

quement neutres caractérisées par un rayon et une masse particuliers.

Nous pouvons maintenant concevoir qu'en piégeant un photon et un exciton dans une même région, on crée entre eux une interaction permanente représentée par une quasi-particule, le polariton (*voir l'encadré page ci-contre*). Pour l'obtenir, il faut trouver le moyen de placer un ou plusieurs « puits quantiques », jouant le rôle de pièges à excitons, au sein d'une « cavité optique » faisant office de piège à photons.

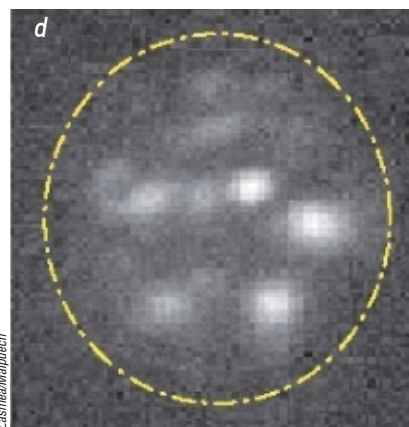
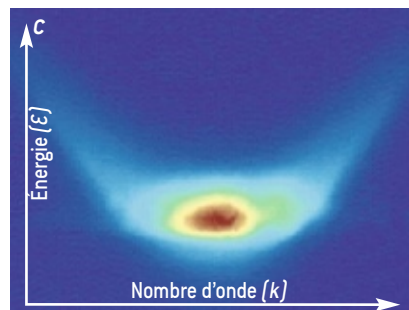
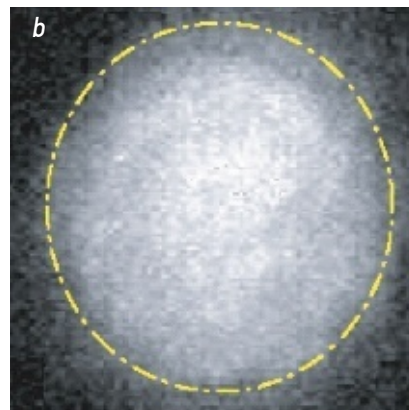
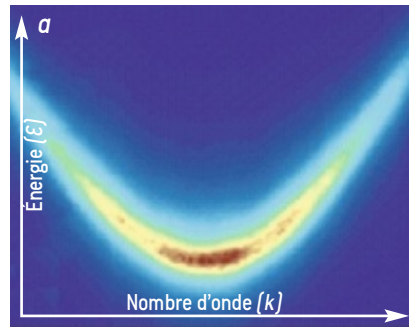
Cette cavité optique consiste en deux miroirs de Bragg se faisant face. Un miroir de Bragg est une succession de couches planes et transparentes d'indices de réfraction différents. Une telle structure réfléchit presque toute la lumière incidente, pour une longueur d'onde appropriée. Les déphasages entre les ondes réfléchies à chaque interface dépendent en effet de la longueur d'onde lumineuse et de la distance entre plans, et ces déphasages doivent donner lieu à une interférence constructive. Un miroir de Bragg est donc construit pour fonctionner pour une longueur d'onde précise : l'épaisseur de ses couches successives doit être égale à un quart de la longueur d'onde de fonctionnement.

Entre les deux miroirs de Bragg qui se font face, on intercale une couche d'épaisseur égale à un multiple de la demi-longueur d'onde. Un photon introduit dans cette couche y crée un mode photonique confiné : en d'autres termes, une répartition stationnaire du champ lumineux dans le plan du piège optique.

Au sein de ce piège à photons, pour piéger des excitons, on place un ou plusieurs puits quantiques aux maxima du champ électrique du mode photonique confiné. Concrètement, les puits quantiques prennent la forme de couches de matériau semi-conducteur épaisses de quelques nanomètres seulement.

En pratique, ces pièges sont obtenus par croissance cristalline en de nombreuses étapes, grâce aux progrès techniques accomplis dans les années 1980. Le piégeage des excitons et des photons se fait le long de l'axe de la croissance du cristal, noté z . Les excitons et les photons restent donc libres de se déplacer dans le plan perpendiculaire à z , qui est aussi celui du piège.

Comment caractériser le comportement de ces particules ou quasi-particules dans le piège ? Cette information est donnée par la « relation de dispersion »



2. L'ÉMISSION LUMINEUSE d'un gaz de polaritons dans l'espace $\{\epsilon, k\}$ et dans l'espace physique avant et après la condensation de Bose-Einstein traduit la relation de dispersion des excitons. Avant la condensation (*a et b*), l'émission est diffuse. Après la condensation (*c et d*), l'émission devient cohérente et tend à se concentrer autour d'une seule valeur de k dans l'espace $\{\epsilon, k\}$ et à devenir ponctuelle (plusieurs condensats sont présents simultanément) dans l'espace physique.

dans le matériau, c'est-à-dire par la relation entre leur énergie et leur vitesse.

Comment créer des excitons dans le puits quantique ? En y pompant de l'énergie lumineuse, c'est-à-dire en l'inondant de lumière. Une partie de cette lumière y est absorbée et crée des excitons. Une telle paire électron-trou peut se recombiner (l'électron et le trou disparaissent simultanément) et restituer sous la forme d'un photon l'énergie ayant servi à le créer. À peine émis, le photon se retrouve dans le piège optique, dans la même région de l'espace que le piège à excitons.

L'interaction d'un exciton et d'un photon piégés ensemble peut se produire de deux façons, l'une qualifiée de faible et l'autre de forte. Dans la première, un photon émis par la recombinaison d'un exciton quitte la cavité avant d'interagir à nouveau avec un exciton ; on parle de régime de couplage faible, puisque le photon ne reste pas assez longtemps dans la cavité pour que de nouvelles interactions aient lieu.

Piégeage dans un plan

Dans le régime de couplage fort, en revanche, l'exciton émet en se recombinant un photon dont la durée de vie est assez longue pour que le photon soit réabsorbé et recrée l'exciton ; ce dernier réémet ensuite le photon, puis le réabsorbe, etc. C'est ainsi que s'établissent des états intermédiaires entre exciton et photon : les polaritons. Dans le piège, ces états quantiques mêlant lumière (le photon) et matière (l'exciton) ne sont confinés que dans la direction z ; ils s'étendent dans tout le plan du piège, perpendiculaire à z .

Il existe en fait plusieurs sortes de polaritons, mettant en jeu des quasi-particules différentes. Ceux que nous considérons ici sont nommés polaritons de microcavité, par référence à la microcavité optique. L'énergie des polaritons de microcavité résultant du couplage fort peut prendre deux valeurs, l'une basse et l'autre élevée, mais toutes deux différentes de celles du photon et de l'exciton d'origine.

L'écart entre ces deux énergies est de l'ordre de cinq à dix milliélectronvolts (un électronvolt vaut $1,6 \times 10^{-19}$ joule) dans les structures à base d'arséniure de gallium (GaAs, l'un des semi-conducteurs les plus utilisés en optoélectronique) ; il peut atteindre 60 milliélectronvolts dans des structures réalisées avec

LES AUTEURS



Guillaume MALPUECH est chercheur du CNRS au LASMEA (Laboratoire des sciences et matériaux pour l'électronique et d'automatique, unité mixte CNRS/Université Blaise Pascal), à Clermont-Ferrand. Dmitry SOLNYSHKOV est maître de conférences à l'Université Blaise Pascal et travaille au LASMEA. Il a été le lauréat du Grand prix Jeune chercheur de la ville de Clermont-Ferrand en 2008.

✓ BIBLIOGRAPHIE

J. Levrat *et al.*, **Condensation phase diagram of cavity polaritons in GaN-based microcavities: Experiment and theory**, *Phys. Rev. B*, vol. 81, 125305, 2010.

A. Kavokin *et al.*, **Microcavities**, Oxford University Press, 2007.

G. Malpuech *et al.*, **Bose glass and superfluid phases of cavity polaritons**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 98, 206402, 2007.

J. Kasprzak *et al.*, **Bose-Einstein condensation of exciton polaritons**, *Nature*, vol. 443, pp. 409-414, 2006.

M. Richard *et al.*, **Experimental evidence for nonequilibrium Bose condensation of exciton polaritons**, *Phys. Rev. B*, vol. 72, pp. 201301, 2005.

A. Kavokin et G. Malpuech, **Cavity polaritons**, Elsevier, 2003.

C. Weisbuch *et al.*, **Observation of a coupled exciton-photon mode splitting in a semiconductor quantum microcavity**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 69, p. 3314, 1992.

du nitrure de gallium (autre semi-conducteur). Cette différence entre les énergies des deux états de polariton est un paramètre important, car elle détermine la vitesse d'échange de l'énergie entre le mode photonique et le mode excitonique. Par exemple, un écart de 10 millielectronvolts signifie qu'un exciton émet un photon, puis le réabsorbe en 0,2 picoseconde (une picoseconde est égale à 10^{-12} seconde). Même s'ils sont assez stables pour être exploités, les polaritons finissent par disparaître: leur durée de vie, de l'ordre de la picoseconde, est liée pour l'essentiel à celle, brève, de la composante photonique.

À ce stade, il importe d'insister sur ce qui étonne les physiciens avec les polaritons. Pour commencer, les polaritons sont des systèmes physiques peu ordinaires, puisqu'il s'agit de quasi-particules composées d'une quasi-particule matérielle (l'exciton) et d'une particule de lumière (le photon). Mais, surtout, ils ont une masse effective environ 100 000 fois inférieure à celle d'un électron dans le vide, donc environ 100 millions de fois plus petite que celles des atomes constituant le réseau cristallin... Une masse effective aussi faible est inédite et ne peut que conférer aux polaritons des comportements singuliers.

Condensation de Bose-Einstein

L'émission laser obtenue avec des polaritons illustre justement cela de façon fascinante. Cette émission ne résulte en effet pas du principe classique d'émission laser (l'inversion de populations d'atomes excités et non excités), mais de la formation d'un « condensat de Bose-Einstein ». Expliquons ce que cela veut dire.

Il existe deux types distincts, par leurs propriétés quantiques, de particules: les bosons et les fermions. Les fermions, de spin demi-entier, ne peuvent pas se trouver dans le même état quantique qu'un autre fermion identique. Les bosons, dont le spin est entier, ne sont pas soumis à cette interdiction: des bosons identiques peuvent se retrouver tous dans l'état de plus basse énergie possible du système considéré (par exemple un puits de potentiel). On nomme « condensation de Bose-Einstein » le processus où les bosons perdent assez de leur énergie pour se retrouver tous dans l'état de plus basse

énergie, dit état fondamental. La condensation de Bose-Einstein n'est possible à une température donnée que si la densité de particules dépasse une valeur critique, au-delà de laquelle les bosons s'accumulent dans l'état fondamental. La possibilité d'une telle condensation fut décrite dès 1924 par Albert Einstein sur la base de la notion de boson introduite par le physicien indien Satyendranath Bose (1894-1974). Mais elle n'a été observée pour la première fois qu'en 1995, dans un gaz ultrafroid d'atomes bosoniques (atomes de spin entier).

Plusieurs phénomènes où des bosons se retrouvent tous dans le même état sont apparentés à la condensation de Bose-Einstein. Citons l'émission d'un rayonnement laser, les photons (des bosons) émis ayant tous à peu près la même énergie et la même direction; il en est de même de la supraconductivité, qui trouve son origine dans la formation de paires bosoniques d'électrons, et de la superfluidité des gaz suffisamment froids d'atomes bosoniques. Sauf dans le cas des photons (dont la masse est nulle), tous ces effets, ainsi que la condensation de Bose-Einstein, ne s'observent qu'au-dessous d'une certaine température, d'autant plus basse que les bosons concernés ont une masse élevée (la température de condensation est inversement proportionnelle à la masse).

Dans le cas des polaritons, la température critique de condensation de Bose-Einstein est très élevée, puisque ces quasi-particules sont des bosons de très faible masse. La condensation des polaritons n'est limitée que par l'instabilité des polaritons – plus la température est élevée, plus les polaritons sont instables – et par la nécessité d'avoir une densité suffisante de polaritons.

Franchir ces obstacles est difficile tant l'obtention du régime de couplage fort est contraignante. Il faut travailler dans une gamme de températures où les excitons sont stables, ce qui, dans le cas des semi-conducteurs en arséniure de gallium couramment utilisés, signifie au-dessous de 50 à 80 kelvins (-223 à -193 °C). Dans les semi-conducteurs tels que le nitrure de gallium ou l'oxyde de zinc, où les excitons sont bien plus stables, on peut *a priori* observer à température ambiante la condensation de Bose des polaritons, voire construire un composant qui exploite ce phénomène.

On est loin d'avoir tout compris des lasers à polaritons. Normalement, la formation dans un fluide quantique d'un condensat de Bose-Einstein s'accompagne de la superfluidité, c'est-à-dire de la capacité à s'écouler sans frottements. Or ce ne semble pas être le cas avec les condensats de polaritons. Pourquoi ?

Une contrepartie importante de la faible masse effective des polaritons est que leur durée de vie est faible dans leur état fondamental : de l'ordre de la picoseconde (10^{-12} seconde). Ce temps de vie bref a longtemps suggéré aux chercheurs que la condensation de Bose des polaritons ne pourrait pas être observée, car il s'agit en principe d'une transition de phase thermodynamique, décrite pour des particules ayant un temps de vie infini. Toutefois, avec les lasers à polaritons, on se trouve dans le cas particulier de systèmes où des particules sont continuellement injectées dans le piège par un pompage extérieur, tandis que d'autres le quittent à cause de leur durée de vie finie. Il s'agit donc d'un système en quasi-équilibre, et non pas à l'équilibre. Or d'un point de vue théorique, seule la condensation de Bose dans un système à l'équilibre a été étudiée en détail et... assez bien comprise. Une théorie efficace de la condensation de Bose dans un système ouvert manque encore.

Du point de vue expérimental, depuis 1997, de nombreux résultats ont été obtenus. Une étape importante a été franchie en 2005-2006 grâce aux travaux de l'équipe de Le Si Dang, à Grenoble, en collaboration avec l'École polytechnique fédérale de Lausanne et notre laboratoire (le LASMEA). En particulier, le changement radical de l'émission lumineuse obtenue, une fois franchi le seuil de condensation, a été observé (voir la figure 2).

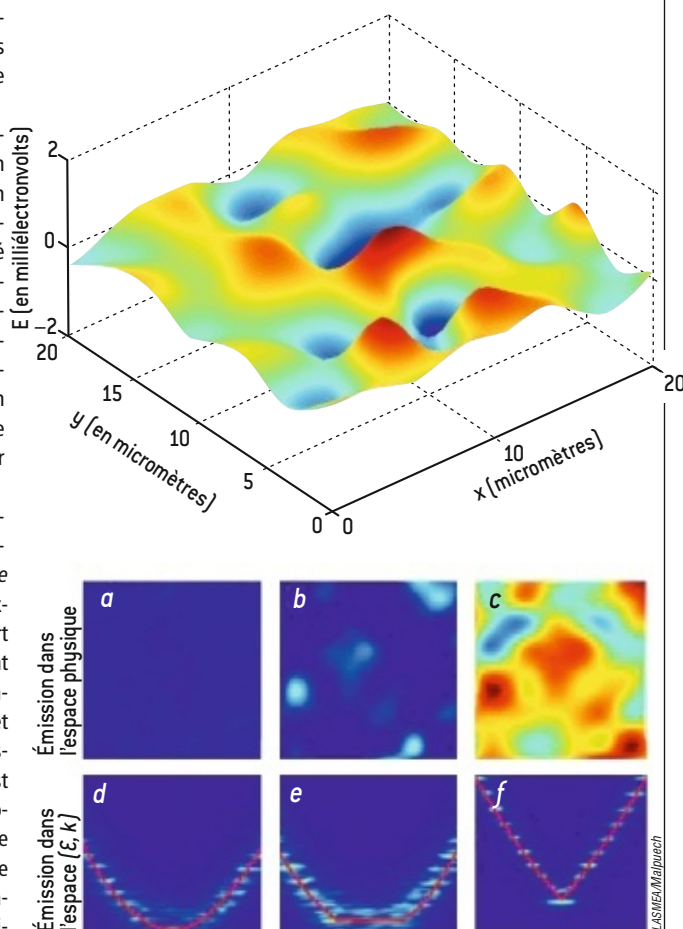
La condensation de Bose des polaritons a ensuite été observée par plusieurs autres équipes dans des microcavités à base de divers semi-conducteurs. Pour autant, un condensat de Bose-Einstein est en

principe superfluide, mais la superfluidité du condensat de polaritons n'a pas été clairement observée, ce qui intrigue les physiciens.

On montre que pour faire disparaître les frottements dans un condensat, il faut que la relation de dispersion cesse d'être parabolique pour devenir linéaire. Suggéré par Lev Landau en 1941 pour expliquer les propriétés de l'hélium superfluide, ce changement de la relation de dispersion traduit la minimisation de l'énergie d'interaction des particules du condensat entre elles au point de rendre possible leur propagation sans frottement.

Cette dispersion linéaire n'a cependant pas été observée expérimentalement (voir la figure b où une dispersion plate est visible). Pour expliquer cette déviation par rapport au cas idéal, deux hypothèses sont avancées. Selon l'équipe de Cambridge dirigée par P. Littlewood et celle de Trento dirigée par I. Carusotto, l'absence de superfluidité est liée à la durée de vie finie des polaritons, aspect qui est en effet une entorse à la théorie habituelle de la superfluidité. Mais nous ne sommes pas convaincus par cette explication, tant les modèles de la condensation de Bose dans les systèmes ouverts utilisés aujourd'hui paraissent arbitraires.

Nous proposons plutôt d'expliquer l'absence de superfluidité par l'inévitable désordre régnant au sein de la structure. La simple observation de l'émission laser au-dessous et au-dessus du seuil de condensation (voir la figure 2) révèle que le condensat n'est pas homogène dans l'espace, mais fragmenté. Pour exploiter cette idée, nous avons modélisé l'évolution dans le temps et l'espace du condensat dans un potentiel désordonné (ci-dessus en haut) imitant par son désordre les propriétés de la microcavité. Ces travaux montrent qu'à faible densité, l'émission est homogène dans l'espace et la dispersion parabolique (ci-dessus, a et d). C'est la phase « normale ». Pour les densités intermédiaires, lorsque la condensa-



LE POTENTIEL ALÉATOIRE qui caractérise une microcavité de tellure de cadmium (CdTe) est représenté en haut. Ci-dessus, les émissions lumineuses d'une telle cavité à mesure qu'augmente la densité de polaritons, au début faible (a et d), quand on a un verre d'Anderson (b et e) et quand les condensats se rejoignent et forment une phase superfluide à forte émission lumineuse (c et f, simulation).

tion débute, les polaritons remplissent les minima du potentiel désordonné et forment des lacs séparés les uns des autres. La relation de dispersion devient plate autour de $k = 0$ (ci-dessus, b et e). Une telle phase, cohérente, localisée et non superfluide est nommée verre d'Anderson. Nous pensons que c'est elle qui a été observée expérimentalement. Ensuite, lorsqu'on monte en densité, le niveau des lacs de condensat augmente à cause des interactions répulsives entre les particules. À un certain stade, les lacs se rejoignent pour former une mer, et le condensat devient superfluide (ci-dessus, c et f). On peut ainsi distinguer trois

phases différentes : la phase normale, le verre d'Anderson et la phase superfluide. D'après nos simulations, la phase superfluide se situe dans une gamme de températures et de densités accessible expérimentalement.

Nos conclusions ont été par la suite soutenues par l'observation en 2008, par une équipe de l'Université Stanford, de la dispersion linéaire caractéristique d'un superfluide dans une cavité réalisée à partir du semi-conducteur AsGa, de bien meilleure qualité que TeCd. D'autres travaux publiés en 2009 et 2010 rapportent des observations compatibles avec la formation d'un superfluide.

Le laser à polaritons n'est que le premier d'un ensemble de composants fondés sur les propriétés des polaritons. L'enjeu est la réalisation de circuits à polaritons qui ouvriraient la voie à un traitement de l'information ultra-rapide et entièrement optique.

Ce genre de composant nécessite toutefois la propagation et la manipulation de condensats sur plusieurs dizaines de micromètres.

Jusqu'à présent, le désordre présent dans les échantillons à microcavités et la trop brève durée de vie des polaritons ont limité les réalisations expérimentales, alors que de nombreux schémas de transistors ou d'interféromètres à polaritons ont été proposés.

Ces difficultés semblent en grande partie résolues par des travaux récents du Laboratoire de photonique et de nanostructures (CNRS,

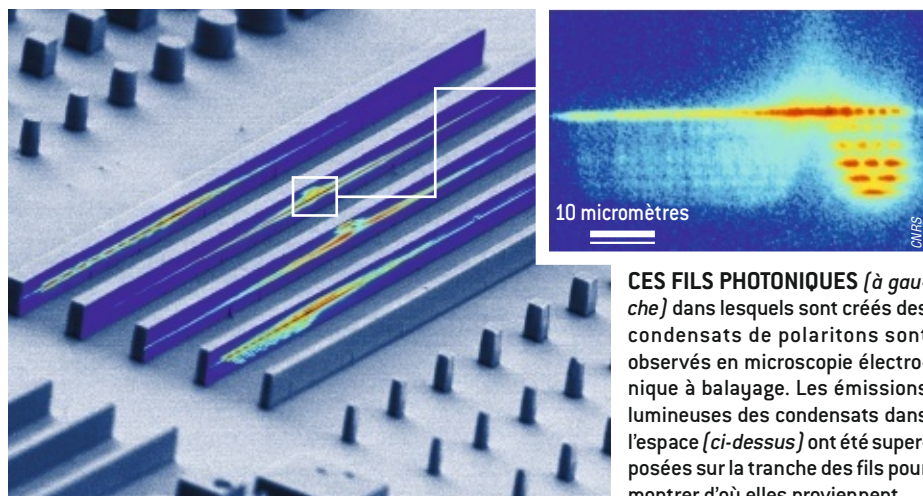
à Marcoussis) qui ont élaboré des microcavités en forme de fil (*ci-dessous*) où la durée de vie des polaritons est dix fois plus longue que dans les structures qui existaient jusqu'à présent. Elle peut de fait atteindre 100 picosecondes.

Ces travaux ont conduit, en collaboration avec notre laboratoire (LASMEA) et l'Institut des nanosciences de Paris (CNRS/UPMC), à la création de condensats de po-

laritons qui s'étendent bien au-delà de la zone où ils ont été créés, tout en gardant leur cohérence spatiale. Ces condensats lumière-matière interagissent avec leur environnement, ce qui a permis aux chercheurs de les manipuler par des moyens optiques.

Pour les obtenir, on emploie un faisceau laser pour créer localement des paires électron-trou. Une fois ces dernières en nombre suffisant, elles se condensent dans un même état quantique. Alors que jusqu'à présent, ce phénomène restait localisé à la zone d'excitation, les chercheurs ont pu observer la présence de cet état quantique macroscopique sur toute la longueur du fil.

Les physiciens ont en outre montré que l'expansion du condensat est gouvernée par le potentiel répulsif qui s'exerce entre le condensat et les particules non condensées dans la zone d'excitation. L'utilisation de ce potentiel fournit d'ailleurs un moyen nouveau de contrôler l'étendue du condensat.



CES FILS PHOTONIQUES (*à gauche*) dans lesquels sont créés des condensats de polaritons sont observés en microscopie électronique à balayage. Les émissions lumineuses des condensats dans l'espace (*ci-dessus*) ont été superposées sur la tranche des fils pour montrer d'où elles proviennent.

En effet, les polaritons de cavité sont en partie constitués de photons qui peuvent être émis vers l'extérieur de la cavité à travers les miroirs de Bragg, qui ont une certaine capacité à transmettre de la lumière. Comme les polaritons condensés sont très nombreux à être dans le même état quantique, c'est aussi le cas pour les photons émis hors de la cavité à travers les miroirs de Bragg. En d'autres termes, la condensation de Bose-Einstein des polaritons s'accompagne d'un rayonnement monochromatique, cohérent et intense, bref d'un rayonnement laser. Pour les physiciens, il est remarquable que ce rayonnement laser ne doive rien au principe de l'inversion de population qu'exploitent les autres lasers...

Le principe des lasers à polaritons a été proposé en 1996 par Atac Imamoglu de l'École polytechnique fédérale de Zurich (ETH). Leur intérêt, potentiellement immense, tient au fait que l'énergie minimale à leur apporter pour les faire fonctionner est extrêmement faible, par comparaison avec tous les autres lasers.

Ces avancées suggèrent qu'il est temps de tenter d'exploiter les lasers à polaritons sous la forme d'une nouvelle génération de composants optoélectroniques très peu gourmands en énergie.

L'ensemble des effets physiques évoqués et leurs applications potentielles pourraient être obtenus à température ambiante si des microcavités étaient réalisées à partir de semi-conducteurs dits « à grande bande interdite » en nitrure de gallium (NGa) ou en oxyde de zinc (ZnO). Toutefois, cela représente encore un défi technique.

Des condensats à température ambiante

La réalisation de microcavités en nitrure de gallium fonctionnant en régime de couplage fort a déjà fait l'objet de trois projets européens en huit ans. C'est ainsi que l'observation du régime de couplage fort à 300 kelvins (la température ambiante) dans une structure en nitrure de gallium a été rapportée dès 2003. La qualité des structures a été par la suite fortement améliorée, de sorte

que le premier rayonnement d'un laser à polaritons fonctionnant à température ambiante a été obtenu en 2007. L'observation de la condensation de Bose-Einstein à cette température est revendiquée par des chercheurs de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, des Universités de Southampton et de Cambridge, ainsi que par ceux de notre laboratoire.

Une étape reste à franchir avant d'obtenir des composants viables commercialement : la mise en circuit de ces structures. Notre laboratoire a déposé un brevet proposant un schéma d'injection efficace et développé en collaboration avec l'Université de Rome un simulateur du laser à polaritons pompé électriquement, simulateur qui inclut le transport des porteurs de charge électrique à partir des contacts, la formation des excitons et des polaritons, et la condensation de ces quasi-particules. Nos résultats suggèrent que des lasers à polaritons, fonctionnant avec beaucoup moins d'énergie que les photodiodes actuelles, arriveront sur le marché dans un futur proche. ■

La sélection SCIENCE

Spécial évolution



La Terre avant les dinosaures

Sébastien Steyer,
illustré par Alain Bénateau

Ce livre répare une injustice ! Il braque l'objectif sur de grands oubliés de la paléontologie : des vertébrés à quatre pattes qui, bien avant le règne des dinosaures, peuplaient notre planète. Retrouvez-les dans cet ouvrage, avec plus de 100 reconstitutions d'animaux pour beaucoup inédites, ainsi que de nombreuses photos de fossiles. Un livre événement pour tous les passionnés des mondes perdus !

978-2-7011-4206-7 • 208 p. • 25,00 €



Guide critique de l'évolution

Sous la direction
de Guillaume Lecointre

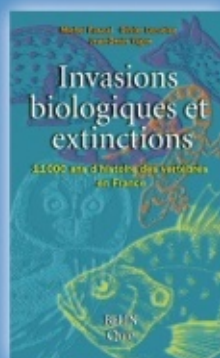
Pourquoi la théorie de l'évolution est-elle si souvent mal comprise du public ? Pourquoi fait-elle l'objet de si nombreuses attaques ? Ces questions sont au cœur de cet ouvrage. Il ne critique pas la théorie contemporaine de l'évolution, mais la façon dont nous en parlons. Il présente le cadre scientifique, épistémologique et historique dans lequel on peut comprendre l'évolution, et donne les clés pour déjouer les pièges que notre langage et nos réflexes premiers nous tendent.

978-2-7011-4797-0 • 576 p. • 35,00 €

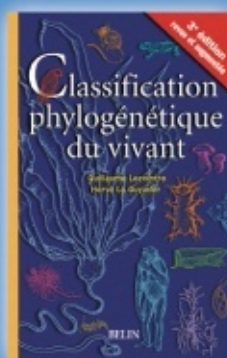


Feuilletez les premières pages de notre sélection de livres en exclusivité et commandez en ligne sur notre site

www.pourlascience.fr



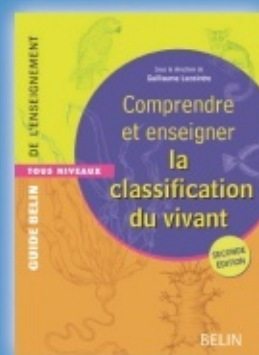
M. Pascal, O. Lorvelec et J.-D. Vigne
978-2-7011-3628-8 • 352 p. • 35,50 €



G. Lecointre et H. Le Guyader
978-2-7011-4273-9 • 560 p. • 41,50 €



A. Meinesz
978-2-7011-4694-2 • 336 p. • 19,50 €



G. Lecointre
978-2-7011-4799-4 • 360 p. • 27,00 €



M. Gargaud, H. Martin, P. López-García,
T. Montmerle, R. Pascal
978-2-7011-4799-4 • 304 p. • 26,50 €



C. Bousquet
978-2-7011-5119-9 • 160 p. • 6,95 €



P. Tassy
978-2-7011-4971-4 • 168 p. • 18,00 €



P. Forterre
978-2-7011-4425-2 • 256 p. • 20,50 €

Prix littéraire
de culture scientifique

HISTOIRE DES SCIENCES

Comment la France adopta l'heure de Greenwich

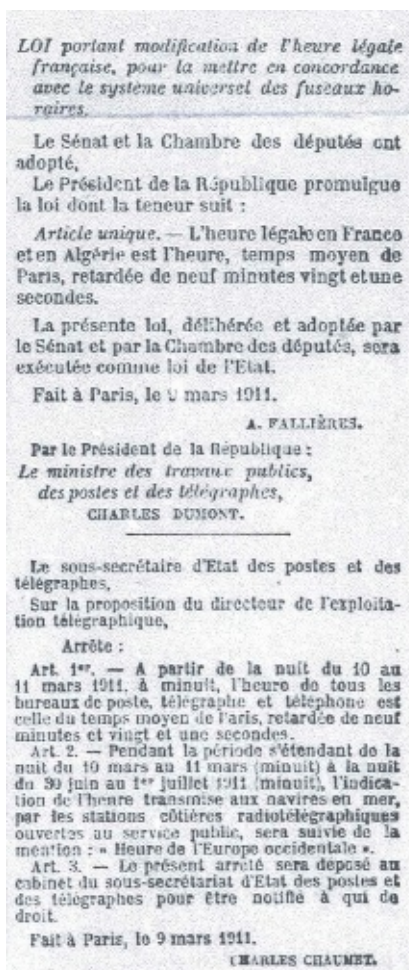
Il y a 100 ans, après presque 30 ans de résistance, la France abandonnait l'heure de Paris pour se mettre à celle de Greenwich... sans pour autant l'indiquer explicitement dans le texte de loi.

Jacques GAPAILLARD

Janvier 1911. Essoufflé, l'homme jette un coup d'œil à l'horloge de la gare de Lyon, à Paris, avant de s'engouffrer dans le bâtiment. Ouf, il n'est que 8h05 « heure de Paris ». Le train Paris-Lyon doit partir à 8h04 « heure du chemin de fer », et il lui reste donc encore quatre minutes pour rejoindre le quai et monter à bord. Tel était le quotidien du voyageur français à l'aube du XX^e siècle. Depuis le milieu du siècle précédent, les horaires des trains avaient cinq minutes de retard sur l'heure de Paris. On voulait à la fois aider le voyageur à prendre son train, et prévenir d'éventuelles réclamations en cas de train manqué. Cette spécificité française était accompagnée d'une autre particularité : l'heure de Paris, qui était l'heure légale française depuis 1891, avançait de 9 minutes et 21 secondes par rapport à l'heure de Greenwich et, de ce fait, ne s'intégrait pas au système des fuseaux horaires largement adopté dans le monde depuis 1892.

La France a finalement adhéré au système horaire mondial par la loi du 9 mars 1911, en même temps qu'elle se débarrassait de l'heure du chemin de fer. Pourquoi avoir si longtemps différé cette mesure ? Et quel événement a débouqué la situation ?

Pour comprendre la position française, remontons quelque temps plus tôt. Pendant longtemps, l'heure solaire vraie, celle des cadrans solaires, a été la seule envisageable, et son emploi allait de soi, sans qu'il fût nécessaire de le spécifier. Avec les progrès de l'horlogerie au XVIII^e siècle, on a peu à peu substitué à l'heure solaire vraie l'heure locale de temps moyen, heure fondée sur la course d'un soleil moyen fictif corrigée des irrégularités de la



1. LE TEXTE DE LA LOI du 9 mars 1911 sur l'heure légale française tel qu'il fut publié dans le *Journal Officiel*. Il indique que la nouvelle heure légale en France et en Algérie est l'heure de Paris retardée de 9 minutes et 21 secondes, sans pour autant spécifier que cette opération revient à adopter l'heure de Greenwich.

marche apparente du Soleil réel. Cette décision a d'abord été prise par la ville de Paris en 1826 (et non 1816 comme on le lit souvent), puis s'est étendue en province, mais le changement résultait uniquement d'initiatives locales.

Une heure de référence internationale

Cependant, le fonctionnement du chemin de fer ne pouvait s'accommoder des heures locales. Une même heure devait régler la marche des trains sur une même ligne et, bientôt, une heure unique, celle de Paris, a régné sur l'ensemble du réseau. C'est ainsi que le chemin de fer a diffusé en province l'heure de Paris, laquelle réglait, aux côtés de l'heure locale (et de l'heure du chemin de fer, décalée, nous l'avons vu, de cinq minutes par rapport à celle de Paris), la vie des villes desservies. À partir de la fin des années 1870, plusieurs villes ont pris l'initiative d'adopter l'heure de Paris, si bien qu'au début des années 1880, le paysage horaire français est un curieux mélange de l'heure de Paris, de l'heure du chemin de fer et des heures locales, mélange où il est difficile de se retrouver.

La France n'est pas le seul pays à avoir des problèmes d'horaires. Avec l'étendue du territoire des États-Unis en longitude et la multiplicité des compagnies ferroviaires, le paysage horaire des chemins de fer américains est particulièrement chaotique. En avril 1883 est présenté un projet de normalisation des heures ferroviaires aux États-Unis et au Canada, inspiré des idées de Sanford Fleming (1827-1915), ingénieur