisamment pour que les résultats restent transposables à des applications lunaires. »

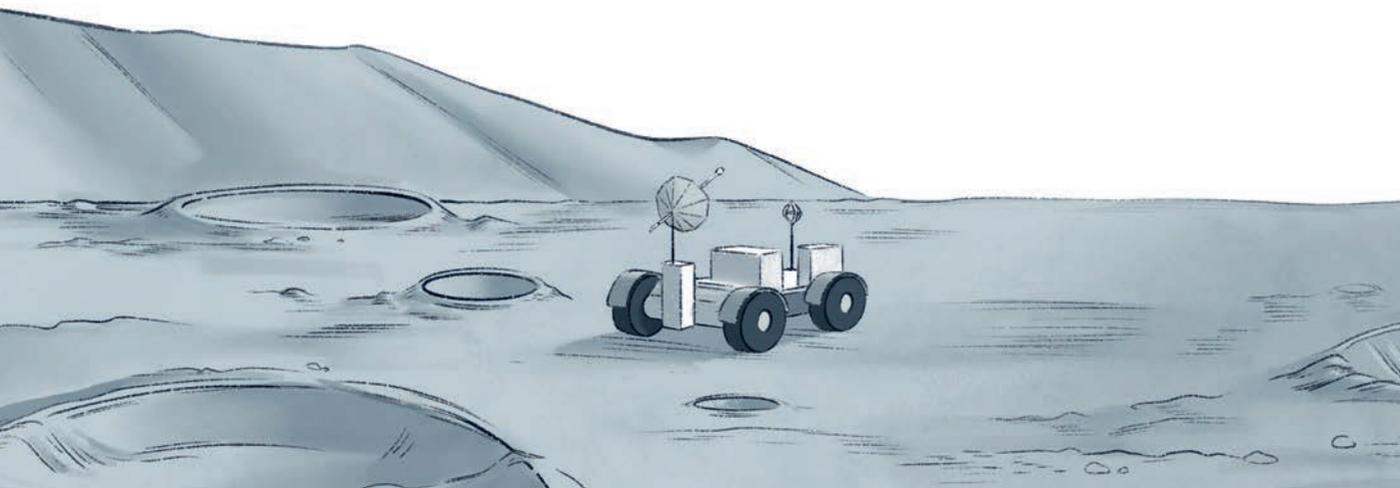
La poudre est alors prête à intégrer la machine de fabrication additive (communément appelée « imprimante 3D »). Mais celle-ci doit encore être configurée afin d'opérer sur l'analogue. Dans le cas de la fusion par laser, il faut déterminer la puissance délivrée, la taille du faisceau, la vitesse de déplacement, le niveau de recouvrement entre deux passages... « Pour déterminer ces paramètres, il est nécessaire de connaître la manière dont la poudre va réagir au rayonnement », explique Thierry Cutard. « Car sa réponse peut par exemple dépendre de la température, de la longueur d'onde du laser ou des deux à la fois. Nos travaux permettent ainsi de déterminer précisément les comportements thermiques, thermo-optiques et thermo-mécaniques de notre analogue. » Des informations essentielles pour modéliser les interactions rayonnement-matière et optimiser le paramétrage de la machine.

Renforcer le matériau et réduire la consommation d'énergie

Ce processus de fabrication s'accompagne toutefois d'une difficulté majeure : les produits formés peuvent s'avérer fragiles. « Ces matériaux risquent de se fissurer, surtout avec la chaleur opérée localement par le laser », note le chercheur. « Fabriquer une pièce sans fissure représente donc un vrai défi. » Pour y répondre, au-delà de l'optimisation des paramètres de la machine, l'équipe de recherche étudie la possibilité de mélanger l'analogue avec un autre élément, comme du métal, qui rendrait le matériau plus résistant, plus tenace.

De même, les scientifiques envisagent le recours à la fabrication additive indirecte, c'est-à-dire en associant la poudre à un liant organique, permettant d'unir temporairement les grains les uns aux autres. Une méthode qui limite les risques de fissures, mais qui implique un traitement supplémentaire dans un four pour friter le matériau, augmentant ainsi la durée de l'opération et sa consommation énergétique.

Cependant, les chercheurs ne se focalisent pas uniquement sur la fusion par laser. Au contraire, ils étudient la possibilité de recourir à d'autres sources de rayonnement, moins énergivores. « Au sein d'une station lunaire, il n'y aura pas nécessairement d'énergie disponible en grande quantité », signale en effet Thierry Cutard. L'équipe d'IMT Mines Albi a ainsi réalisé de premiers essais prometteurs avec des lampes halogènes, en concentrant leur rayonnement, et commencé à modéliser les interactions entre la poudre et ce nouveau type de source.



De la Lune à la Terre

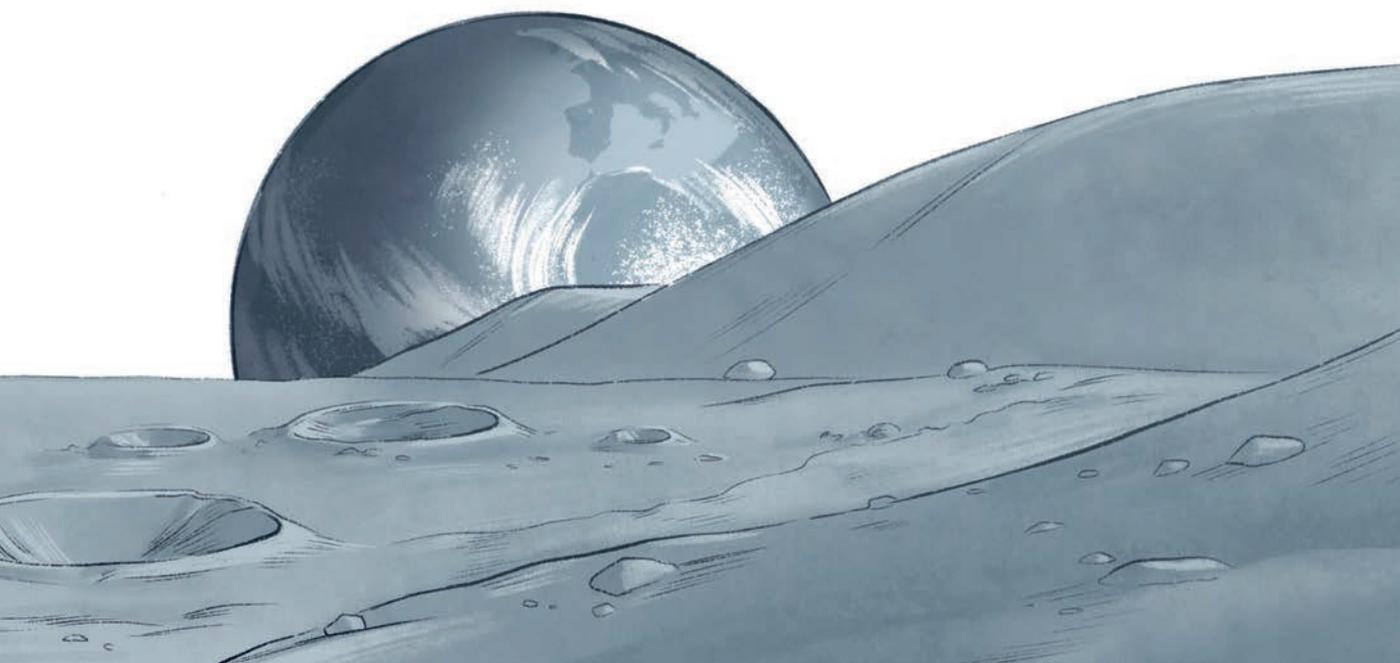
Les résultats obtenus et à venir sont régulièrement partagés avec d'autres acteurs de la communauté scientifique, notamment entre membres de la « Toulouse Task Force » composée de l'IRAP, du Laboratoire de génie chimique (LGC) et de l'Institut Clément Ader. L'équipe de recherche est déjà parvenue à fabriquer des premiers objets, de l'ordre du centimètre, issus de la fusion par laser de l'analogue du Pic d'Ysson et présentant des propriétés mécaniques satisfaisantes (dureté, résistance en compression...).

Par la suite, les chercheurs entendent passer à l'échelle, en réalisant des produits d'une dizaine de centimètres, tout en caractérisant leurs performances. Des objets dont la forme et la fonction sont encore à définir, en concertation avec des partenaires tels que l'Agence spatiale européenne (ESA), le Centre national d'études spatiales (CNES) ou des industriels du secteur spatial. En parallèle, l'équipe continue d'affiner ses

calculs et simulations multiphysiques, afin de disposer de modèles représentant fidèlement la réalité.

Par ailleurs, l'étude de la fabrication additive sur la Lune pourrait avoir des retombées... sur Terre. « Sans ce contexte lié aux nouvelles ambitions d'exploration spatiale, nous n'aurions peut-être jamais travaillé sur des procédés de fabrication à partir de roches naturelles », remarque Thierry Cutard. « Dès lors, pourquoi ne pas appliquer ces méthodes sur des matériaux terrestres, dans une optique de développement durable ? » Tirer parti de ressources locales de manière raisonnée, s'adapter à un environnement contraint, limiter sa consommation d'énergie : autant d'enjeux pas vraiment lunaires aujourd'hui. ▲

Rédigé par Bastien Contreras.



LA SOUTENABLE LÉGÉRETÉ

DE L'AUTOMOBILE

En partenariat avec les acteurs industriels de la filière automobile, les équipes d'IMT Nord Europe mènent des recherches autour des matériaux polymères et composites pour exploiter au mieux le potentiel d'allègement des véhicules.

Dans le cadre de la transition écologique et environnementale, la traque à la consommation de carburants et d'énergie est devenue une préoccupation centrale pour l'industrie. Les acteurs de la filière automobile sont particulièrement soumis à des normes de plus en plus strictes. Alors que la recherche autour de la motorisation – l'hybridation et l'électrification – est sous les feux des projecteurs, d'autres domaines sont investis pour tenter de réduire l'empreinte environnementale automobile. C'est le cas de la recherche en matériaux qui œuvre pour l'allègement des véhicules.

Cela semble évident, mais plus un véhicule est lourd, plus il a besoin d'énergie pour se déplacer ; a contrario, moins sa masse est importante, moins il faut de puissance pour le mouvoir. Les véhicules lourds ont une plus grande inertie et une plus grande résistance au mouvement, ce qui accroît leur consommation de carburant – ou d'énergie pour les moteurs électriques. En parallèle, les émissions polluantes dans le cas des moteurs thermiques sont plus importantes aussi. Pour l'industrie automobile, mais aussi l'aéronautique, le ferroviaire ou le transport maritime, l'allègement est donc un levier de décarbonation significatif à activer.

Intégrer des matériaux plus légers

Plusieurs vecteurs permettent d'alléger un véhicule. L'un des principaux est de jouer sur la densité des matériaux utilisés. Des efforts de R&D sont produits depuis longtemps pour substituer les matériaux métalliques très denses, comme l'acier, par de plus légers, comme les matériaux polymériques (à base de matière plastique). Dès les années 1970, les matériaux polymères ont été intégrés dans

les habitacles, puis en remplacement des pièces extérieures et de la caisse en blanc (l'ossature), grâce au renfort de fibres de verre ou de carbone.

En partenariat avec les fabricants de matériaux, équipementiers et constructeurs de la filière automobile, les équipes de recherche d'IMT Nord-Europe étudient le déploiement et la mise en œuvre des matériaux polymères et composites dans les véhicules. Actuellement, ces matériaux représentent environ 20 % de la masse d'un véhicule. Leur proportion peut être augmentée à condition de satisfaire un cahier des charges exigeant, et inchangé en matière de sécurité et de performance. « Dès lors qu'une pièce ou un composant est allégé, ce composant, comme le véhicule, est soumis aux mêmes batteries de tests et protocoles d'homologation », explique Patricia Krawczak, enseignante-chercheuse à IMT Nord-Europe, spécialisée dans les polymères et composites.

Un équilibre entre performance et coût

Un des critères d'évaluation des matériaux est leur rapport entre résistance ou rigidité et densité, aussi appelé performance spécifique. Au regard de ce seul critère, l'aluminium ou les matériaux composites, à renfort de verre ou de carbone, sont intéressants car ils sont bien plus légers que l'acier. La densité de l'acier est comprise entre 7 et 8 g/cm³, quand celle de la fibre de carbone se situe entre 1,8 et 1,9, celle de la fibre de verre entre 2,5 et 2,6 et celle de l'aluminium à 2,7. En outre, le renfort de fibres au sein de la matrice polymère fait des composites des matériaux de choix car particulièrement résistants et rigides.

Or la performance spécifique est à mettre en balance avec un autre critère décisif, celui du coût. Le remplacement de l'acier multiplie les coûts, par 2 à 3 pour de l'aluminium, par 5 à 10 quand il s'agit de composites à fibres de carbone. La viabilité économique est une ligne directrice pour tous les développements de R&D du secteur automobile, où le kilogramme gagné se paie beaucoup moins cher que dans le secteur aéronautique. « Même s'il y a des solutions éprouvées pour alléger, si le prix d'un véhicule est trop élevé à l'achat, le consommateur en choisira un autre », notifie Patricia Krawczak.

Les démonstrateurs industriels, modèles de sobriété

La démonstration de faisabilité sur des prototypes est un exercice auquel se plient régulièrement constructeurs et équipementiers à l'occasion des salons automobiles. EOLAB de Renault, Nova Car de Novares, ou encore Living Body de Plastic Omnium sont quelques exemples de ces vitrines technologiques, véritables laboratoires roulants. Présenté en 2014, le concept-car de Renault concentrait une centaine d'innovations autour de l'aérodynamisme et de l'allègement, avec pour résultat un véhicule pesant moins d'une tonne et une consommation à 1 L/100 km seulement, soit l'équivalent de 22 g d'émissions de CO₂/km, bien en-deçà de la limite des 95 g fixée par le Parlement européen.

Le potentiel d'allègement d'un véhicule via le levier matériaux est de l'ordre de 200 à 300 kg. « C'est un objectif largement atteignable pour des véhicules commerciaux », affirme Patricia Krawczak. « L'exemple d'EOLAB – dont la masse a été réduite de 400 kg – est vraiment extrême, mais a démontré que, techniquement et technologiquement, les constructeurs pouvaient le faire. »

Cet allègement a été rendu possible grâce à l'utilisation de matériaux légers à haute performance (dont l'aluminium et des composites à fibres de carbone) et le régime minceur accentué par une reconception des organes – moteurs, frein, batteries – de dimensions, et donc de poids, réduits. « Avec bien sûr un impact coût très fort ! », complète la chercheuse. « Les constructeurs et leurs équipementiers décident des pièces à substituer. Certains comme BMW peuvent se permettre de doter certains modèles d'éléments de carrosserie (BMW Série 7), voire des habitacles passagers (BMW i3 et BMW i8), en composites à fibres de carbone. Mais pour le moment, cela ne peut pas être appliqué à la voiture de M. Tout-le-monde. Il faut donc rendre économiquement viables toutes ces solutions technologiques pour les véhicules produits en très grande série. »

Réduire le coût des matériaux de substitution

Deux voies sont actuellement explorées par les équipes de recherche d'IMT Nord-Europe pour le développement de matériaux composites à fibres de carbone bas coût. La première est d'utiliser des fibres issues du recyclage, soit des déchets de production, soit de pièces en fin de vie. Aujourd'hui la fibre de carbone est recyclée, avec des performances sensiblement dégradées par rapport à la fibre « vierge », mais qui conviennent néanmoins pour certaines applications.

L'autre voie est de fabriquer des matériaux à bas coût à partir de précurseurs biosourcés : « Quelques formulations de fibres de carbone ont été développées, mais il faut encore les évaluer, vérifier leur performance, leur durabilité et leur capacité à être mises en œuvre et en forme dans des pièces industrielles réelles », tempère Patricia Krawczak. Le remplacement dans les composites haute performance des fibres de verre par des fibres végétales, comme la fibre de lin, est aussi un sujet de recherche qui a été abordé par les équipes d'IMT Nord-Europe au cours de grands projets nationaux structurants.

En attendant le déploiement de ces matériaux composites haute performance à bas coût, les équipes continuent d'explorer d'autres procédés d'allègement des matériaux polymères, notamment l'injection-moussage. Cette technique permet de créer des polymères alvéolaires, micro ou nano-poreux, réduisant leur masse sans affecter leurs performances mécaniques. Le procédé est bien maîtrisé sur des polymères pétrosourcés, mais constitue encore un défi sur des polymères biosourcés ou des pièces complexes.

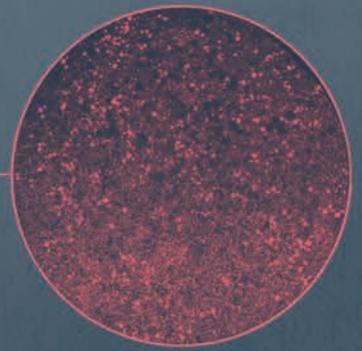
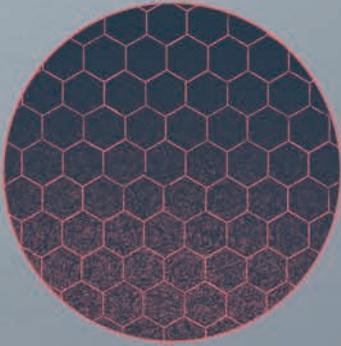
Optimiser les procédés de fabrication

Rendre économiquement viable et industrialisable massivement signifie généralement produire plus vite et moins cher. Dans l'automobile, le rythme de production est extrêmement rapide – en moyenne, une pièce par minute. Un axe de recherche pour l'optimisation de la production est la suppression ou l'intégration d'étapes de fabrication, en réduisant le nombre de composants à assembler. En 2016, les équipes d'IMT Nord-Europe ont développé avec l'équipementier Faurecia un procédé d'intégration de fonctions « one-shot » pour alléger la structure des sièges automobiles : l'estampage et le moulage en une seule opération, et avec une même machine, une presse d'injection thermoplastique standard, d'un matériau composite à base de fibres de verre. Face au succès de ce développement – industrialisé par la suite par Faurecia – les équipes cherchent à étendre ce même concept à d'autres matériaux (fibres de carbone ou de lin, polymères issus du recyclage ...) et aux procédés de fabrication d'autres pièces.

L'étape suivante est de travailler sur la multifonctionnalité, c'est-à-dire d'apporter, dès la formulation et la conception d'un matériau ou d'une pièce, une nouvelle fonctionnalité en plus de sa performance mécanique : par exemple une fonction piézoélectrique ou acoustique. Pour cela, des équipes tirent parti des possibilités nouvelles de l'impression 3D pour élaborer des nouveaux matériaux architecturés ou bio-inspirés, hyper légers, absorbants et résistants aux chocs. « Pour le moment, c'est encore une piste exploratoire », conclut Patricia Krawczak.

Quoiqu'il en soit, la recherche autour de l'allègement des véhicules a encore de beaux jours devant elle avec la fin annoncée des moteurs thermiques et le développement des véhicules à propulsion hybride ou électrique, à batterie ou à pile à combustible. Que ce soit pour compenser le poids des batteries – entre 250 et 600 kg en fonction des modèles, ou le poids des réservoirs de stockage sous très haute pression d'hydrogène alimentant la pile, les matériaux qui constituent ces nouveaux véhicules doivent nécessairement être repensés. Cela afin non pas de rendre les véhicules plus sobres pour moins polluer, comme dans le cas des moteurs thermiques, mais de les faire gagner en autonomie. ▲

Rédigé par Ingrid Colleau.





II

SOUVERAINETÉ NUMÉRIQUE ET SOBRIÉTÉ

1

IA À BORD :
DES ALGORITHMES
AU SERVICE DE LA
SÉCURITÉ ROUTIÈRE

2

VILLES CONNECTÉES :
COMMENT METTRE
L'ÉTHIQUE AU CŒUR
DE LA SÉCURITÉ ?

3

NEW NORMAL AU TRAVAIL :
LE COLLECTIF EN PÉRIL

4

FAKE NEWS, L'IMAGE
D'UN SYSTÈME COMPLEXE

IA À BORD

DES ALGORITHMES AU SERVICE DE LA SÉCURITÉ ROUTIÈRE

La technologie embarquée expose les véhicules modernes à des attaques informatiques qui peuvent affecter la sécurité des personnes à bord et en dehors. Au sein de la chaire de recherche C3S de Télécom Paris, le deep learning permet de développer des systèmes de détection d'attaques performants et adaptables à tous les modèles de véhicules.

Sur la route des vacances, il n'est pas rare de rouler aussi bien aux côtés d'automobiles dernier cri que de modèles iconiques, fleurant bon la nostalgie. L'année 2023 marque particulièrement l'anniversaire symbolique de nombreuses voitures françaises, jusqu'à 60 ans pour certaines ! Un coup d'œil dans le rétroviseur de l'industrie automobile permet de réaliser le chemin parcouru sur ces dernières décennies. Loin des systèmes 100 % mécaniques d'antan, les voitures sont aujourd'hui équipées de nombreux composants électroniques d'une grande complexité, et sont de plus en plus connectées.

Cette connectivité soulève d'importantes problématiques, notamment liées à la sécurité des systèmes informatiques qui centralisent de nombreuses fonctionnalités dans les véhicules. Ces architectures complexes sont susceptibles de comporter des failles que des pirates pourraient exploiter en vue d'attaque. Lors d'un piratage à distance, un hacker est capable de brouiller les signaux des capteurs d'un véhicule, le faire rouler à une certaine vitesse ou encore le rendre incontrôlable, induisant un risque considérable pour les usagers du véhicule et ceux environnants. En conséquence, la cybersécurité à bord des véhicules connectés fait l'objet de nombreuses régulations et recherches.

La chaire Connected Cars and Cybersecurity (C3S) de Télécom Paris se concentre justement sur ces thématiques, avec un axe particulièrement dédié à l'analyse des risques de cyberattaque sur un véhicule connecté. Natasha Alkhatib a été doctorante au sein de la chaire C3S et a conduit des recherches sur la détection d'intrusion dans le système d'un véhicule, grâce à l'intelligence artificielle. Elle s'est appuyée pour cela sur des algorithmes d'apprentissage profond (deep learning).

Une solution unique grâce au transfert d'apprentissage

Une unité de commande électronique (UCE) est un système embarqué qui contrôle un ou plusieurs sous-systèmes dans le véhicule, en se basant sur les signaux de capteurs. L'aide à la conduite, l'anti-patinage ou encore le contrôle automatique de la pression des pneus font partie des UCE standards d'une automobile actuelle. Un véhicule comporte donc de nombreuses UCE – jusqu'à une centaine pour les plus équipés – qui échangent entre elles via un système de communication, appelé bus informatique. Lorsque le véhicule est autonome, l'ensemble des signaux transmis par les capteurs doit être pris en compte pour que le véhicule prenne les bonnes décisions de conduite.

La détection d'une intrusion requiert donc un système intégré dans le véhicule qui prenne en considération tous les signaux, et adaptable à tous les modèles, quel que soit le constructeur. Le système développé par les équipes de Télécom Paris satisfait à ces deux conditions. Bien qu'il ne soit pas capable d'identifier quel signal correspond à quel capteur, les signaux sont traités par « paquets » et catégorisés en un flux normal ou anormal. Si un pirate a modifié le contenu des informations, le système identifie l'anormalité car le flux de données diffère du comportement habituel. L'attaque est alors détectée et le système alerte le conducteur – en lui suggérant par exemple de se garer immédiatement.

Ce système s'adapte également à toutes les architectures automobiles et appareils électroniques embarqués grâce à l'apprentissage par transfert. Cette technique de machine learning fait qu'un système reconnaît et applique des connaissances et des compétences acquises antérieurement à de nouvelles tâches similaires. Ainsi, le même algorithme entraîné sur les

données d'un modèle de voiture spécifique peut être réglé sur un autre. « Dès qu'un nouveau véhicule nous intéresse, nous pouvons lui adapter notre algorithme en modifiant très peu de paramètres », explique Natasha Alkhatib. « Cette fonctionnalité permet de cibler un large panel de véhicules, au lieu de devoir développer un seul produit pour un seul véhicule. » Elle permet en outre d'économiser de la puissance de calcul – pour l'entraînement des algorithmes – et de gagner du temps sur la collecte de données propres à chaque véhicule.

Un manque de données pour modéliser toutes les attaques

Car ce fut bien l'un des principaux défis à relever dans le développement de cet outil de détection : le manque de données disponibles. « Tout comme on ne peut pas conduire une voiture sans carburant, on ne peut pas entraîner un algorithme de deep learning sans données », souligne la jeune chercheuse. Afin de bien exécuter sa tâche de détection, un algorithme de deep learning nécessite énormément de données issues des véhicules.

Or, peu de constructeurs automobiles mettent en ligne des lots de données concernant leurs véhicules. De nombreux scénarios d'attaque manquent et si un scénario n'est pas modélisé, il ne peut pas être détecté. Les données doivent en outre être étiquetées pour que l'algorithme apprenne à reconnaître les situations d'attaques des situations normales, et les classer. Le meilleur moyen d'obtenir des données est donc de réaliser soi-même des attaques.

Les « White hats » sont des hackers éthiques qui réalisent des tests d'intrusion afin de découvrir les failles de sécurité des systèmes d'information. En diffusant leurs découvertes et en proposant des pare-feu, ils contribuent à lutter contre les hackers malintentionnés. Le Hacking and Countermeasure Research Lab publie ainsi de nombreux ensembles de données issues du piratage de véhicules par des « Whites hats » – sans en divulguer la marque. L'entreprise Bosch, qui produit de l'électronique pour les voitures, fournit également un ensemble de données appelé SynCAN permettant de comparer différents systèmes de détection d'intrusion, sur différents scénarios d'attaque.

Nouveaux véhicules, nouvelles technologies

Un second problème relatif aux lots de données concerne leur obsolescence. Chaque nouvelle génération de véhicule s'accompagne de nouveautés technologiques, au niveau des UCE, des capteurs, du système de transmission des informations... « Il est essentiel de travailler sur des ensembles de données qui représentent réellement ce qui se passe à l'intérieur d'un véhicule aujourd'hui, car nous ne pouvons pas développer une solution pour des véhicules récents si nos ensembles de données datent de 2009 ! », alerte Natasha Alkhatib.



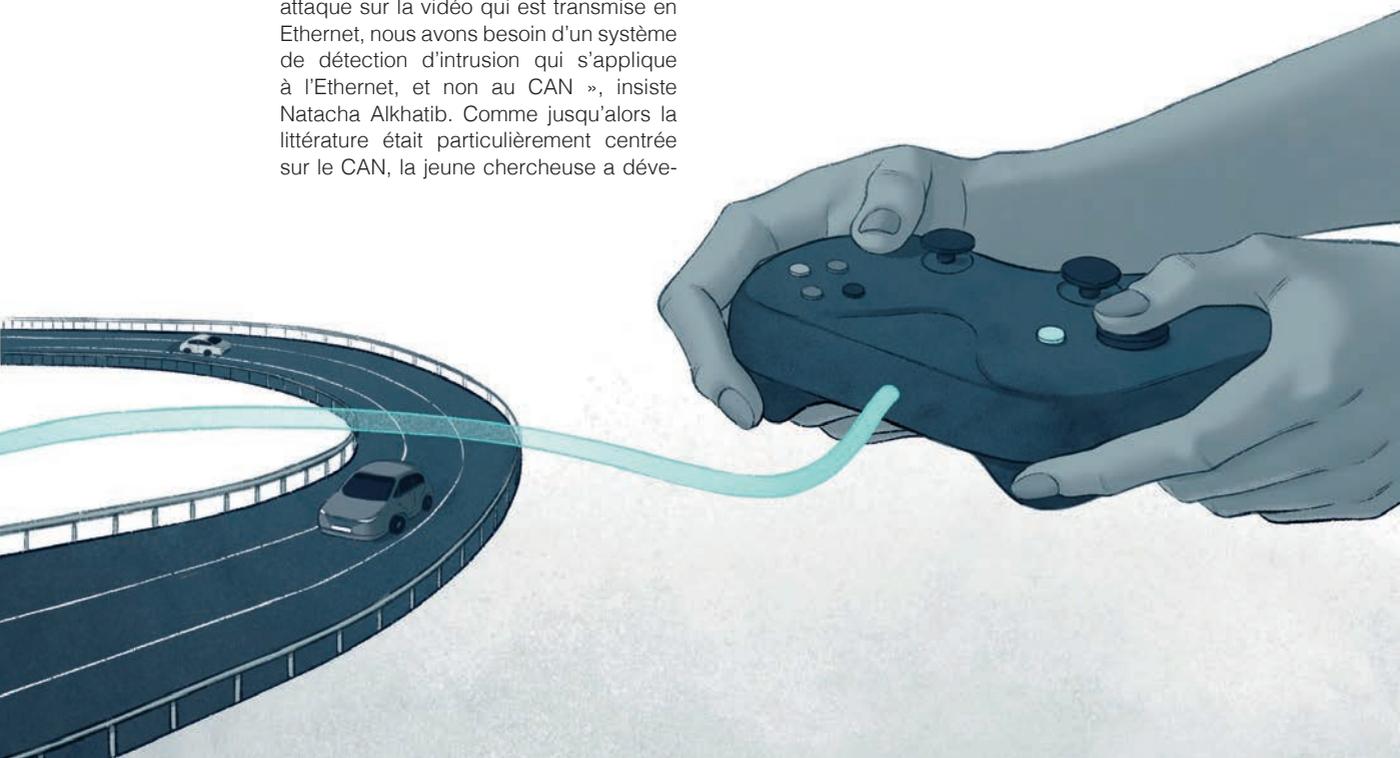
Le bus de données CAN (Controller Area Network) est la méthode de communication standard entre les UCE. Le CAN remonte à 1986, c'est un système de transmission robuste et fiable, mais qui n'est pas en mesure de transmettre de grandes quantités d'informations. Lors d'un stationnement autonome, par exemple, les caméras situées autour du véhicule envoient des vidéos à l'UCE, qui doit décider s'il faut tourner les roues à gauche ou à droite pour ajuster la position du véhicule. Une telle technologie nécessite l'envoi de mégabits de données qui vont bien au-delà de la simple information pour savoir si les phares sont allumés ou non. En outre, le bus CAN n'est pas « Secure-by-design » : il suffit d'en connaître les vulnérabilités pour accéder aux données transmises et exploiter le véhicule.

Depuis quelques années, les équipementiers et constructeurs automobiles utilisent donc la technologie Ethernet, plus adaptée pour transmettre des informations à haut débit et plus sécurisée. « S'il y a une attaque sur la vidéo qui est transmise en Ethernet, nous avons besoin d'un système de détection d'intrusion qui s'applique à l'Ethernet, et non au CAN », insiste Natacha Alkhatib. Comme jusqu'alors la littérature était particulièrement centrée sur le CAN, la jeune chercheuse a déve-

loppé son propre ensemble de données : « Malgré le défi, nous avons trouvé des vulnérabilités sur l'Ethernet et simulé des attaques. Puis nous avons généré et étiqueté la donnée pour alimenter notre algorithme de détection. »

Étant donné que le CAN sera toujours présent dans les véhicules pour prendre en charge des fonctionnalités basiques (typiquement la détection de l'allumage des phares), Natasha Alkhatib a travaillé sur une solution adaptable aux deux systèmes de transmission d'informations. Quoiqu'il en soit, ses travaux ont ouvert la voie à de nombreux acteurs de la recherche. « Il a fallu un an d'état de l'art avant de nous lancer sur l'Ethernet, mais nous étions convaincus de l'avenir de cette technologie et nous avons posé les jalons de la recherche en la matière » conclut-elle avec fierté. ▲

Rédigé par Ingrid Colleau.



VILLES CONNECTÉES

COMMENT METTRE L'ÉTHIQUE AU CŒUR DE LA SÉCURITÉ ?

Deux ans et demi après son démarrage, le projet européen IMPETUS délivre une plateforme du même nom dédiée à la sécurisation des villes intelligentes. Cette plateforme IMPETUS intègre huit outils mêlant technologies de pointe, considérations éthiques et recommandations opérationnelles à destination des centres de sécurité.

Si les taxis volants n'occupent pas encore l'espace aérien, la ville du futur, intelligente et adaptative, est, elle, déjà une réalité. Un peu plus chaque jour, la technologie vient améliorer le quotidien des citoyens et citoyennes en administrant et pilotant les bâtiments, le mobilier urbain, les réseaux d'eau et d'électricité ou encore les transports. Cette numérisation massive expose les villes intelligentes à des cyberattaques, mais ouvre aussi un nouveau champ d'action en matière de sécurisation. En s'appuyant sur ce tissu urbain d'objets et de services connectés, de nombreuses solutions technologiques peuvent être mises en place afin d'assurer la surveillance et la protection des villes intelligentes.

Démarré en 2021, le projet européen Horizon 2020 baptisé IMPETUS s'est focalisé sur le développement d'une sélection de ces technologies de lutte et de prévention, en cherchant non seulement à lever les barrières opérationnelles, mais également à répondre aux questions éthiques liées à leur implémentation. L'aboutissement de ce projet, deux ans et demi plus tard, tient en une plateforme, baptisée également IMPETUS, qui concilie technologie, éthique, et aide à la décision. Cette plateforme globale pour la sécurisation des villes intelligentes intègre huit outils, associés chacun à une procédure d'action à destination des centres opérationnels de sécurité (Security Operator Center, SOC), ainsi qu'un guide pratique détaillé.

Les outils sélectionnés couvrent un panorama de solutions technologiques agissant à différents niveaux : la détection d'urgences requérant une réponse immédiate, l'identification de menaces

potentielles ou émergentes, la gestion de situations de crise, la cyber-protection, et la garantie de l'efficacité opérationnelle. Deux écoles de l'Institut Mines-Télécom ont été impliquées dans le développement de ces outils : IMT Mines Alès pour la détection des bactéries dans l'air (Bacteria Detector), et Télécom SudParis pour l'outil de détection des menaces cyber et de contre-attaque (Cyber Threat Detection and Response). Cette dernière a également piloté l'évaluation éthique des outils, et l'élaboration du guide pratique.

« Pour déstabiliser une ville, il n'y a pas besoin d'atteindre tout le monde. »

Parmi les outils d'IMPETUS, certains existaient déjà et ont été amenés à des niveaux de maturité supérieurs, mais d'autres étaient complètement nouveaux. C'est le cas de l'outil de sécurisation du risque biologique développé par Sandrine Bayle, chercheuse à IMT Mines Alès, et son équipe. « Notre innovation est d'avoir changé de paradigme par rapport aux autres outils du marché qui se concentrent sur la recherche d'organismes pathogènes connus », explique-t-elle.

« Nous sommes partis du principe qu'en cas d'attaque, les responsables libèreraient beaucoup de micro-organismes. Donc nous avons décidé de mesurer la concentration de tous les micro-organismes présents dans l'air et d'évaluer à quel moment cette concentration n'est pas normale et représente un risque potentiel. »

L'outil a ainsi plus de chance de détecter une attaque d'une souche inconnue ou considérée comme non-pathogène en petite concentration. « L'expérience du Covid-19 a montré que pour déstabiliser une ville, il n'y a pas besoin d'atteindre tout le monde. L'organisation fait que quelques personnes malades suffisent à générer des dysfonctionnements, et surtout à créer la panique », ajoute la chercheuse. La mesure de concentrations dans l'air est basée sur le dosage de l'adénosine triphosphate, ATP, une molécule commune à tous les micro-organismes. Le dosage de l'ATP est une méthode couramment utilisée pour faire des diagnostics rapides sur les réseaux d'eau : par exemple, pour vérifier l'état si un système de climatisation est conta-

miné par la légionnelle. Sandrine Bayle et son équipe ont ensuite travaillé à la définition d'un seuil qui permettrait d'alerter sur la qualité de l'air.

L'opérationnalité de l'outil, et plus généralement de la plateforme IMPETUS, a pu être vérifiée en fin de projet, via deux exercices de mise en situation dans les villes intelligentes d'Oslo et de Padoue. Les membres du consortium ont ainsi testé la plateforme sur un scénario dans lequel différentes alertes (manifestation, présence d'une personne armée dans la foule, attaque terroriste et simulation d'une attaque bactériologique) se déclenchaient successivement sur une durée de deux ou trois heures. L'objectif était de mettre en tension les différents outils et d'observer leur mise en application, notamment leur capacité à prévenir les SOC afin d'enclencher une action.



Un équilibre entre surveillance et protection

Ces mises en situation ont également permis de faire le point sur les données collectées par chaque outil, et leur conformité au regard du cadre légal et technique. « Aujourd'hui, dès qu'une nouvelle technologie apparaît, nous devons nous interroger sur les conséquences éthiques de sa mise en place. Il est indispensable de créer ou de faire évoluer nos outils avec des briques technologiques qui respectent les contraintes légales en termes d'éthique et de respect de la vie privée », souligne Nesrine Kaaniche. Chercheuse à Télécom SudParis, elle a eu la charge d'un groupe de travail transverse sur l'identification et la gestion des risques liés notamment à la collecte des données personnelles par les outils d'IMPETUS.

« Dès le début du projet, nous avons identifié les outils traitant des données sensibles et les réglementations qui s'appliqueraient dessus », complète la chercheuse. Toutes les technologies d'IMPETUS ont ainsi été soumises à une analyse d'impact sur la protection des données (Privacy Impact Assessment, PIA), une bonne pratique validée par l'Agence de l'Union européenne pour la cybersécurité (ENISA), assurant de manière uniforme que les données de vie privée soient traitées respectueusement.

Les données collectées par certains outils, comme le détecteur d'armes à feu basé sur des caméras connectées, sont effectivement sensibles : « Ces caméras filment en permanence mais nous avons fait en sorte que les images ne soient consultées et conservées que lorsqu'une arme à feu est détectée », argumente Nesrine Kaaniche. « De même, pour l'outil de détection sur les réseaux sociaux, les données identifiantes sont anonymisées et conservées de façon chiffrée. »

En portant ce sujet transverse, la chercheuse a été consultée tout le long du projet par les acteurs du consortium en charge de développer un outil : « Grâce à cela, au moment des simulations, nous étions plus sur une phase de validation que sur une phase de mise en conformité. In fine, tous les outils ont respecté les normes fixées. »

Une plateforme complémentaire de sensibilisation et d'informations

En cours de projet, convaincu par le travail réalisé sur les questions d'éthique et de vie privée, le coordinateur scientifique et technique d'IMPETUS a confié à Télécom SudParis la réalisation d'analyses similaires sur les aspects cybersécurité et opérationnels des outils. Le résultat de ces travaux se présente sous la forme d'un guide pratique en ligne, appelé Practioners Guides, à destination des utilisateurs de la plateforme IMPETUS (opérationnels, politiciens, etc.). « Sintef [ndlr : l'organisation coordinatrice du projet] a initié l'idée d'une plateforme en ligne sur laquelle intégrer tous les résultats du projet. Les partenaires du projet pouvaient entrer eux-mêmes les informations et nous en avons récupéré l'animation », relate Joaquin Garcia-Alfaro, chercheur à Télécom SudParis et en charge du pilotage du Practioners Guides. ▲

Rédigé par Ingrid Colleau.

NEW NORMAL AU TRAVAIL

LE COLLECTIF EN PÉRIL

L'Observatoire du new normal au travail, porté par une chercheuse d'Institut Mines-Télécom Business School, sort son troisième livre blanc. L'étude souligne cette année l'effritement du collectif en entreprise. Un détachement alimenté notamment par l'utilisation des outils numériques au détriment de l'oral, et par un déploiement inégal du télétravail.

Le « new normal au travail » englobe toutes les mutations du monde professionnel liées à l'intégration des outils numériques et collaboratifs, accélérées par la crise de la Covid-19. Depuis 2022, l'Observatoire du new normal au travail caractérise et restitue ces changements tout en proposant des solutions d'accompagnement pour les entreprises. Pour sa troisième édition, l'étude continue de reporter les évolutions annuelles des thèmes récurrents, tout en explorant de nouveaux questionnements tirés des précédents enseignements.

« L'an passé, nous avons constaté un basculement de la notion « d'équipe » à la notion de « tribu ». Cette année nous avons donc voulu explorer la thématique du « collectif » et nous avons demandé aux membres de l'observatoire : « Qu'est-ce qu'un collègue pour vous aujourd'hui ? », expose Aurélie Dudézert, professeure en management à Institut Mines-Télécom Business School, et co-fondatrice de l'observatoire, avec Florence Laval, chercheuse de l'IAE Poitiers.

La remise en question du collectif

Quatre grandes thématiques se sont distinguées au fil des échanges : le collectif dans le travail, l'entreprise et la flexibilité, le mode de management, et le travail sous l'angle des outils. Ces thèmes confirment une évolution marquante entre 2022 et 2023 : une grande lassitude face aux évolutions en cours. « Nous avons constaté un désenchantement très marqué qui ne porte pas, comme l'année précédente, sur les interrogations et déceptions des modes de travail proposés, mais plutôt sur ce qu'est l'entreprise », analyse Aurélie Dudézert.

En 2022, les membres de l'observatoire exprimaient encore une insatisfaction sur les méthodes d'organisation du travail avec, en creux, les problématiques liées à la maîtrise et à la robustesse des outils technologiques. En 2023, ces questions sont balayées par une remise en cause très forte du « faire ensemble » : les individus se positionnent en retrait par rapport au collectif incarné par l'entreprise, et le management ne dispose pas des outils pour contrebalancer cela.

Un détachement exacerbé par les outils numériques

En cause de cet ébranlement du « faire ensemble » : la difficulté à communiquer à l'ère du new normal. Le changement de paradigme imposé par l'arrivée de la crise de la Covid-19 a précipité l'adoption des outils numériques. D'une part, les échanges par media interposé sont souvent source de malentendus et génèrent de l'inconfort. D'autre part, ces échanges ont pris le pas sur le dialogue oral, conduisant à une attitude de travail productive, sans « perte de temps » avec les collègues. « Sauf que cette socialisation est essentielle pour mener une action collective ! », décrypte Aurélie Dudézert.

Cependant, la perte du lien collectif résulte d'un phénomène global qui puise ses sources bien avant la crise de la Covid-19. « Cette crise a été vécue très violemment par la majorité de la population, mais avant cela, les gens s'interrogeaient déjà beaucoup sur le sens du travail », relate la chercheuse. Pour elle, il ne s'agit pas pour autant d'un désengagement ou d'un manque de motivation : « Les individus sont engagés sur leurs tâches mais ne se préoccupent plus de la vision collective ou de ce qu'ils apportent à l'entreprise. Il n'y a plus d'attachement à l'organisation. »

En revanche, si le collectif dans le monde professionnel a pâti, l'émotionnel y est exacerbé, au sein des équipes notamment : « Les gens se serrent les coudes, mais ne travaillent qu'avec les collègues qu'ils apprécient. »

Le télétravail, source d'inégalités

Toujours au cœur des polémiques dans le new normal, le télétravail a lui-aussi sa part de responsabilité dans le désagrègement du collectif. Outre les problèmes de communication ou de compréhension habituellement pointés du doigt, le télétravail est désormais à l'origine d'un sentiment d'iniquité, voire d'injustice, de plus en plus marqué. La faute à un déploiement extrêmement variable en fonction des entreprises, des activités et des contrats.

Typiquement, le déséquilibre en usine, entre des équipes managériales autorisées à télétravailler et les équipes ouvrières qui n'en ont pas le droit, est naturellement source de tensions. Ce constat ne concerne pas que l'industrie, mais aussi par exemple, le secteur bancaire. « Beaucoup de gens ne peuvent pas faire de télétravail », rappelle Aurélie Dudézert. « Il y a des raisons imposées par leur activité mais aussi par des conditions de vie personnelles. »

Les travailleurs et travailleuses qui en bénéficient ne sont pas en reste, avec l'ajout d'une charge mentale parfois insoupçonnée. Les personnes autorisées à télétravailler, mais plus assidues que d'autres à se rendre sur site, sont par exemple plus à même d'être sollicitées par celles qui y travaillent en permanence, même sans lien hiérarchique entre elles.

Autre exemple venant affecter le sentiment collectif, la diminution des espaces de travail pour compenser une moindre présence sur site. La cession de locaux amène généralement à des solutions de flex office qui alimentent auprès des individus le sentiment de ne plus avoir « leur place » au sein de leur entreprise.

Accompagner le changement de paradigme

Malgré la complexité de la mise en œuvre du télétravail, un retour au présentiel permanent paraît difficilement concevable et pertinent. Face à ces conclusions, l'Observatoire du new normal au travail fournit des recommandations essentiellement axées sur la conciliation entre présentiel et distanciel. Les chercheuses et leur communauté s'accordent également sur l'importance des directions générales et des ressources humaines à s'emparer du problème. « Dans le new normal, tout a changé : l'espace, le temps, le lien... C'est un changement de paradigme aussi fort que le Taylorisme, et il a fallu énormément de temps pour accompagner cela », explicite Aurélie Dudézert.

Sur la question du collectif, malgré un tableau assez noir, la plupart des individus sont satisfaits et en tirent leur parti. La mobilisation des salariées et salariés autour de sujets forts et à enjeux, comme les sujets environnementaux, pourrait être un moyen de regonfler le sentiment collectif et d'associer l'entreprise à autre chose qu'un lieu de production. « Mais il faut aussi que cela ait un sens avec l'activité de l'organisation », alerte la chercheuse.



Les enseignements de cette année encouragent les deux fondatrices de l'observatoire dans leur volonté de pérenniser ce dispositif. « Les personnes interrogées éprouvent un grand soulagement à se retrouver et à partager ce qu'elles vivent, qui contrebalance généralement avec une grande solitude et une difficulté à parler de tout cela dans leur structure. C'est pourquoi il est nécessaire de maintenir cette réflexion sur les pratiques de travail, la collaboration et le management dans les organisations », souligne Aurélie Dudézert.

Des méthodes qualitatives pour observer le new normal au travail

L'observatoire est constitué d'une vingtaine de personnes de tous âges, hommes et femmes confondus, salariées et managers, issues d'organisations privées et publiques en France, de taille et de localisation variables. Ces personnes travaillent toutes autour de la transformation digitale, sur des fonctions support ou techniques, certaines sont même impliquées dans des unités mises en place au sein de leur entreprise pour reconcevoir les modes de travail et s'adapter au mieux aux changements. Aurélie Dudézert reconnaît néanmoins la sous-représentation des « cols bleus » dans cet échantillon.

L'observatoire repose sur des méthodes qualitatives et notamment l'analyse d'entretiens de groupes. Chaque année, les discussions sont amorcées par une question spécifique à partir de laquelle les membres de l'observatoire témoignent de leur expérience et de situations observées ou vécues. Les données sont soumises à des analyses statistiques ou textuelles.

Depuis cette année, l'Observatoire du new normal au travail a étoffé son offre avec un site web, donnant accès à un espace de veille en ligne, à une série de podcasts, ainsi qu'à un espace d'échanges pour communiquer avec les membres. « L'idée est que des personnes extérieures à l'observatoire partagent également leurs expériences », espère Aurélie Dudézert. Une médiatrice accompagne la chercheuse et sa co-fondatrice, Florence Laval, dans la gestion de ces supports de diffusion et l'animation de la communauté. ▀

Rédigé par Ingrid Colleau.



FAKE NEWS

L'IMAGE D'UN SYSTÈME COMPLEXE

Élections présidentielles, crise sanitaire et guerre en Ukraine sont autant d'événements associés à l'utilisation massive de fake news. Les raisons de leur apparition et les contextes dans lesquels elles s'inscrivent sont très complexes, et nécessitent des analyses à différentes échelles. Anuragini Shirish, chercheuse à Institut Mines-Télécom Business School, travaille à tisser le lien entre les fake news et des indicateurs économiques et sociaux.

Les fake news se sont déployées avec l'utilisation croissante des outils numériques dans des contextes de tension sociale de plus en plus importants » introduit Anuragini Shirish, chercheuse à Institut Mines-Télécom Business School. L'essor massif des fake news avait déjà été observé lors de prises de positions politiques, par exemple lors de l'élection de Donald Trump en 2016 aux États-Unis. Mais c'est au cours de la pandémie de Covid-19 que celles-ci ont pris une ampleur inégalée. Bien que les thématiques vulnérables aux fake news se ressemblaient parfois, par exemple concernant le vaccin contre le Covid-19, leur apparition et leur propagation a été très variable selon les pays.

Afin d'étudier les contextes pouvant favoriser ou diminuer l'apparition des fake news, l'équipe d'Anuragini Shirish a mené une étude sur le nombre de fake news qui ont émergé dans 104 pays durant la crise sanitaire, en les croisant avec des indices de développement humain et de croissance économique. L'étude a été financée par l'Institut Carnot Télécom & Société Numérique et a donné lieu à une publication en accès libre (Impact of Human and Economic Development on Fake News Propensity During the COVID-19 Crisis: A Cross-Country Analysis, Anuragini Shirish & Kanika Kotwal). « Nous avons regardé l'origine des fake news dans différents pays en nous basant sur le nombre de fake news qui y sont apparues et identifiées par des systèmes de fact checking » précise-t-elle.

Dans un travail précédent, la chercheuse avait déjà montré que les incertitudes concernant l'avenir individuel et collectif engendrent la création et la propagation de fake news. L'inquiétude des indivi-

us les pousse à chercher des réponses rapides qu'ils acceptent plus facilement sans utiliser un regard critique. « Nous pensions donc qu'une croissance économique et un développement humain plus élevé réduirait les incertitudes des individus, et donc leur influençabilité par les fake news » explique Anuragini Shirish.

Des observations inattendues

Les résultats de cette nouvelle étude sur les pays ont été surprenants. Si une meilleure économie d'un pays réduit effectivement le nombre de fake news qui en émerge, un meilleur indice de développement humain n'a pas cet effet : au contraire, il augmente le nombre de fake news. « Le résultat des observations était inattendu, ce qui reflète une problématique très complexe, et à ce stade, nous pouvons simplement émettre des hypothèses » indique la chercheuse.

L'indicateur de développement humain comprend différents aspects. Il est notamment défini par des standards de confort de vie, qui inclut des bénéfices sociaux comme la sécurité sociale, une mesure de l'espérance de vie en bonne santé, ainsi qu'un certain standard d'éducation. « Nous pensions que le niveau d'éducation général aiderait à développer l'esprit critique et à posséder plus d'outils pour réfléchir avant de réagir émotionnellement face aux incertitudes » explique la chercheuse. « Mais ce n'est pas le cas, et cela pourrait même avoir un effet inverse, car des personnes peuvent avoir plus de curiosité pour s'informer sur des sujets spécifiques sans avoir les outils pour les maîtriser » souligne-t-elle.

Dans beaucoup de pays, les enseignements mis en place ne sont pas actualisés pour lutter contre la problématique émergente de la désinformation. De tels enseignements spécifiques consiste-

raient notamment à apporter une maîtrise des outils de communications digitaux et de pensée critique de l'information médiatique. « Ces enseignements sont d'ailleurs mis en place dans les pays d'Europe du Nord, où les fake news sont beaucoup moins répandues » pointe la chercheuse.

De plus, les individus des pays plus développés ont un accès plus facile à des technologies numériques plus avancées, ce qui leur donne une capacité à créer ou à diffuser des fake news de manière plus efficiente. Certaines technologies modifient même finement des images ou des vidéos, et leur falsification devient davantage difficile à détecter. La différence entre les vraies et les fausses informations est de plus en plus compliquée à repérer, d'autant plus que des outils d'information très puissants comme ChatGPT peuvent les utiliser sans distinction pour répondre aux utilisateurs.

Le système complexe des fake news

« La diffusion des fake news a une dynamique très complexe qui est influencée par un très grand nombre de paramètres » explique Anuragini Shirish. « De plus, cette dynamique comporte des boucles de rétroaction positives, notamment par le fait que plus des personnes sont exposées à une information, plus elles vont avoir tendance à la croire et à se sentir dans le rôle de la relayer à leur tour » précise la chercheuse.

Les liens et les différences entre une bonne économie et un bon niveau de développement humain d'un pays sont encore à approfondir pour comprendre leur influence différentielle sur les fake news. Les indicateurs gagneraient aussi à être subdivisés pour analyser l'influence croisée des sous-indicateurs. « Même des facteurs comme l'influence de l'universalité d'un langage sont importants à prendre en compte dans la dynamique de propagation des fake news, ajoute la chercheuse. Les fake news dans des langues comme l'anglais, l'espagnol ou le français se diffusent plus facilement que des fake news dans les langues moins parlées, dont les langues des pays d'Europe du nord, et c'est donc aussi un critère à prendre en compte. »

Le niveau de développement humain n'est pas nécessairement lié à une incertitude moins élevée chez les individus. D'autres critères sont à intégrer, comme le bien-être de vie général, qui reste un critère subjectif difficile à mesurer. Des pays avec de bons indicateurs de développement humain peuvent avoir un niveau de bien-être élevé, comme les pays nordiques, ou relativement faible comme la France.

Vers des réflexions sociologiques

Les états qui ont un bon niveau économique et humain général peuvent toutefois comporter des inégalités sociales importantes. En sociologie, la théorie de la tension (strain theory) stipule que les inégalités sociales engendrent de la pression sur les individus qui cherchent en permanence un meilleur nivellement social, et que celui-ci est souvent lié à des objectifs matérialistes. Cela peut parfois induire des activités immorales ou illégales, voire criminelles. La polarisation d'une société entraîne sa fragmentation en groupes communautaires qui ont des croyances et des nécessités divergentes.

Les groupes peuvent ainsi créer et diffuser des fake news pour des raisons différentes. Par exemple, des personnes moins aisées peuvent chercher à monétiser ces fausses informations pour gagner de l'argent... En revanche, des personnes aisées et influentes peuvent propager la désinformation pour des raisons politiques. Ce type de déviance est donc lié à la mentalité culturelle de nos sociétés. « Il est important d'apprendre à considérer les individus de manière holistique, c'est-à-dire en prenant plus en compte leurs aspects émotionnels, spirituels, culturels et sociaux » évoque Anuragini Shirish.

Les fake news sont le symptôme d'un modèle de fonctionnement général qu'elles renforcent par la même occasion. La complexité de leur dissémination nécessite d'approcher la lutte contre

la désinformation avec des angles très variés. À court et à moyen terme, des aspects comme la mise en place de solutions techniques sur les plateformes numériques sont nécessaires. Il est également important que les gouvernements agissent pour accompagner le développement de la pensée critique, et mettent en place des réglementations tout en respectant la liberté d'expression. L'étude du lien entre les fake news et les spécificités des réglementations des pays fait l'objet de recherches en cours par l'équipe d'Institut Mines-Télécom Business School. « À long terme, pour continuer de mieux comprendre un problème complexe de la sorte, les analyses aux macro-échelles et micro-échelles devront se combiner, et inclure une dimension de philosophie sociale » conclut Anuragini Shirish. ▲

Rédigé par Antonin Counillon.





III

ENVIRONNEMENT & INDUSTRIE CIRCULAIRE

1

POLLUANTS À LA DÉRIVE :
COMMENT PROTÉGER
LES OCÉANS ?

2

DES MATHÉMATIQUES
POUR GÉRER L'ESPACE
MARIN

3

L'AGROFORESTERIE,
UNE OPPORTUNITÉ
POUR LES MATÉRIAUX
ET LA CHIMIE

POLLUANTS À LA DÉRIVE :

COMMENT PROTÉGER LES OCEANS ?

À l'instar des pétroliers et leurs marées noires, les chimiquiers accidentés libèrent jusqu'à plusieurs tonnes de substances liquides nocives et potentiellement dangereuses. La nappe générée en surface peut dériver sur l'eau, mais également s'évaporer sous forme de nuages gazeux toxiques, inflammables, voire explosifs. Le projet MANIFESTS, achevé cette année, a regroupé un consortium international d'instituts de recherche, parmi lesquels IMT Mines Alès. Dans le cadre de ce projet européen coordonné par le Cedre, les scientifiques ont cherché à mieux comprendre le comportement de ces substances une fois déversées dans les océans, afin de réduire le risque encouru en intervention par les autorités maritimes dans leur lutte contre la pollution.

Le transport maritime représente environ 80 % en valeur des échanges mondiaux de marchandises, et 90 % en volume. La flotte mondiale dénombre plus de 50 000 navires de commerce, dont 40 % sont des navires-citernes dédiés au transport de pétrole (pétroliers) et 2 % au transport de produits chimiques (chimiquiers). Ces navires sont de plus en plus nombreux à naviguer le long des côtes européennes sous la vigilance accrue des autorités maritimes. À juste titre. Les pollutions par hydrocarbures dues à des naufrages de pétroliers, comme l'Erika ou le Prestige, ont largement marqué les esprits. Qui plus est, les chimiquiers et leurs cargaisons à haut potentiel toxique, d'inflammabilité et d'explosion, présentent des risques bien plus élevés en matière de sécurité humaine et d'impact environnemental.

En octobre 2000, le navire *Levoli Sun* transportant 6 000 tonnes de produits chimiques, dont une majorité de styrène à potentiel explosif et toxique, a sombré au large de Cherbourg, libérant un nuage de gaz très odorant en direction de la ville. Si une coopération internationale, notamment entre les autorités françaises et anglaises, s'est rapidement et efficacement mise en place pour circonscrire le danger, cet accident a montré les limites des connaissances en matière de comportement des produits chimiques déversés en mer. Des limites qui rendent souvent difficiles l'évaluation du risque et le choix des méthodes d'intervention.

C'est à partir de ce constat qu'a été lancé, en janvier 2020, le projet européen MANIFESTS (MANaging risks and Impacts

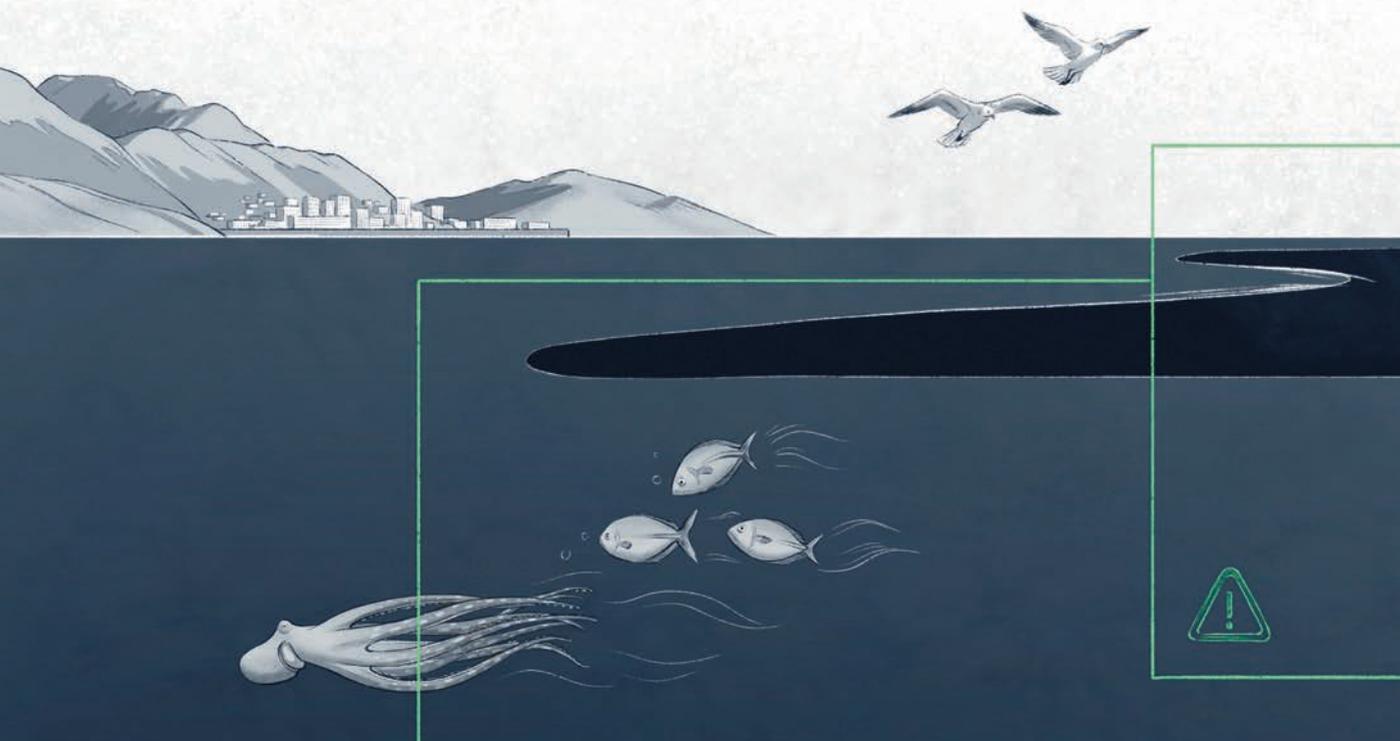
From Evaporating and gaseous Substances To population Safety). Pendant deux ans, neuf instituts de recherche et administrations de six pays (France, Belgique, Royaume-Uni, Norvège, Espagne, Portugal), dont IMT Mines Alès, ont allié leur expertise. L'objectif : développer un système opérationnel d'aide à la décision pour les déversements de substances nocives et potentiellement dangereuses (Hazardous and Noxious Substances, HNS) en milieu marin. Un tel système permettrait à terme d'améliorer les capacités d'intervention lors de fuites chimiques avec rejets aériens d'un navire-citerne, et de décider rapidement du confinement ou de l'évacuation de l'équipage et des populations environnantes.

Pour servir cet objectif, le projet prévoyait plusieurs missions : compréhension des mécanismes de dispersion des produits chimiques – dans l'eau et dans l'air, modélisation de ces mouvements, évaluation des risques et élaboration de protocoles de réponses adaptées, intégration dans des outils d'aide à la décision, et enfin diffusion et valorisation de ces résultats. Les équipes du consortium se sont partagées la responsabilité de ces missions ; IMT Mines Alès était principalement en charge des parties dédiées à l'expérimentation pour l'étude des conséquences d'incendies ou d'explosions et la réalisation d'un jeu sérieux à destination des services d'intervention.

Une modélisation au fil de l'eau... et du vent !

Afin de mieux comprendre la dérive de polluants type nappe de pétrole en mer, ou nuage de gaz dans l'atmosphère, les équipes du Cedre et d'IMT Mines Alès ont procédé à différents essais de dispersion. D'abord à petite échelle, dans l'eau en laboratoire, puis en soufflerie, avant de passer à une simulation grandeur nature. Sous l'œil de la Marine Nationale, les scientifiques ont suivi la trajectoire d'une nappe d'huile végétale au large des côtes bretonnes. Les équipes alésiennes ont aussi réalisé des essais de feu et d'explosion pour comprendre les comportements de produits enflammés depuis un navire, en fonction de la quantité de produits à bord.

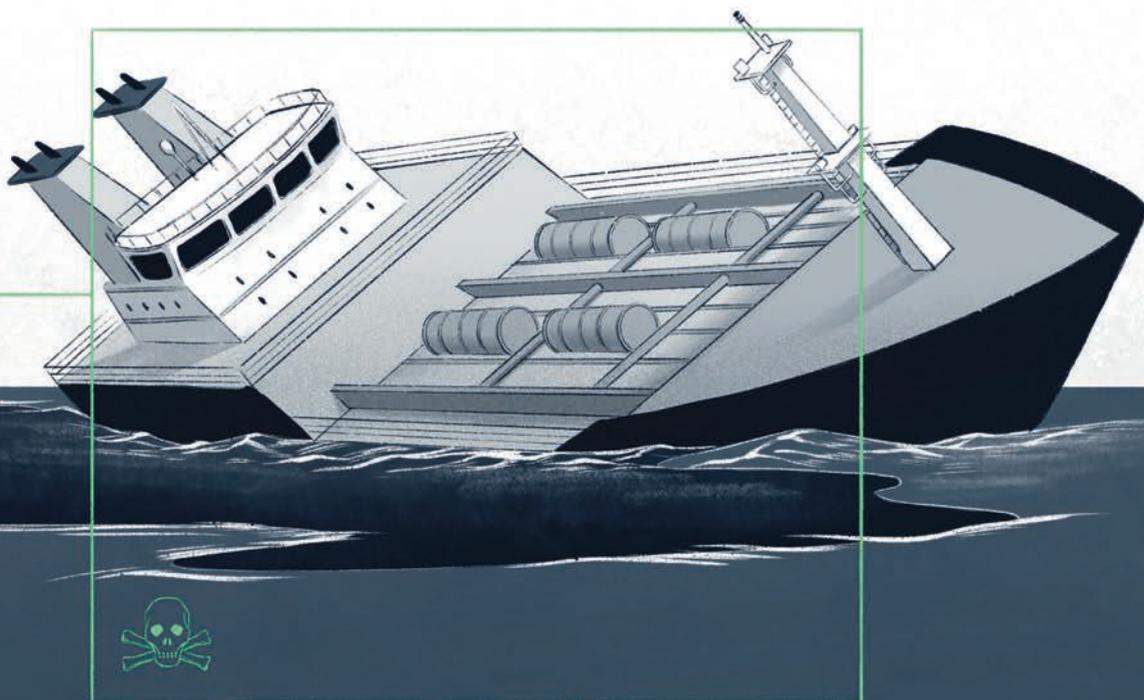
En parallèle, les équipes belges du consortium ont coordonné la mise en équation de ces expérimentations. Leur but : anticiper le déplacement des polluants en mer et dans l'air, visualiser les flux thermiques d'une explosion ou d'un incendie, quadriller les futures zones touchées et évaluer les dégâts sur l'environnement. « Ces modèles numériques sont très complexes à élaborer car ils font intervenir des disciplines variées : l'hydrodynamique marine (ndlr : l'étude de la houle, des courants...), la physico-chimie, la météorologie, la dispersion atmosphérique ou encore l'explosion-combustion. De nombreuses incertitudes se cumulent dans les calculs », convient Laurent Aprin, chercheur à IMT Mines Alès.



Les modèles développés ont été éprouvés avec de nouvelles simulations en mer, mais également – une fois n'est pas coutume – mis en comparaison avec des modèles développés par d'autres Instituts de recherche. Une mise en situation commune a été faite afin d'opposer les prévisions pour un même scénario. Cette expérience comparative a notamment attiré l'attention des scientifiques sur le phénomène météorologique des vents tournants. Selon l'heure de la journée, le vent change de direction, modifiant potentiellement la trajectoire anticipée par le modèle. Cette mise en situation a permis d'enrichir les scénarios possibles de nouveaux paramètres, et des statistiques liées aux incertitudes météorologiques ont été ajoutées pour améliorer la prédictibilité des comportements.

Des cartes de danger comme outil d'intervention

Après les calculs vient l'évaluation des risques et des moyens de protection à mettre en œuvre pour sécuriser les personnes environnantes et intervenantes. Grâce aux modélisations, des cartes de danger ont été établies indiquant les zones à risques définies par des seuils réglementaires. Par exemple : la distance à tenir par rapport au rayonnement thermique d'un incendie pour intervenir en sécurité.



Les modèles sont basés sur des niveaux de dangers maximaux car comme le justifie Laurent Aprin, « une explosion en mer est beaucoup moins catastrophique qu'une explosion dans une zone confinée, comme celle qui a eu lieu dans le port de Beyrouth en 2020. Mais en opération, il n'y a pas de marge de manœuvre : soit les équipes interviennent, soit elles n'interviennent pas. Même si dans certains cas il y a plus de 200 % d'écart avec la réalité, notre volonté a été de dresser ces cartes sur le pire des scénarios, pour que la sécurité soit garantie en-dehors des zones de risque indiquées. »

L'interprétation des valeurs limites a par ailleurs été une réflexion centrale dans l'élaboration des cartes de danger. « Souvent, les difficultés d'intervention découlent d'une incompréhension entre les experts qui ont une connaissance fondamentale, et les intervenants sur le terrain, car les équipes n'ont pas la même approche, ni le même vocabulaire », commente le chercheur. « Par exemple, les garde-côtes ont des difficultés pour interpréter les valeurs des seuils critiques, et donc les conséquences. »

Trouver un langage commun entre les différentes parties prenantes

Ainsi, pour que les destinataires de ces outils puissent se les approprier facilement, les valeurs numériques limites ont été associées à des dommages observables : le seuil du blast (explosion des vitres), des brûlures au 1^{er} degré, de l'explosion des tympons... Un travail de retranscription mais aussi de simplification des messages. « En tant que scientifiques, nous avons tendance à restituer toutes les connaissances que nous avons

sur un sujet. Or les équipes d'intervention n'ont pas forcément besoin d'avoir beaucoup d'informations pour prendre une décision, mais il leur faut les bonnes informations », constate Laurent Aprin. Les cartes ont donc été complétées par un code couleur universel, allant du vert au rouge pour signaler le niveau de danger.

Ces cartes ont finalement été associées à différents scénarios d'accident et soumises aux personnes opérant sur le terrain qui, elles, connaissent les moyens de protection adaptés à chaque situation. Des méthodologies d'intervention ont été recensées sur la base de leurs retours d'expérience. L'objectif de cette démarche était de voir comment se préparer à toutes les situations, et d'identifier celles pour lesquelles il n'y avait peut-être pas encore de moyens de lutte en place.

Enfin, le projet MANIFESTS prévoyait l'élaboration d'un outil de formation à l'adresse des services d'intervention. Les équipes d'IMT Mines Alès ont donc développé un jeu sérieux dont le but est d'identifier des « pollu-criminels ». Dans la peau d'un inspecteur, les joueurs et joueuses doivent identifier un polluant en fonction de ses caractéristiques physico-chimiques, de son comportement dans l'eau ou dans l'air, et de sa toxicité. Le jeu démontre que l'identification et les risques associés à un produit dépendent de nombreux paramètres qui vont également déterminer les méthodes d'intervention adaptées. Une démonstration réussie en a été faite lors de la réunion de clôture du projet à Bruxelles en mars 2023, et une mise en ligne est prévue afin de valoriser cette preuve de concept.

Encore de nombreuses pistes à explorer

Encouragé par le succès de ce projet MANIFESTS, le Cedre a souhaité reconduire le consortium. Un autre projet européen (MANIFESTS Genius) a été déposé au mois de mai 2023 afin de continuer à travailler sur la compréhension des déversements de HNS en milieu maritime, mais aussi se focaliser sur les accidents dans les ports et sur les pipelines. Une orientation qui fait suite au sabotage des gazoducs Nord Stream 1 et 2, en mer Baltique, en septembre dernier. « Il est très complexe d'intervenir lorsqu'il y a une fuite de gaz dans la mer », alerte Laurent Aprin. « Non seulement il y a la formation d'un nuage de gaz inflammable et explosif dont il faut évaluer les conséquences – ça, c'est la partie que nous commençons à maîtriser – mais en plus, le gaz dans l'eau en change globalement la physique. Un navire sauveteur peut couler car il n'a plus assez de portance pour flotter ! » Ces situations sont d'autant plus critiques que les fuites sont généralement très importantes, avec des périmètres de sécurité qui peuvent s'étendre à des centaines de mètres, interdisant toute approche et donc toute intervention, par voie maritime ou aérienne. Autour de Nord Stream, la zone de sécurité était de 9 km.

L'objectif sera là encore de fournir des mémorandums à utiliser au moment d'un accident, pour la gestion de crises, et des fiches d'intervention. La modélisation ne sera pas au cœur des recherches pour ce futur projet, même si une association avec une équipe de l'ONERA est envisagée pour utiliser une caméra hyperspectrale. « Nos cartes montrent des cercles de sécurité en cas de fuite. Mais en situation réelle, avec les vents et les courants, les fluides polluants se déplacent et le cercle prend plutôt la forme d'une plume », rétablit le chercheur. Cette caméra aiderait à visualiser les concentrations (toxiques ou explosives), et à déterminer par où commencer l'intervention sur un accident pour garantir une sécurité maximale. L'utilisation d'outils d'intelligence artificielle pour la prévision des comportements de HNS en mer n'est pas non plus exclue. « Nous avons essayé une fois d'utiliser un réseau de neurones pour des calculs de simulation numérique de dispersion et les réponses sont extrêmement rapides, il y a un vrai potentiel », reconnaît Laurent Aprin. Cette possibilité ouvre là aussi la voie à de nouvelles collaborations. ▲

Rédigé par Ingrid Colleau.

DES MATHÉMATIQUES

POUR GÉRER L'ESPACE MARIN

La répartition de l'espace marin entre les multiples activités, de natures diverses et parfois incompatibles, comme la pêche et l'exploitation d'hydroliennes, peut s'avérer un véritable casse-tête. Patrick Meyer, chercheur à IMT Atlantique, conçoit des modèles mathématiques d'aide à la décision. Ces modèles sont intégrés dans un outil, visuel et collaboratif, que le chercheur a développé avec son équipe pour résoudre des problèmes spécifiques au domaine maritime.

Vous êtes-vous déjà torturé les méninges après avoir fait un choix, de peur de ne pas avoir fait le bon ? Ce phénomène a un nom : la FOBO, pour « Fear Of Better Options », littéralement la « peur d'une meilleure option ». Si la FOBO caractérise surtout un mal-être qui puise ses sources dans l'hyper-connexion et la mise en concurrence sur les réseaux sociaux, « l'embaras du choix » face à une surabondance de possibilités est une réalité universelle. Quelle voiture, plateforme de streaming, ou marque de yaourts sélectionner au regard de critères de plus en plus nombreux, comme le coût, la performance, la composition, l'éthique... ?

De tels dilemmes s'expriment également au niveau collectif et sociétal, avec des enjeux politiques, économiques et écologiques significatifs : comment organiser un territoire ? Où investir l'argent des contribuables ? Ces problèmes, généralement très complexes, comportent un nombre incalculable de solutions que le cerveau humain, seul, n'est pas en mesure d'analyser. En revanche, ils peuvent être soumis à des ordinateurs qui, à l'aide de modèles mathématiques, vont trouver LA solution – ou à défaut, le meilleur compromis. Patrick Meyer est chercheur au Lab-STICC (UMR CNRS 6285), à IMT Atlantique, sur le campus de Brest, et travaille sur le développement de ces modèles pour faciliter la prise de décision. Ses recherches s'appliquent à de nombreux domaines, mais sont particulièrement ancrées sur le territoire breton, et notamment la mer.

Les enjeux de la planification de l'espace marin

Que vient faire la mer dans des problèmes de décision ? Au même titre que la terre, la mer est un espace qui soulève des questions de gestion et d'aménagement. De nombreux acteurs investissent cet espace pour différentes activités : la pêche, l'extraction de ressources, le tourisme, la recherche scientifique, le militaire, la navigation... dont certaines peuvent coexister et se dérouler au même endroit, mais d'autres pas. Le croisement, par exemple, d'une zone de pêche et d'une route de cargos peut s'avérer dangereux, voire catastrophique.

Le but de la planification de l'espace maritime (PEM) est d'affecter chaque activité à une zone afin d'éviter les conflits entre les différents acteurs, tout en respectant les contraintes liées au « territoire ». La PEM sert typiquement à décider du tracé de nouvelles routes de bateaux dans la mer ou de l'implantation de fermes d'hydroliennes, ce qui implique par exemple que ces zones deviennent interdites à la pêche, ou du moins, que celle-ci doit s'y faire différemment. En outre, il existe le long des côtes des aires marines protégées où aucune activité, économique ou d'extraction, n'est autorisée.

« Il suffit de superposer sur une carte l'ensemble des activités prévues en mer et leurs contraintes pour se rendre compte du chaos et de toutes les incompatibilités ! », argue Patrick Meyer. C'est dans ce genre de situation inextricable que le mathématicien et informaticien, outillé de ses modèles et ses algorithmes, intervient afin d'aider les autorités locales à prendre leurs décisions.

DESEASON, un outil dédié aux problèmes de décision maritimes

Pour soutenir les processus de décisions spécifiques à l'espace maritime, Antoine Malléol, chercheur dans l'équipe de Patrick Meyer, a développé avec le Service hydrographique et océanographique de la marine (SHOM) une plateforme logicielle adaptée, DESEASON. L'outil facilite la collaboration en réunissant, soit dans une salle physique, soit à distance, les différents acteurs concernés par un problème donné. Pour la création par exemple d'une zone de pêche et d'une ferme d'hydroliennes (voir illustration ci-dessus), chaque protagoniste exprime ses exigences et ses contraintes. Les chercheurs et chercheuses du Lab-STICC les traduisent en équations mathématiques pour alimenter l'outil, qui propose des premières solutions de « zoning » (détermination des zones). Ces propositions sont soumises aux différentes parties prenantes et ouvrent la discussion. En fonction des retours, de nouvelles équations sont introduites dans l'outil qui ainsi, de manière itérative, finit par converger vers une solution équilibrée.

DESEASON fournit in fine des cartes sur lesquelles figurent les caractéristiques d'intérêt de l'espace maritime étudié (les zones de poissons, la présence de courants favorables à l'installation d'hydroliennes, ...), avec les contraintes (les aires protégées, les voies maritimes existantes, ...). Et sur lesquelles se dessinent les zones d'activité à placer, avec un niveau de satisfaction par rapport à des critères prédéfinis (le coût, la rentabilité...). « Sur des problèmes aussi complexes, il est peu probable que la solution retenue satisfasse totalement toutes les parties prenantes mais c'est la recherche du meilleur compromis », précise Patrick Meyer.

La traçabilité, une priorité

Le chercheur souligne un aspect central de cet outil : son explicabilité. Certaines solutions nécessitent des millions d'euros pour être implémentées, l'entité de conseil doit donc être en mesure de justifier pourquoi celles-ci précisément ont été choisies. « En tant qu'analystes, nous visons à l'objectivité. Mais nous ne pouvons pas être totalement neutre dans notre modélisation, dans la mesure où notre but est d'expliquer un problème et de prescrire une action », nuance ce dernier. « Pour autant, notre propre système de valeurs ne doit pas influencer cette modélisation. Dans une démarche 'd'auditabilité', nous essayons d'être le plus transparent possible, et d'éviter la 'boîte noire'. »

Une manière simple de ne pas opacifier le processus de décision consiste par exemple à garder les unités de mesure propres à chaque critère, et à ne pas les transformer en scores. Si le coût est un des critères clés, le modèle va sortir une valeur en euros ; si c'est l'impact écologique, le critère en sortie sera le nombre de tonnes de CO₂ émis, etc. D'un bout à l'autre de la chaîne, le chercheur est ainsi capable d'expliquer pourquoi les algorithmes ont proposé telles ou telles solutions, quels ont été les compromis acceptés, quel est le niveau de satisfaction des différents critères pour chaque scénario étudié... amenant à la recommandation finale.

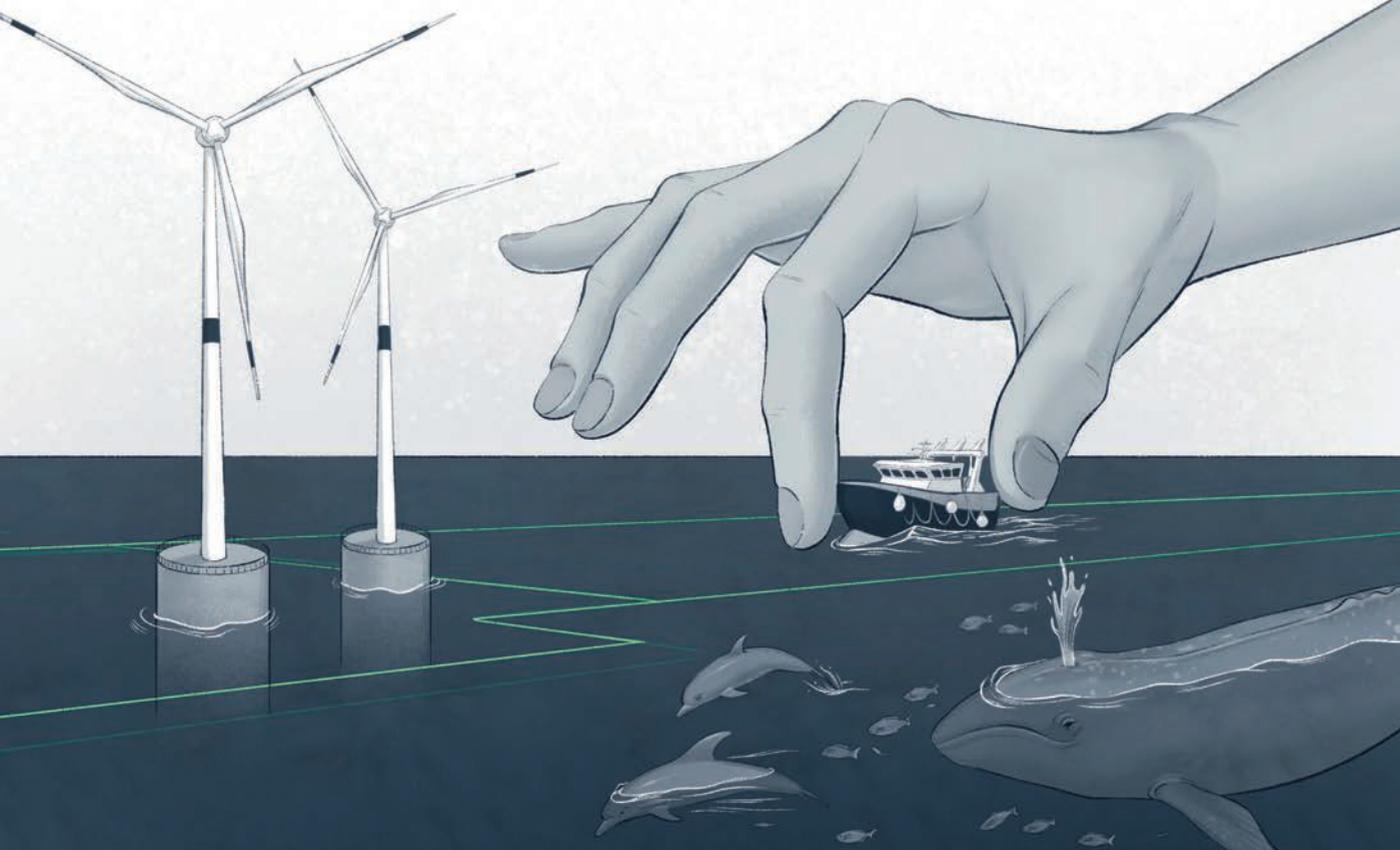
L'humain au centre

Si les calculs et les modèles mathématiques en constituent le socle, la discussion et la négociation sont les piliers de l'outil DESEASON. « On ne peut pas faire abstraction de l'humain dans le processus de décision, et fournir des modèles de résolution fondés uniquement sur les données. », objecte Patrick Meyer. « C'est pourquoi nous avons vraiment placé l'humain au centre de l'outil et des modèles. »

Outre leurs exigences, les parties prenantes expriment aussi les concessions qu'elles sont prêtes à accepter, ce qui facilite la recherche de solutions. « Si l'une des conditions de départ d'un problème est d'avoir une zone de plaisance de 5 km², on peut se rendre compte au fil des discussions avec la personne impliquée que ce critère est flexible et que la zone peut être réduite à 4,8 km² », illustre le chercheur.

Grâce à ce fonctionnement, DESEASON peut aussi aider à statuer sur des sujets controversés comme le lieu d'implantation d'une ferme d'éoliennes, en accordant par exemple autant d'importance au visuel qu'aux autres critères décisifs. « Il y a des riverains extrêmement opposés aux fermes d'éoliennes pour cette raison. Auquel cas, nous sommes capables d'intégrer dans nos modèles une contrainte sur le fait de ne pas voir les éoliennes depuis une certaine ville. » La contrainte modifie l'algorithme, qui va alors déplacer la ferme d'éoliennes de telle sorte qu'elle ne soit pas vue de ladite ville. « Mettre l'humain au centre, c'est prendre en compte ses contraintes mais aussi ses préférences », souligne le chercheur. ▲

Rédigé par Ingrid Colleau.



L'AGRO FORESTERIE,

UNE OPPORTUNITÉ POUR LES MATÉRIAUX ET LA CHIMIE

Encouragée par les politiques environnementales, l'agroforesterie est une pratique agricole qui permet une meilleure diversité biologique tout en limitant l'érosion des sols. Le projet Agrobranche, qui s'est terminé cette année, a étudié la productivité et la rentabilité de plusieurs systèmes agroforestiers en Bretagne et en Occitanie. Il a permis d'évaluer le potentiel de valorisation de ces systèmes pour les filières des matériaux et de la chimie biosourcée.

L'agroforesterie est une pratique ancestrale de plus en plus mise en avant par les politiques liées aux changements climatiques. Elle associe des arbres avec des cultures et des animaux sur une même parcelle, contrairement à la monoculture qui utilise une seule espèce végétale sur une parcelle. Elle présente plusieurs avantages, parmi lesquels figurent la capacité à stocker du carbone à long terme, la régulation des attaques parasitaires sur les cultures, et la limitation de l'érosion des sols. Le projet Agrobranche, auquel participe IMT Mines Alès, s'est intéressé pendant 4 ans à la valorisation des branches d'arbres, depuis le territoire d'approvisionnement jusqu'à la transformation industrielle. En ligne de mire : l'utilisation de la matière végétale pour le domaine des matériaux et de la chimie biosourcée.

L'objectif du projet était « d'étudier la possibilité de renforcer le modèle économique de l'agroforesterie en améliorant la valorisation des branches d'arbres dans les nouveaux domaines des matériaux et de la chimie biosourcée » indique Nicolas Le Moigne, chercheur en sciences des matériaux à IMT Mines Alès. « Dans les systèmes agroforestiers, les espaces occupés par les arbres sur la parcelle réduisent la surface agricole, il est donc important de s'intéresser à la production de biomasse valorisable » indique Fabien Liagre, agro-économiste chez Agroof, un bureau d'étude chargé d'organiser le projet Agrobranche. La valorisation des branches d'arbres peut par exemple se faire en transformant celles-ci en renforts pour matériaux composites, qui peuvent ensuite être utiles dans le secteur du bâtiment pour fabriquer le plâtrage ou des panneaux de particules, ou encore dans le secteur automobile pour fabriquer le revêtement des portières.

L'agroforesterie pour des composites biosourcés compétitifs

Pour savoir si les biomatériaux élaborés au sein du projet ont des performances au moins aussi bonnes que celles des standards commercialisés, les chercheurs d'IMT Mines Alès ont réalisé une série de tests. « Nous avons notamment réalisé des essais de traction et de choc pour tester les propriétés mécaniques de ces matériaux » explique Nicolas Le Moigne. Au final, la rigidité et la résistance à l'impact des composites élaborés à partir des différentes essences de bois agroforestier étudiées (noyer, peuplier, châtaignier et chêne) sont pertinentes en tant que biomasse de renfort pour des matériaux composites biosourcés à base de bois.

L'une des idées d'Agrobranche était aussi de s'intéresser à l'impact de la préparation de la biomasse sur ses propriétés. Les scientifiques du projet ont montré que l'influence de cette préparation – qui comprend notamment des étapes de séchage, de broyage des branches en copeaux et de criblage de ces derniers – avait autant d'importance que l'essence de bois utilisée. Ce résultat signifie qu'avec une essence d'arbre locale, « on peut obtenir une biomasse de renfort d'aussi bonne qualité que celle d'une autre région, moyennant un travail de préparation bien maîtrisé » pointe Nicolas Le Moigne. Cela permettrait ainsi de limiter les transports de matières, émetteurs de gaz à effet de serre, et de valoriser les ressources locales grâce à la production agroforestière.

Un système de production intéressant pour les industriels

Pour que l'agroforesterie soit viable à l'échelle industrielle, il est nécessaire que les filières agroforestières soient organisées et produisent des volumes de biomasse en adéquation avec les besoins des industries, tout en restant vertueuses sur le plan environnemental. À ce titre, « les industriels montrent un fort intérêt pour l'utilisation de produits biosourcés » explique Fabien Liagre.

En Bretagne, une des deux régions dans lesquelles se sont déroulées les études d'Agrobranche, les scientifiques ont constaté que des filières de récupération de plaquettes agroforestières sont déjà organisées, et que ces biomasses mixtes issues de plusieurs essences d'arbre sont intéressantes en tant que renfort de matériaux composites. Cela montre « qu'il est tout à fait possible d'éviter la monoculture et de s'appuyer sur les filières agroforestières existantes » indique Nicolas Le Moigne. « Nous avons constaté que les volumes de biomasses produits par les systèmes agroforestiers étaient envisageables pour des besoins industriels » précise Fabien Liagre. Cependant, si le recours à l'agroforesterie se généralise sur l'ensemble du territoire, il sera nécessaire de développer cette pratique pour que le volume de biomasse généré puisse suffire à l'approvisionnement des industries.



Des labels pour encourager la pratique agroforestière

Aujourd'hui, des labels existent pour les agroforesteries. « Ces labels intègrent la dimension carbone et les pratiques de bonne gestion des systèmes agroforestiers » déclare Fabien Liagre. « Les services rendus par la biodiversité sont aussi intégrés comme critères pour décerner ces labels » ajoute-t-il. Cependant, « les services rendus par les écosystèmes ont des résultats à long terme qui incluent une dimension qualitative encore mal évaluée et prise en compte par les outils actuels » poursuit Nicolas Le Moigne.

Les analyses du cycle de vie (ACV) menées dans le projet ont montré que les systèmes agroforestiers intra-parcellaires permettent de réduire la pollution causée par les nitrates. « Les nitrates perdus dans les sols des parcelles sont absorbés par les racines des arbres, ce qui permet d'atteindre des taux de nitrates proches de zéro au sein d'une même parcelle » témoigne Fabien Liagre. Cependant, d'autres services tels que l'accroissement de la biodiversité, l'atténuation et l'adaptation aux conséquences du changement climatique ne sont pas non plus pris en compte dans les ACV. Il reste donc à approfondir les méthodes utilisées et les adapter aux différents publics comme les agriculteurs et les industries.

Par ailleurs, il est nécessaire que les producteurs de biomasse comprennent les contraintes du point de vue des industriels pour adapter leur mode de production. Les industriels doivent quant à eux comprendre les enjeux que les systèmes agroforestiers impliquent et ce qui leur donne une plus-value. Un travail de communication auprès des acteurs est donc nécessaire pour que la filière agroforestière conserve les vertus qui en font un modèle agricole adapté aux défis environnementaux actuels. ▲

Rédigé par Rémy Fauvel.

À lire sur l'MTech : Que sait-on de l'impact environnemental des biocomposites ?





IV

INGÉNIERIE SANTÉ ET BIEN-ÊTRE

1

**BAYFLEX:
L'ÉLECTRONIQUE VERTE
AU SERVICE DE LA SANTÉ**

2

**RESORB : LE CAPTEUR
DANS LA PEAU**

BAYFLEX

L'ÉLECTRONIQUE VERTE AU SERVICE DE LA SANTÉ

Le projet européen BAYFLEX propose de développer des capteurs flexibles et intelligents, capables de recueillir en continu des signaux biologiques, de les traiter et de les classifier sur puce. La valeur ajoutée de ce projet ambitieux : faire appel à des technologies organiques « vertes », moins gourmandes en énergie dans leur fabrication et à l'usage.

L application des technologies numériques au domaine de la santé a ouvert le champ des possibles en matière de dépistage, de suivi et de traitement. Cependant, de telles prestations sont souvent coûteuses, voire inaccessibles. Le développement de solutions technologiques abordables est donc un enjeu primordial dans la démocratisation du soin.

Cette problématique est au cœur de l'EIC Pathfinder Open 2022 du programme Horizon Europe, dans lequel s'inscrit le projet BAYFLEX. Ce dernier cherche à développer un dispositif d'électronique flexible à faible coût, utilisant l'intelligence artificielle (IA) pour le suivi de signaux physiologiques. Le cas d'usage serait la surveillance des activités électrophysiologiques du cerveau pour la détection, voire la pré-détection, d'activités anormales. En ligne de mire : le traitement de l'épilepsie ou de maladies neurodégénératives, comme la maladie d'Alzheimer.

L'EIC Pathfinder est un appel à projets très compétitif qui soutient des propositions à haut risque mais haut potentiel, pour le développement de technologies radicalement innovantes. BAYFLEX capitalise sur les enseignements d'un premier projet bilatéral entre l'ANR et le Ministère fédéral de l'éducation et de la recherche allemand, BAYOEN, qui portait essentiellement sur le module de calcul et de classification de ce dispositif intelligent. Démarré depuis le 1er avril 2023, BAYFLEX projette de couvrir sous trois ans la production in extenso du dispositif : de la captation sur l'individu à la récupération du signal, le traitement et la transmission de ce signal vers le monde clinique. Mines Saint-Étienne est impliquée dans cet ambitieux programme, qui se

distingue par une approche résolument « verte » : l'intégration tout au long de la chaîne d'innovation de technologies moins consommatrices en énergie.

Un assemblage de technologies bio-inspirées pour un capteur intelligent

Le dispositif prévu par BAYFLEX est constitué de capteurs portables utilisant l'IA pour détecter des anomalies. Les capteurs, réalisés à partir de matériaux organiques souples, qui s'interfacent avec le corps humain, recueillent un signal électrophysiologique, par exemple un électrocardiogramme (ECG). Ce signal est d'abord traité, puis classé à l'aide de circuits. Ces circuits sont qualifiés de « neuromorphiques » car basés sur une méthode de l'IA inspirée du fonctionnement des neurones biologiques : les réseaux de neurones artificiels à impulsions (SNN, Spiking Neural Networks).

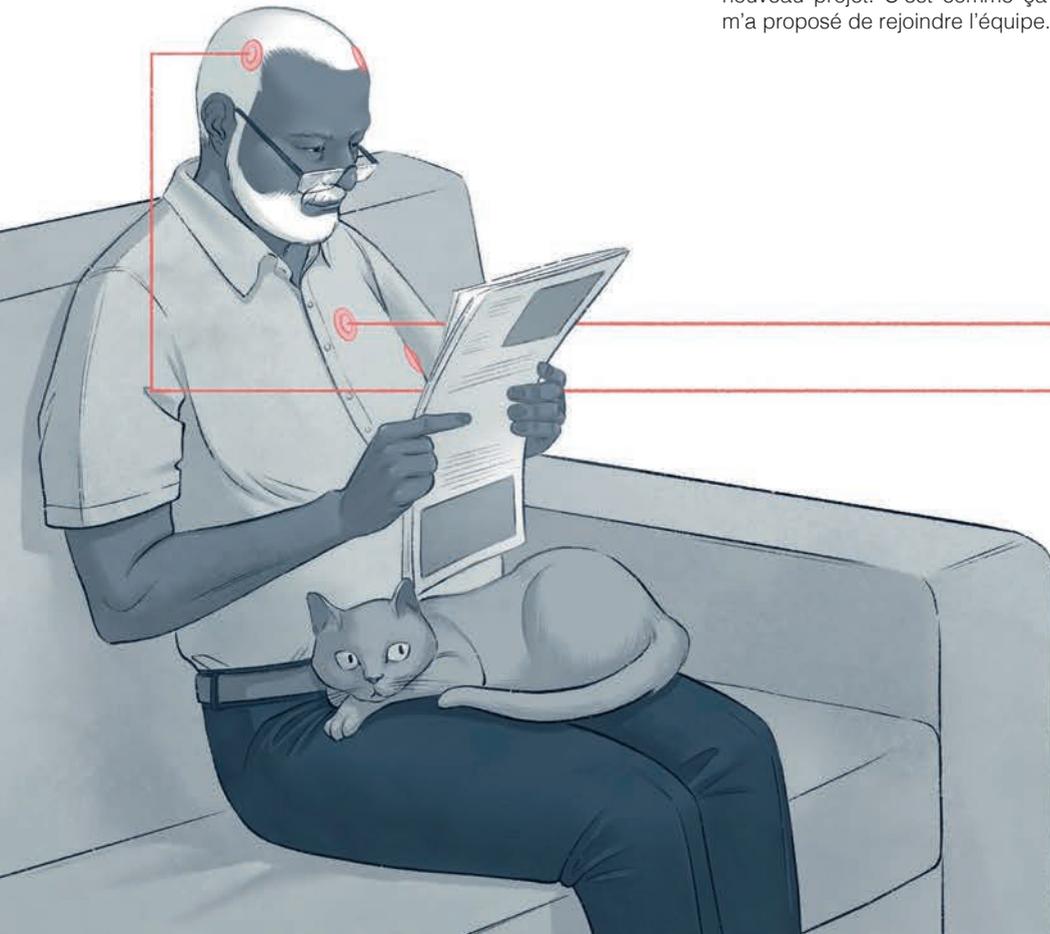
Aujourd'hui la classification du signal traité, qui permet des détecter les anomalies, se fait sur ordinateur. C'est pourquoi ce type de dispositif est encore très énergivore. Dans le cas de BAYFLEX, la classification se fera « on chip » (sur puce) grâce à des transistors organiques embarqués. Ce qui signifie que toute l'intelligence va se faire directement sur le capteur.

L'assemblage optimal de tous les éléments sur un seul et même support fait d'ailleurs l'objet de tout un pan du projet. À partir des paramètres clés de chaque module, une équipe modélise et simule le design identifié comme le meilleur et le moins énergivore possible. Une production identique – via les mêmes procédés, avec les mêmes matériaux organiques – devrait assurer la compatibilité de tous les composants.

de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE, plus connus sous la désignation e-waste). « Ces dispositifs sont constitués de matériaux carboniques : il n'y a pas de matériaux précieux ou de procédés énergivores et coûteux donc, sur le long-terme, leur production devrait en outre être moins chère que celle des dispositifs à base de silicium », complète la chercheuse.

Le défi de la captation des signaux biologiques

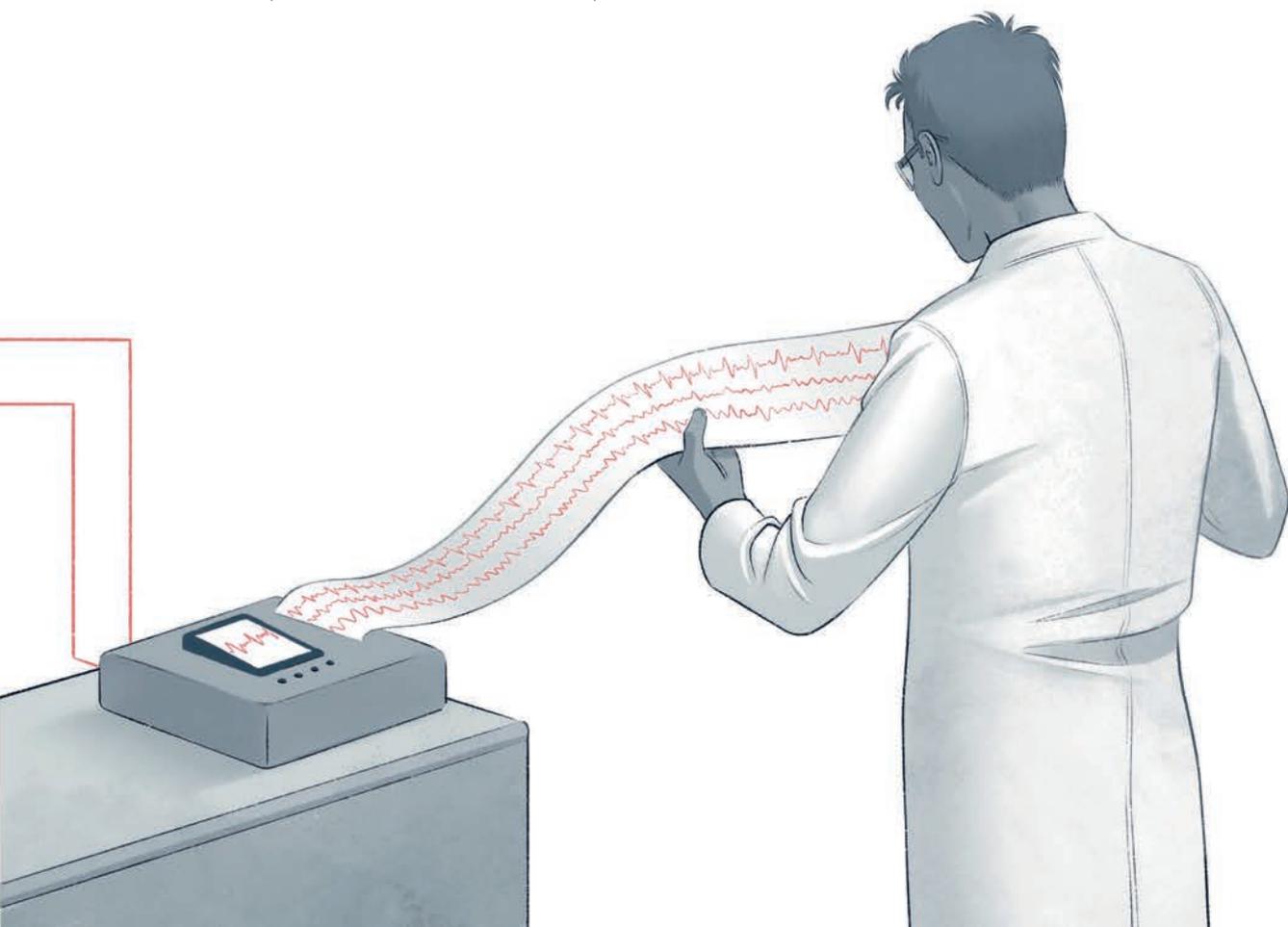
BAYFLEX, comme son précurseur BAYOEN, est porté par une chercheuse du CNRS spécialisée en physique des dispositifs, Laurie Calvet. C'est au cours d'un symposium du Groupement de recherche Organic Electronics for the new era (OERA) à Paris qu'elle approche Esma Ismaïlova. « J'y présentais mes travaux autour d'électrodes capables de récupérer des signaux physiologiques et de les transformer en signal électrique pour le suivi de santé », raconte la chercheuse de Mines Saint-Étienne. « Laurie avait déjà travaillé lors de son premier projet sur la partie électronique de calcul mais il lui manquait le chaînon d'interface avec le corps humain pour ce nouveau projet. C'est comme ça qu'elle m'a proposé de rejoindre l'équipe. »



Pour Esma Ismaïlova, l'enjeu est d'améliorer la captation du signal en provenance des patients et patientes dans le cas d'un système portable. « Les cabinets médicaux ou les institutions de soin disposent de technologies robustes pour collecter des signaux physiologiques, mais hors de ce cadre clinique, ça se complexifie », constate-t-elle. « Le signal enregistré par un capteur portable sort souvent très bruité et très faible ». En conséquence, le traiter requiert une technologie plus importante – un ordinateur – et notamment plus d'énergie pour faire tourner les algorithmes. Pour y remédier, la chercheuse explore l'association d'électrodes passives et actives susceptibles de capter et transmettre le signal de façon plus robuste afin d'en améliorer la qualité.

Deux approches pour capter un signal physiologique de qualité

Pour ces électrodes, Esma Ismaïlova utilise également des matériaux organiques, à base de polymères conducteurs. Leur particularité : la conduction de signaux électriques mais également ioniques, permettant la traduction d'un signal biologique en signal électrique. Les polymères conducteurs sont en outre plus compatibles avec le corps humain car plus souples et mécaniquement adaptatifs, donc ergonomiques.



D'un côté, l'électrode passive est un dispositif de suivi électronique : elle enregistre le signal physiologique sous forme de variation de potentiel, mais ne le transforme pas. Le traitement est toujours réalisé par ordinateur. En revanche, le signal enregistré est propre, avec peu d'artefacts, il n'a pas besoin d'être excessivement purifié pour récupérer les informations critiques ce qui implique un traitement plus simple et moins énergivore.

D'où l'intérêt exacerbé de combiner cette électrode à un transistor électrochimique organique (OECT) pour créer une électrode active. Développée au département de bioélectronique de Mines Saint-Étienne, cette électrode innovante est capable d'enregistrer le potentiel, de l'amplifier et de le traduire en signal électrique. Les OECT sont très performants dans la traduction des signaux biologiques et moins sensibles aux effets de bruits environnementaux (mouvements, champs électromagnétiques, ...), ce qui permet là-encore de récupérer un signal propre et de bonne qualité, conditionné et compatible, pour faciliter ensuite le calcul on chip.

La Rotonde, un CCSTI pour la dissémination du projet

BAYFLEX prévoit un volet de diffusion auprès de différents publics : les scientifiques par le biais de publications dans des revues et conférences, les industriels et utilisateurs finaux par le biais de démonstrations, mais aussi le grand public. Pour cette dernière cible, le consortium souhaite s'appuyer sur les capacités de médiation de La Rotonde, le Centre de Culture Scientifique Technique et Industrielle (CCSTI) de Mines Saint-Étienne.

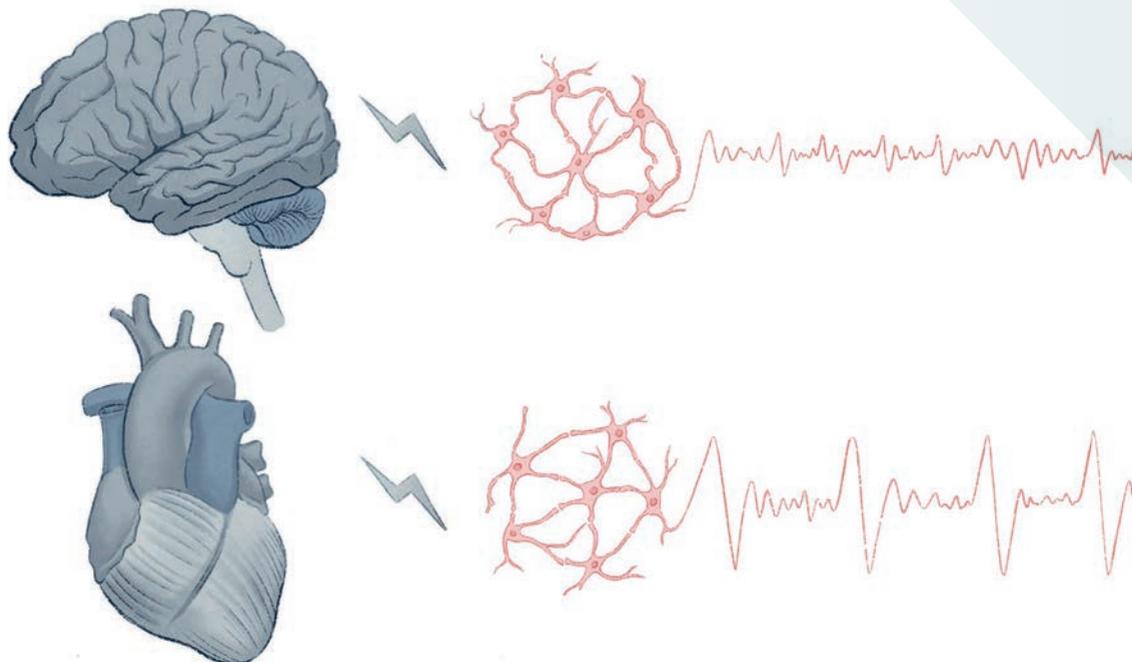
Par le biais d'un atelier à destination des communautés non scientifiques, les chercheurs et chercheuses impliqués espèrent réussir à transmettre efficacement les nombreux concepts clés abordés par ce projet multidisciplinaire. « BAYFLEX parle de capteurs électrophysiologiques, de matériaux organiques, de neuromorphiques, de bioélectronique, de modélisations physiques, de traitement computationnel... Une activité ludique nous semble pertinente pour bien communiquer sur ce projet, sans générer de mauvaises compréhensions ou interprétations. Ce que nous voulons surtout transmettre, c'est qu'aujourd'hui, nous sommes capables de développer de l'électronique au service de la société, qui soit plus verte, moins énergivore et accessible au plus grand nombre », résume Esma Ismaïlova.

Des expertises croisées, mélant recherche et industrie

Le projet BAYFLEX – pour BAYesian Inference with FLEXible electronics for biomedical Applications – a été lancé le 1^{er} avril 2023 pour une durée de trois ans. Les six participants du consortium – Bitbrain & Université Rovira i Virgil (Espagne), CEA, CNRS & Mines Saint-Étienne (France), et Technical University of Dresden (Allemagne) – réunissent des expertises interdisciplinaires dans la modélisation de dispositifs émergents, la conception de circuits inspirés par la biologie, l'apprentissage automatique impliquant des données électrophysiologiques et la fabrication d'OTFT et d'OECT. ▲

Plus d'informations sur le site web du projet : <https://bayflex.cnrs.fr/>

Rédigé par Ingrid Colleau.



RESORB

LE CAPTEUR DANS LA PEAU

Certaines pathologies, comme les cancers, nécessitent une surveillance en continu des données physiologiques. Lancé en 2022 pour une durée de trois ans, le projet européen RESORB réunit un consortium international autour du développement d'un implant intelligent destiné au suivi des chimiothérapies. À Mines Saint-Étienne, une équipe de recherche est impliquée dans le développement d'une batterie biocompatible et résorbable, indispensable au fonctionnement du dispositif.

Une fois par an, peut-être plus, c'est un rendez-vous auquel vous vous rendez probablement à reculons. La prise de sang – et plus généralement l'analyse des fluides biologiques – est cet équivalent du contrôle technique qui permet de s'assurer, quand nécessaire, que tous les voyants sont au vert. Or pour les personnes atteintes de maladies invasives, comme le cancer, il est primordial que le suivi de certains indicateurs biologiques et des niveaux de médicaments in vivo se fasse en continu.

C'est pour répondre à cette demande que six équipes de recherche, dont l'une à Mines Saint-Étienne, se sont réunies autour du projet européen Horizon Europe RESORB. Lancé en avril 2022, ce projet a pour objectif de développer un biocapteur performant, autonome en énergie et entièrement biorésorbable, pour mieux contrôler l'administration de médicaments. Le biocapteur, implanté sous la peau en chirurgie classique, fournirait en temps réel des informations sur des paramètres physiologiques et, pour ce cas d'étude spécifique, l'évolution d'un médicament chimiothérapeutique, la doxorubicine. Les doses ne seraient renouvelées que lorsqu'un niveau seuil est atteint : l'ajustement de la posologie permettrait un traitement mieux ciblé pour un résultat clinique optimal. La biorésorbabilité du dispositif permettrait d'éviter une seconde chirurgie pour le retirer.

La tâche est d'ampleur car un tel système requiert le développement conjoint de trois briques technologiques : un capteur spécifique à la doxorubicine, une source d'excitation – nécessaire au déclenchement de la mesure – et une source d'énergie pour activer la source d'excitation. Il faudrait en outre que le

temps de biorésorbabilité soit contrôlé, pour que le dispositif se dégrade et soit éliminé par le corps humain au bout d'une durée pré-convenue de quatre, six mois ou un an par exemple, sans risque pour la santé.

Un capteur sélectif à détection optique

Le principe de détection du biocapteur spécifique à la doxorubicine repose sur la modification de l'indice de réfraction de la lumière. La surface du capteur a une certaine réponse quand elle est excitée par la lumière. Lorsque la doxorubicine présente dans le sang est captée – elle vient se piéger dans le récepteur situé en surface du capteur, cette réponse lumineuse est modifiée. La modification de la réponse lumineuse du capteur renseigne donc sur la présence de la molécule et sur sa concentration.

Un biocapteur est composé d'un biorécepteur, qui assure la liaison et la reconnaissance d'une molécule cible, et d'un transducteur, qui traduit le phénomène chimique, biologique ou physique résultant en signal mesurable. Dans le cadre de ce projet, les partenaires de recherche italiens ont travaillé à l'élaboration du biocapteur spécifique à la doxorubicine, grâce à un récepteur artificiel biomimétique, appelé polymère à empreinte moléculaire (MIP).

Le MIP est constitué d'une membrane polymérique sur laquelle est réalisée de l'impression moléculaire. La sélectivité et la sensibilité du récepteur sont accrues si l'empreinte de la molécule est réalisée sur une surface en trois dimensions plutôt que sur une surface plane. « Un groupe a donc œuvré à la conception d'une structure 3D en silicium poreux – un matériau biorésorbable – tandis qu'un autre a eu la charge de développer la membrane



polymérique « pré-moulée » sur la doxorubicine », détaille Thierry Djenizian, chercheur à Mines Saint-Étienne. Comme la source lumineuse « activatrice » ne peut pas provenir de l'extérieur, elle doit émaner du capteur lui-même, une troisième équipe de recherche située à Lisbonne s'occupe de développer une diode électroluminescente constituée de matériaux résorbables.

Le développement de A à Z d'une batterie biocompatible

Thierry Djenizian et son équipe développent des solutions pour l'électronique flexible et étirable, de la fabrication des matériaux jusqu'à leur intégration dans des objets fonctionnels et autonomes en énergie. Un de leur champ d'expertise est le stockage électrochimique de l'énergie à des échelles micrométriques, autrement dit, le développement de micro-batteries d'épaisseur inférieure au millimètre (par opposition aux imposantes batteries automobiles par exemple). Ils interviennent donc au niveau de la source d'énergie du dispositif, celle qui va activer les diodes électroluminescentes en charge d'exciter le capteur. « La batterie doit être biocompatible, acceptée par le corps, et biorésorbable », résume le chercheur. « Or à l'heure actuelle, ce type de système n'existe pas, il y a tout à faire ! ».

La difficulté principale réside dans le fait que la plupart des matériaux utilisés dans les batteries sont toxiques pour l'environnement et l'humain. Malgré la récence de cette technologie, l'équipe a retenu le système sodium-ion, qui satisfait aux deux conditions de biocompatibilité et de biorésorbabilité. Puis pour chaque composant de la batterie, le chercheur a parcouru la littérature afin de trouver les matériaux compatibles

et respectueux du cahier des charges. « Les premières publications sur la technologie sodium-ion remontent à une dizaine d'années et pour des développements autour des véhicules, donc des applications non-biologiques », relate Thierry Djenizian « Pour la cathode par exemple, j'ai découvert que l'oxyde de manganèse pouvait être utilisé, mais pas le liant qui n'était pas biocompatible. J'ai donc fait d'autres recherches sur les liants, et c'est ainsi que, de proche en proche, nous avons trouvé la bonne combinaison de matériaux. »

En avril 2022, l'équipe a ainsi breveté la première batterie biorésorbable à base de sodium-ion. « Il y a encore des améliorations à apporter, notamment au niveau de la longévité, mais nous avons démontré qu'en une année, nous avons été capables de lever pas mal de verrous et de produire un prototype. », positive le chercheur.

Encore de nombreux défis technologiques

Le projet BAYFLEX – pour BAYesian Si les premiers développements sont extrêmement encourageants, la batterie ne répond effectivement pas encore aux besoins énergétiques du dispositif. L'allumage des diodes requiert une tension de 5 V, or la batterie développée par Mines Saint-Étienne ne délivre pour le moment qu'une tension à 1,5 V. Plusieurs batteries doivent donc être fabriquées et empilées pour atteindre les performances requises. Au-delà des obstacles techniques subsistant distinctement pour chaque brique technologique, l'assemblage du dispositif pose des difficultés supplémentaires liées à l'interconnexion entre les éléments finaux, ou encore à la résorbabilité de l'en-

semble. Pour le moment, le temps de bio-résorbabilité diffère pour chaque brique technologique : la batterie, par exemple, ne se dégrade pas à la même vitesse que les diodes électroluminescentes ou le capteur. Une piste est de contrôler le phénomène par un système d'encapsulation : le dispositif est enrobé dans un matériau dont la vitesse de dissolution est connue, et l'épaisseur de la capsule est ajustée en fonction de la « durée de séjour » in vivo souhaitée.

Parallèlement à l'intégration des trois briques technologiques, l'équipe de Thierry Djenizian prévoit également de concevoir un circuit qui permette d'activer et désactiver la batterie, sans quoi celle-ci se déchargera trop vite. Cependant, le système sodium-ion est rechargeable – contrairement au système

des piles alcalines. « Cela ne fait pas partie des objectifs du projet, mais il est clair qu'à l'avenir, nous devons être capable d'effectuer une recharge sans fil de la batterie. » La batterie du dispositif RESORB devrait avoir une autonomie de trois mois, mais le chercheur projette déjà des pistes de développements futurs, comme un système de recharge sans fil par induction, tel qu'il en existe pour les téléphones portables. ▲

Rédigé par Ingrid Colleau.







SANTÉ : PRÉVENIR POUR MIEUX VIEILLIR

Le système de santé fait face à l'augmentation des maladies chroniques et au manque de personnels. Dans ce contexte, comment décharger les hôpitaux tout en améliorant la qualité de vie des patients ? La prévention, notamment basée sur les outils numériques, apparaît comme une solution de choix.



Rédacteur-en-chef : Benjamin Vignard

Rédacteurs : Ingrid Colleau, Bastien Contreras, Antonin Counillon, Rémy Fauvel

Secrétaire de rédaction : Véronique Charlet

Illustrations : Diane Rottner

Conception : Agence MadameMonsieur

www.imtechnews.fr

Twitter : @IMTechfr

LinkedIn : IMTech



Institut Mines-Télécom

19 place Marguerite Perey

91 120 Palaiseau



I'MTech.

L'actualité scientifique
et technologique
de l'Institut Mines-Télécom

www.imt.fr

Twitter : @IMTFrance

Linkedin : IMT

19 place Marguerite Perey
91 120 Palaiseau

