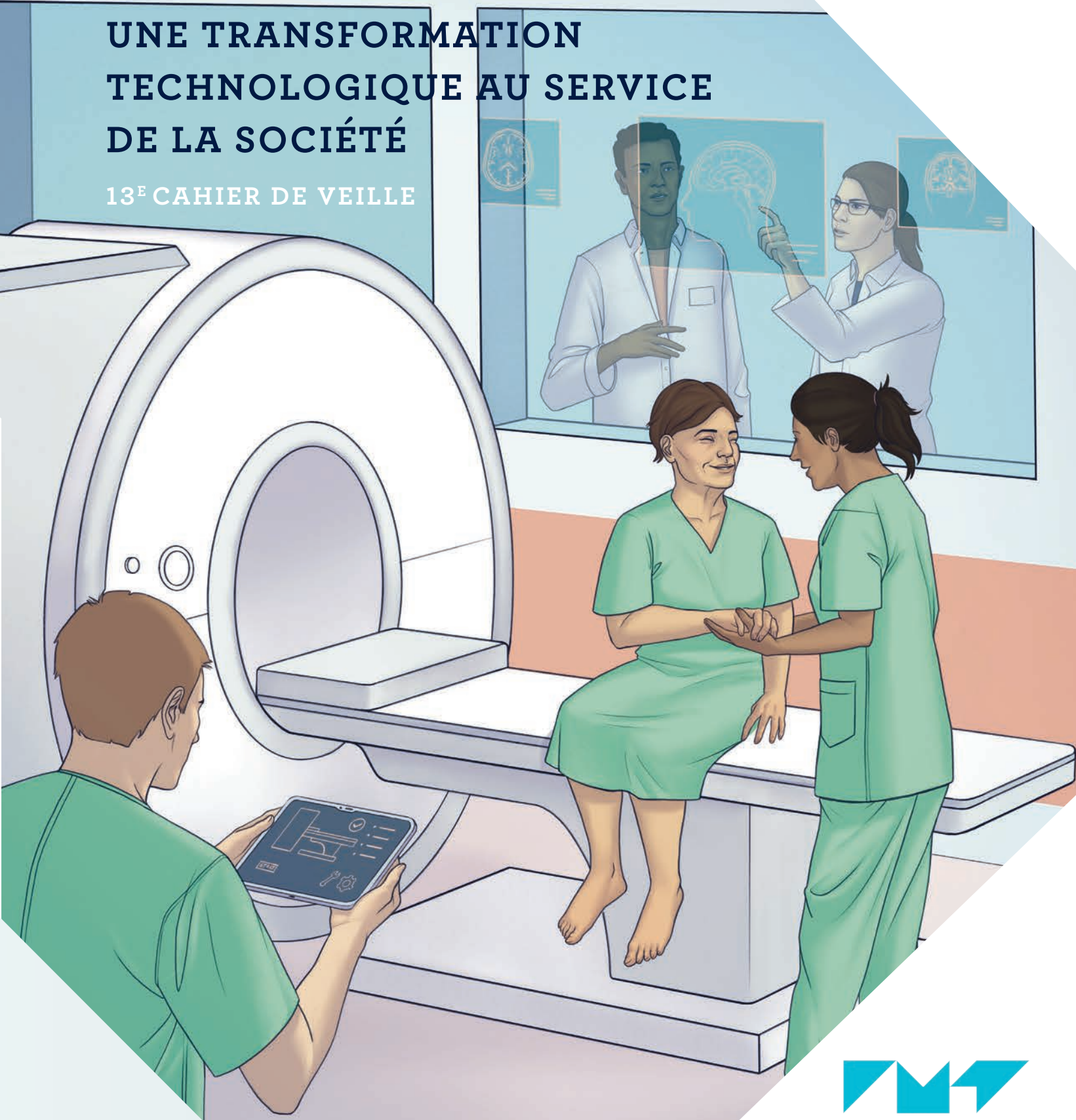


SANTÉ :

UNE TRANSFORMATION TECHNOLOGIQUE AU SERVICE DE LA SOCIÉTÉ

13^E CAHIER DE VEILLE





SANTÉ

UNE TRANSFORMATION
TECHNOLOGIQUE
AU SERVICE
DE LA SOCIÉTÉ

13^E CAHIER DE VEILLE



ÉDITO

**Odile Gauthier,
directrice générale de l'IMT.**



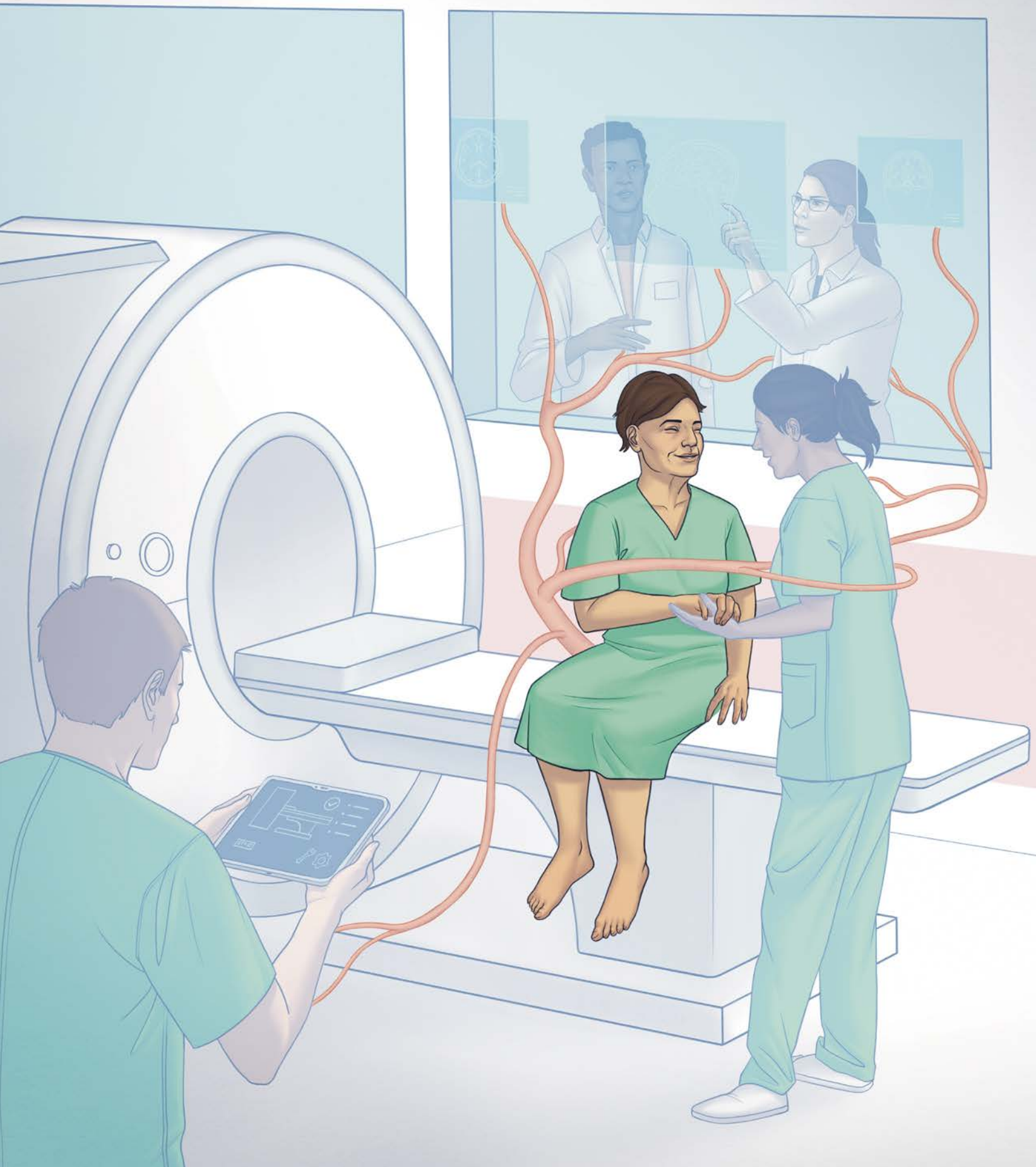
Fallait-il une crise sanitaire mondiale pour parler de la transformation du système de soins en France ? Comme tout secteur, celui de la santé est frappé depuis des années par une lame de fond technologique et organisationnelle. Les transformations numériques lui imposent des questionnements sociaux, professionnels, juridiques, éthiques auxquels il se doit de répondre, peut-être encore plus urgemment et avec plus de subtilité qu'ailleurs tant les conséquences touchent à ce qui nous avons de plus cher : notre vie. La crise de la covid-19 n'aura fait qu'accélérer des idées et catalyser des visions sur lesquelles la recherche travaille depuis de nombreuses années. Comment pousser plus loin l'individualisation de la prise en charge du patient, de la détection de ses pathologies jusqu'à l'administration de soins ou l'implantation de dispositifs médicaux adaptés à chacun ? Quels outils fournir aux professionnels pour réinventer leurs métiers à l'aune des percées technologiques majeures du XXI^e siècle, telles que l'intelligence artificielle, la fabrication additive, ou la réalité augmentée ? Comment repenser en profondeur le lien entre santé et qualité de vie ? Quelle gouvernance et quelles protections mettre en place sur les données liées à la santé des individus ?

Ces questions, les enseignants-chercheurs de l'Institut Mines-Télécom tentent d'y répondre année après année, au fil de l'émergence d'innovations et de leur acceptation, possible ou non, par la société. Dans le cadre de l'élaboration de ce treizième cahier de veille, nous avons croisé leurs regards avec ceux des partenaires industriels de la Fondation Mines-Télécom. Le résultat brosse un portrait de plusieurs enjeux posés au secteur de la santé, à la fois en tant que somme de problématiques propres à chaque acteur, et comme ensemble systémique. Plus qu'un état des lieux de la recherche technologique en santé, cet ouvrage formule au final une question ouverte qui doit mobiliser patients, hôpitaux, médecine de ville, industriels et régulateurs : à quoi ressemblera demain le secteur de la santé au bénéfice de tous ?



SOMMAIRE

ÉDITO	3
L'HUMAIN ET SA SANTÉ	7
PRENDRE EN MAIN SA PROPRE SANTÉ	9
MIEUX PRÉVENIR LES TROUBLES PHYSIOLOGIQUES GRÂCE À UNE DÉTECTION PRÉCOCE	12
OPTIMISER LE MATÉRIEL MÉDICAL POUR L'ADAPTER À CHAQUE PATIENT	16
DE LA CRYPTOGRAPHIE AU TATOUAGE : COMMENT PROTÉGER LES DONNÉES DE SANTÉ ?	20
RÉGLEMENTATION ET ÉTHIQUE DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE EN SANTÉ	24
UN ACTE MÉDICAL TRANSFORMÉ	29
JUMENT NUMÉRIQUE : VRAIE MÉDECINE SUR FAUX PATIENT	30
ANATOMIE D'UN MÉDECIN AUGMENTÉ OU L'ORIGINE DU « RÊVE » DANS RÉVOLUTION	35
IMPRIME-MOI UN TRAITEMENT PERSONNALISÉ	38
NOUVELLES PRATIQUES : UN MÉDECIN À PORTÉE DE CLIC ?	43
L'HÔPITAL, UNE INFRASTRUCTURE TECHNOLOGIQUE	49
LA LOGISTIQUE HOSPITALIÈRE EN QUÊTE DE PERFORMANCE	50
NUMÉRISATION DU BLOC OPÉRATOIRE : QUEL IMPACT SUR L'HUMAIN ?	56
UN ÉVENTAIL D'INNOVATIONS À L'HORIZON	60
VERS UN NOUVEAU SYSTÈME DE SANTÉ	65
PERSPECTIVES ET MUTATIONS DU SYSTÈME DE SANTÉ	66
DESSINE-MOI UN SYSTÈME DE SOINS PLUS DURABLE	70



I

L'HUMAIN ET SA SANTÉ

1

PRENDRE EN MAIN
SA PROPRE SANTÉ

2

MIEUX PRÉVENIR
LES TROUBLES
PHYSIOLOGIQUES
GRÂCE À UNE
DÉTECTION PRÉCOCE

3

OPTIMISER
LE MATÉRIEL
MÉDICAL POUR
L'ADAPTER
À CHAQUE PATIENT

4

DE LA
CRYPTOGRAPHIE
AU TATOUAGE :
COMMENT
PROTÉGER
LES DONNÉES
DE SANTÉ ?

5

RÉGLEMENTATION
ET ÉTHIQUE
DE L'INTELLIGENCE
ARTIFICIELLE
EN SANTÉ



PRENDRE EN MAIN SA PROPRE SANTÉ

Le suivi des personnes fragiles améliore leur bien-être et prévient les dégradations de leur état de santé. Des dispositifs numériques sont développés afin de proposer des solutions appropriées en cas de déclin. L'usage de ces technologies implique une participation active du patient.

Le suivi des personnes fragiles améliore leur bien-être et prévient les dégradations de leur état de santé. Des dispositifs numériques sont développés afin de proposer des solutions appropriées en cas de déclin. L'usage de ces technologies implique une participation active du patient.

« Le cloisonnement entre le milieu médical et celui du bien-être doit être réduit. »

La médecine préventive et le bien-être jouent un rôle fondamental dans le maintien d'un état de santé de qualité chez les personnes fragiles. La prise en charge des individus en amont de la dégradation de leur état évite des maladies graves qui impliquent des interventions d'urgence. Des dispositifs numériques développés dans cet objectif visent à suivre constamment l'état de santé et améliorer le bien-être quotidien, ce qui inclut parfois une communication régulière avec les praticiens. « *Le cloisonnement entre le milieu médical et celui du bien-être doit être réduit, car la prévention est un aspect crucial de la santé*

qui se situe à l'interface des deux », indique Gérard Chollet, chercheur émérite à Télécom SudParis.

e-VITA, coach virtuel pour des conseils en temps réel

C'est justement pour décroiser ces deux milieux que l'Institut Mines-Télécom participe au projet européen e-VITA. Il s'agit d'une plateforme qui développe différentes formes de coachs virtuels via des dispositifs variés. « *Les coachs utilisent notamment un système de reconnaissance du dialogue et de la compréhension du langage parlé »,* explique Jérôme Boudy, chercheur à Télécom SudParis. L'objectif est de dialoguer avec les utilisateurs et les utilisatrices pour leur donner des conseils pertinents sur leurs comportements. « *Les principaux services mis en place pour l'instant concernent l'activité physique et la nutrition, mais d'autres services seront implémentés par la suite »,* précise Christophe Lohr, chercheur à IMT Atlantique.

Les coachs sont dotés de capteurs qui récupèrent un maximum de données de différents types sur les personnes. Les données sont ensuite fusionnées, ce qui apporte une compréhension à la fois fine et globale de la situation « *Par exemple, au-delà des données*

associées au dialogue, des capteurs sur l'environnement ou la physiologie de la personne apportent des informations qui participent grandement à l'interprétation des données», explique Gérard Chollet. L'analyse croisée de ces différentes données permet de contextualiser le dialogue et, par exemple, d'inférer des états émotionnels pour l'interpréter et réagir en conséquence.

« Les données sur l'environnement social de l'utilisateur sont également intéressantes à intégrer dans la fusion de données », ajoute Jérôme Boudy. La participation active de la patientèle et de son entourage dans la production de données enrichit les modèles pour les rendre les plus pertinents possible. Le déploiement de ces systèmes dans le milieu de vie des personnes implique qu'ils doivent être optimisés pour qu'ils interagissent activement, sans être intrusifs, et continuer de capter de données.

Som'Health, mieux prévenir pour mieux dormir

Le sommeil est un déterminant de santé dont la mesure objective repose sur la captation de données. « Selon l'Institut national du sommeil et de la vigilance, durant le second confinement, 45% des français et des françaises ont déclaré souffrir d'au moins un trouble du sommeil », introduit Elisa Wrembel, doctorante à IMT Mines Alès et l'Université de Nîmes. Ces troubles peuvent s'aggraver s'ils ne sont pas pris en charge à temps et nuire grandement à la qualité de vie en plus d'être facteurs de risque de différentes maladies mentales ou physiques. L'environnement et les comportements découlant de certains modes de vie ont une grande influence sur les troubles du sommeil.

Les premières phases d'amélioration de la qualité du sommeil passent par une compréhension des différents comportements sur lesquels les personnes peuvent agir. La prévention primaire des troubles du sommeil consiste à intervenir en amont des troubles ou

rapidement après l'apparition des premiers troubles. « Il s'agit de repenser l'accompagnement des troubles du sommeil précoces en prenant en compte le développement des technologies en santé numérique et en particulier la santé mobile », pointe la doctorante.

« 45% des français ont déclaré souffrir d'au moins un trouble du sommeil. »

Le projet Som'Health est développé par une équipe pluridisciplinaire depuis 2016. L'axe prévention, conduit par la doctorante, vise à informer, sensibiliser et prévenir les personnes sur leurs troubles du sommeil. Celui-ci est développé en partie grâce à une solution numérique via une application de sensibilisation des troubles du sommeil. Une des fonctionnalités de l'application consiste à mettre en place une version numérique améliorée de l'agenda de sommeil numérisé, où les individus indiquent leur rythme de sommeil et l'associent avec le ressenti de leur qualité de vie au quotidien. Elle intègre aussi les comportements sur lesquels il est possible d'intervenir, comme la consommation de nourriture, d'alcool, de café ou le temps passé sur les écrans. « L'application donne des outils aux personnes pour qu'elles puissent réfléchir par elles-mêmes sur leurs comportements, mais ne cherche en aucun cas à imposer des méthodes définies et sa visée est préventive », souligne Elisa Wrembel. « Le projet de thèse consiste notamment à penser aux apports et aux limites de l'utilisation d'applications mobiles en prévention, et c'est pourquoi l'outil est pensé au sein d'un dispositif mêlant des solutions numériques et humaines », conclut la doctorante.

L'application Generation Care, pour un suivi plus poussé

Mais comment renforcer le lien entre les solu-

tions numériques destinées aux patients et la prise en charge ? « *L'application Generation Care, initiée en 2014, est une solution de télésurveillance de la santé des personnes âgées* », introduit Catherine Tonlorenzi, ex-directrice des programmes e-santé à BNP Paribas Cardiff. Generation Care vise à prévenir les problématiques de santé globales associées à la vieillesse. L'application met en lien les utilisateurs avec les médecins et les infirmiers, via un dossier médical partagé contenant les informations de l'utilisateur. Elles concernent notamment les variables physiologiques telles que la tension, la nutrition, le système cognitif

« Le patient est régulièrement encouragé à donner des informations sur son humeur, son sommeil ou sa nutrition. »

ou le système moteur.

Ce dossier facilite et accélère les consultations chez le médecin, car celui-ci n'a généralement pas le temps de vérifier l'ensemble des aspects en une seule consultation. Le patient est aussi impliqué dans son propre suivi médical. Celui-ci est régulièrement encouragé à donner des informations sur sa situation, par exemple sur son humeur, son sommeil ou sa nutrition. Ces informations sont converties en scores qui permettent à l'algorithme de calculer des variations éventuelles. « *Les résultats obtenus par les algorithmes sont toujours associés à une vérification humaine* », précise Catherine Tonlorenzi. La prise de données par l'application peut aussi être contextualisée pour qu'elles soient mieux interprétées. « *L'entourage peut participer à cette contextualisation en fournissant des aspects sur les événements de vie, l'état psychologique et*

le comportement de la personne », précise Catherine Tonlorenzi.

Les variations des états physiologiques sont les indicateurs les plus importants à prendre en compte pour suivre une personne âgée. Des variations lentes peuvent traduire une dégradation continue de la personne qui peuvent échapper aux médecins lors des consultations. « *L'utilisation de l'intelligence artificielle se révèle utile dans le sens où elle permet aussi d'objectiver des ressentis* », explique Catherine Tonlorenzi. Lors de variations plus abruptes, l'application envoie automatiquement des messages d'alertes afin de prendre en charge le problème le plus rapidement possible. « *Ces alertes sont destinées aux professionnels de santé, mais également à l'entourage, car ils constituent un relais efficace pour vérifier la situation dans laquelle se trouve la personne âgée* », précise-t-elle.

Durant cette dernière décennie, de nombreux changements ont eu lieu au niveau de l'hébergement des données de santé, des objets connectés ou des protocoles de communication. « *La pandémie de Covid-19 a profondément impacté le monde technologique et le rapport que nous avons avec celui-ci* » indique Catherine Tonlorenzi. « *Aujourd'hui, le patient comprend qu'il est producteur de données et accepte de plus en plus de les partager lorsque celles-ci s'inscrivent dans des objectifs de prévention* », conclut-elle. ▲

MIEUX PRÉVENIR LES TROUBLES PHYSIOLOGIQUES GRÂCE À UNE DÉTECTION PRÉCOCE

La détection précoce de troubles physiologiques permet de mieux anticiper leurs dégénérescences possibles, ce qui conduit à de meilleurs traitements en mettant en place au plus tôt des prises en charge adaptées. L'analyse de données sur les modifications comportementales associées à des troubles ou des maladies apporte de nouvelles possibilités dans cette perspective.

Les troubles mentaux comme la schizophrénie peuvent notamment être détectés grâce à l'analyse de données associées au langage. « *Nous étudions les caractéristiques du langage des patients atteints de schizophrénie, et de personnes qui présentent des risques de développer cette maladie* », explique Philippe Lenca, chercheur à IMT Atlantique. L'équipe analyse des entretiens enregistrés de personnes avec leurs médecins. « *Chez les personnes atteintes de schizophrénie, les pauses et les interjections sont placées à des endroits stratégiques des phrases qui peuvent en impacter la compréhension, comme par exemple entre un nom et un adjectif* », précise Yannis Haralambous, également chercheur à IMT Atlantique. Des phénomènes de ce type dans le flux du langage sont révélateurs d'un risque de schizophrénie, ce qui permet

de poser un diagnostic le plus tôt possible et d'éviter le déclenchement de la maladie, appelée transition psychotique.

« Les troubles mentaux peuvent être détectés grâce à l'analyse du langage. »

L'analyse du langage pour la détection de troubles est également appliquée aux personnes « suicidantes », c'est à dire qui ont déjà fait au moins une tentative de suicide. « *Dans l'étude des suicides, nous ne manquons malheureusement pas de données* », indique

L'HUMAIN ET SA SANTÉ
**MIEUX PRÉVENIR LES TROUBLES PHYSIOLOGIQUES
GRÂCE À UNE DÉTECTION PRÉCOCE**

Philippe Lenca. En France, il y a environ 10 000 suicides et 200 000 gestes suicidaires par an. Le taux de récurrence est particulièrement important l'année qui suit la première tentative et un suivi est nécessaire. Les entretiens menés avec du personnel médical peuvent mener à la collecte de données de différentes natures.

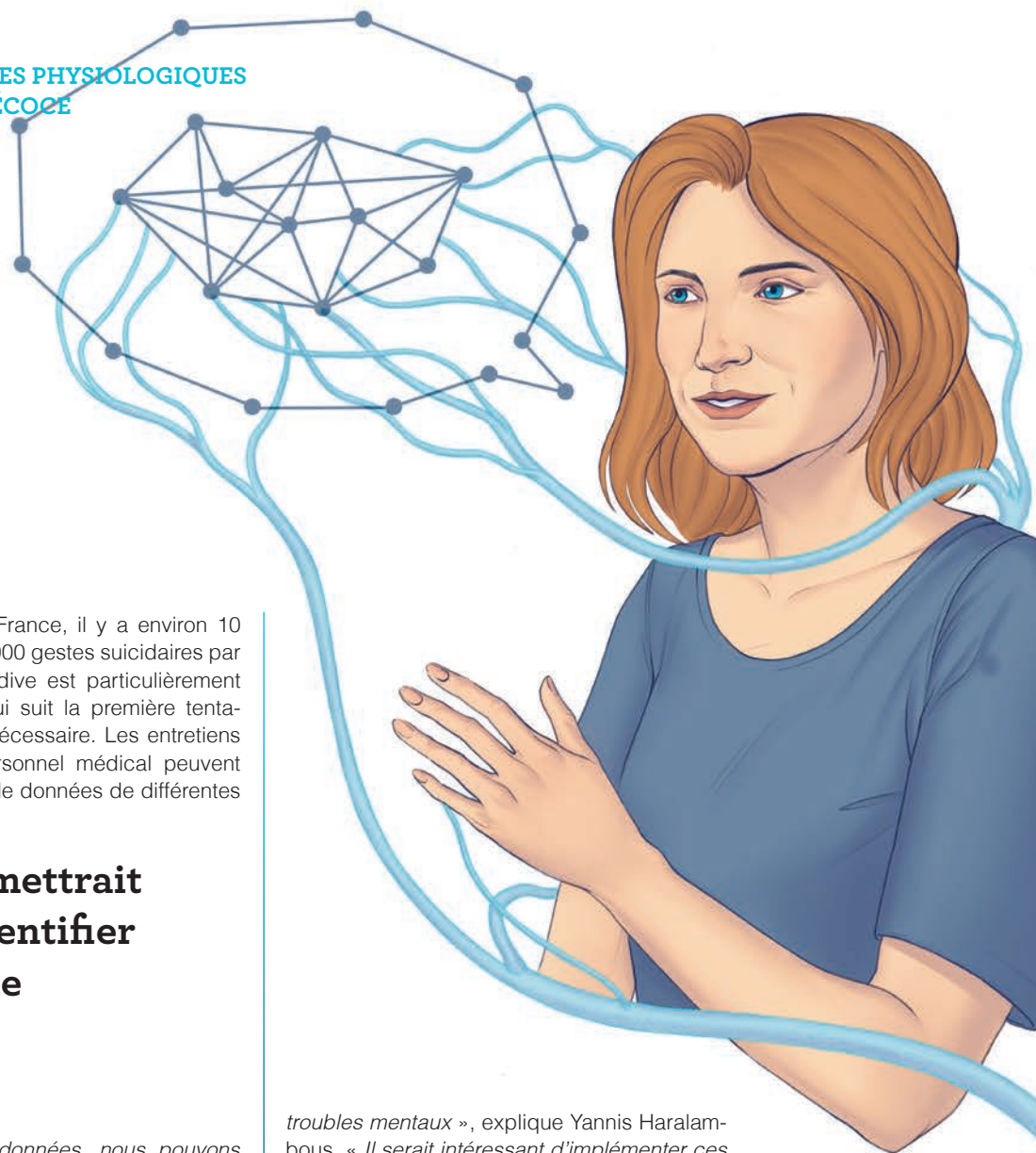
**« La détection permettrait
aux praticiens d'identifier
un risque de suicide
en temps réel. »**

« À partir de ces données, nous pouvons développer une approche globale pour analyser les données sociodémographiques et cliniques des suicidants ainsi que celles associées à leur langage et leurs émotions », explique Philippe Lenca. Les données servent à estimer des facteurs de risque, notamment des maladies mentales comme la dépression. Ces analyses visent à fournir des outils d'aide à la décision aux hôpitaux quant à l'évolution et le rétablissement des personnes « suicidantes », afin de prévenir les récurrences.

« L'analyse du langage apporte des informations complémentaires aux médecins et aux psychiatres dans la détection précoce de

troubles mentaux », explique Yannis Haralambous. « Il serait intéressant d'implémenter ces analyses aux entretiens des professionnels de santé avec leurs patients », suggère le chercheur. Des outils de détection permettraient ainsi aux praticiens d'identifier en temps réel un risque imminent de tentative de suicide, et d'orienter la discussion pour apporter un soutien spécifique à la personne.

Enfin, un problème de nature différente est omniprésent lors du traitement des données textuelles dans un contexte médical : ces données peuvent contenir des informations sur l'identité, l'environnement et le contexte familial du patient, et la nouvelle réglementation générale sur la protection des données (RGPD)



impose des restrictions draconiennes pour éviter leur dissémination. Ainsi, une importante étape préalable consiste à pseudonymiser les transcriptions, un axe de recherche poursuivi par Philippe Lenca et Yannis Haralambous au sein d'IMT Atlantique.

« Plus la détection est précoce, plus il est possible d'éviter les situations dangereuses. »

Détection précoce des troubles du mouvement

Les troubles psychologiques ne sont pas les seules pathologies à pouvoir être détectées précocement par la collecte de données. C'est aussi le cas des troubles du mouvement chez les personnes âgées ou fragiles, qui dégénèrent et aboutissent à des conséquences graves, comme les chutes suivies de blessures. « *En général, la dégradation des mouvements se fait de manière continue durant une période de temps assez longue* », explique Jacky Montmain, chercheur à IMT Mines Alès. Par conséquent, plus la détection de ces troubles est précoce, plus il est possible de diagnostiquer et d'éviter les situations dangereuses par des thérapies adaptées.

Pour mesurer les mouvements en temps réel, des capteurs inertiels sont placés à différents endroits du corps humain et mesurent leur position dans l'espace. Ils révèlent ainsi l'état du système sensorimoteur afin d'extraire des signatures typiques des mouvements. « *Les variables physiologiques sont liées par un ensemble de relations qui définissent le comportement fonctionnel normal du patient* », développe le chercheur. Les premières déficiences qui apparaissent chez les personnes âgées ou fragiles correspondent en général à

une perte de la complexité de leurs mouvements. Les individus fragiles ont des mouvements plus mécaniques, ce qui indique une perte de leur capacité à s'adapter à l'environnement. « *La complexité est une réserve de bonne santé* », commente le chercheur.

Avec les données fournies par les capteurs, il est donc possible d'établir une référence du comportement d'une personne saine. À partir du moment où les paramètres s'écartent significativement de cette référence, cela peut indiquer que l'individu est en train de développer un trouble du mouvement. « *Dans ces analyses, le symptôme est donc défini par l'écart entre le comportement de référence fourni par le modèle et celui qui est observé en temps réel* », précise Gérard Dray, également chercheur à IMT Mines Alès.

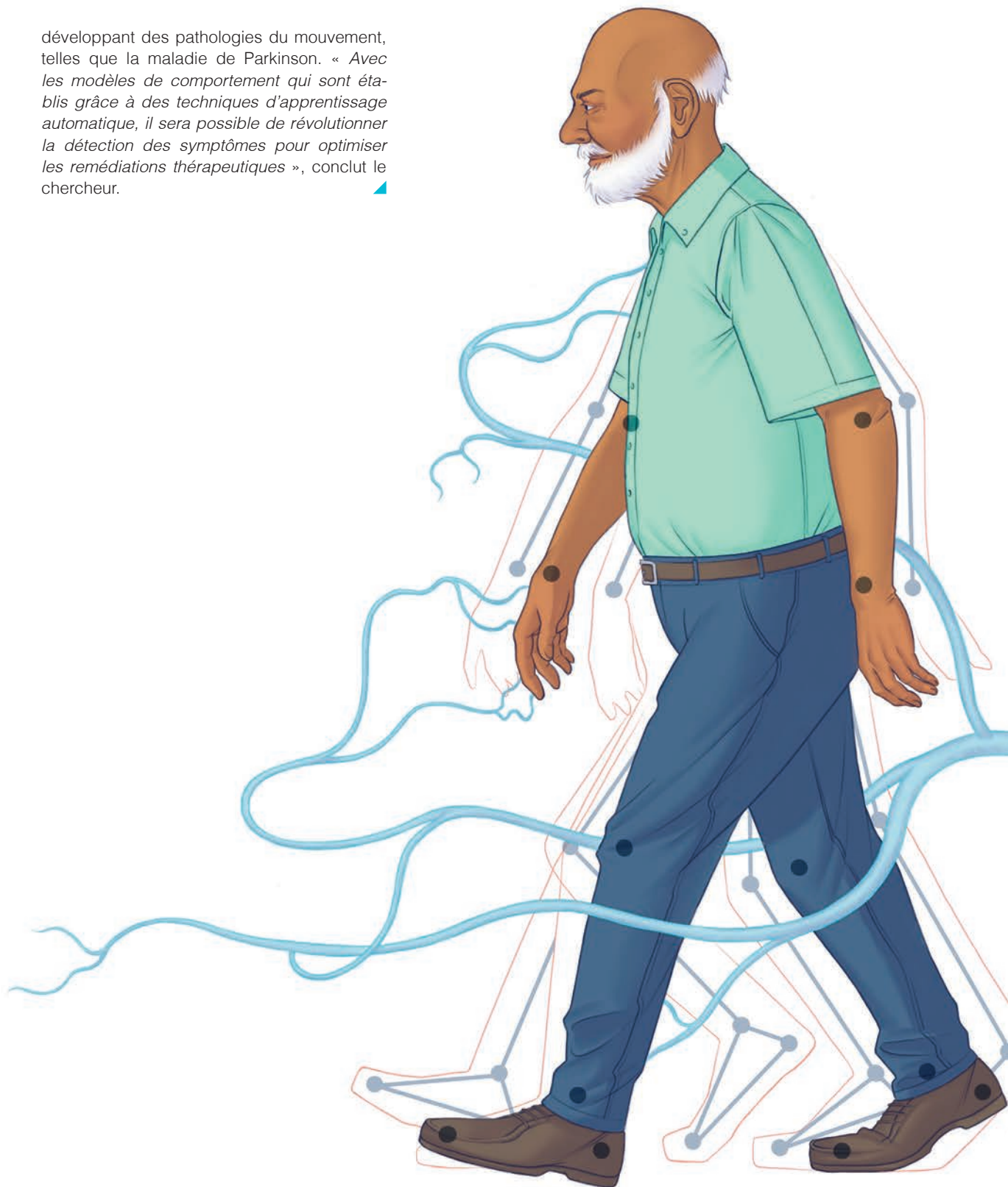
« Prendre en charge très tôt des patients développant des pathologies telles que la maladie de Parkinson. »

En croisant la détection de différentes anomalies concomitantes, il est aussi possible d'accéder à la cause de ces dernières et de poser un diagnostic, qui doit être confirmé médicalement par la suite. Avec une approche de ce type, des anomalies peuvent être détectées très tôt, et corrigées avant que celles-ci ne puissent s'aggraver et entraîner des conséquences dangereuses. « *C'est important pour concevoir des remédiations plus souples et moins violentes que lorsque le déclin est plus avancé* », explique Gérard Dray.

En couplant cette approche avec un diagnostic clinique, il serait ainsi envisageable de prendre en charge très tôt des patients

L'HUMAIN ET SA SANTÉ
**MIEUX PRÉVENIR LES TROUBLES PHYSIOLOGIQUES
GRÂCE À UNE DÉTECTION PRÉCOCE**

développant des pathologies du mouvement, telles que la maladie de Parkinson. « Avec les modèles de comportement qui sont établis grâce à des techniques d'apprentissage automatique, il sera possible de révolutionner la détection des symptômes pour optimiser les remédiations thérapeutiques », conclut le chercheur. ▲



OPTIMISER LE MATÉRIEL MÉDICAL POUR L'ADAPTER À CHAQUE PATIENT

Le matériel médical à usage personnel, comme les prothèses, rétablit des fonctions physiologiques ou anatomiques. L'arrivée de nouvelles technologies de simulation dans les laboratoires permet d'envisager une forte personnalisation de ces dispositifs médicaux.

Les essais cliniques des prothèses et des implants orthopédiques sont particulièrement complexes. Une des raisons principales correspond à la variabilité élevée des réactions aux implants dans le temps entre les personnes. « Pour un même modèle d'implant, une personne peut se retrouver dans l'incapacité de se déplacer tandis qu'une autre pourra faire du sport quotidiennement », pointe Jean Geringer, chercheur en biomécanique à Mines Saint-Étienne. Les expérimentations en laboratoire en amont des essais apportent des informations sur les causes physiques et chimiques de la fonctionnalité ou de la dysfonctionnalité des dispositifs.

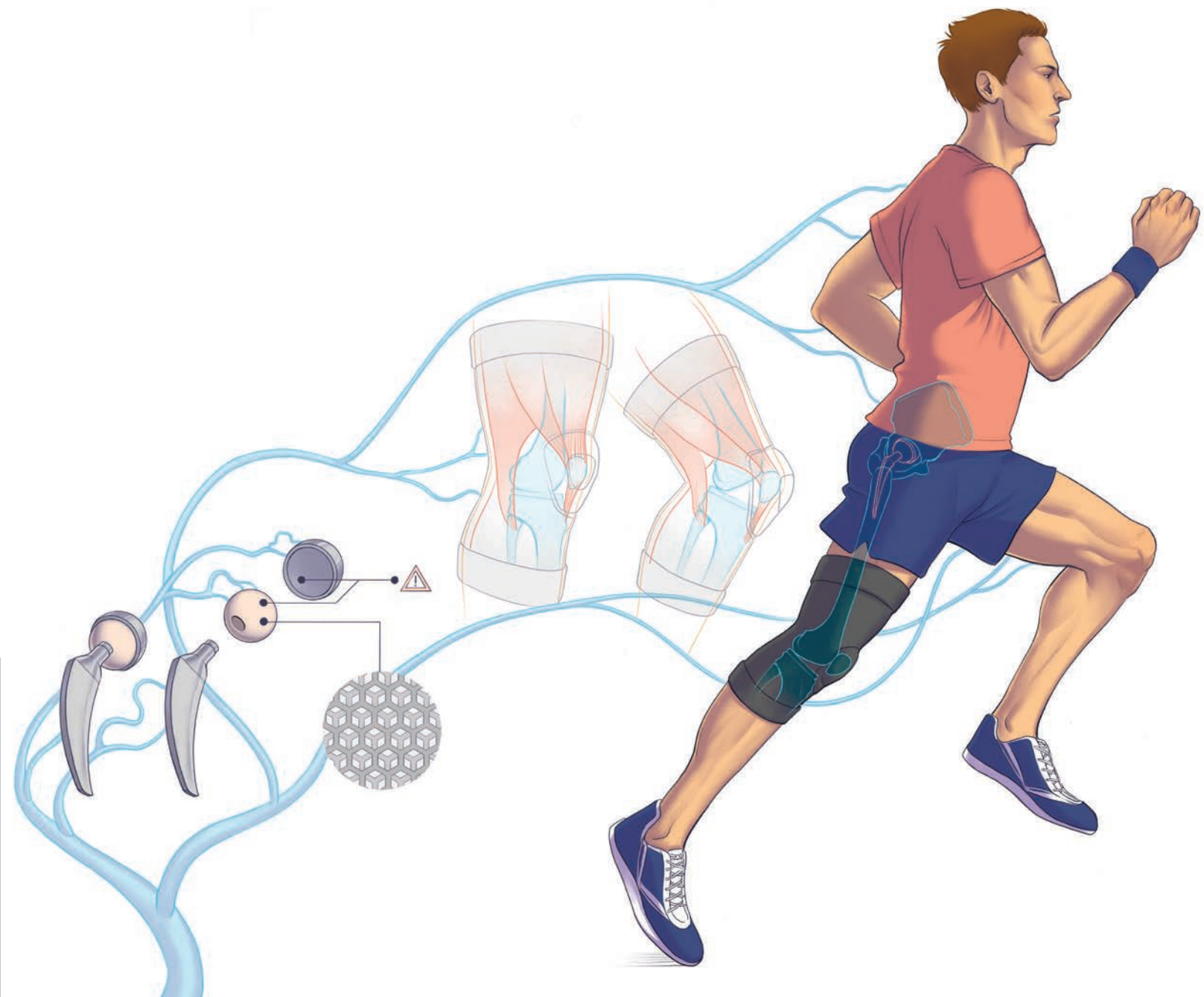
« Les réactions aux implants entre les personnes sont extrêmement variables. »

« Nous travaillons notamment sur les matériaux utilisés dans les implants orthopédiques comme la prothèse totale de la hanche, du genou, de l'épaule ou du coude », explique Jean Geringer. « L'usure de ces matériaux peut les rendre inefficaces, voire délétères, ce qui implique parfois des interventions lourdes », développe le chercheur. L'équipe étudie notamment le phénomène de frottements qui ont lieu à l'interface de contact entre deux matériaux en milieu corrosif. De nombreux implants orthopédiques sont des assemblages de différents composés, ce qui entraîne la possibilité de ce type de phénomène. Par exemple, une prothèse totale de hanche comporte une tige en métal fémorale ainsi qu'une partie rotatoire composée de polymères plastiques. Les phénomènes de frottement ont lieu entre ces deux parties.

Le laboratoire teste les matériaux orthopédiques dans différentes conditions de frottement. « Nous avons notamment mis en évi-

dence qu'en milieu liquide, sous l'influence du frottement, les métaux s'usent trois fois plus vite que les polymères », illustre le chercheur. Dernièrement, l'équipe a aussi montré que les mousses de titane, habituellement utilisées dans l'ingénierie aéronautique, ont de bonnes propriétés mécaniques de par leur légèreté et leur résistance aux frottements.

« En milieu liquide, sous l'influence du frottement, les métaux s'usent trois fois plus vite que les polymères. »



Les mesures en laboratoire donnent donc des informations sur la qualité et la résistance des matériaux dans le temps. Cependant, il n'est pas possible d'affirmer qu'elles correspondent aux phénomènes qui ont lieu chez l'humain, chez qui ce type d'observation est impossible directement. « *Nous pouvons néanmoins corréler nos résultats aux observations cliniques, auxquelles nous participons également, par exemple sur la durée de vie moyenne des implants, ou à l'observation de débris issus des frottements* », explique le chercheur.

Les prochains axes de recherche du laboratoire concernent l'étude de différents effets biomécaniques issus des mouvements, comme la température ou l'humidité. De plus, les processus biologiques chez les patients changent avec l'âge, et l'équipe de recherche souhaite étudier l'impact de ces changements sur les matériaux des prothèses. « *La personnalisation des dispositifs permettra, notamment grâce à l'impression 3D, d'adapter les implants à chaque patient* », souligne le chercheur. Mieux comprendre les mécanismes de vieillissement des matériaux dans le corps humain représente donc un enjeu de taille pour améliorer les soins.

De la prothèse aux textiles

Au-delà des implants à l'intérieur du corps, la problématique de la performance des dispositifs médicaux personnalisés s'applique aussi aux textiles. « *Les textiles médicaux corrigent des mouvements délétères du corps qui entraînent des complications graves* », explique Jérôme Molimard, chercheur en biomécanique à Mines Saint-Étienne. Les textiles médicaux sont particulièrement utilisés dans les systèmes compressifs, comme les bas de contention ou les bandes de compression. Leur conception nécessite une compréhension générale de la mécanique des tissus. « *Un enjeu important est de concevoir des systèmes qui intègrent la dynamique des mouvements et s'y adaptent* », explique le chercheur.

« Un enjeu est de concevoir des systèmes qui intègrent la dynamique des mouvements. »

« *Par exemple, certains systèmes appliquent des pressions localisées durant une certaine phase d'un mouvement afin de le corriger* », ajoute-t-il.

Les études cliniques sur les tissus permettent de conclure sur le fait qu'un tissu améliore un mouvement ou non, mais les causes de sa fonctionnalité ne sont pas déterminées. Les expériences en laboratoire et la modélisation numérique visent à identifier ces causes, en testant les propriétés physiques des matériaux. « *Les approches numériques se concentrent sur l'extraction des paramètres qui influencent le fonctionnement des tissus, dont les variations indiquent des tendances durant les efforts* », développe Woo-Suck Han, chercheur en mécanique et modélisation numérique à Mines Saint-Étienne.

Les expériences physiques menées sur les tissus vérifient ensuite ces propriétés avant de proposer de nouvelles solutions à adopter pour le secteur clinique. De plus, elles fournissent des données au modèle numérique afin de l'enrichir. « *Les expériences permettent d'obtenir des informations sur ce qui est observable de manière externe, c'est-à-dire sur l'influence du dispositif sur les mouvements, le déplacement ou l'accélération* », développe Jérôme Molimard. « *La simulation numérique utilise les données de ces expériences, les connaissances médicales, ainsi que différentes données comme celles obtenues par les techniques d'imagerie afin de modéliser ce*

*qui se passe à l'intérieur du corps humain »,
complète Woo-Suck Han.*

**« La collaboration
entre hôpitaux et
laboratoires de recherche
est un impératif. »**

Les équipes de Mines Saint-Étienne sont en étroite collaboration avec le centre hospitalier universitaire de Saint-Étienne qui mène les essais cliniques. Ce rapprochement permet des échanges entre les résultats en laboratoire et les pratiques cliniques pour améliorer le matériel médical, son implantation ou son utilisation chez le patient, et son suivi. La collaboration entre hôpitaux et laboratoires de recherche est un impératif pour développer une prise en charge adaptée à chaque individu. Si la personnalisation des soins est au cœur des aspirations de la médecine moderne depuis quelques années déjà, son essor doit s'appuyer sur des techniques de modélisation et de simulation pour la conception qui n'en sont aujourd'hui qu'à leurs balbutiements. ▲

DE LA CRYPTOGRAPHIE AU TATOUAGE : COMMENT PROTÉGER LES DONNÉES DE SANTÉ ?

Les données de santé sont des données à caractère personnel particulières car considérées comme sensibles. Leur accumulation par la numérisation progressive des systèmes de santé nécessite d'implémenter des stratégies de protection efficaces contre les cyberattaques. Pour cela, il est indispensable de sécuriser les systèmes d'information ainsi que les données elles-mêmes.

La prise en charge par le système de santé génère une grande quantité de données médicales qui sont amenées à circuler entre différents systèmes d'information (SI). Les SI correspondent notamment aux infrastructures comme les hôpitaux, les objets connectés et les bases de données médicales. « *Le système de santé fait partie des infrastructures critiques, telles que définies par les réglemen-*

tations européennes. Les besoins de sécurité sont larges et variés, et doivent couvrir la production des données jusqu'à leur réutilisation », explique Hervé Debar, chercheur en cybersécurité et directeur de la recherche de Télécom SudParis.

La cybersécurité d'un réseau de SI consiste à s'assurer qu'ils puissent fonctionner correctement et communiquer entre eux dans la chaîne de traitement des données sans que celles-ci en sortent. Généralement, les attaques visent soit à empêcher le fonctionnement d'un système, rendre des données inaccessibles, puis exiger une rançon (attaques de type *ransomware*). Elles peuvent également avoir pour objectif de voler des données afin de les

« Le système de santé fait partie des infrastructures critiques. »

revendre à une partie tierce. « *La cybersécurité n'est pas exclusive à un type d'attaque* », précise Hervé Debar. Renforcer la sécurité des infrastructures de manière globale permet de lutter contre l'ensemble des menaces. Pour lutter contre des attaques de manière plus spécifique, les équipes de recherche et d'ingénierie posent des hypothèses sur les stratégies potentielles des attaquants.

« Il est urgent de mettre en place des certifications adéquates, au regard de l'obsolescence. »

Sécurité des systèmes d'information

« *Il est urgent de mettre en place des certifications adéquates, au regard de l'obsolescence des logiciels et de certains objets médicaux* », poursuit Hervé Debar. Ces objets et les systèmes d'information associés peuvent avoir une durée de vie importante, car les fabricants privilégient leur robustesse et leur stabilité dans le temps. Ils sont dotés par conséquent de technologies numériques et de systèmes d'exploitation anciens et plus vulnérables. Des actualisations importantes sont encore à effectuer pour expliquer et imposer le niveau de sécurité nécessaire pour qu'un objet de santé soit plus résistant.

Des progrès ont tout de même lieu dans ce domaine. Depuis 2018, les fabricants d'objets médicaux en Europe et aux États-Unis se doivent d'informer leur clientèle sur les vulnérabilités de leurs objets via des sites qui les répertorient. « *Les fabricants sont obligés de proposer des solutions, comme d'indiquer comment utiliser les objets pour qu'ils ne soient pas vulnérables, de changer ou de mettre à jour leur système d'exploitation, ou de les remplacer s'ils sont devenus définitivement obsolètes en matière de cybersécurité* », pointe le chercheur.

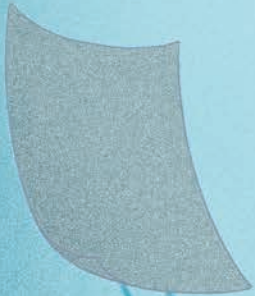
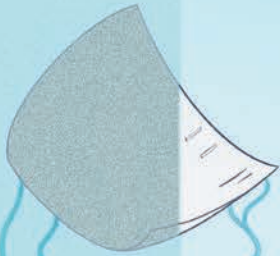
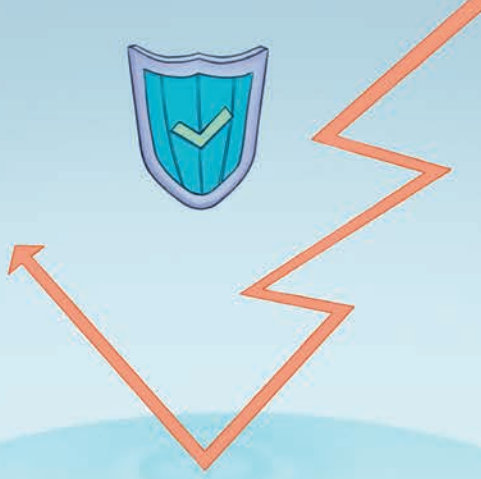
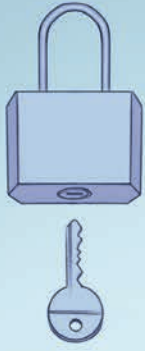
Le chiffrement des données par la cryptographie et la gestion du consentement

Mais que faire si les défenses des hôpitaux cèdent, et si les données parviennent malgré tout à être dérobées ? En plus de la sécurité des infrastructures, la cryptographie permet de rendre les données illisibles et inutilisables en l'absence d'une clef de déchiffrement. « *Voler des données chiffrées n'apporte rien à l'attaquant s'il n'est pas capable de les déchiffrer* », explique Maryline Laurent, chercheuse en cybersécurité et protection de la vie privée à Télécom SudParis.

Comme l'oblige le RGPD, les données de santé doivent faire l'objet d'une protection renforcée du fait de leur caractère sensible. Qu'elles fassent partie du dossier médical partagé (DMP), l'équivalent numérique du carnet de santé du patient, ou qu'elles soient mises à disposition des chercheurs de façon anonymisée via les *Health Data Hub* pour favoriser les progrès médicaux, elles sont conservées de manière chiffrée par des entreprises ayant obtenu une certification en tant qu'hébergeurs de données de santé (HDS). « *Il est impératif que l'accès aux données de santé soit strictement contrôlé. Ce sont les hébergeurs qui sont les gardiens de la sécurité de ces données car ils contrôlent le chiffrement opéré et l'accès* », précise la chercheuse.

Pour renforcer la sécurité des données de santé vis-à-vis de possibles défaillances du système d'information de l'hébergeur, une piste de recherche suivie à Télécom SudParis repose sur le fait que les données ne puissent être déchiffrées que par le personnel habilité et depuis son poste de travail.

Ainsi une fuite de ces données chiffrées ne permettra pas directement d'accéder à leur contenu en clair ; encore faudra-t-il réussir à les déchiffrer. « *C'est une piste de recherche que nous trouvons particulièrement pertinente dans le contexte du DMP* », indique Maryline Laurent.



DE LA CRYPTOGRAPHIE AU TATOUAGE : COMMENT PROTÉGER LES DONNÉES DE SANTÉ ?

Le patient doit avoir le contrôle sur son DMP et doit pouvoir désigner les professionnels de santé avec lesquels il partage ses données pour être mieux pris en charge médicalement, ce qui peut être fait depuis tout récemment par le service numérique Mon espace santé. Le DMP comprend entre autres les comptes rendus d'hospitalisation, l'historique des soins des deux dernières années répertoriés par l'assurance maladie, les antécédents médicaux ainsi que différents résultats d'examen « Avec une numérisation de plus en plus importante du secteur médical, il est important de concevoir une approche systémique à l'échelle nationale répondant à l'ensemble des obligations réglementaires », explique Maryline Laurent. Cela concerne la gestion du consentement des patients vis-à-vis de l'accès à leur DMP, la traçabilité des accès aux DMP et des traitements opérés par les professionnels de santé. « À cet égard, la technologie blockchain avec le concept d'identités auto-souveraines apparaît particulièrement prometteuse », ajoute la chercheuse. Il est question d'explorer cette piste de recherche au sein de la chaire innovation « Bloc opératoire augmenté » (BOPA) cofondée par l'assistance publique - Hôpitaux de Paris (AP-HP) et l'Institut Mines Télécom.

Traçage des données par la technique de tatouage et responsabilité

Les données circulent entre différents SI et il est important d'identifier rapidement l'origine de leur fuite à une étape de la chaîne de traitement, le cas échéant. Cela permet de corriger la faille ainsi que d'identifier le responsable de la fuite. Le tatouage des données est une technique qui est en cours d'implémentation dans le traçage des données de santé.

Le principe du tatouage consiste à insérer une information dans les données à chacun de leurs transferts d'un SI à un autre afin de les tracer facilement. À chaque fois que des données circulent ou sont sollicitées par un SI, elles sont modifiées très légèrement. « Cette empreinte est « invisible » et n'affecte pas

la qualité des données », précise Gouenou Coatrieux, chercheur en sécurité des données médicales à IMT Atlantique. Il est alors possible d'identifier quelles sont les dernières empreintes apposées sur les données, et ainsi de retracer le parcours de la donnée, comme une radiographie par exemple.

« Le tatouage permet de vérifier l'intégrité d'une donnée, d'implémenter des droits d'accès ou d'en contrôler l'usage. »

Si des attaquants cherchent à se débarrasser d'une donnée tatouée, ils doivent introduire une quantité importante de distorsion dans le jeu de données pour faire disparaître le tatouage, ce qui la rend inexploitable. « Le tatouage permet donc aussi de vérifier l'intégrité d'une donnée, et d'implémenter des droits d'accès ou d'en contrôler l'usage », précise Gouenou Coatrieux. Cette technique vise à la fois à encourager les utilisateurs des SI à optimiser leurs systèmes de protection et dissuade les attaquants de voler des données.

« Il est fondamental de responsabiliser les entités qui utilisent des données afin de les empêcher de les utiliser d'une mauvaise manière. Il faut pousser les acteurs à investir dans des systèmes de protection adéquats », conclut le chercheur. Un travail crucial de pédagogie auprès des acteurs, à l'heure où les données personnelles prennent une valeur de plus en plus importante. ▲

RÉGLEMENTATION ET ÉTHIQUE DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE EN SANTÉ

Les données de santé sont encadrées juridiquement et législativement de manière stricte, en particulier en France et en Europe avec la mise en place du Règlement Général de la Protection des Données. Ces encadrements juridiques sont associés à des réflexions éthiques importantes sur la place de l'intelligence artificielle dans le secteur de la santé.

Le Règlement général de la protection des données (RGPD), mis en place en 2019 impose différentes contraintes très strictes associées à la manipulation des données personnelles. De par leur sensibilité particulière, les données médicales sont distinguées des autres données personnelles au sein du règlement. « Afin d'obtenir une autorisation d'exploitation des données de santé par la Commission nationale de l'informatique et des libertés, il est nécessaire d'obtenir des documents spécifiques de mise en conformité », indique Anne-Sophie Taillandier, directrice de Teralab, une plateforme de l'IMT spécialisée dans l'intelligence artificielle (IA) et le *big data*. « En France, la gestion des données de santé est très stricte car le consentement éclairé du patient doit être explicité », poursuit-elle.

D'autres réglementations, comme les lois sur la bioéthique, incluent des réflexions sur le numérique et la santé. Par exemple, celles-ci stipulent que les résultats obtenus par un algorithme doivent impérativement être vérifiés par un humain compétent avant une prise de décision médicale.

Les principes de l'éthique en intelligence artificielle

« Ces dernières années, les travaux sur l'éthique de l'intelligence artificielle en santé ont été découplés en deux phases », explique Christine Balagué, sociologue à Institut Mines-Télécom Business School. La première phase a commencé en 2018 et a conduit de nombreuses publications scientifiques concernant les grands principes que doivent respec-

ter les technologies d'IA. Celles-ci doivent notamment être justes et équitables, respecter l'autonomie et le consentement éclairé, apporter un bénéfice réel à la personne, et ne pas lui nuire. Ce courant sur l'IA responsable est très actif, mais également critiqué, notamment sur son manque de pragmatisme et sur la difficulté à traduire ces grands principes dans la réalité.

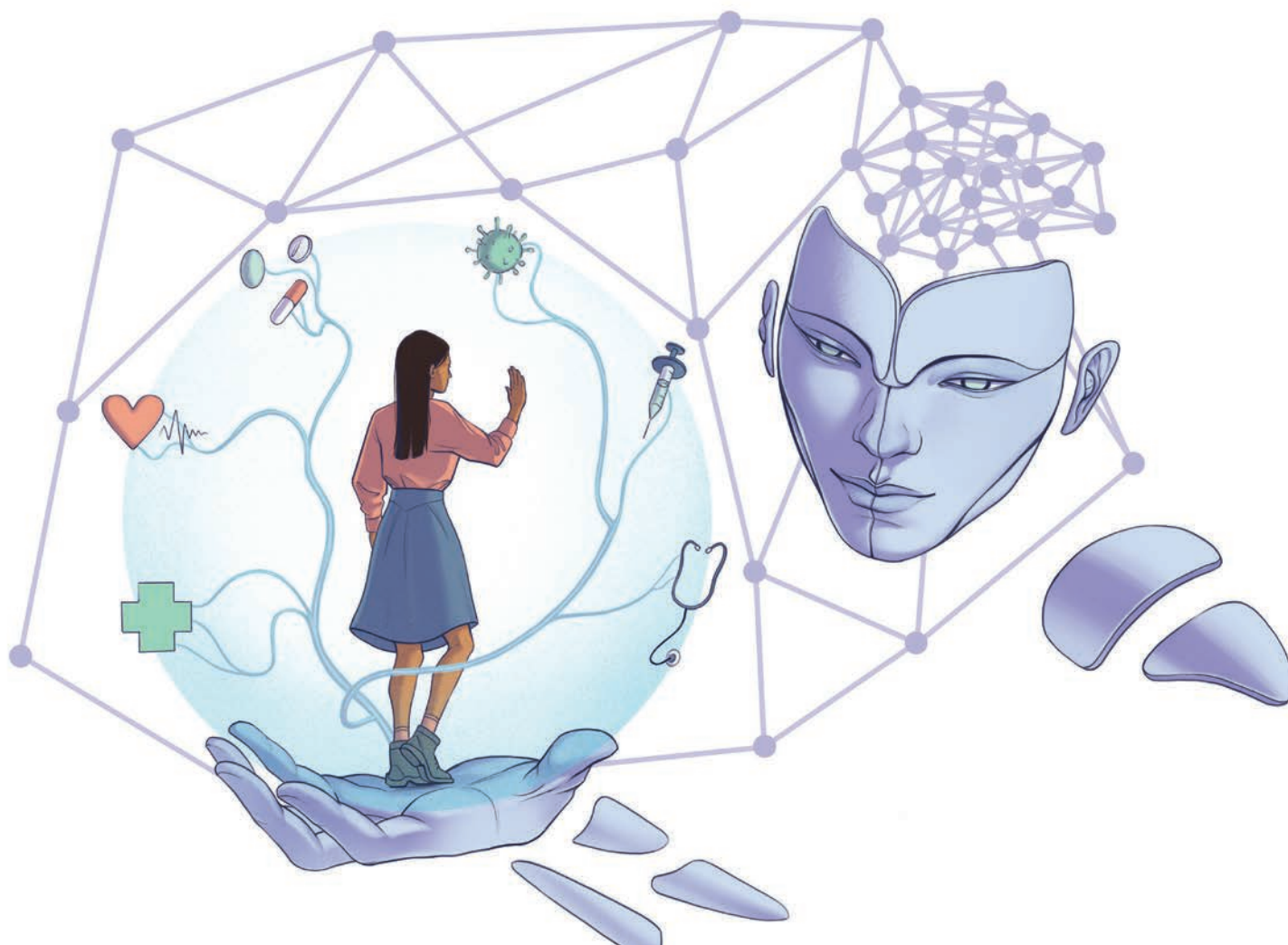
« La deuxième phase, qui est en cours de déploiement, consiste à implémenter des solutions techniques pour que ces principes soient respectés », poursuit la chercheuse. Par exemple, les IA peuvent être discriminantes sur certaines populations à cause des biais dans leurs données ou des modèles d'apprentissage, ce qui invalide le principe de justice. Pour répondre à cet enjeu, un courant très actif s'est développé sur le « *fair machine learning* » afin de limiter les biais et les

discriminations liés aux algorithmes d'IA qui seraient en conséquence plus « justes ».

« Les IA doivent apporter un bénéfice réel à la personne, et ne pas lui nuire »

Le principe d'autonomie et de consentement éclairé est parfois aussi difficile à respecter. « Il y a une dynamique temporelle de la réutilisation des données qui est difficile à maîtriser au regard de la notion de consentement », pointe aussi Christine Balagué.

Une meilleure diffusion d'informations pour



expliquer le devenir des données personnelles est nécessaire dans les années à venir. Une compréhension approfondie du fonctionnement des algorithmes et un regard humain sur les données d'apprentissage pourront limiter les discriminations. Certaines bases de données de santé pour la recherche, comme les *Health Data Hubs*, structurent les données de manière à être en accord avec ces principes éthiques.

« La puissance de calcul des algorithmes peut se révéler très utile, encore faut-il que les médecins et les patients acceptent de l'utiliser »

L'acceptation de l'IA en santé

La mise en place progressive de l'IA dans le secteur de la santé pose une problématique liée à son acceptation. « *La puissance de calcul des algorithmes peut se révéler très utile dans certains cas, mais les systèmes restent opaques, et encore faut-il que les médecins et les patients acceptent de l'utiliser* », remarque Christine Balagué. Si certaines technologies ne sont pas encore bien acceptées dans le monde médical, d'autres sont aujourd'hui déjà très bien utilisées.

Par exemple, l'application Digikare suit les patients à domicile après une opération du genou. Elle est recommandée par les chirurgiens orthopédiques et remboursée par la sécurité sociale, ce qui facilite son acceptation par les patients. Un autre exemple concerne les dispositifs connectés pour diabétiques qui mesurent régulièrement le taux d'insuline des patients. Ces dispositifs transforment la consultation : le médecin échange avec son patient sur les données lues sur son téléphone mobile, et ils réfléchissent ensemble, à partir

de faits réels, sur les solutions à mettre en place pour mieux gérer la pathologie. Cette technologie, en plus de renforcer la relation de confiance entre le médecin et le patient, améliore l'implication du patient dans sa propre gestion du diabète. Cependant, la confiance des patients en ces outils de mesure ne doit pas leur enlever leur capacité de savoir réagir en leur absence.

D'autres dispositifs ou applications de ce type n'ont pas pu voir le jour, par exemple par manque d'ergonomie, ou parce qu'ils étaient trop intrusifs et donc mal acceptés. Une méthode de développement qui permet d'éviter ces problématiques est la conception participative, car celle-ci s'appuie une collaboration entre des spécialistes de différents domaines et des patients.

La maîtrise de l'utilisation de l'IA dans le milieu de la santé est importante pour son intégration efficace et son acceptation. « *Les médecins en général ne sont pas encore suffisamment formés à l'IA et les data scientists travaillent sur des données de santé sans être réellement formés au domaine médical. C'est une perspective importante à continuer de développer, même si les échanges sont de plus en plus nombreux entre ces disciplines* », conclut la chercheuse. ▲

ÉCLAIRER LA BOÎTE NOIRE DES ALGORITHMES

Une autre difficulté importante concernant l'éthique de l'IA en santé correspond à la compréhension du fonctionnement des algorithmes. Pour respecter les principes éthiques, les algorithmes doivent être transparents, explicables et interprétables. La transparence signifie que l'ensemble des informations et des codes qui composent les algorithmes soit accessible, même si elle n'est pas toujours recherchée pour des raisons de propriété intellectuelle. L'explicabilité des algorithmes signifie que leur fonctionnement doit pouvoir être visualisé et décomposé, que ce soit pour les professionnels de santé ou pour les patients. Enfin, les algorithmes doivent être interprétables par un médecin généraliste le plus facilement possible pour intégrer correctement un diagnostic ou une recherche, ce qui n'est pas encore le cas aujourd'hui.

TERALAB: UN HEALTH DATA HUB POUR LA RECHERCHE

Les *Health Data Hubs* (HDH) correspondent à des bases de données formatées pour la recherche publique qui sont très encadrées juridiquement. Ces bases de données ont des contraintes importantes en termes de sécurité. Teralab est un HDH de l'IMT qui regroupe et met à disposition des données de santé pour la recherche. « *L'espace virtuel de Teralab est verrouillé pour qu'aucune donnée ne puisse en sortir : les données sont des copies temporaires que les chercheurs peuvent visionner et manipuler, mais ils ne peuvent jamais les extraire* », explique Anne-Sophie Taillandier, directrice de Teralab.



II

UN ACTE MÉDICAL TRANSFORMÉ

1

JUMEAU NUMÉRIQUE :
VRAIE MÉDECINE
SUR FAUX PATIENT

IMPRIME-MOI
UN TRAITEMENT
PERSONNALISÉ

3

2

ANATOMIE
D'UN MÉDECIN AUGMENTÉ
OU L'ORIGINE DU « RÊVE »
DANS RÉVOLUTION

NOUVELLES
PRATIQUES :
UN MÉDECIN
À PORTÉE
DE CLIC ?

4

JUMEAU NUMÉRIQUE : VRAIE MÉDECINE SUR FAUX PATIENT

Un double numérique du patient permet aux médecins de tester virtuellement différents traitements avant d'adopter la meilleure solution pour son patient. Cet outil peut aussi bien renforcer les décisions d'un chirurgien avant et pendant une opération, que celles d'un généraliste sur le choix d'un dispositif médical adapté. Mais cette approche a ses limites.

Imaginez : un clone fait de 0 et de 1 sur lequel un médecin pourrait tester une thérapie ou encore se préparer à une opération. C'est ce qu'offre le jumeau numérique : un modèle informatique répliquant un patient réel à partir de ses données médicales. Pensé comme un outil d'aide à la décision, il accompagne le médecin à chaque étape clé de sa pratique. Son principal avantage ? « Il permet de tester et de remodeler sans avoir d'impact sur le patient », souligne Woo-Suck Han, chercheur en ingénierie de la santé à Mines Saint-Étienne. Mais en pratique, cela donne quoi ?

« Un clone fait de 0 et de 1 sur lequel un médecin pourrait tester une thérapie ou encore se préparer à une opération. »

Comprendre pour mieux traiter

Les maladies cardiaques représentent la principale cause de décès à travers le monde¹. Parmi les causes responsables, figure l'artériosclérose : une accumulation de dépôts de graisse qui obstrue les artères. Un des traitements consiste à implanter dans la zone bouchée un petit cylindre métallique, appelé stent, afin de dilater l'artère et de rétablir le flux sanguin. « En pratique, il arrive qu'une opération se déroule sans problème, mais que le patient décède quelques jours plus tard à cause d'une complication liée au stent. Les chirurgiens vasculaires veulent comprendre pourquoi », révèle Christophe Collet, chercheur en traitement d'images et directeur de Télécom Physique Strasbourg.

Afin de répondre à cette demande, les chercheurs développent un modèle 3D, non pas du patient entier, mais de ses artères. Pour cela, l'équipe mixte entre Télécom SudParis, Télécom Physique Strasbourg et l'association Geprovas², s'appuie sur une base de données

1. Rapport 2020 de l'Organisation mondiale de la santé (OMS)

2. Groupe européen de recherche sur les prothèses appliquées à la chirurgie vasculaire

atypique : des explants d'artères fémorales. À l'intérieur de ces petits morceaux de chair, se trouvent différents marques de stents implantés sur des patients depuis amputés ou décédés. « *Des acquisitions 3D par imagerie Micro-CT nous permettent d'observer la structure interne de ces échantillons. Nous développons ensuite des algorithmes qui retracent l'historique de la vie du stent* », décrit Emmanuel Monfrini, chercheur en statistique à Télécom SudParis.

Autrement dit, à partir d'une représentation 3D de l'artère à un instant T, les chercheurs parviennent à détecter les zones et le moment où le cylindre a cédé après l'opération. « *Apprendre de ces accidents permettra ensuite de les éviter sur de futurs patients* », précise Emmanuel Monfrini. À terme, cet outil se destine donc à améliorer les techniques d'imagerie et à accompagner le chirurgien lors de la phase préopératoire. En effet, grâce à lui, il testera différentes marques et longueurs de stents adaptés aux artères du patient. Le modèle l'assistera aussi dans l'identification de la zone idéale d'implantation. Et le potentiel du jumeau numérique ne s'arrête pas là.

Une aide à la pratique jusque dans les salles d'opération

Valérie Burdin, chercheuse en traitement d'images à IMT Atlantique, développe des modèles statistiques dynamiques sur les structures osseuses. Dynamiques, car ils représentent en 3D l'ensemble des variations de mouvements d'une articulation. Un atout pour le chirurgien orthopédique. En effet, celui-ci ne dispose généralement que d'images médicales sur la zone à opérer et non l'articulation complète. Or, le mouvement d'une jambe ne se réduit pas à celui du genou, tout comme celui du bras au mouvement du coude. Connaître l'impact de sa pratique sur l'ensemble de l'articulation permet donc au chirurgien ou à la chirurgienne de s'assurer de la réussite de l'opération en cours et du rétablissement de son patient.

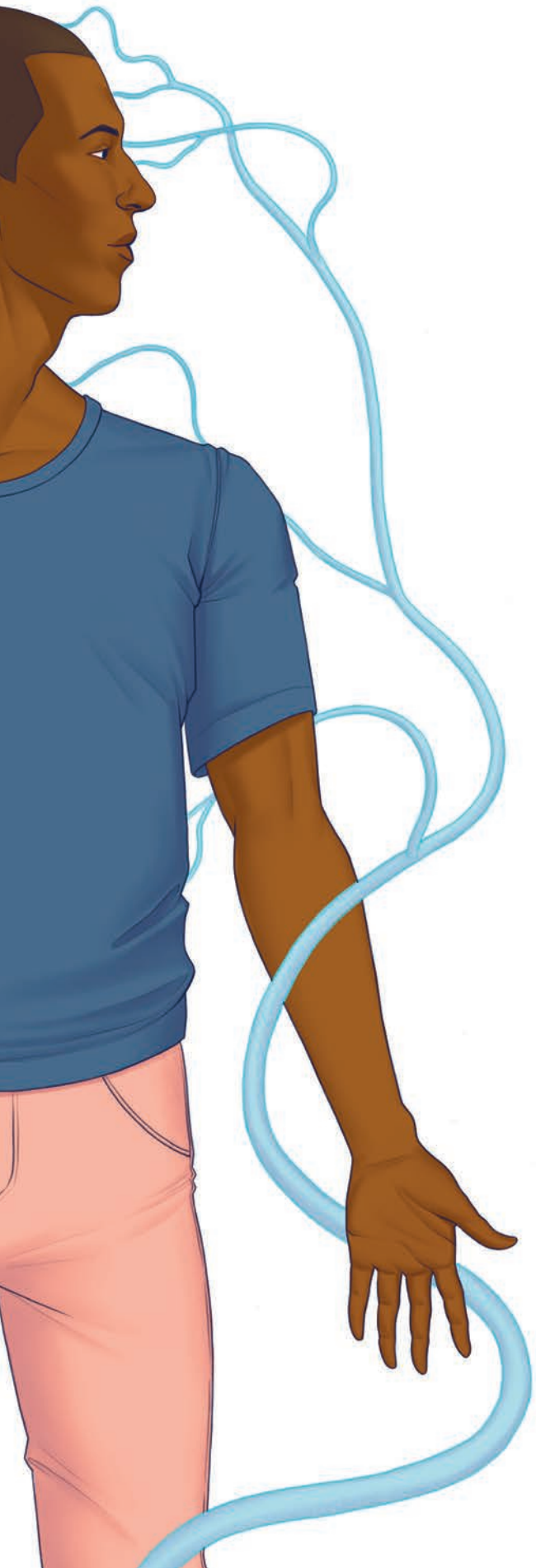
Mais alors comment dupliquer numériquement une jambe si on ne dispose, par exemple, que d'observations du genou ? « *À partir d'une seule partie du membre, les modèles statistiques calculent, dans une gamme de formes, le reste de la jambe non imagée*, décrit la chercheuse. *On peut même imaginer l'axe mécanique que devrait avoir la jambe réparée après l'opération* ». Ce modèle peut s'intégrer aux systèmes de guidage pendant une chirurgie et apporter une visibilité supplémentaire au praticien sur l'impact de son geste lors de l'intégration d'une prothèse par exemple. Toutefois, l'intervention chirurgicale n'est souvent qu'un traitement de dernier recours. Et le jumeau numérique peut également aider des formes thérapeutiques non-invasives.

Simuler ce qui se passe à l'intérieur du patient

Les dispositifs médicaux sont des formes thérapeutiques non-intrusives souvent préférées à l'intervention chirurgicale lorsqu'elle n'est pas obligatoire. « *Quand un médecin prescrit une ceinture lombaire, il se demande comment elle contribue à la thérapie du patient. La modélisation des effets sur un jumeau numérique pourrait l'aider à adapter ses choix thérapeutiques* », présente Woo-Suck Han.

« Le jumeau numérique prend en compte l'anatomie du patient, mais aussi les aspects mécaniques de la peau, des ligaments... »

Pour des raisons éthiques, il est impossible de placer un capteur au milieu de la colonne vertébrale d'un patient qui aurait mal au dos. L'enjeu est alors de comprendre comment un dispositif impacte l'intérieur du corps, à l'aide de données captées à l'extérieur de celui-ci.



Pour cela, le jumeau numérique prend en compte l'anatomie du patient, mais aussi des aspects mécaniques : les propriétés de la peau, des ligaments, des muscles, des os, etc. Une variété de paramètres qui complexifie le développement d'un jumeau numérique de précision. « *Nous savons modéliser tous les disques intervertébraux, les rotations et les torsions, mais c'est plus compliqué avec des tissus mous. Dans nos modèles, le muscle est donc encore représenté par un simple fil. Son rôle, bien qu'essentiel dans un mouvement, n'est pas encore modélisé* », précise le chercheur.

« Traduire une douleur subjective en une variable mathématique ajoute une couche de complexité au jumeau numérique. »

De plus, les effets d'une ceinture lombaire varient selon les mouvements, les postures et les individus. La personnalisation thérapeutique implique donc d'adapter le modèle au patient et à ses ressentis. Essayer de traduire une douleur subjective en une variable mathématique ajoute une couche de complexité supplémentaire au développement du jumeau numérique.

Les limites du patient numérique

Qu'il soit opéré ou non, le patient est pris en charge dans un cadre qui ne se cantonne pas à un acte médical isolé. « *Quand bien même nous disposerions de tous les outils nécessaires pour récupérer les données biologiques et anatomiques imaginables, un patient est aussi un être humain avec des sentiments. Il faut le considérer dans son environnement social* », tempère Benjamin Dalmas, chercheur en science des données de santé à Mines Saint-Étienne. C'est pourquoi son équipe met

en place de nouveaux partenariats avec des disciplines de sciences humaines et sociales. L'objectif : développer un outil d'anticipation de retour à l'hôpital combinant des données médicales et sociales.

« Comment numériser les données socioculturelles, l'isolement ou encore la psychologie ? »

« Une personne âgée vivant seule, dans un désert médical, qui est renvoyée chez elle un vendredi soir, a de grandes chances de revenir à l'hôpital pendant le week-end. Au-delà d'un problème médical, c'est un problème social », illustre le chercheur. Intégrer des critères sociaux inhérents à la qualité du rétablissement du patient, assurerait une meilleure prise en charge des personnes qui ne serait pas seulement médicale mais sociale et adaptée aux risques de rechutes associés à leur contexte de vie. Ces données permettraient de mieux accompagner les personnes isolées en leur proposant de nouveaux services par exemple. Mais comment numériser les données socioculturelles, l'isolement ou encore la psychologie ? C'est l'un des enjeux émergents auquel est confrontée la recherche. Pour le chercheur, la solution est claire : « Si nous voulons continuer à développer des jumeaux numériques, nous devons sortir du cadre de techno-ingénierie dans lequel nous nous sommes cloîtrés depuis trop longtemps ». ▲





ANATOMIE D'UN MÉDECIN AUGMENTÉ OU L'ORIGINE DU « RÊVE » DANS RÉVOLUTION

Augmenter les sens des chirurgiens consiste à leur apporter, par diverses technologies, de nouvelles informations qui vont renforcer la qualité de leur pratique. Toutefois, une technologie aussi révolutionnaire soit-elle n'aura que peu d'impact si elle ne s'intègre pas aux usages des principaux intéressés.

Et si les médecins avaient une vision à rayons X ? Pour la première fois en 2020, des chirurgiens américains de l'hôpital Johns Hopkins ont mené une opération de fusion vertébrale – qui consiste à relier deux vertèbres entre elles – en étant soutenus par un système de guidage de réalité augmentée. Sans aucun doute, l'avenir de la chirurgie verra émerger une coopération étroite entre l'humain et de nouvelles technologies. Des robots chirurgicaux aux simulateurs de réalité virtuelle, les méthodes franchissent peu à peu les murs

« L'avenir de la chirurgie verra émerger une coopération étroite entre l'humain et de nouvelles technologies »

des hôpitaux pour améliorer le confort et la pratique des chirurgiens. C'est le début de l'ère du praticien augmenté.

Transformer le patient en écran d'affichage au bloc opératoire

Un des enjeux lors d'une chirurgie est de superposer des données préopératoires à l'opération en cours. Autrement dit, afficher sur le patient des informations pour guider le geste du chirurgien en temps réel. « Afin d'éviter la multiplication du nombre d'écrans et d'outils, nous mettons en place des solutions de réalité augmentée permettant de localiser des structures anatomiques sur le patient », explique Chafiaa Hamitouche, chercheuse en traitement de l'information à IMT Atlantique. Au cœur de ces développements : des caméras capables d'estimer la position des objets et des structures anatomiques dans la scène opératoire. Elles remplacent des repères inva-

sifs, actuellement vissés sur les os du patient, afin d'aider le médecin à localiser les points d'intérêt lors d'une chirurgie orthopédique. Ces technologies contribuent ainsi à la pose, précise et non-invasive, d'un implant.

Elles aident également lors de chirurgies mini-invasives. L'enjeu est alors de positionner les trocarts au bon endroit. Ces instruments servent à l'insertion des outils à l'intérieur du corps sans avoir à l'ouvrir. « *À partir d'images médicales 3D de la personne opérée, nous avons développé un logiciel tenant compte de la déformation des organes et où ils se trouvent en fonction de la position du patient sur la table d'opération* », explique Cédric Dumas, chercheur en ergonomie cognitive à IMT Atlantique. Les emplacements adéquats des trocarts sont directement projetés sous forme de points lumineux sur le corps du patient.

Pointer du doigt avec un œil bionique

Jean-Louis de Bougrenet de la Tocnaye, professeur responsable du département d'optique d'IMT Atlantique, développe des lentilles de contact cyborg dans le cadre de la chaire innovation « Bloc opératoire augmenté » (BOPA) entre l'AP-HP et l'IMT. Portée par le praticien, cette technologie accompagne le geste chirurgical. Lorsque les mains du médecin sont utilisées – comme dans la majorité du temps au bloc – son œil ne sert plus seulement à voir, mais à désigner des zones d'attention. « *La lentille cyborg matérialise la direction du regard par un faisceau laser (infrarouge détectable par les caméras). Cela facilite les échanges avec l'équipe chirurgicale au bloc qui peut ainsi suivre où le médecin porte son attention* », explique le chercheur. Par exemple, lors d'une opération, un chirurgien expert peut se trouver à distance pour superviser/assister celui qui opère et le guider à chaque étape. Le pointeur peut alors être monté sur un bandeau de tête, et piloté par le chirurgien à distance pour attirer l'attention de son collègue sur des zones d'intérêt ou de vigilance.

« Nous transformons l'œil en organe de désignation et de décision. »

Associée à un casque de réalité augmentée, de telles lentilles cyborg offrent également des fonctions encore plus avancées. Elles permettent notamment à l'œil d'interagir avec un environnement en réalité augmentée – comme on cliquerait du bout du doigt sur le menu d'un écran tactile. « *Nous transformons l'œil en organe de désignation et de décision, ce qui rajoute par la même occasion une charge cognitive au médecin* », décrit Jean-Louis de Bougrenet de la Tocnaye. Il est alors impératif de veiller à ce que le dispositif n'entraîne pas de pertes d'attention à son porteur. C'est pourquoi le système est capable de détecter des incidents et de renforcer la perception périphérique du chirurgien. « *Pour cela, nous rajoutons sur la lentille de contact des éléments holographiques qui projettent des stimuli lumineux sur la rétine en zone parafovéale, c'est-à-dire en périphérie de la vision centrale de la personne. Cela permet de rééquilibrer son attention, et maintenir sa vigilance, sans la détourner de sa tâche principale* », ajoute-t-il. On parle alors de vision augmentée rétinienne périphérique (*Peripheral retinal augmented reality-PRAR*).

Apporter le sens du toucher aux robots chirurgicaux

La technologie développée par Jean-Louis de Bougrenet de la Tocnaye permettra d'apporter de nouvelles fonctionnalités au bloc opératoire qui s'ajoutent aux opportunités déjà offertes par les robots chirurgicaux. Et ces derniers présentent également de nombreuses pistes à explorer afin d'augmenter le ressenti des praticiens. « *Les robots de chirurgie les plus utilisés actuellement ont une très bonne dextérité et améliorent la vision, mais ils n'ont pas de retour haptique. Le chirurgien ne ressent*

donc pas la force de son geste », explique Cédric Dumas. Pour répondre à ce besoin, le chercheur développe différentes technologies centrées sur l'humain. Par exemple, des bras robotiques qui font ressentir à l'utilisateur les efforts qu'il exerce dans un environnement virtuel. Celui-ci sert d'aide à l'apprentissage au geste chirurgical.

Le chercheur équipe pour cela des instruments comme une aiguille de péridurale avec des capteurs de mesure d'effort. La procédure de cette dernière consiste à passer plusieurs couches de tissu afin d'injecter l'anesthésiant au bon endroit. « *Nous avons mesuré ce geste avec un vétérinaire lors d'une péridurale réalisée sur une chienne. Nous développons actuellement un bras robotique capable de reproduire ces efforts pour les transmettre lors de phases d'apprentissage* », décrit le chercheur. Autrement dit, ce robot sera capable de transmettre l'effort à fournir à un apprenti médecin qui ne dispose autrement que d'instructions orales pour le guider dans cette pratique. Il lui permettra ainsi de mieux mesurer le passage de membranes et donc d'injecter l'anesthésiant au bon endroit sans mettre en danger la patiente animale ou humaine. À terme, de tels ressentis pourraient être ajoutés aux propriétés offertes par les robots de chirurgie afin de renforcer la sensibilité du chirurgien.

Démocratiser l'usage des nouvelles technologies médicales

Les technologies d'augmentation du praticien veulent apporter des effets positifs : améliorer la pratique médicale, renforcer la sécurité du patient, etc. Néanmoins, leur niveau de complexité limite parfois leur usage. Par exemple, les endoscopes flexibles sont utilisés par les gastro-entérologues et les urologues afin d'observer l'intérieur d'un patient. Depuis une dizaine d'années, ces équipements sont dotés d'un système de chromographie virtuelle. Celle-ci permet d'éclairer des tissus à l'aide de différentes longueurs d'onde afin de détecter des pathologies comme le cancer. Un

diagnostic immédiat qui se substitue à la biopsie – un prélèvement et des analyses pathologiques qui prennent du temps. « *C'est un bon exemple de technologie pointue, prometteuse, pratique et largement répandue, que peu de personnes maîtrisent*, révèle Cédric Dumas. *Si nous voulons que ces techniques aient un impact sociétal, il est primordial de former les personnels à l'utilisation de toutes leurs fonctionnalités.* »

Or, plus un hôpital est éloigné d'un grand centre, plus cette sous-utilisation des technologies est répandue. En cause : les médecins de petits hôpitaux sont moins nombreux et doivent être plus polyvalents dans leur domaine de spécialité. Ils ont donc moins de temps pour se former. En collaboration avec le CHU de Nantes, l'équipe de Cédric Dumas s'est intéressée à la continuité de formations avancées en endoscopie. Elle a développé un outil de partage d'images anonymisées de patients permettant aux apprenants d'une promotion d'échanger à distance. « *Souvent, le risque après une formation est que le médecin n'applique pas ce qu'il a appris. Cet outil favorise la poursuite de l'apprentissage en facilitant la collaboration à distance avec des experts* », précise Cédric Dumas. Car c'est bien là un des premiers enjeux de l'adoption des technologies par les praticiens : augmenter des non-spécialistes en leur permettant de s'approprier toutes les fonctionnalités proposées par leurs équipements du quotidien. Cela tient notamment d'une différence entre les grands centres hospitaliers qui ont pour une spécialité donnée plusieurs experts de sous-spécialités – par exemple des neurologues spécialistes des migraines. Alors que dans des petits centres, l'hyperspécialisation n'existe pas. Les nouvelles technologies pourraient apporter à ces profils davantage de latitude et donc renforcer leurs pratiques à condition d'être formés sur le sujet. ▲

IMPRIME-MOI UN TRAITEMENT PERSONNALISÉ

L'impression 3D est un mode de fabrication qui pourrait booster le développement du sur-mesure médical. Des médicaments aux implants, les techniques de fabrication se perfectionnent. Mais le frein principal pourrait s'avérer plus économique que technique.

Prendre des décisions thérapeutiques guidées par le profil du patient : c'est le credo de la médecine personnalisée. Née de progrès en bio-informatique, elle bénéficie désormais d'autres méthodes innovantes tant en traitement de données (voir encadré) qu'en ingénierie des matériaux. Dans ce dernier cadre, l'impression 3D – ou fabrication additive – permettrait aux médecins une meilleure prise en charge des besoins de leurs patients.

« Si le dosage est trop bas, la molécule peut être inefficace. S'il est trop haut, le risque de toxicité augmente. »

Des médicaments adaptés à chacun

L'impression 3D de « comprimés » offre plusieurs avantages aux médecins. Premièrement, elle répond à une des contraintes majeures de médicaments standards : leur dosage. S'il est trop bas, la molécule peut être inefficace. Quand il est trop haut, le risque de

toxicité augmente. « *Nous collaborons avec un pharmacien-chercheur en pédiatrie qui doit constamment façonner des médicaments à la main pour ajuster les dosages aux enfants. La fabrication additive faciliterait et accélérerait drastiquement son travail* », remarque Martial Sauceau, chercheur en génie des procédés à IMT Mines Albi.

L'impression 3D permet également la fabrication d'objets complexes. « *On peut combiner plusieurs médicaments en un pour faciliter leur prise par les patients âgés qui ont tendance à avoir de multiples traitements* », explique Romain Sescousse, spécialisé en génie des matériaux à IMT Mines Albi. Cette méthode de confection à la carte permet également aux chercheurs de jouer sur la vitesse de libération des principes actifs. Pour cela, ils modifient la forme de l'excipient, c'est-à-dire le matériau qui contient les molécules thérapeutiques. Selon les besoins, ils peuvent ainsi accélérer ou ralentir l'effet d'un médicament.

Jusqu'à présent, le Spritam lévétiracétam – un traitement contre l'épilepsie – est le seul à être fabriqué par cette méthode dans le monde. Mais l'impression 3D sert à le produire

en masse et non à le personnaliser. Ce mode de fabrication est donc encore loin des applications cliniques potentielles contrairement à une autre utilisation de l'impression 3D en médecine : celle des implants sur-mesure

« Nous développons des dispositifs médicaux personnalisés qui stimulent la régénération osseuse tout en se résorbant. »

Des implants sur-mesure pour stimuler la régénération osseuse

À Mines Saint-Étienne, les chercheurs de l'équipe Ingénierie des biomatériaux utilisent l'impression 3D pour traiter certains traumatismes de l'appareil musculo-squelettiques os, cartilage, etc.). Parmi les pathologies visées : les grands défauts osseux liés à l'ablation d'une zone cancéreuse, une fracture, etc. Actuellement, les implants utilisés dans le milieu médical sont inadaptés aux traitements de ces dernières pour plusieurs raisons : ils sont incapables de se dégrader à une vitesse concomitante à celle de la formation du nouvel os, ils n'épousent pas parfaitement le défaut osseux du patient, ou encore car ils ne stimulent pas la reformation osseuse. « *C'est pourquoi, nous développons des dispositifs médicaux personnalisés qui ont pour but de stimuler la régénération osseuse tout en se résorbant dans le corps humain à une vitesse choisie* », présente David Marchat, chercheur en biomatériaux.

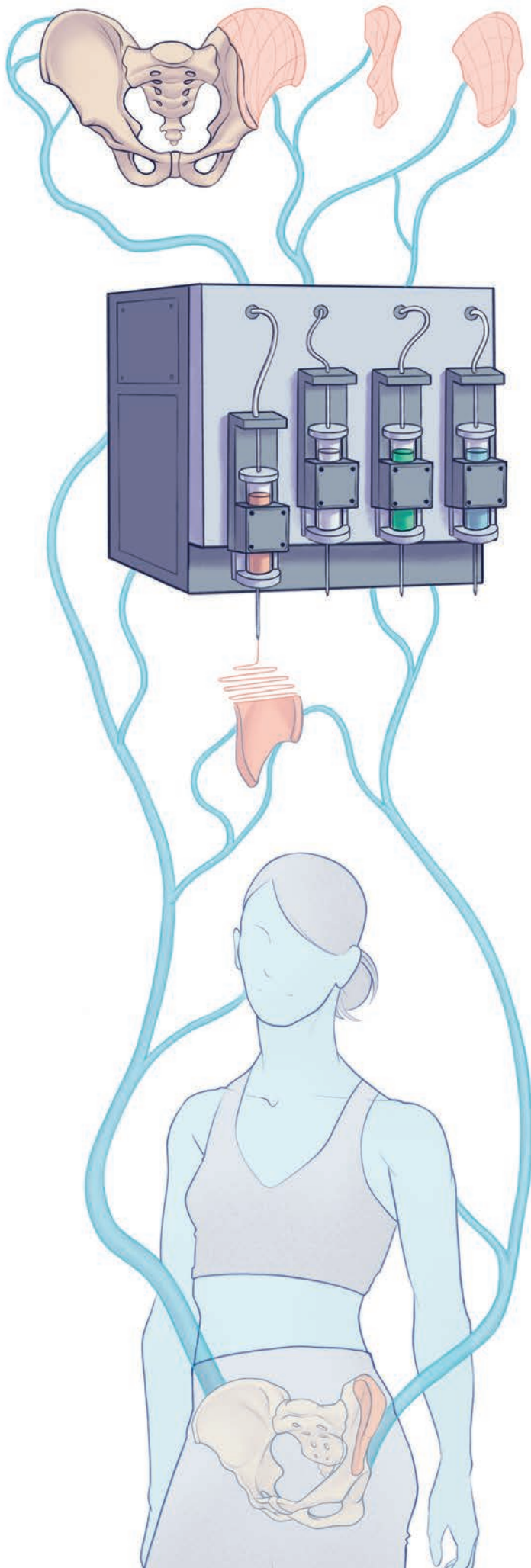
Élément important : les tissus musculo-squelettiques n'ont pas tous les mêmes propriétés. « *Notre squelette est vivant et il se renouvelle d'environ 10 % par an. Ce remodelage osseux dépend, entre autres, de notre patrimoine génétique, et de notre mode et hygiène de vie,*

incluant les contraintes mécaniques que notre squelette subit », explique David Marchat. Par exemple, l'activité physique qui stimule mécaniquement nos os les renforce. Les propriétés des biomatériaux implantés doivent donc s'adapter aux besoins des os à réparer et aux contraintes mécaniques qui leur sont imposées. Celles-ci peuvent être faibles, comme pour certains os du crâne, ou au contraire très importantes (mandibule, fémur). Grâce au progrès des procédés de fabrication additive, les chercheurs s'adaptent à ces contraintes en jouant sur la composition et l'architecture des implants.

Dans un contexte de médecine personnalisée, les implants sont ainsi développés à partir des caractéristiques morphologiques du défaut du patient, de son état de santé, et de la stratégie chirurgicale définie par le praticien. « *Les outils numériques nous permettent de tout envisager (planning opératoire) et la fabrication additive de concevoir l'ensemble des outils nécessaires aux chirurgiens pour adapter leur procédure aux caractéristiques de chaque patient. La chimie de l'implant peut également être modulée pour ajuster la vitesse de dégradation de l'implant, mais également des plaques de soutien de l'implant* », rapporte le chercheur.

Des implants dopés à la biologie

Un implant osseux, doit-il nécessairement être rigide pour aider à la régénération ? C'est la question posée par les travaux de David Eglin, chercheur en ingénierie de la santé à Mines Saint-Étienne. Il imprime en 3D des implants sous forme d'hydrogel – des matrices polymériques contenant plus de 80 % d'eau en poids. Ces dernières sont composées de biopolymères déjà présents dans le corps humain comme le collagène qui protège et offre la trame physique nécessaire à nos cellules pour régénérer les tissus. « *Notre objectif n'est pas de créer de l'os, mais un environnement biodégradable qui supporte le processus de régénération osseuse* », explique le chercheur.



UN ACTE MÉDICAL TRANSFORMÉ IMPRIME-MOI UN TRAITEMENT PERSONNALISÉ

Un des enjeux est alors d'identifier les fonctionnalités biologiques les plus intéressantes. « Nous avons travaillé sur un hydrogel chargé avec des techniques d'ARN messenger. Lorsque les cellules du patient colonisent l'implant, elles utilisent ces ARN en vue de produire des protéines qui stimulent la vascularisation et l'innervation », explique David Eglin. Le chercheur souhaite également intégrer des cellules-souches pour accélérer davantage la réparation. Ces technologies sont compatibles avec celles développées par David Marchat. Ensemble, elles peuvent former un implant hybride – céramique et hydrogel – qui jouerait alors sur les différentes échelles temporelles du processus de réparation osseux.

« Au-delà de l'impact sur le chirurgien, l'impression 3D appelle également à une restructuration de l'hôpital. »

Néanmoins, ces nouveaux dispositifs vont engendrer des changements de pratiques. À savoir, un glissement vers la chirurgie mini-invasive. « La planification opératoire aujourd'hui réalisée sur un bout de papier par le chirurgien, devra être faite via un logiciel de conception assistée par ordinateur, afin de planifier correctement toutes ces nouvelles étapes. Or, les médecins ne sont pas encore formés à ce type de pratique », ajoute David Marchat. Au-delà de l'impact sur le chirurgien, l'impression 3D appelle également à une restructuration de l'hôpital.

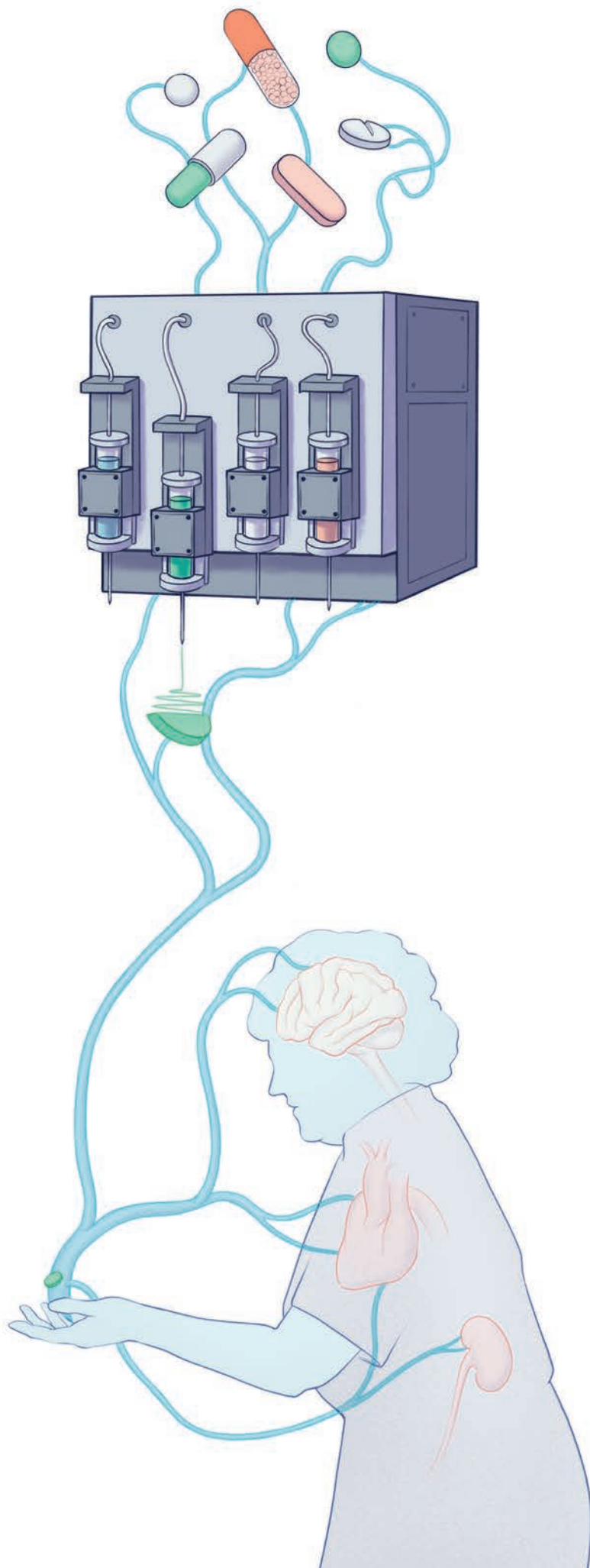
Quelle place pour la médecine personnalisée ?

En effet, intégrer l'impression 3D implique un remaniement des chaînes d'approvisionne-

UN ACTE MÉDICAL TRANSFORMÉ IMPRIME-MOI UN TRAITEMENT PERSONNALISÉ

ment des centres hospitaliers. Premier point à éclaircir : où seront installées les imprimantes 3D ? Selon David Marchat : « Les intégrer au sein de l'hôpital ne fera qu'alourdir la gestion des opérations. Mieux vaut externaliser la fabrication des implants et les livrer stériles au bloc opératoire ». De nouveaux acteurs pourraient ainsi voir le jour. Mais alors dans le cas des médicaments, quels acteurs procureraient la matière première ? Et qui imprimerait les molécules ? Ce nouveau schéma pose un problème de responsabilité. « Beaucoup de contrôles et de procédures qui sont actuellement sur les épaules des entreprises pharmaceutiques pourraient se reporter sur d'autres acteurs », précise Martial Sauceau.

Au-delà de l'intégration de l'impression 3D, c'est l'ambition de la médecine personnalisée qui pourrait être plus largement compromise. La personnalisation pose des questions de rentabilité. Jérôme Molimard, chercheur en biomécanique à Mines Saint-Étienne, travaille régulièrement avec des industriels sur des textiles médicaux tels que les ceintures lombaires. Selon lui : « Les seuls acteurs qui ont la possibilité d'aller vers de la personnalisation de dispositifs médicaux sont les fabricants ». Or, jusqu'à présent, personnaliser pour les industriels signifie proposer plusieurs tailles d'un même dispositif produit en masse. « Pour qu'ils apportent un service supplémentaire, ils devront être rémunérés, ajoute le chercheur, mais ce n'est pas prévu dans les cahiers de la sécurité sociale ». Finalement, le sur-mesure se destinerait plutôt à des applications de niche. Une solution lorsque le traitement standard ne peut être appliqué. Pour les autres, la voie du 100 % personnalisé semble encore loin. ▲



L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE POUR BOOSTER LA THÉRAPIE PERSONNALISÉE

En principe, le dossier médical numérique et personnel du patient circulera entre les mains des spécialistes qui auront accès à un important panel de données. Données qui permettront de développer des modèles de prédiction de l'impact d'une thérapie sur un patient précis. Le projet FollowKnee met en relation les phases pré- et post-opératoires dans le processus de rééducation d'une opération du genou. « *Actuellement, certains chirurgiens demandent des séances de kiné pré-opératoires, sans connaître précisément l'impact qu'elles auront sur la récupération post-opératoire*, explique Valérie Burdin, chercheuse à IMT Atlantique. *Nous développons des modèles qui permettront d'anticiper les effets d'une rééducation et donc de cibler les muscles à travailler avant l'opération à partir des données d'imagerie du patient* ». Pour cela, les chercheurs utilisent des méthodes d'intelligence artificielle qui permettent d'assurer une prise en charge thérapeutique sur-mesure.

C'est également l'objectif de François Rousseau, chercheur en traitement d'image médicale à IMT Atlantique et pilote de la chaire AI4Childs, dédiée à l'étude de la paralysie cérébrale chez l'enfant¹. Cette lésion non-évolutive survient autour de la naissance. Elle impacte de différentes façons le développement moteur de l'enfant. Dans le cadre du projet, les chercheurs traitent par des méthodes d'intelligence artificielle une grande variété de données : des IRM, des électroencéphalogrammes ou encore des signaux de fonctionnement des articulations d'une centaine d'enfants. « *Nous voulons identifier les corrélations entre les effets moteurs observés et la localisation de la lésion, explique le chercheur. L'objectif est ensuite d'anticiper la façon dont la maladie va impacter les muscles de l'enfant pour lui proposer une rééducation adaptée à l'expression de sa pathologie* ». Ces travaux visent à détecter plus rapidement la maladie pour commencer une thérapie précoce. La collaboration avec des kinésithérapeutes facilite en parallèle le déploiement de programmes de rééducation thérapeutique personnalisés.

¹. Ces travaux sont menés au sein du Laboratoire de traitement de l'information médicale (Inserm/ Université de Bretagne Occidentale/IMT Atlantique) et du groupement d'intérêt scientifique BEaCHILD.

NOUVELLES PRATIQUES : UN MÉDECIN À PORTÉE DE CLIC ?

La télémédecine offre de nouvelles perspectives de prise en charge des patients à travers les territoires. Elle transforme également le lien entre le praticien et son patient jusqu'à modifier l'image du médecin. Mais les cadres d'applications et les avantages de la télémédecine restent à déterminer.

À quoi pensez-vous si l'on vous dit « télémédecine » ? Celle-ci regroupe diverses pratiques allant de la consultation d'un médecin par WhatsApp, à la télé-expertise entre deux praticiens. Censée répondre à des problématiques d'accès aux soins dans les déserts médicaux, la télémédecine doit également apporter une meilleure maîtrise des dépenses de santé. Elle se retrouve donc au cœur d'évaluations médico-économiques, comparant les coûts engendrés par une pratique à distance et ceux d'une pratique classique. « Ces évaluations sont obligatoires pour que ces nouveaux systèmes de prise en charge soient autorisés à être mis en place par les médecins qui les proposent.

**« Les chercheurs
sont unanimes :
la téléconsultation pour tous,
ce n'est pas une bonne idée. »**

Il faut alors démontrer qu'il y a un intérêt, soit médical à coût constant, soit économique pour un résultat médical constant », explique Myriam Le Goff-Pronost, économiste spécialiste de la télémédecine à IMT Atlantique.

La télémédecine, c'est pas systématique !

Les chercheurs sont unanimes : la téléconsultation pour tous, ce n'est pas une bonne idée. En médecine libérale, la plus-value de son utilisation dépend de la typologie de territoire, des pathologies et de l'âge des patients. Elle est par exemple adaptée au suivi des malades chroniques, au renouvellement d'ordonnance, à la gériatrie, à certains cas d'urgence, et dans le cadre de la médecine du travail. « Selon un praticien interrogé lors de notre enquête avec le CNES sur l'utilisation de la télémédecine en 2020 : un médecin généraliste peut résoudre 90 % des problèmes sur ces sujets en étant à distance », rapporte Christine Balagué, sociologue à Institut Mines-Télécom Business School.

En revanche, les entretiens menés par la chercheuse montrent que certains cas médicaux ne s'y prêtent pas du tout : les cas de douleur abdominale aiguë, les gênes respiratoires intenses, etc. La téléconsultation a néanmoins un beau potentiel d'avenir : « *Un spécialiste peut faire une consultation à distance d'une personne âgée dans un Ehpad, avec l'aide d'une infirmière ou du médecin généraliste sur place qui aide le patient* », relève Christine Balagué.

« Des personnes âgées se retrouvent aux urgences suite à des décompensations qui auraient pu être détectées plus tôt. »

Quand nos données sonnent l'alarme

Les personnes âgées se retrouvent régulièrement aux urgences suite à des décompensations qui auraient pu être détectées plus tôt. Une des pistes afin de limiter cela est la télésurveillance médicale. Comprenez ici, un suivi à distance de l'état de santé d'un patient grâce aux données captées par des objets connectés associées à des données déclaratives. « *La majorité des solutions existantes portent sur le suivi d'une seule maladie chronique. Or, les personnes âgées sont souvent polyopathologiques. C'est pourquoi nous travaillons sur une solution globale (Génération Care) d'objets connectés associés à des données déclaratives permettant au généraliste une prise en charge globale (pathologies, difficultés fonctionnelles, psychologiques et sociales) pour un meilleur suivi de son patient* », explique Catherine Tonlorenzi, ancienne directrice du département e-santé de BNP Paribas Cardif.

Pour le médecin, les intérêts d'une telle solution sont multiples. En paramétrant lui-même la solution, il reçoit des alertes adaptées à

chacun de ses patients lorsque les constantes de ce dernier sont caractéristiques d'un problème médical. Cela lui évite les déplacements à domicile inutiles, lui permet de se recentrer sur les patients qui en ont le plus besoin et accroît ainsi son efficacité de soin et sa rentabilité économique au travail. Enfin, en objectivant le subjectif, la solution apporte du recul au praticien qui développe, sans s'en rendre compte, des biais d'habitude sur ses patients fidèles. Mais cela n'est possible que si le patient est en capacité de prendre seul ses constantes ou est accompagné pour le faire.

L'apport de données complémentaires, hors consultation, est également intéressant pour le suivi des maladies chroniques. Christine Balagué s'est intéressée à l'impact de dispositifs connectés sur le lien médecin-patient dans le cadre du suivi d'adolescents diabétiques par l'hôpital Purpan de Toulouse. « *Nous avons observé un changement du rôle du médecin qui est non seulement prescripteur mais aussi accompagnant de son patient. La relation pendant la consultation se construit également autour du mobile et du partage des données qui permet au médecin d'échanger avec le jeune patient sur plusieurs événements liés à sa pathologie* », décrit la chercheuse. Le médecin et son patient discutent plus librement et ouvertement de la maladie et de l'impact des décisions du jeune patient (excès alimentaires ou liés à l'alcool par exemple) sur sa glycémie.

Ces outils numériques améliorent la confiance entre les deux parties et la gestion de la maladie chronique par l'adolescent diabétique. Néanmoins, les médecins soulignent que cette nouvelle opportunité n'est possible qu'en maintenant des rencontres physiques de suivi avec les malades chroniques plutôt qu'à distance qui limite cette proximité d'échanges.

Erreur 651 – connexion impossible

Étendre la télésurveillance médicale à tous serait-elle une bonne idée ? Les chercheurs



observent que l'apport d'informations supplémentaires au médecin allonge la durée des visites médicales et limite donc le nombre de patients suivis. Appliquer cette pratique à l'ensemble d'une patientèle soulève également des problèmes de responsabilité. « *Un médecin est responsable de ce qu'il sait. Ses décisions dépendent des informations dont il dispose. Or, plus il en a, plus il prend le risque de passer à côté de quelque chose qu'il aurait pu détecter alors qu'on ne peut pas légalement lui reprocher de passer à côté d'un diagnostic qu'il n'aurait jamais pu donner. Cela complexifie le processus d'arbitrage des informations à remonter au médecin, dans un monde « noyé » dans les données.* », explique Raksmei Phan, chercheur en ingénierie des systèmes de soins à Mines Saint-Étienne.

Pour Catherine Tonlorenzi, le constat est sans appel : « *Les déserts médicaux se superposent le plus souvent aux déserts numériques. Tant que la couverture réseau ne s'améliorera pas, l'utilisation des méthodes de suivi à distance restera limitée dans les régions qui en ont pourtant le plus besoin* ». ▲

« La télésurveillance est efficace dans 90 % des expérimentations menées sur les maladies chroniques. »

De nombreux verrous doivent également être levés pour que s'installe la télésurveillance. Myriam Le Goff-Pronost précise : « *Nous avons montré qu'elle est efficace dans 90 % des expérimentations menées sur les maladies chroniques. Il y a donc un intérêt à la développer, mais la réflexion sur la télésurveillance n'est pas tant sur la rémunération d'un acte, que celle d'un forfait* ». En effet, il s'agit ici d'un suivi régulier, souvent mené par des infirmières coordinatrices, et qui implique de multiples acteurs. Son mode de rémunération n'a cependant pas encore été tranché.

Enfin, un enjeu de taille pour la télémédecine en général est la connectivité. L'intérêt des pratiques est rapidement limité si les alertes à destination des médecins sont envoyées plusieurs heures après l'événement.

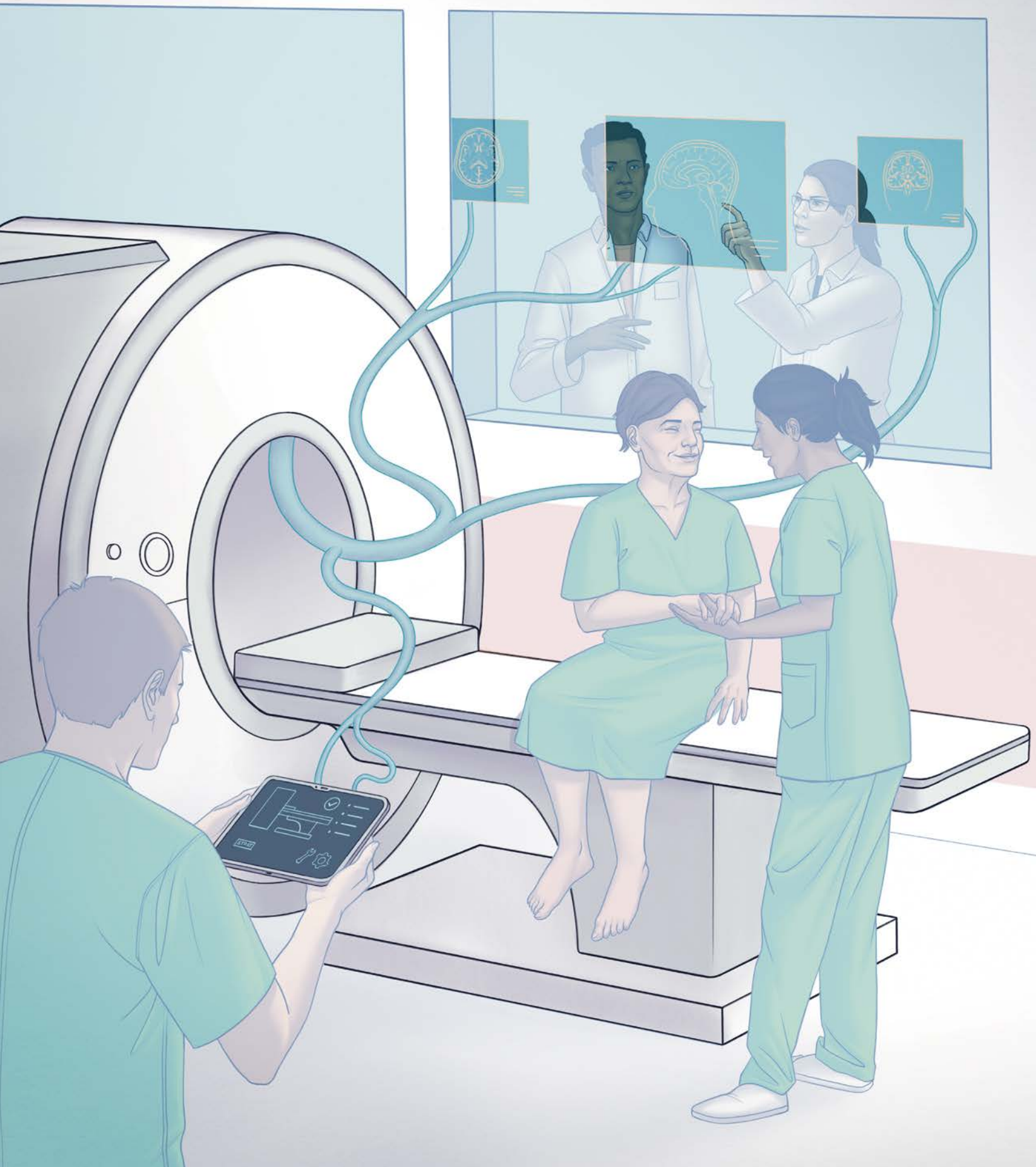
REGARD D'INDUSTRIEL - ORANGE VEUT TOUT « DONNÉES » POUR LA SANTÉ

Orange est présent tout au long du voyage de la donnée médicale : sa captation par des objets connectés, son stockage en tant qu'hébergeur de données de santé certifié, sa protection avec Orange Cyberdéfense, son transport via des solutions d'interopérabilité et enfin son exploitation par les professionnels de santé. « *Nous développons des solutions en étant guidés par les usages afin d'améliorer la qualité de vie au travail des praticiens et la prise en charge des patients* », témoigne Icham Sefion, directeur innovation chez Enovacom, pôle santé B2B du groupe Orange.

Pour cela, plusieurs pistes pourraient être envisagées dont le développement d'un pack de services associés à un abonnement box spécifique aux professionnels de santé. « *Celui-ci pourrait être alimenté par des solutions permettant de suivre à distance la rééducation d'un patient par exemple. Les médecins optimiseraient le suivi patient grâce à la mise en place d'un écosystème d'outils interopérés autour de la box Internet, des réseaux mobiles et de protocoles d'échanges de données renforcées* », décrit Guillaume Hapulat, responsable du programme Santé, bien-être et pratique sportive d'Orange Innovation.

« *Une autre piste serait de proposer d'accompagner chaque individu dans ses moments de vie : la préservation de sa santé, le suivi de maladie et d'hospitalisation, le maintien à domicile, etc., grâce à l'usage adapté, raisonné des données personnelles. Et ainsi faciliter et enrichir le dialogue indispensable entre les médecins et les patients* », précise Jérôme Galloyer, UX design Leader chez Orange Innovation.

L'entreprise souhaite également exploiter les gisements de données de santé avec certaines approches comme le *machine learning* et le *deep learning* pour aider notamment les médecins dans leur quotidien. Ces méthodes d'IA nécessitent de grands volumes de données de qualité et induisent parfois des résultats peu interprétables ou peu explicables. « *Nous avons collectivement cette responsabilité d'apporter la bonne approche au bon problème, et de proposer des solutions dont nous sommes capables d'expliquer les recommandations dans un cadre éthique* », précise Icham Sefion. Orange souhaite ainsi accompagner la transformation d'une politique de santé curative, vers une médecine plus prédictive et préventive grâce à la donnée.



III

L'HÔPITAL, UNE INFRASTRUCTURE TECHNOLOGIQUE

1

LA LOGISTIQUE
HOSPITALIÈRE
EN QUÊTE
DE PERFORMANCE

2

NUMÉRISATION
DU BLOC OPÉRATEUR :
QUEL IMPACT
SUR L'HUMAIN ?

UN ÉVENTAIL
D'INNOVATIONS
À L'HORIZON

3

LA LOGISTIQUE HOSPITALIÈRE EN QUÊTE DE PERFORMANCE

La logistique hospitalière a un rôle prépondérant à jouer pour améliorer la performance du système de soins. Elle est animée par une importante diversité de flux (patients, médicaments, personnels soignants...), dont la complexité appelle à l'intégration de nouveaux outils numériques. Zoom sur les axes de recherche prioritaires qui peuvent faire peser la balance vers plus de performance.

Qui diagnostique l'hôpital quand il est malade ? Cela fait plus de vingt ans que le nombre de patients aux urgences augmente chaque année. Et la tendance ne risque pas d'être à la baisse. D'une part, car 9 à 12 % de la population vit dans un désert médical¹, ce qui motive les patients de ces régions à se tourner vers les hôpitaux, faute de pouvoir visiter un médecin autrement. D'autre part, parce que 5,5 % des centres hospitaliers publics ont disparu au cours des huit dernières années².

« Moins d'hôpitaux doivent traiter plus de patients, à moindre coût. »

Bilan: moins d'hôpitaux doivent traiter plus de patients, à moindre coût. En effet, chaque année la tarification à l'acte qui finance en partie les hôpitaux est revue, elle a ainsi baissé de 5 % entre 2009 et 2016³. Le système de soins doit donc rapidement s'optimiser. Une des pistes est d'améliorer sa chaîne logistique. Comprenez ici la gestion de ses flux opérationnels (ressources médicales, nombre de lits disponibles, etc.) et de ses flux de patients en lien avec ses dépenses.

Avant-pendant-après, un parcours patient optimisé

Répondre à 99 % des appels en moins de 60 secondes. C'est l'objectif que se fixe le SAMU dans sa prise en charge des appels d'urgence. Or, le nombre d'appels ne cesse de croître au point de mettre à mal cette ambition.

1. Rapport du Sénat : déserts médicaux : l'État doit enfin prendre des mesures courageuses ! (2020)

2. Rapport de la Direction de la recherche, des études, de l'évaluation et des statistiques (DREES) - n° 1208 - septembre 2021

3. Vie-publique.fr, Entre T2A et Ondam, quel financement pour l'hôpital ? (22/01/2020)

Plus qu'un besoin de renfort humain, le service nécessite un nouveau modèle organisationnel. Eva Petitdemange, chercheuse en génie industriel à IMT Mines Albi, développe un outil de diagnostic afin de les aider. Elle explique : « On ne peut pas arrêter ces structures en cours de route pour regarder sous le capot et observer la machine en marche. La simulation nous permet de reproduire la réalité, faire des tests et proposer une organisation optimisée de la gestion des appels sans impacter le fonctionnement réel ».

« Répondre à 99 % des appels en moins de 60 secondes. »

Après un petit tour en ambulance, arrive le cas des urgences. « Optimiser l'organisation de ce service est prioritaire, car il coûte cher à l'assurance maladie. Le coût moyen d'un passage est entre 160 € et 250 € en fonction des hôpitaux et de leur organisation », pointe Raksmei Phan, spécialiste de l'ingénierie des systèmes de soins à Mines Saint-Étienne. Le chercheur développe des outils d'aide à la décision destinés aux médecins urgentistes. Ces algorithmes évaluent, par exemple, l'impact des pathologies de chaque nouveau patient sur la gestion globale du service. « On peut simuler une arrivée massive de patients et, en fonction du nombre de personnels présents, savoir comment cela va impacter le service (augmenter les délais de prise en charge, etc.) et donc identifier les goulots d'étranglement (accueil, triage, matériel...). De là, nous pouvons proposer des solutions adaptées (renfort en personnel et matériel) », ajoute le chercheur. L'objectif à terme est de fournir des outils aux médecins pour les aider à gérer le flux de patients arrivés aux urgences et donc de directement améliorer la qualité d'accueil des patients.

D'autant que ces admissions imprévues aux urgences impactent en cascade les autres services hospitaliers forcés d'intégrer des patients sur le vif. « Nous travaillons sur un système qui permettrait de suivre en temps réel, à la fois le nombre de patients en attente d'un lit et la quantité de lits disponibles dans le service qui doit les recevoir », explique Franck Fontanili, chercheur en ingénierie organisationnelle pour la santé à IMT Mines Albi. Jusqu'à présent, ce système est déclaratif. Il peut donc se passer plusieurs heures entre le moment où un lit s'est libéré et celui où il est marqué comme libre. L'objectif est donc de fluidifier les flux interservices en automatisant certaines communications sur les besoins et disponibilités de chacun.

Une fois le patient hors de danger, celui-ci peut être pris en charge chez lui notamment par des services d'aide à domicile. Problème : le métier, peu valorisé, peine à recruter. Or, la demande est exponentielle. « Nous proposons d'automatiser la création des tournées de services, habituellement construites à la main. La prise en compte de la satisfaction des intervenants permet de limiter le roulement du personnel, et donc d'apporter de la stabilité aux structures », rapporte Cléa Martinez, chercheuse en génie industriel à IMT Mines Albi. Une tâche ardue demandant de formaliser mathématiquement des connaissances métiers liées à l'humain (quel patient accepte les retards, etc.). « Nous intégrons aussi des outils d'aide à la décision pour mieux gérer les aléas, que ce soit au niveau tactique ou opérationnel : personnel absent, ralentissement sur la route, etc. ». L'enjeu est d'aboutir à une meilleure prise en charge à chaque étape du parcours du patient.

Piloter un hôpital à l'aide d'un jumeau numérique

Rendre les services hospitaliers plus performants consiste aussi à les aider à prendre les meilleures décisions au quotidien. Sauf que tant qu'une situation n'est pas connue, il est impossible de juger la qualité de sa gestion.

« Aucun hôpital n'est capable de dire à ce moment précis combien ils ont de patients et où ils sont dans l'établissement, car ces outils n'existent pas encore, expose Franck Fontanili. Nous proposons de répondre à ce problème à l'aide d'un jumeau numérique ».

Ce double virtuel de l'hôpital serait-il le Graal de l'optimisation organisationnelle des centres hospitaliers ? Connecté aux données enregistrées par les services, il permettrait de piloter en temps réel l'ensemble des flux de patients, de médicaments, de dispositifs médicaux, etc.

« Ce double virtuel de l'hôpital serait-il le Graal de l'optimisation ? »

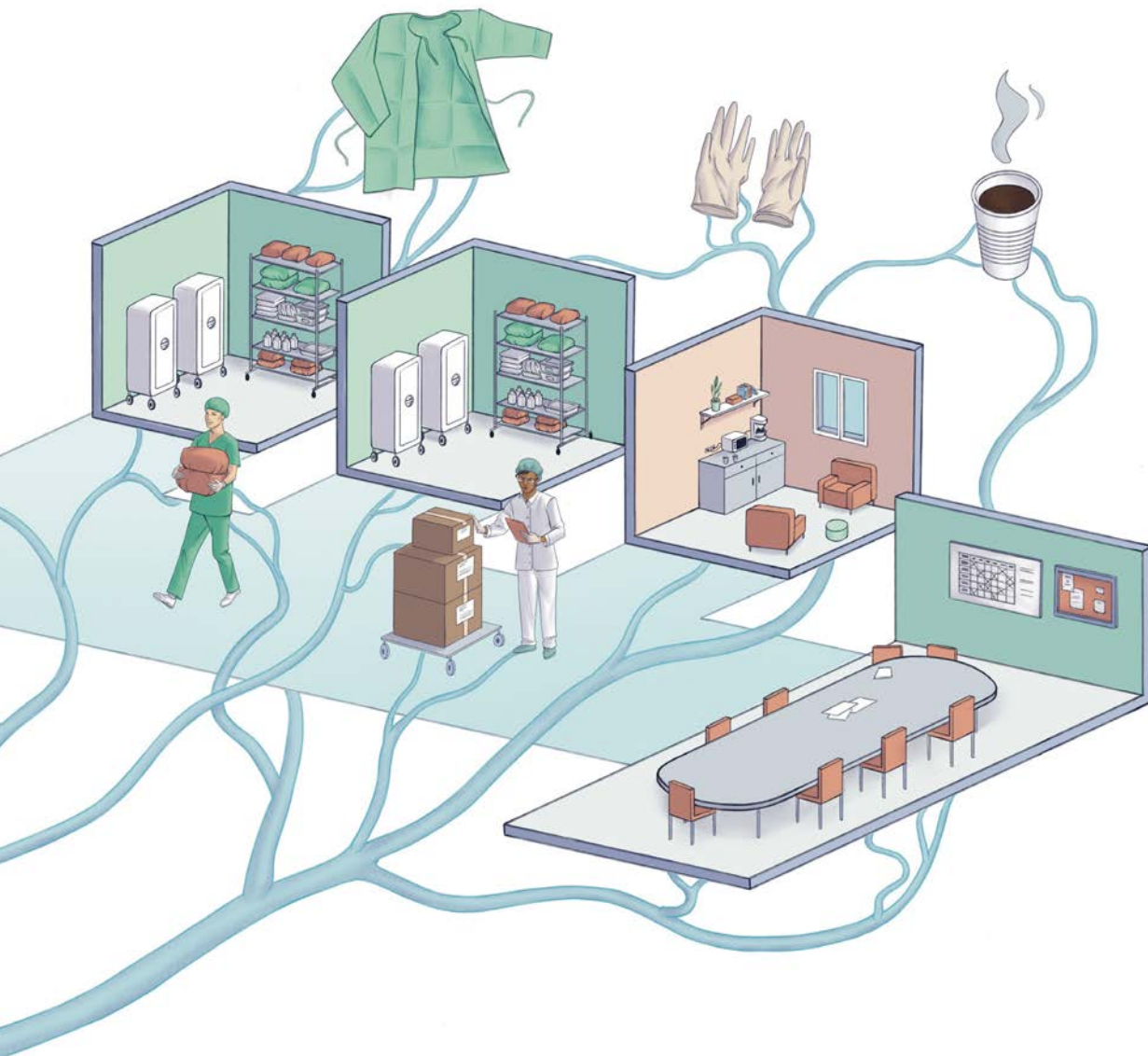
Mais cela demande la création d'un nouveau poste : celui de pilote des flux, équivalent d'un contrôleur aérien au sein de l'hôpital. Lorsqu'une situation sortirait de l'ordinaire, un système d'alerte signalerait à cette personne



la zone concernée. Par exemple, de nombreux rendez-vous en consultations externes ne sont pas honorés par les patients chaque jour. Les personnels de santé sont forcés de prendre des décisions à l'aveugle qui perturbent parfois plus le système que l'absence

par exemple les patients de dispositifs permettant de suivre leur parcours en temps réel dans l'établissement.

Votre brancard est à 10 cm sur votre droite



Sa solution est valorisée par la *start-up* Cartobat. Elle s'appuie sur la communication entre un bracelet équipant un patient ou un brancard, des modules qui couvrent l'ensemble d'un service hospitalier, et un routeur Wifi ou 4G qui envoie l'information de géolocalisation aux utilisateurs. Ce système permet par exemple de suivre des équipements de chirurgie ambulatoire – une pratique qui connaît une augmentation annuelle significative.

La géolocalisation est également utile à des fins de sécurité. Elle assure notamment la localisation de patients désorientés avant qu'ils ne sortent par erreur d'un Ehpad.

« Avec la Covid-19, des ressources considérées non-critiques ont été en rupture. »

Autre enjeu de sécurité : la gestion des stocks de produits stratégiques. Jusqu'à présent, les centres hospitaliers voulaient disposer de réserves minimales sur des produits pré-identifiés (souvent en raison d'une obligation réglementaire) et tendre vers un stock très faible sur les autres produits. Or, la crise de la Covid-19 a bouleversé cette vision lorsque des ressources qui n'avaient pas été identifiées comme critiques ont été en rupture (gants, masques, blouses, etc.). « *Un nouveau paradigme se met en place afin d'identifier les produits stratégiques sur l'ensemble de la chaîne logistique et comment sécuriser ces flux*, explique Pierre Lebon, partenaire conseil santé social emploi chez Sopra Steria Next. *Nous accompagnons les hôpitaux dans la mise en place de nouveaux modèles qui leur permettent d'amortir le risque que leur fournisseur ne les livre plus demain.* »

Problème majeur : l'hôpital fonctionne sur un système de marchés publics. Chaque structure signe donc des contrats pour une durée déterminée sur un produit avec un fournisseur unique. Il lui est alors difficile de s'approvisionner ailleurs sur cette ressource même si son prestataire n'en a plus. Trouver une alternative à un médicament, ou un autre produit stratégique, en rupture pourrait alors consister à adopter une gestion du risque fournisseur bien définie en ayant notamment de bons vecteurs contractuels, des réflexions à l'échelle du GHT ou bien des pratiques alternatives lorsque les voies habituelles ne sont pas possibles. Pour mieux s'organiser et gérer les aléas, l'hôpital doit donc adopter des stratégies qui dépassent les limites de son établissement.

Territoires : et si on revoyait tout le système ?

L'organisation territoriale des soins est au cœur de la stratégie de transformation de notre système de santé. Son objectif : faire en sorte que tous les patients aient accès aux infrastructures nécessaires à leur prise en charge à proximité de leur domicile (voir encadré). Elle est à l'origine de la création des groupements hospitaliers de territoire (GHT) et des problématiques de mutualisation des ressources qui leur sont associées. En effet, les GHT réunissent au sein d'un même réseau les hôpitaux publics, les centres de santé mentale ou encore les EHPAD. Se pose alors la question de leur gestion commune : quel support d'organisation utiliser, comment les mettre en place, quelles ressources mutualiser (médicaments, linges, etc.) ? « *Avec des outils d'optimisation mathématiques, nous aidons ces acteurs dans leurs décisions stratégiques en identifiant là où ils peuvent avoir des gains, les ressources à partager et où les localiser, etc.* », témoigne Thierry Garaix, chercheur en génie industriel hospitalier à Mines Saint-Étienne.

De plus, les GHT remettent en question la gestion de certaines prestations menées par les hôpitaux qui pourraient être stratégiques d'externaliser. Par exemple, le transport de

patients, pendant longtemps intégré à l'hôpital, disparaît peu à peu pour laisser place à des acteurs privés. D'autres services comme la stérilisation, pourraient suivre. « *Le budget hospitalier en France se décompose ainsi : 70 % est dédié à la masse salariale et 30 % aux achats. Aux États-Unis, cette répartition tend vers du 50-50, car il y a un repositionnement des établissements sur leur cœur de business : le soin* », rapporte Pierre Lebon. Étant donné la réorganisation globale du système de soins, et une volonté toujours plus forte de réduire les dépenses hospitalières, la France devrait à son tour voir ces quotas se modifier dans les prochaines années. ▲

VERS UNE MEILLEURE PRISE EN CHARGE DES PATIENTS DANS LES TERRITOIRES ?

Les différences entre les territoires influencent-elles la manière de soigner ? Cette question est au cœur des travaux de Vincent Augusto, chercheur en ingénierie des systèmes de soins à Mines Saint-Étienne. « *Je m'attaque à des problématiques d'inégalité d'accès aux soins en menant des études d'évaluation de performance sur la prise en charge de patients atteints de différentes formes de cancers* », présente le chercheur. Une de ses études est réalisée avec le réseau Netsarc sur le suivi de patients atteints d'un sarcome – une forme de cancer des tissus. Ce réseau veut mettre en place une collaboration entre les spécialistes à travers la France pour des parcours mieux organisés, efficaces et adaptés. Un patient du réseau pourra être renvoyé vers le bon spécialiste et se verra proposer le traitement le plus adapté à son cas qui sera partagé entre les professionnels du réseau. Un patient traité hors réseau ne bénéficiera pas d'autres regards que celui du médecin consulté, ni de recommandations médicales pointues adaptées à sa pathologie. « *Nous cherchons à démontrer que la prise en charge standardisée dans ce réseau est meilleure que celle d'une personne traitée en dehors de celui-ci*, explique le chercheur. *Cette étape est indispensable pour démontrer la plus-value de ce type d'accompagnement* ». Ces évaluations se multiplient à travers les territoires afin de démontrer aux autorités publiques d'éventuelles inégalités et le fonctionnement de différentes prises en charge dans un objectif global d'amélioration du système de soins.

NUMÉRISATION DU BLOC OPÉRATOIRE : QUEL IMPACT SUR L'HUMAIN ?

Après la stérilisation, la numérisation sera-t-elle la prochaine révolution du bloc opératoire ? Dans sa quête de la réduction des erreurs, l'hôpital se rationalise, se standardise et se numérise jusque dans les salles d'opération. Il s'inspire pour cela depuis une dizaine d'années de méthodes éprouvées par l'aéronautique. Gérard Dubey, anthropologue à Institut Mines-Télécom Business School, étudie l'impact du numérique sur le collectif de travail du bloc et le geste chirurgical.

Quelles solutions provenant de l'aéronautique l'hôpital souhaite-t-il intégrer pour réduire les risques dans les blocs opératoires ?

Gérard Dubey : L'hôpital a déjà adopté par le passé des méthodes issues du secteur de l'aéronautique avec l'intégration de *check-lists*. Désormais, une des ambitions est d'introduire dans le bloc une « boîte noire » qui enregistrerait tout ce qui se passe et dont le traitement des données serait partiellement automatisé. Autrement dit, on veut intégrer des modes d'enregistrement et d'analyse recourant à l'intelligence artificielle pour faciliter un retour d'expérience au bloc comparable à celui qui existe en aéronautique et renforcer ainsi la culture de la sécurité. Mon travail, au sein de la chaire d'innovation Bloc opératoire augmenté portée par l'IMT et l'AP-HP, a donc été dans un premier temps de comparer le modèle de sécurité de l'aéronautique avec celui du monde chirurgical et d'évaluer les potentiels transferts.

Ce modèle de sécurité est-il réellement transposable au milieu chirurgical ?

GD : Cette transposition n'est pas pertinente pour plusieurs raisons. La première est due à l'environnement de travail. Dans un cockpit, il y a deux pilotes interchangeables qui constituent un ensemble homogène. Le bloc opératoire peut aller de trois à une quinzaine de personnes selon la complexité de la chirurgie pratiquée. Ces personnels ont des qualifications et des niveaux hiérarchiques différents : les chirurgiens, les anesthésistes, les infirmiers de bloc (lbode) ou infirmiers anesthésistes (lade), les brancardiers... Les interactions sociales sont donc très différentes d'un contexte à l'autre.

Deuxième raison majeure : même si un avion est un système très complexe, les pilotes vont surtout être dans une interaction homme-machine qui est plus facile à formaliser et à traiter par des algorithmes. Or, l'environnement du bloc est beaucoup moins standardisé. Il

Il y a beaucoup d'échanges informels entre les acteurs qui passent par tout un langage non verbal comme la gestuelle, les clins d'œil, etc. Des signes infimes qui ne peuvent pas être numérisés. À cela, s'ajoute l'interprétation de toute une ambiance sonore d'une grande complexité : bruit des aspirateurs, signaux sonores continuellement émis par les différents équipements en fonction.

« Dans le bloc, les échanges passent par un langage non verbal comme la gestuelle ou les clins d'œil... »

Enfin, en cas d'accident dans l'aéronautique, les compagnies recueillent les boîtes noires qui sont étudiées par des pairs. Toute une structure travaille collectivement sur ces données enregistrées. Pour l'instant, il n'existe rien de tel au niveau de l'hôpital où l'on manque cruellement de temps. Et aujourd'hui la tendance est finalement à une rationalisation très taylorienne du temps : augmenter les cadences tout en réduisant au maximum tout ce qui n'a pas de plus-value quantifiable.

Vous avez mentionné que le numérique accompagne la démarche de rationalisation des hôpitaux. Comment cette quête de l'efficacité risque-t-elle d'impacter l'équilibre social du bloc opératoire ?

GD : L'informel a une place si considérable au bloc, qu'essayer de le rationaliser va engendrer d'autres problèmes qu'il faudra anticiper. Par exemple, le brancardier du bloc est un employé multitâche, au bas de l'échelle hiérarchique, qui a un rôle informel considérable pour la cohésion du collectif hospitalier. Or, la rationalisation décompose de façon très analytique les tâches. Sauf qu'en divisant pour opti-

miser, on engendre de nouveaux problèmes de liaison et de coopération.

Les brancardiers pratiquent, par exemple ce que l'on appelle en anthropologie des protocoles de plaisanterie qui permettent d'abaisser la pression et le stress. Ils repersonnalisent des relations sociales dans un environnement très fonctionnel dominé par l'anonymat (les uniformes). Ces échanges ne peuvent pas être numérisés et sont perçus comme des temps morts, c'est-à-dire inutiles d'un point de vue strictement rationnel. Ils sont donc peu à peu supprimés. Mais que perd-on ? Nous ne savons pas l'effet que cela aura sur le long terme : personnels plus stressés, plus d'arrêts maladie déposés, etc. Du côté du patient, cela se manifeste par davantage de déshumanisation.

Mon objectif est donc de témoigner de tout ce que l'approche fonctionnelle passe sous silence et dont dépend pourtant le fonctionnement quotidien de l'hôpital. Puis de montrer que si la numérisation peut apporter des choses en matière de sécurité, elle ne doit pas fragiliser et déstabiliser ces relations informelles qui doivent rester centrales et décisives.

La standardisation des échanges est une autre forme de rationalisation également appliquée dans l'aéronautique. Les échanges au bloc opératoire seront-ils amenés à se standardiser ?

GD : C'est déjà le cas avec les blocs opératoires communs mis en place dans de grands hôpitaux parisiens. Cette organisation, basée sur des équipes interchangeables, impacte le rapport d'interconnaissance qui joue un rôle important lors d'interventions compliquées : anticipation des attentes des membres de l'équipe, gain de temps, réactivité, etc.

Lorsque les hôpitaux font le choix de blocs communs avec des personnels interchan-

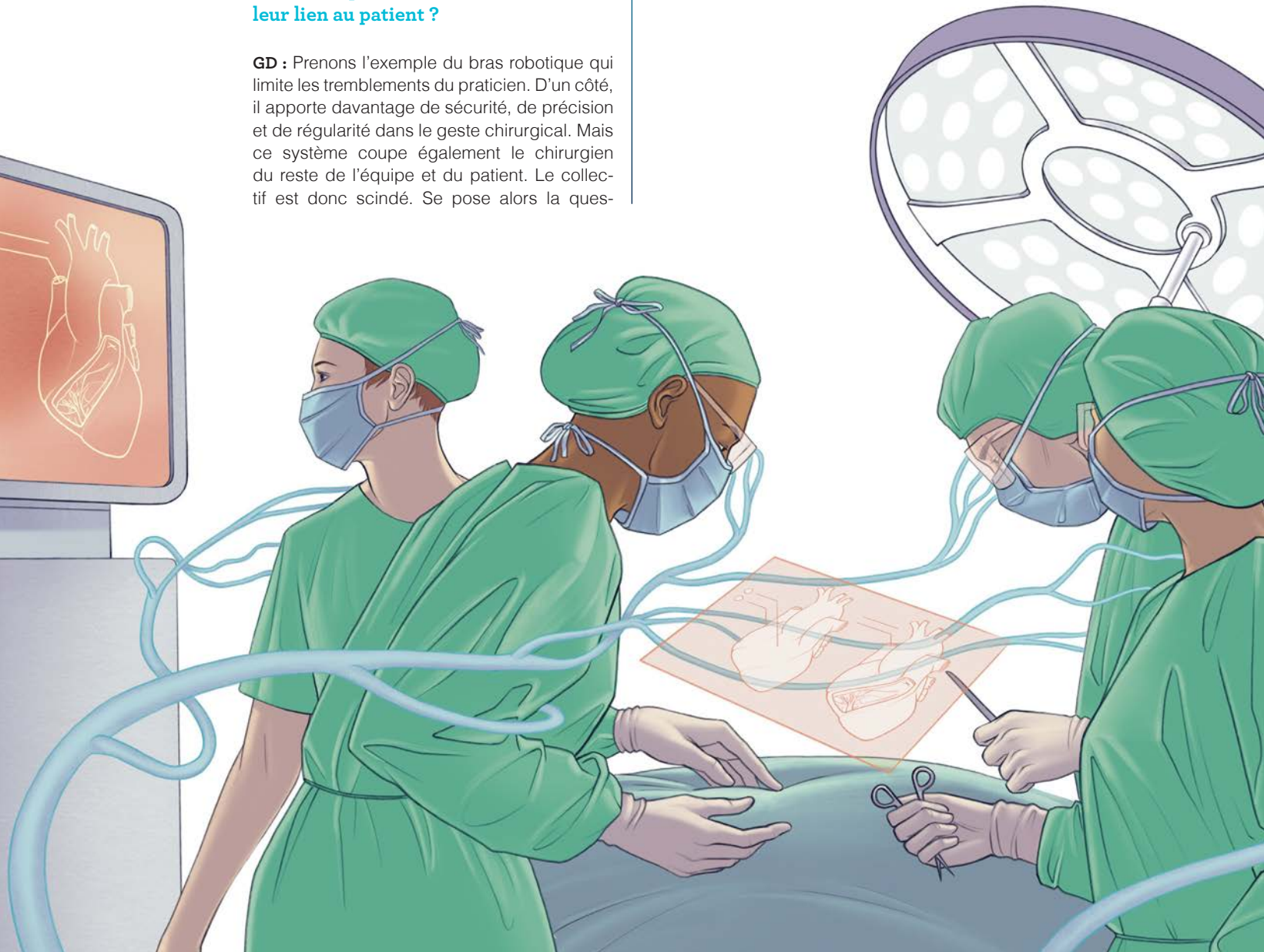
geables plutôt que d'équipes constituées dont la cohésion repose sur de l'interconnaissance, ils ne doivent pas se contenter de mesurer les gains locaux et ponctuels, mais tous les effets sur la durée. Comment cela va impacter l'engagement dans les différents métiers, par exemple ? Les gens finiront-ils par faire leur métier de façon formelle, à la façon d'un cahier des charges dont on remplirait les cases ? Derrière ces transformations, les liens de solidarité peuvent changer, l'organisation informelle du temps de travail peut être brisée.

L'insertion d'outils numériques impacte-t-elle déjà l'organisation au bloc entre professionnels de santé et leur lien au patient ?

GD : Prenons l'exemple du bras robotique qui limite les tremblements du praticien. D'un côté, il apporte davantage de sécurité, de précision et de régularité dans le geste chirurgical. Mais ce système coupe également le chirurgien du reste de l'équipe et du patient. Le collectif est donc scindé. Se pose alors la ques-

tion : jusqu'où peut aller la distanciation au patient sans perdre de vue la finalité du geste opératoire ?

Aujourd'hui, l'hôpital affiche sa volonté de mettre le patient au centre du système de santé. Or, paradoxalement, on rationalise et numérise de plus en plus d'actes ce qui a pour conséquence d'accroître la distanciation physique, émotionnelle et sensible au corps. En se rationalisant, c'est-à-dire en réduisant le temps consacré aux micro-médiations sociales – comme le temps de ceux qui sont au plus près du patient – l'hôpital ne risque-



t-il pas de se déshumaniser encore un peu plus ? Quelle place est au fond réservée au corps – pas seulement physiologique, mais le corps porteur d'une histoire singulière, d'une souffrance et d'espoirs – dans ce dispositif de plus en plus exclusivement tourné vers ce qui est quantifiable ?

« Quelle place est réservée au corps dans un dispositif tourné vers ce qui est quantifiable ? »

Il ne reste humain – au sens où c'est un lieu où l'on ne fait pas que traiter des pathologies où vivent des personnes – que s'il est soutenu par un collectif médical pour s'occuper de patients. En ce sens, tout ce qui menace l'intégrité du collectif de travail ne va pas dans le bon sens. Plus on va individualiser, plus on déshumanise les gens et moins ce sera humain. Plus on essaie de gagner du temps, plus on va dégrader le lien social qui ne peut, comme la médecine, s'élaborer que dans la durée. Il faut sans cesse relancer ce débat et réfléchir aux conditions qui permettent aux humains de donner un sens à ce qu'ils font, c'est-à-dire d'être autre que machinalement. L'innovation technologique ne sera socialement légitime qu'à cette condition. ▲



L'HÔPITAL, UNE INFRASTRUCTURE TECHNOLOGIQUE

UN ÉVENTAIL D'INNOVATIONS À L'HORIZON

Difficile de prédire à quoi ressemblera l'hôpital du futur. Sa transformation devrait néanmoins être marquée par l'émergence de technologies inédites en imagerie, d'outils numériques d'aide au diagnostic et de nouvelles méthodes de traitement des données médicales. Ces innovations pourraient apporter davantage de fiabilité et de précision dans les pratiques médicales. De quoi s'interroger sur les champs du possible de la médecine de demain. Illustration avec trois exemples de technologies émergentes.

1. RÉVOLUTIONNER L'IMAGERIE MÉDICALE AVEC UNE NOUVELLE GÉNÉRATION DE SCANNERS

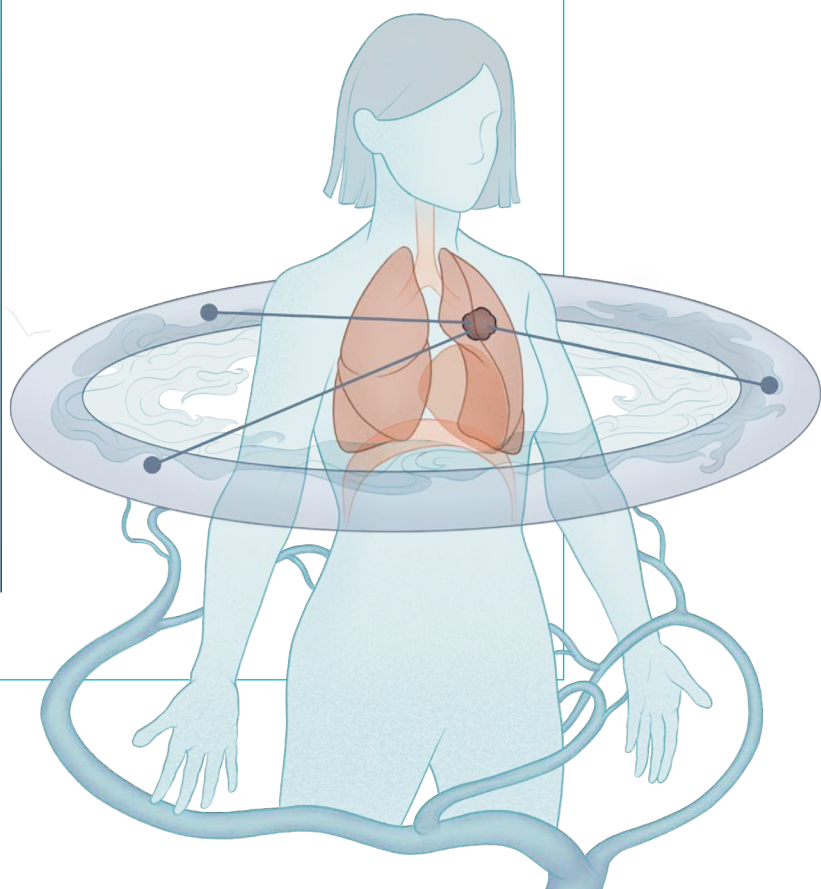
Obtenir 100 images médicales de très haute qualité là où un PET-scan n'en offre qu'une seule aujourd'hui : c'est l'enjeu des travaux de Dominique Thers, chercheur au laboratoire Subatech basé à Nantes. Le PET-scan est un mode d'imagerie utilisé pour détecter la présence d'une maladie ou évaluer son étendue. Elle impose d'injecter une petite dose de produit radioactif au patient afin d'accroître la qualité d'image, ce qui réduit le nombre d'observations.

« Cette modalité d'imagerie est née de recherches sur la matière noire de l'univers. »

L'équipe de Dominique Thers est la seule au monde à développer une technique d'imagerie à base de trois photons contre deux dans les méthodes actuelles. « *Cela nous permet de trianguler en 3D la position du médicament injecté avec davantage de précision et donc plus rapidement. C'est ce qui nous permet de réduire la quantité de produit de synthèse* », explique le chercheur en physique fondamentale d'IMT Atlantique, cotutelle du laboratoire Subatech. En augmentant le nombre d'observations sur une même durée, cette méthode permet donc de suivre plus régulièrement l'évolution d'une maladie. En oncologie, il serait possible, par exemple, de réorienter plus rapidement les patients vers d'autres traitements si celui appliqué n'est pas efficace.

Cette modalité d'imagerie s'appuie sur une caméra unique appelée Xemis et dont le

développement est né de recherches sur la détection de matière noire dans l'univers. Pour la version actuellement testée sur de petits animaux, la caméra se compose de 200 kg de xénon liquide, un gaz rare extrait de l'air par liquéfaction. Pour le moment, la production mondiale de cette matière première n'est que de 50 tonnes par an. Une utilisation massive qui devrait se répercuter sur le coût de la technologie, plus cher que les solutions actuelles, et donc limiter son intégration dans les hôpitaux. C'est pourquoi les chercheurs collaborent avec Air Liquide, premier producteur de xénon au monde, afin d'anticiper ces problématiques. Néanmoins, le xénon n'est pas consommé par la caméra et il ne vieillit pas. Ces dispositifs offrent donc une solution plus durable que les technologies existantes faites à partir de terres rares.



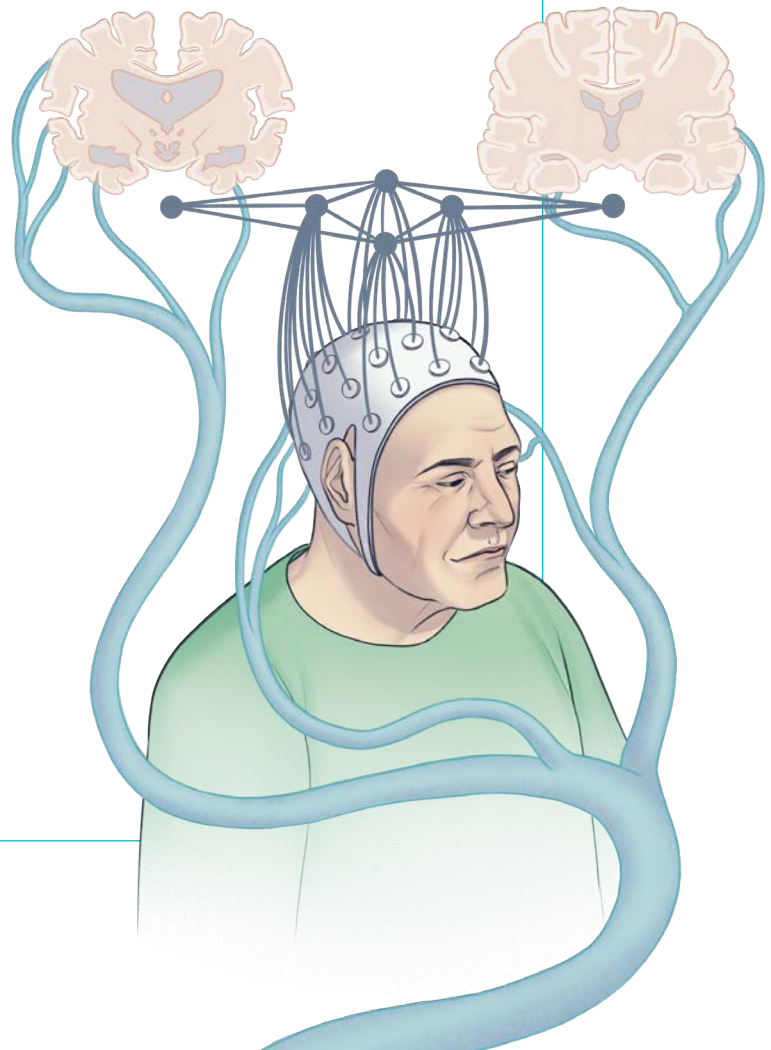
2. ENRICHIR LES PROTOCOLES DE DÉTECTION DE MALADIES NEURODÉGÉNÉRATIVES

L'utilisation d'algorithmes en routine clinique permettrait d'obtenir davantage d'informations sur l'état de santé d'un patient sans modifier les pratiques des médecins. Par exemple, l'électroencéphalogramme (EEG) est un examen dispensé dans les services de gériatrie à l'arrivée d'un patient. Il consiste en un réseau d'électrodes apposées sur le cuir chevelu qui mesure l'activité électrique du cerveau. Nesma Houmani, chercheuse en traitement du signal à Télécom SudParis, travaille sur ces données pour détecter des marqueurs caractéristiques de pathologies neurodégénératives, comme la maladie d'Alzheimer et la démence du corps de Lewy.

« Ces maladies se traduisent par une destruction progressive et irréversible de certains neurones ce qui altère la transmission d'informations d'une zone cérébrale à l'autre, explique la chercheuse. En pratique, cela se manifeste par une altération de la connectivité fonctionnelle mesurée sur des signaux capturés par différentes électrodes ». Analyser ces observations est fastidieux et demande beaucoup de temps. C'est pourquoi la chercheuse développe un logiciel de traitement automatique de données pour apporter une aide à la décision aux médecins.

Comment cette solution est-elle testée ? Afin de faciliter son intégration, Nesma Houmani travaille sur des données captées en conditions réelles. Parmi elles, des EEG de patients présentant plusieurs pathologies, qui sont par conséquent plus difficiles à diagnostiquer. « Nous voulons également aller jusqu'à la prédiction du risque de contracter une maladie neurodégénérative pour les cas de patients

qui ont tous les symptômes, mais pas encore les marqueurs correspondants », ajoute la chercheuse. À terme, ces travaux visent à mettre en place une interface unique capable d'identifier différentes maladies neurodégénératives lors d'un examen clinique. ▲

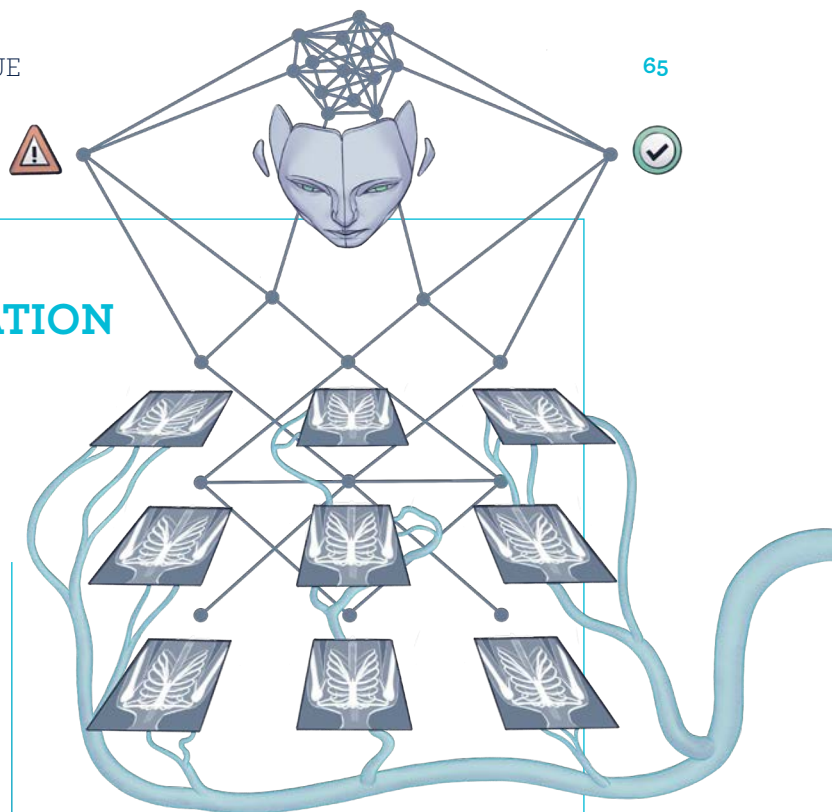


3. FACILITER L'UTILISATION DE L'IA EN PRATIQUE CLINIQUE

L'intelligence artificielle (IA) devrait apporter des avancées inestimables qui iront jusqu'à la prédiction d'un risque de maladie lors d'un examen clinique. Pour cela, elle a besoin de s'entraîner en consommant de très gros volumes de données. « *En réalité, il y a beaucoup d'informations cliniques sur des personnes saines, mais trop peu sur les maladies à diagnostiquer* », expose Maria A. Zuluaga, chercheuse en sciences de la donnée à EURECOM. Et plus une maladie est rare, moins il y a de données pour améliorer les connaissances sur le sujet.

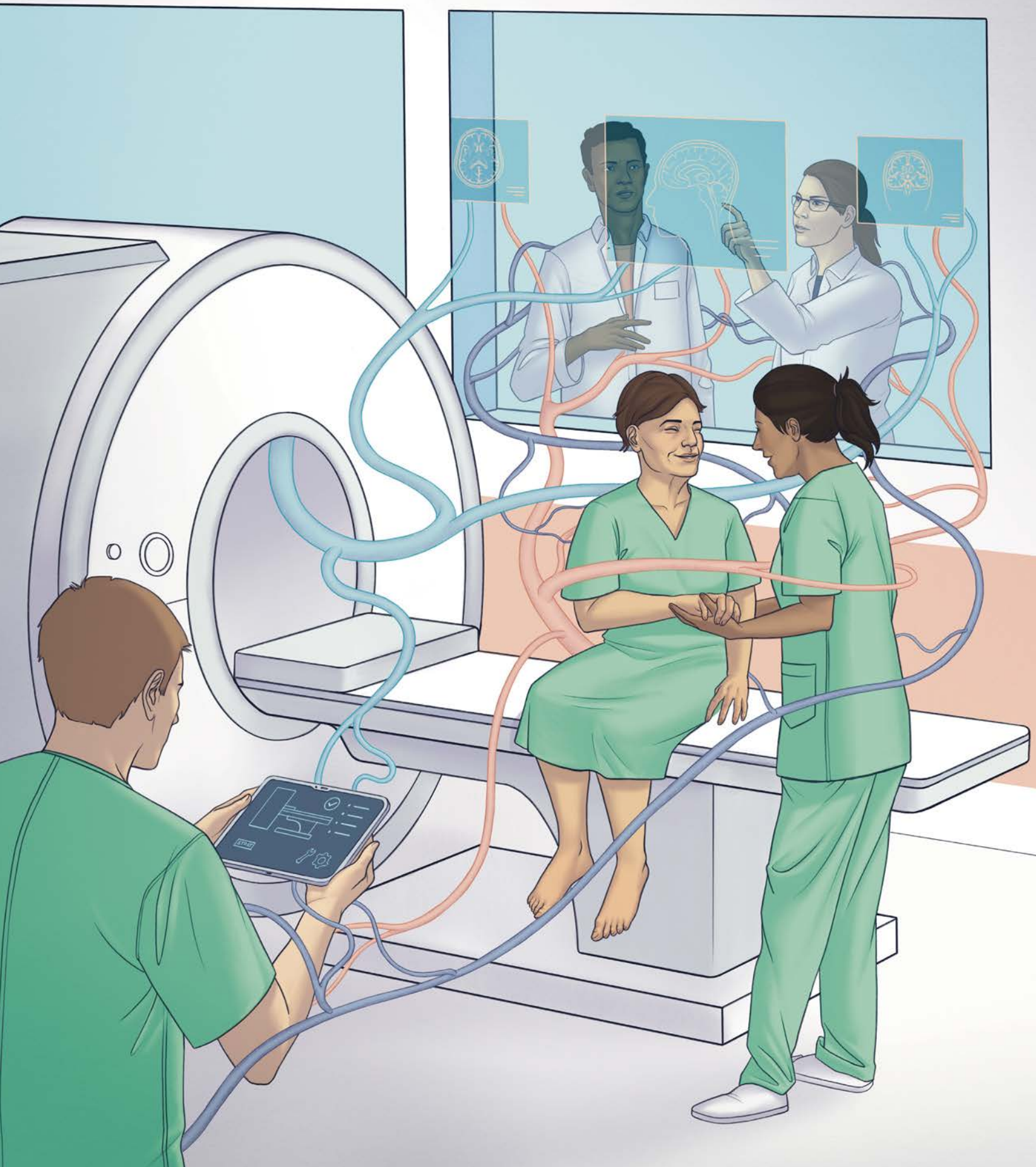
« L'IA en situation clinique demande des algorithmes qui apprennent au fur et à mesure. »

Utiliser des méthodes d'intelligence artificielle en situation clinique demande donc de développer des algorithmes qui apprennent au fur et à mesure que des données lui sont fournies. « *Le risque avec cette approche est que le système fonctionne très bien au début, mais que la fiabilité des recommandations s'amenuise avec le temps car le traitement appliqué par l'algorithme n'est peut-être pas scalable sur des jeux de données plus importants* », explique Maria A. Zuluaga. C'est pourquoi la chercheuse développe des méthodes capables de surveiller la qualité des résultats de ces algorithmes. Autrement dit, elle veut proposer aux médecins des solutions d'aide



au diagnostic capables d'auto-évaluer la fiabilité des résultats qu'elles préconisent.

Elle applique pour cela des solutions à base d'intelligence artificielle qui détectent des anomalies, non pas sur des données utilisées, mais sur les méthodes de traitement utilisées par l'IA. Les algorithmes développés mesurent la variabilité attendue d'un modèle. Dès lors qu'elle s'écarte trop de celle attendue, une alerte est envoyée à l'utilisateur qui décide de poursuivre ou non avec le modèle. À terme, l'IA détectera automatiquement les anomalies et sera capable de corriger seule son propre algorithme sans intervention humaine. De quoi faciliter l'intégration de l'IA en routine clinique sur tous types de maladies, même les moins communes. ▲



IV

VERS UN NOUVEAU SYSTÈME DE SANTÉ

1

PERSPECTIVES
ET MUTATIONS
DU SYSTÈME
DE SANTÉ

DESSINE-MOI
UN SYSTÈME
DE SOINS
PLUS DURABLE

2

PERSPECTIVES ET MUTATIONS DU SYSTÈME DE SANTÉ

Le système de santé doit s'adapter à des problématiques importantes où la révolution numérique joue un rôle crucial. Nadia Frontigny, directrice de mission santé à Orange Business Services, explique les mutations du secteur de la santé et présente les directions importantes dans lesquelles il doit s'engager selon elle.

Quels sont les problèmes systémiques associés à la gestion de la santé en France ?

Nadia Frontigny : Notre système de santé tel que nous le connaissons a été construit après 1945, à une époque où la longévité moyenne était de 60 ans et où la plupart des maladies traitées étaient infectieuses et non chroniques. Aujourd'hui, la longévité est autour de 80 ans et de plus en plus de maladies prises en charge sont des maladies chroniques. Notre système de santé doit donc complètement se réadapter. La population vieillit et il est dès lors indispensable de remettre le patient au centre et d'investir dans un champ nouveau qu'est la prévention. La santé n'est pas que sanitaire: elle inclut aussi le bien-être, la qualité de vie, le social et le médico-social. La santé n'est pas que personnelle, elle concerne toute une population qui aspire à mieux vivre. En France, le système de santé est administré et très réglementé. Cependant il n'est pas encore organisé comme un écosystème structuré et

cohérent, et il est donc fondamental de le restructurer.

Quelles sont les évolutions importantes du système de santé ?

N.F : Le système de santé est un système de services qui bénéficie constamment de l'apport des développements technologiques. Par exemple, la rupture technologique des télécommunications il y a 20 ans a fait émerger les hotlines qui ont permis de mieux coordonner les structures et d'apporter une grande interopérabilité. Aujourd'hui ces *hotlines* dans les services sont en train d'être réduites au profit des interfaces numériques, à l'image des banques qui ferment des agences et qui favorisent les opérations totalement dématérialisées. La révolution numérique change profondément le secteur de la santé, si bien que nous parlons aujourd'hui de "santé numérique". Cela implique que les métiers associés devront également évoluer, et que l'accès au service de soins et d'accompagnement sera principalement numérique, pour une plus



grande efficacité au bénéfice des professionnels et des particuliers.

Une deuxième révolution majeure est la santé populationnelle, où une meilleure allocation possible de ressources, pour une meilleure santé de l'ensemble de la population suivant ses besoins, devient cruciale. Cela consiste notamment à comprendre la place de la santé dans la société et de savoir comment croiser les données de santé et d'environnement pour une meilleure prévention. Par exemple, il y a un lien direct entre la pauvreté et le taux d'amputation. Ce raccourci brutal s'explique par le fait que la pauvreté implique souvent une mauvaise alimentation qui conduit au diabète, parfois grave, et aux amputations. La qualité de vie est directement liée à l'environnement et il s'agit donc de comprendre la santé dans ses différents contextes. La promotion de la santé populationnelle dépend donc aussi des acteurs du numérique car il s'agit de collecter des informations de vie réelle puis de les exploiter intelligemment pour une meilleure santé globale.

Pourquoi ce sujet intéresse-t-il un acteur des télécommunications comme Orange ?

N.F : Les opérateurs fournissent depuis toujours les acteurs de santé en infrastructures de communication et en plateformes numériques. Mais les opérateurs vont au-delà, notamment avec les technologies comme l'intelligence artificielle, l'interopérabilité, la cybersécurité et la traçabilité. Par exemple, Orange apparaît dans les grands programmes du ministère des Solidarités et de la santé comme la création des groupements hospitaliers de territoires et avec des applications clé comme le portail Système d'information national de dépistage populationnel de la Covid-19 (SI-DEP). Chez Enovacom, qui est filiale santé d'Orange, il y a quatre axes principaux concernant les données de santé : l'hébergement des données de santé et leur accès sécurisé, l'interopérabilité, la gestion des parcours de soin et le stockage intelligent des données.

Comment structurer les territoires de santé numérique ?

N.F : Les investissements numériques dans le sanitaire, le social et le médicosocial ne peuvent être efficaces sans vision cible d'organisation humaine et technique. L'urbanisme du système d'information (SI) qui traduit cette organisation technique cible, n'a été initiée par l'Agence du numérique en santé (ANS) que début 2019 : on peut le regretter car depuis trop longtemps, la France investit dans des plans numériques décousus et des expérimentations sans capitalisation technique possible. Cependant, le sens est à présent donné et le Ségur de la Santé a été l'objet d'annonces de financement conséquent, dont la mise en œuvre doit suivre à présent.

**« Sans vision,
les investissements
numériques dans le sanitaire,
le social et le médicosocial
ne peuvent être efficaces. »**

Pour ce qui concerne la santé populationnelle et sa déclinaison territoriale, qui devrait inclure la télésurveillance, du chemin reste encore à parcourir. De même, les compétences et le déploiement des technologies pour limiter les conséquences des cyberattaques du système de santé dans chaque territoire doivent encore être renforcés et mieux structurés.

Comment améliorer le développement de l'industrie en santé ?

N.F : Le domaine de la santé en France est réglementé et la commande publique structure la filière industrielle de la santé qui comprend les industries du médicament, des équipements médicaux et du numérique en santé. Une réflexion devrait être engagée pour

« Une réflexion devrait être engagée pour faire émerger une filière numérique forte et structurée. »

faire émerger une filière numérique forte et structurée. Par exemple, le Ségur médico-social d'août 2020, qui finance la modernisation digitale de 44 000 établissements sociaux et médico-sociaux, prévoit un déploiement par « grappe » de 15 établissements, avec des circuits de décisions et de validations complexes. De même, la loi de financement de la sécurité sociale de 2022 fait entrer la télésurveillance de certaines pathologies – le diabète, l'insuffisance cardiaque chronique, l'insuffisance rénale chronique et l'insuffisance respiratoire chronique – dans le droit commun, mais avec quelle réponse industrielle possible quand la demande est émettée ?

L'excellence de notre système de santé et celle de son industrie doivent être débattues et planifiées conjointement, avec une gouvernance et une visibilité données sur plusieurs années. ▲

VERS UN NOUVEAU SYSTÈME DE SANTÉ

DESSINE-MOI UN SYSTÈME DE SOINS PLUS DURABLE

La crise sanitaire a souligné les failles de notre système de soins. Si l'innovation jouera un rôle important pour améliorer la prise en charge des patients, c'est le système tout entier qui doit être repensé et transformé afin d'assurer sa viabilité sur le long terme. Une piste : fédérer les acteurs à l'échelle des territoires.

« Pour avoir un système de santé publique qui soit viable et durable au-delà de 2030, la France doit miser sur la prévention par le suivi personnalisé et retarder le plus longtemps possible l'arrivée massive des patients à l'hôpital », défend Mounir Mokhtari, professeur de l'IMT en santé digitale et du bien-vieillir. Jusqu'à présent, la prévention a surtout été une affaire de choix et de motivations individuels (avoir une alimentation équilibrée, faire de l'exercice, veiller à son sommeil, etc.). Pourtant, entre l'accroissement du vieillissement de la population, la prolifération des maladies chroniques et des déserts médicaux, la vague qui mettra à mal le système de soins français, encore trop réactif, ne devrait plus tarder à déferler. Et c'est au niveau des territoires que se joue l'avenir de ce système.

« De par leur connaissance terrain, les territoires ont identifié les problématiques sanitaires majeures à aborder, mais manquent

d'experts pour y répondre, précise le chercheur. Notre ambition est avant tout de réunir des acteurs et des données pour répondre rapidement à leurs besoins ». Le Centre d'excellence en santé digitale et du bien-vieillir¹, que le chercheur est en train de créer depuis 2021, réunit pour cela un collectif de chercheurs, de collectivités territoriales, d'acteurs hospitalo-universitaires et d'industriels. Leur objectif : donner un coup d'accélérateur à des résultats de recherches prometteurs et favoriser leur transfert vers l'industrie pour un déploiement à grande échelle dans différents territoires. Et comme les problématiques sanitaires et sociétales ne sont pas l'affaire d'un seul territoire, le programme mise sur le transfert de bonnes pratiques déjà existantes.

Dépoussiérer les solutions qui stagnent sur les étagères

Depuis 2015, le Conseil de promotion de la santé à Singapour promeut le *National Steps*

¹. Le Centre implique 6 territoires français (Métropole de Rennes, Ville de Nice, Métropole de Strasbourg, Territoire Sud Est Avenir de Créteil, Ville de Saint-Etienne et la ville de Castres), des métropoles européennes (Madrid et Milan) et internationales (Singapour et New York).

Challenge. Un programme qui incite les gens à faire 10 000 pas quotidiens en vue de lutter contre la progression du diabète de type 2. Les participants volontaires se voient remettre une montre connectée pour les accompagner dans leur démarche sportive. Ils reçoivent des bons de réduction lorsqu'ils accomplissent les objectifs visés. Cet exemple illustre un point clé : pour répondre aux problématiques de santé publique qui les embolissent, les territoires doivent être proactifs ; embarquer les citoyens, et pas seulement les professionnels de santé.

« Pour répondre aux problématiques de santé publique, les territoires doivent être proactifs. »

En ce sens, à compter de 2022, l'arrivée de « mon espace santé » permettra aux citoyens français de redevenir souverains de leurs propres données. La mise en place de la plateforme offre de nouvelles opportunités de transfert de solutions de prévention existantes, mais non-utilisées. « *Nous avons développé un modèle prédictif du risque de diabète de type 2 et des maladies respiratoires en milieu urbain à partir d'informations comme le tour de taille, le poids, la mobilité, le sommeil, la nutrition, la qualité de l'air, etc. Si l'on identifie une personne à risques, alors on peut envisager de proposer, via d'autres applications, des informations adaptées et des programmes d'intervention pour l'accompagner* », décrit Mounir Mokhtari. C'est donnant-donnant. Plus la personne partage ses informations de bien-être, plus il lui sera possible de bénéficier d'outils qui lui permettront de prendre sa bonne santé en main. L'objectif ultime serait que la prévention soit prise en charge par l'assurance maladie, comme le sont les soins. Les

territoires s'intéressent également à des solutions d'accompagnement pour le bien-vieillir.

Stopper l'hémorragie financière de la vieillesse

En France, le montant des soins de longue durée aux personnes âgées représente 11 milliards d'euros par an. Et la facture ne cesse de s'allonger d'après le rapport « Faire de la France une économie de rupture technologique » commandité par le ministère de l'Économie, des finances et de la relance, et le ministère de l'Enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation en 2020. « *Si le système ne change pas, plus on va avancer, plus on va réduire les coûts sur les prescriptions des médecins, les remboursements, etc. et cela deviendra problématique* », décrit Mounir Mokhtari. Si la pilule miracle qui nous empêche de vieillir n'a pas encore été inventée, il existe néanmoins des solutions pour prévenir le vieillissement accéléré des personnes fragiles.

Le centre d'excellence propose ainsi d'investiguer le modèle d'un Ehpad sans murs. Comprenez ici, la volonté de favoriser le maintien à domicile et la mobilité de nos aînés en déplaçant les services dispensés en Ehpad vers leurs lieux de vie. À nouveau, le territoire va jouer un rôle prépondérant. En effet, l'objectif est de transformer l'environnement de ces personnes en une source d'informations facilitant le suivi non-intrusif de leur état de santé et de bien-être. « *Nous avons déjà mené plusieurs expériences à Singapour et en France sur le suivi d'activités simples de la vie quotidienne (mobilité, nutrition, hygiène, etc.) pour détecter précocement une dégradation de l'état de santé ou de la qualité de vie d'une personne* », explique le chercheur.

Par exemple, des capteurs de présence sont placés dans l'environnement extérieur (marché, pharmacie, etc.) sous forme de bornes. Celles-ci détectent la présence ou non de la personne âgée équipée d'une montre connectée à des moments clé de son



quotidien. L'objectif est alors de détecter un changement de comportement, prélude à un risque. Si pendant une durée anormale, une personne ne sort plus de chez elle, alors elle est contactée directement (ou son entourage) afin d'évaluer la situation. « *Ce type de solution numérique soutient le bien-vieillir, c'est-à-dire le maintien dans la communauté, et contribue à la prévention de risques potentiels sur des personnes saines en dehors du système hospitalier* », ajoute Mounir Mokhtari. Et si cela marche, c'est grâce aux données qui sont générées et analysées.

« Les données de bien-être captées par les objets connectés contribuent à la prévention en santé publique. »

Le nerf de la guerre, c'est la donnée

Jusqu'à présent, bien que de nombreuses initiatives existent déjà au niveau des territoires, elles souffrent généralement d'un manque de continuité. « *Quand un projet s'achève, les données sont perdues. Notre premier objectif est donc d'enrichir les entrepôts de données dans les territoires et de favoriser le partage d'informations sans constamment avoir à repartir de zéro* », explique Mounir Mokhtari. La donnée – élément fondateur du renouveau des systèmes de soins – aidera les territoires à définir une politique de santé publique et de bien-être de leurs citoyens et citoyennes..

Pour cela, le centre d'excellence en santé digitale et du bien-vieillir a créé la plateforme PULSE. Elle agrège de façon sécurisée des données sur la santé (dossiers médicaux, prescriptions, etc.), le bien-être (collectées par les objets connectés, smartphones, etc.), ou encore la qualité de l'air. L'ambition est de

la faire évoluer pour assurer un partage sécurisé d'informations grâce à des techniques basées sur une *blockchain*. Une nouvelle plateforme, appelée FAIR Hub, permettra ainsi de soutenir l'émergence d'outils intelligents et d'IA de confiance, capables d'interpréter les interactions entre différents paramètres selon les cibles intéressées. Par exemple, grâce à une approche populationnelle, les agences de santé pourront mieux comprendre pourquoi elles observent la prévalence de certaines maladies sur un territoire. Elles identifieront également les meilleures politiques à adopter afin d'y remédier. L'interconnexion d'informations se veut initiatrice d'une interconnexion d'acteurs.

« *Nous entendons beaucoup parler des données de santé qui restent très limitées dans le but de faire de la prédiction sur l'état médical d'une personne. En revanche, les données de bien-être captées par les objets connectés – qui appartiennent aux industriels qui ont conçu l'outil – contribuent directement à la prévention en santé publique. Les États seront amenés à s'associer aux grands groupes du numérique pour renforcer la prévention en santé publique* », relève Mounir Mokhtari. L'intérêt croissant de ces entreprises pour le secteur médical contribue déjà à l'accélération de la filière santé digitale. Le marché mondial de cette dernière devrait d'ailleurs observer un taux de croissance annuel moyen de 10 % jusqu'en 2030.

La santé digitale est en ce sens un marché stratégique sur lequel pourrait se positionner la France. Il s'agit d'ailleurs d'une des recommandations du rapport « Faire de la France une économie de rupture technologique » déjà cité. Dans ce paysage pavé d'enjeux politiques, économiques et d'innovations, les collaborations entre recherche et industrie seront incontournables. Elles permettront d'aboutir à l'industrialisation de solutions pérennes, à la transformation d'un système de soins plus durable et au soutien de la souveraineté nationale. ▲



L'IMT et la Fondation Mines-Télécom tiennent à remercier les enseignants-chercheurs, les experts d'entreprise, et les mécènes pour leur participation à ce 13^e cahier de veille.

Directrice de la publication :

Odile Gauthier

Rédacteur-en-chef :

Benjamin Vignard

Secrétaire de rédaction :

Véronique Charlet

Rédacteurs :

Antonin Counillon, Anaïs Culot

Création graphique et illustrations :

Diane Rottner

Comité éditorial consultatif :

Zoélie Adam-Maurizio, Dominique Balbi, Yannick Deroche, Emmanuel Gruson, Pierre Lebon, Nicolas Monsarrat, Céline Morel, Catherine Tonlorenzi, Benjamin Vignard

Conception éditoriale :



Institut Mines-Télécom

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



FONDATION
Mines-Télécom

La Fondation de l'IMT

Fondation Mines-Télécom,
17 rue de l'Amiral Hamelin
75016 Paris

contact@fondation-mines-telecom.org

**Imprimé en mai 2022 par Imprimerie Escourbiac,
sur papier 100 % recyclé**

ISBN 978-2-9574278-1-9



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



AIRBUS



sopra  steria



StreamWIDE

ISBN 978-2-9574278-1-9