

Développement d'outils innovants pour la chirurgie cardiaque et cardiovasculaire

Le potentiel des matériaux multifonctionnels

Marine Bordet

Chirurgienne vasculaire, Hospices Civils de Lyon (HCL)

Pierre-Jean Cottinet

Enseignant-Chercheur au LGEF, INSA Lyon

Depuis plusieurs années, les matériaux multifonctionnels ne cessent d'évoluer en termes de propriétés, de techniques de mise en œuvre et de performance. La diversité des produits accessibles offre de nouvelles perspectives dans de nombreux secteurs tels que l'automobile et l'aéronautique mais aussi dans les domaines du médical et biomédical. Ce dernier requiert, pour certains procédés, des dispositifs de petite taille ou de faible encombrement, de grande fiabilité et biocompatibles.

Qu'est-ce qu'un matériau multifonctionnel et quels sont les enjeux en termes d'innovation ?

Le développement actuel de matériaux multifonctionnels ou intelligents favorise une réelle intégration de fonctionnalités au plus proche de la structure. Cet axe de recherche va de pair avec les procédés de

fabrication additive (FA) qui permettent ainsi de passer d'équipements greffés à des équipements complètement intégrés [1]–[4]. De fait, dans les années à venir, la FA de matériaux multifonctionnels et leur développement seront de plus en plus employés pour la réalisation de fonctions mécatroniques hybrides qui combineront à la fois la structure mécanique, des composants électroniques,

des pistes conductrices et des matériaux fonctionnels. Cette thématique s'inscrit autour des matériaux programmables et de l'impression 4D¹ [2], [4].

¹ L'impression 4D est le processus par lequel un objet imprimé en 3D peut modifier lui-même sa structure et changer de forme avec l'impulsion d'une énergie extérieure comme la température, la lumière ou d'autres stimuli environnementaux.

En effet les matériaux multifonctionnels (piézoélectrique, polymère ionique, électrostrictif, etc.), qui réalisent une conversion ou une adaptation suite à un stimulus physique, démontrent peu à peu leurs potentiels d'innovation technologique dans de nombreux secteurs d'application [5]. Outre l'idée qu'ils pourraient à terme supplanter dans certains cas les procédés de transduction classiques (capteurs et actionneurs), les nouvelles possibilités offertes par ces matériaux en termes de performances et de fonctionnalités de couplages multiphysiques constituent une puissante motivation pour aborder et résoudre des problématiques issues des enjeux sociétaux [6].

Mais les matériaux fonctionnels qui présentent des couplages multiphysiques, sont un champ vaste et hétérogène se positionnant entre matières premières et marchés d'applications industriels. Jusqu'à présent, ce positionnement « intermédiaire » a conduit à un déficit d'image fort dans la mesure où les produits associés sont rarement visibles du grand public ou des champs disciplinaires scientifiques. Pourtant ce secteur alimente les développements et les innovations du monde qui nous entoure que ce soit dans le domaine du transport ou du médical, de l'énergie ou de l'environnement... Par sa position « intermédiaire », la thématique de la fonctionnalisation des matériaux se doit d'innover fortement pour continuer à soutenir ses secteurs d'applications qui sont aujourd'hui en pleine mutation (allègement dans l'automobile, efficacité énergétique

dans le bâtiment, nouveaux matériaux pour les énergies renouvelables...).

Cette course à l'innovation est également une condition sine qua non pour rester en pointe dans un secteur où la concurrence internationale est très forte. Cette thématique dispose d'atouts scientifiques indéniables, avec un développement de la thématique de l'impression 4D et l'exploitation de nombreux couplages multiphysiques qui vont permettre d'accompagner les ruptures et les mutations de ces secteurs d'applications. Les matériaux bénéficiant de nouvelles propriétés, qualifiés de multifonctionnels, revêtent une importance particulière quant à la compétitivité future et au développement durable de l'industrie européenne. En effet, ils constituent la base de progrès techniques dans de nombreux secteurs.

Plusieurs enjeux se posent pour les matériaux multifonctionnels. Ils doivent en effet être plus performants, plus durables, avec de multiples fonctionnalités et avec l'aptitude à être transformés et à être recyclés. Une coopération entre les différents secteurs passant de la chimie à leur mise en œuvre et application est nécessaire afin de garantir une adaptation optimale des performances des matériaux à leur usage. Les matériaux multifonctionnels et intelligents sont clairement un exemple de solutions « amont » qui permettent de répondre aux nouvelles exigences et mutations des industries en aval, telles que l'allègement pour le transport ou le diagnostic pour structures sensibles, etc. Le déve-

loppement de ces matériaux est largement conditionné par la demande et donc par de nouvelles applications et de nouveaux marchés.

Potentiel des matériaux multifonctionnels pour le développement de dispositifs médicaux généraux

Les rapports nationaux et européens montrent que le secteur du dispositif médical (28 Md€, + 4 % par an) est le secteur le plus dynamique parmi les industries de santé. Ce secteur présente un tissu industriel très diversifié et composé de nombreuses niches de marché. Il rassemble plus de 1300 entreprises dont 92 % de PME pour près de 85 000 emplois en France contre 99 000 pour le médicament. L'industrie du dispositif médical (DM) est souvent méconnue et son identification est complexe, à cause du champ très vaste et hétéroclite que recouvrent les DMs : cela va du simple pansement à la plus sophistiquée des valves cardiaques, en passant par les matériels d'imagerie médicale et les logiciels de diagnostic... Une telle variété de produits implique une diversité tout aussi impressionnante de disciplines scientifiques mobilisées. Cela permet la rencontre de différents acteurs aux savoirs multiples : praticien hospitalier, chercheur, ingénieur... Avec ce qu'elle implique de compétences croisées et de collaborations inter-métiers, cette pluridisciplinarité constitue un terreau extrêmement fertile pour l'innovation et ainsi, propice à la mise en application de matériaux multifonctionnels ...

“ Les matériaux bénéficiant de nouvelles propriétés, qualifiés de multifonctionnels, revêtent une importance particulière quant à la compétitivité future et au développement durable de l'industrie européenne. En effet, ils constituent la base de progrès techniques dans de nombreux secteurs. ”

Exemple : De la réparation de la valve mitrale à la réalisation de fil guide intelligent

La valve mitrale

Afin de mettre en perspective le potentiel des matériaux multifonctionnels pour le domaine des DMs, une descrip- ●●●

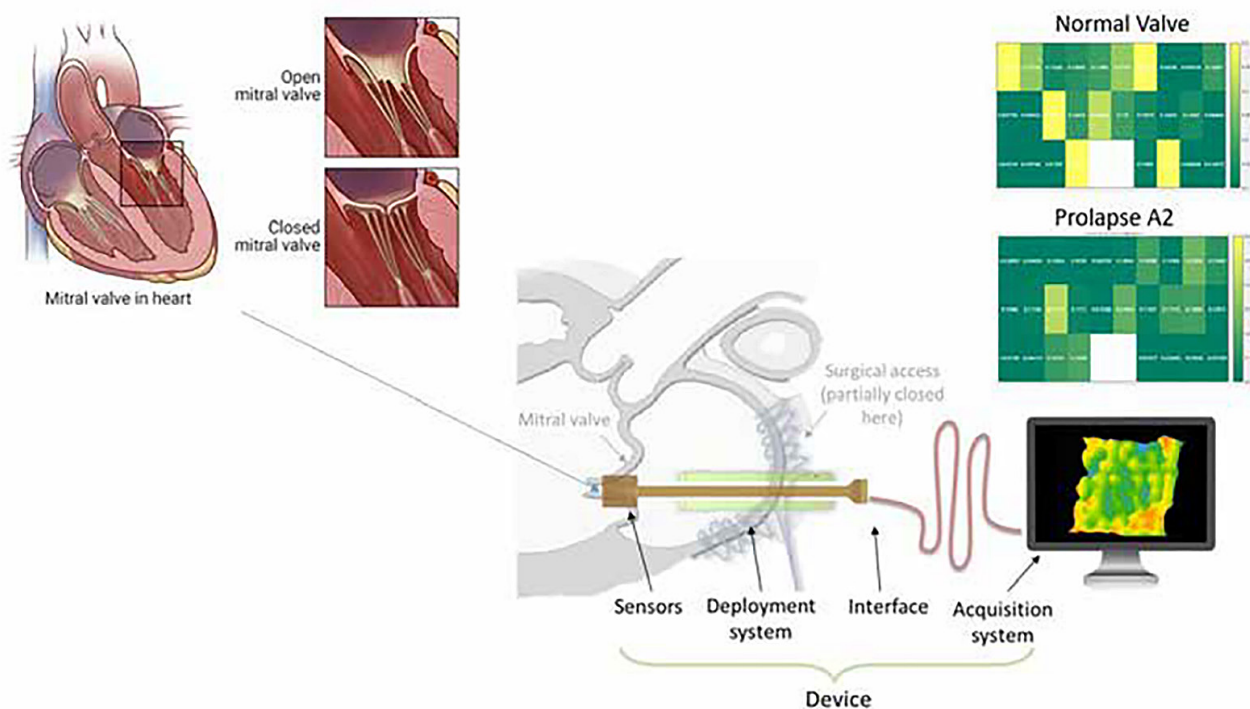


Figure 1 : Illustration du projet *mitral print* permettant la mesure de la force de coaptation lors d'une procédure de réparation de la valve mitrale.

●●● tion de la réparation de la valve mitrale semble un bon exemple. L'insuffisance mitrale (perte d'étanchéité de la valve mitrale) est la cardiopathie valvulaire ayant l'incidence la plus élevée dans les pays occidentaux. Néanmoins les stratégies thérapeutiques médicales et les pratiques chirurgicales ainsi que leurs résultats sont hétérogènes, entre les différents opérateurs, centres de soins et pays. Au bloc opératoire pendant une procédure de réparation de valve mitrale, l'évaluation de la qualité de cette réparation repose aujourd'hui sur une évaluation morphologique (aspect visuel de la valve), et fonctionnelle « grossière » (test à l'eau) alors que le cœur du patient est encore arrêté et immobile. Le résultat de la réparation sera apprécié par une échographie cardiaque réalisée au bloc opératoire une fois le cœur reparti, puis après l'intervention. En cas de résultat insuffisant, il faudra alors arrêter à nouveau le cœur pour ajuster la réparation. Une meilleure compréhension des modifications physiques survenant au cours des réparations mitrales permettrait d'améliorer les pratiques médicales de multiples façons : sélection des stra-

“ Pour toutes les opérations endovasculaires, quel que soit le territoire artériel ou veineux à traiter, un fil guide ainsi que des cathéters angulés sont nécessaires afin d'entrer dans le vaisseau cible puis d'y amener le matériel de traitement : ballon, stent ou endoprothèse. ”

tégies thérapeutiques idéales (réalisation de chirurgies “à la carte” adaptées à chaque patient), évaluation objective et quantitative peropératoire (concept de “réparation à faible stress”), aide au développement de techniques et d'outils de réparations percutanées (anticipation des résultats à moyen et long terme). Depuis plus de 5 ans, une collaboration d'experts chirurgicaux et scientifiques de France (Hospices Civils de Lyon - HCL, et Laboratoire de Génie Électrique et Ferroélectricité - LGEF) et des États-Unis (Mount Sinai Hospital and Sinai BioDesign lab (NY, USA), CEA LITEN) a été initiée, afin de développer des outils innovants à base de polymères piézoé-

lectriques (PVDF-TrFE² de chez Piezotech) ou piézorésistifs³ permettant la mesure de certains paramètres objectifs (physiques) de l'appareil valvulaire mitral (figure 1) [7]–[10]. L'objectif du dispositif illustré en figure 1 consiste à mesurer la coaptation c'est à dire la qualité de l'adossement des feuillets mitraux l'un contre l'autre, au cours de la fermeture d'une valve. Cette coaptation est nécessaire à l'étanchéité et donc au bon

2 P(VDF-TrFE) : polymères ferroélectriques normaux de type poly(fluorure de vinylidène-trifluoroéthylène)

3 La piézorésistivité, est une propriété d'un matériau décrivant le changement de résistance électrique dû à une contrainte mécanique subie

fonctionnement du système valvulaire. Dans le cas contraire, la perte de celle-ci engendre une insuffisance mitrale ou maladie régurgitante mitrale. Cet adossement mesure chez le patient sain 5 à 10 mm de hauteur, et ce sur toute la largeur de la fermeture mitrale (3 à 4 cm, concave vers l'orifice aortique). La restitution chirurgicale d'une « large surface de coaptation » est un des principes clés de la réparation mitrale, énoncé depuis plus de 30 ans dans les travaux du Pr Alain Carpentier [11]. L'obtention d'une large surface de coaptation est en effet corrélée au succès de la réparation mitrale [12], [13]. Un outil permettant la mesure des forces de coaptation valvulaire a été développé et breveté (patent application No. 62/796,269). Celui-ci comporte une matrice de capteurs de type piézoélectrique (28 éléments), de l'épaisseur d'une feuille de papier, pouvant être inséré entre les deux feuillets valvulaires afin de mesurer, lors de la contraction cardiaque, les forces de contact entre les deux feuillets de la valve mitrale. Ceci permet d'obtenir une cartographie bidimensionnelle des forces de coaptation. Ce capteur est appendu à un manche permettant son orientation et son maintien dans la valve, puis son retrait lors de la fermeture cardiaque en fin d'intervention. Ce capteur est relié à un système d'acquisition et d'interprétation des données.

Comme l'illustre l'exemple précédent, cela implique un certain nombre de défis scientifiques et technologiques en termes de transduction des matériaux multifonctionnels mais aussi de contraintes d'intégration, sans omettre l'aspect normatif. En effet la mise sur le marché de nouveaux dispositifs médicaux en Europe est un processus nécessitant une certification européenne (CE) du dispositif au regard d'un cahier des charges strict, défini dans le cadre de la norme ISO-10 993. Cette certification vise à évaluer les risques biologiques liés à un DM afin de déterminer son acceptabilité pour une application donnée. Il est donc primordial de valider en amont la compatibilité des matériaux multifonctionnels avec le contexte nor-

matif afin de pouvoir sécuriser le développement de DMs innovants. Les principaux résultats obtenus autour de cet axe ont été présentés à l'académie de médecine et sont disponibles dans la référence [8].

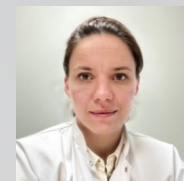
Le fil guide intelligent

Un autre exemple d'application des matériaux multifonctionnels concerne la chirurgie cardiovasculaire, avec le développement d'un nouveau type de fils-guides pour la navigation endovasculaire capables d'être contrôlés électriquement, mais aussi de fournir un retour d'information (force et position, et pression artérielle), afin de disposer d'un outil qui pourra s'intégrer dans un système robotique médical.

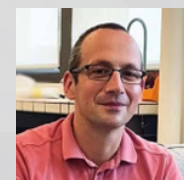
En effet la chirurgie endovasculaire a connu un véritable essor ces 10 dernières années suite aux études scientifiques montrant une baisse de la morbi-mortalité mais aussi des coûts de santé de ces procédures par rapport à la chirurgie conventionnelle [14]. Pour toutes les opérations endovasculaires, quel que soit le territoire artériel ou veineux à traiter, un fil guide ainsi que des cathéters angulés sont nécessaires afin d'entrer dans le vaisseau cible puis d'y amener le matériel de traitement : ballon, stent ou endoprothèse. Le chirurgien fait naviguer ces différents outils au moyen d'imagerie sous rayons X en temps réel permettant de s'orienter (angiographie) [14], [15]. Ainsi la manœuvrabilité du fil-guide lors de la navigation intravasculaire est un élément clef du succès. Il n'existe à l'heure actuelle aucun guide déformable à la demande et le chirurgien est obligé d'utiliser des sondes préformées d'angulation variées pour entrer dans tel ou tel vaisseau en fonction de l'anatomie du patient [15]. Les angulations dans le système vasculaire chez l'homme allant jusqu'à 120° avec parfois la nécessité de passer des doubles voire des triples courbures. Ces manœuvres entraînent des durées opératoires longues, des coûts de matériel importants et surtout des risques de lésion vasculaire de type dissection ou rupture pour le patient [14].

Les auteurs

Marine Bordet est chirurgienne vasculaire aux Hospices Civils de Lyon. Doctorante au sein du LGEF, elle travaille autour de la mise en application de matériaux multifonctionnels et sur les méthodes de caractérisation afin de développer de nouveaux outils répondant au besoin de la chirurgie vasculaire et endovasculaire.



Pierre-Jean Cottinet Après avoir obtenu son diplôme d'ingénieur en 2008 (INSA-Lyon), puis son diplôme de doctorat en 2010 avec un financement de la DGA. Pierre-Jean Cottinet est ensuite post-doctorant au HPMI de Florida State University. Il rejoint l'INSA en tant que Maître de Conférences au LGEF. Son activité de recherche porte sur les matériaux multifonctionnels et leurs applications. Il a publié plus de 100 articles internationaux dans des revues et conférences à comité de lecture, 4 chapitres de livre. Il est co-auteur de 7 brevets



L'optimisation de la navigation et du cathétérisme est donc un enjeu majeur en chirurgie cardiovasculaire mais aussi en cardiologie, neuroradiologie, radiologie interventionnelle, urologie, ce qui représente un marché considérable ; des milliers de guides et sondes préformées sont utilisés chaque jour dans le monde entier. Un guide déformable à son extrémité, sur une longueur variable, serait un dispositif très innovant et efficace pour atteindre cet objectif d'optimisation avec moins de manipulations, une réduction du temps opératoire, et l'utilisation d'un seul guide au lieu de multiples sondes préformées pour chaque angulation. ●●●

“L’optimisation de la navigation et du cathétérisme est donc un enjeu majeur en chirurgie cardiovasculaire mais aussi en cardiologie, neuroradiologie, radiologie interventionnelle, urologie, ce qui représente un marché considérable ; des milliers de guides et sondes préformées sont utilisés chaque jour dans le monde entier.”

●●● Par ailleurs, le caractère multifonctionnel peut permettre d’envisager une fonction double à ce guide : actionneur avec la déformation nécessaire à la navigation, mais aussi capteur permettant de mesurer la pression artérielle en amont et en aval d’une lésion artérielle, dans le but de juger de son caractère significatif ou non sur le flux et donc de décider de son traitement.

Le développement de ce guide intelligent passe par le développement de nouveaux matériaux à couplage électromécanique qui soient biocompatibles et par la définition des règles d’intégration. La figure 2 illustre le principe de fonctionnement du guide intelligent en mode actionneur où l’application d’un

champ électrique provoque la déformation du polymère électro-actif et ainsi la flexion de la structure pour faciliter la phase de « navigation ». Le système est constitué d’une électrode centrale entourée d’un polymère électroactif, et de deux électrodes externes en forme de demi-cylindre. En établissant un champ électrique entre l’électrode centrale et l’une des électrodes externes, il est possible de déformer le matériau vers le haut ou vers le bas.

Pour répondre à cet objectif illustré dans la figure 2, les problématiques suivantes ont été traitées aux travers de différentes thèses de doctorat (Florent Ganet, Nellie Della Schiava) [14], [16] :

- Développement de matériaux multifonctionnels adaptés à la problématique (ferroélectrique, piézo-résistif, piézo-électrique, électrostrictif de chez Piezotech Arkema) ;

- Caractérisation de leurs couplages ;

- Caractérisations physico-chimiques et corrélations structure/propriétés ;

- Etude de biocompatibilité des nouveaux matériaux en concertation avec les HCL (Hospices Civils de Lyon) ;

- Mise en application pour une preuve de concept.

En revanche le développement de telles solutions implique de lever un certain nombre de verrous scientifiques et technologiques, à savoir :

- La possibilité d’obtenir des composites avec une bonne dispersion par une méthode d’impression ou par un autre procédé.

Le but étant de ne pas être lié à un procédé spécifique mais de s’adapter aux besoins ;

- Développer des matériaux électroactifs à partir de matrices polymères inertes et

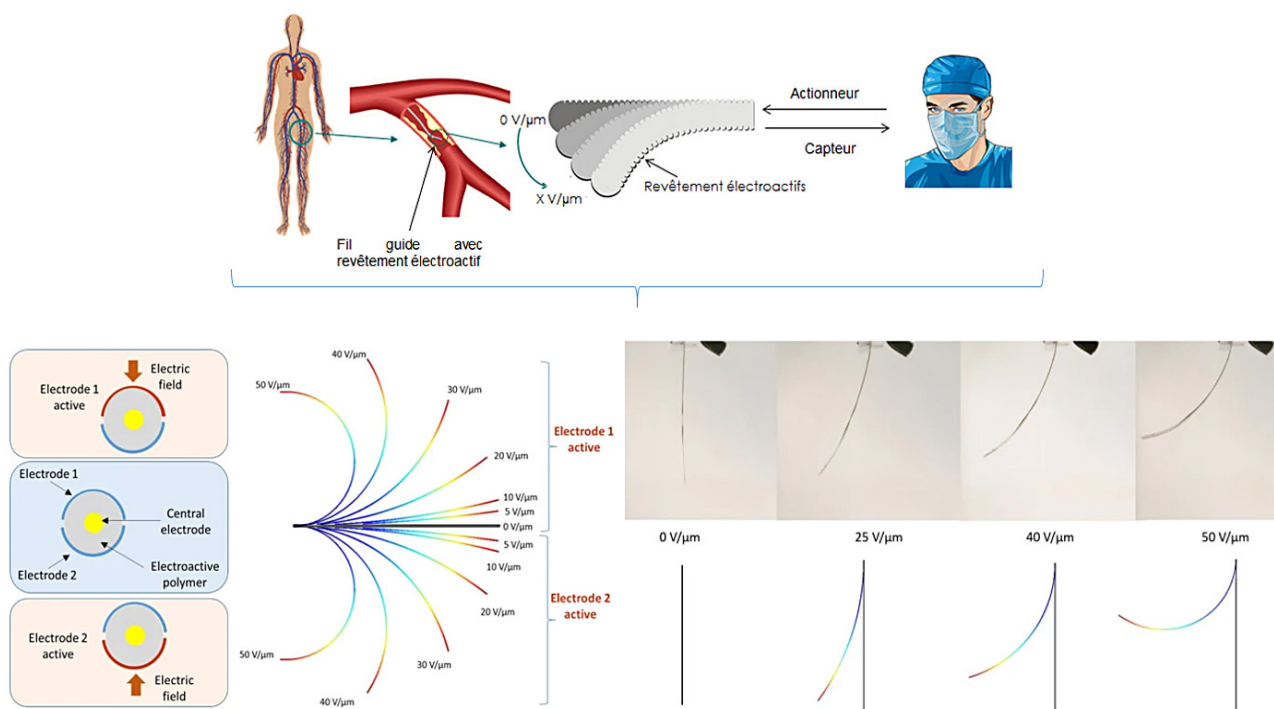


Figure 2 : Illustration du principe de fil guide intelligent dont la déformation dépend de l’intensité du champ électrique appliqué.

biocompatibles c'est-à-dire n'entraînant pas de mort cellulaire ;

- La tenue en température des propriétés de conversion et des contraintes applicatives (stérilisation, etc.) ;

- Les interfaces/interphases des matériaux électroactifs avec les électrodes et/ou les substrats ;

- La réponse suffisante des transducteurs pour correspondre aux attentes applicatives.

Les actions de recherche ont permis de démontrer le potentiel d'utilisation des polymères électroactifs de type P(VDF-TrFE-CFE) pour la réalisation de fil guide intelligent [14], [17], [18]. Actuellement les travaux concernent l'optimisation de la formulation d'encre pour la réalisation de multicouches avec le CEA à travers la thèse de Simon Toinet.

Conclusion et perspectives

Depuis plusieurs années, les matériaux actifs ne cessent d'évoluer en termes de propriétés, de techniques de mise en œuvre et de performances. La diversité des produits accessibles offre de nouvelles perspectives dans de nombreux secteurs tels que l'automobile et l'aéronautique mais aussi dans les domaines du médical et biomédical. Ce dernier requiert pour certains procédés des dispositifs de petite taille ou faible encombrement, de grande fiabilité et biocompatibles. Tel est le cas des systèmes électromécaniques utilisés en microchirurgie robotisée, ou encore dans le domaine des prothèses motorisées, et aussi pour l'aide à la chirurgie lors du développement de nouvelles procédures. Face à ces applications, les matériaux électroactifs constituent une réponse prometteuse qu'il convient d'évaluer avec soin.

Afin d'appréhender cette problématique, il s'agit de répertorier conjointement les fonctionnalités offertes par les différentes familles de matériaux électroactifs exploitables, et d'analyser les domaines d'application potentiels propres au domaine mé-

Les co-auteurs

Cet article résulte d'un travail d'équipe qui a impliqué les experts suivants :

Simon Toinet, Doctorant au LGEF et au CEA Grenoble, sa thèse porte sur la conception et la fabrication d'un fil guide intelligent, à base de polymères électro-actifs conformables en multicouches.

Joseph Faudou est doctorant au LGEF de l'INSA Lyon et au CEA Grenoble, il étudie des capteurs de force flexibles pour des applications médicales.

Giulia d'Ambrogio a réalisé son travail de doctorat au LGEF, elle dispose d'une expertise dans le développement de matériaux multifonctionnels et de leur mise en application.

Nellie Della Schiava est chirurgienne cardiovasculaire au HCL, et chercheuse associée au LGEF de l'INSA Lyon. Elle réalise une recherche transversale en favorisant le lien entre pratique clinique et recherche fondamentale.

Daniel Grinberg est chirurgien cardiaque au HCL de Lyon et chercheur associé au LGEF de l'INSA. Il développe des actions de recherche transversale entre la médecine et les sciences de l'ingénieur.

Mohammed Benwadih est chercheur au CEA autour de l'électronique imprimée.

Fabrice Domingues Dos Santos est ingénieur diplômé de l'ESPCI (Ecole de Physique-Chimie de Paris), docteur en science des polymères de l'université Pierre et Marie Curie. Il a rejoint Arkema, un leader mondial des matériaux de spécialités en 2000. Depuis 2010, il est président d'Arkema-Piezotech, qui conçoit, produit et commercialise des polymères électroactifs, il est l'auteur de plus de 50 publications et brevets dans ce domaine.

Guilhem Rival est enseignant-chercheur au LGEF à l'INSA Lyon, il étudie l'élaboration et les relations structure-propriétés dans les matériaux polymères et composites électroactifs.

Minh-Quyen Le est enseignante-chercheuse au LGEF de l'INSA Lyon, elle étudie l'utilisation de matériaux multifonctionnels pour des applications en lien avec la santé et le transport.

Jean-Fabien Capsal est enseignant-chercheur au LGEF à l'INSA Lyon, il développe une expertise autour de la compréhension des couplages multi-physiques dans les matériaux.

dical. Pour répondre à cet axe de recherche, une synergie forte est nécessaire avec les acteurs de terrain. C'est pour cela qu'à partir de 2014 des collaborations ont été initiées avec différents centres hospitaliers (HCL, APHP, HPL, Mount Sinai Hospital, etc.).

Cette approche peut être mise en parallèle avec le numéro de la revue Nature [19], où les auteurs déplorait la pénurie d'innovation en chirurgie. Il est important de rappeler que les technologies médicales font partie intégrante de

notre quotidien. plus que de simples utilisateurs, les praticiens ont un rôle capital à jouer dans l'innovation de ces technologies. Par l'évaluation de nouveaux instruments, ils peuvent guider les actions de recherche vers des solutions amenant à un réel impact clinique. De plus, par leur pratique quotidienne, ils ont la capacité d'identifier les réels besoins non comblés par les technologies actuelles. C'est pourquoi il est nécessaire de décloisonner les disciplines afin de favoriser l'émulation transverse. ■



... Références

- [1] K. Thetraphi et al., '3D-printed electroactive polymer force-actuator for large and high precise optical mirror applications', *Addit. Manuf.*, vol. 47, p. 102199, 2021.
- [2] D. Grinberg, S. Siddique, M.-Q. Le, R. Liang, J.-F. Capsal, and P.-J. Cottinet, '4D Printing based piezoelectric composite for medical applications', *J. Polym. Sci. Part B Polym. Phys.*, vol. 57, no. 2, pp. 109–115, 2019.
- [3] V.-C. Nguyen et al., 'Printing smart coating of piezoelectric composite for application in condition monitoring of bearings', *Mater. Des.*, vol. 215, p. 110529, 2022.
- [4] T. van Manen, S. Janbaz, K. M. B. Jansen, and A. A. Zadpoor, '4D printing of reconfigurable metamaterials and devices', *Commun. Mater.*, vol. 2, no. 1, Art. no. 1, Jun. 2021
- [5] A. Gangele and A. Mishra, 'A Review on Smart Materials, Types and Modelling: Need of the Modern Era', *Mater. Today Proc.*, vol. 47, pp. 6469–6474, Jan. 2021
- [6] G. D'Ambrogio et al., 'Piezoelectric biosensor for smart cardiovascular grafts based on NaNbO₃ fibers/PDMS structured composite', *Mater. Des.*, vol. 223, p. 111195, Nov. 2022
- [7] X. Zhang et al., 'Optimization Strategies Used for Boosting Piezoelectric Response of Biosensor Based on Flexible Micro-ZnO Composites', *Biosensors*, vol. 12, no. 4, Art. no. 4, Apr. 2022
- [8] D. Grinberg et al., 'Outils innovants pour guider la réparation mitrale : méthodes et perspectives', *Bull. Académie Natl. Médecine*, vol. 204, no. 5, pp. 500–507, May 2020
- [9] D. Grinberg, A. Bruhat, P.-J. Cottinet, M. Q. Le, D. H. Adams, and A. Costa, 'Mitral valve repair based on physical characterization of coaptation forces', *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.*, vol. 159, no. 3, pp. e181–e183, Mar. 2020
- [10] D. Grinberg, 'Multi-physical approach for the assessment of objective consequences of mitral valve repair', *These de doctorat*, Lyon, 2020. Accessed: Jan. 30, 2023. [Online]. Available: <https://theses.fr/2020LYSEI110>
- [11] A. Carpentier, 'Cardiac valve surgery—the "French correction"', *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.*, vol. 86, no. 3, pp. 323–337, Sep. 1983
- [12] D. Wei, J. Han, H. Zhang, Y. Li, C. Xu, and X. Meng, 'The correlation between the coaptation height of mitral valve and mitral regurgitation after mitral valve repair', *J. Cardiothorac. Surg.*, vol. 12, no. 1, p. 120, Dec. 2017
- [13] M. P. Sá et al., 'Coaptation Length as Predictor of Recurrent Mitral Regurgitation After Surgical Repair for Degenerative Mitral Valve Disease: Meta-Analysis of Reconstructed Time-to-Event Data', *Struct. Heart*, vol. 0, no. 0, Jan. 2023
- [14] N. Della Schiava, 'Development of electrostrictive P(VDF-TrFE-CTFE) terpolymer for medical applications', *These de doctorat*, Lyon, 2020. Accessed: Jan. 30, 2023. [Online]. Available: <https://www.theses.fr/2020LYSEI112>
- [15] F. Ganet et al., 'Development of a smart guide wire using an electrostrictive polymer: option for steerable orientation and force feedback', *Sci. Rep.*, vol. 5, no. 1, Art. no. 1, Dec. 2015

Résumé

Le secteur du dispositif médical est toujours à la recherche de matériaux possédant des propriétés et performances spécifiques. Le développement actuel des matériaux multifonctionnels ainsi que les progrès de la fabrication additive rendent possible une intégration complète des équipements multifonctionnels directement à la structure hôte. De fait, dans les années à venir, la fabrication additive de matériaux multifonctionnels sera de plus en plus employée pour la réalisation de fonctions mécatroniques hybrides qui combineront à la fois la structure mécanique, des circuits intégrés en silicium, et des pistes conductrices. Afin de démontrer le potentiel d'utilisation des matériaux multifonctionnels pour le secteur des dispositifs médicaux, deux exemples autour de la chirurgie cardiaque et cardiovasculaire sont présentés. Ils permettent une mise en perspective de la thématique et mettent en évidence la nécessité d'une synergie importante entre industriels, académiques et praticiens. ■

Abstract

The medical device sector is always looking for materials with specific properties and performances. The current development of multifunctional materials together with the progress of the additive manufacturing make it possible to a real integration of multi-functional equipment directly into a host structure. In the coming years, the additive manufacturing of electroactive materials will be increasingly used in order to achieve high performance mechatronic systems combining mechanical structure, silicon integrated circuits, and conductor trackers. In order to demonstrate the potential use of multifunctional materials for the medical device sector, two examples related to cardiac and cardiovascular surgery are presented, putting the theme into perspective and emphasizing the need for a tight synergy between industry, academia and practitioners. ■