

LA RECHERCHE DANS LE RÉSEAU DE L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

L'ANNÉE-LUMIÈRE

Mises à l'honneur en 2015 par les Nations unies,
les technologies de la lumière bouleversent le monde
de la recherche. Et le Québec n'est pas en reste.

Cette image lumineuse est un sujet d'expérimentation
pour Philippe Boissonnet, professeur d'arts visuels et
médiatiques à l'Université du Québec à Trois-Rivières.
Nous voyons ici le détail d'un hologramme intitulé
La conscience des limites: galileo.

UNE ÉNIGME TRÈS ANCIENNE

QU'EST-CE QUE LA LUMIÈRE ?

À la fois onde et particule, la lumière a donné du fil à retordre aux physiciens depuis l'Antiquité.

Elle a permis l'essor de la vie sur Terre et symbolise le divin dans toutes les religions. Elle rythme notre quotidien. Elle est un outil privilégié pour les ingénieurs et a toujours fasciné les physiciens. La lumière a amené quantité de découvertes scientifiques. Mise à l'honneur par les Nations unies, qui ont déclaré 2015 l'Année internationale de la lumière et des technologies fondées sur la lumière, elle est, au plan scientifique, l'un des phénomènes les plus complexes et mystérieux à saisir.

« Les scientifiques se sont interrogés très tôt sur la nature de la lumière. On a longtemps cru que c'était l'œil qui l'émettait et éclairait les objets », rappelle Yves Gingras, professeur d'histoire et de sociologie des sciences à l'Université du Québec à Montréal (UQAM). C'est aux alentours de l'an 1000 que le scientifique arabe Ibn al-Haytham met à mal cette théorie et démontre que l'œil est un instrument d'optique et non pas un générateur de lumière.

Cela dit, la « géométrie » de la lumière, elle, est comprise très tôt. « Dès l'Antiquité, notamment grâce à Ptolémée, on décrit les lois de la réflexion de la lumière sur les miroirs, par exemple », poursuit l'historien. Ibn al-Haytham reprend aussi les travaux de Ptolémée et les complète, étudiant la réfraction, c'est-à-dire la déviation d'un rayon lumineux lorsqu'il passe d'un milieu à un autre; par exemple de l'air à l'eau. Le savant est aussi l'un des premiers à soupçonner que la vitesse de la lumière est finie. Celle-ci ne sera évaluée précisément qu'en 1676 par l'astronome danois Ole Römer.

Mais l'histoire de la lumière ne s'est pas arrêtée là. Elle continue même à être un sujet de science et de technologie largement étudié, notamment en ce qui concerne la mise au point et l'utilisation de lasers. Et le dossier que nous vous proposons ici vous permettra d'entrer de plain-pied dans la recherche de pointe en ce qui concerne notre futur lumineux. ■

Un dossier réalisé par Marine Corniou



IL Y A 3,8 MILLIARDS D'ANNÉES LA GRANDE OXYDATION

Si l'on ne sait pas exactement comment la vie est apparue sur Terre, une chose est sûre, c'est le « domptage » de la lumière qui a permis aux organismes primitifs de conquérir la planète et de rendre l'atmosphère respirable.

La Terre, jadis, était peu propice à la vie. « La couche d'ozone n'existait pas et les premières bactéries devaient donc résister aux ultraviolets qui bombardaient la Terre », explique Philippe Juneau, professeur au département des sciences biologiques de l'UQAM.

Quant au taux d'oxygène dans l'atmosphère, il équivaut alors à 0,001% du taux actuel. La planète bleue est irrespirable! Un peu plus de 1 milliard d'années plus tard, pourtant, tout change. C'est la « Grande Oxydation » qui correspond à une augmentation brutale de la concentration d'oxygène dans l'air.

Que s'est-il passé? Cette bouffée d'oxygène, c'est majoritairement aux cyanobactéries qu'on la doit. « Ce sont les bactéries qu'on appelle à tort des algues bleu vert. Elles font partie des premiers organismes apparus sur Terre », précise le biologiste.

Leur coup de génie, c'est d'avoir « inventé » la photosynthèse, cette capacité à exploiter la lumière du soleil pour produire de l'énergie en libérant de l'oxygène. Une innovation qui permettra à la vie de quitter les fonds océaniques et de conquérir progressivement toute la planète. Car sous l'effet du rayonnement UV, l'apparition d'oxygène a permis

l'accumulation d'ozone dans les couches supérieures de l'atmosphère, créant ainsi un milieu plus clément et permettant l'émergence de formes de vie plus complexes.

Aujourd'hui encore, la photosynthèse est à la base de la chaîne du vivant, permettant la prolifération du phytoplancton. C'est le seul mécanisme capable d'assurer le renouvellement constant de l'oxygène.

« La photosynthèse est le cœur de la vie sur Terre, reprend le chercheur. Il y a plusieurs hypothèses quant à la date d'apparition des premières réactions photosynthétiques, mais nous savons que c'est survenu très tôt dans l'histoire de notre planète. »

En se nourrissant de lumière pour créer de la matière carbonée, les premières cyanobactéries ont ouvert la voie de la photosynthèse à tous les végétaux, apparus des millions d'années plus tard. En effet, les chloroplastes, ces petits organites qui réalisent la photosynthèse chez les plantes, sont très probablement issus d'une cyanobactérie « absorbée » par une autre cellule – un phénomène appelé endosymbiose.

Ces bactéries ancestrales n'ont pas disparu. Elles constituent la majorité du phytoplancton, et

C'est en se nourrissant de lumière pour créer la matière carbonée que les premières cyanobactéries ont ouvert la voie de la photosynthèse à tous les végétaux.

SOMMAIRE



Œuvre holographique de Philippe Boissonnet (détail). Elle a été réalisée en 2013.

Une énigme très ancienne III

Il y a 3,8 milliards d'années, la Grande Oxydation Et la lumière fut
Une brève histoire de la lumière

L'invention du siècle? VI

La lumière mise en boîte
Les lasers pour « voir » la matière
En mode accéléré

Un spectre d'innovations XI

La photonique contre les micro-embouteillages
L'âge des cristaux
La vie en vraies couleurs
La signature de l'eau
Éclairer le futur



Ce dossier est inséré dans le numéro de décembre 2015 du magazine *Québec Science*. Il a été financé par l'Université du Québec et produit par le magazine *Québec Science*.

Le comité consultatif était formé de :

Marie Auclair, UQAM
Sébastien Charles, UQTR
Stéphane Allaire, UQAC
Frédéric Deschenaux, UQAR
André Manseau, UQO
Josée Charest, INRS
Josée Gauthier, ENAP
Sylvain G. Cloutier, ÉTS
Éric Lamiot, TÉLUQ
Céline Poncelin de Raucourt, UQ
Valérie Reuillard, UQ
David H. Mercier, UQ
Raymond Lemieux, *Québec Science*

Coordination:

Raymond Lemieux
et Valérie Reuillard

Rédaction:

Marine Corniou

Graphisme:

Maxime Girard

Révision: Hélène Matteau

Correction-révision:

Luc Asselin

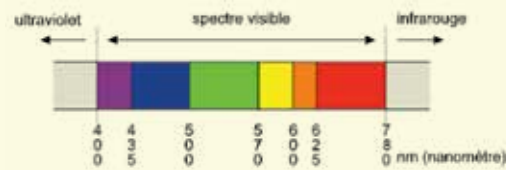
Bibliothèque nationale du Canada:

ISSN-0021-6127

Les 10 établissements du réseau de l'Université du Québec ont pour mission de faciliter l'accessibilité à l'enseignement universitaire, de contribuer au développement scientifique du Québec et au développement de ses régions.

LE SPECTRE DE LUMIÈRE

La lumière visible par l'œil humain est composée de l'ensemble des ondes dont la longueur est comprise entre 380 nanomètres (nm) et 780 nm (un nanomètre est égal à un milliardième de millimètre). Dans cet intervalle appelé spectre, chaque longueur d'onde correspond à une couleur. Le spectre visible n'est qu'un fragment du spectre électromagnétique; les autres longueurs d'onde correspondent à celles que l'on ne voit pas, soit le rayonnement UV, les micro-ondes, les rayons X, etc. Cependant, on parle souvent de « lumière » infrarouge ou ultraviolette. ■



on les trouve absolument partout sur le globe, que ce soit dans l'eau douce ou salée, dans la glace ou les déserts, dans les eaux thermales brûlantes ou même sur les rochers, où elles vivent en symbiose avec un champignon pour former du lichen. À quoi doivent-elles leur succès? «Elles possèdent des pigments qui leur permettent d'exploiter la majeure partie du spectre de la lumière», précise Philippe Juneau, spécialiste de ces micro-organismes. Il faut savoir que, afin de capter la lumière, les organismes photosynthétiques font appel à plusieurs pigments, le plus connu et le plus abondant étant la chlorophylle. Au contact des photons, les électrons de ces pigments s'excitent – sont «énergisés» – et sont transférés de molécules en molécules. Grâce à ces réactions en chaîne, les cellules parviennent à produire de l'énergie chimique

à partir d'eau; cela leur permet, dans un second temps, de fabriquer des glucides à partir du dioxyde de carbone de l'air.

Pour exploiter au mieux la matière première lumineuse, les pigments doivent pouvoir capter le plus de longueurs d'onde possible – c'est-à-dire, le plus de couleurs du spectre possible. La chlorophylle, à elle seule, est loin du compte. «Elle n'absorbe pas dans le vert, c'est pourquoi les plantes apparaissent vertes. D'autres pigments, les caroténoïdes, sont aussi omniprésents chez les plantes, mais les cyanobactéries possèdent en plus des phycocyanines et des phycoérythrine qui absorbent la lumière là où la chlorophylle n'est pas efficace», ajoute Philippe Juneau. Résultat, elles profitent au maximum des photons du soleil. Certaines études ont même démontré que les cyanobactéries pouvaient changer leur pigmen-

tation en quelques jours lorsqu'on les expose à une lumière d'une certaine longueur d'onde, histoire de capter plus efficacement cette couleur dominante.

«En laboratoire, les cyanobactéries sont utilisées comme des organismes modèles pour étudier la photosynthèse», indique le biologiste. Hélas, les «algues bleu vert» ont aujourd'hui mauvaise presse. Avec leur forte capacité d'adaptation, elles ont une fâcheuse tendance à envahir les lacs, libérant des substances toxiques. «Le problème, aujourd'hui, ce sont les variations dans l'état de notre environnement qui engendrent dans certains

cas un déséquilibre entre les algues et les cyanobactéries, et favorisent leur prolifération», déplore Philippe Juneau, qui étudie le phénomène. Ce qui ne devrait pas nous faire oublier les fiers services qu'elles ont rendus au monde du vivant. ■

UNE BRÈVE HISTOIRE DE LA LUMIÈRE EN TROIS TEMPS

Newton. Au XVII^e siècle, Isaac Newton franchit une étape majeure en décomposant, à l'aide d'un prisme, le spectre de la lumière blanche et en démontrant qu'il est composé de plusieurs couleurs. Le physicien théorise aussi sur la nature de la lumière. Pour lui, chaque couleur correspond à des « corpuscules » se déplaçant à des vitesses différentes.

Huygens. À peu près au même moment, le physicien hollandais Christiaan Huygens décrit au contraire la lumière comme une onde, similaire à celles que l'on peut observer à la surface de l'eau. C'est la théorie qui va dominer jusqu'au XX^e siècle.

Einstein. Le conflit sur la nature corpusculaire ou ondulatoire de la lumière va durer jusqu'à ce que les travaux de physique d'Albert Einstein, en 1909, permettent de trancher. «Pour expliquer l'effet "photoélectrique" [NDLR: correspondant à l'émission d'électrons observée lorsque de la lumière UV frappe une surface métallique], Einstein conclut que la lumière est à la fois un faisceau de particules et une onde. C'est ce qu'on appelle la dualité onde-corpuscule. Il qualifie lui-même ses travaux de révolutionnaires», note l'historien Yves Gingras.

Avouons que le concept est encore difficile à saisir. La lumière se comporte tantôt comme une onde électromagnétique, tantôt comme un flux de particules (les photons). D'ailleurs, en mars dernier, des chercheurs de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, en Suisse, ont réussi à «photographier» simultanément les deux aspects de la lumière, en utilisant un flux d'électrons.

ET LA LUMIÈRE FUT...

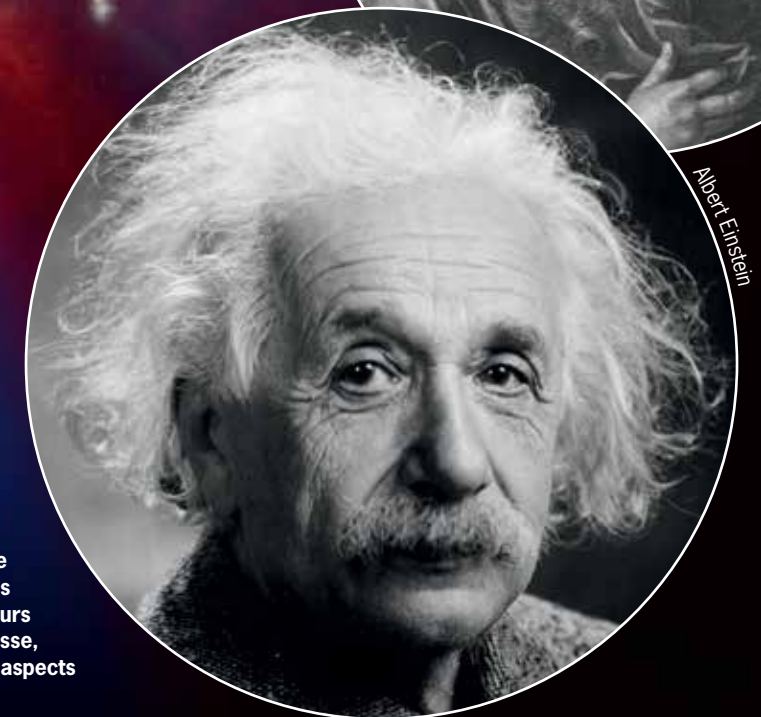
De légendes en croyances, de contes en mythologies, les peuples du monde entier ont imaginé toutes sortes d'histoires pour expliquer la naissance du Soleil ou celle de la lumière, souvent perçus comme des incarnations du divin. Mais la lumière et ses origines fascinent aussi les cosmologistes. Il faut dire qu'il est encore possible d'observer, aujourd'hui, la première lueur de l'Univers, émise 380 000 ans après le big-bang. Petit retour en arrière. Juste après sa naissance, l'Univers ressemble à une soupe extrêmement dense et chaude de particules (de noyaux d'hydrogène et d'électrons), totalement opaque. Avec l'inflation, c'est-à-dire l'expansion brutale du cosmos, cette purée de pois se dilate et se refroidit, jusqu'à atteindre 2 700 °C au bout de 380 000 ans. C'est à cette température que les atomes commencent à se former, libérant d'un coup les photons jusqu'ici englués dans la « soupe ». Le cosmos devient soudainement transparent; la lumière fuse. Ce « flash » originel nous parvient, encore aujourd'hui, après un long voyage de 13,8 milliards d'années. Cette « lumière » arrive en fait sous forme d'émission très faible, dans le domaine de longueur d'onde des micro-ondes (entre l'infrarouge et les ondes radio). Elle est décelable par certains télescopes.



Isaac Newton



Christiaan Huygens



Albert Einstein

L'INVENTION DU SIÈCLE ?



LA LUMIÈRE MISE EN BOÎTE

Les lasers sont partout : dans l'industrie, dans la vie quotidienne et dans les laboratoires de recherche. Mais il a fallu des décennies avant que les scientifiques parviennent ainsi à domestiquer la lumière.

Les équipements de système laser nécessitent des ajustements minutieux comme le fait ici le technicien François Poitras de l'INRS à Varennes.

Quand le physicien états-unien Theodore Maiman met au point le premier laser en 1960, la communauté scientifique est loin de se douter qu'une révolution est en marche. La découverte intrigue, mais elle est qualifiée de « solution dont on cherche encore le problème »... Aujourd'hui, les lasers sont partout. Ils permettent de générer et de stocker de l'information (fibres optiques, CD, etc.), de pratiquer des interventions chirurgicales, de découper des matériaux, de décaper des bâtiments, d'analyser la matière, de faire de la microscopie ou de l'astronomie, ou encore de guider des missiles. « Je ne fais plus vraiment le compte, mais au-delà de 50 prix Nobel, que ce soit en chimie, en physique ou en médecine, sont liés à l'utilisation des lasers », aime à rappeler Sylvain Cloutier, professeur au département de génie électrique de l'École de technologie supérieure (ÉTS).

Il faut dire que la lumière émise par les lasers n'a rien de banal. Elle est même radicalement différente de la lumière naturelle. Alors que cette dernière est constituée d'ondes qui se déplacent dans toutes les directions, le faisceau laser, lui, est très directionnel et se propage sans diverger, ou très peu. Alors que la lumière du jour est composée de toutes les couleurs (ou longueurs d'onde) de l'arc-en-ciel, la lumière laser est soit faite d'une seule longueur d'onde,

lorsque le rayonnement est continu – comme dans les pointeurs laser –, ou de plusieurs longueurs d'onde très proches les unes des autres, lorsque le laser émet plutôt des flashes de lumière (impulsions) de durée définie. Enfin, dans la lumière « classique »,

On est aujourd'hui capable de générer des impulsions laser ultracourtes, de moins de 1 milliardième de seconde.

les différentes ondes sont chaotiques et indépendantes les unes des autres. « Dans un flash laser, les différentes ondes sont « en phase ». On force toutes les ondes à se déplacer dans la même direction pour qu'elles puissent communiquer (interférer) ensemble et créer ce qu'on appelle l'impulsion », explique François Légaré, spécialiste des lasers au Centre Énergie Matériaux Télécommunications de l'Institut national de la recherche scientifique (INRS) à Varennes.

Pour domestiquer ainsi la lumière, il a fallu des décennies de travail théorique, initié par Einstein en 1905. Derrière le mot « laser » se cache d'ailleurs un acronyme complexe, issu de la langue anglaise, signifiant « amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement ». Comme son nom l'indique – de façon assez obscure, convenons-en! – le laser consiste donc à amplifier la lumière et à l'ordonner. Il se compose d'un milieu amplificateur (il peut s'agir d'un gaz, d'un liquide ou d'un solide), d'une cavité composée de deux miroirs qui « emprisonne » la lumière et d'une source externe d'énergie pour exciter le milieu amplificateur.

Pour comprendre, un rappel s'impose : lorsqu'un atome reçoit un photon, il l'absorbe et atteint un niveau d'énergie supérieur. On dit qu'il est excité, c'est un état qui ne dure pas. En repassant à un niveau plus bas d'énergie, il émet à nouveau un photon, dans une direction aléatoire. Cependant, Albert Einstein a découvert que, lorsqu'un atome déjà excité reçoit un photon, il en émet deux dans la même direction, c'est l'émission stimulée. Ce qui permet d'obtenir une lumière homogène (on dit « cohérente »).

Dans le laser, en excitant le milieu amplificateur (ce qu'on appelle le « pompage optique », à l'aide de décharges électriques ou d'un autre laser), on transmet donc de l'énergie aux atomes pour les faire passer dans un état excité. Les atomes émettent alors un photon chacun, lequel rencontre un autre atome qui va l'absorber, et qui va émettre deux photons de façon « stimulée », et ainsi de suite. L'effet de cascade permet d'amplifier rapidement le rayonnement, d'autant que les photons rebondissent sur les miroirs de la cavité laser et traversent plusieurs fois le milieu actif. Finalement, l'un des miroirs partiellement réfléchissants laisse s'échapper de la lumière : c'est le faisceau laser.

Si le premier laser a fonctionné avec un cristal de rubis, l'arsenal optique des chercheurs s'est beaucoup diversifié depuis. Et on est aujourd'hui capable de générer des impulsions laser ultracourtes, de moins de 1 milliardième de seconde. François Légaré, qui est directeur du Laboratoire de sources femtosecondes (LSF) de l'INRS, s'intéresse justement à ces outils. « Ce sont les lasers basés sur des cristaux de titane-saphir comme milieu amplificateur qui sont les plus utilisés pour cela, mais ils ont leurs limites. En les faisant interagir avec un gaz, on peut par contre convertir leur longueur d'onde vers une longueur d'onde plus



François Légaré, directeur du Laboratoire de sources femtosecondes de l'INRS, vient de recevoir la prestigieuse médaille Herzberg de l'Association canadienne des physiciens et physiciennes.

courte, ce qui permet de générer des impulsions attosecondes (10^{-18} seconde, soit 1 milliardième de milliardième de seconde) plutôt que femtosecondes (10^{-15} seconde) », explique le spécialiste.

Le but? « Observer les dynamiques d'électrons, qui sont des éléments de base des atomes, et qui, lorsqu'ils sont échangés entre différents atomes, permettent de créer des liaisons chimiques, donc des molécules », dit-il. Par exemple, les atomes dans une molécule vibrent à l'échelle de la femtoseconde, et un électron fait le tour d'un atome d'hydrogène en 152 attosecondes. « Quand on veut photographier une Formule 1 qui met une minute à faire le tour du circuit, il faut un appareil photo rapide. C'est pareil pour les électrons : il faut faire des flashes de lumière plus courts que 152 attosecondes! » ajoute le scientifique qui vient de recevoir la médaille Herzberg de l'Association canadienne des physiciens et physiciennes pour sa contribution dans le domaine de l'imagerie... ultrarapide. ■

L'AVÈNEMENT DES TÉRAHERTZ

Situées entre les domaines micro-onde et infrarouge (entre 0,1 térahertz (THz) et 15 THz), les ondes térahertz sont longtemps restées une portion inexplorée du spectre électromagnétique, parce qu'il était difficile de les détecter et de les produire. « Les impulsions lasers ultracourtes permettent maintenant de les générer et de les détecter », explique François Blanchard, chercheur à l'ÉTS qui travaille étroitement avec l'université de Kyoto, au Japon, où il a terminé un postdoctorat sur la microscopie des térahertz. « Les techniques de laser associées à ces ondes sont particulières. Elles permettent de mesurer l'amplitude et la phase de l'onde, comme pour l'électricité. Et depuis 10 ans, la recherche dans le domaine explose! »

L'intérêt? Les applications sont nombreuses, car ces rayons passent à travers plusieurs matériaux opaques, comme le plastique, le papier, le bois ou les vêtements. « Mais elles sont moins énergétiques et donc en principe moins dangereuses que les rayons X, poursuit-il. Ces ondes sont fortement absorbées par l'eau. Elles ont donc un grand intérêt en médecine pour, par exemple, visualiser les cellules cancéreuses de la peau, puisque ces dernières n'absorbent pas les ondes de la même manière que les cellules saines. »

Jusqu'ici, les térahertz ont surtout été utilisées dans le domaine de la sécurité des transports. De nombreux voyageurs s'y sont déjà exposés dans les aéroports, en passant dans les « scanners corporels » qui permettent littéralement de voir à travers les vêtements. Il faut dire que les photons térahertz permettent de caractériser finement, sans contact, les composants d'une substance solide, liquide ou même gazeuse. C'est ce qu'on appelle la spectroscopie térahertz. D'où l'idée de les utiliser pour repérer des explosifs, comme le RDX (ou cyclotriméthylènetrinitramine) qui pourrait être caché sous les vêtements ou dans des paquets. « Avec ces ondes, on peut même détecter la présence d'objets métalliques dans le chocolat. On pourrait aller jusqu'à déterminer son taux de sucre », précise François Blanchard.

Du côté de la recherche, les ondes térahertz permettent de sonder la matière et d'évaluer la conductivité des matériaux de pointe comme le graphène et la pérovskite, qui serviront pour le stockage et la conversion plus efficace de l'énergie solaire. « Elles constituent un outil fantastique pour le développement et la caractérisation des matériaux », note le chercheur.

LES LASERS POUR «VOIR» LA MATIÈRE

La lumière sait faire parler les matériaux, et peut révéler leurs propriétés cachées. L'interaction «laser-matière» est au centre de nombreux domaines de recherche.

On les trouve dans les lecteurs de code-barres ou de DVD, dans l'industrie pour la découpe métallique ou l'impression 3D, dans les photocopieuses ou les imprimantes, ou encore au bloc opératoire d'un hôpital. Les lasers sont partout. Y compris, bien sûr, dans les laboratoires, où ils constituent un outil précieux pour étudier les matériaux ou les tissus vivants. «Comme le laser focalise énormément d'énergie sur une petite surface, il peut faire vibrer les matériaux, les exciter. De notre côté, en regardant comment le matériau réagit, on peut obtenir des informations précises sur ses propriétés fondamentales et électroniques», explique **Sylvain Cloutier**, professeur au département de génie électrique de l'ÉTS.

L'étude des interactions laser-matière est désormais au cœur de l'innovation, dans tous les domaines, qu'il s'agisse de l'aéronautique ou des nanotechnologies. Le chercheur a même, par le passé, travaillé en collaboration avec des restaurateurs d'œuvres d'art aux États-Unis, qui cherchaient à caractériser le type de peinture utilisée sur un tableau. «Leur crainte était que, en restaurant la couleur avec un autre pigment, il y ait des réactions chimiques inattendues. Grâce au laser, on peut découvrir la "signature moléculaire" des peintures utilisées et éviter les mauvaises surprises», explique-t-il.

À l'ÉTS, Sylvain Cloutier a troqué les toiles de maître contre des semi-conducteurs. «Le cœur de ma recherche, c'est de développer de nouveaux matériaux avec des propriétés uniques. On a par exemple découvert qu'en perçant des nano-trous dans le silicium, on pouvait modifier ses propriétés», poursuit-il.

De quoi inventer des revêtements de surface uniques pour l'aérospatiale ou encore créer des cellules photovoltaïques imprimables capables de se plier. «L'idée, c'est de développer des matériaux un peu moins performants que ce qui se fait actuellement, mais à un coût de production environ 1% de ce qu'il est présentement. Par exemple, plutôt que d'utiliser un bloc entier de semi-conducteur, dont la synthèse est très onéreuse, on utilise

des nanoparticules de silicium qui s'accrochent l'une à l'autre grâce à une molécule "velcro". Les nanobilles s'assemblent couche par couche. Bien que la performance soit un peu diminuée par rapport au silicium pur, cela coûte tout de même beaucoup moins cher. En changeant la molécule velcro utilisée, on pourrait encore modifier les propriétés du matériau», observe l'ingénieur.

Si les lasers permettent d'en savoir plus sur les matériaux composites de demain, à l'INRS, au Laboratoire de sources femtosecondes LSF, **Jean-Claude Kieffer** les emploie pour en savoir plus sur... la matière vivante. «Notre installation est unique au Canada et est dotée de lasers ultracourts qui génèrent des impulsions de 20 à 30 femtosecondes (10^{-15} seconde)», explique-t-il. Inventés il y a 25 ans, ces lasers femtosecondes ne prennent réellement leur essor que depuis une dizaine d'années. En concentrant l'énergie des impulsions en un temps très court, de l'ordre du millionième de milliardième de seconde, ils permettent d'atteindre une puissance énorme, d'environ 200 térawatts (10^{12} watts) (à comparer à la puissance de production électrique de la planète Terre d'environ 4 térawatts!).

«Ces lasers permettent de voir les réactions chimiques se produire en temps réel, car toutes les réactions à l'échelle de l'atome ou des molécules se produisent sur des échelles de temps extrêmement brèves», précise le chercheur. Tel un stroboscope, le laser femtoseconde bombarde donc la matière vivante pour prendre des clichés instantanés des molécules.

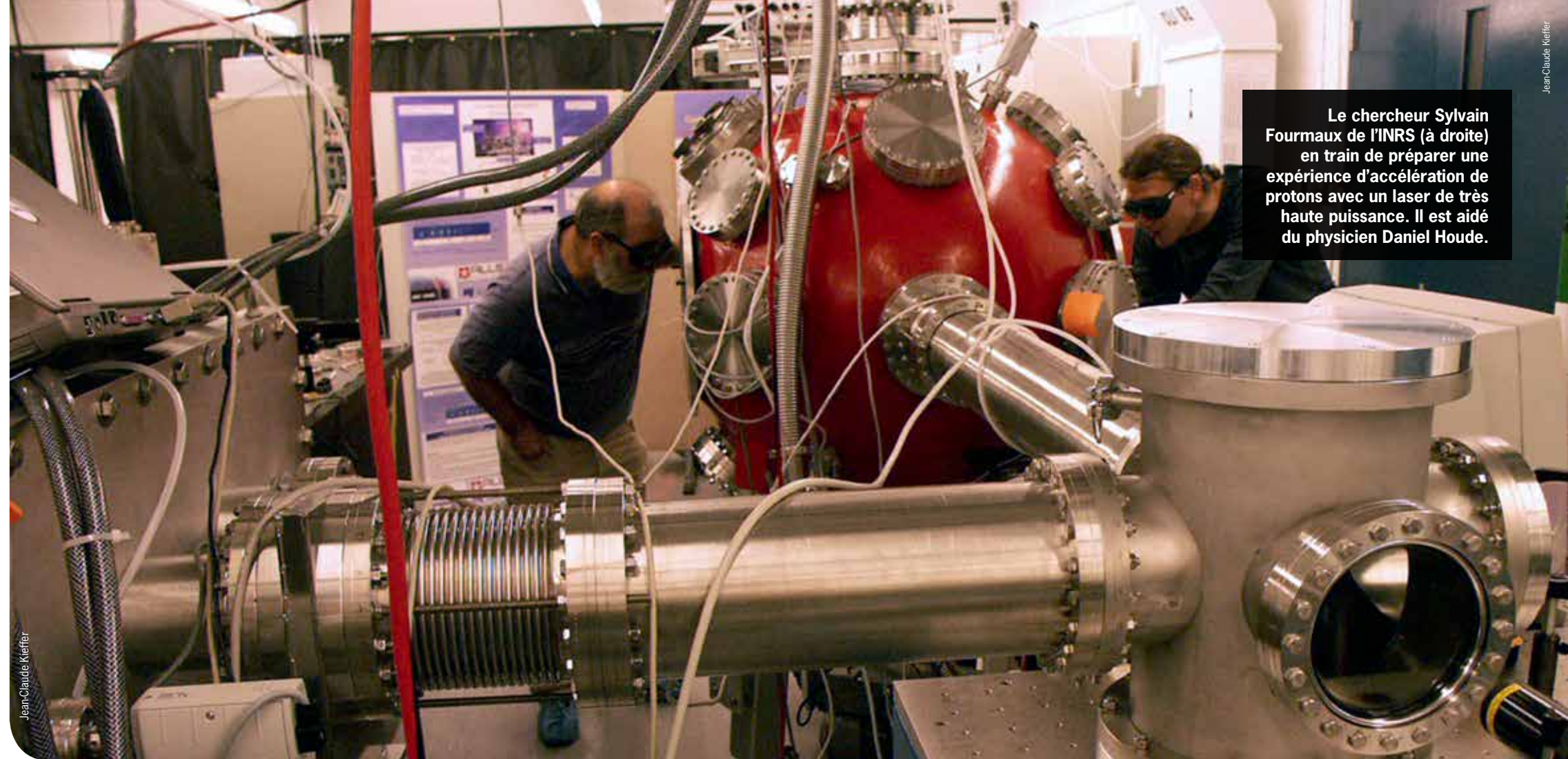
«Actuellement, le laser "tire" environ 10 coups par seconde, mais la prochaine génération pourrait aller jusqu'à 1 000 coups par seconde. Le but est de visualiser de façon dynamique les molécules complexes, comme la myoglobine. Cette enzyme change de configuration pour transporter et relâcher l'oxygène au niveau des muscles, en une fraction de seconde. En la martelant avec un laser, on peut induire ce changement de structure et le visualiser», ajoute-t-il. Il devient donc possible de suivre les mouvements des atomes qui se séparent ou se rapprochent au sein d'une molécule, et même de détecter les transferts d'électrons entre atomes.

En 2014, l'équipe du professeur **François Légaré** a ainsi réussi à faire un «film moléculaire» révélant la transformation d'une molécule naturelle,

l'acétylène, en vinylidène, une molécule présente dans le plastique. «Nous avons réussi à suivre le déplacement d'un proton, qui saute d'un côté à l'autre de la molécule lors de ce réarrangement. Obtenir des images dynamiques des systèmes chimiques, c'est l'avenir de l'imagerie», explique François Légaré dont l'exploit a été publié dans la revue *Nature Communications* et s'avère prometteur pour la recherche en chimie, biologie ou pharmacologie.

Et ce n'est pas tout! Les lasers peuvent aussi constituer des sources de rayonnement utiles en imagerie médicale. «Lorsqu'on fait interagir le laser avec un solide, on peut focaliser l'énergie sur une toute petite surface, de quelques micromètres carrés, ce qui fait chauffer la matière et entraîne l'émission de rayons X», reprend Jean-Claude Kieffer. Ces sources de rayons X sont 50 à 100 fois plus faibles que les sources conventionnelles utilisées en médecine: «Cela nous permet d'avoir des images à très haut contraste et de bien meilleure résolution, poursuit-il. Ces sources pourraient être utilisées en médecine d'ici trois ans, et elles pourraient constituer des outils puissants pour la détection de tumeurs précoces.» ■

Le chercheur **Sylvain Fourmaux** de l'INRS (à droite) en train de préparer une expérience d'accélération de protons avec un laser de très haute puissance. Il est aidé du physicien **Daniel Houde**.

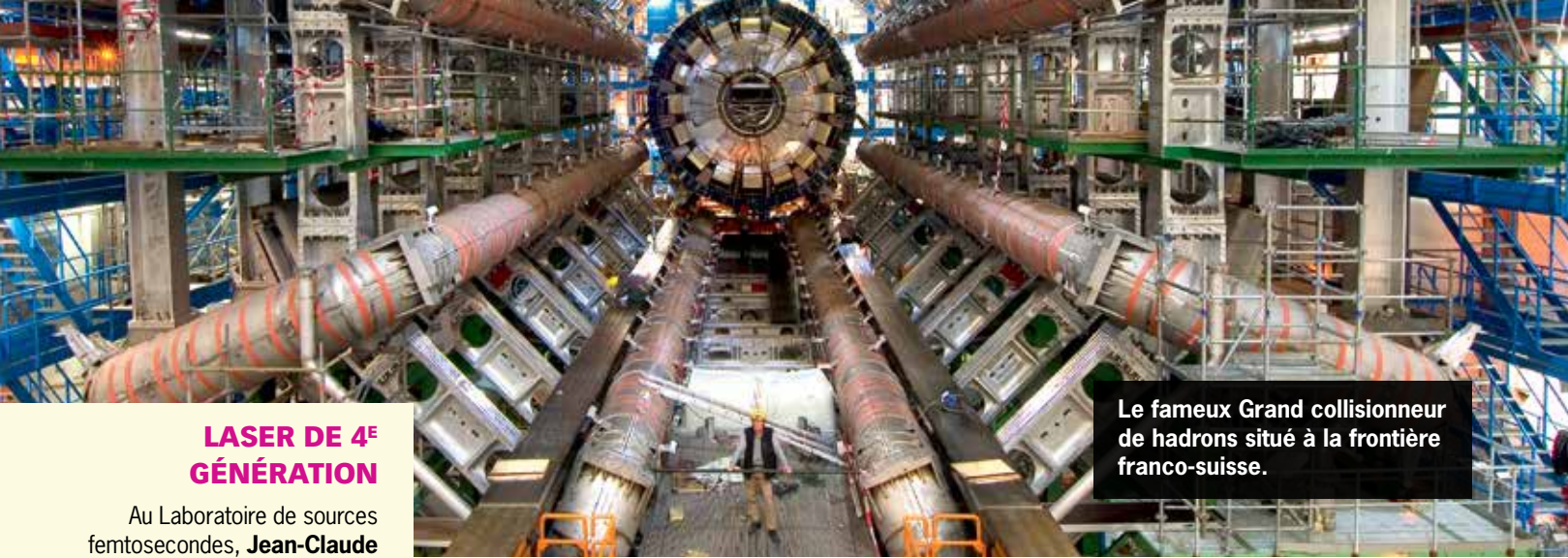


Jean-Claude Kieffer

Jean-Claude Kieffer



Jean-Claude Kieffer, professeur au Centre Énergie Matériaux



LASER DE 4^E GÉNÉRATION

Au Laboratoire de sources femtosecondes, **Jean-Claude Kieffer** focalise son énergie sur un projet ambitieux : la création d'un laser dit à électrons libres, en collaboration avec le Centre canadien de rayonnement synchrotron situé à Saskatoon.

Contrairement aux lasers classiques qui utilisent des atomes ou des molécules excités pour amplifier la lumière, cette nouvelle génération de lasers fonctionne grâce à un faisceau d'électrons libres – c'est-à-dire non liés à des atomes – accélérés à une vitesse proche de celle de la lumière. « On fait passer ces électrons dans un onduleur, c'est-à-dire une série d'aimants, et ils se mettent à osciller ainsi qu'à émettre de la lumière », explique le physicien.

Les lasers à électrons libres permettent d'émettre des impulsions très courtes et d'ajuster la fréquence dans une gamme très large, depuis l'infrarouge jusqu'aux rayons X, en modifiant la vitesse des électrons. Mais leur coût est prohibitif : il n'en existe pour l'instant que deux dans le monde, un en Allemagne et l'autre aux États-Unis, à Stanford. Ce dernier, le Linac Coherent Light Source (LCLS), le plus puissant du monde, produit des impulsions de rayons X au moins 1 milliard de fois plus intenses que les sources conventionnelles les plus puissantes. « Notre but est de créer un laser à électrons libres à un coût très réduit : il devrait être opérationnel dès 2016 », annonce M. Kieffer.

Le fameux Grand collisionneur de hadrons situé à la frontière franco-suisse.

Maximilien Brice / CERN

EN MODE ACCÉLÉRÉ

Les lasers femtosecondes repoussent les frontières de la physique.

C'est la plus grosse machine jamais construite par l'homme. Avec son anneau d'une longueur de 27 km, le Grand collisionneur de hadrons (LHC) de Genève est un terrain de jeu de rêve pour les physiciens. Mais tous les chercheurs ne disposent pas d'un accélérateur de ce calibre, pour dévoiler les secrets fondamentaux de la matière! **Jean-Claude Kieffer**, lui, a trouvé la parade. Dans son Laboratoire de sources femtosecondes, à l'INRS, ce sont les lasers qu'il utilise pour accélérer les électrons. « Les lasers nous permettent de créer de mini-accélérateurs de particules, explique-t-il. En fait, on se sert de la lumière comme d'un piston qui exerce une pression sur la matière et l'accélère. »

Son laboratoire, leader canadien dans le domaine, expérimente deux techniques d'accélération : par plasma et par champ laser. Alors que le laser agit directement sur les électrons, l'accélération laser-plasma s'obtient de façon indirecte. « Les impulsions laser ultracourtes interagissent d'abord avec un gaz et l'ionisent au fur et à mesure, créant des particules chargées. Dans ce plasma, il apparaît alors des sortes de vagues, sur lesquelles les électrons "surfent" pour accélérer », explique le chercheur.

Comme un sillage laissé à la surface de l'eau par un bateau, ces ondes créent en fait des champs électriques intenses capables d'accélérer les particules rapidement et sur de très courtes distances. « À titre de comparaison, on atteint une vitesse donnée en 1 cm, tandis que les accélérateurs linéaires y parviennent en 100 m! » indique-t-il.

En décembre dernier, l'accélérateur laser-plasma le plus puissant du monde, situé au Lawrence Berkley

National Laboratory aux États-Unis, a permis d'accélérer des électrons jusqu'à une valeur d'énergie de 4,25 gigaélectronvolts (GeV) dans un tube long de 9 cm. Soit un gradient d'énergie 1 000 fois plus important que ce que des accélérateurs de particules classiques, permettent d'obtenir! C'est dire l'enthousiasme que suscitent ces nouveaux outils, capables de « propulser » avec une puissance extrême les électrons, mais aussi les protons ou les ions. À l'INRS aussi, on s'apprête à battre des records. Grâce à un financement privé, le laboratoire va pouvoir augmenter, dès janvier 2016, la puissance de ses installations laser, qui passeront de 200 à 500 térawatts, ce qui équivaut à quelques centaines de fois la puissance de toutes les centrales électriques du monde.

Mais ce n'est pas tout : en réduisant considérablement la taille et le coût des dispositifs requis pour accélérer les particules, les lasers femtosecondes ouvrent la voie à de nombreuses applications industrielles et médicales. C'est d'ailleurs une source de motivation pour Jean-Claude Kieffer qui espère notamment mettre au point de nouveaux outils de protonthérapie. Cette technique consiste à détruire les cellules cancéreuses en les bombardant avec un faisceau de protons très précis, minimisant les « dommages collatéraux ». Actuellement, elle implique des accélérateurs conventionnels (de gros cyclotrons) dans lesquels des champs magnétiques et électriques accélèrent les protons de façon circulaire jusqu'à atteindre les énergies nécessaires. Sans surprise, peu d'institutions dans le monde peuvent aujourd'hui offrir à leurs patients la protonthérapie, surtout indiquée pour traiter les cancers du cerveau et de l'œil. Mais les lasers femtosecondes pourraient la démocratiser.

« Lorsque l'on bombarde une cible solide avec un laser à impulsions ultracourtes, on fait chauffer la matière ; les électrons sont expulsés, arrachant avec eux des ions et des protons, par effet de fronde », explique le physicien. Résultat, on peut générer des faisceaux de protons avec des machines bien plus compactes qu'un cyclotron. On pourrait donc en installer dans les hôpitaux à un coût moindre. ■

LA PHOTONIQUE CONTRE LES EMBOUTEILLAGES

La fibre optique permet de transmettre de l'information sur de très longues distances à une vitesse fulgurante. Mais pour éviter la congestion des réseaux de télécommunications, on mise sur de nouvelles puces de silicium.

Voyageant à 300 000 km/s, la lumière est tellement rapide qu'on a cru, jusqu'au XVII^e siècle, qu'elle était instantanée. « L'idée d'utiliser la lumière pour communiquer ne date pas d'hier, rappelle **Sylvain Cloutier**. Déjà, dans l'Antiquité, les Grecs utilisaient des signaux lumineux pour la navigation. »

Aujourd'hui, c'est à la lumière que l'on doit nos connexions internet haut débit et notre monde « branché ». Un incroyable réseau de fibres optiques sillonne en effet la planète, reliant les grandes métropoles entre elles et les continents par des câbles sous-marins.

Si les moyens se sont perfectionnés depuis les premiers phares, le concept reste globalement le même : « On envoie des impulsions lumineuses, un peu comme un code morse. Les fibres optiques permettent de transporter ces signaux lumineux du point A au point B », résume le professeur au département de génie électrique de l'ÉTS à Montréal.

Ces fils de verre souples et fins, mis au point dans les années 1970, sont constitués de deux matériaux à base de silice, le cœur et la gaine, qui ont des indices de réfraction différents. De quoi confiner et guider la lumière qui se réfléchit sur l'interface entre le cœur et la gaine et se propage ainsi avec un minimum de perte. « Grâce aux lasers, on peut générer des impulsions très courtes pour véhiculer énormément

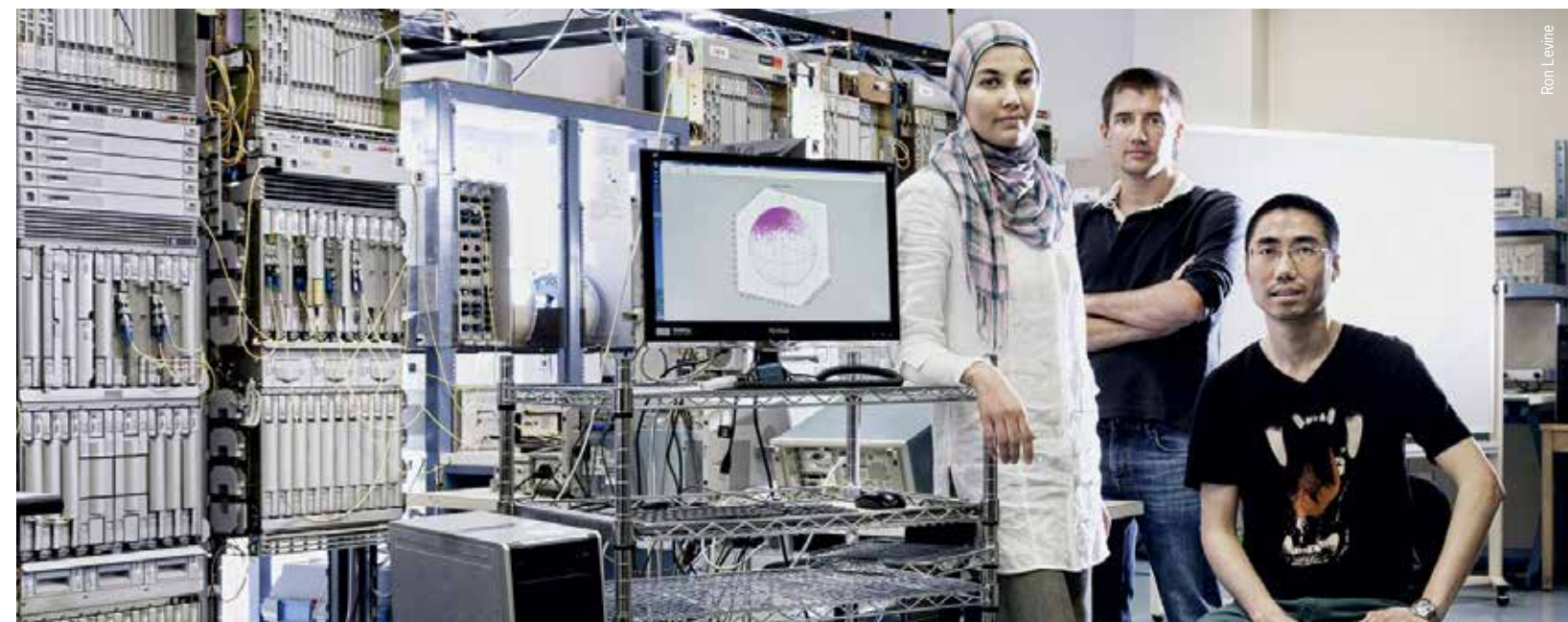
d'information », précise Sylvain Cloutier.

L'efficacité des fibres optiques n'est plus à démontrer. « Alors qu'une paire de fils de cuivre pour le téléphone peut transmettre jusqu'à 3 000 conversations simultanées sur une distance de quelques centaines de mètres tout au plus, grâce à des électrons, une fibre optique peut en transmettre plus de 1 million sur des distances pouvant atteindre 10 000 km, grâce aux photons! » indique **Christine Tremblay**, professeure et fondatrice du Laboratoire de technologies de réseaux au département de génie électrique de l'ÉTS.

Pour atteindre de telles capacités de transmission, on utilise la technique de multiplexage en longueur d'onde appelée WDM. « Un tel système de transmission permet de transporter dans une seule fibre optique presque une centaine d'ondes lumineuses de couleurs différentes, chacune portant indépendamment son flux de données. Les systèmes actuels transportent environ 100 gigabits par seconde par longueur d'onde, ce qui est considérable », précise la chercheuse spécialiste des réseaux de télécommunications.

« À la fin des années 1990, la fibre optique est devenue le moyen de transmission de choix pour les grandes distances. Mais si on peut se permettre d'en installer entre New York et Montréal, par exemple, les équipements optiques qui sont situés

De nombreux étudiants-chercheurs s'initient au défis de communication que représente la circulation de l'information sur les réseaux électroniques. Ici, au Laboratoire de technologies de réseaux (de gauche à droite) : Ferial Nabet, Thomas Brugière et Zhenyu Xu s'intéressent à la question.



Ron LeVine

à chaque extrémité sont encore très chers», ajoute **Michaël Ménard**, chercheur du Laboratoire de microtechnologies et de micro-systèmes (Micro²) de l'Université du Québec à Montréal (UQAM). Résultat, dans les réseaux locaux et les nœuds de commutation, l'électron est encore souvent le seul maître à bord, ce qui ralentit considérablement le flux des données. Ainsi, dans le cas d'Internet, les routeurs électroniques doivent convertir, trier et mémoriser une quantité colossale de paquets de données «lumineuses», qui arrivent de manière pratiquement simultanée. Et le trafic des données numériques, qui se fait majoritairement par le biais des centres de données (*data centers*), repose encore essentiellement sur des transmissions électriques.

«Or, nos besoins en capacité augmentent sans cesse. L'optique doit donc pénétrer dans des réseaux plus courts», poursuit le chercheur. Car les fils de cuivre saturent, un peu comme le pont Cham-

vidéos en ligne, du partage de fichiers, etc.

«Les composants photoniques utilisés aujourd'hui font appel à des semi-conducteurs comme l'arséniure de gallium ou le phosphore d'indium, propices à la fabrication de lasers, mais coûteux. Notre but est de mettre au point des circuits intégrés capables de manipuler des signaux optiques, en utilisant le silicium, le matériau le plus utilisé dans l'électronique, pour une production à grande échelle et à coût réduit», ajoute-t-il.

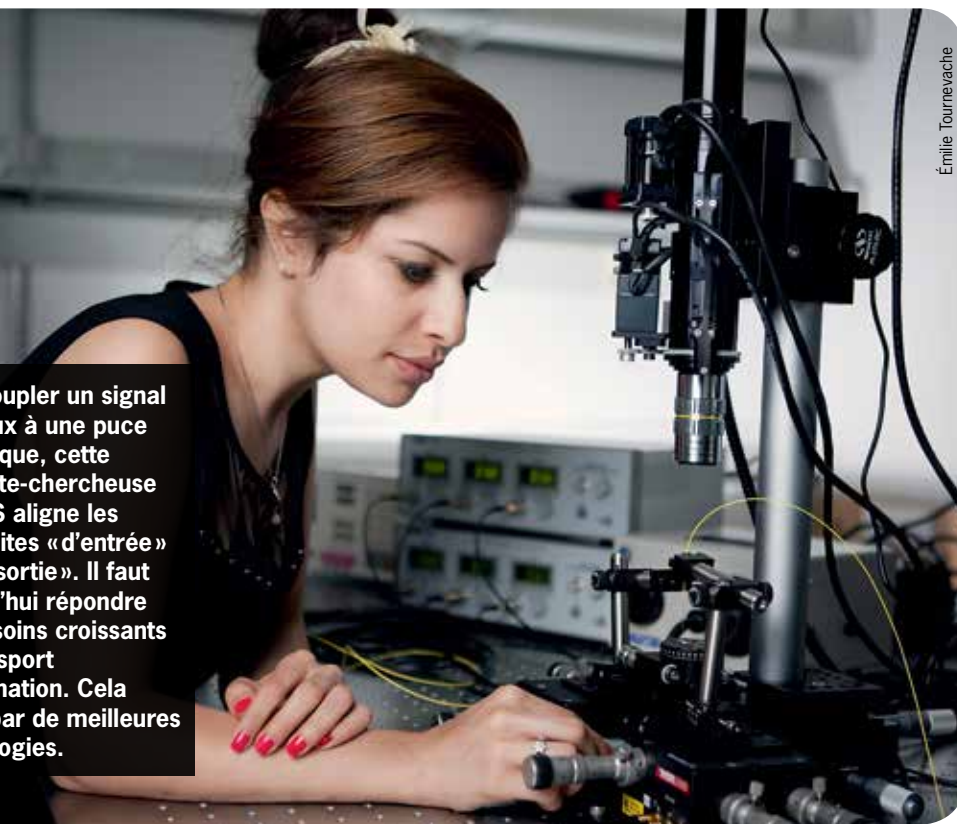
Mais il y a encore des obstacles à franchir, notamment pour assurer la fiabilité des dispositifs. De plus, si le silicium conduit bien la lumière, il ne permet pas de la générer efficacement, contrairement au phosphore d'indium, par exemple. Il faut donc ruser. «Les approches émergentes consistent à intégrer un morceau micro-métrique de phosphore d'indium sur le silicium pour y générer la lumière et faire en sorte que tout soit sur la même puce», indique le chercheur. Et les applications commerciales commencent déjà à voir le jour. Plusieurs entreprises, comme Intel et IBM, qui développent la photonique sur silicium depuis une quinzaine d'années, prévoient de l'implanter prochainement dans certains centres de données et supercalculateurs pour connecter des serveurs distants de quelques dizaines à quelques centaines de mètres. Micro², quant à lui, s'est associé en mars dernier à la *start-up* Aeponyx pour intégrer des composantes optiques dans les centres de données.

De son côté, Christine Tremblay mise sur la photonique sur silicium pour fabriquer des outils de télécommunication plus compacts et moins énergivores. Avec une équipe de l'université Jiao Tong de Shanghai, en Chine, elle développe et teste des circuits optiques sur puce de silicium pour «traiter» l'information au bout des fibres optiques. «Il s'agit de micro-anneaux qui ont un diamètre entre 10 micromètres (μm) et 20 μm , et qui agissent un peu comme des carrefours giratoires. Ils permettent de guider, d'extraire les longueurs d'onde et de les diriger vers les bonnes voies de sortie», explique-t-elle. Sur une puce

de 2 cm sur 1 cm, nous pouvons mettre plusieurs centaines de micro-anneaux!» s'enthousiasme-t-elle. Outre la compacité, la photonique sur silicium offre l'immense avantage de fonctionner avec des tensions très faibles, de quelques volts seulement.

«Cela permet d'avoir des dispositifs qui consomment beaucoup moins d'énergie, et qui sont aussi très flexibles, car il est possible d'agir sur la lumière et de manipuler le signal activement et non seulement de le guider de façon passive», précise la chercheuse.

Cumulant bien des avantages, la photonique sur silicium devrait donc devenir la norme dans les décennies à venir. «Elle permet de régler beaucoup de problèmes liés à la densité croissante des câblages dans les centres de réseaux», conclut Christine Tremblay. ■



Pour coupler un signal lumineux à une puce photonique, cette étudiante-chercheuse de l'ÉTS aligne les fibres dites «d'entrée» et de «sortie». Il faut aujourd'hui répondre aux besoins croissants de transport d'information. Cela passe par de meilleures technologies.

plain aux heures de pointe... Pourra-t-on s'affranchir complètement des liaisons électriques, en passant à l'ère du tout optique? C'est en tout cas vers cet objectif que convergent de nombreuses recherches, dont celles de Christine Tremblay et de Michaël Ménard.

«L'idée est de miniaturiser et d'intégrer des dispositifs qui manipulent la lumière sur des puces en silicium», résume l'ingénieur, en montrant un prototype de puce optique, sur laquelle sont disposés des «guides d'onde», de minuscules fibres optiques, en silicium.

En remplaçant les liaisons électriques entre les puces ou les microprocesseurs par des guides d'onde et des circuits optiques, la «photonique intégrée sur silicium» est la solution qui s'impose pour faire face à la croissance effrénée du nombre d'appareils mobiles intelligents, des services offerts sur Internet, du visionnage de

L'ÂGE DES CRISTAUX

Faire parler les sédiments avec la lumière, c'est ce à quoi s'applique le géologue Michel Lamothe.

L'entrée du laboratoire dirigé par **Michel Lamothe**, au département des sciences de la Terre et de l'atmosphère de l'Université du Québec à Montréal (UQAM), ressemble à un antre de magicien. Deux étudiants poussent une porte en forme de demi-cylindre noir qu'ils font pivoter avant de disparaître. De l'autre côté de ce sas, l'obscurité est presque totale. Seules quelques lampes recouvertes de filtres rouge foncé permettent de distinguer les paillasses sur lesquelles s'entassent des échantillons de roches et de sable provenant de partout dans le monde. Ces vieilles pierres attendent de révéler leurs secrets.

«En éclairant les échantillons avec des faisceaux lumineux, on peut savoir à quel moment ces roches ont été enfouies. C'est une méthode de datation qui permet de remonter jusqu'à 500 000 ans en arrière, soit 10 fois plus loin que les autres méthodes de datation», explique le chercheur.

Ainsi, la luminescence stimulée optique – c'est le nom de la technique – permet de faire parler les sédiments pour, par exemple, reconstituer l'histoire des glaciations ou encore déterminer le moment où des céramiques ancestrales ont été enfouies dans le sol. Michel Lamothe revient d'ailleurs d'Alaska, où il a analysé des échantillons provenant de glaciers – son premier centre d'intérêt –, mais aussi de sites archéologiques datant de 13 000 à 14 000 ans.

«Des chercheurs de partout m'appellent pour des projets de datation. Notamment, en archéologie, il nous est par exemple possible de dire en quelques minutes si une roche a été chauffée, et donc si elle provient d'un foyer préhistorique», précise le géologue.

La luminescence n'a pourtant rien de magique. Les roches enfouies, irradiées au fil des ans par la radioactivité naturelle, ont la propriété d'émettre de la lumière lorsqu'elles sont soumises à une stimulation thermique (c'est la thermoluminescence) ou lumineuse (c'est la luminescence stimulée optiquement ou OSL). La quantité de lumière qu'elles émettent est alors proportionnelle à leur âge, ou plutôt à la durée de leur enfouissement dans le sol.

«Il faut savoir que les cristaux, dans les roches, sont imparfaits. Il existe, çà et là, des «trous», appelés «vacances». C'est principalement le cas dans les cristaux de quartz et de feldspath, des minéraux que l'on retrouve dans tous les sédiments et toutes les céramiques», explique Michel Lamothe. Au fil des ans, la radioactivité de l'environnement contribue à dégrader ces cristaux et à éjecter des électrons des atomes. Ces électrons errants sont susceptibles de venir se nichier dans les trous, au sein des défauts cristallins.

«Ils se retrouvent piégés, mais restent instables. Si on envoie de l'énergie, en chauffant le cristal ou en l'éclairant avec un faisceau de lumière, on peut les déloger», précise-t-il. Ce faisant, ils libèrent des photons. «On parle en réalité de millions de milliards d'électrons et de photons», ajoute ce spécialiste mondial de la luminescence, tout en plaçant un échantillon-test dans une machine d'OSL. En quelques secondes, l'échantillon, de la taille d'une pièce de 10¢, devient littéralement phosphorescent, émettant une jolie lumière bleutée dans la pénombre du laboratoire. «Le nombre d'électrons piégés dépend de la quantité totale de radiations auxquelles le cristal a été exposé au fil du temps. En mesurant la lumière émise et la radioactivité environnante, dont le débit est constant dans le temps, on peut savoir depuis quand le sédiment était enfoui», résume Michel Lamothe.

On comprend que les échantillons doivent être protégés contre toute lumière, jusqu'au moment de leur datation. «On doit utiliser un faisceau ayant une longueur d'onde différente de celle que renverra la roche pour réaliser la mesure», poursuit le géologue. Bien que la marge d'erreur soit actuellement entre 5% et 8%, cette méthode est prometteuse. «Elle a un gros potentiel d'application, que ce soit en archéologie ou en paléoclimatologie, que ce soit pour connaître la variation historique des niveaux marins, et même pour authentifier des œuvres d'art», dit Michel Lamothe, dont l'un des projets porte sur la datation de peintures rupestres dans des grottes d'Afrique du Sud. Il a même été jusqu'à mener une étude de faisabilité pour utiliser la méthode sur Mars! ■



Le travail en laboratoire de luminescence se fait en lumière tamisée et filtrée pour longueur d'onde se rapprochant de l'orange.



Le site archéologique de Wonderkrater, en Afrique du Sud est un lieu clé pour la recherche en paléoclimatologie. Michel Lamothe a été appelé à y travailler pour déterminer la datation de certaines découvertes.

LA VIE EN VRAIES COULEURS

Comment les ampoules DEL peuvent-elles imiter la lumière du soleil ? Des étudiants de l'École de technologie supérieure à Montréal ont relevé le défi.

Voir la « vraie » couleur des choses n'est pas si simple. À preuve, cet étrange débat qui a enflammé les réseaux sociaux il y a quelques mois, après la diffusion d'une banale photo de robe rayée. La robe était-elle noire et bleue, ou dorée et blanche ? En une semaine, le monde était divisé sur la question, chacun défendant avec véhémence sa propre vision de la chose.

En réalité, la robe était bleue, mais cela importe peu (la photo était surexposée et certaines personnes corrigeaient inconsciemment le défaut, se fiant davantage à leur correction qu'à leur vision). Ce que rappelle cette anecdote, c'est que les couleurs sont « fabriquées » et interprétées par le cerveau. « On sait que la perception des couleurs est relative et dépend de l'éclairage », indique **Sylvain Cloutier**. Ainsi, un citron éclairé avec une lumière rouge apparaîtra rouge; éclairé par une lumière bleue, il semblera noir.

Or, notre œil est habitué à la lumière du soleil, une lumière « blanche naturelle » qui résulte de la somme de radiations de différentes longueurs d'onde, allant du violet au rouge (les fameuses couleurs de l'arc-en-ciel). C'est cette lumière qui nous permet d'apprécier avec le plus d'exactitude les diverses nuances des couleurs (on dit qu'elle a un excellent indice de rendu de couleur).

Restituer cet aspect naturel a toujours été un défi dans le domaine de l'éclairage. Depuis les lampes au sodium jaunes jusqu'aux néons blafards, pas facile de produire une lumière agréable. « La lumière du jour offre un indice de rendu de couleur très proche de 100. Les ampoules à incandescence, elles, ont un rendu de couleur d'environ 90, alors que celui des DEL conventionnelles tourne autour de 78 ou 80, précise Sylvain Cloutier. Si bien qu'avec les DEL, on économise sur la facture, mais leur rendu de couleur n'est pas très naturel. »

La lumière bleutée des DEL leur a en effet longtemps porté pré-

judice. Mais **François Roy-Moisan** et **Gabriel Dupras**, deux étudiants à la maîtrise à l'ÉTS, pourraient bien avoir résolu le problème, en produisant un éclairage à DEL plus vrai que nature... ou presque. « On a atteint un rendu de couleur supérieur à 99 », indiquent-ils.

Forts de ce succès, en janvier dernier, ils ont créé la *start-up* Sol-lum Technologies. Premier objectif, proposer leur produit à des musées. « Notre éclairage imite la lumière du soleil, mais sans les rayons nocifs, c'est-à-dire les rayons ultraviolets et infrarouges qui peuvent endommager les œuvres d'art », explique François Roy-Moisan. Mieux, il est ajustable, pouvant fournir diverses nuances de couleurs selon le désir de l'utilisateur.

Comment ont-ils réussi cette prouesse ? Il faut savoir que chaque diode émet dans une longueur d'onde bien précise. En fait, les diodes sont fabriquées à partir de l'empilement de couches de différents matériaux semi-conducteurs. En faisant varier les matériaux et les épaisseurs de chaque couche, on fait varier la couleur émise.

Les deux étudiants ont donc analysé la composition du spectre visible de la lumière du jour (qui contient plus de radiations bleu vert que de rouges, par exemple) et l'ont reproduite. « On a disposé de multiples diodes différentes de façon bien précise, et on les a réglées pour ajuster la couleur finale », expliquent-ils, fiers d'avoir breveté leur technique.

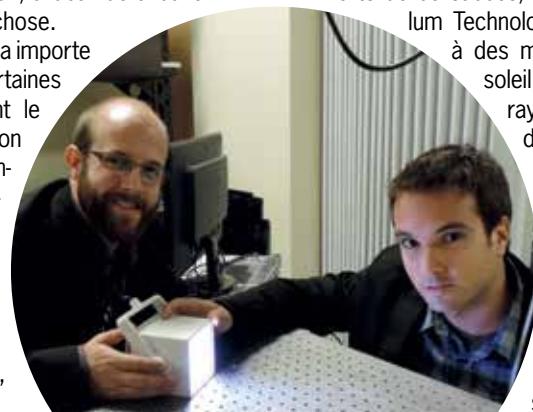
Leur imitation quasi parfaite de la lumière du jour, qui tient dans un luminaire de 10 cm sur 10 cm, pourrait avoir de nombreuses applications. « Comme on peut moduler la lumière, le dispositif pourrait également être utilisé dans des serres, où il permettrait de reproduire la lumière du printemps, de l'été, de l'automne ou de l'hiver de façon cyclique ou encore d'obtenir la lumière du matin, du midi ou du soir », ajoute François Roy-Moisan. Cet éclairage pourrait aussi être employé en chirurgie, ou dans les transports. ■

dont Los Angeles ou Pittsburgh, ont déjà opté pour l'éclairage public aux DEL. Et Montréal envisage de changer 110 000 lampadaires au sodium en faveur des lampes à DEL.

Il faut dire qu'elles cumulent les qualités : insensibles aux chocs, leur durée de vie peut atteindre 40 000 heures, contre 8 000 pour les lampes fluocompactes. « La DEL est constituée de couches de matériaux semi-conducteurs, dont la propriété intrinsèque est d'émettre de la lumière quand on y fait passer un courant électrique », précise Sylvain Cloutier de l'ÉTS.

Résultat, la DEL émet très peu de chaleur et est donc très économe en énergie. Un atout considérable, quand on sait que 20% de l'électricité mondiale sont utilisés pour l'éclairage.

« Malheureusement les DEL sont encore chères, mais on travaille à les rendre plus abordables », affirme M. Cloutier.



François Roy-Moisan et Gabriel Dupras ont réinventé la lumière du Soleil.

Les océanographes ont recours à des bouées pour prendre des mesures qui leur permettent de comprendre la dynamique marine du Saint-Laurent. Elles sont notamment dotées de capteurs qui calculent la quantité de lumière que reçoit l'estuaire, une donnée déterminante pour suivre l'activité de photosynthèse de cet écosystème.



Gabriel Ladouceur



La photo montre ce que l'on appelle un bloom de phytoplanctons, survenu en août 1999 dans l'estuaire du Saint-Laurent. Il faut une bonne quantité de lumière pour que le phénomène se produise.

LA SIGNATURE DE L'EAU

L'analyse de la couleur des océans permet d'en savoir plus sur leur activité biologique.

Simon Bélanger passe une bonne partie de son temps en bateau, au large de Rimouski. Mais il prend aussi de la hauteur pour observer le fleuve. Directeur du Laboratoire d'optique aquatique et de télédétection de l'Université du Québec à Rimouski (UQAR), il surveille le Saint-Laurent grâce aux images captées depuis les satellites. « On sait que la couleur de l'eau change en fonction des constituants. La télédétection permet de déduire la richesse en sédiments, matières organiques et en phytoplancton des eaux », explique-t-il.

C'est cette « signature spectrale » de l'eau, qui diffère selon l'activité biologique et les écosystèmes, que le chercheur compare aux données du terrain. « Entre 90% et 100% de la lumière qui arrive dans les océans est absorbée par la colonne d'eau, poursuit-il. Il y a donc très peu de lumière rétrodiffusée, mais cette réflectance captée par les satellites

donne de nombreuses indications sur la santé de l'océan. » Par exemple, la chlorophylle du phytoplancton absorbe la lumière rouge; la composition de la lumière réfléchie permet donc de déduire le niveau de productivité du phytoplancton.

L'équipe de l'UQAR travaille de près avec Pêches et Océan Canada. « Le Ministère a mis en place un système de monitoring de l'eau au large de Rimouski grâce à des bouées qui mesurent la température, la salinité, etc., ajoute Simon Bélanger. Il y a aussi des capteurs optiques, et nous utilisons leurs données pour valider les informations des satellites et affiner les méthodes de télédétection. » De quoi se préparer à faire le décodage des données des satellites *Sentinel-3*, dont la mise en orbite est prévue entre 2015 et 2017 par l'Agence spatiale européenne, et qui sont destinés à la surveillance de l'environnement. ■

ÉCLAIRER LE FUTUR

Pour Federico Rosei, la lumière, c'est avant tout de l'énergie. Et ce pourrait être l'énergie de demain.

Le curriculum vitæ du physicien **Federico Rosei** a de quoi impressionner. Membre de l'Académie européenne des sciences ainsi que de la Société royale du Canada, il a reçu, entre autres, le prix international Bessel de la Fondation Alexander von Humboldt, en reconnaissance de ses travaux sur les nanomatériaux en 2011, la médaille Herzberg du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG) du Canada, la médaille Rutherford en chimie de la Société royale du Canada en 2011, etc. La liste de ses récompenses est longue! L'an passé, c'est le Conseil culturel mondial qui lui a remis le prix José Vasconcelos en éducation. Le rapport avec la physique? La conviction profonde qu'a le professeur Rosei qu'il est possible de combler l'écart technologique des pays en développement, et de contribuer ainsi à changer le monde.

Fort de ses compétences dans le domaine des matériaux photovoltaïques, il s'est donné comme mission de promouvoir les énergies renouvelables, et en particulier l'énergie solaire. Il a mis sur pied en 2014 la Chaire de l'UNESCO sur les matériaux et les technologies pour la conversion, l'économie et le stockage de l'énergie, dont il est titulaire. «Le but est de valoriser les échanges scientifiques avec les pays en développement et le transfert de connaissances en matière d'énergie solaire, explique-t-il. Car je pense qu'il est plus sage d'enseigner à quelqu'un à pêcher que de lui donner du poisson.»

Dans ce cadre, il a déjà noué des partenariats avec des universités de nombreux pays, depuis la Chine jusqu'au Mexique, en passant par le Bénin, l'Inde, le Vietnam et l'Algérie, entre autres. «Lorsqu'on est proche de l'Équateur, le soleil se couche tôt, et de façon très soudaine. De nombreux villageois se retrouvent donc dans le noir à 18 h, et les enfants ne peuvent pas étudier le soir. Le fait d'avoir accès à un éclairage fiable peut faire une grosse différence pour promouvoir l'éducation», affirme-t-il. Le Centre Énergie Matériaux Télécommunications de l'INRS,

où le chercheur encadre une équipe de 30 personnes, est donc le pôle névralgique de cette chaire Nord-Sud, qui forme des étudiants étrangers, propose des programmes d'échanges et des bourses de doctorat.

«Le solaire, c'est la technologie de l'avenir. Le Soleil nous envoie en une heure assez d'énergie pour combler les besoins énergétiques de toute la planète pendant un an, explique Federico Rosei. Pourtant, cette énergie ne représente encore que 2% du

professeur Rosei. Il a eu l'idée d'utiliser une nouvelle classe de matériaux, dits «multi-ferroïques», pour recouvrir des cellules solaires à base de silicium afin d'accroître leur rendement. Ces matériaux, constitués notamment de bismuth, de fer, de chrome et d'oxygène, sont abondants et assez peu coûteux, et permettraient aussi de prolonger la longévité des panneaux solaires.

«Le plus grand problème des énergies renouvelables reste le stockage», souligne le professeur Rosei. Là encore, les chercheurs

Selon le physicien Federico Rosei, le Soleil nous envoie en une heure assez d'énergie pour combler les besoins énergétiques de toute la planète pendant un an.



INRS/UNESCO

gâteau énergétique mondial.»

L'homme, modeste, est toutefois conscient des défis. «Quand on touche à l'énergie, on se heurte à des enjeux politiques et sociaux; aux lobbies des énergies fossiles», indique-t-il. Ce qui ne l'empêche pas d'être optimiste: «Pendant longtemps, le solaire était freiné par un problème de coût. Aujourd'hui, les prix ont beaucoup baissé, même si cela s'est fait aux dépens de la stabilité et de la durée de vie des matériaux.»

Pour améliorer les cellules photovoltaïques sans augmenter leur coût, plusieurs pistes sont envisagées par la communauté scientifique. L'une d'elles a été développée en 2014 par **Riad Nechache**, de l'équipe du

du monde, dont une douzaine à l'INRS, ont mis l'épaulé à la roue. «Mais il y a aussi un choix à faire. Par exemple, si une voiture électrique doit être rechargée tous les 150 km, mais que cela est bénéfique pour l'environnement, c'est un inconvénient qui en vaut peut-être la peine», estime-t-il. Une chose est sûre, Federico Rosei est un homme de convictions. Et sa volonté d'aller de l'avant est encore plus forte depuis qu'il a rencontré Al Gore dans le cadre du Sommet des Amériques sur le climat, en juillet dernier à Toronto. Paradoxalement, croit-il, c'est peut-être le Soleil qui nous sauvera du réchauffement climatique. ■