

LE PETIT  
LUMIÈRE  
ILLUSTRÉ

REGARDS CROISÉS DE CHERCHEURS

# LUMIÈRE

LA DÉPÊCHE



COLLECTION  
PETIT ILLUSTRÉ n°25

4,90€

## SOMMAIRE « Le petit lumière illustré »

- Pages 2-3 Controverse sur une lumière cosmique
- Pages 4-5 Utiliser la lumière pulsée pour sonder la chimie de Mars
- Pages 6-7 Observer les rayonnements émis et réfléchis par la Terre depuis l'espace : la télédétection
- Pages 8-9 Les aurores polaires : des lumières qui dansent dans le ciel
- Pages 10-11 Les cellules photovoltaïques organiques : une autre source d'électricité issue de la lumière du soleil
- Pages 12-13 La lumière pour éliminer les micropolluants de l'eau
- Pages 14-15 La LED, une centenaire pleine d'avenir...
- Pages 16-17 La thérapie photodynamique : traiter les cancers avec de la lumière
- Pages 18-19 L'imagerie optique du petit animal : utiliser la lumière pour la recherche médicale
- Pages 20-21 Les LED organiques, source de lumière du futur ?
- Pages 22-23 Des microscopes à feuille de lumière pour accéder à la troisième dimension
- Pages 24-25 La photonique : sculpter la lumière à des échelles de plus en plus petites
- Pages 26-27 Des impulsions laser pour contrôler la matière
- Pages 28-29 Lumière sur les nanocristaux
- Pages 30-31 L'optique atomique : un outil pour l'innovation et la recherche fondamentale
- Pages 32-33 Guider la lumière jusqu'au nanomètre
- Pages 34-35 Les instruments du patrimoine



# ÉDITO

« Le petit lumière illustré »



La lumière a toujours joué un rôle majeur dans l'histoire des sciences. C'est, par exemple, grâce à la lumière des étoiles et des planètes que Copernic et Galilée ont pu affirmer que la Terre tournait autour du Soleil, et non l'inverse. Depuis une centaine d'années, le double caractère (ondulatoire et corpusculaire) de la lumière est fermement établi, réconciliant des points de vue qui s'opposaient depuis le XVII<sup>e</sup> siècle. À la fois objet de recherches fondamentales de pointe et formidable outil (communication, analyse, thérapie, dépollution), la lumière est au cœur de notre quotidien.

Mais la lumière ne se limite pas à ce que l'on peut voir. La lumière visible ne représente en effet qu'une infime partie du spectre lumineux. Les rayons X, ultraviolets, infrarouges ou encore les micro-ondes sont autant de composantes du spectre utilisées par la communauté scientifique.

À l'occasion de l'Année internationale de la lumière, le CNRS et ses partenaires vous proposent quelques exemples des recherches réalisées en Midi-Pyrénées autour de la lumière. De l'infiniment grand à l'infiniment petit, de l'origine de l'Univers aux dispositifs nanométriques du futur, laissez-vous guider dans ce voyage à travers le temps et l'espace !

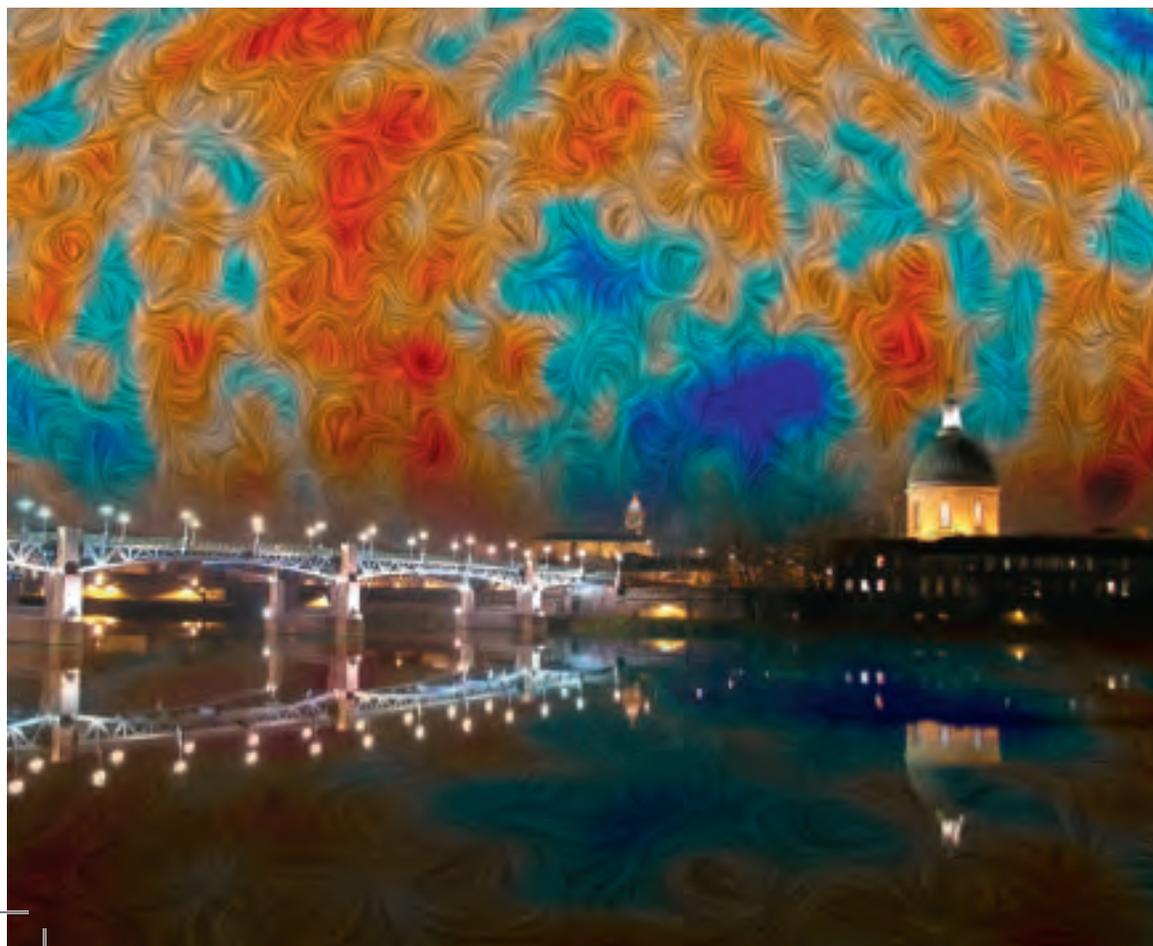
MARTIN GIARD & LUDOVIC MONTIER  
Institut de recherche en astrophysique  
et planétologie  
Unité mixte de recherche 5277  
CNRS/Université Toulouse III

# CONTROVERSE SUR UNE LUMIÈRE COSMIQUE

La quête de la lumière fossile qui nous reste du Big Bang a fait l'objet, ces douze derniers mois, de vives discussions entre des équipes scientifiques américaine et européenne.

**N**ous disposons maintenant d'images inédites représentant l'empreinte fidèle de notre Univers près de 380 000 ans après le Big Bang. À cette époque, l'Univers n'était encore qu'une soupe cosmique composée d'un mélange extrêmement chaud et dense de particules de matière et de lumière. Jusqu'alors piégée dans cette soupe cosmique, cette lumière fossile s'est enfin libérée quand la température de l'Univers est passée sous les 3 000 degrés, puis a voyagé pendant plus de 13 milliards d'années avant de nous parvenir. Cette lumière fossile nous transmet l'image de notre Univers encore jeune, mais porte aussi en elle la signature d'un passé encore plus reculé de notre Univers, alors qu'il n'était âgé que

✧ **Image de la lumière cosmique du Big-Bang** reconstituée par la mission spatiale PLANCK, telle qu'elle pourrait apparaître dans le ciel de Toulouse si elle était perceptible à l'œil humain.  
©Sébastien Chastanet -ESA - Collaboration PLANCK.



d'une infime fraction de seconde. En effet Andrei Linde et Alan Guth ont imaginé à la fin du XX<sup>e</sup> siècle un procédé pouvant être responsable de la création de la totalité de l'Univers observé aujourd'hui à partir de quelques microgrammes d'énergie contenus dans un volume infinitésimal beaucoup plus petit qu'un atome. C'est ce qu'on appelle le mécanisme de l'inflation cosmique, qui aurait, si la théorie se confirme, laissé des traces dans cette lumière fossile que nous recevons aujourd'hui.

### Poussières galactiques

Bien entendu l'image du rayonnement fossile du Big Bang n'est pas facile à capter. Elle n'est perceptible qu'aux capteurs des lumières infrarouges et micro-ondes, et de plus, tout comme les nuages de pluie peuvent nous cacher complètement le ciel étoilé, les volutes de gaz et de poussières qui remplissent le cosmos nous cachent une grande partie de la lumière fossile du Big Bang. Les astronomes doivent donc réaliser des prouesses technologiques pour l'observer. C'est l'objectif des antennes déployées au pôle sud par des universités américaines (expérience BICEP2), ainsi que celui de la mission spatiale PLANCK de l'Agence Spatiale Européenne.

En février 2014, l'équipe qui opère le télescope BICEP2 situé sur la base américaine du pôle sud annonce qu'elle vient d'identifier dans ses mesures certains effets prédits par la théorie de l'inflation cosmique : l'existence d'ondes de gravitation. C'est la preuve tant attendue ! Pendant ce temps,

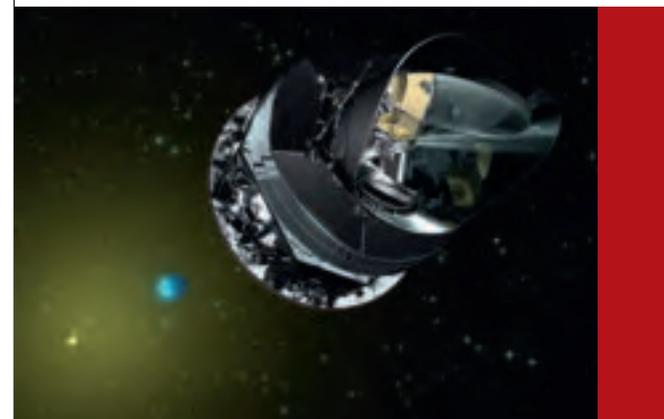


la collaboration PLANCK analyse son propre jeu de données, et, disposant d'une plus large palette de couleurs du ciel micro-onde, tire des conclusions radicalement différentes : le signal observé par les équipes américaines serait produit par les nuages de poussières tourbillonnant dans le champ magnétique de notre propre Galaxie, la Voie Lactée. Ce n'est qu'un an plus tard, en février 2015, qu'Européens et Américains annoncent le résultat final d'une étude menée en commun qui confirme la détection de poussières galactiques et non celle d'ondes de gravitation.

Les fameuses ondes de gravitation créées par le Big Bang ne sont donc pas encore au rendez-vous, ou alors à un niveau trop faible pour être observées par les instruments actuels. Ce sera donc aux générations futures de construire de nouveaux observatoires beaucoup plus puissants qui livreront tous les mystères de cette lumière fossile du Big Bang, au-delà de notre Galaxie. ◻

✧ **Les installations américaines SPT, BICEP2 et Keck Telescope** en Antarctique.  
©Steffen Richter, Harvard University.

✧ **Vue d'artiste montrant la mission PLANCK** dans le vide de l'espace avec la Terre et le Soleil dans le lointain.  
© ESA.



OLIVIER GASNAULT &  
SYLVESTRE MAURICE  
Institut de recherche en astrophysique  
et planétologie  
Unité mixte de recherche 5277 CNRS/  
Université Toulouse III

## UTILISER LA LUMIÈRE PULSÉE POUR SONDER LA CHIMIE DE MARS

La spectroscopie induite par ablation laser est un procédé d'analyse chimique entièrement optique. L'instrument ChemCam utilise cette technique à bord de l'astromobile Curiosity qui arpente la surface de Mars depuis mi-2012. La mesure est rapide, sans contact, avec une précision submillimétrique, et capable de souffler la poussière pour voir les couches sous-jacentes.



Curiosity  
© NASA/JPL-Caltech



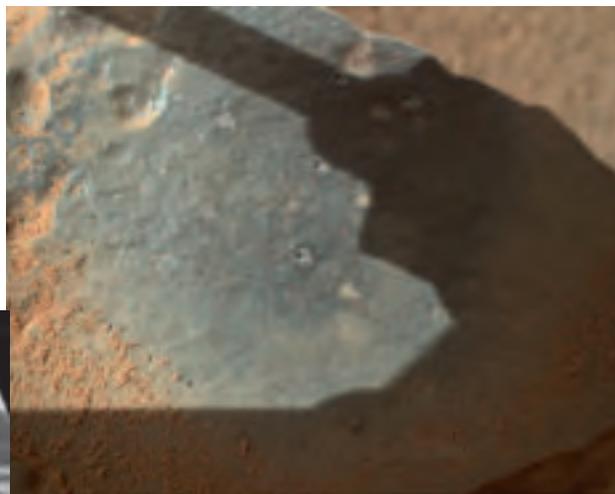
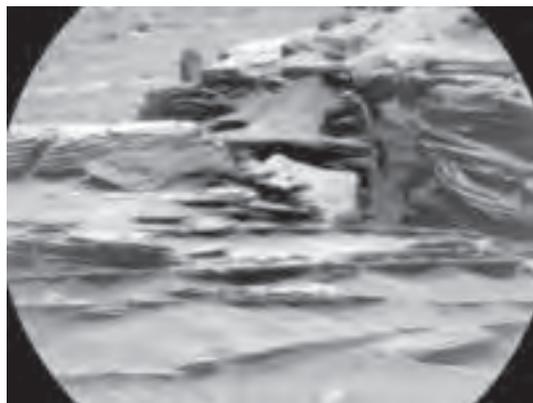
ChemCam utilise un laser pour vaporiser quelque nanogrammes de la roche visée, jusqu'à 7 m de distance. La concentration des impulsions laser, une lumière invisible (1 067 nm) mais puissante, délivre une intensité de l'ordre du gigawatt par centimètre carré. Un peu de matière est alors sublimée pour produire un plasma. Les atomes composant ce gaz très chaud sont excités par la lumière du laser. En revenant à leur état « normal » ils émettent de la lumière ultraviolette, visible et infrarouge.

ChemCam collecte cette lumière avec un télescope, et la transporte par une fibre optique à un spectromètre à l'intérieur de l'astromobile. Le spectromètre fonctionne comme un prisme en séparant la lumière dans un arc-en-ciel de couleurs (240-840 nm). ChemCam est capable d'identifier les différents éléments présents dans la roche car chaque composé chimique possède sa propre empreinte sous la forme de raies d'émission. L'intensité de ces raies est comparée à celle mesurée en labora-





✱ **ChemCam** est aussi équipé d'une caméra haute résolution qui fait des images avant et après les tirs laser.



✱ **Roche Stephen découverte 611 jours après l'atterrissage.** Les tirs laser ont non seulement soufflé la poussière rouge orangée que le vent avait déposée sur cette roche, mais ont aussi creusé à travers la couche superficielle d'altération, une couche fine et sombre, riche en oxyde de manganèse. Elle témoigne d'une époque où l'atmosphère martienne était plus oxydante qu'aujourd'hui.  
© NASA/JPL-Caltech, MSSS

toire dans des conditions similaires à la surface de Mars et sur des échantillons connus pour quantifier l'abondance de chaque élément comme le silicium, le fer, l'aluminium ou encore le sodium.

ChemCam identifie le type de roche sur lequel on a tiré en analysant simultanément tous les rayonnements émis. Il a découvert une grande diversité de roches et de sols sur le site d'atterrissage, le cratère Gale à proximité de l'équateur martien. Cette diversité représente la richesse des processus magmatiques qui ont formé la surface martienne, puis com-

ment cette matière a été transportée et transformée dans des systèmes fluvio-lacustres par des processus sédimentaires et d'altération.

### La lumière, vecteur d'informations

D'autres instruments à bord de Curiosity utilisent la lumière comme vecteur d'information. La lumière visible est captée par les caméras pour étudier la géologie environnante. Deux autres instruments utilisent le rayonnement X pour mesurer la composition chimique ou minéralogique. Un autre capte le rayonnement gamma à haute énergie pour étudier les radia-

tions à la surface de Mars et évaluer les risques pour les futurs spationautes. Un autre laser est utilisé pour étudier finement la composition de l'atmosphère martienne. Enfin, les ondes radios servent à communiquer avec la Terre. En combinant toutes les observations, les scientifiques de l'équipe internationale de Curiosity ont établi que l'environnement de la baie de Yellowknife, qui était un lac il y a plus de trois milliards d'années, aurait pu être habitable pour une forme de vie très simple. Mais nous n'avons aucune preuve que cette vie ait pu se développer.

L'instrument ChemCam est une collaboration internationale menée par le Los Alamos National Laboratory aux USA et l'Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie en France. ◻



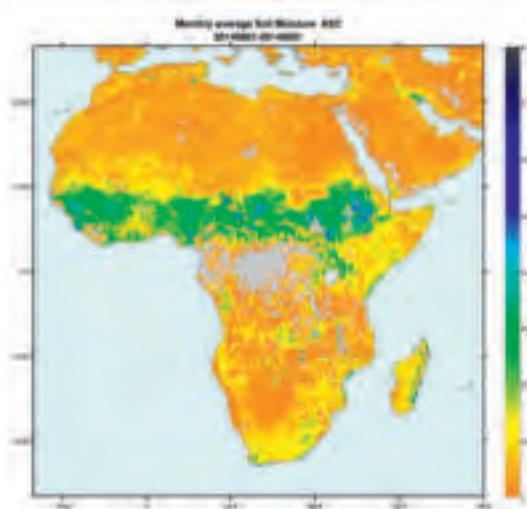
### Dans le bassin Yellowknife, forage « John Klein » réalisé par Curiosity en mars 2013.

Il s'agit d'une roche argileuse traversée par des veines blanches de sulfate de calcium qui témoignent d'une activité aqueuse prolongée. On peut distinguer l'impact des tirs laser (série verticale de petits points noirs) effectués avec précision sur la paroi verticale du trou pour caractériser la composition de cette roche.  
© NASA/JPL-Caltech, MSSS.



CATHERINE LEPRIEUR  
Centre d'études spatiales de la biosphère  
Unité mixte de recherche  
CNES/CNRS /IRD /Université Toulouse III

# OBSERVER LES RAYONNEMENTS ÉMIS ET RÉFLÉCHIS PAR LA TERRE DEPUIS L'ESPACE : **LA TÉLÉDÉTECTION**



✱ **Moyenne mensuelle du contenu en eau de la surface terrestre** (couche entre 0 et 5 cm de profondeur) obtenue à partir des mesures du satellite SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity). © Arnaud Mialon CATDS/CESBIO.

✱ **Zone agricole autour de St-Clar-de-Rivière (31).** Traitement en fausses couleurs d'une prise de vue du satellite Formosat (18 avril 2010). © Claire Marais-Sicre - CESBIO.



Les rayonnements provenant de la Terre traduisent la nature et l'état des objets présents à sa surface. Il s'agit par exemple d'utiliser l'information portée par ces rayonnements pour cartographier les cultures, mesurer l'humidité des sols ou quantifier la biomasse des forêts.

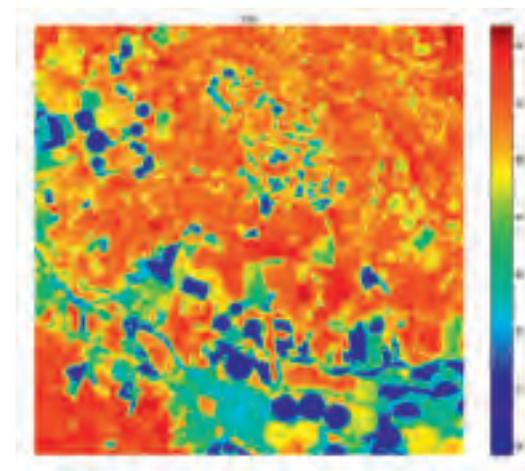
La télédétection spatiale utilise principalement les rayonnements du domaine visible, du proche infrarouge, de l'infrarouge thermique et des micro-ondes. Les capteurs embarqués à bord des satellites enregistrent la lumière émise ou réfléchi par des objets présents à la surface de la Terre. Ces données ne constituent, à ce stade, ni des photographies, ni directement des images mais des valeurs numériques rassemblées en tableaux de points (pixels) à deux dimensions. À chaque pixel sont associées des coordonnées géographiques et les valeurs numériques correspondant au signal enregistré par le capteur. Les données brutes transmises par les satellites sont ensuite interprétées pour, d'une part, identifier les objets observés et, d'autre part, en quantifier les paramètres.

Dans le domaine optique (lumière visible et proche infrarouge), nous pouvons suivre aisément l'état de la végétation. Les jeunes pousses de blé et de colza (biomasse riche en chlorophylle) apparaissent dans des rouges très foncés, les champs de colza en fleur en rose et les sols nus sont bleu clair. L'eau, qui absorbe pratiquement toutes les longueurs d'onde, apparaît presque noire (*ci-contre*).

L'observation dans l'infrarouge thermique permet une mesure de la température des objets. Voici l'observation d'une zone agricole en Espagne. Nous constatons sur cette zone une grande amplitude des températures (28-56°C), avec des zones plus froides liées à l'irrigation (l'eau refroidit la surface du sol en s'évaporant). On observe aussi une végétation dense et non irriguée (zone bleu clair au sud). Le reste de la zone est plutôt composé de sol nu et de zones urbaines.

Dans le domaine des micro-ondes, il est possible d'accéder à une mesure de l'humidité des sols. Le satellite SMOS, imaginé par le CESBIO, enregistre l'énergie naturellement émise par la Terre à une fréquence particulière : 1,4 GHz. Cette carte de l'Afrique (*à gauche*) montre les zones désertiques en orange (Sahara), qui affichent moins de 0,1 m<sup>3</sup> d'eau par m<sup>3</sup> de sol. À l'inverse, les zones humides (vert, bleu) sont caractérisées par des valeurs supérieures à 0,3 m<sup>3</sup> d'eau par m<sup>3</sup> de sol, correspondant à la zone intertropicale qui amène d'importantes quantités de pluie.

Les recherches menées au CESBIO permettent d'étudier le cycle de l'eau à l'échelle de la planète et de mieux comprendre le fonctionnement des écosystèmes continentaux. Parmi ses prochaines missions spatiales figure la mission BIOMASS, qui sera lancée en 2019 et permettra de mesurer la biomasse des forêts depuis l'espace. ◻

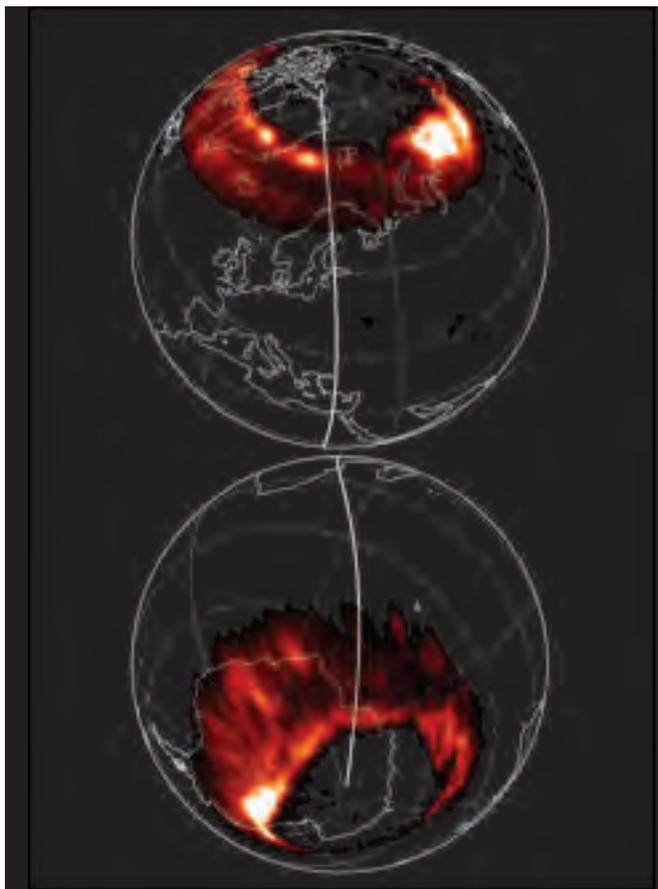


✳ **Températures de surface** (degrés Celsius) mesurées par le satellite Landsat 8 (NASA) près de Valence en Espagne (13 juillet 2014). © Benjamin Tardy, Vincent Rivaland - CESBIO

## Les 20 ans du CESBIO

Depuis 1995, ce laboratoire développe les connaissances sur le fonctionnement et la dynamique de la biosphère continentale. Ses travaux sont multidisciplinaires (physique et sciences de la vie) et vont de la recherche au développement de modèles et d'instruments. Ils ont pour objectif une meilleure gestion de la ressource (eau, carbone, azote), dans un contexte de changement global.

FRÉDÉRIC PITOUT & VINCENT GÉNOT  
Institut de recherche  
en astrophysique et planétologie  
Unité mixte de recherche 5277 CNRS/  
Université Toulouse III



# LES AURORES POLAIRES : DES LUMIÈRES QUI DANSENT DANS LE CIEL

Une nuit d'hiver sur l'archipel norvégien du Svalbard, où l'absence de nuages nous offre un ciel étoilé de toute beauté. En un clin d'œil, tout le ciel s'embrase d'une intense lumière verte : c'est l'aurore boréale !

## Quand le Soleil n'émet pas que de la lumière

Les aurores polaires (boréales au nord, australes au sud) se produisent habituellement près des pôles. Qu'elles soient vertes, rouges ou bleues, qu'elles aient la forme d'arcs ou de spirales, ces lumières proviennent de l'interaction entre le Soleil et la Terre. En effet, le Soleil expulse une partie de sa matière sous la forme d'un gaz chaud (un plasma) : le vent solaire. Ce vent est essentiellement constitué de particules appelées protons et électrons qui portent toutes une charge électrique. Le vent solaire se propage dans tout le système solaire à environ 1,5 millions de km/h et quand il approche la Terre, il ressent l'effet du champ magnétique terrestre (la Terre se comporte comme un gros aimant qui oriente nos boussoles). L'essentiel du vent solaire est dévié par le champ magnétique terrestre, qui forme donc un bouclier protecteur.

✧ Aurores boréales et australes asymétriques.  
© Nikolai Øsgaard

Aurore polaire au-dessus du radar ESR au Svalbard ✧  
© CNRS Photothèque/INSU/LPG/Guillaume GRONOFF

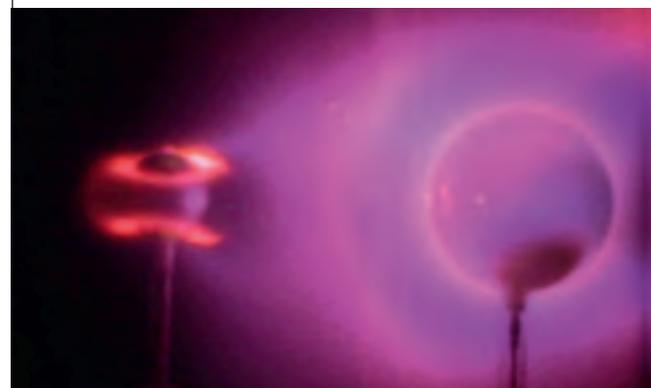


Pourtant, une petite partie du vent solaire parvient à traverser ce bouclier et à pénétrer à l'intérieur de ce qu'on appelle la magnétosphère. Une fois dans la magnétosphère, les électrons et protons sont guidés vers les régions polaires par les lignes du champ magnétique terrestre, se déversent dans l'atmosphère et interagissent avec ses constituants pour donner naissance aux aurores.

### Une recherche active

Que ce soit sur la Terre ou sur les autres planètes sur lesquelles se produisent des aurores (Jupiter, Saturne), le principe de base est plutôt bien compris. Pourtant, des questions fondamentales se posent encore et constituent des thèmes actifs de recherche. Par exemple, nous savons que les électrons qui provoquent les aurores sont accélérés avant d'atteindre l'atmosphère. Comment ? Ce n'est toujours pas très clair. Plus intrigant encore : les aurores boréales et australes ne sont pas toujours symétriques. C'est à première vue difficilement explicable puisque les aurores boréales et australes sont produites par les mêmes particules qui proviennent des mêmes régions et qui circulent sur les mêmes lignes de champ magnétique. Finalement, comprendre la formation des aurores polaires, c'est comprendre toute la chaîne de processus d'interactions entre une étoile et l'environnement de ses planètes. C'est aussi, du point de vue - plus appliqué - d'une discipline récente qu'est la météorologie de l'espace, pouvoir quantifier l'afflux de particules provenant du Soleil qui peuvent être néfastes aux spationautes et aux satellites artificiels. ☉

66 Les aurores, boréales ou australes, proviennent de l'interaction entre le Soleil et la Terre.

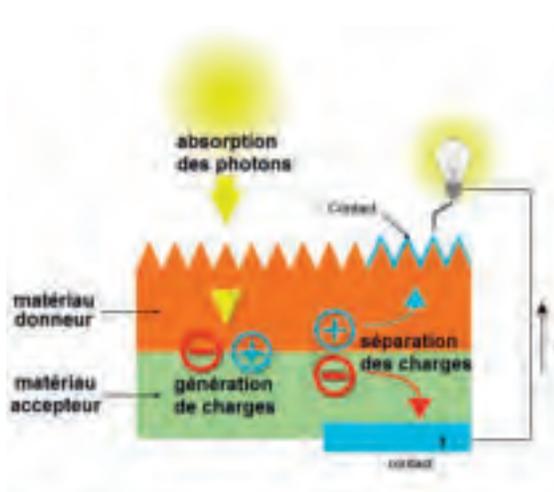


### Des aurores en laboratoire

La planetterrella, expérience inspirée d'un dispositif inventé dans les années 1900, permet de reproduire des aurores. Un « soleil » (grosse sphère métallique, à droite) émet des électrons qui interagissent avec le champ magnétique et l'atmosphère d'une « planète » (petite sphère métallique contenant un aimant puissant, à gauche).

© Philippe Jeanjacquot, ENS-Lyon/IFE

KATHLEEN MOINEAU-CHANE CHING  
Laboratoire de chimie de coordination  
Unité propre de recherche 8241 du CNRS  
ISABELLE SÉGUY  
& ELENA BEDEL-PEREIRA  
Laboratoire d'analyse et d'architecture  
des systèmes  
Unité propre de recherche 8001 du CNRS  
CHRISTINA VILLENEUVE  
Laboratoire plasma et conversion d'énergie  
Unité mixte de recherche 5213 CNRS/  
université Toulouse III/INPT  
FABIENNE ALARY  
Laboratoire de chimie et physique  
quantiques  
Unité mixte de recherche 5626 CNRS/  
Université Toulouse III



**Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque organique**  
constituée de matériaux donneur et accepteur : la lumière  
du soleil est absorbée puis transformée en courant.

# CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES ORGANIQUES :

## UNE AUTRE SOURCE D'ÉLECTRICITÉ ISSUE DE LA LUMIÈRE DU SOLEIL

La lumière du soleil peut être convertie en électricité par effet photovoltaïque. Les chercheurs développent les prochaines générations de panneaux photovoltaïques, sans silicium.

La lumière du soleil est une source d'énergie inépuisable convertible en énergie électrique, par exemple grâce aux panneaux photovoltaïques bleutés en silicium. Plus récemment, les chercheurs se sont intéressés aux cellules photovoltaïques organiques, constituées de matériaux issus de la synthèse organique comme les plastiques. Leurs avantages sont une production à bas coût et à faible bilan carbone, et une fabrication possible sur support souple.

### Comment fonctionnent-elles ?

Les cellules photovoltaïques organiques sont constituées de deux électrodes (dont l'une doit être transparente) et de deux couches actives, à l'interface desquelles se produit la conversion lumière-électricité. Ces couches sont composées de deux types de matériaux

organiques, un matériau donneur (D) et un matériau accepteur (A) d'électrons. L'action des photons, particules de lumière issues du soleil, sur ces matériaux provoque des mouvements d'électrons, particules générant l'électricité, du matériau D vers le matériau A. Les charges électriques ainsi produites se déplacent vers les électrodes ce qui donne lieu à un courant électrique.

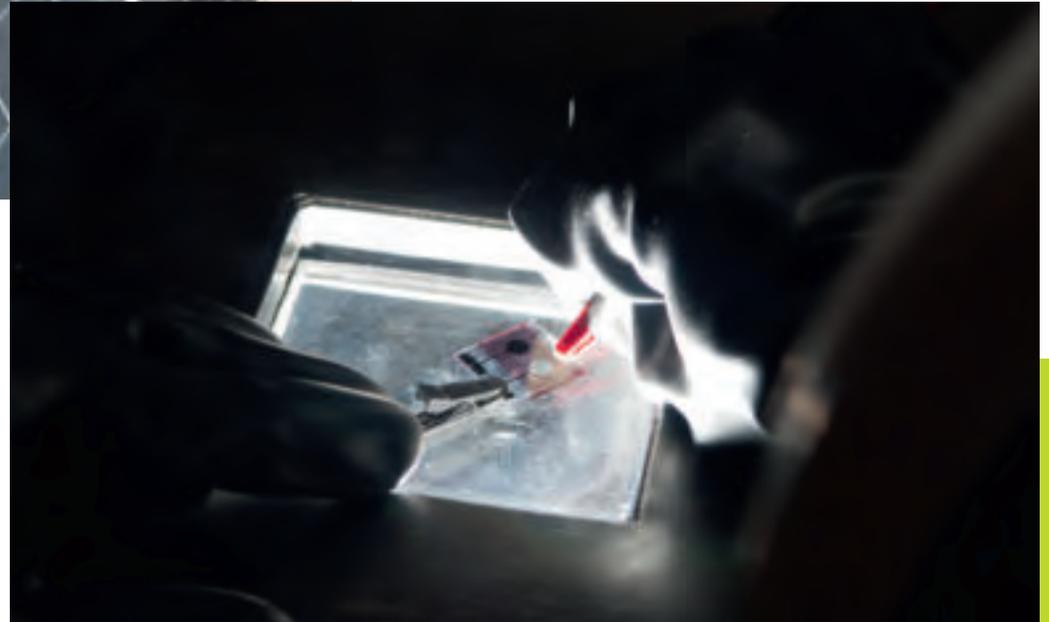
### Que visent nos recherches ?

L'ultime objectif est l'augmentation de l'efficacité des cellules photovoltaïques organiques. Pour cela, nous imaginons à l'aide de calculs de chimie théorique, puis synthétisons, des molécules D et A efficaces. Ensuite, nous étudions les processus électroniques complexes, encore mal compris, qui ont lieu au niveau de ces molécules. La production du courant électrique dépend fortement de l'organisation



✧ **Panneaux photovoltaïques**  
© CNRS Photothèque / Cyril FRESILLON

✧ **Cellule photovoltaïque organique**  
© CNRS Photothèque / Cyril FRESILLON



des molécules dans les couches actives. Grâce aux progrès instrumentaux dans le domaine des nanotechnologies et en particulier de la microscopie à force atomique, nous pouvons mesurer la répartition du courant sur une surface à l'échelle nanométrique.

Les prototypes de cellules solaires organiques sont actuellement deux fois moins efficaces que les cellules à base de silicium. En combinant des couples D et A innovants et des avancées en ingénierie des matériaux, ces nouvelles cellules pourraient être l'une des technologies-clés du XXI<sup>e</sup> siècle, ouvrant la porte à de nouvelles applications nomades telles que l'alimentation des téléphones portables ou des chargeurs de batteries. ◻

“ L'ultime objectif est l'augmentation de l'efficacité des cellules photovoltaïques organiques. ”

FLORENCE BENOIT-MARQUIÉ  
Laboratoire des interactions moléculaires  
et de la réactivité chimique  
et photochimique  
Unité mixte de recherche 5623 CNRS/  
Université Toulouse III  
CATHERINE CLAPAROLS  
Institut de Chimie de Toulouse  
Fédération de recherche 2599 CNRS/  
Université Toulouse III  
MARION MARTIGNAC  
Derichebourg Aqua

# LA LUMIÈRE POUR ÉLIMINER LES MICROPOLLUANTS DE L'EAU

Les stations d'épuration n'ont pas été conçues pour éliminer des eaux usées les micropolluants. Pourtant, leur impact sur l'environnement et sur la faune est déjà démontré. Depuis quelques années, les chercheurs s'emparent de la question, en collaboration étroite avec les industriels de l'eau.



Les techniques d'analyse actuelles sont capables de détecter la présence dans l'eau de substances à des concentrations infinitésimales. On a ainsi pu quantifier des micropolluants (pesticides, résidus médicamenteux, produits vétérinaires, détergents, plastifiants, retardateurs de flamme...) à l'échelle mondiale, à la fois dans les eaux de surface et dans les eaux souterraines. La question des effets potentiels de l'exposition chronique à ces « cocktails » se pose. Par exemple, il a été démontré que la présence d'hormones de synthèse dans les eaux de rivières induit des malformations et la féminisation des poissons mâles. Les micropolluants présents dans les eaux usées sont actuellement reversés dans le milieu naturel. Même si la loi française n'im-

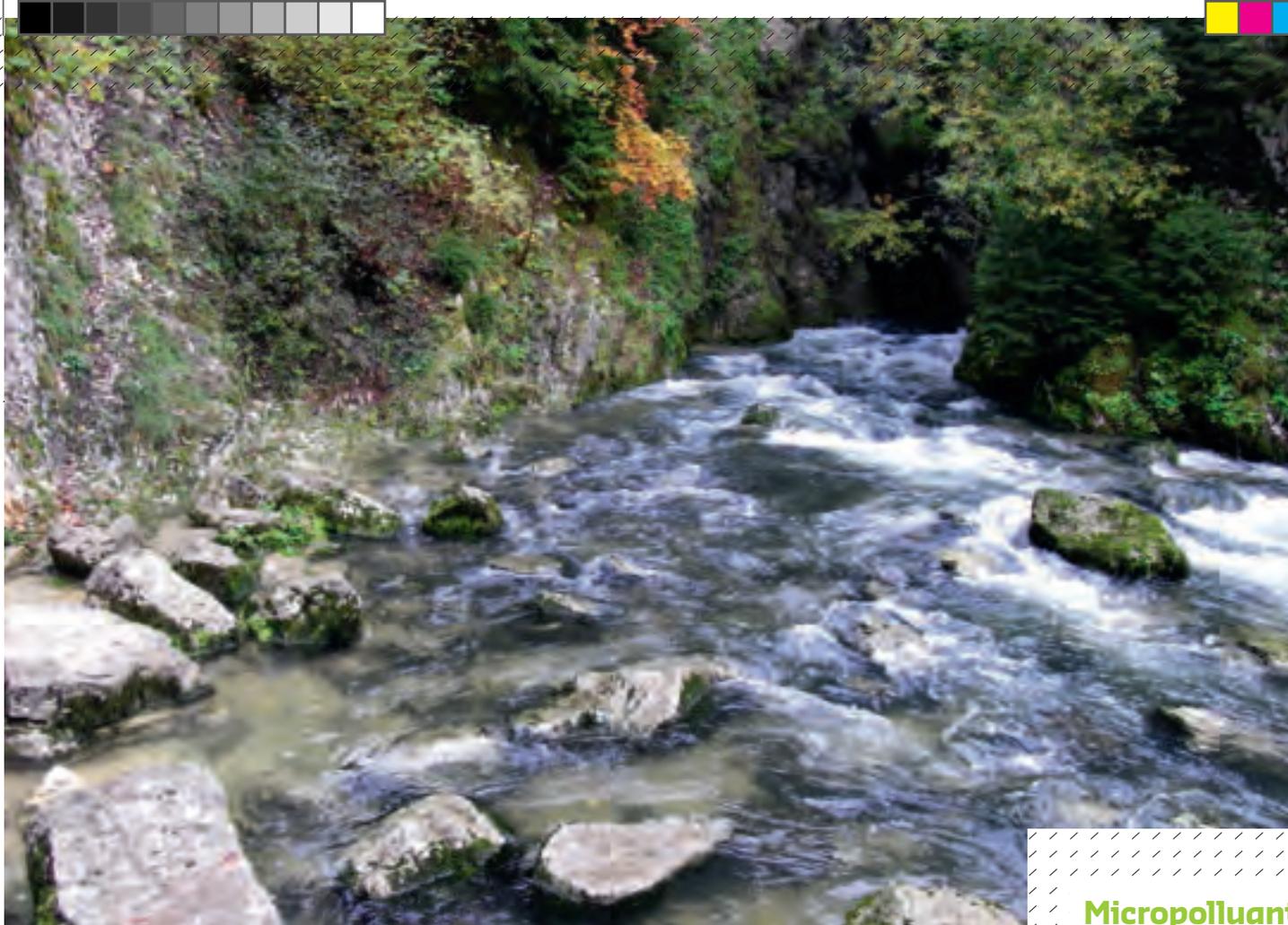
pose rien pour le moment, il est nécessaire d'ajouter aux traitements classiques de l'eau de nouveaux procédés permettant d'éliminer efficacement les micropolluants. Parmi les techniques existantes, des procédés dits d'oxydation avancée photochimique utilisent des rayonnements ultraviolets, qualifiés de lumière noire car invisibles pour l'œil humain. Au laboratoire, nous étudions depuis plusieurs années différentes méthodes de dépollution photochimique.

## Un travail primé

Ces procédés permettent d'obtenir la dégradation totale des polluants organiques présents dans l'eau en produisant à température et pression ambiantes, un oxydant puissant capable de dégrader une grande variété de molécules. A partir de ces études, nous avons développé un procédé (le Loilyse®) utilisant une lumière UV, qui a fait l'objet d'essais à

✱ Réacteur photochimique de dépollution de l'eau en fonctionnement.





© CNRS Photothèque  
/Marc STEINMANN

l'échelle d'un pilote industriel sur une diversité de micropolluants, en partenariat avec la société *Derichebourg Aqua*. Les résultats ont démontré sa grande efficacité pour dégrader différentes familles de médicaments (anticancéreux, antibiotiques de la famille des pénicillines, antalgiques...). Des pesticides et des conservateurs (parabènes) sont également effi-

cacement éliminés. Ce travail a été primé par l'Agence de l'eau Adour-Garonne et le Loilyse® est actuellement en cours de commercialisation par la société Derichebourg Aqua. Toutefois, il reste beaucoup à faire pour que ces procédés de dépollution, peu coûteux, soient utilisés massivement et ce, malgré les risques avérés pour la faune et la santé humaine. ◻

## Micropolluant de l'eau

Substance organique présente dans l'eau à des concentrations comprises entre le microgramme et le nanogramme par litre (cette concentration correspond à l'équivalent d'une sucrée dissoute dans une piscine olympique). Les substances chimiques concernées ont une origine agricole, domestique ou industrielle.

LAURENT CANALE, SOVANNARITH LENG,  
GEORGES ZISSIS  
Laboratoire plasma  
et conversion d'énergie  
Unité mixte de recherche 5213 CNRS/  
Université Toulouse III/INPT

✳ **Une diode électroluminescente (DEL, en anglais : Light-Emitting Diode, LED)** est un composant électronique fabriqué à partir d'un cristal semi-conducteur.

# LA LED, UNE CENTENAIRE PLEINE D'AVENIR...

Aujourd'hui, l'éclairage représente à lui seul près de 20% de la consommation énergétique mondiale. C'est donc un formidable bras de levier pour réduire les coûts énergétiques et limiter notre impact sur l'environnement.

**E**n 1907, un pionnier de la radio, J.H. Round mentionne le premier une émission de lumière à partir d'un cristal de *carborundum* sans pouvoir l'expliquer. Sans le savoir, O.V. Losev, un chercheur russe, reproduit cette expérience en 1921 et suppose qu'il s'agit de l'effet photoélectrique inverse mentionné par Einstein. Il faudra attendre plus de quarante ans, en 1962, pour que N. Holonyak invente la LED rouge. G. Craford invente la LED jaune en 1972 et la LED verte suit... 1993 fera date avec l'invention de la LED bleue qui vaudra le prix Nobel de physique à Nakamura, Akasaki et Amano en 2014 et ouvrira la porte de l'éclairage artificiel aux semi-conducteurs.

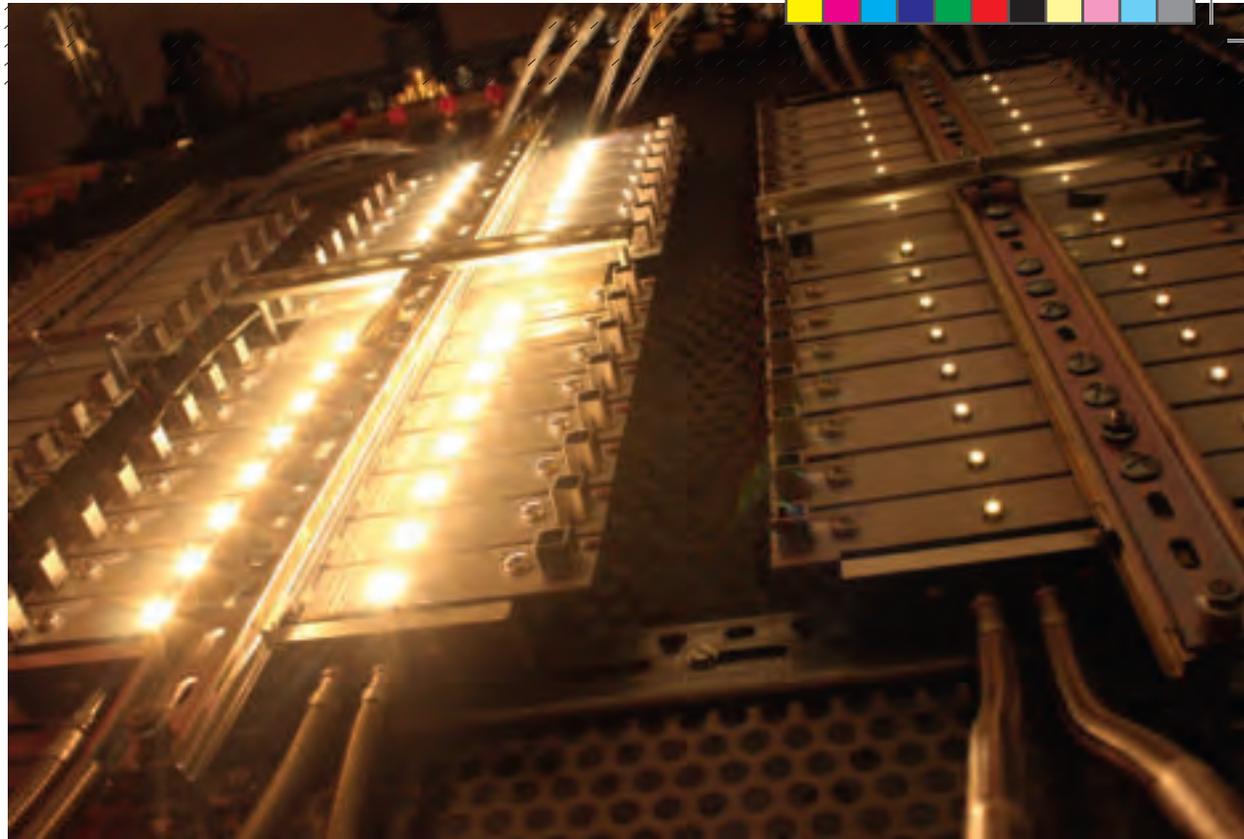
La lampe à incandescence, inventée en 1878 par Joseph Swan, n'utilise que 3% de l'énergie qu'on lui fournit et 97% sont perdus sous forme de chaleur ou d'infra-rouge. Les limites théoriques de l'efficacité des lampes à incandescence ne peuvent excéder 15% alors que celles des LEDs peuvent

atteindre 100% ! C'est donc bien naturellement que les chercheurs se sont tournés vers cette centenaire pleine d'avenir...

Depuis quelques années, des LEDs blanches de haute brillance sont disponibles sur le marché et produisent plusieurs centaines de lumens. Depuis, l'efficacité lumineuse, la fiabilité et la qualité de la lumière des LEDs ont été en constante augmentation avec une vitesse incroyable pour dépasser aujourd'hui les 300 lumen/watt au niveau du composant LED en laboratoire. Mais la situation est bien différente une fois la LED intégrée dans un système d'éclairage : les rendements sont aujourd'hui de l'ordre de 100 lm/W, ce qui reste néanmoins bien supérieur aux sources à incandescence (environ 16 lm/W).

### La source de lumière idéale ?

Grande efficacité énergétique, très longue durée de vie, impact environnemental réduit... Les LEDs seraient-elles enfin la source de lumière idéale ? Bien qu'elles se présentent comme telles, elles restent encore perfectibles. Dans notre laboratoire, l'équipe « *Lumière et Matière* » participe activement à l'étude des mécanismes de dégradation des LEDs de puissance utilisées pour l'éclairage, et notamment les aspects liés à l'évacuation de la chaleur dans les LEDs. Car si les LEDs ont bien un talon d'Achille, c'est la



chaleur ! En effet, une LED mal implantée dans un système va s'échauffer et induire des dégradations prématurées desquelles résulteront des échauffements supplémentaires. Mieux connaître ces mécanismes doit nous permettre de développer des solutions techniques optimisées et accroître ainsi la durée de vie et la fiabilité de ces sources de lumière. L'équipe « *Lumière et Matière* » du laboratoire LAPLACE travaille également sur l'optimisation des éclairage à LEDs pour la culture sous serre, l'étude de l'impact sur l'environnement et l'écosystème, la réduction de la pollution lumineuse, la santé et le bien-être. ◻



Prototype de  
banc de vieillissement de LEDs  
développé au  
laboratoire.  
© Laurent Canale



Découverte en 1907,  
la LED est une  
centenaire  
pleine d'avenir

ANNE-FRANÇOISE MINGOTAUD  
& PATRICIA VICENDO

Laboratoire des interactions moléculaires  
et de la réactivité chimique et  
photochimique

Unité mixte de recherche 5623 CNRS/  
Université Toulouse III  
MARIE-PIERRE ROLS

Institut de pharmacologie et biologie  
structurale

Unité mixte de recherche 5089 CNRS/  
Université Toulouse III



La chimiothérapie consiste à injecter des molécules toxiques conçues pour tuer les cellules cancéreuses. Malheureusement, ces médicaments sont également toxiques pour les cellules saines ce qui conduit à des effets secondaires parfois très graves. Le rêve de tout médecin est ainsi de pouvoir détruire sélectivement les cellules cancéreuses sans toucher aux cellules saines. Dans certains cas, la thérapie photodynamique permet de répondre à ce besoin. Cette thérapie consiste à utiliser une molécule non toxique dans le noir mais qui, sous l'effet d'une lumière spécifique et en présence d'oxygène, devient active et induit la mort des cellules environnantes. Un médicament appelé photosensibilisateur est injecté au patient. Celui-ci mettra 1 à 2 jours à se distribuer dans le corps et à s'accumuler dans la tumeur. Dans l'étape suivante la zone tumo-

# LA THÉRAPIE PHOTODYNAMIQUE : TRAITER LES CANCERS AVEC DE LA LUMIÈRE

Face à la découverte d'une tumeur, plusieurs stratégies thérapeutiques se présentent aux médecins : radiothérapie, chimiothérapie, chirurgie, mais aussi photothérapie.

rale sera irradiée avec une fibre optique laser, pour que le médicament génère des produits hautement toxiques pour les cellules, telles que des espèces réactives de l'oxygène. Dans cette technique, seule la zone à soigner est illuminée, donc les risques de toucher à des organes sains sont faibles. Toutefois, le photosensibilisateur se retrouve

un peu partout dans le corps et le patient ne peut donc pas s'exposer au soleil pendant plusieurs semaines, sous peine de produire les espèces toxiques dans toutes les zones exposées. Notre équipe travaille donc sur une méthode permettant d'amener le photosensibilisateur principalement dans la zone tumorale et le moins possible ailleurs.



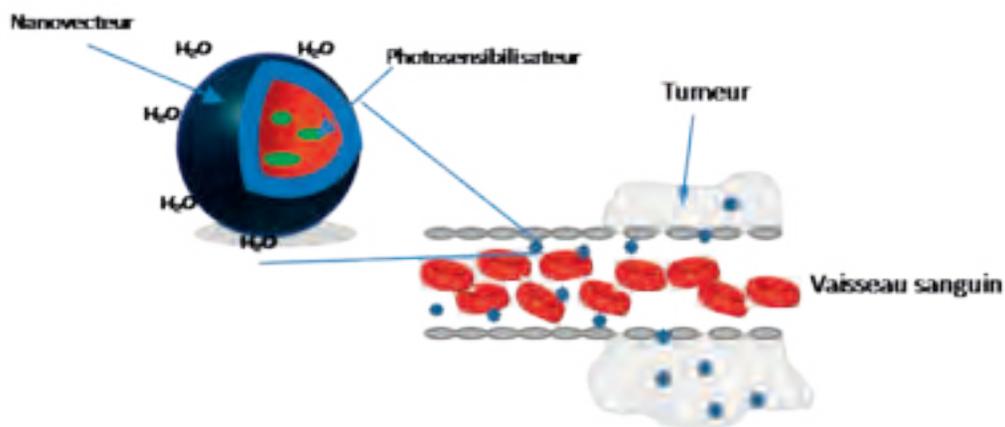


✱ Fibre optique laser © National Cancer Institute

## 66 Amener le photosensibilisateur principalement dans la zone tumorale

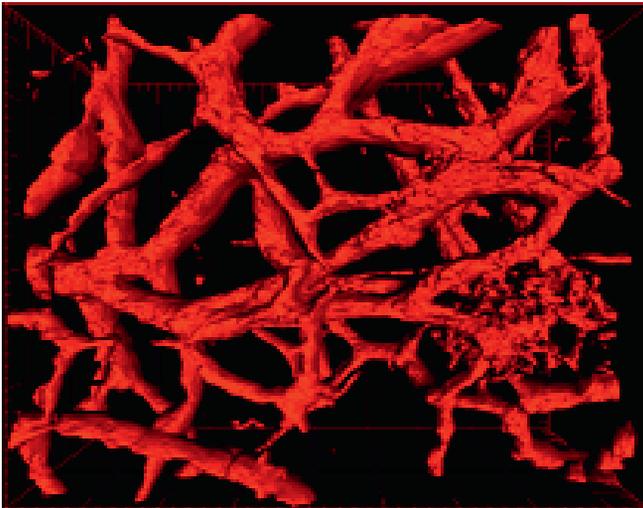
Pour cela, l'idée est de l'emprisonner dans une capsule de taille nanométrique, c'est-à-dire plus petite que l'épaisseur d'un cheveu divisée par 1 000. Ce genre d'objet qui transporte des médicaments est appelé un nanovecteur. Si celui-ci est bien choisi, il s'accumulera préférentiellement dans la zone tumorale, et le photosensibilisateur sera ainsi véhiculé sélectivement jusqu'à la tumeur.

Dans notre démarche, nous sommes aidés par la nature. En effet, les vaisseaux sanguins qui alimentent les tumeurs sont différents de ceux qui irriguent les tissus sains : ils sont beaucoup plus poreux. Grâce à cette anomalie, le nanovecteur peut s'échapper du flux sanguin au niveau des tumeurs, ce qui facilite une distribution ciblée. Cette situation est idéalisée, et notre équipe travaille sur la conception de différents types de nanovecteurs qui permettraient de s'en approcher au maximum, l'objectif final étant une thérapie photodynamique anti-cancéreuse optimisée. ◻



✱ Schéma illustrant la diffusion facilitée des nanovecteurs dans la tumeur grâce à la porosité des vaisseaux sanguins au niveau de cette zone.

MURIEL GOLZIO & MARIE-PIERRE ROLS  
Institut de pharmacologie  
et biologie structurale  
Unité mixte de recherche 5089 CNRS/  
Université Toulouse III



Visualisation de l'architecture des vaisseaux tumoraux en 3D par microscopie biphotonique.

# L'IMAGERIE OPTIQUE DU PETIT ANIMAL : UTILISER LA LUMIÈRE POUR LA RECHERCHE MÉDICALE

L'imagerie est un outil indispensable pour étudier *in vivo* les processus biologiques au niveau d'organes et de tissus, évaluer la pertinence de modèles animaux, réaliser des études précliniques ou valider de nouveaux traitements et médicaments.

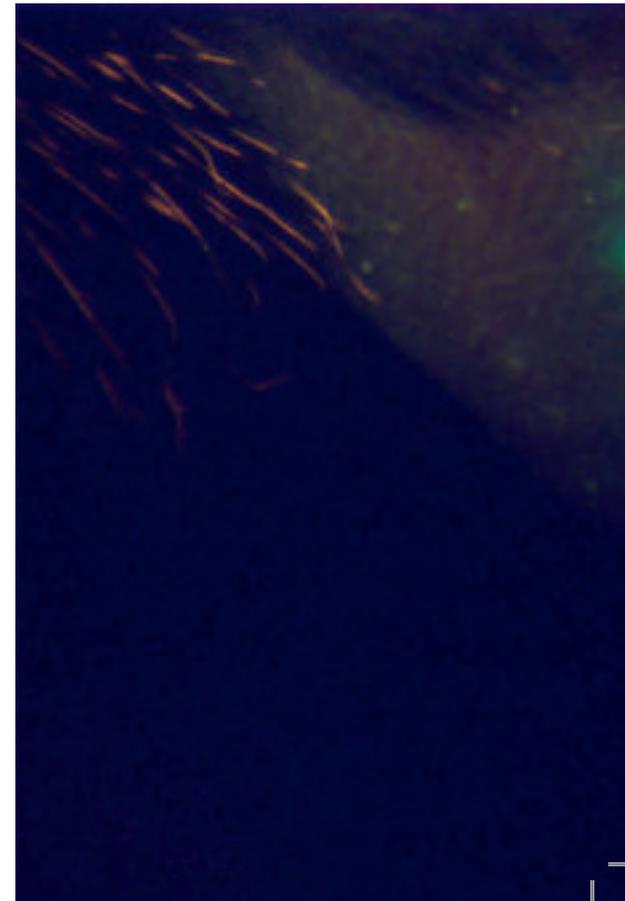


La complexité pour obtenir des animaux modèles ou transgéniques, ainsi que la volonté d'en réduire le nombre pour des considérations éthiques, conduisent les laboratoires de recherche à utiliser des méthodes d'étude et d'analyse non invasives. L'imagerie optique, utilisée directement sur l'animal vivant, est une méthode efficace et reproductible pour détecter et suivre l'expression de gènes dans le temps sans sacrifier l'animal.

## De nouvelles possibilités

Le gène d'intérêt est couplé à un gène rapporteur de la famille des protéines naturellement fluorescentes (de la méduse ou du corail) ou pouvant utiliser un substrat biolumines-

Visualisation en fluorescence du transfert d'ADN dans le muscle de la patte de souris pour évaluer l'efficacité d'une nouvelle approche de thérapie génique. ✱



cent (de la luciole ou du ver luisant). Ainsi, la détection de lumière dans la zone d'intérêt reflète directement la présence et l'activité du gène recherché. Grâce aux récentes avancées technologiques (caméras refroidies très sensibles, diodes électroluminescentes LED, lasers,...), les techniques optiques telles que la bioluminescence et la fluorescence offrent aujourd'hui la possibilité d'une imagerie spatio-temporelle quantitative non invasive et peu onéreuse.

### Observer plus en profondeur

Dans notre laboratoire, les chercheurs utilisent et développent l'imagerie optique et notamment en fluorescence car elle offre la possibilité de travailler avec plusieurs longueurs d'onde et offre des réponses très rapides (milliseconde). Nous avons ainsi la possibilité de suivre en temps réel et de façon non invasive le transfert et la régulation de gènes (fusion avec un gène rapporteur), le développement de tumeurs, l'évaluation de traitements anti-tumoraux ainsi que la bio-distribution de molécules thérapeutiques (vitesse de diffusion et localisation).

Actuellement ces techniques d'imagerie sont principalement utilisées pour l'observation d'événements peu profonds dans l'organisme. Les développements instrumentaux récents (analyse spectrale et durée de vie de fluorescence) et de nouvelles sondes spécifiques du proche infrarouge (650 à 800 nm) permettront d'imager les processus biologiques plus en profondeur dans les tissus. ◻



**Visualisation en fluorescence d'une souris transgénique âgée de 8 jours** dont les muscles contiennent la GFP ou « *Green Fluorescent Protein* ». Cette visualisation permet de sélectionner les animaux transgéniques sans leur faire de biopsie. ✱

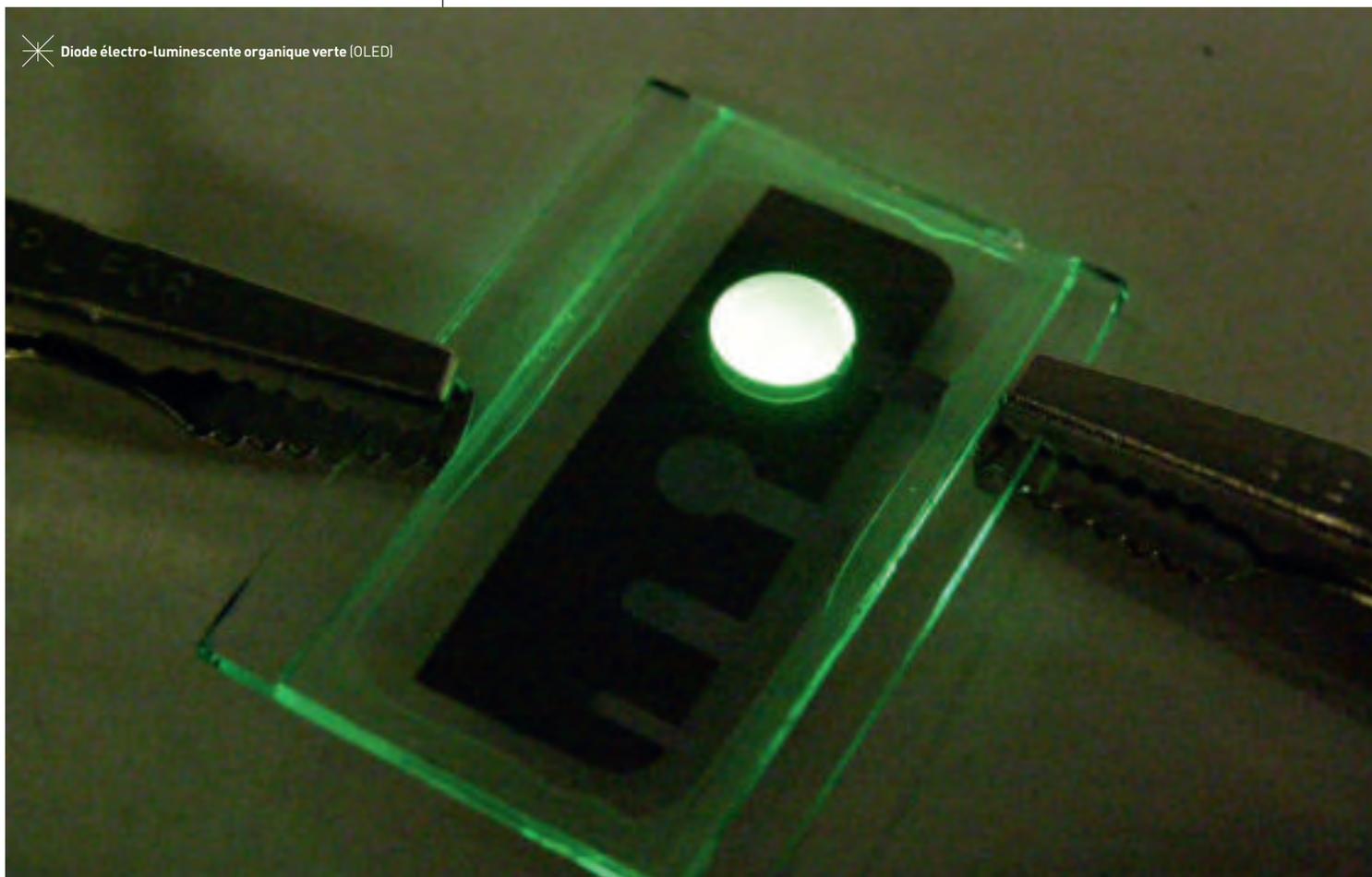
66 Les techniques optiques offrent aujourd'hui la possibilité d'une imagerie spatio-temporelle quantitative non invasive et peu onéreuse

MARC TERNISIEN, DAVID BUSO, MANUEL  
LOPES & GEORGES ZISSIS  
Laboratoire plasma  
et conversion d'énergie  
Unité mixte de recherche 5213 CNRS/  
Université Toulouse III/INPT

# LES LED ORGANIQUES, SOURCE DE LUMIÈRE DU FUTUR ?

Depuis une centaine d'années se sont succédé différents types d'émetteurs de lumière fonctionnant à l'électricité. Les diodes électroluminescentes organiques (OLED) sont la dernière génération de ces dispositifs. Encore au stade du développement, elles représentent peut-être l'éclairage du futur.

✧ Diode électro-luminescente organique verte (OLED)



**D**e manière générale, la matière organique évoque aux gens ce qui constitue les êtres vivants ou la flore qui nous entoure, c'est-à-dire un matériau sans la propriété de transporter l'électricité : une matière isolante. Au travers des différentes découvertes réalisées ces soixante dernières années, on a pu voir que lorsqu'on retire ou ajoute des électrons au matériau par dopage chimique, on peut augmenter de quatre-vingts fois sa conductivité, c'est-à-dire sa capacité à transporter l'électricité. On peut donc par modification chimique créer des matériaux organiques conducteurs. Ce sont ces derniers qui sont utilisés pour la fabrication d'une OLED.

### De nombreuses utilisations

Une OLED présente une structure relativement simple : un empilement de couches de matériaux organiques placé entre deux électrodes permettant l'application d'une tension électrique. Chaque couche de matière joue un rôle bien précis. Certaines améliorent l'injection des charges électriques au niveau des électrodes, tandis que d'autres transportent ces charges jusqu'à la couche émettrice de lumière.

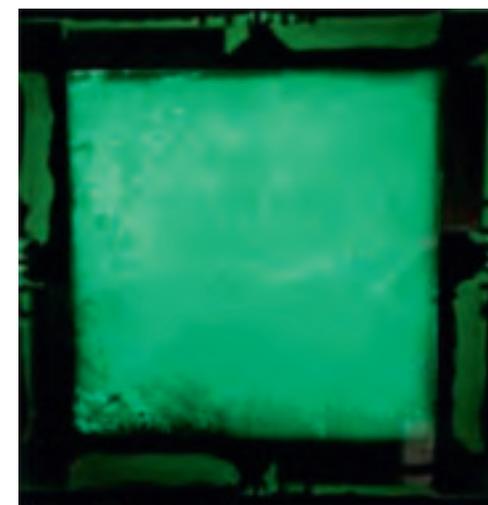
De manière générale, les différentes couches de matériaux organiques utilisés sont déposées sur un substrat en verre et leur épaisseur est extrêmement faible (de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres).

Les performances désormais atteintes par les OLED développées en laboratoire laissent percevoir des utilisations pour l'éclairage d'ambiance. Beaucoup de recherches sont encore réalisées même si quelques dispositifs en sont au stade du prototype. Les grands domaines d'avenir pour les OLED sont l'affichage (télévision, téléphones mobiles, ...) et l'éclairage uniforme dans le cadre de l'habitation et de l'automobile. Concernant ce dernier secteur, notre laboratoire travaille notamment sur le transfert de la technologie OLED sur support plastique.

### Faibles consommatrices d'énergie

En résumé les OLED sont intéressantes à développer car elles consomment peu d'énergie. Ces dernières présentent l'avantage de pouvoir être déposées sur différents types de supports, et notamment des supports plastiques. On peut donc imaginer fabriquer, dans le futur, des sources de lumière de n'importe quelle forme, pouvant ouvrir de nouvelles possibilités d'utilisation. ◻

“ Dans le futur, on pourra fabriquer des sources de lumière de n'importe quelle forme ”



\* OLED bleue et verte sur substrat plastique (Polycarbonate) réalisées au laboratoire. (Dimensions 35x35 mm).

JACQUES ROUQUETTE &  
BERNARD DUCOMMUN

Institut des technologies avancées  
en sciences du vivant  
Unité de service et de recherche 3505  
CNRS/Université Toulouse III/INSA  
Toulouse

JULIEN COLOMBELLI

Advanced Digital Microscopy Core Facility  
Institute for Research in Biomedicine,  
Barcelone, Espagne

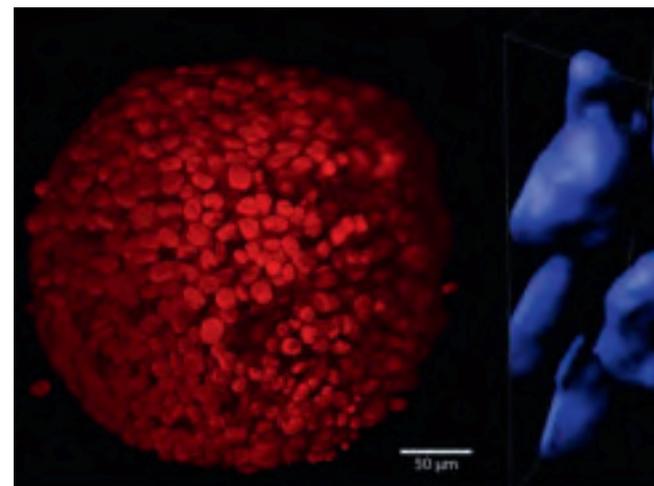
# DES MICROSCOPES À FEUILLE DE LUMIÈRE POUR ACCÉDER À LA TROISIÈME DIMENSION

L'un des challenges de l'imagerie optique en biologie est de visualiser en trois dimensions des structures biologiques et des organismes dans des conditions qui préservent leur intégrité tridimensionnelle. C'est ce que permettent de nouveaux instruments basés sur la microscopie à feuille de lumière.

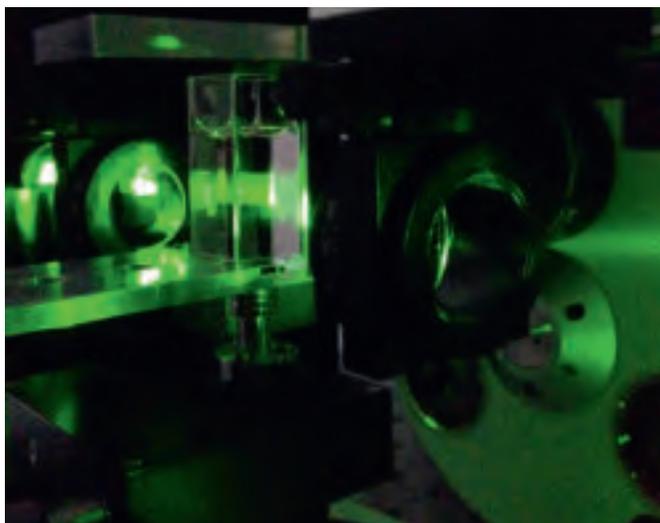
La microscopie à feuille de lumière est basée sur un principe simple. La lumière qui éclaire l'objet biologique observé n'est plus un faisceau laser cylindrique, mais a la forme d'une feuille de quelques micromètres d'épaisseur. De façon originale, cette feuille de lumière est positionnée perpendiculairement à l'objectif qui détectera la fluorescence émise par l'objet. Ainsi, comme sur une trancheuse virtuelle, le déplacement de l'objet dans cette feuille de lumière permettra de réaliser des coupes optiques à toutes les profondeurs de l'échantillon, permettant ainsi de l'observer dans sa globalité.

## De véritables images en 3D

Dans un microscope classique, la lumière d'illumination et celle de la détection de la fluorescence ont des trajets anti-parallèles passant par le même objectif. Dans un microscope à feuille de lumière le fait de dissocier les trajets optiques des lumières d'ex-



✱ Visualisation en 3D d'un modèle de microtumeur *in vitro*, composée de nombreuses cellules cancéreuses dont les noyaux sont marqués avec une protéine fluorescente.  
© Valérie LOBJOIS (ITAV).



✱ **Vue du MacroSPIM** permettant de visualiser la feuille de lumière, horizontale, qui traverse l'échantillon.  
© Jacques ROUQUETTE (ITAV)

citation et d'émission offre des avantages remarquables car seul le plan d'observation est éclairé et l'image de ce plan est obtenue en une seule fois dans sa globalité. Ceci permet d'obtenir des images avec une excellente résolution axiale et de diminuer les risques de toxicité de la lumière sur l'échantillon. De plus, l'illumination du plan entier en une fois permet de réaliser des images très rapidement. Enfin, une autre caractéristique spécifique de la

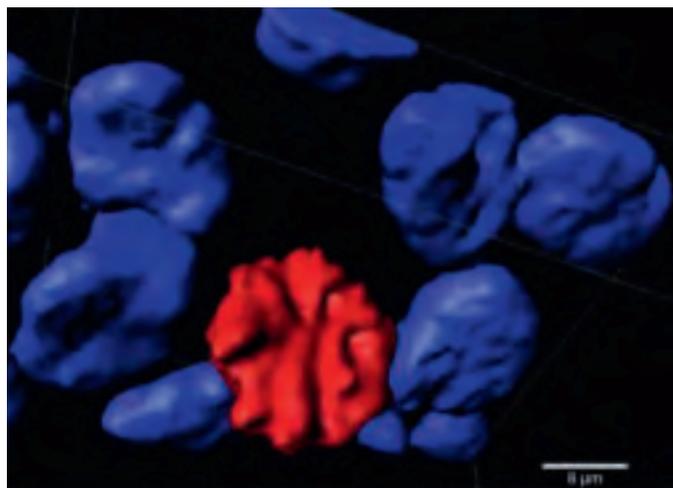
microscopie à feuille de lumière est que l'échantillon peut être déplacé dans toutes les directions mais également être tourné sur lui-même, ce qui permet de prendre des images selon plusieurs angles de vues. Les images une fois fusionnées donnent ainsi accès à de véritables images en 3D.

### De nombreuses applications

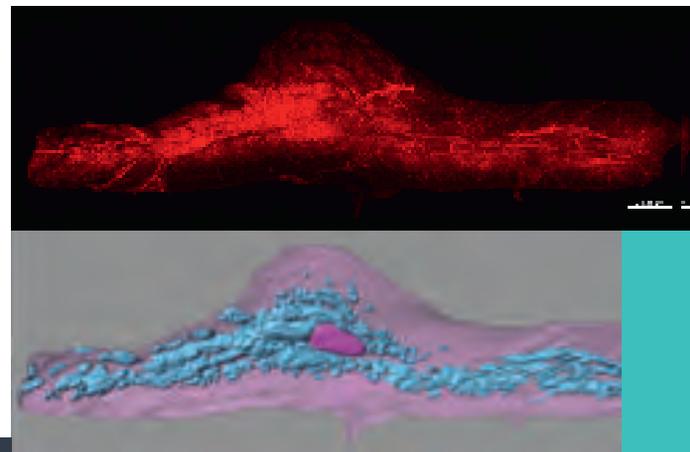
Ces microscopes à feuille de lumière sont des instruments particulièrement adaptés au suivi en temps réel d'événements biologiques au sein d'échantillons de grande taille (de quelques centaines de micromètres au millimètre) ou à l'observation de tissus ou d'organismes de taille plus importante (plusieurs centimètres) et ceci avec une résolution à l'échelle de la cellule !

Le développement de ces nouveaux microscopes, de la construction du dispositif optique à la visualisation en 3D des échantillons, en passant par le contrôle

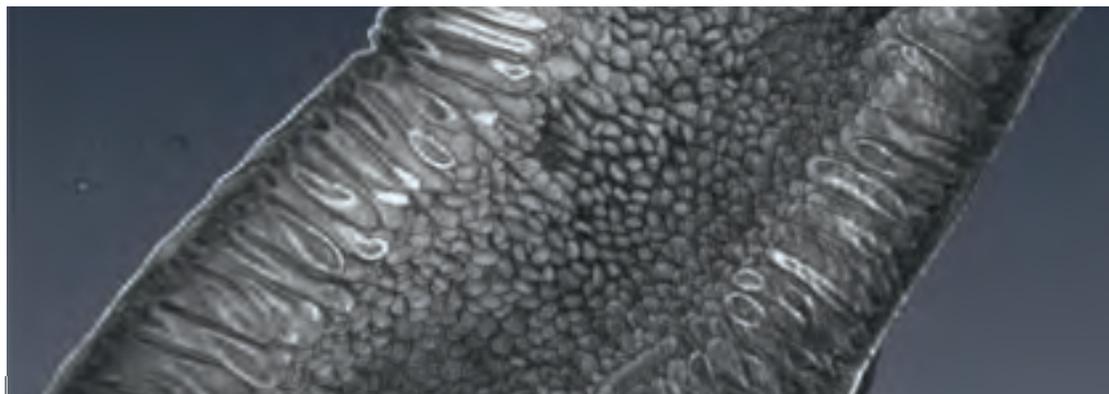
des composants électroniques, s'appuie sur des compétences multidisciplinaires et associe en particulier des biologistes cellulaires spécialistes d'imagerie, des physiciens, des mathématiciens et des informaticiens. La polyvalence de ces instruments ouvre de nombreuses perspectives d'applications et cette microscopie émergente fait aujourd'hui l'objet d'un intérêt majeur dans des domaines aussi variés que la biologie cellulaire, la cancérologie, la pharmacologie, la biologie du développement, la biologie marine, la biologie végétale et l'ingénierie tissulaire. ○



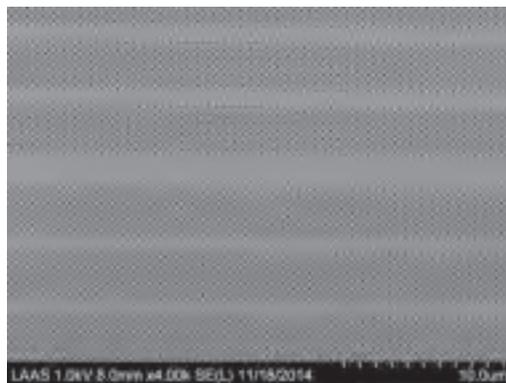
✱ **Reconstruction d'une pile d'images** permettant la visualisation en 3D de l'intérieur d'un intestin de souris.  
© Jacques ROUQUETTE (ITAV) et Christophe GUISSARD (STROMALab)



✱ **En haut, visualisation volumique du tissu adipeux entier de souris.** Le signal observé est un signal d'autofluorescence. **En bas,** représentation 3D de toutes les sous-structures fonctionnelles du tissu adipeux. © Jacques ROUQUETTE et Souleymane GANI KOU MASSI (ITAV) et Corinne BARREAU et Christophe GUISSARD (STROMALab).



PHILIPPE ARGUEL  
& ANTOINE MONMAYRANT  
Laboratoire d'analyse et d'architecture  
des systèmes  
Unité propre de recherche 8001 du CNRS



✱ **Cristal photonique mésoscopique** : la lumière peut se propager dans le cristal, perpendiculairement aux zones non trouées, sans s'étaler latéralement. Ce cristal constitue ainsi un guide optique sans paroi. Le diamètre des trous est de 180 nm.  
©LAAS-CNRS

# LA PHOTONIQUE : SCULPTER LA LUMIÈRE À DES ÉCHELLES DE PLUS EN PLUS PETITES

Depuis 20 ans, la photonique inonde notre vie quotidienne : télécommunications, Internet, stockage de données, télémétrie, chirurgie...



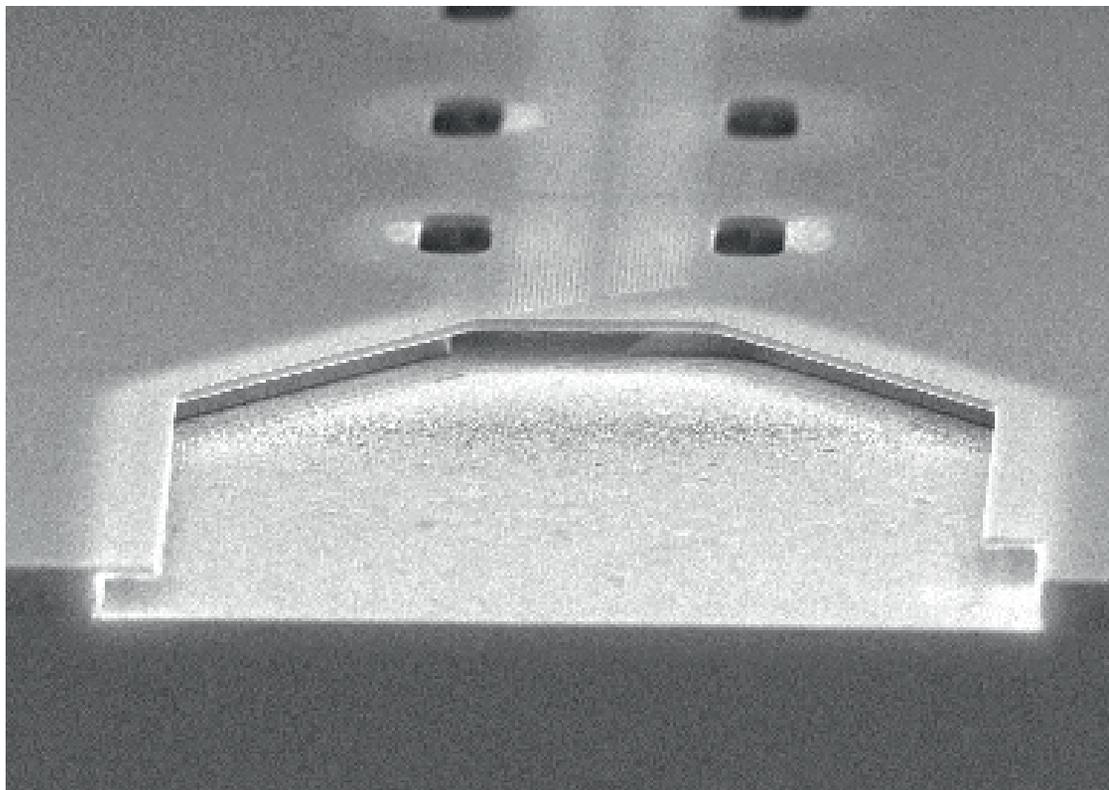
e domaine scientifique est étroitement lié à la maîtrise du laser et aux progrès effectués depuis deux décennies par les technologies des très petites dimensions.

Ainsi, à l'échelle humaine, la lumière émise par un pointeur laser et passant au travers d'un tamis est dispersée (on dit qu'elle est diffractée) en un motif dépendant de la géométrie et de la finesse du tamis. À des dimensions bien inférieures, la parfaite maîtrise de la lumière suppose alors d'avoir recours à des technologies capables de façonner la matière avec une précision de quelques nanomètres, soit donc quelques milliardièmes de millimètre... C'est ce qui fait l'objet de nos recherches.

## Maîtriser la lumière

Afin d'exercer une action efficace sur la lumière, les dispositifs photoniques sont généralement constitués de la répétition régulière d'un motif précis. Le motif peut prendre différentes formes telles qu'un plot,

une crête, un sillon ou un simple trou pratiqué dans le matériau. La période de répétition étant à l'échelle de la longueur d'onde lumineuse à traiter (généralement voisine du micromètre), les dimensions du motif sont de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de nanomètres. On conçoit alors aisément qu'un paramètre crucial pour le bon fonctionnement du dispositif est la régularité avec laquelle sont réalisés le motif et sa répétition. De même, on peut pressentir qu'en introduisant une rupture dans cette régularité, on parviendra à influencer le comportement de l'onde lumineuse qui s'y propage. C'est en exploitant ce type de propriétés que les scientifiques conçoivent et fabriquent des dispositifs photoniques. Aujourd'hui, par exemple, on est capable de percer des milliers de trous identiques selon une répartition parfaitement maîtrisée, et on est également capable d'omettre la réalisation d'un ou plusieurs trous dans cette répartition. Ce moyen permet de dessiner des structures à l'échelle des longueurs



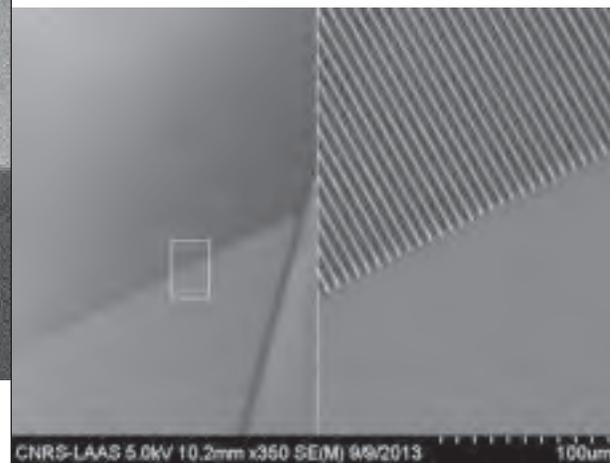
**Face de sortie d'un micro-laser :**  
la lumière laser émerge par la tranche de la membrane (*centre de l'image*) dans le prolongement de l'étroite zone non percée. La membrane a une épaisseur de 270 nm. Les gros trous n'ont aucun rôle optique, ils ont simplement facilité la réalisation du dispositif.  
©LAAS-CNRS

d'onde lumineuses et de maîtriser parfaitement le comportement de la lumière. C'est le développement récent des nanotechnologies qui a permis de vaincre cette difficulté et qui autorise aujourd'hui la réalisation de dispositifs photoniques performants. Parmi ceux-ci, on peut citer des filtres optiques variables pour des satellites d'observation terrestre, des réflecteurs filtrants pour micro-lasers, des résonateurs optiques miniatures pour systèmes

d'analyse, ou encore des objets curieux tels que des guides de lumière sans guide (ou sans paroi)...

### La nature aussi

Au-delà des travaux de laboratoire, il est intéressant de noter que la nature produit elle aussi des structures photoniques : elles rendent iridescentes des ailes de papillons, des carapaces d'insectes ou des plumages d'oiseaux...



**Filtre spectral nanostructuré :** vue d'ensemble (*gauche*) et rapprochée (*droite*) de la surface d'un filtre nanostructuré. Les lignes ont une largeur de 150 nm et elles sont séparées de 700 nm.  
© LAAS-CNRS

BENOÎT CHALOPIN & SÉBASTIEN WEBER  
Laboratoire Collisions, agrégats, réactivité  
Unité mixte de recherche 5589 CNRS/  
Université Toulouse III

# DES IMPULSIONS LASER POUR CONTRÔLER LA MATIÈRE

Le laser est une concentration spatiale de la lumière sous forme d'un faisceau lumineux. Il peut aussi présenter une concentration temporelle sous forme d'un jet de lumière : on parle alors d'impulsion lumineuse de durée très courte.

## Qu'est-ce qu'une impulsion laser femtoseconde ?

Un laser à impulsion s'apparente aux pistolets laser des films de science fiction : la plupart du temps, le laser est éteint, et il émet des jets de lumière pendant des temps très courts, pouvant descendre « jusqu'à la femtoseconde » ( $1\text{fs}=0.000\ 000\ 000\ 000\ 001\ \text{s}=10^{-15}\text{s}$ ). On parle de laser femto quand la lumière est émise sous la forme d'un train d'impulsions dont la durée varie de une à quelques centaines de fs. Il s'agit des plus courtes impulsions de lumière visible. La gamme attoseconde ( $10^{-18}\text{s}$ ) a été atteinte depuis les années 2000 mais nécessite de la lumière ultra-violette.

## Pourquoi les impulsions ultracourtes intéressent-elles les physiciens ?

En concentrant la lumière laser pendant une durée aussi courte, on peut atteindre des puissances lumineuses exceptionnelles, largement supérieures au Gigawatt (c'est la puissance typiquement produite par les centrales nucléaires !). En illuminant ainsi des atomes, on peut alors modifier le comportement des électrons pour les arracher, les accélérer et contrôler leurs trajectoires. En effet, la force électrique, d'origine lumineuse, qui s'exerce sur les électrons devient plus grande que celle qui relie les électrons au noyau de l'atome ! Une impulsion ultra-brève

✱ Pour étudier le guidage de la foudre, des chercheurs expérimentent en laboratoire avec des décharges électriques. (a) Un faisceau laser très intense crée un filament plasma (ionisation de l'air) qui permet de guider la décharge électrique. (b) En l'absence d'impulsion laser, la décharge électrique suit une trajectoire aléatoire.  
© Térabile



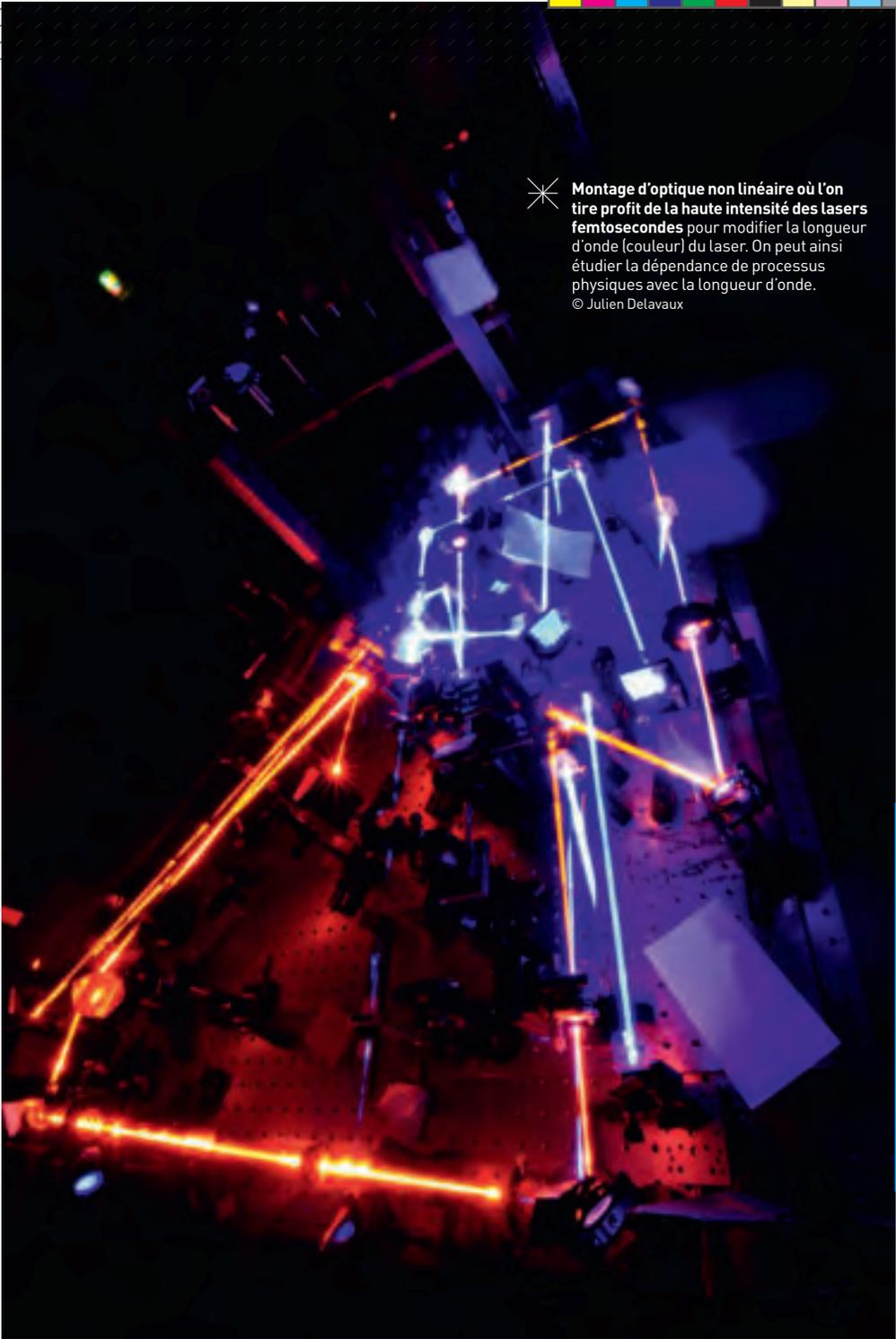
peut être aussi utilisée pour sonder des événements très courts, de façon stroboscopique, tels que le mouvement des électrons ou des atomes dans les molécules.

On peut ainsi obtenir des informations sur la structure géométrique et électronique des objets étudiés et la confronter aux prédictions théoriques. Dans notre laboratoire, nous étudions l'émission d'électrons par des nano-pointes métalliques (pointes qui se terminent par un atome unique) lorsque celles-ci sont illuminées par des impulsions laser femtosecondes. L'objectif est de comprendre les mécanismes d'émission de cet objet très particulier et d'utiliser les électrons émis pour d'autres expériences telles que la microscopie électronique.

### Et en dehors du laboratoire ?

Dès les années 80, les lasers femto ont trouvé des applications en dehors du laboratoire de recherche. Une des premières applications a été la chirurgie oculaire : les impulsions laser servent alors de bistouri très précis permettant une découpe très propre de la cornée, corrigeant ainsi les défauts de vision du patient. C'est la très grande puissance du laser pendant un temps très bref qui permet de casser des liaisons entre atomes pour obtenir une découpe sans bavure.

Le laser femto est aussi utilisé en tant que paratonnerre. En focalisant un laser puissant dans l'air, on crée un plasma le long d'un filament : les atomes ainsi ionisés peuvent alors servir de canal pour guider la décharge électrique d'un éclair. Cela est utilisé notamment pour étudier et contrôler le déclenchement de la foudre. ◻



✦ Montage d'optique non linéaire où l'on tire profit de la haute intensité des lasers femtosecondes pour modifier la longueur d'onde (couleur) du laser. On peut ainsi étudier la dépendance de processus physiques avec la longueur d'onde.  
© Julien Delavaux

MYRTIL KAHN  
Laboratoire de chimie de coordination  
Unité propre de recherche 8241 du CNRS  
FABIEN DELPECH  
Laboratoire de physique et chimie  
des nano-objets  
Unité mixte de recherche 5215 CNRS/INSA/  
Université Toulouse III

# LUMIÈRE SUR LES NANOCRISTAUX

L'utilisation des nanoparticules de semi-conducteurs, en particulier sous forme de nanocristaux (aussi nommés communément quantum dots QD), est en plein essor depuis quelques années.



attirait pour les QD vient d'une propriété particulière : la couleur de la lumière qu'ils émettent (luminescence\*) varie avec leur taille. Cette propriété unique ne devient possible qu'à des dimensions généralement inférieures à 10 nm. Quand les QD absorbent de l'énergie, ils passent de leur état de repos vers un état excité. Aux dimensions nanométriques et de manière remarquable, la différence d'énergie entre ces deux états, qui détermine la couleur de la lumière émise, varie avec la taille du QD. Le retour à l'état de repos se fait en réémettant l'énergie absorbée sous forme de lumière, dont la couleur est modulable par la taille du QD, et qui est ensuite utilisée dans les diverses applications.

## Plusieurs approches

Il existe plusieurs approches pour la fabrication de ces QD : les approches chimiques, appelées voies humides car les réactions ont lieu en solution, et les approches physiques dites sèches. Les approches en solu-

✱ La couleur de la lumière émise varie en fonction de la taille des nanoparticules.

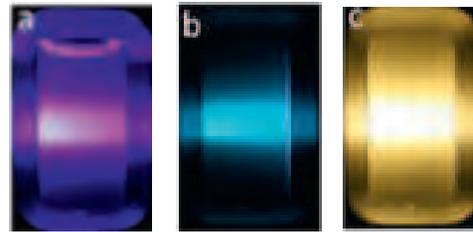
tion présentent l'avantage de donner plus facilement de grandes quantités de QD, elles permettent aussi d'accéder à des objets de formes très variées qui vont avoir des propriétés différentes.

### Des téléviseurs à base de QD

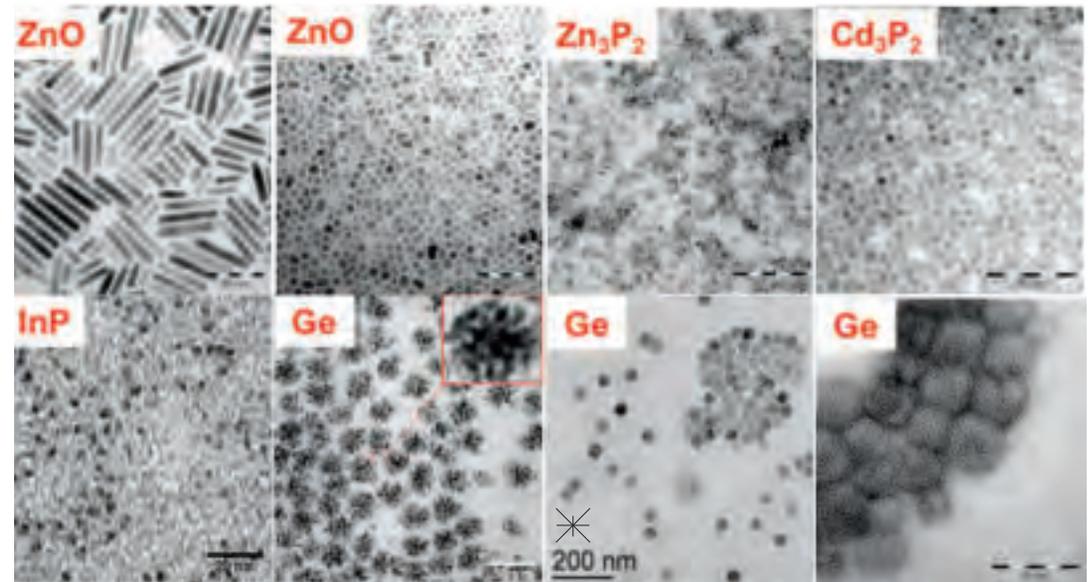
Les progrès réalisés en termes de pureté de couleur, de durée de vie et de luminosité des QD en font aujourd'hui des briques de choix pour la dernière génération d'écrans plats (*Sony* a commercialisé en 2013 le premier téléviseur à base de QD) ou pour la conception des prochaines générations de panneaux photovoltaïques. Cependant, les QD actuellement utilisés sont à base d'éléments toxiques comme le cadmium, le tellure ou le plomb. Il est donc nécessaire de développer des matériaux aux propriétés similaires mais neutres pour l'environnement et la santé. De nombreuses recherches sont actuellement menées sur l'oxyde de zinc (ZnO), qui n'est pas toxique. Des cristaux liquides intégrant des nanocristaux de ZnO ont été obtenus, ils sont particulièrement intéressants pour développer des dispositifs d'affichage.

Un autre matériau de choix est le phosphore d'indium. Ses propriétés optiques en font un bon candidat pour des applications biologiques, et pourrait ouvrir de nouvelles perspectives quant à notre compréhension du vivant ou à la lutte contre le cancer. ◻

\*Luminescence : propriété qu'ont certaines substances de restituer sous forme de lumière l'énergie absorbée au cours d'une excitation lumineuse, électrique, chimique, ou autre.



Avec ces nanoparticules de ZnO de 4 nm de diamètre, on peut faire varier la couleur de la lumière émise en modifiant un peu la longueur d'onde de la lumière d'excitation : 280 nm pour « a », 380 nm pour « b » et 340 nm pour « c ».



Photographies de QD de tailles, de morphologies et de compositions variées (ZnO : Oxyde de zinc ;  $Zn_3P_2$  : Phosphure de zinc ;  $Cd_3P_2$  : Phosphure de cadmium ; InP : Phosphure d'indium ; Ge : Germanium) synthétisées par des approches chimiques dans nos laboratoires.



La couleur de la lumière émise par des nanocristaux varie avec leur taille



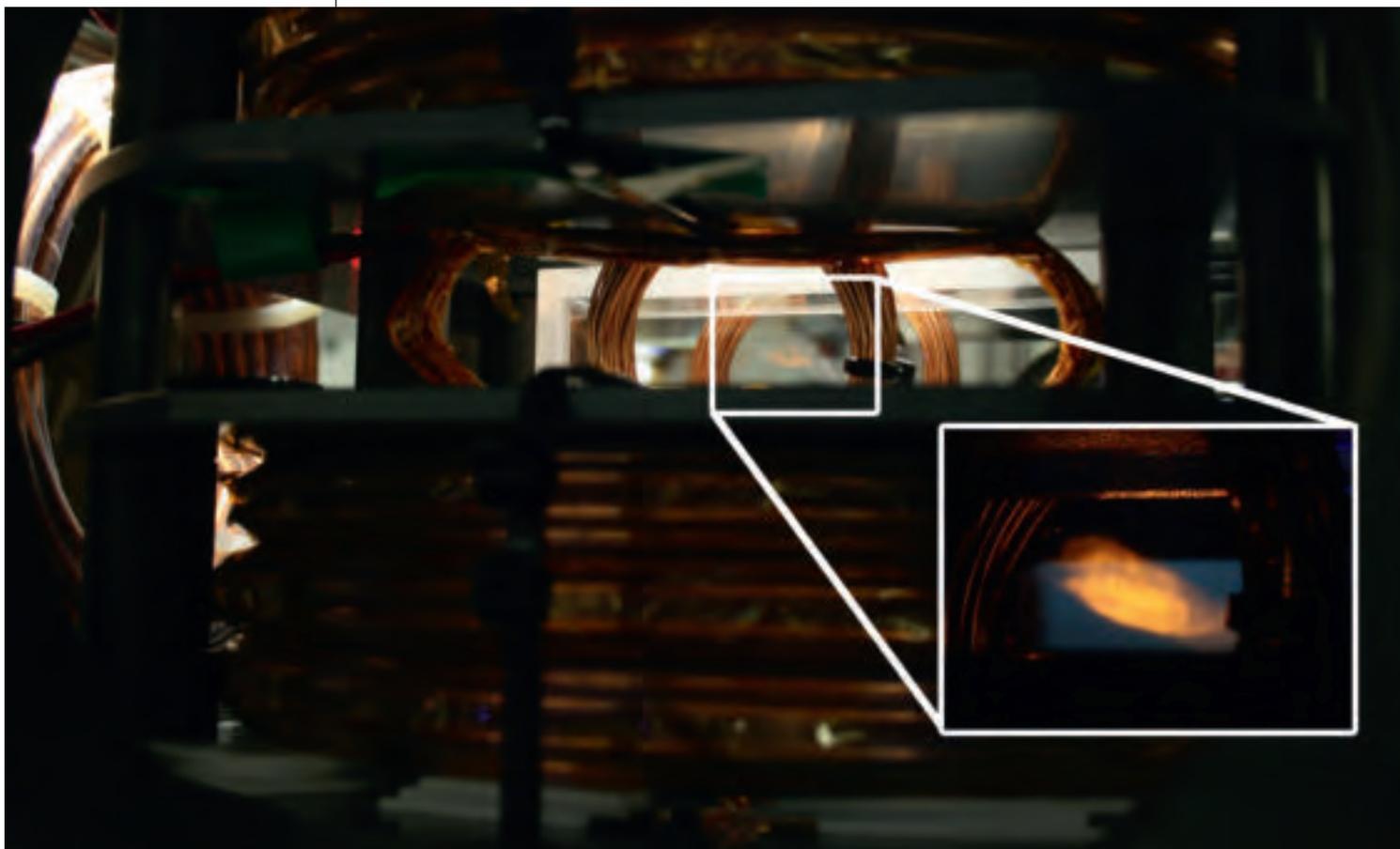
# L'OPTIQUE ATOMIQUE : UN OUTIL POUR L'INNOVATION ET LA RECHERCHE FONDAMENTALE

ALEXANDRE GAUGUET & JULIETTE BILLY  
Laboratoire collisions, agrégats, réactivité  
Unité mixte de recherche 5589 CNRS/  
Université Toulouse III

L'optique atomique est un domaine de recherche qui exploite l'interaction entre les atomes et la lumière issue de lasers afin de reproduire avec les atomes les expériences habituellement réalisées avec de la lumière.



**Photographie d'un nuage composé d'un milliard d'atomes**  
de rubidium refroidis et piégés par laser. Les atomes sont éclairés par des faisceaux laser, ce qui permet leur observation à l'œil nu.



**D**

ans les expériences d'optique atomique, le rôle de la matière et de la lumière est échangé : au lieu d'utiliser des objets matériels (composés d'atomes) pour manipuler la lumière, on utilise de la lumière pour manipuler les atomes. La précision extrême obtenue avec la lumière laser permet de manipuler les atomes jusque dans leur intimité quantique !

La lumière laser présente de nombreux avantages. Sa couleur est bien définie (on dit qu'elle est monochromatique). C'est une lumière directionnelle, que l'on peut faire propager sur de très grandes distances, par exemple pour mesurer la distance Terre-Lune. La lumière laser peut exercer une force sur les atomes, que l'on peut voir comme engendrée par la collision de grains de lumière (photons) avec les atomes. Cette force permet ainsi de ralentir les atomes et donc de les refroidir. C'est ce qu'on appelle le refroidissement laser, technique pour laquelle a été décerné le prix Nobel de physique en 1997. La lumière laser permet également de piéger des atomes en créant des paysages dans lesquels ils peuvent se déplacer. C'est donc l'outil idéal pour manipuler les atomes.

### Explorer la physique quantique

La manipulation d'atomes par laser permet d'élaborer de nouvelles applications. Par exemple la précision des horloges atomiques, qui sont nécessaires à la synchronisation des réseaux informatiques et au positionnement par satellite, a été améliorée par un facteur 100 à l'aide des atomes froids. D'autres appli-



**Les atomes froids permettent de réaliser des interféromètres atomiques très précis.**

Une application possible est la mesure exacte de l'accélération due à la pesanteur,  $g$ . L'instrument sur cette image est un gravimètre à atomes froids extrêmement précis.

© S. Merlet, LNE-SYRTE-Observatoire de Paris.

cations exploitent la nature ondulatoire de la matière, un des phénomènes les plus étranges de la physique quantique, pour réaliser des gravimètres atomiques qui ont des applications en géophysique (volcanologie, recherche de ressources naturelles, etc.).

Dans nos laboratoires, des études sont menées pour miniaturiser les dispositifs, ouvrant la perspective à des capteurs atomiques embarqués. En parallèle de ces innovations, les développements autour des atomes froids et de leur manipulation par des lasers permettent d'explorer les territoires mystérieux de la physique quantique avec une grande précision. Les recherches que nous menons permettent d'étudier de manière très contrô-

lée des phénomènes relevant de la physique du solide, afin de mieux comprendre le comportement de la matière, et de tester de grands principes tels que la neutralité de la matière.

### Vers des lasers à atomes

Toutes les expériences précédentes sont liées à l'utilisation de sources lasers très bien contrôlées pour manipuler les atomes. Une nouvelle génération d'expériences se présente, grâce au développement de lasers à atomes, qui sont l'équivalent pour les atomes du laser pour la lumière. Est-ce que ces nouvelles sources pourront conduire à une révolution similaire à celle liés au laser en optique ? Cette question est au cœur de notre activité de recherche. ◻

ERIK DUJARDIN, CHRISTIAN GIRARD,  
AURÉLIEN CUCHE  
Centre d'élaboration de matériaux  
et d'études structurales  
Unité propre de recherche 8011 du CNRS

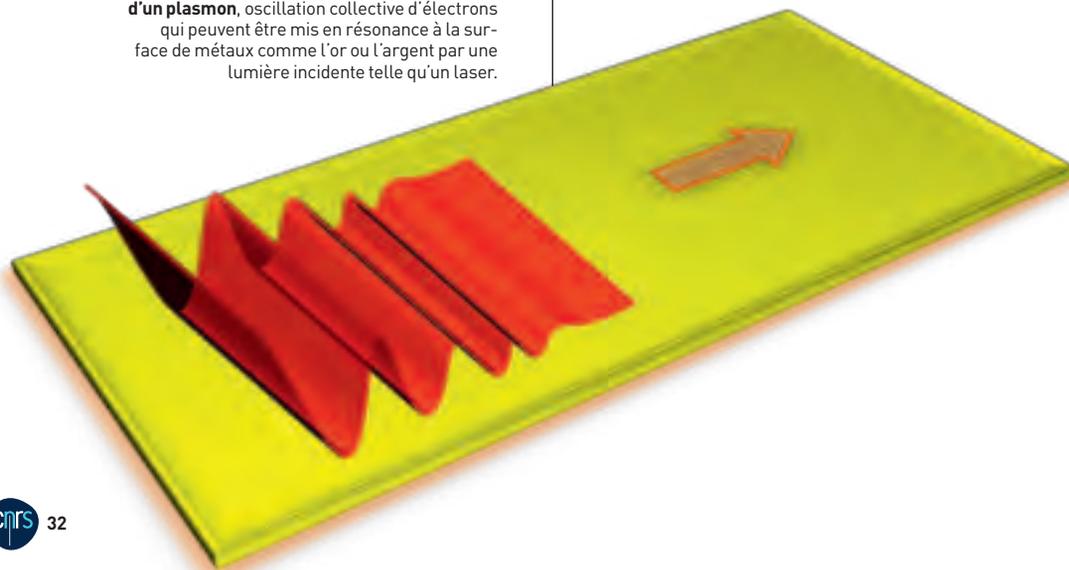
# GUIDER LA LUMIÈRE JUSQU'AU NANOMÈTRE

En cédant leur énergie aux électrons de métaux comme l'or, les photons les forcent à vibrer collectivement. Ces oscillations sont un moyen unique d'exploiter la lumière à l'échelle nanométrique.

**L**es électrons de certains métaux comme l'or ou l'argent ont la particularité d'osciller collectivement pour peu qu'une énergie adéquate leur soit fournie. Ces oscillations, appelées plasmons, peuvent être déclenchées par des photons qui leur cèdent leur énergie lumineuse en tombant sur la surface du métal (*ci-dessous*). D'aucuns

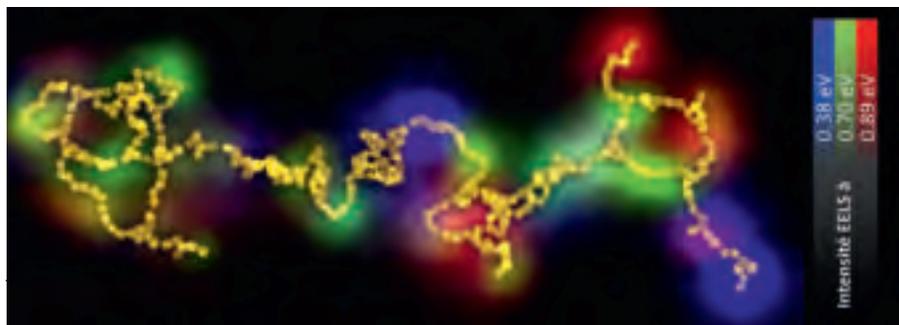
ont vu la parade au grand défaut des photons : ceux-ci ne peuvent être enfermés dans un volume beaucoup plus petit que leur longueur d'onde, soit de l'ordre de 1 micromètre pour la lumière visible. Par contre, en confiant leur énergie à des électrons, il devient possible de compacter l'information par un facteur 100. Dès lors une science, puis une technologie nouvelle, la plasmonique, ont cherché à confiner et guider l'énergie lumineuse à la surface de films métalliques. Cette combinaison de propriétés optiques et électroniques à la surface de métaux pourrait être la clé d'une électronique plus rapide et moins énergivore. De plus, comme ces plasmons existent essentiellement à l'extrême surface du métal, il a vite été envisagé d'en faire des capteurs, qui sont d'ores et déjà leur application la plus répandue.

✱  
**Représentation schématique de la propagation d'un plasmon**, oscillation collective d'électrons qui peuvent être mis en résonance à la surface de métaux comme l'or ou l'argent par une lumière incidente telle qu'un laser.



## Les fibres optiques du futur

Toutefois, quelques défis restent à vaincre. Premièrement, les plasmons sont facilement amortis par une rugosité, même faible, du métal qui les porte. Deuxièmement, jusque récemment, aucune solution n'avait été

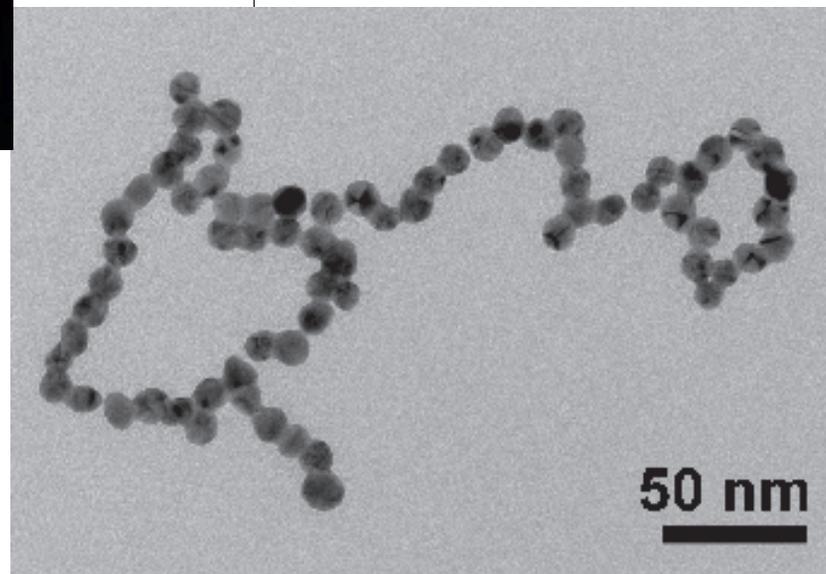


✧ **Image MET de chaînes de nanoparticules d'or superposée au signal EELS** indiquant où se trouvent les zones de plus fortes oscillation plasmoniques pour trois énergies 0.38 eV (bleu), 0.70 eV (vert) et 0.89 eV (rouge).  
© M. Bosman IMRE/Astar, E. Dujardin (CEMES, CNRS)

trouvée pour simultanément confiner les plasmons à moins de 50 nm et préserver une propagation à grande distance. Dans les deux cas, une solution est venue de la chimie qui maîtrise aussi bien la forme que l'agencement de nanoparticules. Les chimistes ont ainsi produit des particules métalliques cristallines sous forme de bâtonnets, fils ou plaquettes à faces atomiquement lisses ce qui évite d'amortir les oscillations des plasmons. La forme des nanoparticules fixe la manière dont les plasmons oscillent, comme celle du vase détermine la forme des vaguelettes provoquées, à la surface de l'eau qu'il contient, par une goutte qui tombe. Si on maîtrise la forme des particules, on maîtrise la répartition des oscillations à la surface du métal. Ceci ouvre des perspectives pour un nouveau traitement de l'information optique.

Des nanoparticules de 10 nm de diamètre ont été alignées sous forme de chaînettes puis sont fusionnées sous un faisceau d'électrons intense, comme par nanosoudure, en réseaux de nanofils métalliques. Dans ces fils, les plasmons oscillent sur de grandes distances (jusqu'à 4 000 nm) tout en étant contenus dans un espace latéral de 10 nm, très petit devant la longueur d'onde de la lumière visible. À l'heure actuelle, ces objets sont si petits que seul un faisceau électronique ultrafin peut en sonder les propriétés. Quelques efforts sont encore nécessaires pour en faire la future technologie des fibres optiques nanométriques à plasmon ! ◻

✧ **Image par Microscopie électronique à transmission (MET) de chaînes de nanoparticules d'or auto-assemblées.** Diamètre des particules : 12 nm. © E. Dujardin (CEMES, CNRS)



“ Des perspectives pour un nouveau traitement de l'information optique

## ✧ Prisme de Newton

Ph. Pellin, Jules Duboscq  
Université Toulouse III Paul Sabatier

Le prisme de Newton permet d'observer le spectre de décomposition d'une lumière blanche et ainsi d'étudier la déviation et la décomposition d'une source lumineuse.

C'est au XVII<sup>e</sup> siècle qu'Isaac Newton démontra que la lumière blanche n'est rien d'autre qu'un mélange de lumières colorées. L'expérience consistait, dans l'obscurité, à faire arriver un faisceau de lumière blanche sur un écran : une tâche lumineuse blanche apparaissait. En interposant un prisme sur le trajet du faisceau, la tache lumineuse était déviée et elle s'étalait en présentant une infinité de teintes. En faisant passer une partie de la lumière dispersée par ce premier prisme dans un second prisme, il montra notamment qu'en recombinant ces faisceaux colorés, on reproduit un faisceau de lumière blanche et ainsi que la couleur n'était pas altérée par le passage dans le second prisme.



## ✧ Héliostat

Foucault J. Duboscq  
Université Toulouse III Paul Sabatier

L'héliostat est destiné à renvoyer la lumière du soleil dans une direction fixe. On obtient ainsi une source lumineuse solaire stable, afin de reproduire la plupart des expériences classiques : éclairage d'un microscope, études de polarisation, de spectroscopie, etc. Ce « petit » héliostat fut conçu par Foucault et construit par Duboscq au début de 1862. Un mouvement d'horlogerie dans une boîte cylindrique entraîne l'axe polaire en rotation à la même vitesse que celle du soleil. Dans sa conception simple et robuste, un pilier solide muni d'une fourche supporte le poids d'un

« grand » miroir. L'entraînement équatorial est assuré via son axe polaire et son axe de déclinaison, le miroir lui-même étant entraîné par une alidade.

L'instrument était utilisé notamment en laboratoire de physique pour projeter, au moyen d'un miroir, les rayons du Soleil sur un point fixe, malgré le mouvement apparent de cet astre. Alors que l'héliostat de Silbermann pouvait être installé à n'importe quelle latitude, celui de Foucault, de par la fixité de l'axe polaire, ne pouvait fonctionner qu'à une latitude donnée. Celui-ci a été réalisé pour fonctionner à la latitude de Toulouse (Toulouse 43°35').





## ✧ Radiomètre de Crookes

**LEYBOLD**  
Université Toulouse III Paul Sabatier

Le radiomètre de Crookes met en évidence la pression cinétique des gaz. Il est constitué d'une ampoule de verre sous vide partiel et d'un moulinet pouvant tourner sur un axe. Ce moulinet est constitué de quatre ailettes en mica dont chacune possède une face argentée réfléchissante et l'autre noircie absorbante.

Exposé à la lumière solaire ou celle d'une lampe à incandescence, le moulinet se met en rotation de telle façon que les faces noires « poussent ». Les faces noircies des ailettes s'échauffent davantage que les faces argentées sous l'effet des rayons infrarouges de la lumière utilisée. Les molécules du gaz résiduel du côté des faces noires s'échauffent davantage et acquièrent une vitesse plus grande que du côté des faces argentées.

## ✧ Lampe étalon secondaire à filament métallique WS21

**Laboratoire central d'électricité  
Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie  
(LAPLACE) CNRS, INP-ENSEEIH, Université  
Toulouse III Paul-Sabatier**

Les étalons secondaires d'intensité lumineuse servent pour l'étalonnage régulier des appareils de mesure comme le luminancemètre et le spectroradiomètre. Ils sont constitués de lampes dont l'intensité lumineuse, exprimée en candelas (cd), a été comparée avec précision à un étalon primaire d'intensité. Le candela est une unité fondamentale du système international (SI) qui caractérise l'intensité lumineuse (la quantité de lumière émise dans un cône unitaire d'ouverture d'un stéradian).



## ✧ Héliographe type Campbell

**Casella**  
École Nationale de la Météorologie INP

L'héliographe est un instrument météorologique qui mesure la durée d'ensoleillement. Celui-ci, datant du début du XX<sup>e</sup> siècle, est constitué d'un support inclinable, portant une sphère de verre focalisant l'image du soleil sur une coupelle hémisphérique où trois séries de rainures permettent de fixer les cartons diagrammes. Une sphère massive de verre focalise les rayons solaires sur une bande de carton coloré, cette focalisation entraîne la brûlure ou la décoloration du carton au point où se forme l'image du soleil. Un traitement spécial du carton diagrammes permet la brûlure uniquement au point d'impact du soleil.

**Direction :**

José Biosca

**Coordination :**

Pascal Lemoine

**Coordination éditoriale :**

Isabelle Dixon et Alexandre Papin (CNRS)

**Création graphique :**

Sandrine Lucas

**Secrétariat de rédaction :**

Jean-Paul Bobin

**Comité de Rédaction CNRS :**

Isabelle Dixon, Alexandre Papin

**Diffusion :**

La Dépêche du Midi

**Impression :**

Techniprint Montauban

**Photo de couverture :**

© CNRS Photothèque / Jean Mouette.

Couronne solaire pendant l'éclipse totale de Soleil du 11 juillet 2010, observée depuis l'atoll de Hao, dans l'archipel des Tuamotu, en Polynésie française.

Bien que la société Le Cèdre ait fait tout son possible pour citer correctement et contacter la source et/ou le(s) détenteur(s) du copyright de chaque image, nous nous excusons par avance de toute erreur ou omission involontaire, qui serait immédiatement corrigée dans les prochaines éditions.



Journal de la Démocratie

Groupe La Dépêche du Midi

Société Anonyme au capital de 3 577 010 euros

Siège : Avenue Jean-Baylet, 31095 Toulouse CEDEX

Tél. 05 62 11 33 00 - Fax 05 61 44 74 74

e-mail : contact@ladepeche.com

Président Directeur Général  
et responsable de la Rédaction

**Jean-Michel BAYLET**

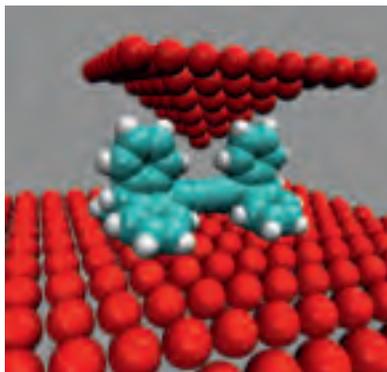
Directeur de la publication

**Jean-Nicolas BAYLET**

Commission paritaire n° 0310 C 87785 - ISSN 0181-7981



© CNRS Photothèque / Jacques CADAUGADE (LCAR)



© CNRS Photothèque / Xavier BOUJU (CEMES)



Le laboratoire d'excellence toulousain NEXT (Nano, Mesures Extrêmes & Théorie) regroupe quelques 450 physiciens et chimistes, aux compétences complémentaires. La communauté NEXT travaille aux frontières de la connaissance dans les domaines de la nano-physique/chimie, la matière condensée et «molle», l'optique, et la physique atomique/des agrégats. L'apport conjoint et cohérent d'équipes expérimentales et théoriques, appartenant à 6 unités de recherche du CNRS, de l'INSA et de l'Université Toulouse III - Paul Sabatier, et leur maîtrise du «monde des nanos», constituent la spécificité et la plus-value scientifique du projet. NEXT finance aussi de nombreuses actions pour accroître l'attractivité des masters et de l'école doctorale associés, la valorisation et le partage des résultats scientifiques issus de ses laboratoires, ainsi que les interactions avec le milieu industriel. <http://www.next-toulouse.fr/>

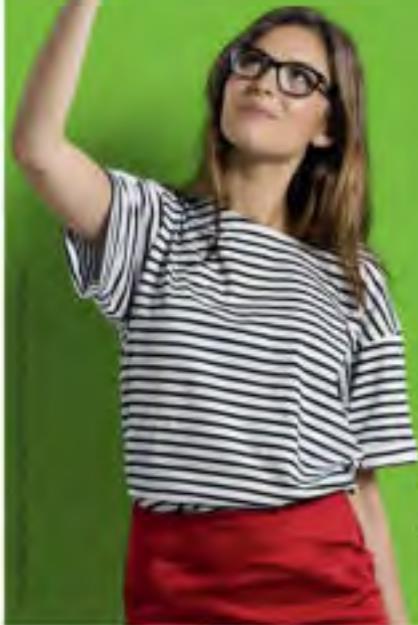
**REMERCIEMENTS**

Le CNRS tient à remercier le labex Next, la CASDEN et la MGEN pour leur engagement dans des actions de diffusion de la culture scientifique.



mgen\*

Bien plus  
qu'une mutuelle  
ma  
préférence  
solidaire



mgen.fr

L'Assurance Santé  
Prévoyance et  
Assurance  
Vie mgen

MGEN, Mutuelle Générale de l'Éducation nationale, n°775 685 339. MGEN Vie, n°441 913 063.  
MGEN Fils, n°440 363 598, mutuelles soustraites aux dispositions du livre II du code de la  
Mutualité - MGEN Action sociale et sociale, n°441 913 913. MGEN Centre de santé,  
n°477 901 714, mutuelles soustraites aux dispositions du livre II du code de la Mutualité.



La CASDEN est la banque coopérative de l'Éducation,  
de la Recherche et de la Culture.

Son réseau de Chargées de Relations Enseignement  
Supérieur et Recherche a pour mission  
d'accompagner les projets des personnels et des  
établissements, de nouer des partenariats et de  
contribuer à la diffusion de la culture scientifique.

La CASDEN est ainsi engagée auprès du CNRS dans  
le cadre d'une convention de partenariat national.

Partager avec vous une relation de confiance, telle est  
la priorité de la CASDEN.



N'hésitez pas à contacter votre Chargée  
de Relations Enseignement Supérieur et  
Recherche:  
Valérie MARIA  
06 77 31 56 81  
valerie.maria@casden.banquepopulaire.fr

www.casden.fr

casden  
BANQUE POPULAIRE

CASDEN, la banque coopérative de l'Éducation, de la recherche et de la culture

La lumière est  
omniprésente dans notre quotidien  
et dans la recherche scientifique de plus haut  
niveau. Dans ce cinquième Petit illustré  
CNRS / La Dépêche du Midi, vous découvrirez que  
la lumière est une composante-clé de nombreuses  
recherches en physique, en chimie, en santé ou encore  
en astrophysique. Après la chimie, l'énergie, l'Ariège  
et la cristallographie, c'est la lumière qui est mise à  
l'honneur cette année. En effet, dans le cadre de l'Année  
internationale de la lumière et des techniques utilisant la  
lumière, décrétée par l'UNESCO pour l'année 2015,  
découvrez un panorama des recherches  
réalisées dans les laboratoires de Midi-  
Pyrénées dans ce domaine.

LA DÉPÊCHE



28554 - 25 - 4,90

