

I'MTech.

LE MEILLEUR DE 2020





I'MTech.

LE MEILLEUR DE 2020



ÉDITO

Si l'année 2020 a été sombrement marquée par la crise sanitaire, elle a aussi mis la science et la recherche à l'honneur. D'abord par la mobilisation du milieu académique pour faire face à la situation exceptionnelle que nous avons vécue. De nombreuses disciplines scientifiques se sont mobilisées, et l'IMT a ainsi participé à l'effort scientifique en mettant à profit son expertise en ingénierie de la santé, en logistique, et en sciences de l'information.

Toutefois, la Covid-19 ne saurait monopoliser l'actualité scientifique de 2020. L'année a également été marquée par un important plan de soutien à la filière hydrogène. Pour le monde de l'énergie, ces annonces ouvrent des opportunités et mettent en lumière les défis qu'il reste à relever sur la technologie hydrogène. 2020 a aussi vu le lancement du collectif Gaia-X, et ses promesses ambitieuses pour l'écosystème européen des données.

Au travers de ce best of l'MTech 2020, nous revenons ainsi sur les moments forts de l'année écoulée, comme sur les actualités plus modestes, qui ont animé la science à l'IMT.



SOMMAIRE

ÉDITO 3

SOCIÉTÉ NUMÉRIQUE 7

LE PARTAGE DE DONNÉES, UN ENJEU COLLECTIF EUROPÉEN 8

DES CARTES POUR LA GESTION DE CRISE DU COVID-19 14

EN PLEINE CRISE,
L'HÔPITAL S'ORGANISE GRÂCE À LA SIMULATION NUMÉRIQUE 18

RÉSEAUX SOCIAUX :

LE SEXISME ORDINAIRE DES ALGORITHMES PUBLICITAIRES 23

ÉNERGIE & ENVIRONNEMENT 29

LES RÉACTEURS À NEUTRONS RAPIDES
SE CHERCHENT UN AVENIR 30

MONDE CONFINÉ, VILLES SILENCIEUSES 36

POWER-TO-GAS :
QUAND L'HYDROGÈNE ÉLECTRISE LA RECHERCHE 40

HYDROGÈNE DÉCARBONÉ :
COMMENT PASSER DU GRIS AU GREEN ? 45

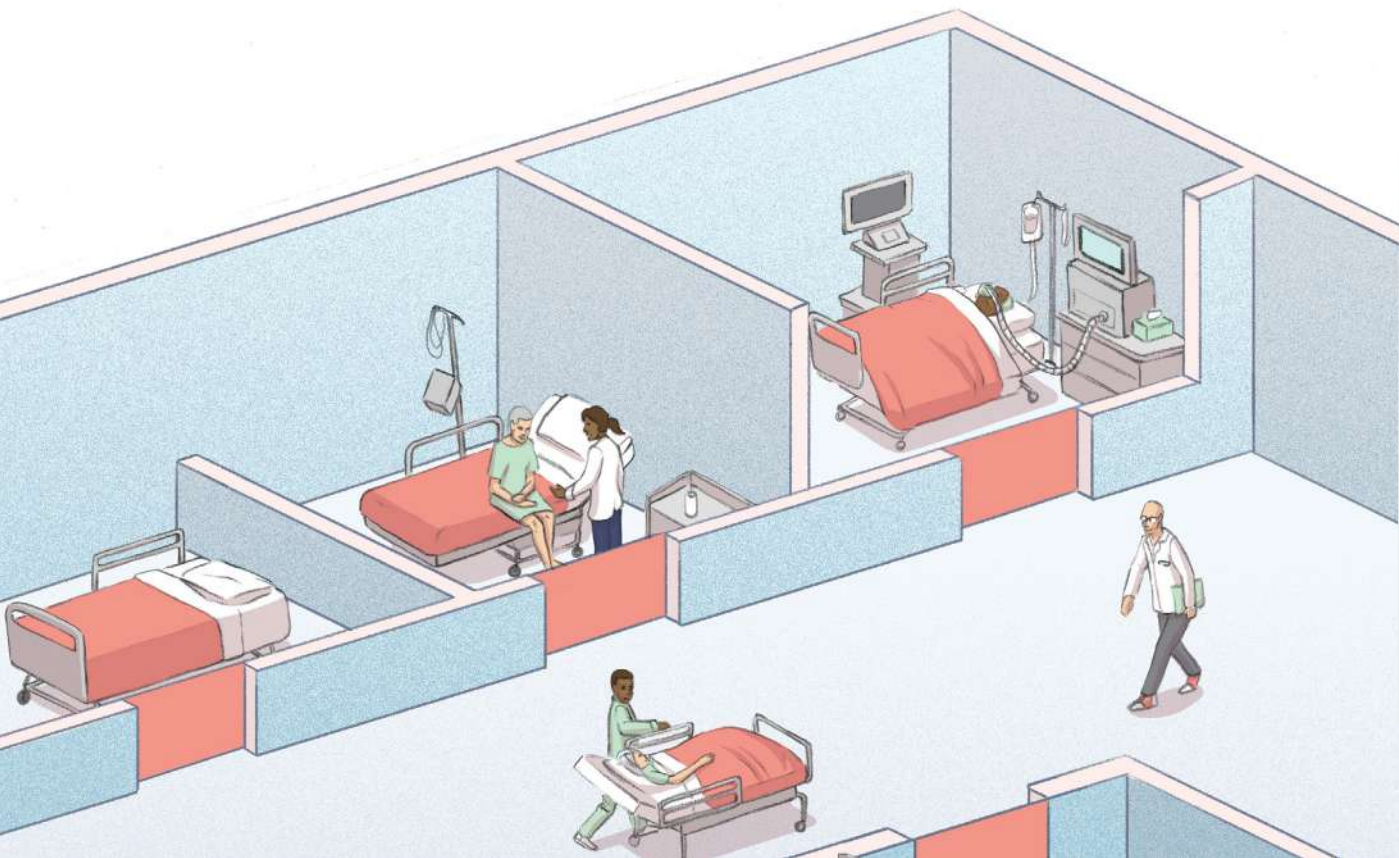
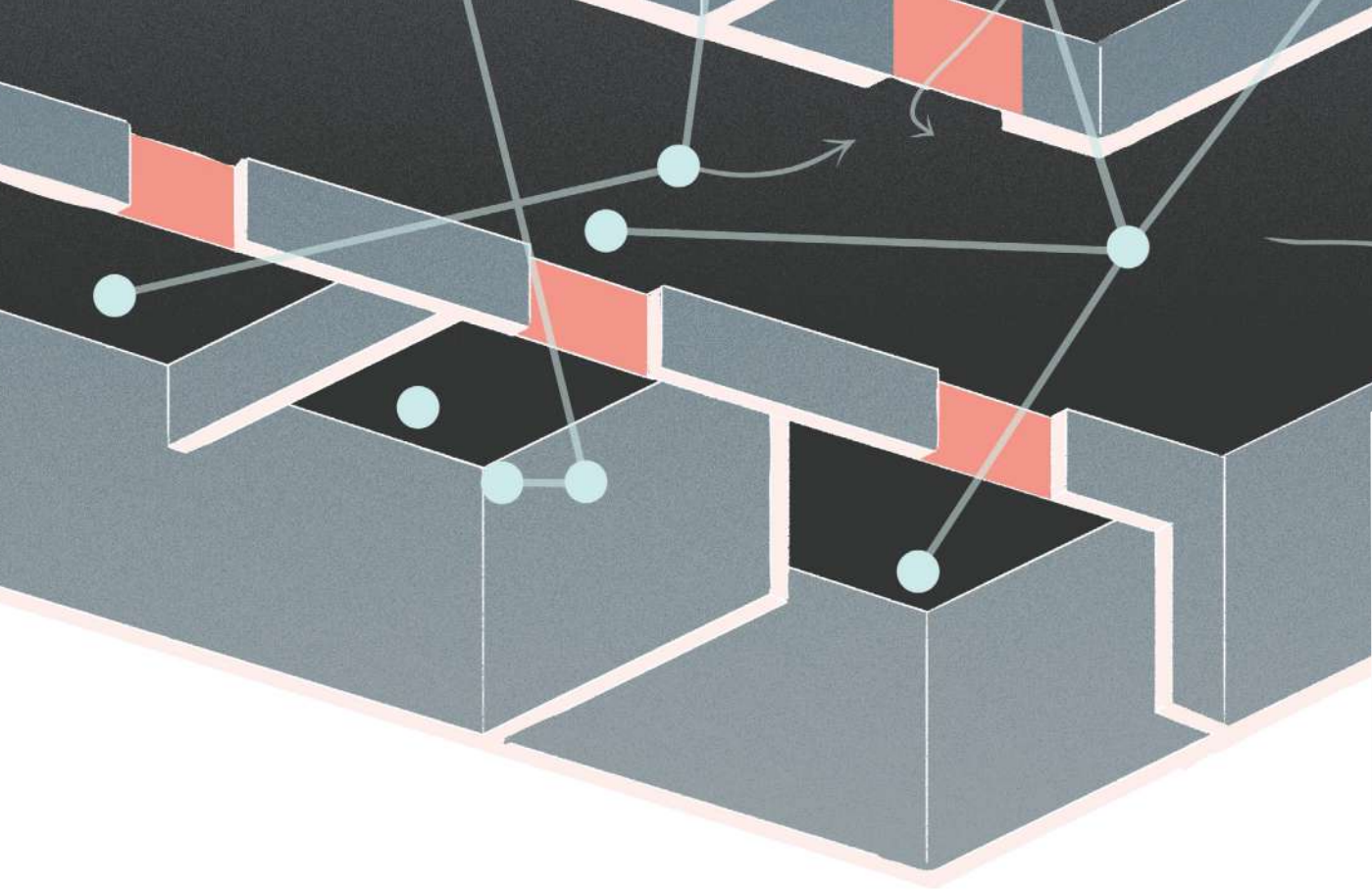
MATIÈRES & MATÉRIAUX 51

LES ERC JUMELLES DE L'AORTE 52

LES TRAINS PASSENT AU RECYCLAGE 58

ÇA J'AIME, ÇA JE N'AIME PAS : L'ESTHÉTIQUE DU TACTILE 62

RETROUVER LA CONNAISSANCE DES MATÉRIAUX
TRADITIONNELS ET LOCAUX 66



SOCIÉTÉ NUMÉRIQUE

1

LE PARTAGE
DE DONNÉES,
UN ENJEU
COLLECTIF
EUROPÉEN

EN PLEINE CRISE,
L'HÔPITAL
S'ORGANISE
GRÂCE
À LA SIMULATION
NUMÉRIQUE

3

2

DES CARTES
POUR LA GESTION
DE CRISE
DU COVID-19

RÉSEAUX
SOCIAUX :
LE SEXISME
ORDINAIRE DES
ALGORITHMES
PUBLICITAIRES

4

LE PARTAGE DE DONNÉES

UN ENJEU COLLECTIF EUROPÉEN

Favoriser le partage de données entre acteurs économiques est l'un des grands objectifs de l'Europe dans le cadre de sa stratégie de gouvernance numérique. Pour y parvenir, deux défis notables sont à relever. D'un côté, il faudra fédérer une communauté autour des enjeux de la donnée, rassemblant des acteurs de natures diverses et de secteurs multiples. D'un autre côté, il est nécessaire d'uniformiser les choix technologiques mis en place par ces acteurs.



« Si nous voulons des algorithmes plus efficaces, avec une incertitude qualifiée, et

des biais réduits, il nous faut non seulement plus de données, mais aussi des données plus diverses », problématise Sylvain Le Corff. Chercheur en statistiques à Télécom SudParis, il illustre là tout l'enjeu autour du partage de données. Et ce besoin n'est pas valable que pour les chercheurs. Les industriels aussi ont besoin de renforcer leurs données avec celles de leur écosystème. Ainsi un producteur d'énergie bénéficiera grandement d'un échange de données industrielles avec les distributeurs ou avec les associations de consommateurs, et inversement. Un constructeur automobile sera d'autant plus performant qu'il aura plus de sources de données de la part de ses sous-traitants.

Problème : ce partage n'est pas une opération triviale. En cause les nombreuses solutions techniques qui existent pour produire, stocker, et utiliser une donnée. Longtemps, l'idée dominante chez les acteurs économiques était de tenter d'exploiter soi-même ses données. Chaque organisation a donc fait des choix personnels quant aux architectures, aux formats, ou aux protocoles relatifs aux données. Or, un algorithme développé pour exploiter des jeux de données dans un certain format ne pourra pas utiliser des données conditionnées dans un autre. Il faut alors passer par une lourde étape d'uniformisation.

« Cet aspect technique est souvent sous-estimé dans les considérations de partage, remarque Sylvain Le Corff.

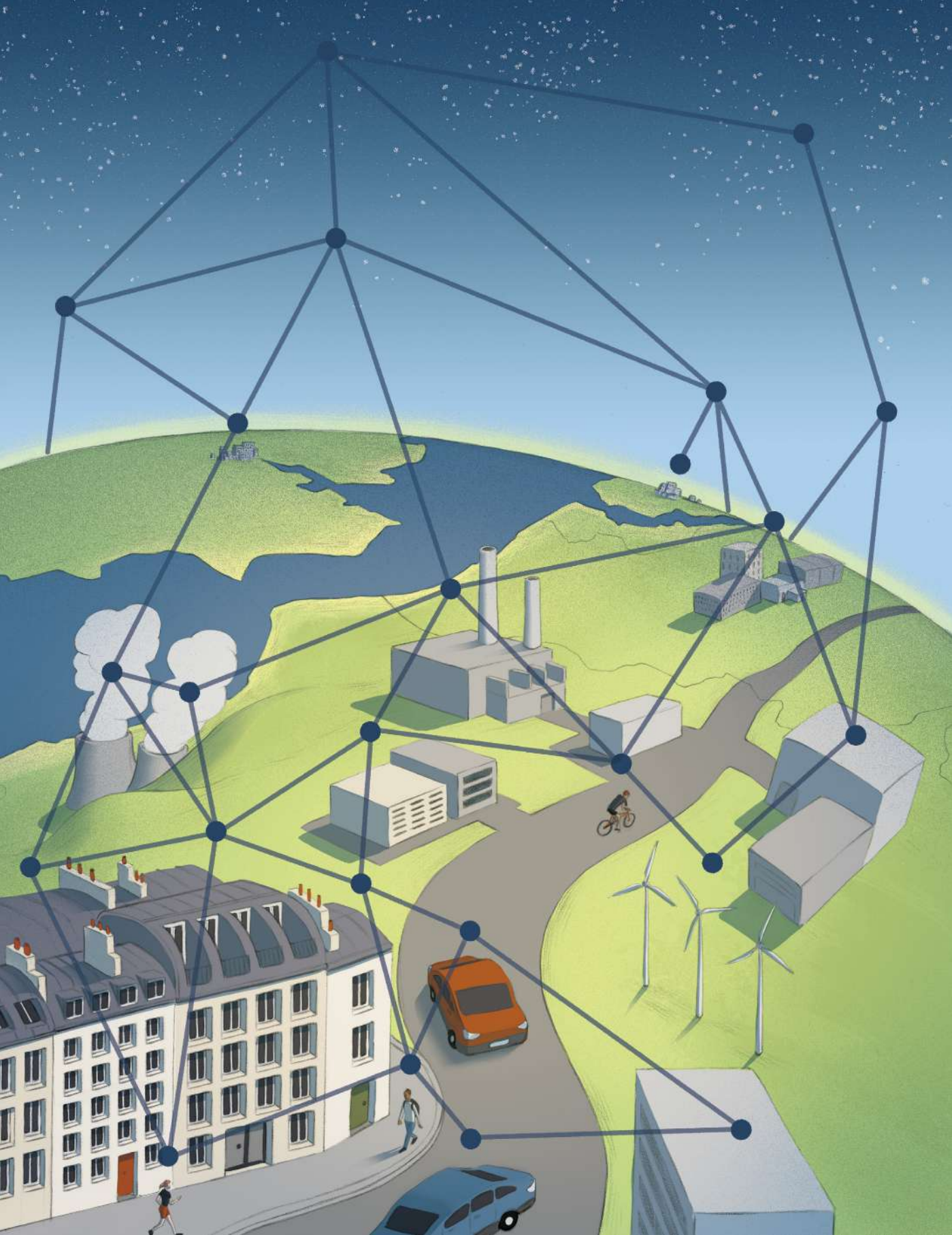
Pourtant, nous nous rendons compte que l'opération de prétraitement pour harmoniser les données est une vraie difficulté. »

Le chercheur prend ainsi l'exemple de l'analyse automatique du langage, une thématique importante de l'intelligence artificielle qui s'appuie sur le traitement automatique de textes provenant de sources multiples : textes bruts, textes générés à partir de documents audio ou vidéo, textes produits à partir d'autres textes, etc. On parle alors de multimodalité. « La pluralité des sources est bien gérée dans le domaine, mais en revanche la façon de gérer cette multimodalité peut changer au sein d'un même secteur. » Deux laboratoires, ou deux entreprises, ne vont donc pas harmoniser leurs données de la même façon. Pour travailler ensemble, il faudra alors absolument passer par ce fameux prétraitement fastidieux, qui peut être un frein à la collaboration.

« Un algorithme développé pour exploiter des jeux de données dans un certain format ne pourra pas utiliser des données conditionnées dans un autre. »

Un standard européen de la donnée

Chercheur en intelligence artificielle et interopérabilité à Mines Saint-Étienne, Olivier Boissier ajoute un élément au problème : « Les personnes qui aident à produire ou traiter des données ne sont pas forcément experts de la donnée



ou de l'IA. Ce sont généralement des personnes qui ont une expertise forte dans le domaine d'application, mais qui ne savent donc pas toujours comment ouvrir des jeux de données, ni comment les mutualiser. » Face à ces limitations techniques, une approche prometteuse consiste à standardiser les pratiques. Une tâche à laquelle s'attelle l'*International Data Spaces association* (IDSA), dont le rôle est de favoriser le partage de données à l'échelle globale, et notamment en Europe.

Contrairement à ce que l'on peut imaginer, l'idée d'un standard de la donnée n'est pas d'imposer une norme unique sur le format de données, l'architecture ou le protocole. Chaque domaine a déjà travaillé sur des ontologies permettant de faciliter un peu le dialogue entre jeux de données. « Nous ne voulons pas apporter une énième ontologie de domaine, précise Antoine Garnier, chef de projet à l'IDSA. Nous proposons plutôt un méta-modèle qui permet de décrire les jeux de données en s'appuyant justement sur ces ontologies de domaine, et de manière agnostique par rapport aux secteurs auxquels il s'adresse. »

**« Les trois piliers sont
l'interopérabilité,
la certification,
et la gouvernance
des données »**

Ce standard peut être vu en quelque sorte comme une liste de conditions sur laquelle se baser pour exploiter les données. « Les trois piliers sont l'interopérabilité, la certification, et la gouvernance des données », pointe Antoine Garnier pour résumer les conditions regroupées dans ce modèle d'architecture proposé par l'IDSA. Grâce à cette approche, le standard qui en découle sert de gage de qualité entre acteurs. Il permet de dire rapidement si une organisation remplit ces conditions, et est donc digne de confiance. Derrière ce système se joue bien évidemment la question de la sécurité, qui est l'une des premières préoccupations des organisations lorsqu'elles consentent à ouvrir leurs données.

L'Europe, région des grands lacs de données ?

Si mettre au point un standard est un pas en avant sur le plan technique, encore faut-il qu'il soit utilisé. Et pour cela, il est nécessaire que sa conception intègre les préoccupations techniques, juridiques, économiques, et politiques des acteurs européens de la donnée — producteurs comme utilisateurs. C'est là toute l'importance de la création d'une communauté rassemblant un maximum d'organisations. En Europe, depuis juin 2020, cette communauté a un nom : Gaia-X, une association d'acteurs rassemblant notamment l'IMT et l'IDSA pour structurer les efforts autour de la fédération de *clouds* pour la *data*, le logiciel et l'infrastructure. Au travers de Gaia-X, organisations publiques et privées ambitionnent de déployer des actions de standardisation — en s'appuyant notamment sur le standard de l'IDSA — mais également de recherche, de formation, ou encore de sensibilisation.

« La problématique est tellement vaste que si l'on veut la résoudre, il faut l'aborder par une communauté de spécialistes en sécurité, en interopérabilité, en gouvernance, en analyse de données », souligne Olivier Boissier pour montrer l'importance du dialogue entre experts sur le sujet. En parallèle de leur engagement dans Gaia-X, l'IMT et l'IDSA organisent ainsi une école d'hiver du 2 au 4 décembre pour sensibiliser des jeunes chercheurs aux enjeux du partage des données). Soutenue par l'Académie franco-allemande pour l'industrie du futur, elle doit donner des clés de compréhension des enjeux techniques et humains, au travers de cas concrets. « Au sein de la communauté de recherche, nous avons l'habitude de participer à des conférences pour nous tenir informés de l'état de l'art de notre thématique, mais il est difficile de s'ouvrir en profondeur aux problématiques d'autres disciplines », concède Sylvain Le Corff. « Ce type d'évènement franco-allemand est nécessaire pour structurer la communauté européenne, et s'approprier un sujet de manière globale, en prenant du recul par rapport à notre champ d'expertise. »

« Pour la Commission européenne, l'ambition de créer un espace de libre circulation des données en Europe est assumée dans sa stratégie. »

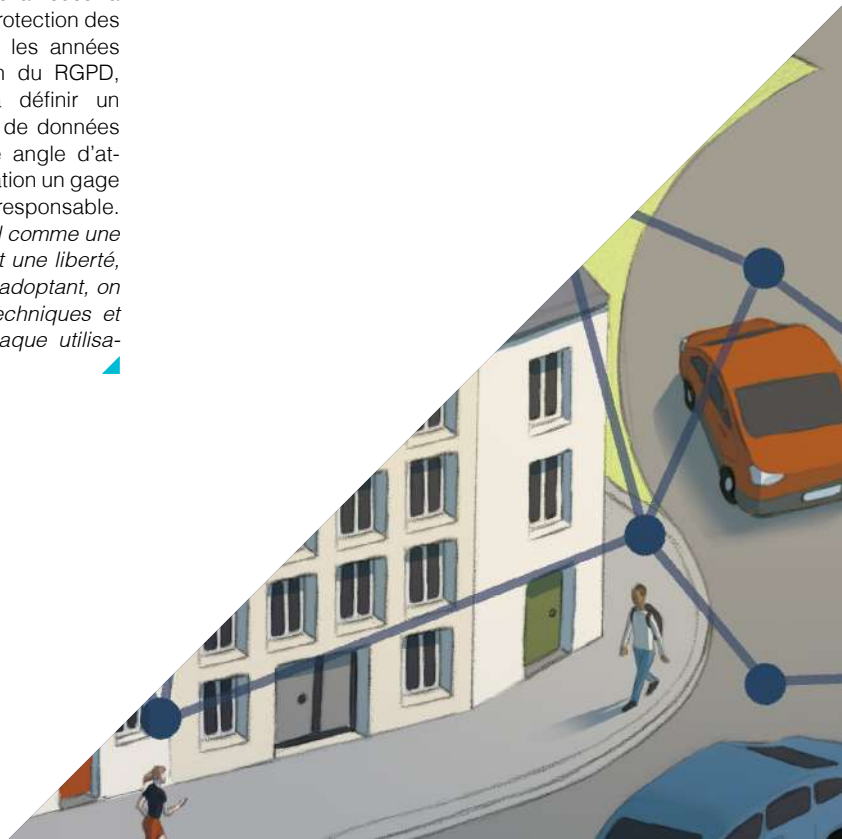
« Certaines entreprises sont encore dans l'idée que les données sont comme un trésor de guerre monétisable qu'il faut éviter de partager. »

Pour la Commission européenne, l'ambition de créer un espace de libre circulation des données en Europe est assumée dans sa stratégie. Comprendre : un environnement commun et décentralisé où les données personnelles et confidentielles seraient sécurisées, mais où les organisations pourraient accéder facilement à une importante quantité de données industrielles dans le respect de la souveraineté de ceux qui les partagent. Pour atteindre ce tableau idyllique en matière de coopération entre acteurs de la donnée, la condition sine qua none est la participation des organisations au collectif. Pour les académiques, l'approche communautaire est au cœur de la pratique et ne représente pas un grand défi. Pour les entreprises en revanche, il faut encore en convaincre certaines. En majorité, les grands industriels ont compris les bénéfices du partage de données, « mais certaines entreprises sont encore dans l'idée que les données sont comme un trésor de guerre monétisable qu'il faut éviter de partager, témoigne Antoine Garnier. Il faut faire preuve de pédagogie et casser les idées reçues. »

Et pour les acteurs non européens ? Lorsque l'on parle de partage de données, on parle mécaniquement du cloud, un marché trusté par trois acteurs amé-

ricains : Amazon, Microsoft et Google, derrière lesquels on trouve d'autres acteurs américains (IBM, Oracle) et quelques acteurs chinois comme Alibaba et Tencent. Comment convaincre ces *hyperscalers* — le nom fait référence à leur capacité de monter en échelle pour satisfaire la demande grandissante, quel que soit le secteur — d'adopter un standard qui n'est pas le leur, alors même qu'ils sont propriétaires des technologies sur lesquelles reposent la majorité des utilisations des données ? « *Paradoxalement, nous ne sommes peut-être pas une si mauvaise nouvelle pour eux*, assure Antoine Garnier. *Ce que nous proposons derrière ce standard, c'est aussi une forme de label. Cela leur permet d'afficher un respect des règles.* »

Derrière cette stratégie de normalisation se joue la souveraineté numérique européenne et la diffusion de ses valeurs. De la même façon que l'Europe a réussi à imposer un standard sur la protection des données personnelles dans les années 2010 avec la concrétisation du RGPD, elle travaille maintenant à définir un standard autour du partage de données industrielles. Avec le même angle d'attaque : faire de la standardisation un gage de sécurité et de gestion responsable. « *On voit souvent le standard comme une contrainte, mais c'est surtout une liberté*, conclut Olivier Boissier. *En l'adoptant, on se libère des contraintes techniques et juridiques spécifiques à chaque utilisation donnée.* »



DES CARTES POUR LA GESTION DE CRISE DU COVID-19

La préfecture du Tarn a travaillé avec une équipe de recherche d'IMT Mines Albi pour répondre aux besoins du département dans la gestion de la crise liée au Covid-19. Frédérick Benaben, chercheur en génie industriel, nous explique l'outil qu'ils ont développé pour aider les acteurs locaux à visualiser les informations nécessaires, et faciliter leurs prises de décision.





« **L**a crise liée au Covid-19 est originale, nouvelle, car c'est surtout une crise d'information », annonce Frédéric Benaben, chercheur à IMT Mines Albi en interopérabilité des systèmes d'information. Habituellement, la gestion de crise implique une organisation complexe pour faire collaborer les différents acteurs. Avec cette crise sanitaire, ce n'est pas le cas. La difficulté est informative : il faut savoir qui est malade, où sont les malades et où sont les ressources. Les outils algorithmiques de gestion de crise sur lesquels l'équipe de Frédéric Benaben travaille se retrouvent alors incompatibles avec les besoins actuels.

« Lorsque nous avons été contactés par la préfecture du Tarn pour leur fournir un outil de gestion de crise, il a fallu presque repartir de zéro », déclare le chercheur. Cette crise n'est pas si complexe dans sa gestion pour qu'elle nécessite l'aide d'intelligence artificielle, mais elle est d'une telle dimension qu'il est difficile de visualiser l'ensemble des informations. Les chercheurs ont donc travaillé à la mise en place d'un outil qui assure à la fois la



visualisation démographique du territoire, et l'optimisation du parcours des volontaires.

L'équipe tarnaise a pu mettre à disposition cet outil rapidement et offrir ainsi un gain de temps considérable aux acteurs du territoire. La réussite de ce projet vient aussi de la cohésion au niveau du territoire d'un établissement de recherche et des acteurs locaux pour réagir au plus vite et au mieux à une crise inédite. La préfecture souhaitait travailler sur des cartes pour visualiser les besoins et les ressources du département. C'est ce que Frédéric Benaben et ses collègues, Aurélie Montarnal, Julien Lesbegueries et Guillaume Martin leur ont fourni.



« La première nécessité est de pouvoir visualiser à l'échelle départementale les besoins des communes. »

Visualiser le département

La première nécessité est de pouvoir visualiser à l'échelle départementale les besoins des communes. Il faut alors identifier les personnes les plus à risques d'être touchées par la maladie. Les chercheurs ont puisé dans les données publiques de l'Insee pour regrouper des informations, tels que l'âge ou la densité de population. « Le but est de décomposer le territoire en communes et cantons pour diagnostiquer la fragilité à une échelle locale », précise Frédéric Benaben. Il y aura par exemple plus de risques pour une commune dont les résidents ont majoritairement plus de 65 ans.



Les chercheurs proposent donc une carte du département avec plusieurs couches que l'on peut cocher pour visualiser les différentes informations. Une montrant la fragilité des communes, une autre indiquant la capacité de résilience du territoire — basée par exemple sur le nombre de volontaires. En s'identifiant sur le site de la préfecture, ces personnes se portent bénévoles pour aller faire des

très rouges. « *Cela nous donne une sorte de pavage du Tarn avec des carreaux rouges et verts, le but étant d'en faire ressortir une couleur unie en associant le surplus de bénévoles aux communes qui en ont besoin* », précise Frédéric Benaben.

Cet outil de visualisation du territoire offre un regard simple et clair aux acteurs locaux pour diagnostiquer les besoins des communes. Avec ces informations en main il leur est plus facile de prendre des décisions pour se préparer ou réagir. « *Si un territoire est dans le rouge on sait que la situation sera difficile lorsque la vague va passer* », résume le chercheur. La préfecture peut alors mobiliser des ressources pour un de ces territoires, en réquisitionnant des locaux par exemple s'il manque un centre de secours à proximité. Il peut aussi s'agir de décisions relatives à la communication, comme un appel à volontaires.

« Il y a un aspect très contemplatif, et un autre plus dynamique qui optimise le parcours de ces volontaires. »

Optimiser les parcours

Cette carte dynamique se met à jour continuellement avec de nouvelles données, comme l'inscription d'un nouveau bénévole. « *Il y a un aspect très contemplatif et un autre plus dynamique qui optimise le parcours de ces volontaires* », indique Frédéric Benaben. Beaucoup de paramètres sont à prendre en compte pour décider des trajets et cela peut s'avé-

courses pour d'autres, ou simplement garder le contact ou vérifier que des résidents se portent bien. « *Nous pouvons alors voir à l'échelle d'une commune la relation entre le nombre de personnes à risques et celles volontaires, pour voir si la commune a suffisamment de ressources pour réagir* », annonce le chercheur tarnais.

Certaines villes avec beaucoup de volontaires apparaissent très vertes, celles où l'on ressent un manque de volontaires



SOCIÉTÉ NUMÉRIQUE
DES CARTES POUR LA GESTION DE CRISE DU COVID-19

rer être un véritable casse-tête pour les employés de la préfecture. De plus, ces parcours de volontaires doivent aussi être pensés pour limiter la propagation de l'épidémie.

Il faut associer les besoins des personnes malades ou à risque avec les compé-



tences des volontaires. Certains résidents demandent de l'aide aux courses ou pour du jardinage, mais d'autres ont aussi besoin de soins médicaux ou d'aide à la toilette qui nécessitent un savoir-faire particulier. Il faut aussi prendre en compte la capacité de déplacement des volontaires, s'ils sont véhiculés, à vélo ou à pied. Vis-à-vis du Covid-19, il est aussi essentiel de limiter les contacts et réduire le périmètre des trajets au maximum.

« Avec ces informations, nous pouvons développer un algorithme d'optimisation pour proposer les meilleurs parcours pour chaque volontaire », révèle le chercheur. Ce sont bien sûr des données personnelles auxquelles les chercheurs n'ont pas accès. Ils ont testé l'algorithme avec

des valeurs fictives pour assurer la fonctionnalité lorsque la préfecture rentrera les données réelles.

« L'intérêt de cette vision cartographique ce sont les possibilités d'évolution », signale Frédéric Benaben. En fonction des données disponibles, de nouvelles couches de visualisation peuvent être ajoutées. « Actuellement nous n'avons pas ou peu de données sur les personnes contaminées ou celles à risque de contamination dangereuse maintenues à domicile. Si nous avions ces données nous pourrions ajouter une nouvelle couche de visualisation et apporter une aide supplémentaire à la prise de décision. » Il est possible de configurer autant de couches de visualisations que souhaité. ▲

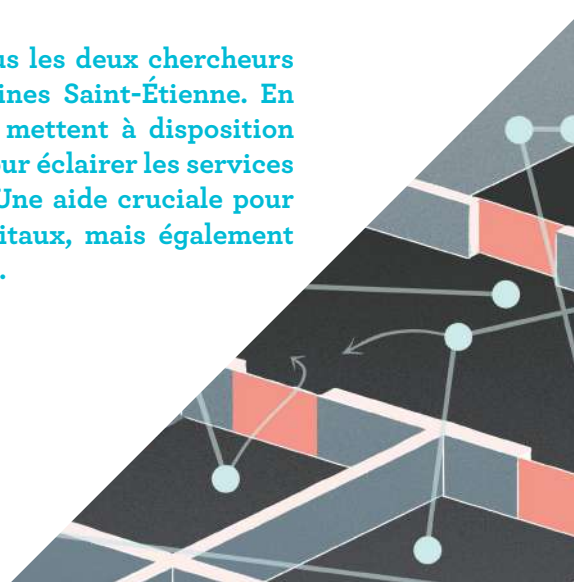


SOCIÉTÉ NUMÉRIQUE

EN PLEINE CRISE

L'HÔPITAL
S'ORGANISE
GRÂCE À LA
SIMULATION
NUMÉRIQUE

Thierry Garaix et Raksmei Phan sont tous les deux chercheurs en ingénierie des systèmes de soin à Mines Saint-Étienne. En réponse à la crise sanitaire actuelle, ils mettent à disposition simulation numérique et jumeau digital pour éclairer les services de santé dans leurs prises de décisions. Une aide cruciale pour assurer l'afflux de patients dans les hôpitaux, mais également gérer la période qui suit le pic épidémique.



L'agencement des différents services de l'hôpital est une préoccupation particulière pour cette gestion de crise. En fonction du nombre de malades entrants et du nombre d'entre eux nécessitant des soins particuliers, il faut transformer certains services pour les dédiés aux malades du Covid-19. Les hôpitaux doivent alors décider quels services ils peuvent se permettre de fermer pour attribuer les lits et les ressources aux nouveaux patients. « Nous travaillons ainsi sur des modèles de simulation des hospitalisations et des services de réanimation », indique Thierry Garaix, chercheur en ingénierie des systèmes de soins à Mines Saint-Étienne.

l'hôpital commence à redescendre, et il faut alors déterminer la réattribution des ressources aux activités habituelles ».

« L'outil que je développe permet de voir la progression dans le temps des flux de patients Covid pour aider le CHU à prendre ses décisions. »

« Ces simulations offrent une vision plus claire aux soignants pour anticiper le besoin de lits en hospitalisation ou réanimation. »

« Les blocs opératoires de cardiologie sont déjà équipés de certaines ressources nécessaires pour les services Covid comme les appareils respiratoires », précise le chercheur. Ils sont de fait un bon candidat pour accueillir les patients Covid en détresse respiratoire. Ces simulations offrent une vision plus claire aux soignants pour anticiper le besoin de lits en hospitalisation ou réanimation. « Au pic de l'épidémie toutes les ressources possibles sont réquisitionnées, affirme-t-il. Une fois ce pic passé, le nombre de cas admis à

Visualiser l'hôpital

Pour les hôpitaux il est essentiel d'avoir une bonne appréciation de l'évolution de l'épidémie pour définir leurs priorités et leurs possibilités. Une fois le pic passé, moins de nouveaux patients sont admis à l'hôpital chaque jour mais ceux déjà présents ont toujours besoin de soins. Ces simulations permettent d'envisager combien de temps ces services resteront occupés par des patients Covid et d'estimer quand ils seront à nouveau disponibles.

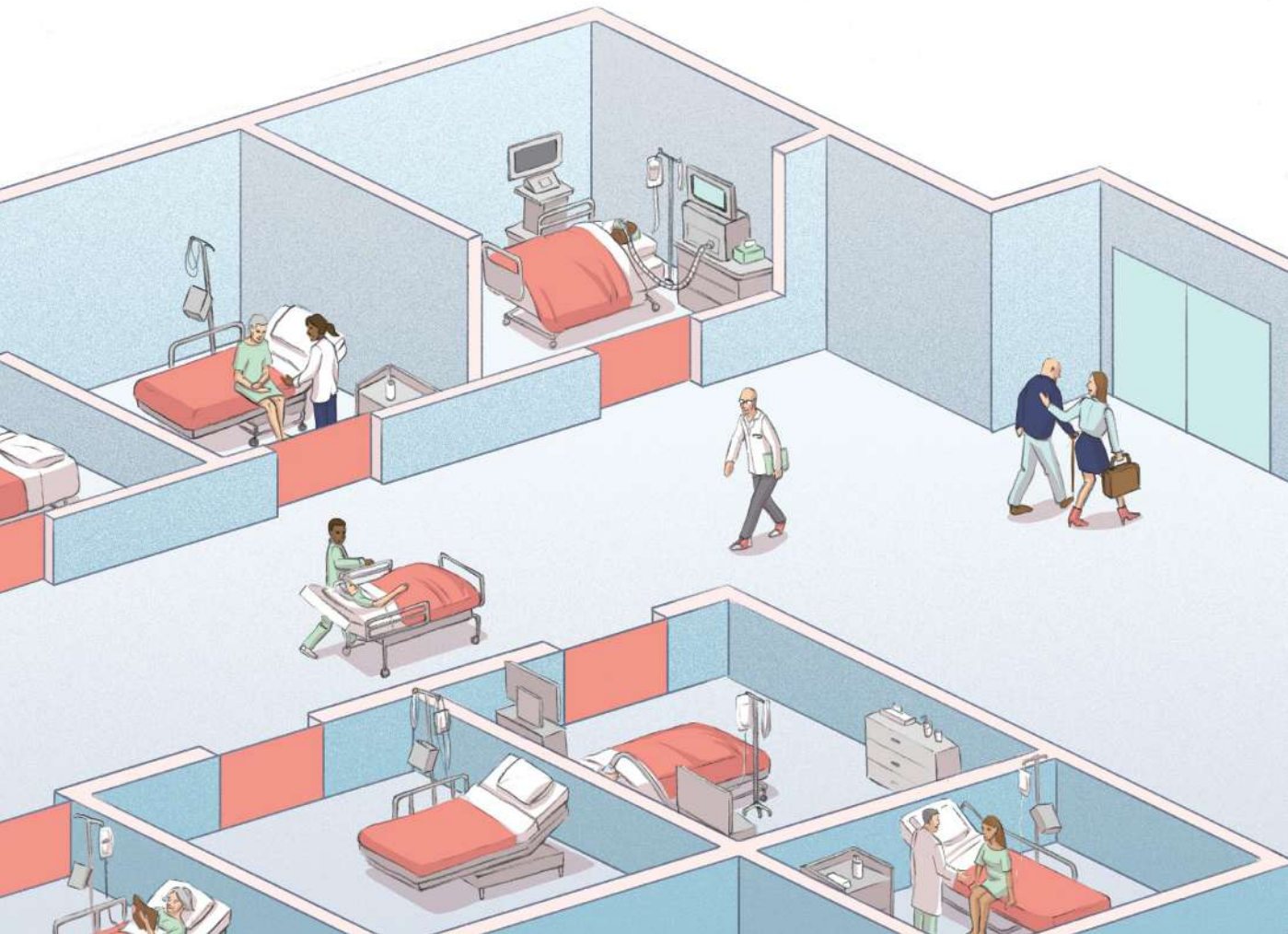
« L'outil que je développe permet de voir la progression dans le temps des flux de patients Covid pour aider le CHU à prendre ses décisions », annonce Thierry Garaix. Le chercheur fournit au modèle des données sur le temps de séjour des patients, le temps passé en hospitalisation ou en réanimation et la capacité de chaque unité de l'hôpital. Le modèle peut alors simuler numériquement le parcours des patients pour aider à visualiser les flux dans l'ensemble de l'hôpital. « Il faut

penser que la progression n'est pas forcément linéaire, ajoute-t-il en soulignant que, si nous assistons à une baisse du nombre de cas il faut envisager la possibilité qu'il y ait ensuite une remontée de l'épidémie ».

De fait, même si un bloc de l'hôpital peut être libéré pour être réaffecté à ses activités habituelles il est peut-être plus précautionneux de le garder sous le coude pour faire face à de nouveaux cas. « Au début de l'épidémie les services de santé ont dû agir dans la précipitation pour affecter les ressources et mettre en place

des services Covid rapidement », signale Thierry Garaix. « L'intérêt de ces simulations est de prévoir avec moins de difficulté la gestion des ressources et de pouvoir les affecter graduellement en fonction de l'évolution de l'épidémie ».

« Nous ne sommes pas à proprement parler sur un jumeau numérique car le modèle n'est pas directement en interaction avec la réalité » annonce le chercheur., « Par ailleurs, si nous avons eu à disposition un jumeau numérique de l'ensemble des services de l'hôpital cela aurait été d'une grande aide pour prévoir



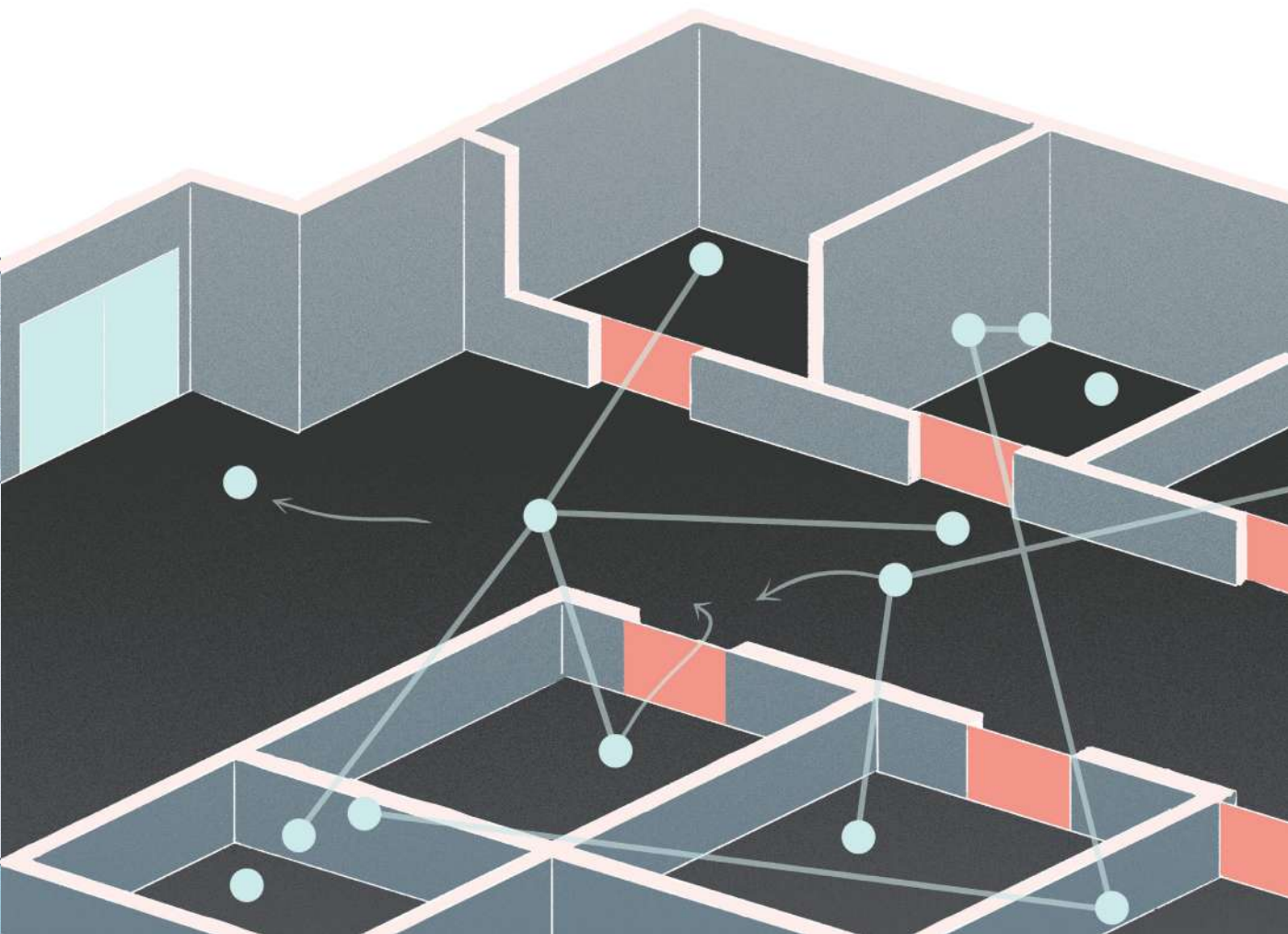
l'affectation des ressources au début de l'épidémie. »

Visualiser les personnes

Un double numérique pourrait permettre d'évaluer de nombreux aspects complexes, dont les conséquences du confinement sur l'état de santé des personnes âgées. « *C'est un projet sur lequel nous travaillons depuis un moment mais qui prend une nouvelle ampleur avec le confinement* », indique Raksmei Phan, également chercheur à Mines Saint-Étienne sur les systèmes de soins. La grille AGGIR

est habituellement utilisée pour mesurer la perte d'autonomie d'une personne. Elle divise en différentes catégories l'état de santé : autonome, à risque, fragile, dépendante, pour proposer une prise en charge adaptée. Le double numérique serait utilisé pour prévoir l'évolution de l'état de santé, cibler les personnes à risque et prévenir un passage vers une situation de dépendance.

« Il faut savoir qu'une personne fragile peut, avec une activité physique adaptée, repasser dans une catégorie correspondant à un meilleur état de santé.



Cependant, si une personne passe la barre de la situation de dépendance, il n'y a pas de machine arrière », informe Raksmei Phan. L'objectif de ce projet de jumeau numérique est de prévoir cette évolution pour proposer des activités adaptées avant qu'il ne soit trop tard. Aujourd'hui, le manque d'activité physique lié au confinement soulève un risque de conséquences néfastes sur l'état de santé puisqu'il implique une perte de mobilité.

« Le manque d'activité physique lié au confinement soulève un risque de conséquences néfastes sur l'état de santé puisqu'il implique une perte de mobilité. »

Dans le cadre du confinement, ce jumeau numérique est alors une possibilité d'estimer l'impact de cet immobilisme pour les personnes âgées. Les chercheurs ont installé avant la période de confinement des capteurs chez les bénévoles, sur les portes, les objets comme les frigos, la porte d'entrée, etc. pour évaluer leur présence et leur activité chez eux. « Avec des capteurs assez simples nous avons un modèle qui correspond bien à la réalité et qui est efficace pour mesurer l'évolution de l'état physique », ajoute-t-il.

Ces capteurs évaluent la durée passée dans un lit, dans un canapé, ou indiquent si, au contraire, la personne passe beau-

coup de temps debout, en mouvement ou si elle sort souvent de chez elle. Avec ces données, le double numérique va permettre d'extrapoler de nouvelles données sur une situation future, et donc prédire l'évolution dans le temps de l'état de santé. « Le but est essentiellement d'analyser un changement préoccupant qui pourrait donner suite à un risque de fragilité, et de réagir pour l'en empêcher », insiste le chercheur.

Les chercheurs travaillant avec la mutuelle Eovi MCD peuvent alors proposer des activités adaptées pour maintenir un bon état de santé. Même en temps de pandémie et en prenant en compte des gestes barrières et des contacts limités, il est possible de proposer des activités à faire chez soi, devant la télévision par exemple. « La mutualité peut proposer des activités, des services à domicile, ou éventuellement les orienter vers une maison de retraite », avertit Thierry Garaix. « Le point central est d'offrir la possibilité d'agir avant qu'il ne soit trop tard en estimant l'état de santé futur des personnes concernées, et de réagir en leur proposant des activités ou des structures adaptées », résument les deux chercheurs. ▲

RÉSEAUX SOCIAUX

LE SEXISME ORDINAIRE DES ALGORITHMES PUBLICITAIRES

Les algorithmes publicitaires des réseaux sociaux peuvent conduire à des situations paradoxales, où des messages destinés aux femmes sont majoritairement diffusés auprès des hommes. C'est le résultat de recherches successives menées par Grazia Cecere à Institut Mines-Télécom Business School, en partenariat avec EPITECH, l'Université Paris-Saclay et l'école de management du MIT. L'équipe a ainsi mis à jour certains mécanismes des algorithmes qui, à première vue, entretiennent ou amplifient des biais de non-parité.



Les algorithmes publicitaires préfèrent les hommes. Du moins, ceux des réseaux sociaux tels que Facebook, Snapchat, Twitter, LinkedIn... C'est le constat que dressent plusieurs recherches successives de Grazia Cecere, économiste de la vie privée à Institut Mines-Télécom Business School, qui travaille depuis des années sur les biais des algorithmes. Dans ces contributions, elle apporte un éclairage de la boîte noire que sont les algorithmes publicitaires des grandes plateformes sociales. « *Ces algorithmes décident et définissent les informations vues par les utilisateurs des réseaux sociaux qui sont très largement des jeunes* », souligne-t-elle.

« Ces algorithmes décident et définissent les informations vues par les utilisateurs des réseaux sociaux qui sont très largement des jeunes »

Au travers d'une collaboration avec des chercheurs d'EPITECH (Clara Jean) et de l'université Paris-Saclay (Fabrice Le Guel et Matthieu Manant), Grazia Cecere s'est intéressée à la manière dont le message d'un annonceur publicitaire est traité et diffusé par les algorithmes de Facebook. L'équipe a ainsi lancé en parallèle deux contenus sponsorisés pour le recrutement d'étudiants en école d'ingénieur. Même visuel, même prix par impression sur les comptes des utilisateurs, et même population cible : des lycéens entre 16 et

19 ans, sans précision de genre. La publicité cible donc des adolescents et des jeunes étudiants.

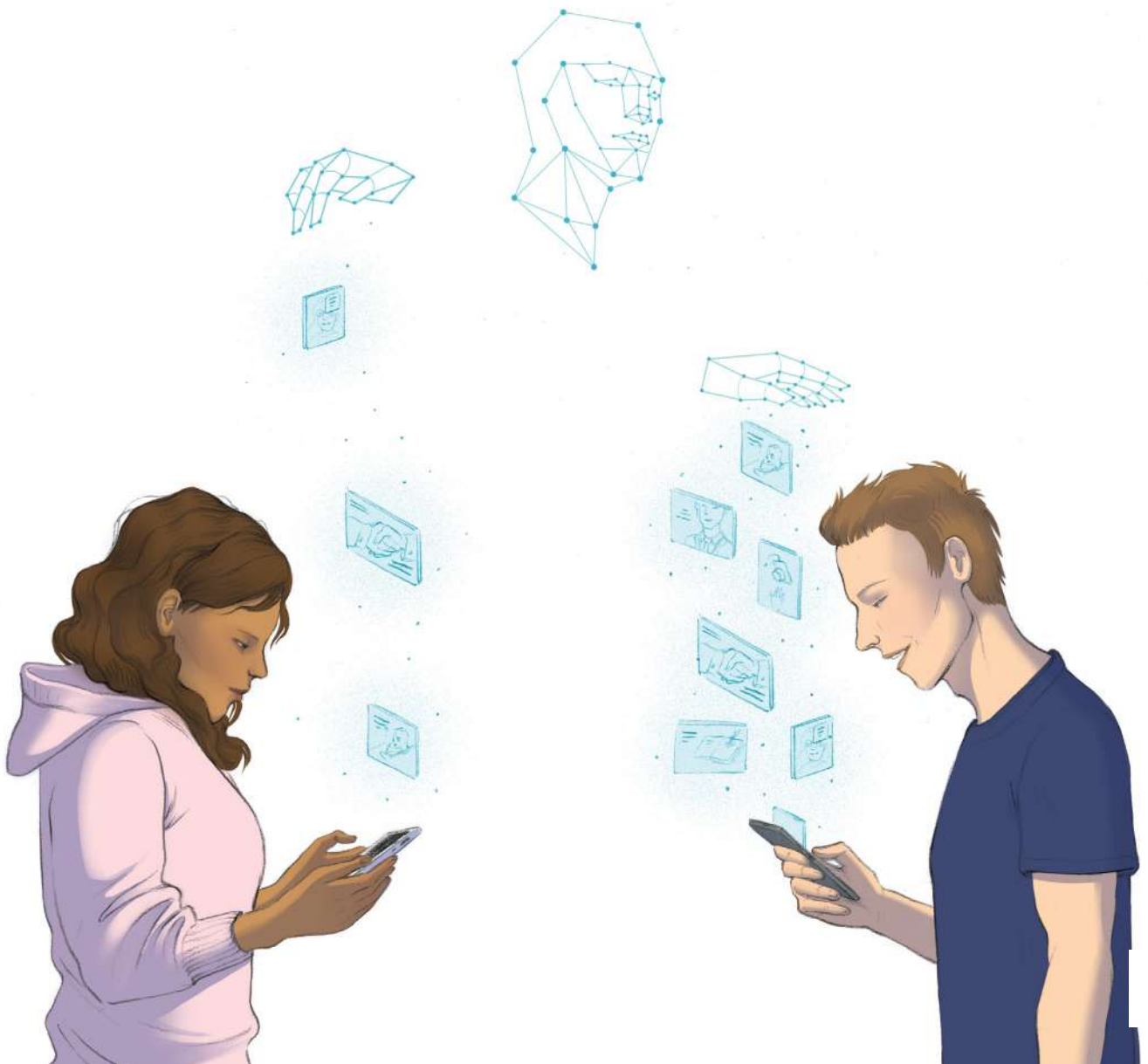
Une différence : le texte des publicités, faisant la promotion dans les deux cas du salaire en sortie d'école pour les ingénieurs et de leur taux d'insertion professionnelle. Sur l'une des publicités : « 41 400 en moyenne de salaire brut annuel. » Sur la seconde : « 41 400 en moyenne de salaire brut annuel pour les femmes. » Et une question des chercheurs : comment ces deux publicités seront-elles distribuées aux hommes et aux femmes par l'algorithme ?

Bilan. Tout d'abord, la campagne comportant un message s'adressant à des femmes réduit le nombre d'impressions diffusées aux utilisations, quelle que soit la cible, et elle est affichée majoritairement auprès... des hommes. La précision « pour les femmes » dans le texte publicitaire ne suffit pas à orienter l'algorithme vers un ciblage des lycéennes plus que des lycéens. Les chercheurs notent toutefois dans leur publication que l'algorithme semble traiter différemment les cibles entre 16 et 17 ans, et les cibles entre 18 et 19 ans. L'algorithme favorise en effet légèrement les lycéennes majeures dans l'affiche de la publicité à caractère féminin, par rapport aux lycéennes mineures qui ont moins de chance de la voir apparaître.

« *Cela indique que l'algorithme utilise des processus de décisions différents pour les utilisateurs mineurs et les utilisateurs majeurs*, écrivent Grazia Cecere et ses collègues. *C'est une observation cohérente avec les législations strictes type RGPD et COPPA qui entourent les usages du numérique par les mineurs en Europe et aux États-Unis.* » Si les lycéennes

majeures ont plus de chances de voir la publicité que leurs camarades mineures, il faut toutefois rappeler qu'elles restent des cibles moins importantes que leurs homologues masculins. La différence de traitement de l'algorithme entre mineurs et majeurs ne corrige pas le biais d'affichage lié au genre.

Autre observation : la publicité neutre — sans spécification « pour les femmes » — est plus diffusée que celle à ciblage féminin, et là aussi, majoritairement à destination des hommes. Une observation qui s'explique à la fois par la longueur du texte publicitaire mais également par son orientation genrée. De manière globale,



les femmes ont un accès favorisé à ce type de contenu lorsque la publicité n'est pas personnalisée en fonction de leur genre. De plus, le mot « femmes » dans le texte conduit également l'algorithme à introduire un critère de diffusion supplémentaire, et donc réduire l'échantillon des cibles — mais de toute évidence sans non plus favoriser la diffusion aux lycéennes.

« Cibler des femmes majeures coûte plus cher aux annonceurs publicitaires. »

Néanmoins, après plusieurs campagnes destinées à comprendre le mécanisme de diffusion de ces deux publicités, les chercheurs ont mis en évidence que l'algorithme est capable d'adapter sa diffusion en fonction du contenu textuel genré de la publicité qui révèle, toutefois, un biais de marché : cibler des femmes majeures coûte plus cher aux annonceurs publicitaires.

Le casse-tête des annonceurs

Ces résultats montrent toute l'opacité des algorithmes publicitaires et les biais paradoxaux qu'ils entraînent. Pour les écoles d'ingénieurs, la diversité et la parité sont des enjeux majeurs du recrutement. Chaque année, elles déploient des efforts et des moyens dans des campagnes spécifiquement ciblées auprès des femmes pour les attirer dans des filières encore très masculines, sans savoir qu'il reste des paramètres de décision de l'algorithme sur lesquels il est très compliqué d'agir.

Les recherches de ce type permettent d'éclairer un peu plus sur les mécanismes avidement protégés des algorithmes publicitaires, et de déterminer des bonnes pratiques. Grazia Cecere rappelle cependant que ces biais générés par les algorithmes ne sont pas nécessairement volontaires : « *Ce sont souvent des conséquences de la manière dont l'algorithme optimise les coûts et les impressions des publicités.* » Et ces méthodes d'optimisation ne sont pas basées initialement sur un favoritisme masculin.



Pour tester les différences de traitement des algorithmes entre hommes et femmes, les chercheurs ont publié quatre photos sur Snapchat.

En 2019, des travaux de Grazia Cecere, menés avec la même équipe et Catherine Tucker, chercheuse distinguée à l'école de management du MIT (MIT Sloan), montraient toute cette complexité du lien entre optimisation et biais des algorithmes, au travers d'un exemple de campagnes sur Snapchat. Le contenu de ces publicités était identique : la promotion d'une école d'ingénieur à des fins de recrutement. Dans ces travaux, 4 campagnes similaires menées sur des populations identiques dans toutes les villes majeures de France. Toutes choses égales par ailleurs, une photo différente pour chaque campagne : un homme de dos avec un T-shirt portant un message masculin, une femme de dos avec un T-shirt portant un message féminin, et les équivalents de ces deux photos sans la tête des personnes.

Pendant la campagne publicitaire, la photo de l'homme complet avait été la plus diffusée, devant celle de l'homme sans tête, de la femme sans tête, et enfin de la femme complète. Derrière ces résultats, une explication qui tient à la manière dont l'algorithme optimise la diffusion de manière dynamique. « *Le premier jour, la photo de l'homme complet a été celle qui a engagé le plus de conversions auprès des Parisiens vers le site web associé, observe Grazia Cecere. Cela nous a conduits à démontrer ensuite que l'algorithme se base sur les choix des villes à forte population pour optimiser les cibles. Il réplique dans les autres agglomérations. Il tend à optimiser toute une campagne sur les premiers résultats obtenus dans ces zones, en les répliquant dans toutes les autres zones.* »

Ce cas est typique d'un biais indirect. « *Peut-être les utilisateurs parisiens étaient-ils plus sensibles à cette photo*

car il y a plus d'étudiants masculins qui s'identifient à cette publicité dans cette ville ? Peut-être y a-t-il tout simplement plus d'utilisateurs masculins à Paris ? Toujours est-il que c'est le comportement des utilisateurs parisiens qui a orienté l'algorithme vers ce biais, ce n'est pas l'algorithme qui a cherché ce résultat », souligne la chercheuse. Or, sans connaissance des mécanismes de l'algorithme, il est difficile pour les annonceurs de prévoir ces comportements. Toujours est-il que le résultat des campagnes soulève un problème : est-il acceptable, lorsque l'on cherche à toucher une population paritaire — voire à cibler préférentiellement des femmes pour corriger des inégalités de filières professionnelles — que les algorithmes des plateformes conduisent à l'effet inverse ? ▲



ÉNERGIE & ENVIRONNEMENT

1

LES RÉACTEURS
À NEUTRONS
RAPIDES
SE CHERCHENT
UN AVENIR

POWER-TO-GAS :
QUAND
L'HYDROGÈNE
ÉLECTRISE
LA RECHERCHE

3

2

MONDE CONFINÉ,
VILLES
SILENCIEUSES

HYDROGÈNE
DÉCARBONÉ :
COMMENT
PASSER DU GRIS
AU GREEN ?

4

LES RÉACTEURS À NEUTRONS RAPIDES

SE CHERCHENT UN AVENIR

En août 2019 a été annoncé l'abandon du projet Astrid de réacteur nucléaire à neutrons rapides (RNR). Un abandon analysé fin 2019 par Stéphanie Tillement, chercheuse à IMT Atlantique, dans un article pour l'MTech. Mais au niveau mondial, où en est-on ? Cette technologie a-t-elle encore un avenir ? Stéphanie Tillement et son collègue Frédéric Garcias décryptent les perspectives de cette filière.



C'est en 2000 que les réacteurs à neutrons rapides reviennent sur le devant de la scène, après des années d'oubli. Le Département de l'énergie des États-Unis (DOE) organise alors un événement très important pour le secteur nucléaire à l'échelle mondiale, le « Forum international génération IV » (GIF en anglais). Ce forum visait à relancer la filière nucléaire en relançant la recherche et l'innovation autour de réacteurs dits « révolutionnaires », devant répondre à plusieurs objectifs très généraux : être plus sûrs, plus économiques, réduire les risques de prolifération, économiser les ressources naturelles et minimiser les déchets. Or, les réacteurs à neutrons rapides (RNR) répondent à ces cinq critères.

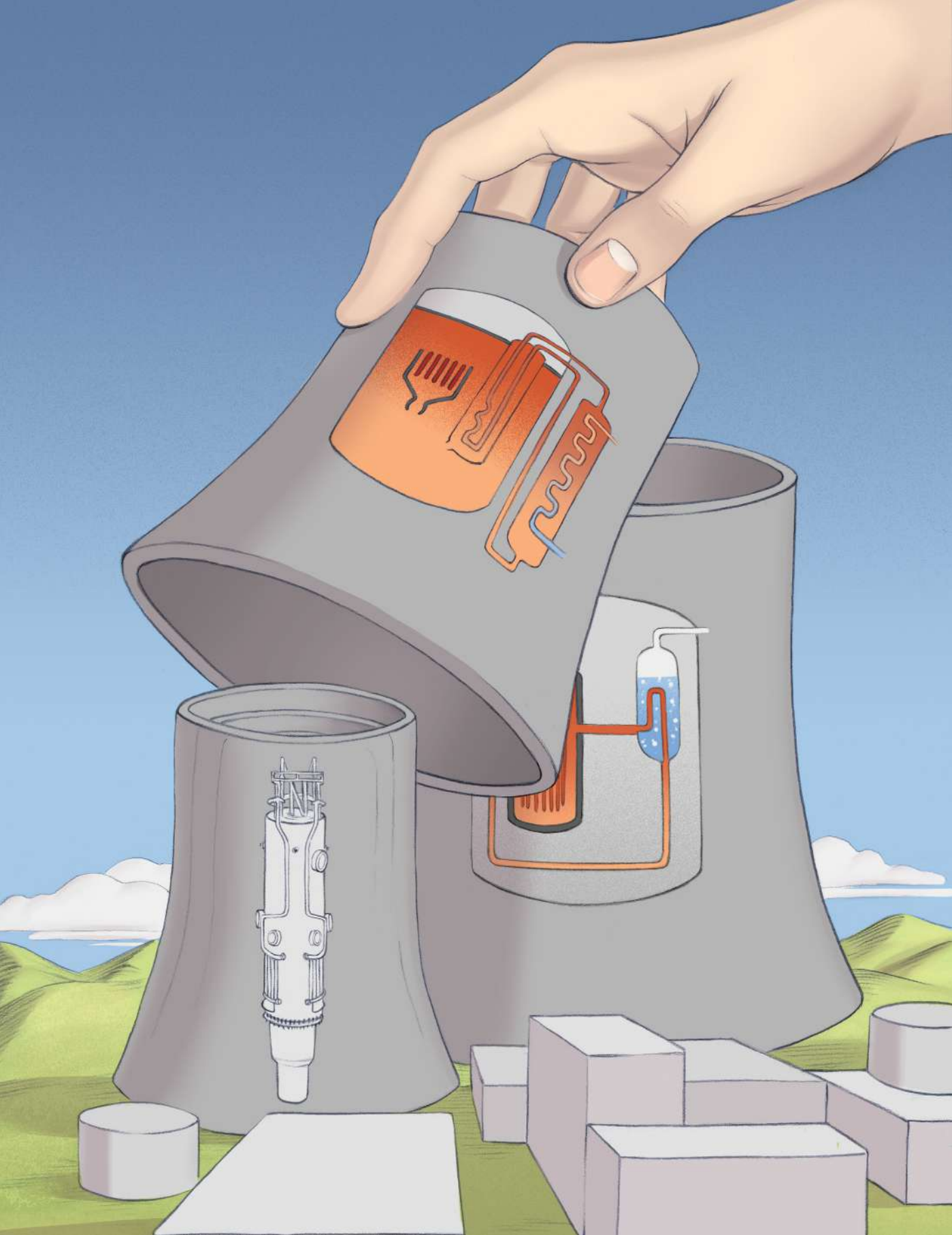
C'est lors de ce forum que l'on définit pour la première fois cette notion de génération de réacteurs. Ceux en exploitation aujourd'hui en France, tous des réacteurs à eau pressurisée (EPR), sont dits de génération II. L'EPR en construction à Flamanville est dit de génération III — tout comme ceux en construction en Angleterre et en Finlande, et les deux EPR en exploitation à Taishan en Chine. La génération IV rassemble pour sa part des réacteurs à venir capables de répondre aux objectifs cités précédemment. Les membres du Forum Génération IV se sont accordés sur six concepts de réacteurs dits de génération IV, dont trois sont des RNR. Parmi ceux-ci, l'un est refroidi au plomb, l'autre au gaz, et le troisième au sodium, comme le prototype Astrid porté par la France.

Économie d'uranium

« Il faut se replacer dans le contexte de ces années 2000, raconte Frédéric Garcias, chercheur en management des organisations à l'université de Lille. Le nucléaire connaissait une pause dans la construction de nouveaux réacteurs, notamment suite à l'accident de Tchernobyl, mais beaucoup pensaient que cela restait une solution d'avenir. Sous quelle forme, et à quel horizon de temps ? On anticipait la croissance de la Chine et des pays émergents, ce qui risquait d'entraîner une forte consommation d'uranium. D'où la recherche de filières plus économiques en uranium. » Les réacteurs à neutrons rapides sont en effet capables de consommer de l'uranium appauvri et du plutonium, qui sont des déchets des réacteurs de générations précédentes.

« Les réacteurs à neutrons rapides sont en effet capables de consommer de l'uranium appauvri et du plutonium, qui sont des déchets des réacteurs de générations précédentes. »

Aujourd'hui, la Russie et la Chine sont en pointe sur cette filière RNR. La Russie en possède deux (BN-600 et BN-800, de respectivement 560 et 820 mégawatts électriques), de conception ancienne, qui ne sont pas considérés de génération IV. La Chine a démarré en 2011 un réacteur expérimental RNR de génération IV



de petite puissance (20 mégawatts électriques) refroidi au sodium. La France, qui était également en pointe, est désormais en retrait depuis l'arrêt d'Astrid en 2019. Quant aux États-Unis, après avoir été à l'initiative de la relance des efforts de recherche via le forum Génération IV, ils ont ensuite délaissé un temps le nucléaire, plus alléchés par les perspectives offertes par les gaz et pétroles de schiste. Mais les perspectives d'une énergie pilotable décarbonée offerte par le nucléaire les amène aujourd'hui à s'intéresser de nouveau à cette filière. Bien que beaucoup de *start-up* travaillent sur ce sujet, aucune construction n'est pour l'instant décidée.

Vers des réacteurs petits et modulables

Si le nucléaire a tant de mal à se relancer, notamment dans les pays comme la France ou les États-Unis, c'est peut-être que la logique de développement dominante tout au long de la seconde moitié du XX^e siècle est aujourd'hui dépassée. Elle consistait à construire des réacteurs toujours plus gros, plus puissants, plus complexes. Et donc plus chers et plus difficiles à financer. Cette course au gigantisme a peut-être atteint ses limites avec l'EPR.

« Cette course au gigantisme a peut-être atteint ses limites avec l'EPR. »

« Les gros réacteurs sont développés ou l'ont été dans les pays très centralisés comme la Russie ou la Chine, ou comme pouvait l'être la France des années 80,

observe Stéphanie Tillement, chercheuse en sociologie industrielle à IMT Atlantique. *On voit bien que, historiquement, le nucléaire a eu moins de succès dans les pays décentralisés. Face à l'essor des modes de gouvernance décentralisés, des acteurs se sont demandés : 'Pourquoi ne pas envisager des réacteurs plus petits, modulables, construits au plus près des besoins, bref: décentralisés ?' »* C'est le principe des *Small modular reactors* ou SMR, de trois à cent fois moins puissants que les réacteurs de Génération III. Ce n'est ni le même *business model* ni la même organisation : un réacteur plus petit nécessite un financement moindre, et semble plus facile à déployer lorsque l'on a peu de visibilité sur le long terme. Les concepts de SMR sont très variés, certains s'inspirant de technologies connues et éprouvées, et d'autres étant plus « exotiques ». Tous utilisent la fission, et peuvent être des réacteurs à eau pressurisée (comme les générations II et III) ou à neutrons rapides.

« Un réacteur plus petit nécessite un financement moindre, et semble plus facile à déployer lorsque l'on a peu de visibilité sur le long terme. »

Verra-t-on une relance du nucléaire en France, par l'intermédiaire des SMR ou non ? « Pour l'instant, l'État français est très silencieux sur ces questions, observe Stéphanie Tillement. Ni la décision de lancer (puis d'arrêter) le projet de réacteur comme Astrid, ni le lancement de

nouveaux projets ne font l'objet de débats parlementaires ou de votes. On ne voit pas de réelle stratégie industrielle en matière nucléaire dans la programmation pluriannuelle de l'énergie, l'outil de pilotage de la politique énergétique en France. » Clairement, aucun gouvernement, ni l'actuel ni les précédents, ne semble vouloir mettre ces questions en discussion, les jugeant trop risquées politiquement. Pourtant, le nucléaire se construit sur le temps long, il a besoin d'une définition de stratégies à long terme et d'investissements publics. Sans cela, le risque est une perte massive des compétences, avec des conséquences certaines sur la filière.

« On ne voit pas de réelle stratégie industrielle en matière nucléaire dans la programmation pluriannuelle de l'énergie, l'outil de pilotage de la politique énergétique en France. »

Pertes de compétences

« Le chantier français de l'EPR a démarré en 2007, après dix ans sans aucune construction en France, rappelle Frédéric Garcias. C'est une des raisons des difficultés de ce chantier. Plus l'intervalle de temps entre deux projets est long, plus on perd les compétences et tout le tissu industriel. Une capacité industrielle, ça s'entretient ! Or, les politiques n'ont pas

conscience de cette question des compétences, ils ont l'impression que l'on peut arrêter 20 ans, et qu'il suffit d'appuyer sur un bouton pour redémarrer. » De plus, lorsqu'il y a peu de chantiers, et peu de perspectives, la filière nucléaire devient moins attractive, les recrutements s'en ressentent.

« Plus l'intervalle de temps entre deux projets est long, plus on perd les compétences et tout le tissu industriel. Une capacité industrielle, ça s'entretient ! »

Le temps des politiques n'est pas celui des industriels du secteur nucléaire. Un mandat dure 5 ans, quand le nucléaire se joue sur des décennies. Les SMR seraient-ils une réponse à cette vision à plus court terme ? « *On n'a pas encore la réponse à cette question* », estiment les deux chercheurs. Les SMR pourraient certes être plus adaptés à un monde plus volatile, moins centralisé, avec plus de démocratie participative. Mais on perdrait aussi certains avantages de la filière, comme sa faible empreinte au sol. Et les questions de sûreté ne seraient pas réglées. Aujourd'hui, la France compte 18 centrales nucléaires (56 réacteurs), il faudrait bien plus de SMR pour produire la même quantité. Pas sûr que ce soit bien accepté par les populations !

Réapprendre à innover

Aujourd'hui, la filière nucléaire est installée dans un certain mal-être, lié à une difficulté à se projeter dans un avenir, en attente de décisions de l'État qui ne viennent pas. Peut-être doit-elle aussi remettre en cause son mode de fonctionnement. « *L'arrêt d'Astrid pose la question des possibilités d'innovation dans le nucléaire en France*, souligne Stéphanie Tillement. *Le nucléaire français repose sur très peu d'acteurs, essentiellement EDF/Framatome pour les activités d'exploitation et de conception, le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) et les régulateurs — l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et son appui technique, l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN). Cela offre de la stabilité, mais aussi beaucoup d'inertie. Ce système a beaucoup de difficultés à innover et à sortir des schémas et modes de fonctionnement préétablis. On a pu le voir avec les travaux sur la Génération IV : seul le CNRS a osé un concept en rupture claire avec les technologies développées précédemment, un concept de réacteur à sel fondu, jamais construit en France.* » Le débat est donc lancé au sein même du secteur nucléaire : a-t-il encore la capacité à innover et à se renouveler ? ▲

MONDE CONFINÉ

VILLES SILENCIEUSES

Le 16 mars la France décide de mettre en place un confinement en réponse à la crise sanitaire. Nos villes se mettent alors à l'arrêt et les voitures disparaissent des rues, laissant les résidents redécouvrir des sons plus discrets tels que le chant des oiseaux. Une équipe de chercheurs décide de mettre à profit ce calme qui s'installe soudainement dans nos vies pour mieux comprendre l'impact de la pollution sonore, et donne vie au projet Silent Cities.



Lorsque le confinement est annoncé et que la France se prépare à se mettre en pause, une équipe de chercheurs se lance dans un projet collaboratif et transdisciplinaire: Silent Cities. Ils s'appellent Samuel Challéat, Nicolas Farrugia, Jérémy Froidevaux et Amandine Gasc, et sont respectivement chercheurs en géographie environnementale, intelligence artificielle, biologie et écologie. Leur projet vise à enregistrer les sons entendus dans des villes à travers le monde pour étudier l'impact que peuvent avoir les mesures de confinement et de distanciation sociale sur la pollution sonore. L'intérêt est aussi de pouvoir évaluer, lors d'un retour progressif à la normale, l'effet de la variation de nos activités sur les autres espèces animales.

A l'écoute des villes

« Il nous a fallu mettre au point un protocole standardisé pour obtenir des enregistrements de bonne qualité pour les analyses, mais aussi léger et facile à déployer pendant le confinement » , indique Nicolas Farrugia, chercheur en apprentissage machine et *deep learning* à IMT Atlantique. Confinement oblige, il n'était pas possible d'aller directement sur le terrain pour effectuer ces relevés acoustiques. Grâce à la mise en place d'un dispositif collaboratif, de nombreux participants ont pu rejoindre le projet à travers le monde pour effectuer ces enregistrements depuis chez eux. Les quatre chercheurs ont fourni une plateforme collaborative pour que les participants puissent ensuite téléverser leurs enregistrements.

Les chercheurs analysent et comparent les enregistrements sur les différents sites à travers ce qu'ils appellent des indices écoacoustiques. Ce sont des valeurs mathématiques. Plus elles sont élevées, plus elles révèlent la diversité ou complexité sonore d'un relevé acoustique. « *Toujours à travers une démarche de libre accès, nous avons utilisé une base de code pour développer un algorithme calculant automatiquement ces indices écoacoustiques pour répertorier nos enregistrements* », explique Nicolas Farrugia.

« *Le but est de pouvoir faire tourner des algorithmes d'audio-tagging, pour reconnaître automatiquement et annoter les différents sons entendus dans un enregistrement* », ajoute-t-il. Grâce à cela il est possible d'obtenir une identification assez fine des sources sonores, en indiquant par exemple pour un relevé acoustique la présence d'une voiture, le croisement d'un corbeau et une discussion entre plusieurs personnes.

Ce type d'algorithme basé sur des réseaux de neurones profonds sont de plus en plus populaires ces dernières années. Pour les écoacousticiens, ils offrent une reconnaissance assez fine, mais surtout multicible : l'algorithme va pouvoir rechercher beaucoup de sons différents en même temps pour effectuer ces annotations sur l'ensemble des relevés acoustiques. « *Nous pouvons aussi nous en servir comme un filtre si nous souhaitons sortir tous les enregistrements où l'on entend un corbeau. Cela peut être utile pour mesurer l'apparition d'une espèce, en visualisant l'heure, la date ou la localisation* », précise Nicolas Farrugia.



L'apport de l'intelligence artificielle est aussi un atout pour estimer la fréquence des sons de différentes catégories — par exemple pour le trafic automobile — et en visualiser l'augmentation ou la réduction. Lors du confinement les chercheurs ont clairement observé une chute du trafic automobile, et s'attendent à les voir revenir lors du retour à la normale progressif que nous vivons actuellement. Le point qui les intéresse est de pouvoir visualiser les perturbations que cela entraîne sur le comportement des autres espèces animales.

Quelles évolutions ?

« Certaines études ont montré qu'en milieu urbain les oiseaux peuvent changer de fréquence ou de plage horaire pour communiquer, à cause du bruit ambiant », indique Nicolas Farrugia. Le

bruit des activités humaines, saturant l'environnement urbain, peut par exemple rendre difficile la reproduction de certaines espèces. « Cela dit, il est délicat de parler de causalité car, en temps normal, nous ne pouvons pas écouter les écosystèmes urbains sans l'apport de nos activités humaines ». Il est donc habituellement difficile pour les chercheurs écoacousticiens de bien connaître la biodiversité présente dans nos villes.

Dans ce sens, le projet Silent Cities est une opportunité de pouvoir étudier directement la variation de l'activité humaine et son impact sur les écosystèmes. Certaines mesures mises en place pour la crise sanitaire pourraient être favorisées par la suite dans une dimension écologique. C'est par exemple le cas du vélo mis en avant aujourd'hui avec les aides financières pour la réparation de vélo

ancien ou la création de nouvelles pistes cyclables, mais aussi des initiatives telles que la mise en place d'horaires décalés. En limitant le trafic aux heures de pointe, cela limiterait aussi la pollution sonore associée. Une des perspectives possible du projet est de pouvoir nourrir des réflexions sur l'organisation du milieu urbain.

« Samuel Challéat, chercheur à l'origine du projet, travaille sur la pollution lumineuse et sur ce qu'on pourrait se permettre de faire pour limiter la lumière artificielle », ajoute-t-il. Par exemple — et à l'instar des « trames vertes et bleues » qui visent à favoriser la préservation de biodiversité dite « ordinaire » jusque dans les milieux urbains —, il travaille actuellement sur un outil d'aménagement émergent, la

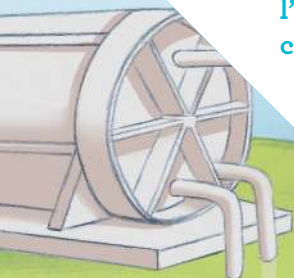
« trame noire », qui vise à restaurer des continuités écologiques nocturnes mises à mal par la lumière artificielle. Comme l'on sait que les sons d'origine humaine perturbent certains processus écologiques, ce raisonnement sur les continuités écologiques pourrait être transposé dans le domaine de l'écoacoustique, où l'enjeu serait alors de travailler au maintien ou à la restauration d'espaces épargnés de toute pollution sonore. Cette piste de réflexion pourra utilement être nourrie par les données et résultats du projet Silent Cities. ▲



POWER TO GAS

QUAND L'HYDROGÈNE ÉLECTRISE LA RECHERCHE

L'hydrogène est présenté comme un vecteur énergétique d'avenir. Dans un système power-to-gas, il sert d'intermédiaire à la transformation d'électricité en méthane de synthèse. Une solution énergétique dont la réussite dépend fortement de son coût de production. Dans ce cadre, les chercheurs de l'IMT s'attellent à l'optimisation des différents procédés pour un power-to-gas plus compétitif.



Augmenter la production d'énergie renouvelable et réduire les émissions de gaz à effets de serre. Et si la solution à ces deux ambitions provenait d'une même technologie : le *power-to-gas*. Autrement dit, la conversion d'électricité en gaz. Quel est l'intérêt ? Cette méthode permet le stockage du surplus d'électricité produit par des sources renouvelables intermittentes qui ne peut pas être injecté sur les réseaux. L'énergie électrique sert alors à produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. Le gaz peut ensuite être consommé sur place, stocké, ou bien servir à l'alimentation de véhicules à hydrogène. Mais ces applications sont encore limitées. C'est pourquoi il est intéressant de le transformer en d'autres produits utiles comme le méthane (CH₄) qui alimente les réseaux de gaz naturels. Quel est le potentiel de cette technologie ?

lations power-to-gas – alors un réacteur à hydrogène de 1 GW (puissance quasi-équivalente d'un réacteur nucléaire) coûterait aujourd'hui 3 milliards d'euros.» Pour rappel, le gouvernement français a alloué en septembre dernier un budget de 7 milliards d'euros d'aide au développement de la filière nationale hydrogène. Une réduction du coût de production de ce gaz s'impose donc. D'autant plus que les technologies *power-to-gas* sont vouées à concurrencer les autres modes énergétiques du marché.

La France souhaite atteindre un coût de 50 € le mégawatt-heure en 2030. Sachant qu'une technologie à bas coût mais ayant une courte durée de vie ne serait pas adaptée. « *Pour être rentables, les systèmes doivent avoir une garantie de fonctionnement d'au moins 60 000 à 90 000 heures* », ajoute Rodrigo Rivera Tinoco. Actuellement, les électrolyseurs basse température (PEM) auraient une durée de fonctionnement comprise entre 30 000 et 40 000 heures. C'est là que la recherche entre en jeu. Son objectif : optimiser l'efficacité énergétique de technologie à bas coût.

« La problématique centrale au développement du power-to-gas aujourd'hui est son coût »

Coût dur pour l'hydrogène ?

« *La problématique centrale au développement du power-to-gas aujourd'hui est son coût*, atteste Rodrigo Rivera Tinoco, chercheur en modélisation des systèmes énergétiques à Mines ParisTech. *Si on prend en compte le coût de production de l'hydrogène par un électrolyseur basse température (PEM) – c'est-à-dire la technologie envisagée au sein des instal-*

Quelle technologie pour quelle utilisation ?

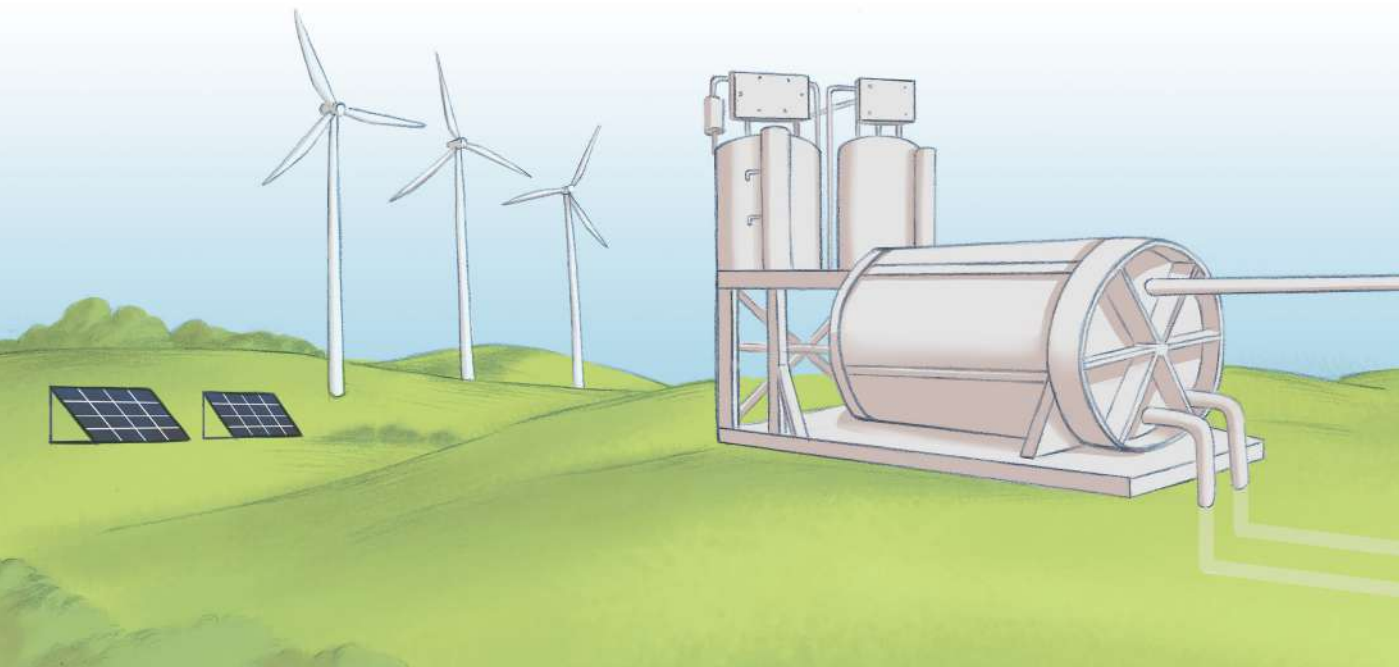
L'approche par modélisation numérique permet d'identifier les points forts et faibles des technologies en amont de leur installation. « *Nous réalisons des études technico-économiques sur les différents procédés d'électrolyse de l'eau dans le but de grignoter en rendement et de réduire leur coût* », présente Chakib Bouallou, expert en modélisation numérique et stockage d'énergie à Mines ParisTech. Plusieurs technologies existent, mais laquelle est la plus adaptée au stockage des énergies

renouvelables? À l'échelle industrielle, les électrolyseurs basse température sont matures et semblent répondre à l'intermittence de ces sources énergétiques.

Cependant, en phase d'évaluation, aucune technologie n'est écartée. Dans le cadre du projet ANR MCEC et en collaboration avec Chimie ParisTech, l'équipe de Chakib Bouallou travaille actuellement sur une solution à base de carbonates fondus qui s'appuie sur la coélectrolyse de l'eau et du CO_2 . « À partir des courbes de performance des matériaux en fonction du courant, nous estimons l'efficacité des systèmes au cours de différents scénarios d'utilisation. L'analyse globale de cette technologie sera ensuite comparée aux autres techniques existantes », résume le chercheur. En effet, l'adaptabilité d'un système dépendra avant tout de l'usage envisagé. Pour compléter ces études, des expérimentations sont cependant incontournables.

Minerve : un démonstrateur à destination de la recherche

Afin d'accroître les connaissances nécessaires à la transition vers le power-to-gas, le démonstrateur Minerve a été installé en 2018 sur le campus de la Chantrerie au nord de Nantes. « La plateforme est avant tout un outil de recherche qui répond à des besoins d'expérimentation et de collecte de données. Les résultats doivent aider le développement de modèles de simulation des technologies du power-to-gas », explique Pascaline Pré, chercheuse en génie des procédés à IMT Atlantique. Équipée de panneaux solaires et d'une éolienne, Minerve dispose également d'un électrolyseur dédié à la production d'hydrogène converti, avec du CO_2 en bouteille, en méthane. Celui-ci est ensuite redistribué vers une station de distribution de carburant gaz naturel véhicule (GNV) pour la mobilité. La prochaine étape consiste désormais à intégrer une technologie de captage du CO_2 des fumées de combustion des



chaudières du réseau de chaleur du site afin de remplacer l'approvisionnement en bouteilles.

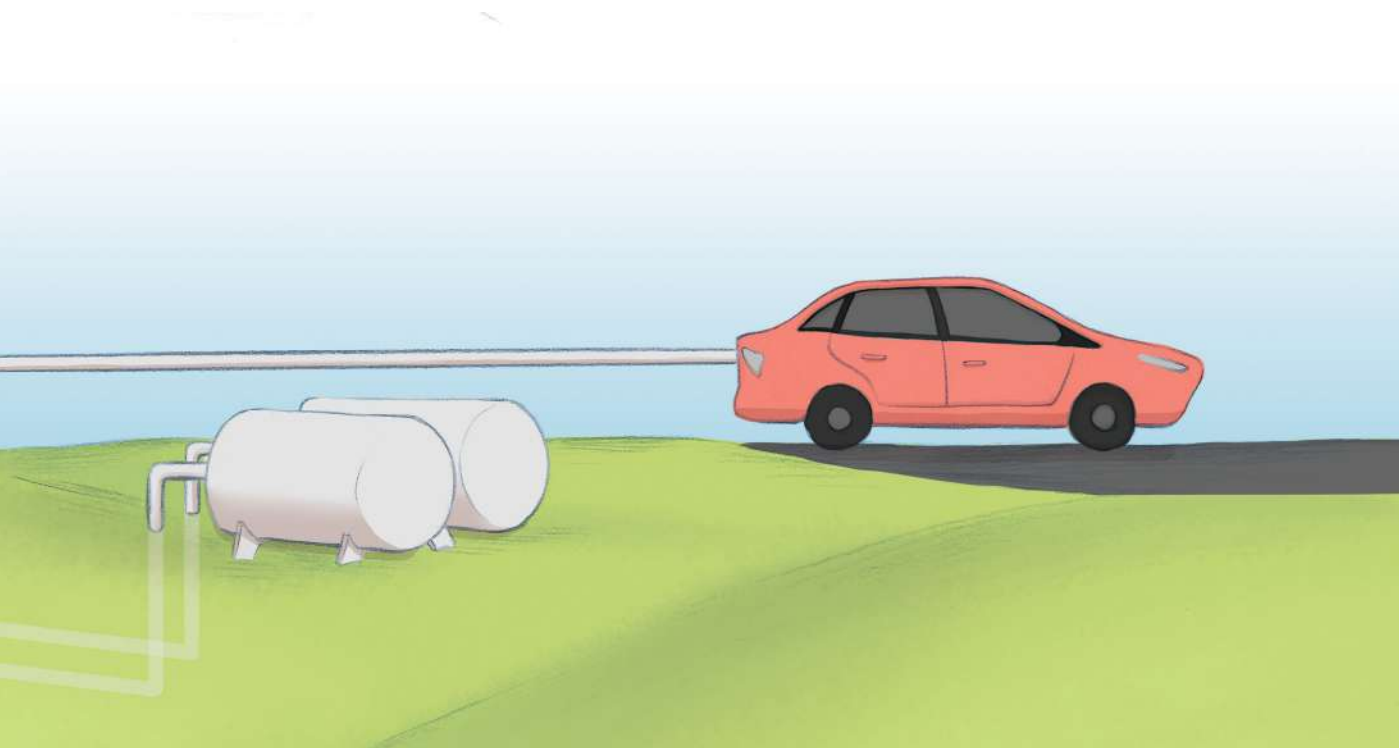
Le dioxyde de carbone est très stable dans l'air. Le transformer en produits utiles est par conséquent difficile. L'équipe de Pascaline Pré développe un nouveau procédé pour capter ce gaz par absorption à l'aide d'un solvant. Le gaz récupéré est purifié, séché, comprimé et envoyé vers le méthaneur. Toutefois, quelques verrous doivent être levés dans le but d'optimiser cette approche : « *La régénération du solvant est très consommatrice de chaleur. Il serait possible d'améliorer l'efficacité énergétique du dispositif en développant un système électrifié de chauffage par micro-onde* », explique la chercheuse. Ce concept réduirait également la taille des structures nécessaires à ce procédé en vue d'une future installation industrielle.

À plus long terme, Minerve devrait également servir de support à l'étude de nombreuses problématiques du projet

Carnot HyTrend qui rassemble une partie de la communauté scientifique française autour de l'hydrogène. D'ici trois ans, des premières recommandations sur les différentes technologies (électrolyse, méthanation, captage CO₂...) devraient être publiées pour améliorer l'existant, ainsi que des études sur les risques et les impacts environnementaux du *power-to-gas*.

Quid du *power-to-gas-to-power* ?

Il est possible d'aller au-delà des techniques de *power-to-gas* actuelles en ajoutant une étape d'oxycombustion. Dans le cadre du projet ANR FluidStory, l'équipe de Chakib Bouallou s'est concentrée sur la modélisation d'un dispositif s'appuyant sur trois technologies de pointe : l'électrolyse PEM à basse température, la méthanisation (permettant le stockage d'électricité sous forme de gaz) et des centrales à oxycombustion pour les étapes de déstockage. Les deux premières étapes sont donc les mêmes que



dans une infrastructure classique de *power-to-gas* mentionnée précédemment. La différence ici est que l'oxygène et le CH_4 – obtenus respectivement par électrolyse de l'eau et méthanation – sont stockés en cavernes pour une durée indéterminée. Ainsi, quand le prix de l'électricité est à la hausse, le procédé d'oxycombustion réutilise ces gaz pour produire de l'électricité. Le CO_2 également émis lors de cette réaction sera réutilisé par le procédé de méthanation au cours du cycle suivant.

Cette conception en cycle fermé permet donc un fonctionnement autonome en ce qui concerne les réactifs requis, ce qui n'est pas possible dans des structures de *power-to-gas* classiques. Toutefois, des analyses visant à mieux comprendre sa mécanique et la nature des interactions entre ses composants doivent encore être menées.

Une ouverture sur le *power-to-X*

La méthanation au cœur des procédés mentionnés jusqu'à présent n'est qu'un exemple parmi d'autres de transformation de l'hydrogène au contact du CO_2 . En effet, ces réactions, dites d'hydrogénation, servent à la synthèse de nombreux produits chimiques habituellement obtenus à partir de ressources fossiles. À IMT Mines Albi, l'équipe de Doan Pham Minh travaille sur l'optimisation de ces procédés. En plus de la production de méthane, les chercheurs ciblent la synthèse de biocarburants liquides, de méthanol, d'éthanol ou encore d'autres produits chimiques à base de carbone. Tous ces composés « X » sont donc obtenus à partir d'hydrogène et de CO_2 . Deux facteurs déterminent alors la nature du résultat : les conditions opératoires

(température, pression, temps de séjour, etc.) et le catalyseur utilisé. « *C'est lui qui conduit la réaction vers un produit cible. Ainsi, en développant des matériaux catalytiques actifs, sélectifs et stables, nous améliorerons les rendements de la synthèse du produit souhaité* », explique le chercheur.

« Ces réactions, dites d'hydrogénation, servent à la synthèse de nombreux produits chimiques habituellement obtenus à partir de ressources fossiles. »

Le méthanol intéresse particulièrement l'industrie. En effet, ce composé est omniprésent autour de nous et est notamment utilisé pour les matériaux de surface des meubles, au sein de peintures, des plastiques des voitures, etc. Il en est de même pour l'éthanol, les biocarburants ou des intermédiaires chimiques d'origine renouvelable. Au-delà du rôle de l'hydrogène pour le mix énergétique national, le chercheur insiste donc sur son utilisation par d'autres secteurs fortement consommateurs : « *il est très utilisé par l'industrie chimique et il faut être prêt à développer des procédés compétitifs et performants en anticipant les futures utilisations de l'hydrogène et du power-to-X.* » ▲

HYDROGÈNE DÉCARBONÉ

COMMENT PASSER DU GRIS AU GREEN ?

Le déploiement industriel de la production d'hydrogène n'a de sens que si celui-ci n'émet que peu ou pas de dioxyde de carbone. Les chercheurs des écoles de l'IMT travaillent notamment sur différentes alternatives à l'utilisation des énergies fossiles, comme l'électrolyse et la photocatalyse de l'eau, la pyrolyse du méthane par plasma ou encore la pyrolyse et gazéification de biomasse.



Produire une tonne d'hydrogène aujourd'hui, c'est émettre 12 tonnes de CO₂. En effet, 95 % de l'hydrogène mondial sont produits à partir de ressources fossiles.

On parle d'hydrogène gris. Une situation incompatible avec le déploiement à long terme de la filière hydrogène. D'autant que, même si le CO₂ émis par les procédés actuels peut être capté en milieu contrôlé, les ressources fossiles ne pourront de toute façon pas répondre aux ambitions gouvernementales sur cette énergie. Développer d'autres modes de production « d'hydrogène décarboné » est donc essentiel. Dans le cadre du réseau Carnot H2Mines, les chercheurs des différentes écoles de l'IMT travaillent sur des procédés qui pourraient faire tourner au vert la palette de couleurs de l'hydrogène actuel.

Du bleu pour se mettre au vert

En ligne de mire du plan gouvernemental français publié en septembre dernier : l'électrolyse de l'eau. Elle consiste à séparer une molécule d'H₂O en hydrogène et en oxygène grâce à un apport d'électricité. Une solution décarbonée, à condition que l'électricité provienne d'une source renouvelable. Mais pourquoi transformer une énergie déjà propre en gaz ? « *L'hydrogène permet le stockage d'importantes quantités d'énergie sur le long terme, ce que ne permettent pas de faire les batteries à grande échelle pour alimenter tout un réseau* », explique Christian Beauger, chercheur en sciences des matériaux à Mines ParisTech. Le gaz répond donc en partie à la problématique d'intermittence des énergies renouvelables.

« L'hydrogène permet le stockage d'importantes quantités d'énergie sur le long terme, ce que ne permettent pas de faire les batteries à grande échelle pour alimenter tout un réseau. »

Dans ce cadre, les chercheurs veulent améliorer la performance des électrolyseurs afin de les rendre plus compétitifs sur le marché. À savoir : trouver le meilleur équilibre possible entre rendements, durée de vie et coûts réduits. Les électrolyseurs sont constitués de plusieurs cellules électrochimiques contenant deux électrodes et un électrolyte, comme dans le cas de piles à combustible. Il en existe trois grandes familles : les alcalins dont l'électrolyte est liquide, les technologies à membrane polymère (PEM) et les systèmes à haute température à base d'oxyde solide céramique (SOC). Chacune présentant des problématiques qui lui sont propres.

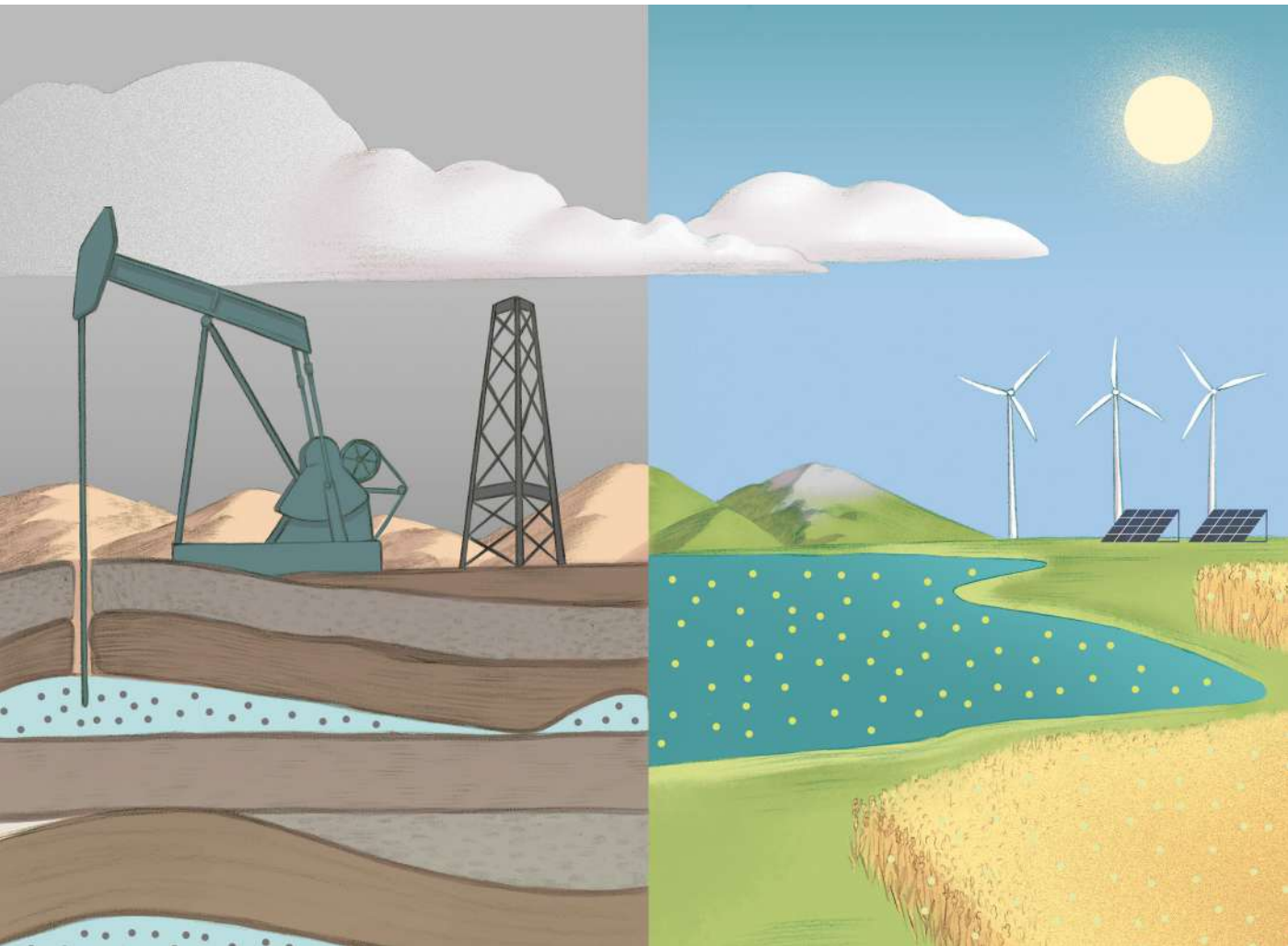
À Mines ParisTech, l'équipe de Christian Beauger cherche à augmenter la durée de vie des électrolyseurs PEM en se concentrant sur les matériaux utilisés au niveau de l'anode. « *Nous développons de nouveaux supports de catalyseurs sous forme d'aérogels d'oxydes métalliques qui doivent être conducteurs électroniques et capables de résister à la corrosion en milieu humide, à une*

température de 80°C et soumis à des potentiels souvent supérieurs à 2 volts», rapporte le chercheur. Une autre problématique de taille touche également les matériaux : le coût d'un électrolyseur. En effet, le catalyseur présent sur les électrodes des PEM est l'oxyde d'iridium. Un composé trop cher pour favoriser le déploiement massif de futurs électrolyseurs à forte puissance. C'est pourquoi les chercheurs travaillent sur des

catalyseurs à base de nanoparticules d'oxyde d'iridium. Ils réduisent ainsi la quantité de matière et donc le coût potentiel du système.

Lumière sur la photocatalyse

À l'échelle du laboratoire, une alternative utilisant l'énergie solaire pour casser les molécules d'eau en hydrogène et oxygène est également envisagée. C'est la photocatalyse. Les semi-conducteurs



utilisés peuvent être immergés dans de l'eau sous forme de poudre. Sous l'effet des rayons solaires, les paires électrons-trous créées fournissent l'énergie nécessaire à la dissociation des molécules d'eau. Mais attention : les niveaux d'énergie de ces porteurs de charge doivent être très précisément contrôlés pour être utiles.

« *Nous formons des défauts au sein des matériaux qui viennent introduire des niveaux d'énergie dont la position doit être compatible avec l'énergie nécessaire au procédé* », explique Christian Beauger. Un travail d'ultra-précision délicat à réaliser, et qui conditionne l'efficacité de la photocatalyse. La route est encore longue pour les photocatalyseurs dont le rendement dépasse difficilement 1 % pour les plus stables. Mais il ne faut pas enterrer ce mode de production d'hydrogène trop vite, car il est moins cher et plus facile à mettre en place qu'un système combinant une source d'énergie renouvelable et un électrolyseur.

De l'hydrogène turquoise par pyrolyse du méthane

À Mines ParisTech, l'équipe de Laurent Fulcheri, spécialiste des procédés plasma, travaille sur la production d'hydrogène non plus à partir de l'eau, mais à partir de la pyrolyse du méthane. Une technique encore peu connue en France, bien que largement explorée par nos voisins allemands, russes. « *Ce procédé nécessite de l'électricité comme pour l'électrolyse de l'eau, mais son principal intérêt est qu'il en nécessite environ sept fois moins que celle-ci. Il permet donc de produire plus d'hydrogène à partir de la même quantité d'électricité* », révèle le chercheur.

En pratique, les chercheurs craquent des molécules de méthane, formule : CH_4 à haute température. « Pour cela, nous utilisons un gaz à l'état plasma pour fournir de l'énergie thermique au système. C'est la seule alternative pour apporter de l'énergie à une température supérieure à 1 500°C sans émission de CO_2 et à une échelle industrielle », précise Laurent Fulcheri. La réaction génère ainsi deux produits valorisables : l'hydrogène (25 % en masse) et le noir de carbone solide (75 % en masse). Ce dernier, à ne pas confondre avec le CO_2 , est notamment utilisé dans la gomme des pneus, les piles, les batteries, des câbles ou encore des pigments. Le carbone est ainsi stocké dans les matériaux et peut théoriquement être recyclé à l'infini. « *La production d'une tonne de noirs de carbone par cette méthode permet d'éviter l'émission de 3 tonnes de CO_2 comparé aux méthodes actuelles* », ajoute le chercheur.

« La production d'une tonne de noirs de carbone par cette méthode permet d'éviter l'émission de 3 tonnes de CO_2 comparé aux méthodes actuelles. »

Ce procédé a déjà fait ses preuves de l'autre côté de l'Atlantique. Depuis 2012, les chercheurs de Mines ParisTech collaborent avec la *start-up* américaine Monolith Materials qui a développé une technologie directement inspirée de leurs travaux. Sa localisation dans le Nebraska

n'est pas anodine, car elle lui apporte un accès direct à l'énergie éolienne au cœur de la *corn belt*, espace agricole majeur des États-Unis. L'hydrogène produit est ainsi transformé en ammoniac pour fertiliser les exploitations de maïs environnantes.


Si la machine tourne, le travail de l'équipe de Laurent Fulcheri, acteur majeur de la R&D de la *start-up*, est pourtant loin d'être fini. « *La production d'hydrogène est la tâche la plus simple, car les procédés de purification du gaz sont assez matures. Par contre, le noir de carbone produit peut avoir des valeurs sur le marché drastiquement différentes selon sa nano-structure. L'objectif est donc désormais d'optimiser notre procédé afin de pouvoir générer toutes les qualités de noirs de carbone qui répondent à la demande des industries consommatrices* », présente le chercheur. En effet, l'avenir de cette technologie repose dans les capacités de valorisation des deux coproduits sur le court terme.

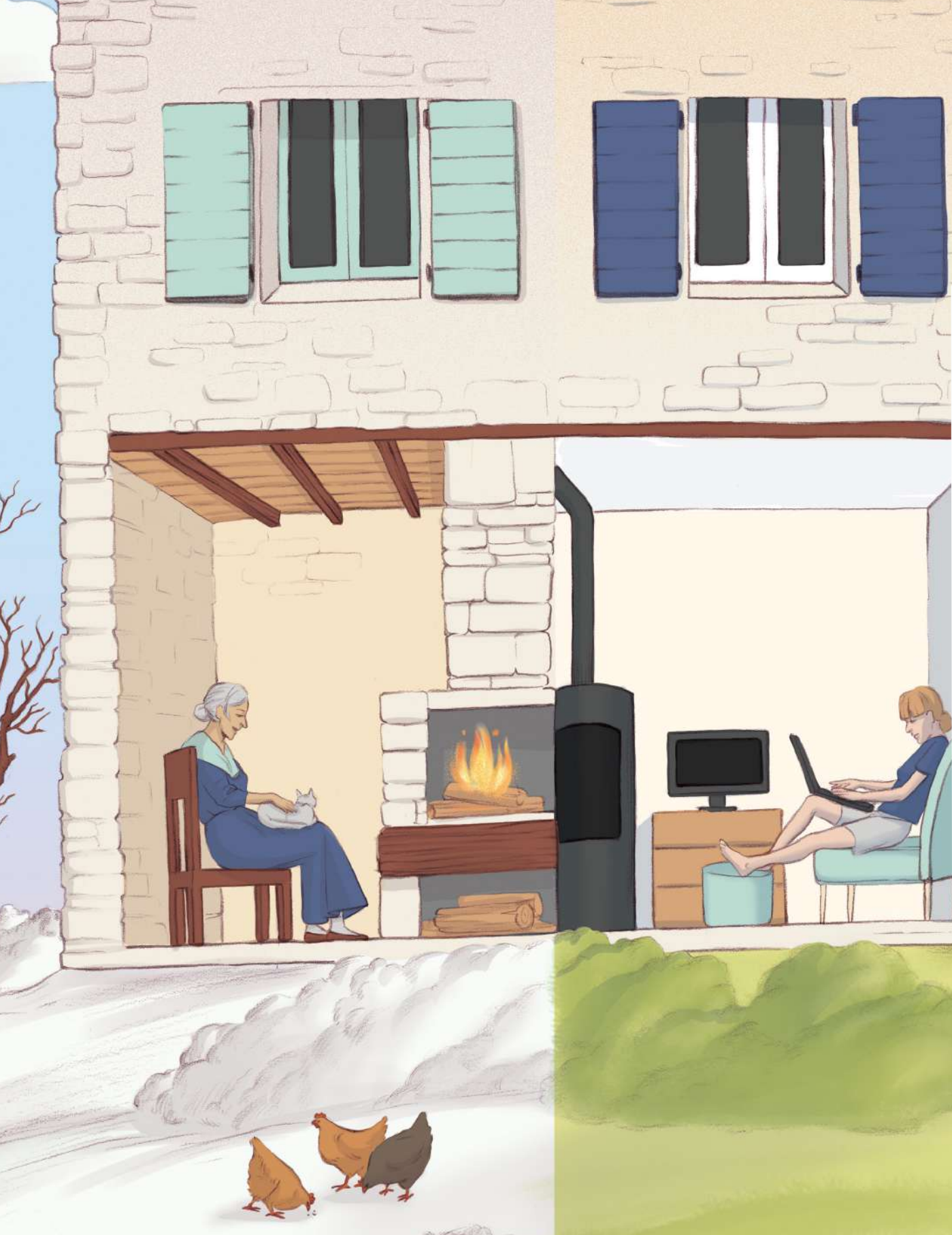
Transformation de la biomasse : une alternative locale

Du côté d'IMT Mines Albi, l'équipe de Javier Escudero travaille sur des procédés thermochimiques de transformation de la biomasse par pyrolyse et gazéification. Des déchets organiques sont chauffés à des températures élevées dans un réacteur et convertis en petites molécules de gaz de synthèse. L'hydrogène, le monoxyde de carbone, le méthane et le CO₂ ainsi produits sont captés pour ensuite être recombinaés ou séparés. Par exemple, le CO₂ et l'hydrogène peuvent servir à la formation de méthane de synthèse utilisable dans les réseaux de gaz naturel.

Toutefois, un verrou scientifique doit encore être levé : « *le gaz de synthèse produit est toujours accompagné de molécules inorganiques et de grandes molécules organiques appelées goudrons. Bien que leur concentration soit faible, elle impose tout de même une étape d'épuration supplémentaire du gaz* », explique Javier Escudero. En résulte une augmentation des coûts de traitement qui rend l'implémentation de cette solution plus difficile à petite échelle. Le chercheur travaille donc sur plusieurs solutions. Par exemple, l'exploration de différents matériaux catalyseurs qui permettraient d'accélérer certaines réactions de séparation des molécules des déchets, tout en éliminant les goudrons.

Cette approche pourrait être envisagée comme une forme de valorisation énergétique locale des déchets. En effet, ces technologies permettraient un maillage du territoire à petite et moyenne échelle avec des tailles de réacteurs adaptées à celles des centres de collecte de déchets verts, de résidus agricoles non valorisés, etc. Mais ceci tient également à un besoin de clarification des réglementations encadrant ce type d'installations. « *Pour le moment, la loi n'est pas claire sur les contraintes environnementales imposées à de telles structures, ce qui ralentit leur développement et rebute certains industriels à vraiment investir dans cette méthode* », précise le chercheur.

Les solutions ne manquent par pour la production d'hydrogène décarboné. Néanmoins, la réalité économique veut que pour être réellement compétitifs, ces procédés devront produire un hydrogène moins cher que celui issu des énergies fossiles. 



MATIÈRES & MATÉRIAUX

1

LES ERC
JUMELLES
DE L'AORTE

ÇA J'AIME,
ÇA JE N'AIME PAS :
L'ESTHÉTIQUE
DU TACTILE

3

2

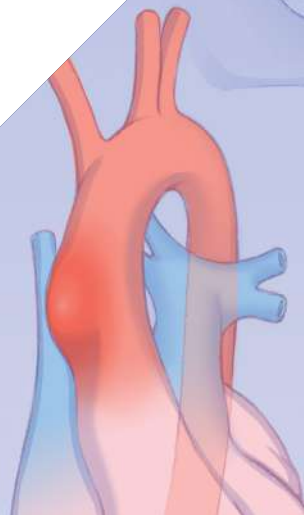
LES TRAINS
PASSENT
AU RECYCLAGE

RETROUVER
LA CONNAISSANCE
DES MATÉRIAUX
TRADITIONNELS
ET LOCAUX

4

LES ERC JUMELLES DE L'AORTE

En 2015, le centre ingénierie et santé de Mines Saint-Étienne obtenait deux bourses du *European Research Council* (ERC). Derrière ces financements, deux projets de cinq ans sur la rupture d'anévrisme de l'aorte au sein du laboratoire Sainbiose¹. Pierre Badel recevait ainsi une *starting grant* (bourse jeune chercheur) de 1,5 millions d'euros, et Stéphane Avril une *consolidator grant* (bourse de consolidation d'une équipe de recherche) de 2 millions d'euros. 2020 marque la fin de leurs bourses et des projets de recherche qui leur sont associés. À cette occasion, l'MTech a réalisé une interview croisée de ces deux chercheurs pour aborder les résultats qu'ils ont ainsi pu obtenir, et l'impact de ces bourses ERC sur leurs travaux.



Vos deux bourses ERC, obtenues en 2014 et débutées en 2015, portaient sur des sujets similaires : la biomécanique de l'aorte dans le cadre des ruptures d'anévrismes. Quelles étaient les particularités de chacun de vos projets ?

Pierre Badel : L'idée de départ pour mon projet, AArteMIS, était de mieux expliquer la résistance des parois de l'aorte. En 2014, nous venions de mettre au point des tests *in vitro* pour étudier la résistance mécanique de cette artère. L'objet de l'ERC était d'y rajouter des expérimentations sur la microstructure : concrètement, il s'agissait de mettre au point des protocoles pour tirer sur ces matériaux et étudier les propriétés de structure lorsque la paroi casse.

« Nous voulions caractériser les contraintes mécaniques dans ces tissus afin de comprendre comment l'anévrisme se développe, et comment il rompt. »

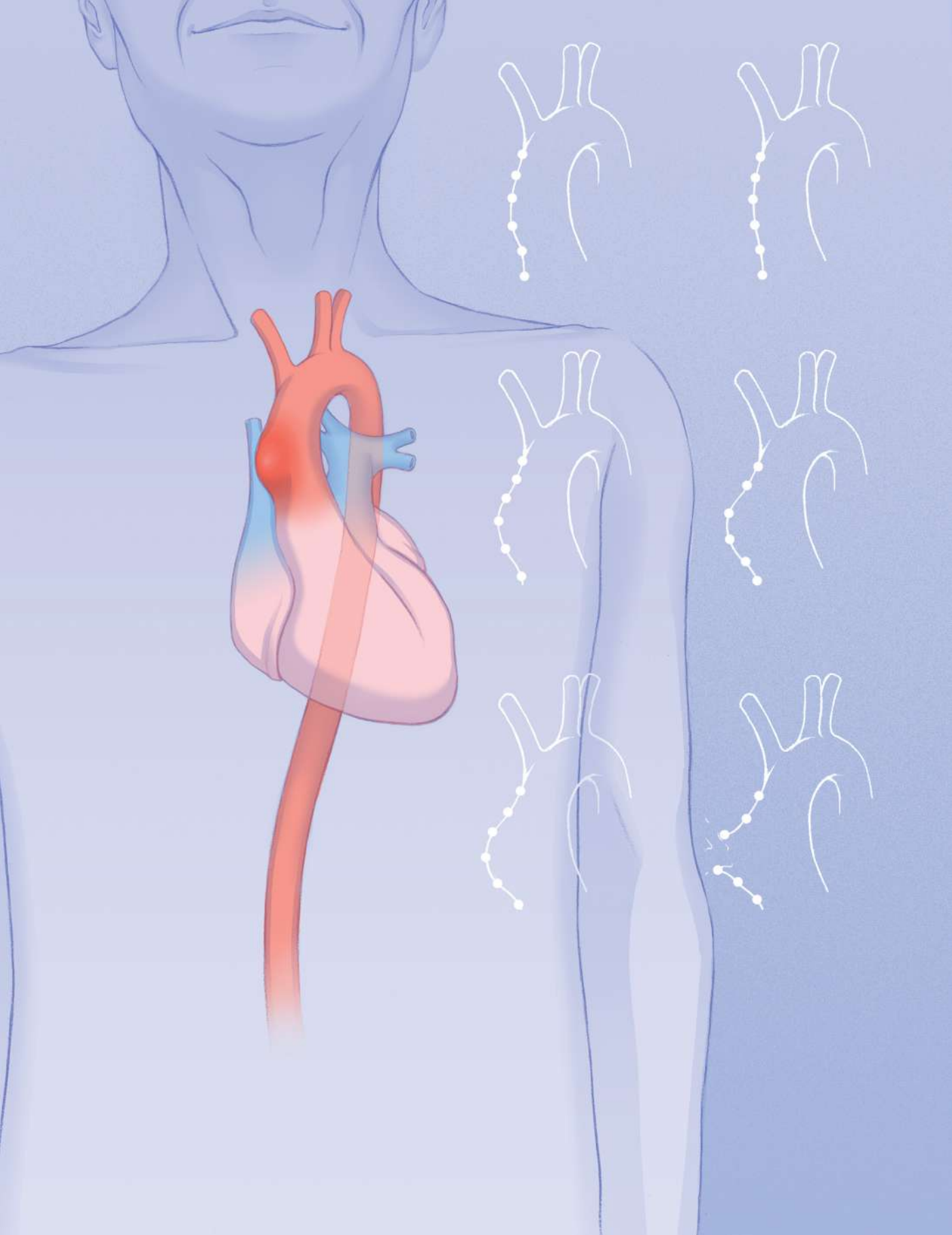
Stéphane Avril : Pour ma part, tel que mon projet Bioloanics avait été monté, il y avait une part de recouvrement avec AArteMIS. Nous avons récupéré des tissus d'anévrisme de patients réels grâce à notre partenariat avec le CHU de Saint-Étienne, et nous voulions caractériser les

contraintes mécaniques dans ces tissus afin de comprendre comment l'anévrisme se développe, et comment il rompt. Il faut dire que les deux projets n'étaient pas prévus pour être articulés : c'était improbable d'avoir deux bourses ERC dans la même équipe. Mais les comités d'évaluation des demandes de bourse pour les *starting grant* et les *consolidator grant* sont différents, ce qui a permis que les deux projets soient jugés indépendamment et qu'ils soient tous les deux lauréats. L'articulation entre les deux projets s'est faite après.

Comment avez-vous adapté les recherches sur chacun des projets en fonction de ce qui était réalisé sur l'autre ?

SA : Lorsque nous avons appris que nous avions obtenu les deux bourses, j'ai effectué un remodelage de mon projet. J'ai plutôt fait porter les travaux sur les aspects mécano-biologiques. Plutôt que d'étudier les raisons mécaniques de rupture des anévrismes et leur lien avec la structure de la paroi — ce que le projet AArteMIS faisait déjà — je me suis concentré sur les modifications précoces de la paroi aortique, et le lien avec l'environnement. L'étude a porté par exemple sur la façon dont le sang circule dans l'aorte, et comment cela impacte le développement de l'anévrisme. En parallèle, nous avons démarré un nouveau protocole dans le projet afin d'inclure des patients atteints de tout petits anévrismes. Nous suivons encore ces patients aujourd'hui, et cela nous permet de mieux comprendre l'évolution de la pathologie.

PB : De mon côté je suis resté assez proche du programme prévu, c'est-à-dire l'étude mécanique du matériau de



l'artère. La seule différence avec le projet d'origine c'est que nous avons pu approfondir cette dimension structurale dans la rupture des parois. Nous avons eu l'opportunité d'utiliser une nouvelle technique: la tomographie au rayon-X. C'est comme le scanner, mais adapté aux tout petits échantillons. Cela nous a permis de travailler sur chaque couche des vaisseaux qui composent la paroi de l'aorte, et qui ont des propriétés différentes.

Ces deux projets ont duré cinq ans et se terminent dans quelques mois. Quels sont les résultats emblématiques que vous retenir ?

PB : Sur AArteMIS, nous avons développé une expérience qui prouve de manière propre que même si nous connaissons l'épaisseur précise d'un anévrisme, nous ne sommes pas capables de savoir où il va casser. C'est un résultat dont nous sommes très fiers car d'habitude un matériau casse à l'endroit le plus fin. Or ici c'est une approche qui est erronée. Ce résultat permet d'aider au diagnostic des anévrismes en expliquant aux praticiens qu'il ne suffit pas de regarder l'épaisseur de la paroi aortique pour argumenter sur un risque de rupture d'un anévrisme.

« Même si nous connaissons l'épaisseur précise d'un anévrisme, nous ne sommes pas capables de savoir où il va casser. »

Et quels résultats sur le projet Biolochanics ?

SA : Il y a deux choses dont je suis très content. La première c'est l'achèvement d'un article scientifique qui a mis 5 ans à être rédigé. Il concerne le développement d'une méthode pour reconstituer la carte d'élasticité des vaisseaux. C'est une technique très intéressante car personne n'avait réussi à faire une carte d'élasticité des vaisseaux de l'aorte avant nous. Elle a donné lieu au dépôt d'un brevet, et pourrait être utilisée en recherche pharmacologique. Le second résultat, c'est que nous avons mis au point un modèle numérique pour simuler le vieillissement accéléré de l'aorte en fonction de paramètres biologiques. Cela nous permet d'aller vers le développement d'un jumeau numérique de l'aorte pour les patients.

« Personne n'avait réussi à faire une carte d'élasticité des vaisseaux de l'aorte avant nous. »

Une bourse ERC est un financement important pendant cinq ans.

Comment ces fonds permettent-ils concrètement de vous aider à développer un projet de recherche ?

PB : D'abord, une bourse ERC signifie que pendant quelques années nous ne perdons plus de temps à chercher de l'argent. C'est un gros confort pour un chercheur qui doit en permanence faire des demandes de financement pour

mener ses travaux. Concrètement pour mon projet, la bourse a permis de recruter trois doctorants et trois post-doctorants. C'est toute une équipe qui se monte, et qui permet d'avoir plus de force de recherche. Dans notre discipline, il y a également beaucoup d'expériences impliquant des outils et appareils coûteux. La bourse permet de s'équiper avec du matériel de pointe et de monter les expériences que l'on souhaite.

bien investi, et c'est principalement ce qui change avec le temps que l'on pourrait passer par ailleurs à chercher des financements, où l'impact est plus incertain. C'est aussi beaucoup de reconnaissance pour les travaux. En tant que chercheurs, nous sommes plus sollicités, et nous recevons des invitations qui n'auraient probablement pas eu lieu sans l'ERC. En matière d'interactions internationales, c'est un apport significatif.

« La bourse permet de s'équiper avec du matériel de pointe et de monter les expériences que l'on souhaite. »

En tant que chercheurs, nous sommes plus sollicités, et nous recevons des invitations qui n'auraient probablement pas eu lieu sans l'ERC.

SA : C'est similaire pour moi : nous avons pu embaucher neuf post-doctorants sur Biolochanics. Ça représente une équipe de recherche conséquente. Le confort financier permet aussi de dédier du temps au ressourcement scientifique et aux collaborations. J'ai pu faire des séjours d'un à deux mois chaque année à l'université de Yale, aux États-Unis, où il y a également une très bonne équipe en biomécanique spécialisée de l'aorte, dirigée par Jay Humphrey.

Comment la responsabilité d'un projet financé par une bourse ERC impacte-t-elle votre vie de chercheur ?

SA : C'est beaucoup de temps passé à manager, à organiser. C'est exigeant mais on perçoit directement les retombées pour le laboratoire. C'est du temps qui est

À l'approche de la fin des projets — fin décembre pour vous Stéphane, et fin octobre pour vous Pierre — comment envisagez-vous la suite de vos recherches ?

PB : Pour l'instant nous sommes à fond ! Nous avons encore plusieurs articles scientifiques en cours de rédaction. Le projet se termine officiellement à l'automne, donc je me remets progressivement à chercher des financements. Par exemple j'ai un projet local qui va débiter sur la rupture de tissus mous pour la réparation des parois abdominales, financé par la région Rhône-Alpes, le CHU de Lyon, l'Insa Lyon, et Medtronic. Mais les prochains mois resteront encore très chargés sur la fin du projet Aartemis.

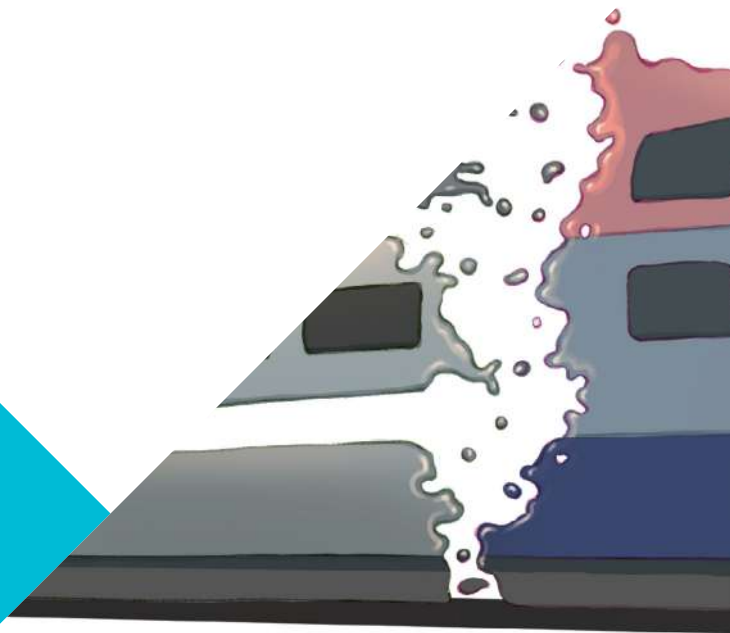
SA : Pendant l'ERC, nous avons peu de disponibilités pour lancer et coordonner d'autres projets. Durant les cinq dernières années, j'ai plutôt eu comme approche de monter dans des trains sans les conduire. Cela se traduit par des associations avec d'autres partenaires académiques pour déposer des projets mais sans être leader. Récemment, l'un de ces projets a été accepté sur financement d'une action Marie Curie International Training Network, qui sont des financements européens pour le recrutement de cohortes de doctorants. Le laboratoire participe ainsi à l'encadrement de 6 thèses sur le jumeau numérique pour les anévrismes de l'aorte qui démarrent au printemps 2020. De plus, je compte profiter de la fin de ce projet pour aller voir ce qui se fait ailleurs dans mon champ de recherche. Pendant un an, j'aurai un poste de professeur invité à l'Université Technique de Vienne en Autriche. C'est important aussi de se donner du temps dans une carrière pour s'ouvrir, et nouer des liens avec des homologues. ▲

1 Le laboratoire Sainbiose est une unité mixte de recherche Mines Saint-Étienne/ Inserm/ Université Jean Monnet

MATIÈRE & MATÉRIAUX

LES TRAINS PASSENT AU RECYCLAGE

Le projet Destiny propose un nouveau procédé de fabrication pour les pièces du domaine ferroviaire et aéronautique. Il repose sur une résine thermoplastique, permettant la recyclabilité des matériaux tout en limitant la pollution liée à leur fabrication.



Etre en capacité de recycler les produits devient de plus en plus essentiel pour améliorer le coût environnemental de leur production. Dans le domaine ferroviaire, les pièces composites utilisées ont une durée de vie d'environ 30 ans et leur recyclage est difficile et coûteux. Elles sont pour la plupart réalisées à partir de résines thermodurcissables — c'est-à-dire qu'elles durcissent grâce à l'effet d'une réaction chimique qui démarre lors de leur moulage. Une fois à l'état solide, elles ne peuvent pas être fondues à nouveau. Si les pièces ne peuvent pas être réparées, elles sont alors détruites

« Dans le domaine ferroviaire, les pièces composites utilisées ont une durée de vie d'environ 30 ans et leur recyclage est difficile et coûteux. »

Le projet Destiny rassemble plusieurs partenaires industriels et académiques, pour répondre à ce besoin. « *L'objectif est de pouvoir migrer vers des matériaux recyclables dans les domaines ferroviaire et aéronautique* » indique David Cnockaert, responsable du projet à Stratiforme Industries, société spécialisée dans les matériaux composites. Destiny a remporté un *Innovation Award* lors du *JEC World 2020* pour deux démonstrateurs en matériaux composites recyclables, une cabine de train régional et une porte d'accès ferroviaire.

Une résine à fondre

« *Une solution de facilité serait d'utiliser du métal, facilement recyclable*, reprend David Cnockaert, *mais il faut aussi prendre en compte les contraintes du milieu comme celles de masse, du design, de thermique ou d'acoustique.* » L'intérêt du projet Destiny est de développer une solution facilement adaptable aux produits actuels en améliorant leurs qualités environnementales. Les matériaux des pièces de référence dans le domaine ferroviaire sont composites, fabriqués avec une résine et des fibres de verre ou de carbone. La stratification est l'étape qui consiste à imprégner ces fibres à la résine pour former les matériaux composites.

« L'intérêt du projet Destiny est de développer une solution facilement adaptable aux produits actuels en améliorant leurs qualités environnementales. »

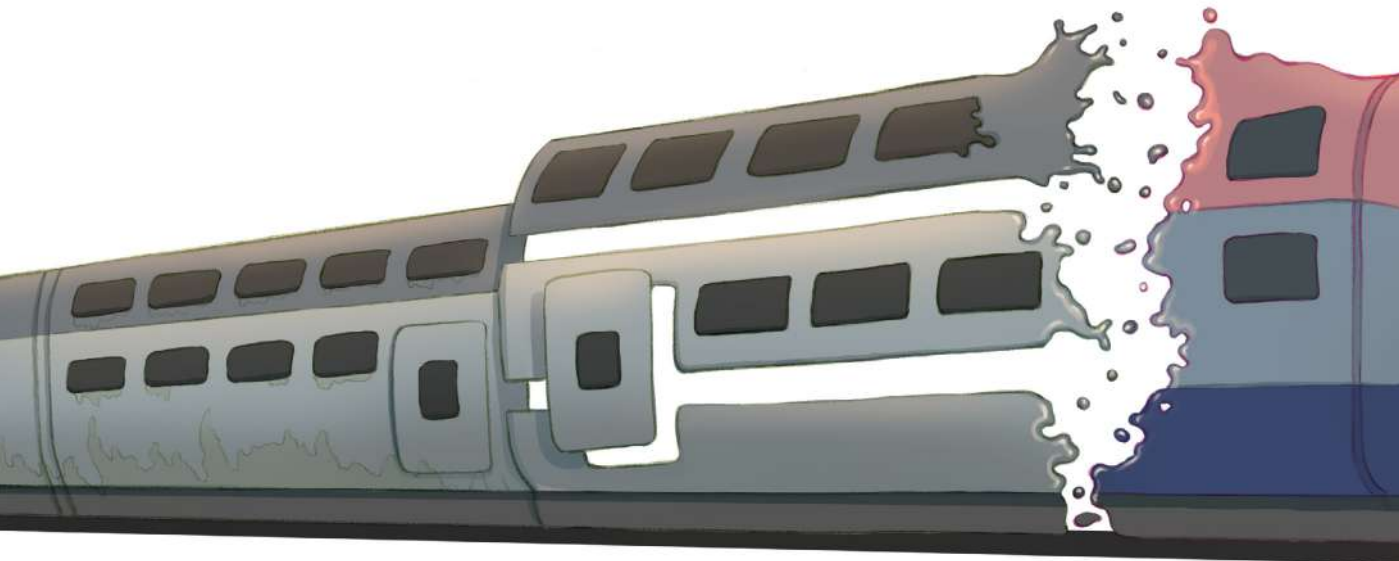
« *Dans le projet Destiny nous développons des résines thermoplastiques pour créer ces pièces* », indique Eric Lafranche, chercheur à IMT Lille Douai impliqué dans le projet Destiny. Au contraire des résines thermodurcissables, les résines thermoplastiques acquièrent une plasticité à très haute température, et passent de l'état solide à un état visqueux. De fait, si une pièce ferroviaire est trop abîmée pour être réparée, elle peut être retransformée pour que les recyclats puissent être réutilisés.

La résine est produite par Arkema sous forme liquide, avec une très basse viscosité. « Une consistance proche de l'eau est nécessaire pour imprégner les fibres de verre ou de carbone lors de la polymérisation », annonce Eric Lafranche. « La polymérisation se fait directement dans le moule et ce procédé nous permet de nous affranchir de certains composants, ceux libérant des composés organiques volatils (COV) », ajoute-t-il. La production de COV est alors grandement limitée par rapports aux autres résines. « Les personnes travaillant à proximité de ces COV ont une protection mais cela reste une pollution, et il est mieux de pouvoir la limiter », précise Eric Lafranche.

Une innovation adaptée

Cette résine thermoplastique présente des propriétés quasiment équivalentes aux résines thermodurcissables, « voire même une meilleure résilience face aux chocs », complète le chercheur. En théorie cette résine est recyclable

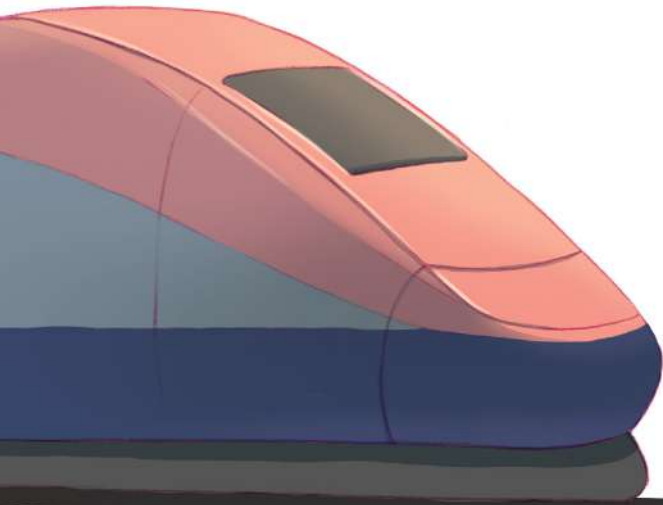
« Cette résine thermoplastique présente des propriétés quasiment équivalentes aux résines thermodurcissables. »



à l'infini. « En pratique c'est un peu plus délicat, au fil des recyclages il peut y avoir une perte de certaines propriétés », concède le chercheur. « Mais ce sont des pertes minimales et nous pouvons mélanger ce matériau recyclé avec du matériau pur pour assurer des propriétés équivalentes », soutient-il.

Le but du projet est de pouvoir proposer de la recyclabilité aux industriels en limitant la pollution associée lors de la fabrication, mais cela en proposant des pièces interchangeables avec celles actuelles. « Tout l'intérêt du projet est de proposer une solution facilement accessible aux industriels, et donc facilement

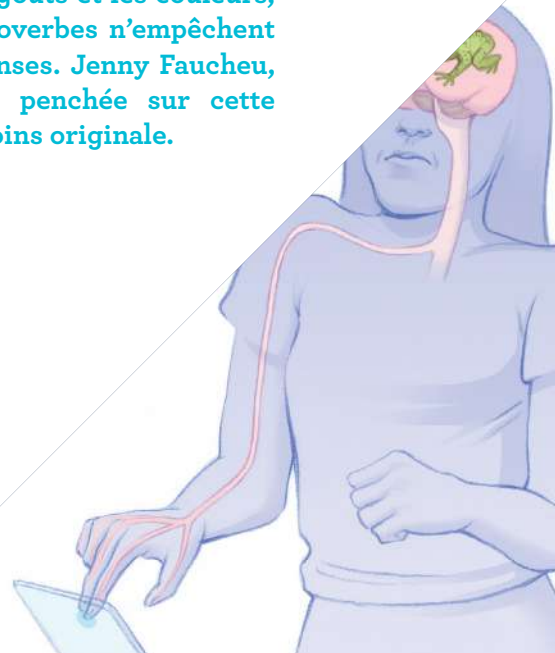
adaptable aux chaînes de production actuelles », souligne David Cnockaert. Il est essentiel que les pièces recyclables suivent le même cahier des charges que leurs homologues thermodurcissables pour pouvoir être installées. Cette solution pourrait aussi s'adapter à d'autres domaines dans le futur. « Nous pourrions penser à des applications dans le domaine de l'énergie, de la défense ou du médical par exemple, pour lesquels nous fabriquons également également des pièces composites », conclut David Cnockaert. ▲



ÇA J'AIME, ÇA JE N'AIME PAS

L'ESTHÉTIQUE DU TACTILE

La fourrure d'un chat, c'est doux, ça plaît. La vase, visqueuse, plaît beaucoup moins. Mais pourquoi cela ? Les goûts et les couleurs, dira-t-on, ne s'expliquent pas. Mais les proverbes n'empêchent pas les scientifiques de chercher des réponses. Jenny Faucheu, chercheuse à Mines Saint-Étienne, s'est penchée sur cette question de la perception tactile, pour le moins originale.



« Nous avons l'habitude de définir ce qui est beau ou plaisant visuellement », commence Jenny Faucheu, chercheuse en ingénierie des matériaux¹ à Mines Saint-Étienne, « mais il est plus rare d'avoir ces questionnements avec d'autres sens, comme le toucher ».

Un Groupement de Recherche nommé GDR TACT 2033 s'est alors formé au 1er janvier 2018 pour étudier à travers diverses disciplines la complexité de la perception tactile.

Une meilleure compréhension du sens du toucher aurait des retombées différentes. D'une part, un questionnaire médical plutôt tourné sur les causes possibles d'une déficience tactile. Ou encore des applications tournées vers la rééducation. D'autre part, des actions de développement ou de conception de produits, plutôt orientées vers des interfaces et simulateurs tactiles, ou des innovations dans le e-commerce. Pour en arriver là il est alors

¹ Jenny Faucheu est chercheuse au laboratoire Georges Friedel, unité mixte de recherche CNRS/Mines Saint-Étienne.

« Nous essayons de tisser des liens entre les différents aspects jouant sur les perceptions tactiles. »

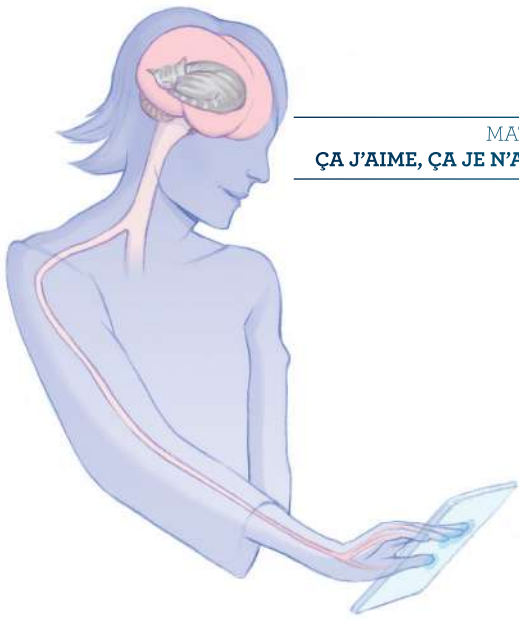
nécessaire d'approfondir nos connaissances sur un sens passant généralement bien après la vue ou l'ouïe.

Qui aime quoi

« Notre but, ce n'est pas de définir un humain standard et un matériau de rêve, signale Jenny Faucheu, nous essayons de tisser des liens entre les différents aspects jouant sur les perceptions tactiles ». Les chercheurs prennent alors en compte la texture et la matière du matériau et utilisent des capteurs pour repérer les vibrations du doigt sur une surface. À travers des électroencéphalogrammes ils étudient aussi l'activité cérébrale, et collectent des informations comportementales à l'aide de questionnaires psychosensoriels. « Par exemple, nous demandions si lors d'un achat en ligne, disons d'un pull, la personne était dérangée de ne pas sentir le tissu », illustre Jenny Faucheu.

D'autres questionnaires étaient orientés sur les surfaces elles-mêmes. Sous la forme d'un QCM à quatre choix, les participants devaient trier les surfaces allant de « j'aime beaucoup » à « je n'aime pas du tout ». Un autre quant à lui s'intéressait plutôt à la surprise ou familiarité d'une surface. Par la suite il était demandé aux participants de trier les matériaux selon leurs similarités. Puis, de les nommer et de leur attribuer des étiquettes de caractéristiques. « Ces mécanismes nous permettent de créer des correspondances, confie Jenny Faucheu, nous pouvons nous dire alors : si cette personne aime l'échantillon 22 elle devrait aimer le 45 ».

Certains matériaux remportent tout de même un consensus. Typiquement les matières lisses sont très appréciées, à



l'encontre d'autres plus rugueuses plaisant difficilement. Et il y a la surprise, tantôt positive, tantôt négative. Mais il faut garder à l'esprit l'impact culturel. « Cette étude a été réalisée avec des participants français, précise-t-elle, il est fort probable que les résultats soient différents pour une culture différente ».

Aimer sans regarder

Pour réaliser cette étude l'équipe de chercheurs a fabriqué des surfaces spécifiques. Les différentes textures sont créées en distribuant sur une surface en polyuréthane de petits plots cylindriques

de hauteur, diamètre et espacement variés. Certains échantillons sont perçus lisses, rugueux, vibrants ou collants.

« Lorsque nous frotons un échantillon, des vibrations sont générées et se propagent dans le doigt jusqu'aux mécanorécepteurs », explique Jenny Faucheu. Les capteurs utilisés par l'équipe de chercheurs servent à étudier les vibrations reçues par ces capteurs sensoriels dans nos doigts. Les plus basses fréquences correspondent aux matériaux rugueux, généralement peu appréciés. Et inversement, plus les fréquences sont hautes, plus les matériaux sont perçus lisses, et ont tendance à plaire. Mais il semblerait aussi qu'une grande amplitude intensifie le sentiment de rugosité.

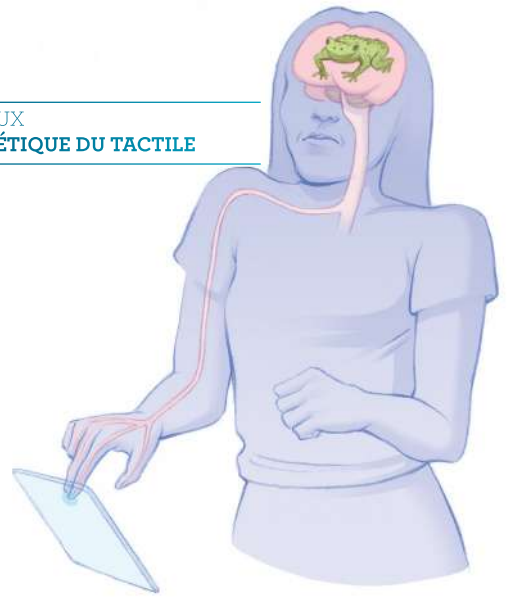
Tous les échantillons se ressemblaient visuellement, un peu blanchâtres, sans trop discerner à l'œil nu les petites aspérités de la cinquantaine d'entre eux. « Nous avons aussi choisi d'être dans une salle assez sombre pour limiter l'influence de la vue » indique la chercheuse stéphanoise. L'information visuelle est omniprésente et peut alors perturber notre perception. Mais l'ouïe, bien que plus discrète, le peut aussi.

« Nous voulions savoir si, en associant des sons plus ou moins agréables, cela pouvait modifier les perceptions tactiles », complète Jenny Faucheu. Les mêmes expériences sont alors répétées avec en prime un casque insonorisé. Lorsque le testeur passe son doigt sur la surface, divers sons sont envoyés dans le casque. Il serait alors imaginable d'inverser la donne d'une surface plutôt perçue comme désagréable en jouant sur l'am-



bianche sonore. « *Cela dit, nous parlons bien de sentiment désagréable, et non pas de douleur* », précise-t-elle.

La perte de sensation tactile peut apparaître avec l'âge ou à la suite d'un accident. Pour ralentir cette perte ou récupérer cette sensation, des exercices de stimulation tactile peuvent être entrepris. Il est possible qu'un ressenti désagréable freine la rééducation en demandant plus d'efforts. De fait, solliciter l'ouïe pour transformer la perception d'une surface pourrait alléger ce processus. « *C'est le principe de gamification*, renchérit Jenny Faucheu, *plus le processus est ludique et agréable, plus le patient s'engage et la rééducation est efficace.* » Une idée requérant de la recherche fondamentale sur le sens du toucher et de nouveaux protocoles d'analyse et de compréhension.



écran tactile augmenté donnant l'impression de toucher la matière affichée. Nous pourrions donc imaginer acheter un pull sur un site de vêtements en ligne et caresser la surface réelle du tissu, en restant face à notre ordinateur. ▲

« Des projets tels que StimTact visent à développer un écran tactile augmenté donnant l'impression de toucher la matière affichée. »

On retrouve le même principe avec les interfaces tactiles. Sur une tablette ou un smartphone, il y a généralement un retour tactile pour accentuer une sélection : un outil améliorant l'interaction avec l'objet. « *Les stimulateurs tactiles essaient de simuler les rendus réels de surface* », ajoute Jenny Faucheu. Des projets tels que StimTact visent à développer un



RETROUVER LA CONNAISSANCE DES MATÉRIAUX TRADITIONNELS ET LOCAUX

Pourquoi une vieille ferme de campagne est plus agréable l'été qu'un immeuble moderne en ville ? Les matériaux traditionnels et les pierres naturelles offrent aux bâtiments anciens de meilleures propriétés thermiques et hygrométriques. Malheureusement, ils manquent souvent d'une caractérisation technique leur permettant de trouver leur place dans l'industrie du bâtiment. C'est pour corriger cela que le projet européen de développement régional OEHM a été lancé. Il associe IMT Mines Alès, l'université de Montpellier et l'école nationale supérieure d'architecture de Montpellier. Aymeric Girard, chercheur en matériaux à IMT mines Alès, nous présente ce projet et ses enjeux.



Dans le cadre du projet OEHM, vous étudiez des matériaux de construction naturels. Pourquoi ?

Aymeric Girard : Tout matériau de construction demande une caractérisation technique. C'est important, car aujourd'hui un projet de bâtiment est toujours simulé par ordinateur dans un premier temps. Or les matériaux de construction traditionnels, qui ne sont pas produits par l'industrie, manquent de ces caractéristiques techniques. En étudiant les matériaux traditionnels locaux dans le cadre du projet, nous voulons combler cette lacune.

« L'un des constats majeurs sur nos bâtiments actuels est qu'ils sont trop isolés de l'intérieur. »

Si les industriels n'utilisent pas ces matériaux, sont-ils intéressés par cette connaissance ?

AG : Oui, car l'un des constats majeurs sur nos bâtiments actuels est qu'ils sont trop isolés de l'intérieur. La raison principale est due au manque de masse thermique des bâtis modernes ; c'est-à-dire d'une masse de matériaux qui joue le rôle de régulateur de chaleur. Dans un nouveau bâtiment réalisé en matériaux de construction classiques, vous avez chaud l'été, et froid l'hiver. Il faut donc de la climatisation et du chauffage. Or c'est un problème bien moins prononcé dans les bâtiments anciens construits avec des matériaux traditionnels. À Séville, qui est l'une des villes les plus chaudes

d'Europe en été, les églises et cathédrales anciennes gardent la fraîcheur. Les industriels cherchent aujourd'hui à s'inspirer de ces constructions pour les nouveaux bâtiments.

« Utiliser des pierres locales favorise les circuits courts, ce qui diminue l'impact environnemental. »

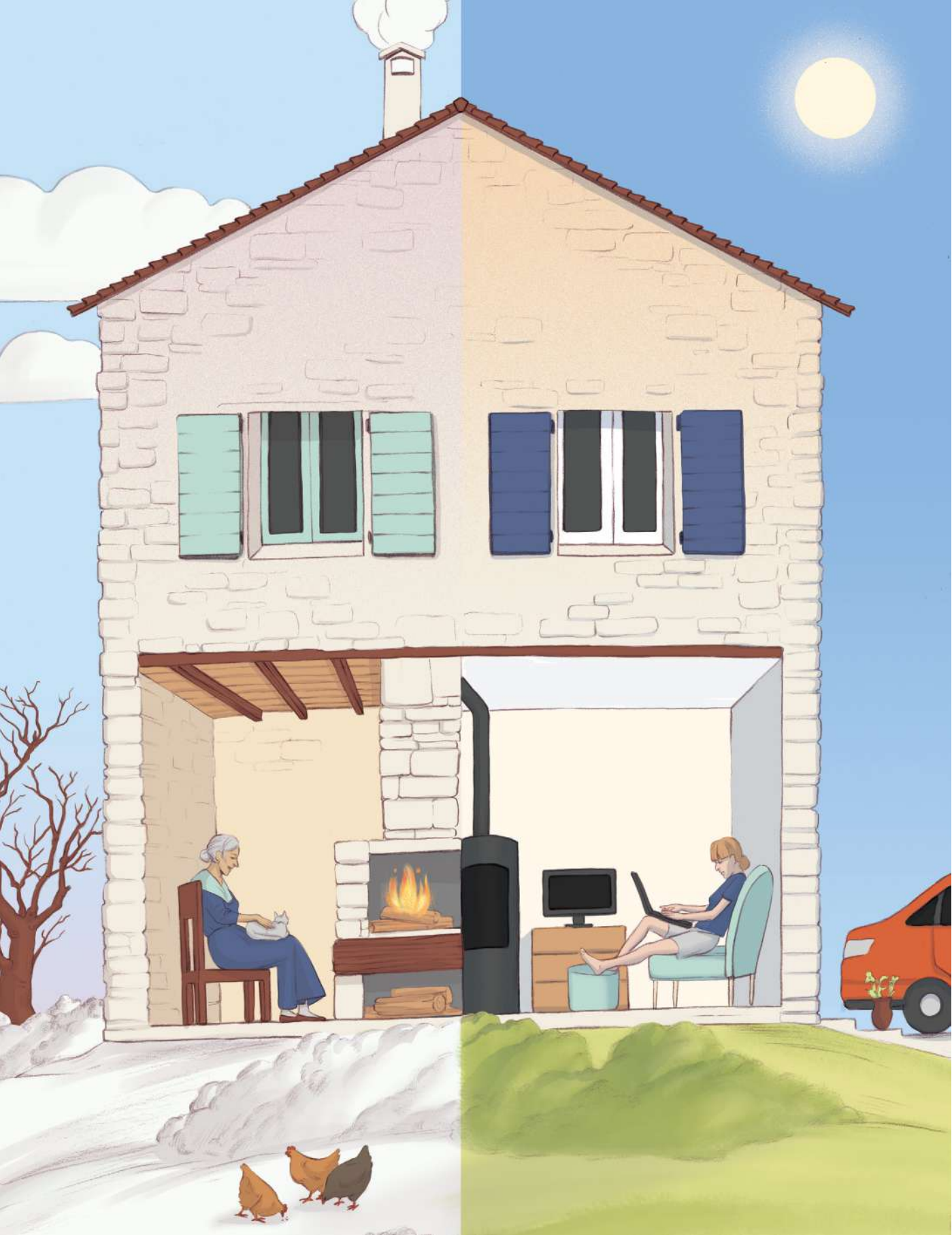
Il y a aussi un second intérêt. Le BTP est un secteur qui contribue beaucoup aux émissions de gaz à effet de serre. Cela est en partie dû à l'empreinte du transport de matériaux. Utiliser des pierres locales favorise les circuits courts, ce qui diminue l'impact environnemental.

De quels matériaux parlons-nous ?

AG : Dans le cadre du projet OEHM, nous travaillons avec une fabrique de briques en terre cuite, et quatre carrières de pierre naturelle : une de granit, et trois de pierre calcaire. Certaines de ces pierres sont vraiment locales, puisqu'elles viennent de la région Occitanie où se situe IMT Mines Alès. D'autres sont locales au sens où elles viennent tout de même de France.

Qu'étudiez-vous sur ces pierres et ces briques ?

AG : Nous avons deux analyses principales de ces pierres : une thermique, et une hygrométrique. L'hygrométrie permet d'étudier la capacité du matériau à absorber l'humidité. C'est important car en



hiver par exemple, la maison est généralement fermée, vous cuisinez, vous vous douchez, vous transpirez... Tout cela contribue à faire augmenter l'humidité des pièces, ce qui joue sur la qualité de vie. Or, certaines pierres très peu poreuses ne vont pas du tout absorber cette humidité. D'autres très poreuses peuvent mettre jusqu'à quatre mois avant d'être saturées en humidité, et jouent donc un effet tampon très agréable.

Comment obtenez-vous les caractéristiques techniques que vous recherchez ?

AG : Les carrières nous envoient des petits cubes de 5 cm de côté pour analyse. Pour étudier le transfert thermique, nous utilisons la méthode du fil chaud. Cela consiste à prendre deux cubes de la même pierre, et à mettre une sonde de la taille d'un post-it entre les deux. On chauffe d'un côté et nous regardons la rapidité de chauffe de la pierre de l'autre côté. Nous étudions aussi la capacité thermique des pierres, en mettant des échantillons encore plus petits de 5 mm de côté dans un mini-four. Cela nous permet de savoir combien de temps il faut à la pierre pour monter en température et comment elle se comporte.

Pour l'humidité, nous avons une sorte de frigo où nous appliquons une quantité constante d'humidité, puis nous comparons le poids de la pierre sèche et celui de la pierre saturée en haut, et nous en déduisons sa capacité d'absorption de l'humidité. C'est un processus très long qui peut prendre jusqu'à quatre mois.

Avec qui travaillez-vous sur ce projet ?

AG : Du côté industriel, nous travaillons uniquement avec les carriers pour l'instant. Les caractéristiques techniques que nous produisons les intéressent pour fournir des données sur les matériaux à leurs partenaires et clients. C'est une connaissance importante, comme lorsque vous achetez de la laine de verre pour des travaux chez vous, où vous voulez comparer les propositions pour savoir quoi acheter. Du côté recherche, le projet s'ancre dans une longue collaboration entre IMT Mines Alès, l'université de Montpellier, et l'école nationale supérieure d'architecture de Montpellier.

Au-delà des caractéristiques techniques, qu'est-ce que le projet produira ?

AG : Nous comptons développer notre propre logiciel de simulation de matériaux grâce aux données que nous allons récupérer. Et nous allons également faire des tests sur site réel en collaboration avec l'école nationale d'architecture de Montpellier. Ils disposent en effet d'une reproduction de maison sur laquelle il est possible de faire des adaptations pour tester des matériaux. Ce sera l'occasion de mettre nos résultats à l'épreuve, et de partager avec des architectes sur les possibilités offertes par des matériaux naturels adaptés au climat méditerranéen. ▲

Rédacteur-en-chef : Benjamin Vignard

Rédacteurs : Sarah Balfagon, Anne-Sophie Boutaud, Tiphaine Claveau,
Bastien Contreras, Anaïs Culot, Cécile Michaut,

Secrétaire de rédaction : Véronique Charlet

Conception et illustrations : Diane Rottner







I'MTech.

L'actualité scientifique
et technologique de l'IMT.

www.imtechnews.fr

Twitter : @IMTechfr

Linkedin : I'MTech

