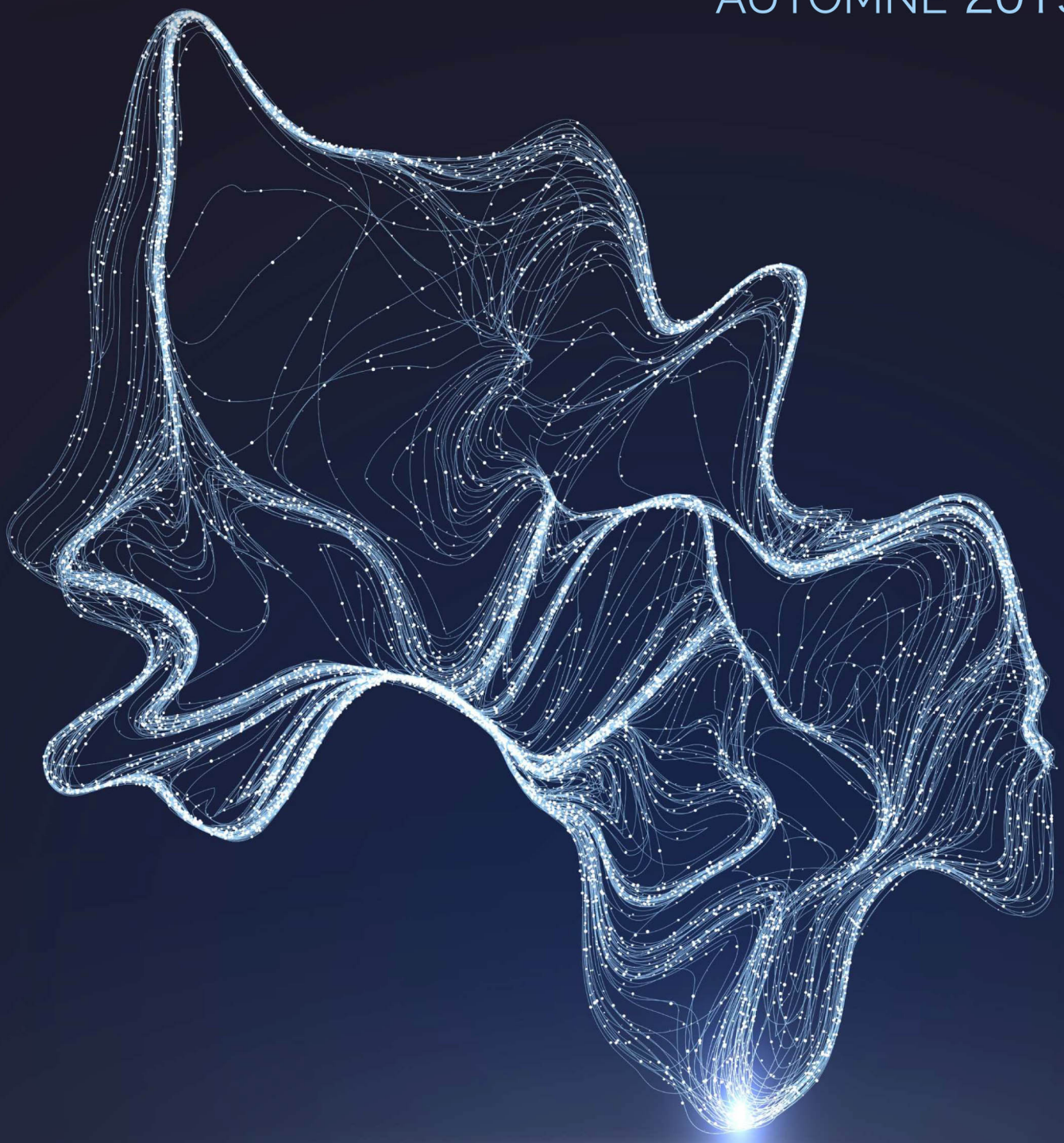
SPECTRA

GÉNIE PHYSIQUE · POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

AUTOMNE 2019



Dans cette édition

SPECTRA · Automne 2019

1. Mot des éditeurs

2. Nouveau professeur
   Les ultrasons arrivent au département

4. Entrepreneuriat
   ChrysLabs et Technologies ShapeShift 3D inc.

6. Manuel Reali
   Vers une électronique plus verte

8. Jean-Sébastient Boisvert
   Un écran intelligent pour nos téléphones

10. Martin Poinsinet De Sivry-Houle
    L'imagerie optique mise en contraste

12. Anne-Laurence Phaneuf-L'Heureux
    Du spin au photon

14. Choix de la rédaction
    La science-fiction pour l'éducation

16. Expériences étudiantes
    Aimé Toumelin, Pierre-Luc Thériault et Félix Desrochers

Mot des éditeurs

Cher lectorat,

La première édition de la revue *Spectra* a été lancée l'année dernière pour souligner le 60e anniversaire du département de génie physique de Polytechnique Montréal. Une équipe passionnée a réussi à mettre en œuvre cette revue. C'est donc avec grand plaisir que nous vous présentons la seconde édition.

Spectra, pluriel de latin *spectrum*, concorde parfaitement avec l'objectif de cette publication, soit celui de dresser un portrait diversifié du département en présentant ses étudiants et ses activités. Le titre rappelle également la lumière, un concept au centre de la recherche effectuée en génie physique.

Avec cette nouvelle édition, nous avons voulu élargir nos horizons en soulignant la contribution des étudiants au baccalauréat et d'anciens étudiants, qui font rayonner le génie physique à travers la création de nouvelles entreprises dans des secteurs innovants et porteurs. Avec l'arrivée d'un professeur apportant une nouvelle expertise, nous avons la conviction que le département de génie physique continuera à apporter des solutions aux différents enjeux de notre société.

Nous espérons que cette nouvelle édition fasse plaisir aux lecteurs et lectrices et que la sortie de la revue *Spectra* devienne une tradition qui perdurera au sein du département.

À tous,
Bonne rentrée scolaire et bonne lecture !

L'équipe de rédaction

De gauche à droite : Paul Xing, Marie-Christine Paré, Jean-Christophe Gagnon-Audet, Billie Maubois et Jean-François Martin.

Les ultrasons arrivent au département

L'année passée, lors du 60e anniversaire du programme de génie physique, Jean Provost a été introduit comme nouveau professeur au sein du département. Anciennement diplômé de génie physique, il a intégré le programme de double diplôme lors de ses années de baccalauréat à Polytechnique Montréal (2002 - 2006). Il a ensuite décroché deux maîtrises, une de l'École Centrale Paris et une de Polytechnique Montréal. Grandement intéressé par le domaine du biomédical, il a complété, lors de sa maîtrise à Polytechnique, un projet en imagerie photoacoustique dans le groupe de Frédérique Lesage. Il a par la suite entrepris un doctorat à l'Université Columbia (2007 - 2012), aux États-Unis, où il a développé son expertise en imagerie ultrasonore. Avant son retour à Polytechnique Montréal, il a travaillé en tant que post-doctorant et chargé de recherche à l'Institut Langevin à Paris, un laboratoire spécialisé en physique des ondes. Son mandat était de développer de nouvelles techniques d'imagerie basées sur l'échographie ultrarapide. Ces dernières sont très intéressantes, car elles permettent d'obtenir des images beaucoup plus rapides et précises que les approches traditionnelles. Depuis l'année dernière, il s'occupe d'un groupe de recherche multidisciplinaire dans le domaine des ultrasons, principalement appliqués à l'imagerie du cerveau et du cœur.

Un des intérêts de l'imagerie ultrasonore est la facilité avec laquelle il est possible de manipuler de telles ondes. Contrairement au domaine de l'optique, où la phase de l'onde est généralement déduite à partir de techniques interférométriques, il est possible de la mesurer directement dans le cas des ondes ultrasonores à l'aide d'échographes dits ultrarapides ou programmables, car leurs oscillations sont beaucoup plus lentes. Lorsqu'il est possible de mesurer l'amplitude et la phase d'une onde, cela permet de recréer, par exemple, l'effet d'une lentille pour façonner le champ acoustique par une série de calculs effectués après l'acquisition de données. Bien que le traitement par ordinateur soit plus complexe que les techniques conventionnelles, l'échographie ultrarapide permet de multiplier par un facteur 100 voire 1000 la cadence d'imagerie et celle-ci peut être mise à profit pour atteindre une bien meilleure résolution.

Dans le laboratoire de Pr Provost, des techniques d'imagerie ultrasonore ultrarapide tridimensionnelle sont développées dans le but de développer de nouveaux biomarqueurs liés à la microvascularisation du cerveau et du cœur. Dans le but de développer des biomarqueurs pour les maladies neurodégénératives, il tente de cartographier des micro-infarctus cérébraux : il s'agit de lésions qui pourraient jouer un rôle important dans le développement des maladies neurodégénératives. Ces lésions sont difficiles à étudier à cause de leur petite taille (entre 0.05 et 4 mm). Actuellement, aucune méthode clinique n'est utilisée pour des images à ces échelles

La figure 1 est un exemple du type d'image qu'il est possible d'obtenir par les techniques d'imagerie du groupe de Pr Provost. Pour ce faire, il exploite une technique d'imagerie super-résolue appelée microscopie de localisation, dont le principe de base a initialement été développé pour l'optique (Prix Nobel de chimie 2014), puis a été généralisé à l'imagerie ultrasonore il y a quelques années. Cette technique permet d'imager le système vasculaire avec une résolution de l'ordre de quelques micromètres, en profondeur et in vivo. Le critère de Rayleigh nous dit que lorsque deux objets sont très proches, il est impossible de les distinguer simultanément, selon une contrainte reliée à la longueur d'onde. L'idée est

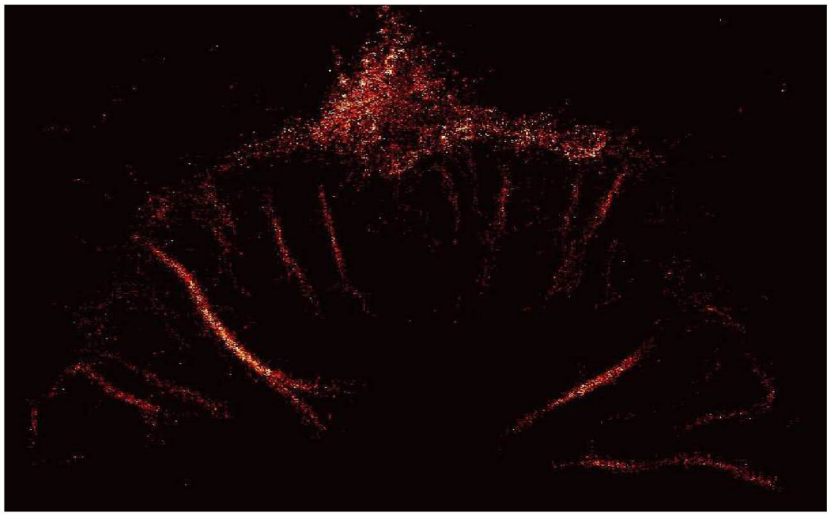


Fig 1. Vascularisation d'un cerveau de rat obtenue à l'aide de la méthode de microscopie ultrasonore de localisation

ainsi de faire une superposition d'images acquises à des moments différents et dans lesquelles les deux objets « n'existent pas » en même temps. En étant capable de faire ce type de manipulation, la localisation desdits objets devient beaucoup plus précise. En ultrasons, on utilise des microbulles injectées dont la concentration est contrôlée pour s'assurer que seul un petit nombre de ces bulles soit présent dans chaque image. Ce faisant, il est possible de détecter leur position exacte, et ce, en dépassant la limite de résolution de Rayleigh. Cependant, pour obtenir à une carte complète du réseau vasculaire, il est nécessaire d'accumuler des millions de points espacés sur l'échantillon à imager. C'est un peu comme essayer de reconstruire le réseau routier (carte vasculaire) en mesurant sur une longue période de temps les positions des automobiles qui y circulent (microbulles). C'est dans un tel contexte que l'imagerie ultrarapide devient utile, car elle peut atteindre des cadences d'environ 10 000 images par seconde. Avec cette technique, une image peut être obtenue en seulement cinq minutes, alors qu'elle prendrait plusieurs heures avec une approche conventionnelle. On peut ainsi reconstruire des images de la vascularisation d'un cerveau avec une résolution de moins de 10 microns, alors que le critère de Rayleigh devrait normalement nous limiter à plus de 100 microns. Actuellement, il s'agit de la seule technique d'imagerie qui permet de sonder in vivo, et à de grandes profondeurs, les plus petits vaisseaux sanguins du corps. Par ailleurs, il est fondamental d'être en mesure d'obtenir de telles images, car ces vaisseaux sont d'une importance majeure pour plusieurs pathologies. À la suite des mesures sur les animaux de laboratoire, la prochaine étape est d'adapter la technique d'imagerie pour l'humain. Cependant, un tel passage représente un défi de taille. En effet, l'onde est fortement déformée lors de son passage au travers du crâne humain, plus épais que celui du rongeur. Pr Provost tente ainsi de développer un modèle de construction d'image capable de prendre en compte la modification de l'onde, grâce au contrôle complet de l'amplitude et de la phase de l'onde.

Au sujet de ses travaux sur le cœur, Pr Provost se concentre sur l'imagerie à la suite d'un infarctus. Après un tel incident, le bon fonctionnement du cœur est généralement réduit par l'apparition de tissus nécrosés. Étant donné que celui-ci s'adapte très mal à ce changement, la durée de vie du patient est souvent réduite. Les travaux de Pr Provost consistent ainsi à développer de nouveaux biomarqueurs permettant d'améliorer les traitements médicaux des patients atteints par ce genre de séquelles.

Dans le laboratoire de Pr Provost, on peut retrouver des étudiants provenant de différentes spécialités, notamment la physique, le génie électrique, le génie mécanique, le génie informatique ou encore le génie biomédical. L'apport de chacun est indispensable pour de tels projets, car ils touchent simultanément à plusieurs domaines. Par exemple, dans le cadre des travaux sur le cœur, un étudiant de génie mécanique travaille sur la modélisation des déformations des parois du myocarde. Dans le cas d'un étudiant en génie physique, il s'agirait, par exemple, de travailler sur des modèles permettant la reconstruction d'images de meilleure qualité en manipulant le champ acoustique en post-traitement.

Actuellement, vous pouvez retrouver Pr Provost dans le cours de physique moderne pour génie biomédical (GBM3805) ainsi que dans le cours de techniques expérimentales et instrumentation en génie physique (PHS3910).

Texte de Jean-François Martin

Découvrez le parcours de ces anciens étudiants qui se sont lancés dans le monde de l'entrepreneuriat!

ChrysaLabs

Les terres arables de notre province sont soumises à une exploitation intensive, c'est pourquoi il est nécessaire de veiller à ce que leurs concentrations de nutriments essentiels demeurent suffisamment élevées. Afin de maintenir le rendement exigé, des engrais sont souvent surutilisés afin de stimuler la croissance des plantes. Cela n'est toutefois qu'une solution à court terme et peut avoir des conséquences néfastes sur la santé des sols. En effet, les sols abritent une grande biodiversité sans laquelle ils ne peuvent survivre. Or, l'utilisation excessive d'engrais nuit aux micro-organismes et rend les sols arides. Leur entretien est donc essentiel tant à court terme, pour répondre à la demande de production, qu'à long terme, afin de préserver leur capacité de culture.

La technique actuelle nécessite que l'on prélève des échantillons uniformément sur l'ensemble de la superficie du sol. Ces échantillons de terre sont par la suite analysés en laboratoire et soumis à divers tests chimiques répondant à des accréditations gouvernementales. Les agriculteurs ne reçoivent donc les résultats que quelques jours plus tard. Dû aux coûts rattachés à l'analyse de chaque échantillon, les agriculteurs tendent à en réduire le nombre afin de limiter les frais. Ceux-ci n'ont donc pas un portrait représentatif de la santé du sol et le traitent comme s'il était uniforme. C'est ici que ChrysaLabs entre en jeu en proposant une solution alternative.

ChrysaLabs est une *startup* créée il y a deux ans par deux étudiants gradués de Polytechnique Montréal, Gabriel Mangeat (génie physique) et Benjamin de Leener (génie biomédical). La jeune entreprise s'est donnée comme mission de distribuer la technologie dans le but de protéger et promouvoir la santé des sols en général.

L'idée du projet est née lors d'une «pause idée», alors qu'ils étaient étudiants au doctorat dans le même laboratoire de Polytechnique Montréal. Le projet initial consistait en la fabrication d'un robot pour l'entretien de terrains agricoles urbains, soit des espaces de plus de quelques mètres. Après quelques recherches, ils ont constaté que les capteurs de nutriments pour les sols, ayant démontré leur faisabilité en laboratoire, n'étaient pas disponibles sur le marché. C'est de là que l'idée d'une sonde spectroscopique a vu le jour.

L'élaboration de la sonde spectroscopique fut un vrai défi technique. Les deux entrepreneurs ont dû modifier leur montage de spectroscopie afin d'obtenir un balayage de l'échantillon sur 360° pour obtenir des données de réflectance instantanément. Ensuite, ils ont miniaturisé leur système pour qu'il puisse être contenu dans une sonde. L'analyse des spectres des nutriments collés à des macromolécules organiques retrouvées dans le sol les renseigne sur leur concentration. Cependant, ces spectres ont une forme caractéristique difficilement reconnaissable par l'œil humain, c'est pourquoi ils sont retrouvés à l'aide de *machine learning*.

Actuellement, l'équipe composée de cinq personnes se concentre sur les sols agricoles. Ils ont conçu et fabriqué un prototype de sonde spectroscopique d'un pouce de diamètre qui peut simplement être planté dans le sol afin de mesurer les concentrations des différents nutriments. Les agriculteurs pourront obtenir une réponse en temps réel et ils pourront effectuer autant de tests que nécessaire afin de connaître l'état de leur sol. Il leur sera alors possible de cibler les endroits nécessitant l'utilisation d'engrais, réduisant ainsi les coûts, tant environnementaux que financiers, et améliorant la production.

Il reste encore quelques étapes avant d'obtenir un produit commercialisable. À court terme, il faut s'assurer de la précision et de l'exactitude des mesures obtenues par l'instrument dans des conditions hors laboratoire. Par ailleurs, cette méthode d'analyse n'est pas encore accréditée par le gouvernement. De plus, cette nouvelle technologie peut amener le doute auprès des consommateurs, c'est pourquoi l'éducation de la clientèle est donc cruciale à leur agrandissement sur le marché de l'entretien des sols.

ChrysaLabs se situe actuellement à Montréal et est toujours à la recherche de stagiaires Mitacs intéressé(e)s à contribuer au traitement des données.

Texte de Billie Maubois

Technologies ShapeShift 3D inc.

De nos jours, les produits portés par l'humain sont fabriqués en masse et sont innovants en terme de design, d'esthétisme ou de matériaux. Technologies ShapeShift 3D inc., fondée par le jeune entrepreneur Jonathan Borduas, ancien étudiant de génie physique, nous propose une technologie permettant la personnalisation de ces produits espérant ainsi donner un second souffle à leur innovation.

Cette compagnie concentre ses activités sur la conception d'une solution logicielle permettant la personnalisation de modèles 3D. Celle-ci permet, entre autres, de déposer un modèle de base sur un scan 3D afin de lui donner une courbe naturelle, assurant ainsi un confort maximal. Leurs algorithmes se distinguent de par la complexité de la déformation du modèle qu'ils peuvent engendrer tout en respectant des contraintes de haut niveau, telles l'épaisseur minimale d'une paroi ou la concentricité de plusieurs éléments. La puissance de ceux-ci réside dans le fait qu'ils contraignent le modèle dans ses déformations, sans définir ce qui se passe en chacun de ses points.

Jonathan Borduas a toujours été fasciné par l'impression 3D. Dès 2009, il fait l'acquisition de sa première imprimante 3D, puis en construit d'autres par lui-même. Il a d'abord complété une technique en génie physique, puis il a poursuivi ses études au baccalauréat dans le même domaine à Polytechnique Montréal. À travers ses multiples projets académiques et personnels, il utilisait l'impression 3D dès qu'il en avait l'occasion. Ce procédé de fabrication ayant toujours été sa solution de prédilection, il a voulu explorer ce domaine à la suite de ses études, espérant y apporter un nouvel œil à l'aide de sa formation.

Tandis que beaucoup se concentraient sur l'amélioration des méthodes d'impression et peu sur les applications, Jonathan a su saisir l'opportunité d'un nouveau marché. Contrairement à l'usinage conventionnel, l'impression 3D a comme avantage de permettre la production de pièces complexes au même prix qu'une pièce simple. De plus, la variété de pièces à produire n'influence pas le coût unitaire, puisque les coûts d'installation de réglages sont nuls. Jonathan a su combiner ces deux avantages pour appliquer l'impression 3D à l'industrie du sur-mesure.

Jonathan s'est alors demandé comment il pouvait rendre son modèle d'affaires intéressant. La personnalisation d'un produit pouvant être un processus long et fastidieux, il s'est intéressé à la résolution de cette problématique. Ayant déjà de l'expérience en développement de logiciel, il a été en mesure de créer ses premiers algorithmes à partir de 2014, et développe depuis son expertise dans le domaine. C'est d'ailleurs le 31 août dernier qu'il lança son entreprise Technologies ShapeShift 3D inc.

L'entrepreneur souligne qu'il y a énormément de défis pour un ingénieur-physicien dans ce domaine ; simulation par éléments finis, *machine learning*, problème de diffusion de la chaleur, contraintes mécaniques et résiduelles, et plus encore. Mais, ce que le génie physique lui a surtout apporté, c'est la capacité à se familiariser avec n'importe quel sujet et à ne pas reculer devant des défis intellectuels importants.

Technologies ShapeShift 3D inc. se concentre actuellement sur le marché des lunettes, des prothèses et des orthèses, mais souhaite devenir le joueur numéro un dans la transition vers le sur-mesure, toutes industries confondues. L'entreprise demeure concurrentielle en proposant une solution logiciel qui couvre du scan 3D à l'impression 3D pour répondre à tous les besoins de leurs clients. En effet, on y retrouve des produits spécialisés pour chaque étape de la chaîne de valeur. Finalement, les domaines d'applications sont multiples et variés, et Technologies ShapeShift 3D inc. est donc prête à saisir toutes les opportunités qui se présentent à elle.

Texte de Marie-Christine Paré

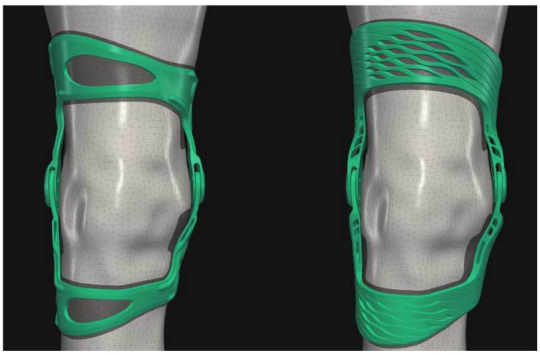


Fig . 1 Modèles d'orthèses de genou personnalisées sur des scans 3D

Vers une électronique plus verte

L'avènement de l'électronique des dernières décennies a complètement bouleversé nos modes de vie et notre rapport face à la technologie. Des téléphones intelligents, tablettes, ordinateurs personnels, dispositifs médicaux aux voitures électriques, on retrouve maintenant des produits électroniques dans toutes les sphères de la société. Nombreux considèrent que toute cette technologie contribue à améliorer nos vies. Cependant, la demande grandissante des pièces électroniques a également généré une quantité colossale de déchets électroniques constituant un défi environnemental de taille. En effet, les techniques actuelles de recyclage ne sont pas suffisamment efficaces pour disposer adéquatement des pièces électroniques en fin de vie, d'autant plus que l'exploitation minière des ressources minières nécessaires à leur fabrication est à la fois fortement polluante et énergivore, contribuant ainsi à l'émission de gaz à effet de serre et au réchauffement climatique. Tout porte à croire que la situation ne va que s'aggraver puisque la demande pour ces matériaux est toujours en pleine croissance, à un point tel que certaines ressources comme le gallium et l'indium risquent d'être épuisées dans les années à venir.

S'inspirer de la nature pour une ingénierie durable

Face à cette problématique, certains pensent qu'il faut complètement changer le paradigme. Les matériaux organiques basés sur le carbone semblent être une alternative prometteuse par rapport à leurs équivalents inorganiques puisqu'ils sont abondants, peu énergétiques à produire et possiblement biodégradables lorsque arrivés à la fin de leur durée de vie utile. C'est en ce sens que Manuel Reali, étudiant au doctorat en génie physique dans le laboratoire de la professeure Clara Santato, s'intéresse à ces matériaux organiques afin de pouvoir établir une électronique à la fois verte et circulaire, permettant d'intégrer dans toute la chaîne d'approvisionnement - de l'exploitation des ressources à la récupération en fin de vie du matériel - une vision écoresponsable et durable. Plus précisément, il étudie les propriétés électriques et photo-électriques d'un matériau organique en particulier, l'eumélanine, pour pouvoir déterminer les applications possibles dans des domaines aussi variés que les capteurs, les matériaux photoconducteurs ou les dispositifs d'emmagasinage d'énergie.

L'eumélanine, un matériau organique fascinant

Les mélanines sont des pigments produits notamment par les mélanocytes, ces cellules spécialisées situées dans l'épiderme, la couche superficielle de la peau. Elles sont responsables de la coloration de la peau et des cheveux et jouent un rôle primordial dans la protection contre les rayons ultra-violets (UV). On retrouve également les mélanines dans de nombreux organismes vivants comme les insectes et les plantes. L'eumélanine qu'étudie Manuel Reali est la variante de couleur brunâtre ou noire formée à partir de la polymérisation de deux précurseurs monomériques (Fig. 1), le 5,6-dihydroxyindole (DHI) et l'acide 5,6-dihydroxyindole-2-carboxylique (DHICA). Comme son nom l'indique, le DHICA se distingue du DHI par la présence d'un groupement -COOH supplémentaire. Ces deux monomères se présentent également sous différents états d'oxydoréduction (ou états redox), ortho-hydroquinone (H2Q), semiquinone (SQ), indole quinone (Q) et quinone imine (QI).

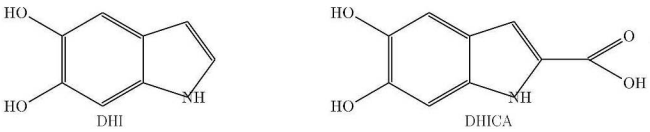


Fig. 1 Les deux composés monomériques de base de l'eumélanine.

DHICA forment dans un premier temps des structures en feuillets d'oligomères - un oligomère étant une structure formée par un nombre fixe de monomères. Un empilage de ces feuillets séparés par une distance caractéristique est par la suite possible par l'intermédiaire d'interactions π-π, des liens chimiques non covalents occasionnés par la présence des orbitales π sur les cycles aromatiques. Finalement, un assemblage de plusieurs empilages oligomériques peut donner naissance par exemple à des structures filamentaires ou particulaires.

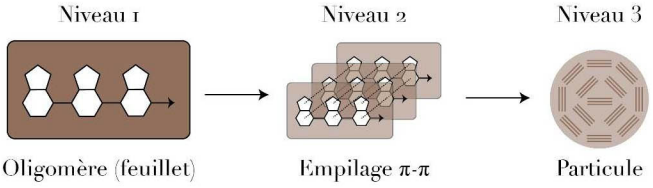
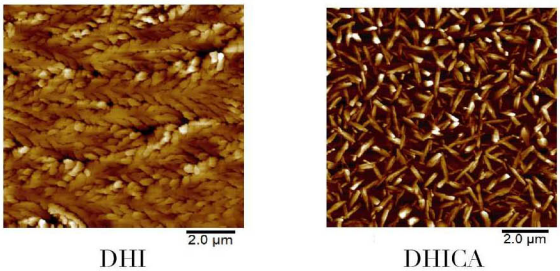


Fig. 2 Niveaux d'agrégation de l'eumélanine.

L'eumélanine possède de nombreuses propriétés physicochimiques d'intérêt à l'ingénierie. Les différents états redox permettent notamment différents niveaux de transferts électroniques. Les interactions π-π jouent également un rôle primordial dans la conductivité électrique par l'intermédiaire d'un mécanisme de délocalisation des électrons. Des études menées dans les années 1970 ont montré que l'eumélanine possède des propriétés similaires aux semiconducteurs (SC) amorphes. Notamment, l'eumélanine démontre des effets de commutation résistive - le passage d'un état de haute résistance à un état de faible résistance sous l'application d'une tension - qui sont propres aux SC. Les propriétés de l'eumélanine sont également fortement dépendantes de la température et du niveau d'hydratation. Celles-ci ont longtemps été interprétées à partir du modèle de SC amorphe. Par exemple, l'augmentation de la conductivité de l'eumélanine en présence d'eau était expliquée par l'augmentation de sa constante diélectrique. Toutefois, ce modèle n'est pas en mesure de tenir compte du rôle des protons comme porteurs de charges. Or, des études plus récentes suggèrent plutôt que le niveau d'hydratation interviendrait dans la modification de l'équilibre des états redox et que l'eumélanine serait en fait un conducteur hybride protonique-électrique. Cependant, ce modèle n'est pas en mesure d'expliquer la présence de la commutation résistive. La nature physique même de l'eumélanine fait donc présentement débat dans la communauté scientifique.

Les avancées de Polytechnique

Manuel Reali cherche à mieux comprendre les propriétés de l'eumélanine en étudiant les réponses électriques et photoélectriques du DHI et DHICA. Pour ce faire, il produit des échantillons de couches minces d'eumélanine en travaillant avec une boîte à gants - une enceinte permettant des manipulations dans un environnement contrôlé et sous vide. Cela permet d'assurer d'une présence minimale de molécules d'eau (et de protons) et que les effets observés sont causés par le comportement des électrons. Les couches minces d'eumélanine offrent l'avantage d'observer l'auto-assemblage des monomères de DHI et DHICA sur un substrat. Il a ainsi pu montrer que l'eumélanine produite à partir du DHI possède une structure différente de celle produite à partir du DHICA (Fig. 3). le DHI produit une structure dendritique tandis que le DHICA produit plutôt une structure en bâtonnet. À l'aide d'électrodes d'eumélanine, Manuel a pu montrer que l'eumélanine possède des caractéristiques capacitrices, signifiant qu'elle est en mesure d'emmagasiner des charges, une propriété qui est la base de la conception de batteries. Les propriétés capacitrices observées par Manuel pourraient être dues à la formation de charges d'espace occasionnée par l'accumulation de charges de signe opposé à l'électrode. Cela mènerait à la capture de charges qui génère un champ électrique de sens opposé à celui appliqué, causant la présence d'une tension non nulle même en absence de l'application d'un courant. Manuel a également observé que la capacitance était affectée par la température. Il propose comme mécanisme un phénomène de décapture des charges par l'activation thermique. Manuel tente présentement de démontrer que l'eumélanine (non-hydratée) constitue bel et bien un SC en étudiant plus en détail ses différentes caractéristiques électriques.



DHI DHICA

Fig. 3 Couches minces des deux types d'eumélanine.

Des domaines d'applications d'avenir

Alors que l'électronique conventionnelle se base sur les courants générés par des électrons, les signaux électriques biologiques se basent principalement sur le mouvement d'ions et de protons. Une propriété des plus intéressantes de l'eumélanine est qu'elle est biocompatible, c'est-à-dire qu'elle peut être mise en contact avec des tissus biologiques sans générer de toxicité ou de réponse immunitaire. Ainsi, l'eumélanine pourrait servir comme matériau de base pour le développement de transducteurs pour convertir un signal biologique ionique en un signal électrique conventionnel, permettant une intégration beaucoup plus poussée des dispositifs médicaux avec les différents tissus. Une autre application possible est le développement de supercapaciteur qui tirerait profit de la capacité d'emmagasiner des charges de l'eumélanine. De par sa nature pigmentaire, l'eumélanine est à même d'interagir avec la lumière et possède un domaine d'absorption à bande large dans l'UV et le visible. Ainsi, une application envisageable serait d'utiliser l'eumélanine pour emmagasiner l'énergie solaire. Par ailleurs, le simple fait qu'une molécule soit organique ne signifie pas pour autant qu'elle soit biodégradable. Il est donc nécessaire d'étudier sous quelles conditions l'eumélanine pourrait être dégradée efficacement et proprement. Pour pouvoir avoir un impact réel sur l'aspect de développement durable, Manuel plaide qu'il faut être en mesure de fournir un produit qui est biodégradable une fois sa durée de vie utile atteinte.

Texte de Paul Xing

Références

J. Wunsche et al., Protonic and electronic transport in hydrated thin films of thepigment eumelanin, Chemistry of Materials **27** (2015)

M. d'Ischia et al., Unexplored bio-optoelectronic materials, Angewandte Chemie International Edition **48** (2009).

M. Irimia-Vladu, "green" electronics : biodegradableand biocompatible materials and devices for sustainable future, Chemical Society Reviews **43** (2014).

Un écran intelligent sur nos téléphones

Depuis la sortie de l'iPhone en 2007, le téléphone intelligent comme on le connaît aujourd'hui, ne cesse de gagner en puissance, en fonctionnalité et en popularité. Environ 44 % de la population mondiale possède un téléphone intelligent et cette proportion est appelée à croître pour atteindre 58 % d'ici 2022 [1]. Les experts s'entendent pour dire qu'il est un facteur important de la transition vers une société de l'information. Mais pourquoi les téléphones intelligents sont-ils si populaires ? Cette popularité est due à l'intégration des outils dans un format élégant: caméra, WiFi, Bluetooth, gyroscope, accéléromètre, magnétomètre, senseurs de proximité; la liste de toutes les fonctionnalités offertes par un si petit appareil est longue. Toutefois, la vitre couvrant l'écran reste à ce jour un domaine inexploité dans le volume limité qu'est le téléphone intelligent.

C'est précisément sur l'exploitation de cette vitre que travaille Jean-Sébastien Boisvert, candidat au doctorat dans le laboratoire de concepts photoniques avancés (APCL) dirigé par le Pr Raman Kashyap. Fonctionnaliser les écrans de téléphones intelligents afin d'y inclure de nouveaux senseurs photoniques est l'avenir de l'industrie du téléphone intelligent. Il coïncide avec le développement de la télémédecine, une pratique où un professionnel de la santé utilise les technologies de l'information pour offrir des prestations de santé aux patients (source). De plus, plusieurs autres applications s'ajoutent à la liste des capteurs pouvant être intégrés tel un alcootest, une analyse de la qualité de l'air ou de l'eau et bien d'autres.

La clé invisible

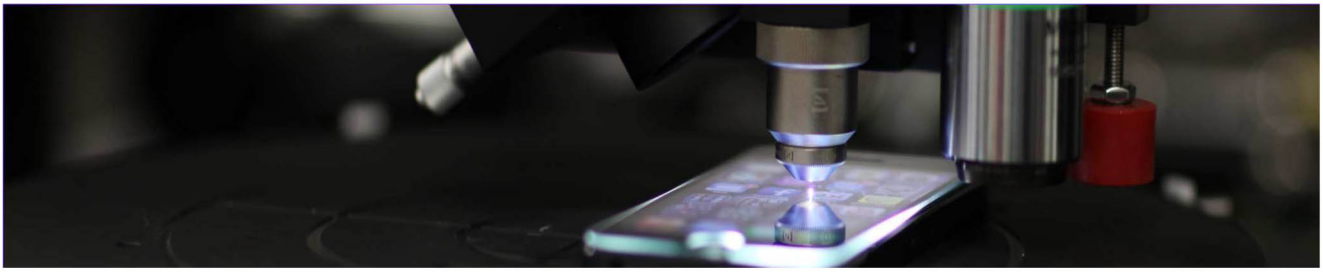
La clé derrière ces applications est l'utilisation d'un guide d'onde inscrit dans le verre. Grâce à un laser à impulsion femtoseconde, il est possible de changer localement l'indice de réfraction du verre. Ainsi, en traçant une ligne dans ce matériau où l'indice de réfraction est plus élevé, on crée un guide d'onde, soit l'équivalent d'une fibre optique fixée dans ce bloc de verre. Cela permet de guider la lumière qui se propage dans la direction où ce dernier a été tracé. Il est alors possible d'écrire des circuits optiques complets dans la vitre d'un téléphone. Cette flexibilité de l'indice de réfraction permet aussi l'écriture de composantes optiques. En effet, celles-ci utilisent la modification de l'indice de réfraction comme principal outil de fonctionnement comme des réseaux de Bragg, des interféromètres de Mach-Zehnder, des coupleurs, etc.

Un grand défi de l'intégration de fonctionnalités dans l'écran est qu'elles ne doivent pas nuire à la visibilité de celui-ci. C'est précisément l'expertise que possède l'APCL. À l'aide des anciens travaux du Dr. Jérôme Lapointe, Jean-Sébastien Boisvert a accès à un procédé d'inscription de guide d'onde dans les verres trempés qui servent d'écran à nos appareils, le plus commun étant le Gorilla Glass®. Il peut ainsi se concentrer sur la conception des fonctionnalités de demain et leur faisabilité.

Une question d'échelle de temps

Le processus utilisé pour modifier localement l'indice de réfraction du verre réside dans l'accumulation d'électrons dans la bande de conduction du matériau pour que leur relaxation perturbe la structure cristalline du verre. Pour ce faire, on tire profit d'un effet non linéaire appelé « l'absorption multiphoton », où un électron dans son état fondamental est excité par plusieurs photons à un même instant. Ce processus requiert l'interaction simultanée de l'électron et d'un nombre arbitraire de photons. Plus le nombre de photons en question est grand, moins cette interaction est probable, c'est pourquoi il est défini comme un effet non linéaire du matériau. L'avantage des effets non

Fig 1 Système d'inscription de guide d'onde dans le verre.



linéaires est qu'ils sont hautement dépendants de l'intensité lumineuse. Ainsi, en focalisant le faisceau laser à l'intérieur du matériau, il est possible d'atteindre, à la focale seulement, l'intensité nécessaire pour que l'absorption multiphoton soit considérable. L'importance de l'absorption multiphoton est que cela permet d'engager une ionisation avalanche dans le matériau où un électron, ayant une énergie beaucoup plus grande que la bande interdite, peut céder une partie de son énergie pour exciter un autre électron dans la bande de conduction. Ce dernier peut ensuite faire la même chose en cédant à son tour une partie de son énergie à un autre électron et ainsi de suite. Créant rapidement une grande population d'électrons excités dans la bande de conduction, ce qui permet donc la modification permanente du matériau. Le matériau est ensuite déplacé à la focale afin de générer la structure désirée.

Cependant, une question demeure: pourquoi a-t-on besoin d'un laser femtoseconde ? La solution réside dans la réponse temporelle du matériau soumis au rayonnement laser. Afin que l'impulsion puisse arriver intacte au point focal pour y engager les mécanismes d'absorptions, elle doit être temporellement plus courte que la réponse du matériau. Sans quoi, des variations énergétiques et de son parcours optique peut venir influencer la précision de l'inscription du guide d'onde. Il a été reporté dans la littérature que le processus de transfert d'énergie entre les électrons et la matrice est de l'ordre de la picoseconde, d'où la nécessité d'utiliser un laser aux impulsions femtosecondes.

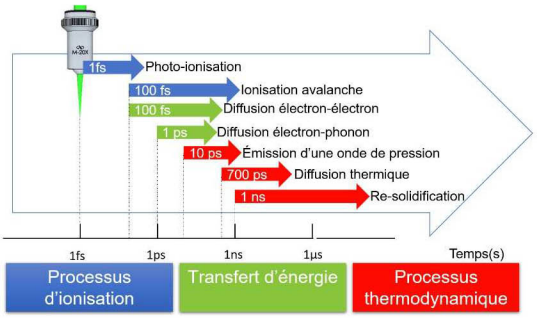


Fig 2 Chronologies des événements dans le matériaux suite à l'exposition d'une impulsion femtoseconde .

Bien que les processus d'ionisation et les transferts énergétiques soient relativement bien compris et détaillés dans la littérature, la source de la variation de l'indice de réfraction réside dans l'interaction de plusieurs mécanismes complexes. Un grand nombre de paramètres expérimentaux tels que la durée de l'impulsion, le taux de répétition du laser, la longueur d'onde, la vitesse d'écriture, l'énergie par impulsion, la polarisation du laser, l'ouverture numérique de la lentille utilisée pour la focalisation, et bien d'autres, influencent la nature du changement de l'indice de réfraction. C'est pourquoi la stratégie employée par la communauté scientifique du domaine de l'inscription au laser femtosecondes est une approche empirique, où l'on se base sur l'expérimentation des paramètres pour baliser les différents régimes d'opérations. Par exemple, à la figure 2, on peut voir trois régimes d'inscription dus à la variation d'un seul paramètre expérimental, la vitesse d'écriture. On remarque qu'une vitesse d'écriture très rapide mène à une structure homogène; en réduisant la vitesse, on atteint un régime hétérogène et à de très basses vitesses, on observe un système à trois couches. On répète ainsi cette démarche, paramètre par paramètre, afin de bien définir leur impact sur le régime ainsi que la relation entre différents paramètres expérimentaux.

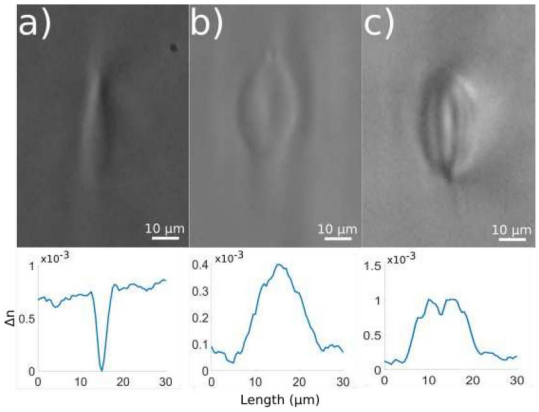


Fig 3 Vue de profil et variation de l'indice de réfraction inscrit dans le verre à une vitesse de a) 300 mm/s b) 10 mm/s c) 1 mm/s.

Une analyse prometteuse

Le travail doctoral de Jean-Sébastien a d'abord commencé par l'analyse de l'influence de plusieurs de ces paramètres expérimentaux sur la résistance mécanique du *Gorilla Glass®* après inscription. Il a confirmé que l'inscription de guide d'onde dans les régimes qui l'intéressaient n'atteignait pas l'intégrité mécanique du verre. Ceci ouvrira alors la porte à sa première preuve de concept où il a été en mesure d'intégrer un spectromètre dans un téléphone intelligent avec l'aide de la lumière des pixels de l'écran et de la caméra frontale. Avec cet outil, il est en mesure de déterminer la concentration de rhodamine dans de l'eau déposée sur l'écran du téléphone. Jean-Sébastien travaille maintenant sur l'inscription d'interféromètre de Mach-Zehnder ainsi que l'amélioration de la précision de son spectromètre, un travail qui se retrouvera certainement dans nos téléphones de demain.

Texte de Jeam-Christophe Gagnon-Audet

Références

IDC. (2019). *Smartphone Market Share*. Smartphone Market Share. Tiré de https://www.idc.com/promo/smartphone-market-share/vendor.

J-S. Boisvert et al. Effect of fs laser exposure on the strength of toughened multimedia glass. Journal of Non-Crystalline Solids **521** (2019).

J. Lapointe et al.Making smart phones smarter with photonics. Optics Express (2014)

L'imagerie optique mise en contraste

Depuis la découverte de l'imagerie par rayon X au début du XXe siècle par Wilhelm Röntgen, l'imagerie biomédicale ne cesse d'évoluer. En effet, il y a eu la spectroscopie Raman, la microscopie confocale, la microscopie par excitation à deux photons pour ne citer que quelques exemples. Cependant, qu'est-ce qui différencient ces types d'imagerie ? Dans le domaine de l'imagerie optique, ce sont les différentes longueurs d'onde utilisées qui vont distinguer les procédés. Par exemple, la fluoroscopie utilise des rayons X, dont la longueur d'onde se situe entre 0,001 nm et 10 nm, tandis que la microscopie confocale se sert d'une lumière monochromatique dans le spectre du visible, comme un laser Hélium-Néon (633 nm), ou même une simple source de lumière blanche, comme une ampoule. Les différentes méthodes d'imagerie se distinguent aussi par le type d'échantillons étudiés. En effet, les rayons X permettent d'imager les structures osseuses, tandis que l'imagerie par spectroscopie Raman est utilisée pour obtenir de l'information sur la composition moléculaire du tissu. Le but principal de l'imagerie biomédicale est donc d'examiner le patient sans avoir recours à une chirurgie invasive. La tomographie par cohérence optique (TCO) s'inscrit aussi dans cette optique.

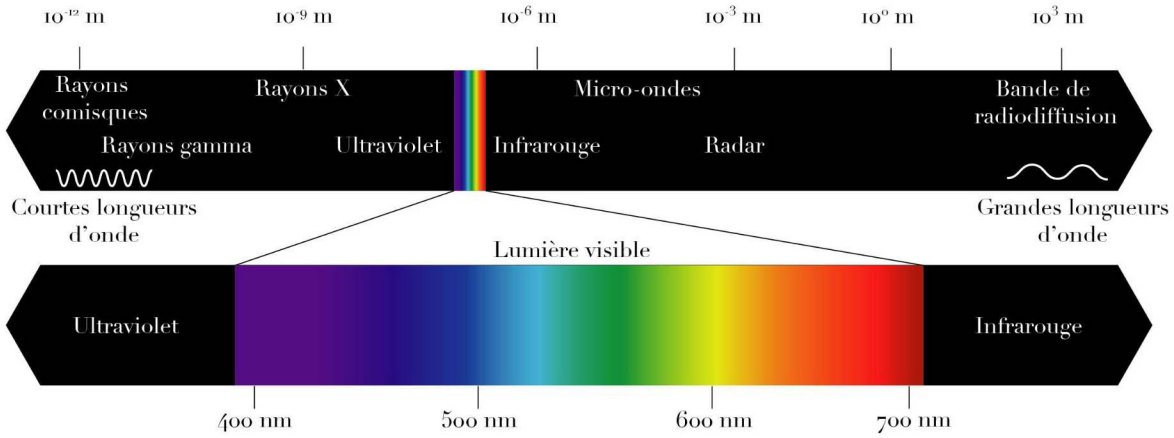
La TCO en bref

Cette technique d'imagerie par interférométrie permet de visualiser les structures biologiques des tissus. La TCO permet d'acquérir des images de tissus jusqu'à quelques millimètres de profondeur en dessous de la surface de l'échantillon avec une résolution d'une dizaine de micromètres. Ce système d'imagerie utilise une source laser à large bande et à faible cohérence dont la longueur d'onde se situe dans le proche infrarouge (800 – 2500 nm). Le laboratoire d'optique diagnostique et d'imagerie (LODI) de la Pre Caroline Boudoux se spécialise dans le développement d'applications en milieux cliniques de la TCO afin de détecter des tissus cancéreux à des stades plus précoces. Le projet d'un des doctorants de ce laboratoire, Martin Poinsinet De Sivry-Houle, se concentre sur le développement d'un système TCO qui apporte une information supplémentaire basée sur le couplage de la lumière réfléchie avec les différents modes de propagation d'une fibre dite à quelques modes. Chaque mode lui permet d'obtenir une image avec un nouveau contraste comme on peut le voir sur la figure 1.

Le potentiel du projet

Il obtient ces différents contrastes grâce à une technique permettant de démultiplexer des modes de propagation de la lumière dans la fibre tout en conservant un contrôle sur la phase de chacun de ces modes. Ici, le démultiplexeur permet de séparer les modes de propagation incidents afin de les mesurer indépendamment. Grâce à cette technique, il est possible de tirer de l'information des canaux de contraste supplémentaires qu'il serait impossible d'obtenir avec un système TCO standard. Le potentiel de cette technique fut d'abord démontré par un autre laboratoire de recherche situé à Vienne en 2017 [1]. Cependant, leur

Fig. 2 Spectre électromagnétique et bande de la lumière infrarouge



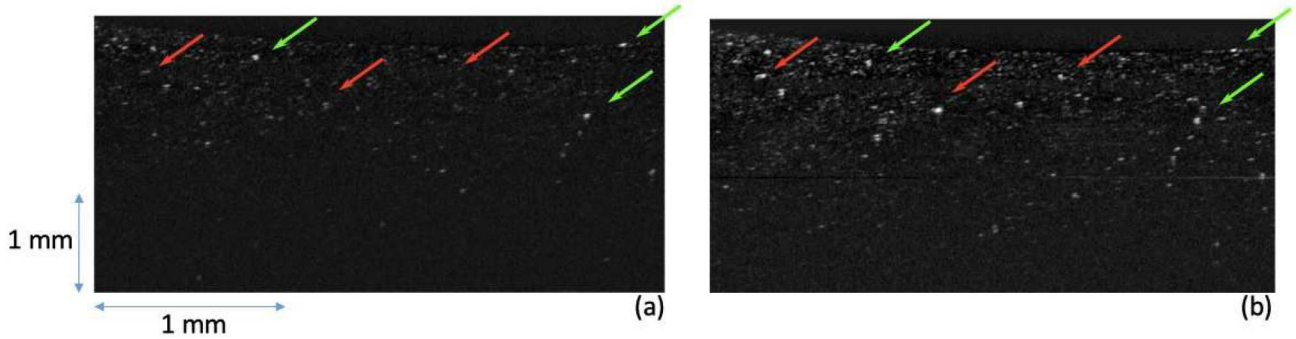


Fig. 1 Exemple de deux images TCO de microbilles de différentes tailles avec deux modes de propagation différents.

méthode comportait quelques problèmes. En effet, en plus d'être très complexe et d'inclure énormément de traitement de données, leur montage était en free-space, autrement dit le faisceau lumineux se promène d'une composante optique à une autre dans l'air, ce qui génère des pertes de contraste. Pour pallier cela, le LODI a proposé en 2019 un système complètement fibré, c'est-à-dire que le faisceau est conduit par un circuit de fibres optiques. Ceci permet entre autres de réduire considérablement les pertes de contraste et ainsi d'obtenir des résultats encore plus probants.

À l'heure actuelle, le projet de Martin termine la phase de preuve de principe pour l'implémentation de cette technique d'imagerie. Il est commun à ce stade de se débrouiller avec les composantes déjà présentes en laboratoire. En effet, dans le domaine de la recherche, il est préférable de prouver que le système donne des résultats avant d'investir. Il a donc modifié un ancien système TCO afin d'obtenir ses premiers résultats.

La figure 2 montre qu'il est possible d'observer une différence de contraste à l'aide des images TCO, en nuances de gris. On peut alors constater que les microbilles indiquées par les flèches rouges sont nettement plus visibles avec le mode de propagation de l'image (b) qu'avec celui de l'image (a). Ceci est dû au fait que le système envoie le laser sur un fantôme optique, un polymère dont les propriétés optiques correspondent à celles d'un tissu biologique, parsemé de microbilles de tailles variant entre 0,3 µm et 1 µm de diamètre. Les microbilles (diffuseurs) vont exciter les modes de propagation différemment en fonction de leur taille. Un diffuseur est un objet qui, lorsqu'il est exposé à la lumière, la réfléchit totalement dans toutes les directions, et apparaîtra blanc sur l'image TCO. Ainsi, le système a démontré sa capacité à différencier les microbilles en fonction de leur taille, ce qui se retranscrit sur les contrastes observés.

Qu'en est-il de la suite ?

Maintenant que le système fonctionne, il reste encore à le tester sur des échantillons biologiques afin de démontrer son potentiel en clinique. Des demandes de subventions sont alors nécessaires afin de pouvoir tester le système avec des composantes plus performantes. Dans les prochaines semaines, un second prototype sera amené à l'Hôpital Sainte-Justine.

Néanmoins, cette technique n'est pas parfaite. Effectivement, la théorie sous-jacente n'est pas élaborée de manière concise. Cependant, comme le mentionne Martin, « on sait qu'il y a du contraste sur les images et on sait à peu près comment le contraste devrait varier », mais la théorie sur la manière dont le contraste varie selon le mode de propagation reste encore à découvrir. Ce projet pourrait être qualifié de médiateur, puisqu'il permet de passer d'un système TCO standard à un autre qui permet de récolter beaucoup plus d'informations. Il est très important de noter que cette méthode peut aussi s'appliquer à d'autres types d'imagerie. Par ailleurs, le fait d'utiliser un système d'imagerie fibré permet d'augmenter le nombre d'applications in-vivo, ce qui facilite son application en clinique.

Texte de Billie Maubois

Référence

P. Eugui *et al.*, Beyond backscattering : optical neuroimaging by BRAD, *Biomedical optics express (2018).*

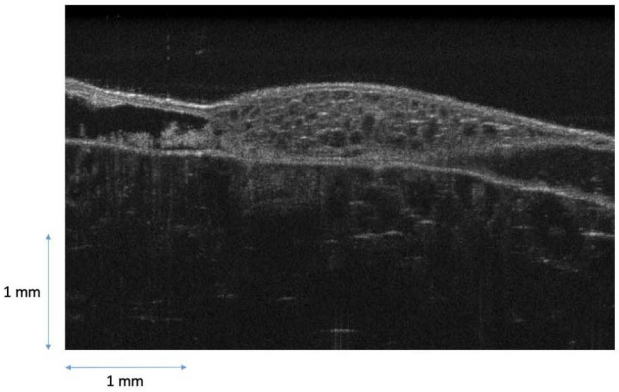


Fig. 3 Exemple d'image TCO d'une pulpe de poivron

Du spin au photon

En 1982, le célèbre physicien Richard Feynman propose d'utiliser les lois de la mécanique quantique pour simuler les systèmes quantiques eux-mêmes [1] : c'est le début de ce qu'on connaît aujourd'hui comme l'ordinateur quantique. Depuis, la course vers l'ordinateur quantique ne cesse de repousser les frontières de l'innovation technologique. Ce nouvel outil de calcul promet de révolutionner de nombreux domaines de recherches en permettant, entre autres, de simuler des systèmes complexes, tels que des atomes polyélectroniques et des molécules complexes, et de résoudre des problèmes d'optimisation non polynomiaux, ce qui est actuellement impossible pour un ordinateur classique dans un temps acceptable.

L'unité de base de l'ordinateur quantique est le qubit, qui est, tout comme le bit, son analogue classique, un système composé de deux états distincts ; souvent notés l'état 0 ou 1. Le qubit est un système quantique, dont on décrit l'état par des propriétés telles que le spin ou la polarisation. L'information y est traitée avec une logique fondamentale complètement différente son pendant classique. En effet, l'ordinateur quantique utilise des phénomènes tels que la superposition ou l'intrication pour effectuer ses calculs, et c'est de là qu'il tire sa puissance.

Transférer l'information

L'un des grands défis de cette nouvelle technologie est de transférer l'information, soit l'état quantique d'un qubit matériel vers un « qubit volant » et vice-versa. Le photon interagit faiblement avec son environnement, ce qui le rend invulnérable aux perturbations qui pourraient en venir. Cette propriété fait de lui le qubit volant idéal. Il est alors possible de connecter les ordinateurs entre eux par un réseau de fibres optiques et d'établir un réseau quantique. Celui-ci est utile, entre autres, pour distribuer les calculs, développer un internet quantique et réaliser une communication quantique sécuritaire à 100 %. Un qubit matériel, fait de semiconducteur par exemple, n'est pas un matériau optique. Il faut donc un intermédiaire, c'est-à-dire un matériau dont on peut contrôler l'état quantique optiquement. C'est, autrement dit, ce qu'on appelle une interface spin-photon.

C'est d'ailleurs sur ce problème que s'est penchée l'étudiante au doctorat Anne-Laurence Phaneuf L'Heureux, du laboratoire de spectroscopie des matériaux et des nanostructures du professeur Sébastien Francoeur, où elle étudie le Tellure comme impureté isoélectronique dans le ZnSe, un semiconducteur. De manière plus spécifique, elle s'intéresse à la dyade de tellure en configuration premier voisin (Fig. 1), ce qui lui permet d'isoler et de résoudre optiquement un seul émetteur. Le but de son projet est de caractériser les propriétés optiques de la dyade afin de démontrer son intérêt comme interface spin-photon ainsi que la possibilité de manipuler son état quantique au moyen de lasers en réalisant diverses expériences de manipulation cohérente et d'optique quantique

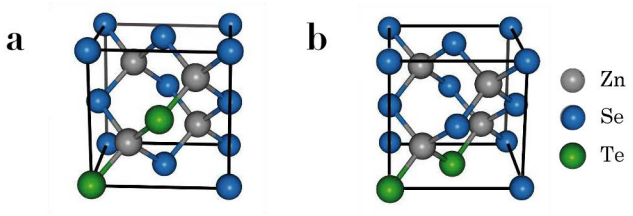


Fig. 1 Configuration de la dyade de Tellure dans le réseau cristallin du ZnSe (a) dans le plan (b) hors du plan

Le tellure est une impureté isoélectronique du ZnSe, c'est-à-dire qu'il contient le même nombre d'électrons de valence que le sélénium qu'il remplace dans le réseau cristallin. Le tellure étant plus électropositif en raison de sa taille, il crée un potentiel qui peut lier un trou, soit l'absence d'un électron dans la bande de valence d'un semiconducteur [2]. Le trou peut attirer à son tour un électron, ce qui forme un exciton, c'est-à-dire une paire électron-trou liée par attraction coulombienne. Le complexe peut à son tour attirer un trou additionnel pour former un trion positif, autrement dit, un exciton chargé. La recombinaison d'un électron et d'un trou crée un photon dont l'énergie est celle de la bande interdite moins une énergie de liaison. La polarisation du photon, linéaire ou circulaire, permet d'identifier la nature de l'émetteur et peut être prédite par des règles de sélection. En effet, une polarisation linéaire correspond aux transitions énergétiques des recombinaisons de l'exciton (Fig. 2a) alors qu'une polarisation circulaire est associée à celles d'un trion, qui, après la destruction de l'exciton, laisse un trou lié à la dyade. On peut d'ailleurs associer cette polarisation à des combinaisons particulières de spins (Fig. 2b), par conservation du moment angulaire.

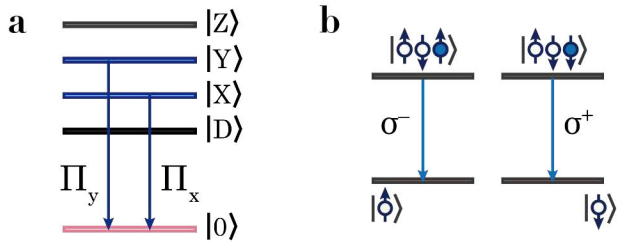


Fig. 2 : (a) Diagramme énergétique des recombinaisons de l'exciton. (b) Diagramme énergétique du trion. Les transitions sont dégénérées à champ magnétique nul et polarisées circulairement.

Ce qui a orienté les recherches d'Anne-Laurence vers ce matériau, ce sont les résultats d'un précédent collègue. En effet, ce dernier a démontré qu'il était possible d'initialiser le spin d'un trou lié à la dyade de tellure au moyen d'une impulsion laser non résonante, c'est-à-dire d'énergie supérieure à la transition. Ce processus d'initialisation est particulièrement intéressant, car, en plus d'être simple comparativement aux mécanismes usuels, il se base sur des émetteurs identiques, puisque ces derniers résultent d'un défaut atomique, qui est déterminé par la configuration du réseau cristallin. De plus, il s'avère aussi être très performant. En effet, il offre une fidélité - la probabilité d'obtenir l'état demandé après l'opération sur le qubit - supérieure à 98.5 %, et ce, en moins de 150 picosecondes [3]. Le mécanisme n'était toutefois pas bien compris, elle a donc poursuivi cette étude au moyen d'une mesure de photoluminescence-excitation (PLE), qui consiste à mesurer l'intensité de l'émission d'une transition à mesure que l'énergie de l'excitation est variée. Lorsque l'excitation ne correspond pas à un niveau énergétique réel, l'intensité d'émission de la transition est faible (Fig. 3a). Toutefois, lorsque l'excitation est résonante avec un certain état possédant un canal de désexcitation efficace vers la transition sondée, l'intensité d'émission augmente fortement (Fig. 3b).

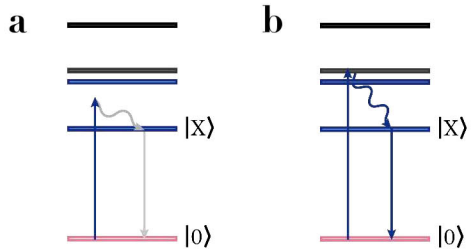


Fig. 3 Principe de mesure de la photoluminescence-excitation

Des résultats inattendus

Les mesures de PLE ont révélé que le moyen le plus efficace de peupler la dyade, c'est-à-dire y lier un complexe excitonique, est d'exciter en résonance le niveau des excitons libres du ZnSe. Ces derniers sont libres de se déplacer dans le réseau et peuvent se lier à une dyade située dans leur voisinage. Leur recombinaison subséquente mène au maximum d'intensité présent à 2,805 eV sur la figure 4. Le mécanisme d'initialisation tire donc profit de cette facilité à peupler les dyades. En effet, à la suite d'une impulsion laser de polarisation adéquate, un trion est formé alors que l'exciton libre généré se lie à une dyade contenant déjà un trou. La recombinaison du trion laisse le spin du trou résultant dans un état connu en raison des règles de sélection des transitions et le photon émis permet de connaître cet état.

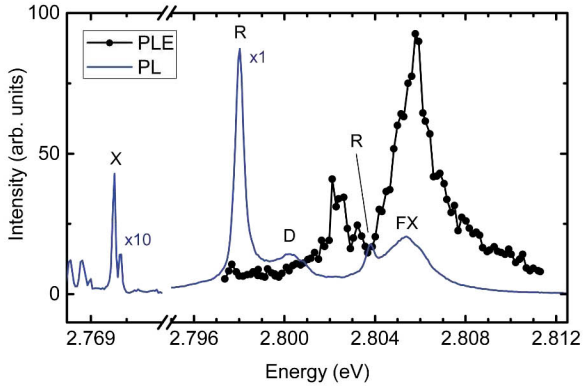


Fig. 4 Spectre de PLE d'un exciton lié à une dyade de Te (noir) superposé à son spectre d'émission non résonant (bleu). X, doublet de l'exciton lié à la dyade, R, raies Raman du ZnSe, D, émission associée aux excitons liés à des impuretés donneurs dans le ZnSe, FX, excitons libres du ZnSe.

Le projet d'Anne-Laurence a pris une tournure complètement inattendue lorsque la PLE a fourni un résultat complètement inusité : l'énergie des dyades oscille en fonction de l'énergie d'excitation lorsque celle-ci est balayée dans la région des excitons libres (Fig 5). Ce phénomène s'explique en raison de la création résonante d'excitons-polaritons, des quasiparticules, hybrides de lumière et de matière. Ceux-ci résultent d'un fort couplage entre les oscillations électromagnétiques dipolaires d'un exciton et d'un photon [2]. Il ne s'agit donc plus ici de simples excitons libres. La couche de 130 nm de ZnSe sur substrat de GaAs composant l'échantillon étudié simule l'effet d'une cavité Fabry-Pérot de faible facteur de qualité. Le champ électrique des polaritons se répartit donc différemment selon l'énergie du photon incident servant à les créer. L'interaction entre la partie excitonique de ces polaritons et les excitons liés aux dyades cause alors une modification de l'énergie d'émission de ces derniers, ce qui explique la présence des oscillations de l'intensité du champ à une profondeur donnée de la couche (Fig. 6).

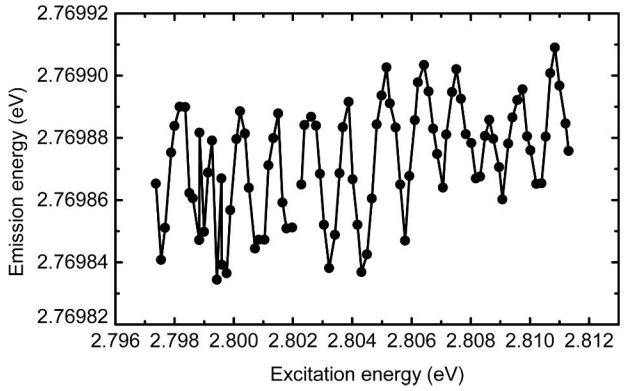


Fig. 5 Oscillation de l'énergie d'émission de l'exciton liée à la dyade en fonction de l'énergie d'excitation.

Les prochaines étapes

L'autre grand aspect du projet d'Anne-Laurence est la démonstration du contrôle cohérent d'un exciton et du spin d'un trou liés à la dyade, ainsi que la détermination de plusieurs grandeurs physiques caractérisant l'efficacité de ce contrôle. D'abord, elle souhaite évaluer le moment dipolaire de la transition entre l'état excité et l'état fondamental d'un exciton lié à la dyade. Cela est important puisque cette caractéristique de la transition influence son couplage avec la lumière : plus il est grand, plus l'absorption et l'émission d'un photon sont probables et plus le contrôle est aisé. Il est possible d'évaluer le moment dipolaire à l'aide de l'expérience des oscillations de Rabi. Au moyen d'une impulsion laser résonante, on peuple le niveau excitonique en induisant une rotation de son vecteur de Bloch, tel que représenté sur la figure 7 à l'aide d'une sphère de Bloch, qui contient toutes les possibilités de superpositions. On peut voir que l'état de l'exciton passe périodiquement de l'état fondamental à l'état excité en passant par tous les états intermédiaires sur un cercle dans le plan yz. La fréquence de Rabi, notée Ω, est le taux auquel ces oscillations ont lieu. L'angle de rotation du vecteur de Bloch dépend de l'aire de l'impulsion et influence directement l'intensité d'émission. Il est alors possible d'observer les oscillations de la population excitonique à mesure qu'on fait varier ce paramètre et que le vecteur tourne sur la sphère. Cet effet témoigne d'une

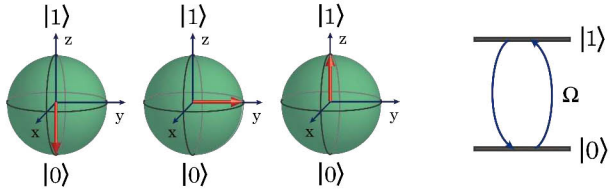


Fig. 7 Représentation des oscillations de Rabi sur la sphère de Bloch et sur le diagramme énergétique d'un exciton. 0 désigne le vide et 1 l'état excité.

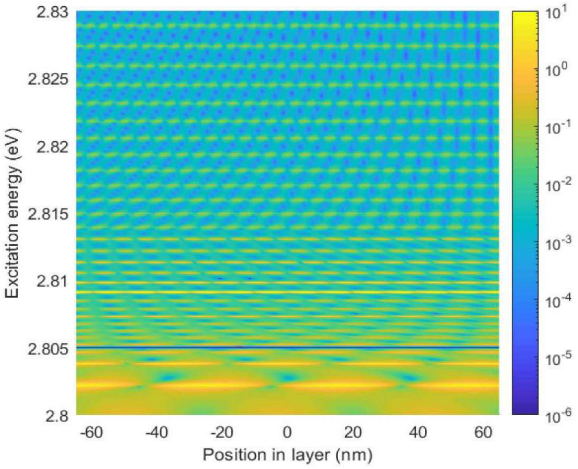


Fig. 6 Simulation de l'intensité du champ électrique associée à un exciton-polariton présent dans une couche de ZnSe d'épaisseur 130 nm

interaction cohérente entre un photon et un système à deux niveaux, ici l'exciton lié à la dyade.

À plus long terme, elle souhaite démontrer le contrôle du spin d'un trou, ce qui demande de travailler avec le trion sous champ magnétique et d'employer plusieurs impulsions lasers. Ces expériences mèneront à la détermination du temps de relaxation de la population T_1 qui dicte le temps nécessaire pour que la population soit réduite d'un facteur e et définit une limite supérieure pour le temps de décohérence T_2. Afin de conserver l'information quantique encodée sur un qubit, les opérations sur celui-ci doivent être réalisées à l'intérieur de son temps de cohérence, c'est-à-dire le temps où l'évolution de la phase peut-être prédite. Il est donc de la plus grande importance de connaître T_1 et T_2.

Finalement, Anne-Laurence étudie la possibilité de tirer profit de la présence de polaritons dans les étapes de contrôle, pour une possible initialisation à distance, par exemple. L'interaction entre des polaritons et un exciton lié à un défaut n'étant pas un phénomène documenté dans la littérature, nul doute que ses résultats auront un impact important dans ce domaine de recherche.

Texte de Marie-Christine Paré

Références

R. Feynman, Simulating Physics with Computers, International Journal of Theoretical Physics **21** (1982).

Ibach et Luth, Solid State Physics, 4e Edition, Springer, 2009.

P. St-Jean et al., High-Fidelity and Ultrafast Initialization of a Hole Spin Bound to a Te Isoelectronic Center in ZnSe, Phys. Rev. Lett. **117** (2016).

La science-fiction pour l'éducation

« C'était l'arme des chevaliers Jedi, les nouveaux pisto-lasers sont bien moins précis… C'est élégant, maniable… l'arme noble d'une époque civilisée »

Cette citation tirée du premier film Star Wars de 1977 introduit pour la première fois au public l'arme iconique de la franchise: le sabre laser. C'est ainsi que l'imaginaire collectif sera marqué à jamais, laissant plusieurs rêver de mettre la main sur celui-ci. Toutefois, la nature finie de la lame rend sa conception illusoire due à l'impossibilité d'arrêter ponctuellement la trajectoire de la lumière. Cela ne nous empêche pas de pouvoir explorer d'autres aspects de ces fameux sabres lumineux. Ici, on discute de la faisabilité de l'interaction mécanique entre deux sabres lasers dans le vide, avec comme objectif de démontrer que des exemples de la science-fiction peuvent être utilisés comme outils pédagogiques pour des concepts avancés de physique. Dans notre cas, on s'intéresse à l'électrodynamique quantique dans le vide.

Classiquement, on déduit rapidement qu'une interaction entre deux faisceaux lasers est impossible dans le vide, puisque lorsque deux ondes électromagnétiques entrent en collision, leurs amplitudes s'additionnent pour un bref instant et continuent leur chemin sans déviation. Ceci est dû à la propriété de linéarité des équations de Maxwell sans terme de source. Pourtant, en appliquant la théorie quantique des champs, on accepte l'existence de particules virtuelles, telles que des paires électron-positron, qui viennent changer ce comportement. Ceci découle du principe d'incertitude d'Heisenberg où une quantité d'énergie peut être empruntée du vide pendant un très court instant. Ces paires d'électron-positron forment ainsi des dipôles, qui assument un rôle similaire à des orbitales atomiques dans un matériau et induisent une interaction non linéaire dans les équations de Maxwell. À des intensités lumineuses suffisamment intenses, l'interaction non linéaire devient non négligeable et les photons peuvent interagir avec d'autres photons. Plusieurs procédés d'interaction sont alors accessibles, par exemple, le mélange à quatre ondes ou l'automodulation de phase, mais le procédé dominant pour l'apparition d'une force mécanique lors de la collision entre deux sabres lasers demeure le miroitement du vide. Celui-ci dicte qu'il est possible qu'un photon soit reflété à l'interface d'interaction entre deux faisceaux lasers en direction du manche du sabre laser. Ces photons reflétés provoquent une pression de radiation sur le manche qui induit une force mécanique lors de la frappe de deux sabres.

Ainsi, il serait théoriquement possible d'avoir la sensation de porter une épée solide lors du croisement de deux sabres lasers. Prenons comme exemple deux sabres de dimensions raisonnables et que notre sujet est Luke Skywalker portant son sabre bleu d'une longueur d'onde de 460 nm. On trouve mathématiquement que le miroitement du vide est si improbable qu'il serait nécessaire d'avoir une puissance d'environ 10e23W circulant dans le sabre, soit 1 % de la puissance radiative du soleil, pour avoir une pression radiative de 10 N au manche du sabre, équivalent à une masse de 1 kg tombant sur votre pied. Cette quantité astronomique permet ainsi de tirer la conclusion qu'un combat de sabres lasers n'est pas impossible à cause des limitations physiques, mais bien à cause d'une limitation pratique.

Malgré ce résultat plutôt décevant, on peut apprécier le fait que la science-fiction peut être utilisée comme médium pour développer des problèmes de physique bien plus complexes, sans se soucier de leur plausibilité. C'est en tout cas la vision de François Fillion-Gourdeau et Jean-Sébastien Gagnon, les auteurs de l'article sur lequel cette rubrique est basée. Ils pensent que l'utilisation de mise en contexte comme celle-ci peut ouvrir de nouveaux canaux d'apprentissage chez les étudiants au baccalauréat et ainsi augmenter l'engagement de ceux-ci afin d'approfondir leurs connaissances.

Texte de Jean-Christophe Ganon-Audet

Référence

Kurtz, G. (producteur), Lucas, G. (réalisateur/scénariste). (1977). Star Wars [Film cinématographique]. États-Unis : 20th Century Fox.

F. Fillion-Gourdeau et al. On the physical (im)possibility of lightsabers. *European Journal of Physics (2019)*.

Il n'y a pas de frontière au génie physique, et ce, dès le baccalauréat. Découvrez le parcours de ces étudiants qui ont su donner une valeur ajoutée à leur formation !

Aimé Toumelin, 3e année

Aimé Toumelin a choisi d'effectuer son premier stage en entreprise chez Bombardier Aéronautique à l'été 2019. Depuis sa première année de génie physique à Polytechnique Montréal, Aimé s'est impliqué au sein de PolyOrbite, une société technique spécialisée dans les technologies spatiales, dont le but est de développer une expertise étudiante en conception et fabrication de nanosatellites. Dès l'été 2018, il y fait ses débuts en tant que gestionnaire de projet, où son rôle est de gérer les équipes et de donner les lignes directrices. C'est d'ailleurs à travers PolyOrbite que le géant de l'aéronautique l'a approché pour rejoindre ses rangs en tant que stagiaire en gestion de projet. Le mandat de son stage se divisait en deux objectifs principaux. D'abord, Aimé a dû développer une application permettant de suivre l'état de production des harnais électriques d'avions, c'est-à-dire un regroupement de plusieurs circuits électriques. Les aéronefs contiennent des systèmes électriques complexes, ces harnais facilitent donc l'assemblage. Par ailleurs, il avait également pour rôle de centraliser l'information provenant des différents pôles de l'entreprise dans le but de faire des présentations aux membres de la direction, ce qui était nécessaire au suivi et à l'optimisation des différents secteurs. Habitué à relever des défis et à aborder des problèmes complexes de par sa formation en génie physique, Aimé n'a eu aucun problème à s'adapter lors de son passage en entreprise. Après avoir découvert la dynamique d'une multinationale, celui-ci souhaite maintenant explorer celle d'une plus petite entreprise. Finalement, le parcours d'Aimé nous montre que l'implication étudiante peut nous ouvrir à de nouveaux horizons.

Texte de Marie-Christine Paré

Pierre-Luc Thériault, 3e année

On dit souvent que le génie physique se distingue de par sa polyvalence dans les divers domaines de la science et de la technologie, Pierre-Luc Thériault est un étudiant qui n'y fait pas exception. En effet, au cours de sa deuxième année, il a participé au programme de bourses UPIR, lui permettant d'acquérir de l'expérience en recherche scientifique par la réalisation d'un projet sous la direction d'un(e) chercheur(e) subventionné(e). Pierre-Luc a cependant choisi d'effectuer son UPIR dans un autre domaine du génie, plus précisément auprès du professeur Jean-Jacques Laurin du département de génie électrique. Au cours de son projet, Pierre-Luc a exploré le concept d'antenne reconfigurable à base de guide d'onde rectangulaire dont on peut simplement faire varier la géométrie. En effet, il est possible d'utiliser un guide d'onde avec des fentes pour faire une antenne. En faisant varier sa géométrie, on modifie sa constante de propagation, ce qui provoque un changement de sa direction d'émission. Bien que le projet de Pierre-Luc était en lien avec le génie électrique, ses habiletés en mathématiques et en résolution de problèmes développées à travers son programme d'étude lui ont été indispensables. Suivant en simultané le cours de *Fondements et applications de l'électromagnétisme*, il a été en mesure de mieux comprendre son projet et, inversement, ce dernier lui a permis de consolider certaines notions vues dans le cadre du cours. Pierre-Luc a également pu se familiariser avec des logiciels de simulation par éléments finis, plus spécifiquement HFFS, spécialisé pour les problèmes d'électromagnétisme. Finalement, le UPIR de Pierre-Luc lui a permis d'explorer un nouveau domaine, ce qui lui permettra de faire un choix plus éclairé lorsque viendra le temps de s'orienter vers les études aux cycles supérieurs ou vers sa carrière d'ingénieur.

Texte de Marie-Christine Paré

Félix Desrochers, 4ème année

Pendant que plusieurs employaient l'automobile ou les transports en commun pour se rendre à leur première journée de stage cet été, Félix Desrochers, lui, prenait l'avion en direction de l'Europe. Plus précisément, à Cologne en Allemagne, où il a passé son été dans le cadre d'un stage à l'international dans le laboratoire de matière topologique de Cologne (TMLC). À la recherche d'un stage dans un domaine lié aux technologies quantiques, il a réussi à en obtenir un à travers l'organisme DAAD. Responsable des services d'échange académique en Allemagne, le DAAD a mis en place le programme RISE, qui permet aux étudiants nord-américains et britanniques, à travers une plateforme en ligne, de rentrer en contact avec les professeurs allemands et de trouver des opportunités de stage et des bourses d'études. Félix a eu l'opportunité de travailler sur une piste prometteuse en informatique quantique : les fermions de Majorana. Ayant la propriété d'être leurs propres antiparticules, ces quasiparticules sont des candidats intéressants pour le rôle de qubit en raison de leur statistique d'échange non abélienne et de leur nature non locale. Le rôle de Félix dans ce projet concernait leur détection. Il a pu travailler en salle blanche à la nanofabrication de dispositifs composés d'un nanofil d'isolant topologique recouvert d'une mince couche supraconductrice, ensuite utilisés pour des mesures de transport à température ultra-faible aux alentours de 10 mK. Il était finalement possible de confirmer la présence de fermions de Majorana en détectant certaines signatures typiques, comme l'effet de Josephson anormale. Félix a pu contribuer à ce long processus qu'est la détection d'une nouvelle quasiparticule tout en vivant un été hors du commun sur un autre continent. Cette expérience nous rappelle la nature internationale de la recherche scientifique et les opportunités uniques que celle-ci peut apporter à ceux qui en font partie.

Texte de Jean-Christophe Gagnon-Audet

Nous sommes à la recherche de nouveaux membres pour continuer le projet.

Contactez-nous !

revue.gphysique@gmail.com

L'équipe de rédaction remercie le département de génie physique et Theldja Mekki pour leur soutien.