



© G. Godeffroy / Shutterstock

Le génie électrique et le secteur de la santé

Vers des avancées au service du diagnostic et de la thérapie

Introduction

Marc Petit

Professeur à CentraleSupélec

La santé, un enjeu sociétal pour l'innovation

La santé est un enjeu sociétal fort au même titre que l'énergie et l'environnement. Par exemple, en France, ces trois enjeux sont des piliers des stratégies de recherche, comme en atteste la feuille de route¹ de 2020 de l'ANR (agence

La santé est une préoccupation sociétale forte avec le besoin de fournir au plus grand nombre une médecine de qualité et à coût raisonnable. Pour répondre à ces objectifs, les praticiens sont toujours à la recherche d'innovations technologiques. Les sciences de l'ingénierie, dont le génie électrique, apportent leurs contributions dans le cadre de travaux collaboratifs avec des équipes de santé.

nationale de la recherche). Cette feuille de route identifiait des domaines scientifiques, mais également des domaines transversaux, dont un sur les « technologies pour la santé ». Cette orientation n'est pas récente car dès le début des années 2000 l'ANR avait lancé le Réseau National des Technologies pour la Santé (RNTS) qui visait à promouvoir les applications des nouvelles technologies au domaine de la santé, autour de thèmes stratégiques, en soutenant des projets portés

par des industriels, des chercheurs, des cliniciens². Aujourd'hui, le champ des technologies et domaines scientifiques dont les applications s'étendent vers la santé est extrêmement large : l'électromagnétisme, les matériaux, la robotique, la physique des capteurs, l'ingénierie des systèmes, le traitement du signal,

¹ ANR, « Plan d'action 2020 »

² <https://anr.fr/fr/detail/call/technologies-pour-la-sante-rnts/>

l'intelligence artificielle pour l'analyse de données, etc. Les applications peuvent concerner par exemple le diagnostic de pathologies (imagerie médicale, spectroscopie), les solutions thérapeutiques (organes synthétiques internes ou externes au corps humain), les équipements opératoires (robots d'assistance à la chirurgie, instruments pour l'imagerie), le suivi de patients (capteurs embarqués, mesures de paramètres).

La recherche médicale vise à développer des diagnostics, des méthodes opératoires, et des traitements pour identifier au plus tôt les pathologies, faciliter les interventions chirurgicales, et proposer des traitements avec des solutions les moins intrusives et douloureuses pour les patients. Tous ces efforts contribuent à l'augmentation de la durée de vie.

Par ailleurs, le vieillissement de la population dans les sociétés occidentales annonce des sollicitations de plus en plus importantes à l'avenir pour les structures médicales. Etant entendu que le cadre de vie est un facteur important de guérison, des solutions se développent également pour permettre aux patients de suivre leur protocole de soins à domicile.

Au-delà de ce qui se passe en France, on observe des orientations similaires à l'étranger avec une plus forte interaction entre des départements d'«*Electrical and Computer Engineering*» et des cliniciens. Par exemple l'université GeorgiaTech (Atlanta) mène des recherches dans le domaine de la robotique biomédicale, des capteurs et de l'instrumentation, du traitement d'image, ou encore de la chirurgie robotisée.

Ces activités sont au croisement de la mécanique, du génie électrique, des matériaux, de la médecine, et sont menées en étroite collaboration avec des cliniciens. Dans le monde entier, les équipes d'ingénierie ont très bien compris la nécessité d'une telle collaboration transverse, et les équipes médicales sont également très demandeuses d'innovations technologiques.

“ Le vieillissement de la population dans les sociétés occidentales annonce des sollicitations de plus en plus importantes à l'avenir pour les structures médicales. ”

Ces enjeux autour des technologies pour la santé impliquent aussi des industriels pour produire et commercialiser les nouvelles solutions qui seront utilisées. Des industriels qui peuvent intervenir dans les phases de R&D (développement d'équipements d'expérimentation et de mesures, d'outils de modélisation), ou dans les phases plus aval pour transformer le prototype de laboratoire en un équipement utilisable en environnement médical à un coût acceptable. Dans le cadre d'innovations, la mise sur le marché peut se faire via des grands groupes lorsque cela met en œuvre des savoir-faire et des processus existants et bien maîtrisés, ou via des PME et start-up pour des marchés de niche qui demandent une certaine agilité opérationnelle.

En France, une illustration de cet effort visant à renforcer les collaborations entre les parties prenantes est le Paris Saclay Cancer Cluster (PSCC) qui vise la création d'un centre d'excellence au niveau mondial pour la cancérologie. Premier lauréat du programme France 2030, et en fonctionnement opérationnel depuis février 2023, il rassemblera sur un même territoire les compétences académiques de recherche, de formation et de soin, avec les industriels de la santé et des biotechnologies et les investisseurs pour accélérer le développement de solutions industrielles innovantes.

La santé, un enjeu pour les formations d'ingénierie

Cet enjeu sociétal est également pris en considération dans des cursus de formation scientifique qui proposent désormais des ouvertures vers le domaine de la santé. Cette tendance s'observe dans de nombreux pays car il apparaît clairement que les communautés doivent mieux in-

teragir pour concevoir les technologies de demain.

L'université de Queensland en Australie, dispense un bachelor en « *electrical and biomedical engineering* ». L'objectif est d'avoir une approche transverse entre technologie, médecine et biologie.

Aux Etats-Unis, l'université GeorgiaTech offre des masters en « *biomedical engineering* » et en « *biomedical innovation* ».

Au Canada, l'université de British Columbia propose aux étudiants une option « *biomedical engineering* » au sein du cursus « *electrical engineering* ». Il s'agit de dispenser aux étudiants des cours et des projets sur l'application des technologies à la médecine et aux sciences du vivant. Cette offre est née du constat qu'il y a une demande de plus en plus forte venant de l'industrie (dispositifs médicaux et biotechnologies) compte-tenu du vieillissement de la population ou de l'évolution des technologies.

Les universités et écoles françaises ne sont pas en reste puisqu'elles s'efforcent également de permettre des cursus transverses (exemples non exhaustifs) :

- L'UTC (Compiègne) a développé une filière Biomédicale avec des enseignements sur l'instrumentation, les capteurs, l'électronique, le traitement d'images, ...

- CentraleSupélec offre à ses étudiants de 3^{ème} année une mention de spécialisation sur les applications vivant et santé (santé et soins et services en biomédical) en mettant l'accent sur l'imagerie, les systèmes médicaux, et les services (objets connectés, organisation d'un hôpital).

- PolytechLyon dispose d'une spécialité en génie biomédical pour la conception et la

“ Au Canada, l’université de British Columbia propose aux étudiants une option « *biomedical engineering* » au sein du cursus « *electrical engineering* ». Il s’agit de proposer aux étudiants des cours et des projets sur l’application des technologies à la médecine et aux sciences du vivant.”

●●● gestion de dispositifs médicaux (diagnostic, traitement, assistance).

- L’université Paris-Saclay offre parmi les masters de la mention 3EA (électronique, énergie électrique, automatique) un master M2 en imagerie biomédicale. L’université a également lancé en 2021 le programme AVERROES pour mettre en place des passerelles afin de permettre à quelques étudiants sélectionnés des doubles formations en ingénierie et santé.

La santé au sein des sociétés savantes d’ingénierie

Il est à noter que l’IEEE dispose d’une société EMBS ³ (*Engineering in Medicine & Biology Society*) qui regroupe plus de 10 000 membres et plusieurs comités techniques autour des bio-nanotechnologies et bioMEMS (systèmes micro-électromécaniques), du traitement du signal et d’images, de la neurologie, ou encore de l’informatique (pour de la médecine préventive et personnalisée).

Tous ces éléments montrent que les liens sont déjà forts et sont amenés à se renforcer davantage entre les domaines « *electrical engineering* » et « *biomedical engineering* », avec la mise en place d’approches plus transversales (incluant le facteur humain) pour apporter les solutions technologiques les plus adaptées. En particulier, la réalisation de projets communs entre des

équipes d’ingénierie et de médecine est un passage obligé.

Le domaine du génie électrique est très large car nous avons l’habitude de dire que cela va du matériau au système, et avec une dimension temporelle (ou fréquentielle) également large dans les phénomènes étudiés. D’un point de vue du système, il faut également considérer son intégration par rapport au corps humain et donc un besoin de commande (au sens du contrôle) pour optimiser son comportement.

Le contenu du dossier

Bien-sûr, ce seul dossier ne suffira pas pour rendre compte de toutes les innovations développées conjointement entre les équipes médicales et de génie électrique. Notre objectif est de mettre en lumière certains travaux récents menés entre équipes d’ingénierie et des équipes médicales afin d’apporter de nouvelles solutions pour le diagnostic, la chirurgie, ou le traitement de pathologies. Ce dossier propose quatre contributions pour lesquelles les auteurs ont présenté leurs innovations avec un souci de vulgarisation et sans développements mathématiques, physiques, chimiques ou biologiques complexes. Alors qu’en arrière-plan ils peuvent être nombreux.

Applications biomédicales des plasmas froids (Emmanuel Odic, Nofel Herbahi)

Cet article propose d’illustrer l’utilisation de plasmas générés par des décharges

électriques pour des applications biomédicales. Ce domaine scientifique est à l’interface des domaines génie électrique, physico-chimique, et biomédical. Les laboratoires de génie électrique sont présents sur ce type d’activité car il faut une maîtrise de la source électrique, et une expertise pour contrôler la nature des décharges électriques. Ces phénomènes de décharges électriques étaient étudiés originellement dans le cadre de systèmes électrotechniques (vieillessement des isolants diélectriques, foudre, décharge couronne sur les lignes aériennes de transport d’électricité,...). Cette expertise dans le domaine des décharges électriques s’est étendue à la caractérisation physico-chimique avec l’analyse des espèces créées lors des processus collisionnels en fonction des gaz injectés, puis cela a permis de trouver de nouveaux champs d’applications, tels que le domaine biomédical. Parmi les applications, l’article présente le cas de la bio-décontamination de surface de dispositifs médicaux thermosensibles, puis celui plus large dénommé plasma médecine pour l’amélioration de la coagulation sanguine, la cicatrisation de plaies, la destruction de cellules cancéreuses. Ces sujets présentent des perspectives très encourageantes bien qu’il reste encore beaucoup à faire car les réglages des conditions opératoires sont fins et multiples selon les applications.

Outils innovants pour la chirurgie cardiaque et cardiovasculaire (Marine Bordet, Pierre-Jean Cottinet)

Cet article décrit l’utilisation de matériaux multifonctionnels pour faciliter des interventions chirurgicales. Ces matériaux du génie électrique (piézoélectrique, électrostrictif, magnétostrictif,...) génèrent une réponse en fonction de l’application d’une sollicitation électromagnétique ou mécanique, et ils peuvent jouer le rôle de capteur (une sollicitation externe donnera une réponse électrique ou magnétique). Les

³ <https://www.embs.org/about/>

chirurgiens sont à la recherche d'outils permettant d'améliorer la qualité de leurs interventions et de réduire les risques associés. Après un descriptif de ces matériaux multifonctionnels, deux exemples sont proposés comme illustrations. Tout d'abord, le cas de la réparation de la valve mitrale. Cette valve se situe au niveau du cœur entre l'oreillette et le ventricule gauche. Quand ce ventricule se contracte (systole ventriculaire) le sang est éjecté vers l'aorte ascendante à travers la valve aortique. Pour éviter que le sang reflue anormalement vers l'oreillette gauche, la valve mitrale doit se fermer. Mais il peut y avoir une perte d'étanchéité. La réparation de la valve doit être évaluée/mesurée. C'est là qu'interviennent les matériaux pour mesurer les forces de coaptation. Un second exemple proposé est celui du fil guide pour amener un objet/matériel (par exemple un stent) dans un vaisseau cible : l'application d'un champ électrique sur le matériau électroactif (fil guide) permet de faciliter son déplacement dans le vaisseau. Ces deux exemples pour lesquels il reste des verrous scientifiques et technologiques (pour concevoir, optimiser et fiabiliser des dispositifs innovants), montrent que la collaboration entre équipes pluridisciplinaires est un facteur clé de succès.

De l'automatique dans les synapses

(Antoine Chaillet, Stéphane Palfi)

Cet article s'intéresse à la maladie de Parkinson qui est la deuxième maladie neurodégénérative la plus fréquente, après la maladie d'Alzheimer. Un des traitements est la stimulation cérébrale profonde qui consiste à délivrer des petites impulsions électriques entre des électrodes implantées dans des zones du cerveau profond. L'article explique comment la science de la boucle fermée, maîtrisée par les automaticiens (et très couramment utilisée dans les systèmes électriques), contribue à adapter les impulsions électriques émises. Cette science s'appuie sur trois composantes

clés qui sont rappelées et discutées : les mesures, l'actionnement (les électrodes), et un modèle mathématique du système (les structures cérébrales impliquées) dont les équations ont des similitudes avec celles des circuits électroniques, ce qui permet d'utiliser des modèles équivalents électriques comme cela peut se faire aussi pour des systèmes thermiques (la nature est assez conservatrice !). Dans le cas traité, la question du modèle est importante et donne lieu à discussion compte-tenu des symptômes moteurs de la maladie qui résultent d'oscillations intempestives de structures cérébrales dans la gamme fréquentielle bêta (13-30 Hz).

Une application clinique pour le suivi de l'activité physique (Guy Carrault)

Ce projet (SHERPAM) a rassemblé plusieurs équipes de recherche bretonnes, en médecine et en ingénierie, et visait à développer une application clinique pour le suivi de l'activité physique de personnes atteintes d'insuffisances cardiaques ou respiratoires, ou de maladies artérielles périphériques. L'analyse d'un certain nombre de données (dont les électrocardiogrammes) permet d'envisager une détection précoce ainsi qu'un suivi pour les personnes en rémission à leur domicile. La solution envisagée a une vocation clinique contrairement à des solutions du marché qui sont davantage dédiées aux loisirs. Les défis du

L'auteur

Marc Petit est Professeur d'universités à CentraleSupélec et membre émérite de la SEE, dont il anime le Comité scientifique et technique (CST).



Il mène des travaux de recherche sur les *smart grids* au sein du Laboratoire GeePs où il est responsable de l'équipe « Réseaux électriques ». Depuis 2012, il est co-titulaire de la Chaire Armand Peugeot sur l'électromobilité avec des travaux sur l'intégration des véhicules électriques dans les *smart grids*.

projet ont porté sur des problématiques de transmission de flux de données avec plusieurs technologies de réseaux sans fils (selon la couverture locale), puis sur l'analyse des données pour le diagnostic médical, enfin sur le degré d'acceptabilité/d'appropriation de la solution. L'article décrit les différentes phases de conception du système, la gestion des données, puis la phase d'essais cliniques avec un échantillon de personnes.

Toutes ces contributions ont pu donner lieu à des collaborations étroites entre des praticiens et des équipes de recherche. De telles collaborations sont les clés des succès futurs. ■

Les articles

Applications médicales et plasmas froids	p.44
Développement d'outils innovants pour la chirurgie cardiaque et cardiovasculaire	p.52
De l'automatisme dans les synapses : stratégies de stimulation cérébrale en boucle fermée pour le traitement de maladies neurologiques	p.59
Projet SHERPAM : une application clinique pour le suivi de l'activité physique	p.66