

L. Szpiro a prouvé cette conjecture dans le cas des corps de fonctions (pour $k = 6$), si bien que la version forte de la conjecture ABC est vraie pour ces corps (ce qui généralise le résultat de R. Mason et W. Stothers). Cela justifie l'espoir que la conjecture soit valable pour les nombres rationnels qui, du point de vue arithmétique, sont assez semblables aux fonctions rationnelles.

J'ai généralisé la conjecture de L. Szpiro en affirmant que la hauteur h_E est bornée par un multiple de $\log \text{Rad}(\Delta_E)$. J'ai ensuite prouvé que cette « conjecture sur la hauteur des courbes elliptiques » entraîne la conjecture ABC . Ces deux dernières sont même équivalentes dans le cadre des fonctions rationnelles.

En exploitant la très riche théorie des courbes elliptiques, développée depuis plus de 200 ans, notamment en utilisant des résultats qui ont conduit G. Faltings à la preuve de la conjecture de Mordell, j'ai ainsi trouvé une borne – malheureusement toujours exponentielle – de C en fonction de $\text{Rad}(ABC)$.

Mais on a fait encore mieux. Par sa relation avec l'arithmétique des courbes elliptiques, la conjecture ABC s'intègre à la géométrie algébrique. Cette branche des mathématiques, qui donne une interprétation géométrique à des problèmes de la théorie des nombres et apporte ainsi des éclaircissements surprenants, a été révolutionnée dans les années 1960 par le mathématicien Alexandre Grothendieck.

D'après moi, la conjecture sur la hauteur des courbes elliptiques n'est pas seulement un énoncé profond sur ces objets en question, mais aussi l'arrière-plan structurel recherché pour la conjecture ABC . Et pour J. Oesterlé, la motivation essentielle de la conjecture ABC était son rapport avec l'arithmétique des courbes elliptiques.

La conjecture sur la hauteur des courbes elliptiques étant vraie pour le corps des fonctions rationnelles, la conjecture ABC l'est aussi pour ce corps. Ma démonstration en est simple et courte, mais on ne peut malheureusement pas la transposer du monde géométrique vers celui des nombres. En revanche, la démonstration initiale de L. Szpiro, bien plus compliquée, fournit une ébauche d'une telle transposition.

Cette preuve tire parti de l'arithmétique des surfaces algébriques, bien étudiées en géométrie algébrique. Il existe un analogue à ces surfaces dans le monde des nombres,



5. ALEXANDRE GROTHENDIECK (ici au Vietnam en 1967) a refondé dans les années 1960 la géométrie algébrique. Né en 1928, ce fils d'un anarchiste russe a découvert très jeune des résultats révolutionnaires, malgré une formation sommaire. En 1970, notamment par conviction antimilitariste, il quitte l'Institut des hautes études scientifiques, près de Paris. Depuis 1991, il vit retiré du monde dans les Pyrénées.

appelé « surfaces arithmétiques ». Ces objets jouent un rôle clef dans la démonstration de la conjecture de Mordell, et les propriétés des surfaces arithmétiques qui permettraient de prouver la conjecture sur la hauteur des courbes elliptiques sont bien identifiées. Nous sommes cependant loin d'avoir trouvé ces propriétés...

Les travaux de S. Mochizuki ont-ils changé la donne ? Expert reconnu dans le domaine des surfaces arithmétiques, S. Mochizuki a prouvé des résultats difficiles sur la relation entre les « groupes fondamentaux au sens de Grothendieck » et les surfaces. Derrière ces termes et ces résultats se cachent encore des idées profondes de A. Grothendieck reliant la théorie de Galois à l'arithmétique. De nombreux spécialistes de la théorie des nombres se sont attelés à la vérification des travaux de S. Mochizuki, qui occupent des centaines de pages et qui utilisent des objets et méthodes mathématiques peu classiques. En attendant leur verdict, la conjecture ABC reste non démontrée.

On est au moins sûr d'une chose. La conjecture ABC n'est pas une bizarrerie gratuite de la théorie des nombres. Elle a de vastes conséquences et découle elle-même d'autres conjectures, dont il y a de bonnes raisons de penser qu'elles sont vraies. La relation entre théorie des nombres et géométrie qui sert de fondation depuis 50 ans à la géométrie algébrique serait mise à rude épreuve si la conjecture ABC était fausse. Il est difficile de l'imaginer. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

S. Mochizuki, *Inter-universal Teichmüller theory I : Construction of Hodge theatres*, 2012. Prépublication : www.kurims.kyoto-u.ac.jp/~ffmotizuki/Inter-universal/Teichmuller/Theory/I.pdf

G. Frey, *Der Beweis des Fermatschen Theorems*, *Moderne Mathematik*, pp. 166-175, Spektrum Akademischer Verlag, 1996.

G. Frey, *Links between solutions of $A - B = C$ and elliptic curves*, *Number Theory - Lecture Notes in Mathematics*, vol. 1380, pp. 31-62, Springer, 1989.

J. Oesterlé, *Nouvelles approches du théorème de Fermat*, *Séminaire Bourbaki*, exposé 694, 1987-88.

F. Beukers, *Introduction to the ABC conjecture*, conférence donnée le 9 septembre 2005 : www.math.leidenuniv.nl/~fdesmit/ic/abc/fritsABCpresentation.pdf

La liste des bons triplets : www.rekenmeemetabc.nl/?item=h_stats.

Projet de calcul collaboratif des bons triplets : www.abcathehome.com

Les LED blanches

L'éclairage

Les lampes à diodes électroluminescentes blanches sont appelées à remplacer les ampoules à incandescence. Elles offrent une bonne qualité de lumière et autorisent d'importantes économies d'énergie.

D'autres lampes à incandescence, ingénieusement combinées, sont exposées dans des salles voisines de celles de M. Edison mais aucune ne donne sa lumière douce et pure, sa clarté fixe, et n'est rattachée à aucun système d'installation véritablement pratique.

Disons-le, dans l'intérêt de la vérité, du progrès, du bien-être général, le système de M. Edison constitue une complète révolution dans l'éclairage domestique; il est appelé à remplacer dans un temps très rapproché tous les systèmes en usage.

Le Journal des débats, 1881

Lors de l'Exposition internationale d'électricité, à Paris, en 1881, Thomas Edison fit la démonstration de ses lampes à incandescence. L'extrait du *Journal des débats* ci-dessus décrit les qualités de ce système novateur qui se généralisa à l'éclairage public et domestique. Edison se lança dans le développement des ampoules électriques dès 1879. Il perfectionna le modèle de l'Anglais Joseph Swan. Les premières lampes étaient constituées d'un filament de carbone, obtenu à partir d'une fibre de bambou du Japon, et placé dans une ampoule sous vide. Après avoir

testé environ 6 000 substances végétales, le choix d'Edison se porta sur le bambou pour sa flexibilité. La durée de vie des premières lampes était de 45 heures. Puis Lewis Latimer, ingénieur de la *Edison Company*, perfectionna la fabrication des lampes pour prolonger leur temps d'utilisation.

En 1898, Carl Auer von Welsbach remplaça le filament de carbone par un filament métallique pour obtenir les lampes à incandescence modernes, dont la durée de vie atteint aujourd'hui entre 1 000 et 2 000 heures. Bien qu'omniprésentes au XX^e siècle, ces lampes ne sont plus autorisées à la vente au sein de l'Union européenne depuis septembre 2012, car leur rendement énergétique est catastrophique : seulement cinq pour cent de l'énergie électrique sont convertis en lumière visible. Ces lampes ont néanmoins l'avantage de produire une lumière blanche chaude très proche de la lumière du jour.

Quel type d'éclairage peut remplacer la lampe à incandescence et satisfaire les contraintes d'une lumière agréable, une longue durée de vie et une faible consommation ? La question est un enjeu économique important, car l'éclairage représente plus

de 10 pour cent de la consommation d'électricité en France. Dans les grandes villes, ce chiffre peut même dépasser 30 pour cent.

De nombreux systèmes d'éclairage alternatifs ont été développés au cours du XX^e siècle. Il en est ainsi des lampes à décharge, qui produisent de la lumière par excitation d'un gaz sous l'effet d'un arc électrique. Différents gaz sont utilisés, tels le néon ou le sodium. Ces derniers sont souvent utilisés dans l'éclairage public, mais donnent des lumières de mauvaise qualité, très loin du spectre solaire, dans des tons orangés pour les lampes à sodium mélangé à du néon.

Les lampes fluorescentes appartiennent à la famille des lampes à décharge, mais la paroi interne est recouverte d'un revêtement fluorescent. Le fonctionnement de ces dispositifs repose aujourd'hui sur l'excitation de vapeur de mercure contenue dans une atmosphère d'argon. Après excitation, les atomes de mercure reviennent à leur état fondamental en émettant un rayonnement ultraviolet, qui est absorbé par des matériaux fluorescents recouvrant les parois du tube, matériaux qui réémettent de la lumière à différentes longueurs d'onde pour

de demain

Nicolas Grandjean

produire de la lumière blanche. Ces lampes sont de plus en plus présentes dans nos foyers, en particulier sous la forme d'ampoules fluocompactes, grâce à l'amélioration constante de la qualité de la lumière, la réduction du délai d'allumage et la diminution du prix d'achat.

Cependant, un autre type d'éclairage est apparu récemment sur le marché : les lampes à diodes électroluminescentes (LED, pour *Light-Emitting Diode*) blanches. Ces systèmes offrent des perspectives intéressantes pour un éclairage de qualité et à faible consommation ; ils pourraient remplacer les ampoules incandescentes d'ici une dizaine d'années.

En attendant, ces dispositifs peuvent encore être améliorés pour arriver à maturité. Cela passe notamment par une augmentation du rendement lumineux, défini comme le rapport du flux lumineux émis dans le domaine visible à la consommation électrique. Les LED blanches ont un rendement lumineux déjà élevé, mais il reste inférieur aux maxima théoriques qui, en fonction de la qualité de la lumière blanche, sont d'environ 350 à 400 lumens par watt. Le rendement actuel

L'ESSENTIEL

- **L'éclairage représente plus de dix pour cent de la consommation d'électricité en France. Le remplacement des lampes à incandescence par des lampes plus efficaces, à base de diodes électroluminescentes (LED), entraînera des économies d'énergie.**
- **Les LED au nitrure de gallium émettent une lumière bleue, dont une fraction est convertie en jaune pour donner de la lumière blanche.**
- **Plusieurs pistes existent pour fabriquer du nitrure de gallium moins cher et de bonne qualité.**

RealCG/shutterstock.com

est de l'ordre de 100 lumens par watt pour les LED blanches, 50 à 80 lumens par watt pour les lampes fluocompactes et environ 15 lumens par watt pour les ampoules à incandescence, qui émettent surtout dans l'infrarouge.

Le principe de fonctionnement des LED blanches est très différent de celui des lampes à incandescence et fluorescentes. Nous allons voir qu'il est fondé sur la physique des semi-conducteurs et qu'il a nécessité une cinquantaine d'années de recherches et de développements avant d'aboutir à des lampes commerciales – dont le coût devrait baisser avec l'amélioration des techniques de fabrication.

Fluorescence contre rendement

Expliquons d'abord pourquoi les lampes fluocompactes ont un rendement lumineux non optimal. La raison principale est liée au phénomène de fluorescence et à l'énergie des photons impliqués – énergie directement liée à la longueur d'onde (ou la couleur) du photon. La désexcitation des atomes de mercure produit des photons

ultraviolets de cinq électronvolts (un électronvolt est l'énergie acquise par un électron soumis à une tension de un volt). Un photon du spectre visible a une énergie plus faible, comprise entre deux (pour le rouge) et trois (pour le bleu) électronvolts. Lors de la fluorescence, la différence d'énergie entre le photon ultraviolet absorbé et le photon visible émis est convertie en chaleur sur les parois de la lampe. Pour obtenir un rendement maximal, il faudrait exciter un atome qui retournerait à son état fondamental en émettant directement un photon de longueur d'onde correspondant à la lumière visible.

Cette idée est applicable dans les semi-conducteurs. Dans un tel matériau, les électrons ne peuvent occuper que certaines gammes d'énergie, nommées bandes. Entre la « bande de valence » – la dernière bande remplie d'électrons – et la « bande de conduction », d'énergie supérieure, il existe une bande interdite correspondant à des énergies inaccessibles aux électrons. Lorsqu'un électron est excité avec une énergie suffisante, il peut passer de la bande de valence à la bande de conduction en laissant un « trou » dans la première. Lorsqu'il revient dans son état fondamental, l'électron se recombine avec un trou de la bande de valence en émettant un photon.

L'énergie de ce photon correspond à la différence d'énergie entre les deux bandes autorisées – la hauteur de la bande interdite. Certains semi-conducteurs présentent des configurations permettant l'émission de photons de longueur d'onde appartenant au domaine visible (voir l'encadré page 35).

■ **LA LUMIÈRE BLANCHE** est le résultat de l'addition des différentes couleurs du spectre électromagnétique visible (380 à 780 nanomètres de longueur d'onde). Il est possible d'obtenir de la lumière blanche en additionnant seulement deux couleurs, telles le bleu et le jaune.

■ **LE LUMEN** est l'unité de flux lumineux. Cette grandeur tient compte de la sensibilité spécifique de l'œil humain aux différentes longueurs d'onde de la lumière visible. Le rendement lumineux d'une lampe, exprimé en lumens par watt, est le rapport du flux lumineux à la puissance électrique.

■ **LA TEMPÉRATURE DE COULEUR** caractérise la lumière blanche qui peut être « chaude » ou « froide » selon que sa composante jaune ou bleue domine.

■ **L'INDICE DE RENDU DES COULEURS** caractérise la qualité d'une lumière blanche et la fidélité du rendu des couleurs perçues. La valeur maximale est de 100 pour la lumière du Soleil.

Lorsque la source d'excitation de l'électron est un courant électrique, on parle de phénomène d'électroluminescence. Cet effet a été observé pour la première fois en 1907 par le physicien anglais Henry Joseph Round. Ce processus est aujourd'hui largement mis à profit dans les diodes électroluminescentes et les lasers à semi-conducteurs. La première LED émettant dans le spectre visible – une LED rouge à base d'arséniure de gallium – fut réalisée par Nick Holonyak en 1962.

LED bleues pour lumière blanche

Durant la décennie suivante, les chercheurs ont développé de nouveaux matériaux semi-conducteurs et le domaine d'émission des LED a été étendu au bleu, avec le carbure de silicium, et au jaune-vert, avec le phosphore de gallium. Mais à l'exception des LED rouges, dont la forte luminosité a permis de les utiliser dans les feux « stop » des véhicules, les LED bleues et vertes sont restées peu efficaces jusqu'au début des années 1990. Leurs applications se sont donc limitées surtout aux témoins lumineux et à l'affichage.

En 1993, Shuji Nakamura, alors ingénieur de l'entreprise japonaise *Nichia*, annonça la mise au point de la première LED bleue à forte luminosité, constituée de nitrure de gallium (GaN). Son rayonnement était dix fois plus intense que celui des autres LED bleues existantes. Cette étape était cruciale pour le développement des LED blanches : en ajoutant un matériau fluorescent qui absorbe une fraction de la lumière

LAMPE À INCANDESCENCE



Rendement (en lumens/watt)

12-20

Indice de rendu des couleurs

100

Durée de vie (en heures)

1 000-2 000

TUBE FLUORESCENT



Rendement (en lumens/watt)

70-120

Indice de rendu des couleurs

40-90

Durée de vie (en heures)

6 000-15 000

LAMPE FLUOCOMPACTE



Rendement (en lumens/watt)

50-80

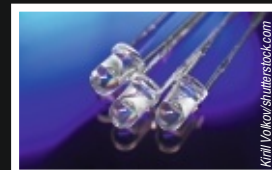
Indice de rendu des couleurs

85-90

Durée de vie (en heures)

6 000-15 000

LAMPE À LED BLANCHE



Rendement (en lumens/watt)

70-100

Indice de rendu des couleurs

80-85

Durée de vie (en heures)

25 000-50 000

1. DIFFÉRENTS SYSTÈMES D'ÉCLAIRAGE ont été développés ces 130 dernières années. Si la lampe à incandescence s'est imposée grâce à la qualité de sa lumière et au faible coût de fabrication d'une

ampoule, son rendement est très faible : une grande partie de l'énergie est dissipée sous forme de chaleur. Les lampes à LED présentent un rendement élevé, qui peut encore être amélioré.

Semi-conducteurs et jonction $p-n$

Dans un matériau cristallin, les électrons susceptibles de conduire le courant occupent des niveaux d'énergie inclus dans deux bandes d'énergie (la bande de valence et la bande de conduction) séparées par une bande interdite ou *gap*. Dans un semi-conducteur, aucun électron n'est dans la bande de conduction à température ambiante, car l'énergie thermique est négligeable par rapport à l'énergie du *gap*. La bande de valence est complètement remplie, les électrons ne peuvent se mouvoir, à l'image d'une foule compacte. Le matériau est un isolant. Sous l'effet d'une excitation extérieure, un électron peut passer dans la bande de conduction, laissant un trou dans la bande de valence. L'électron et le trou sont alors mobiles dans le matériau. Quand l'électron revient dans la bande de valence, l'énergie qu'il perd est émise sous la forme d'un photon (a).

On peut contrôler la conductivité électrique en incorporant des atomes étrangers dans le matériau – on parle de dopage –, ce qui crée un niveau d'énergie dans la bande interdite. Un niveau d'énergie à proximité de la bande de valence peut alors piéger un élec-

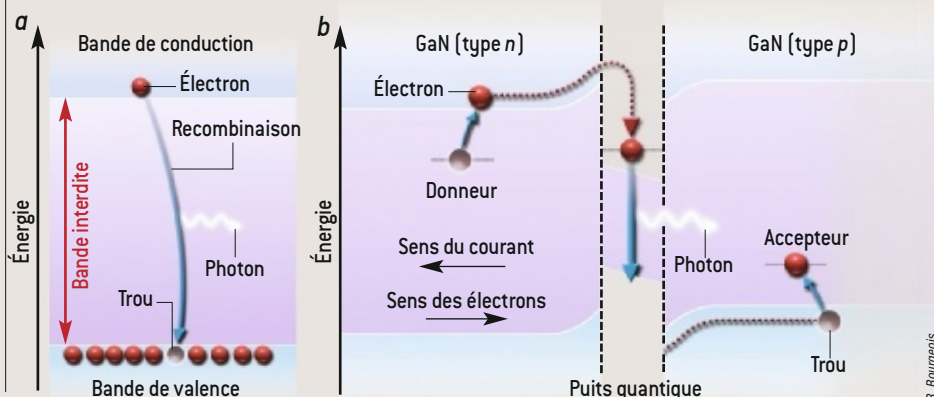
tron de cette bande – on parle d'accepteur (b). Ce « dopage de type p » libère des trous dans la bande de valence, qui peuvent circuler sous l'effet d'un champ électrique. Inversement, on peut ajouter des atomes riches en électrons, des donneurs, avec un niveau d'énergie proche de la bande de conduction. Les électrons passent alors aisément dans la bande de conduction et participent au courant. C'est le dopage de type n .

Lorsqu'on met en contact un matériau dopé n et un matériau dopé p , les porteurs de charge (les trous côté p et les électrons côté n) proches de la jonction diffusent dans le matériau voisin. Par exemple, les trous du matériau dopé p migrent dans le

matériau dopé n , puis se combinent avec les électrons de cet élément. À la jonction, il se forme une zone pauvre en porteurs de charge. La perte d'électrons du matériau dopé n crée une charge électrique positive et, symétriquement, on obtient une charge négative dans le matériau dopé p . Cette différence de charges crée, dans la jonction $p-n$, un champ électrique, qui est à l'origine de l'effet « diode » : si une tension externe est appliquée et s'oppose au champ électrique interne, l'équilibre dans la distribution des charges est rompu et un courant s'établit. Le processus de recombinaison entre électrons et trous est alors important.

Dans le nitrure de gallium, le processus de recombinaison est

principalement radiatif, avec l'émission d'un photon. Dans les LED modernes, on favorise les recombinaisons radiatives en confinant spatialement les porteurs à proximité de la jonction. Pour ce faire, on insère une couche d'un matériau de la même famille, mais ayant une bande interdite plus étroite ; on parle de puits quantique (b). Pour le nitrure de gallium, il s'agit d'une couche de 2 à 3 nanomètres contenant 15 pour cent d'indium, de façon que le *gap* corresponde à un photon bleu. Ce puits quantique, en confinant les porteurs de charge sur des niveaux d'énergie discrets – par opposition aux bandes –, favorise la recombinaison.



bleue et réémet du jaune, il était désormais possible d'obtenir de la lumière blanche, par addition du bleu et du jaune.

Le cœur des LED blanches à haute efficacité est donc constitué de semi-conducteurs inorganiques, composés de nitrures de gallium, d'aluminium ou d'indium. Ces matériaux étaient connus depuis longtemps pour leur capacité à émettre de la lumière aux courtes longueurs d'onde et avaient fait l'objet de nombreuses études à la fin des années 1960. Afin de forcer les recombinaisons électron-trou, donc l'émission de photons, on met en contact deux semi-conducteurs « dopés » avec des impuretés différentes, de façon à augmenter le nombre de trous dans la bande de valence (dopage p) et le nombre d'électrons dans la bande de conduction (dopage n). On forme ainsi une jonction $p-n$ (voir l'encadré ci-dessus).

Les chercheurs étudiant le nitrure de gallium étaient, à l'époque, confrontés à

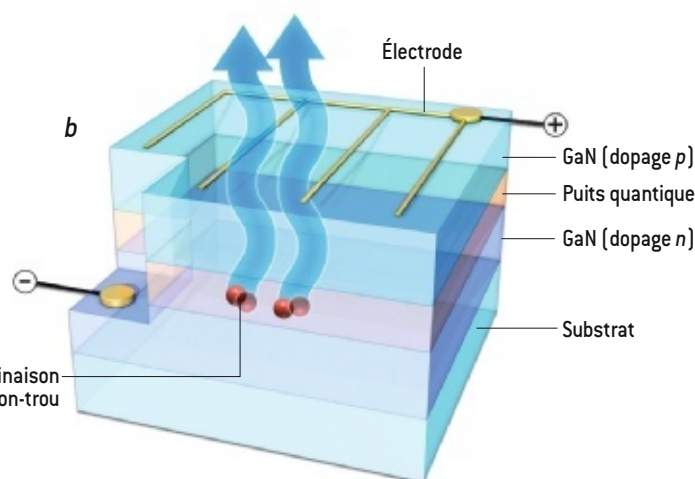
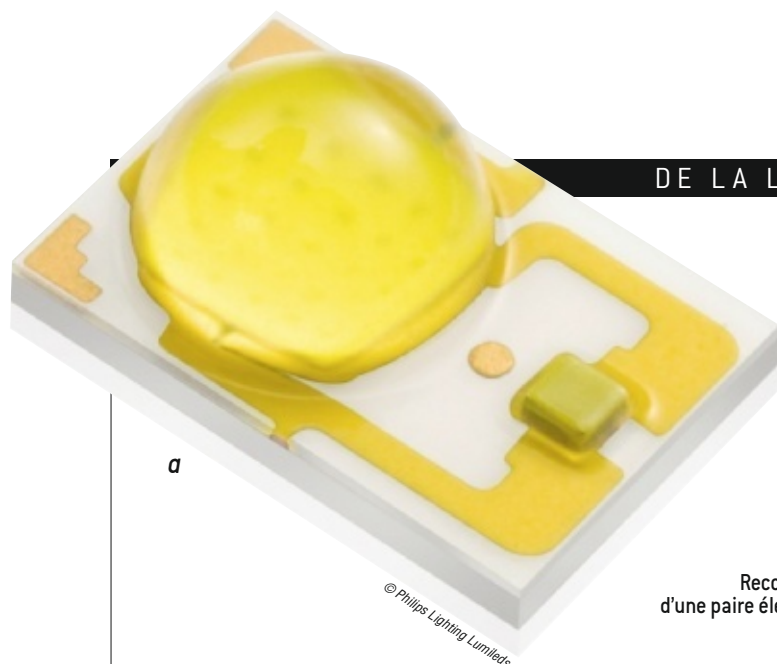
deux difficultés majeures : il était difficile de fabriquer des cristaux de bonne qualité, et le dopage de type p n'était pas maîtrisé. Seules quelques équipes japonaises ont poursuivi leurs travaux sur le nitrure de gallium. En 1989, l'équipe d'Isamu Akasaki, de l'Université de Nagoya, élaborait une technique pour doper le nitrure de gallium. Cette avancée permit la fabrication de jonctions $p-n$ et le développement de la LED de S. Nakamura, qui inventa par la suite le premier laser bleu, aujourd'hui au cœur des lecteurs DVD *Blu-ray*.

Du nitrure de gallium

Le désintérêt des chercheurs pour le nitrure de gallium pendant plus de 20 ans, entre 1970 et 1990, tient pour une bonne part à la piètre qualité des matériaux synthétisés. Le nitrure de gallium est difficile à produire sous forme d'un cristal massif, qui est ensuite découpé en éléments indi-

viduels (sur le même principe que les galettes de silicium de l'industrie électronique). Cela tient aux conditions extrêmes de température et de pression requises pour sa croissance (près de 2000 °C et 2 kilobars). Le nitrure de gallium existe donc presque exclusivement en couches minces, de quelques micromètres d'épaisseur, déposées sur des cristaux de nature différente tels que le saphir.

Cependant, faire croître du nitrure de gallium sur du saphir n'est pas aisé, leurs natures chimiques et leurs structures cristallines étant très différentes. Comme l'espacement entre les atomes du substrat et ceux du nitrure de gallium est différent, des défauts nommés dislocations se forment dans le semi-conducteur pour raccorder les mailles cristallines à l'interface. On dénombre près d'un milliard de dislocations par centimètre carré, densité si élevée que l'émission de lumière par le semi-conducteur n'est, en principe, plus



Le cœur d'une LED blanche (a) est constitué d'une LED bleue. Celle-ci (b) se compose généralement d'un substrat en saphir sur lequel sont déposées des couches de nitrure de gallium de quelques micromètres d'épaisseur. Des atomes de silicium sont incorporés dans la première couche de nitrure de gallium pour obtenir un dopage de type *n*. La couche supérieure a un dopage de type *p* grâce à l'insertion d'atomes de magnésium. Entre ces deux couches est placé un puits quantique (une ou plusieurs couches) composé d'un alliage de nitrure de gallium et d'indium d'une épaisseur de quelques nanomètres. L'ensemble est relié à une alimentation électrique. Pour cela, on dépose un contact métallique sur le nitrure de gallium de type *p*

en prenant soin de ne pas recouvrir toute la surface, pour ne pas absorber la lumière émise. Le deuxième contact est placé sur la couche de type *n* après gravure de la structure. La taille des LED varie de 0,3 millimètre de côté pour les LED standards à plus d'un millimètre pour les LED blanches de puissance.

Dans le puits quantique, les électrons et les trous se recombinent et émettent un rayonnement bleu (b). La LED est recouverte d'un luminophore qui absorbe de la lumière bleue et réémet dans le jaune (c). L'épaisseur du luminophore est choisie de telle sorte qu'une partie seulement de la lumière bleue est absorbée. En ajustant les rapports d'intensité entre bleu et jaune, la lumière perçue est blanche.

possible. Ces défauts créent en effet des niveaux d'énergie autorisés dans la bande interdite. Les électrons ne passent alors plus directement de la bande de conduction à la bande de valence en émettant un photon visible. Ils sont captés par ces nouveaux états, des «pièges» qui dissipent l'énergie de l'électron sous forme de vibrations du réseau cristallin. Il n'y a plus émission de photon: le retour à l'état fondamental de l'électron est «non radiatif».

On a pu contourner cet obstacle dans les LED bleues à base de nitrure de gallium et obtenir un bon rendement quantique interne. Ce dernier est défini comme le rapport du nombre de photons émis au nombre d'électrons injectés provenant du courant électrique qui alimente la jonction *p-n*. Si les électrons étaient captés par les pièges non radiatifs, le rendement quantique interne serait très faible. Cependant, en ajoutant dans le semi-conducteur une couche de quelques nanomètres d'épaisseur de nitrure de gallium contenant de l'indium, on crée un puits quantique, où les électrons et les trous tombent (voir l'enca-

dré page 35). Les puits quantiques constitués de nitrure ont la particularité de piéger les électrons et les trous qui n'ont plus la possibilité de se déplacer et, ainsi, rencontrer une dislocation. En revanche, les porteurs de charge se recombinent et donnent ainsi lieu à une émission de photons.

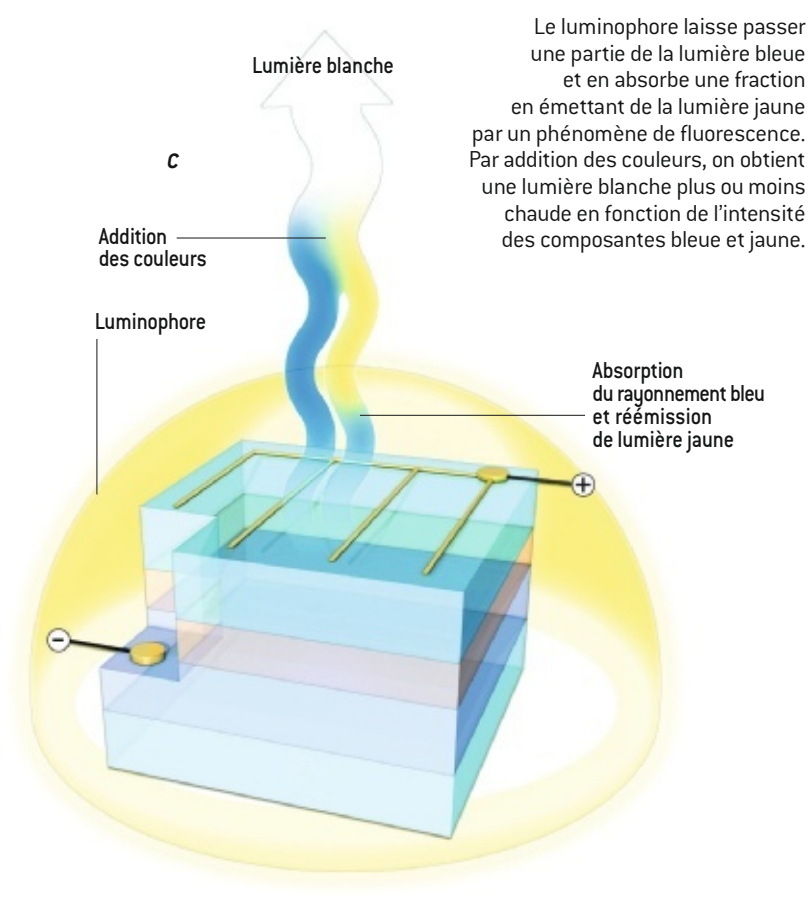
Extraire les photons

Il ne suffit pas d'avoir un excellent rendement quantique interne, encore faut-il pouvoir extraire les photons du cœur de la LED avant qu'ils ne soient réabsorbés par le matériau lui-même. Or du fait de la forte interaction entre la lumière et la matière dans les semi-conducteurs, l'indice de réfraction est élevé (2,4 pour le nitrure de gallium). Le photon doit parvenir quasi perpendiculairement à la surface pour s'échapper; sinon, il est réfléchi vers l'intérieur du matériau et finit par être réabsorbé. Seule une petite fraction de photons sortira de la LED.

Pour y remédier et augmenter le rendement, deux approches sont possibles.

D'une part, on peut réduire le volume total du dispositif, afin de limiter la probabilité que le photon soit réabsorbé. Pour ce faire, la couche de semi-conducteur doit être très mince, inférieure au micromètre, ce qui limite le trajet du photon et les risques d'absorption. D'autre part, on peut limiter les réflexions internes multiples si la surface est très rugueuse: un plus grand nombre d'orientations de la surface augmente la probabilité que le photon y arrive avec un bon angle. Le coefficient d'extraction – la proportion de photons qui sortent de la LED – dans une LED bleue dépasse 90 pour cent. Mais une part des photons est perdue à cause d'autres phénomènes de réflexion et d'absorption qui apparaissent lors de l'intégration de la LED au sein de la lampe.

Le rendement quantique interne et l'efficacité d'extraction ne sont pas tout. Il faut aussi considérer le rendement à la prise, c'est-à-dire la puissance optique émise par rapport à la puissance électrique injectée. Il est de 60 pour cent pour les meilleures LED bleues. Pourquoi n'est-il pas plus élevé? Pour obtenir un photon bleu de



nue à partir des photons de la LED bleue dont une partie traverse le luminophore et l'autre excite le matériau fluorescent, qui réémet dans le jaune (voir l'encadré ci-contre). On peut moduler les émissions bleue et jaune en choisissant l'épaisseur du luminophore – qui absorbe ainsi plus ou moins le bleu –, de façon à produire un blanc au ton chaud ou froid. Certains luminophores ont un aspect plus orangé, ce qui donne un blanc chaud. Le rendement de conversion du luminophore est un facteur important : pour les meilleurs d'entre eux, il est de 90 pour cent et ne se dégrade pas au fil du temps. Toutefois, la fluorescence dégrade inéluctablement une partie de l'énergie, puisque la conversion d'un photon bleu en photon jaune s'accompagne d'une perte d'énergie sous forme de chaleur.

Trois LED pour de la lumière blanche ?

Une solution favorable sur le plan énergétique consisterait à s'affranchir du luminophore et à produire de la lumière blanche en combinant trois LED constituées de semi-conducteurs émettant dans le bleu, le vert et le rouge, respectivement. Si les LED bleues et rouges présentent d'excellents rendements lumineux, ce n'est pas le cas des LED vertes, conçues avec les mêmes matériaux que les LED bleues et pour lesquelles le rendement quantique interne s'écroule lorsqu'on augmente la longueur d'onde : il passe de 90 à 30 pour cent. Si les semi-conducteurs à base de nitrure de gallium sont peu performants dans le vert, les autres matériaux ne font guère mieux. C'est le *green gap*, qui est au cœur des recherches dans le domaine des matériaux pour l'optoélectronique.

Une lampe composée de trois LED serait complexe à réaliser, car en plus du manque de vert efficace, le rendement des LED rouges et leurs longueurs d'onde varient avec la température. La lampe nécessiterait alors un système d'alimentation complexe, qui pourrait inclure par exemple un contrôle continu de la qualité du blanc. Si ces problèmes étaient résolus, cette lampe serait sans doute la source de lumière idéale : elle présenterait un excellent rendement lumineux et pourrait fournir un blanc modulable à volonté, capable de reproduire l'atmosphère bleutée de l'aube ou le rougeolement du couchant.

Les lampes à LED blanches disponibles sur le marché ont des caractéristiques

2,7 électronvolts, il faut exciter un électron avec la même énergie. Or l'énergie d'un électron est le produit de sa charge électrique par la tension appliquée. Idéalement, une LED bleue devrait ainsi fonctionner avec une tension d'environ 2,7 volts. Cependant, si la conductivité électrique des matériaux est mauvaise ou si les contacts métalliques déposés sur les semi-conducteurs présentent une certaine résistance, il faut augmenter la tension d'alimentation.

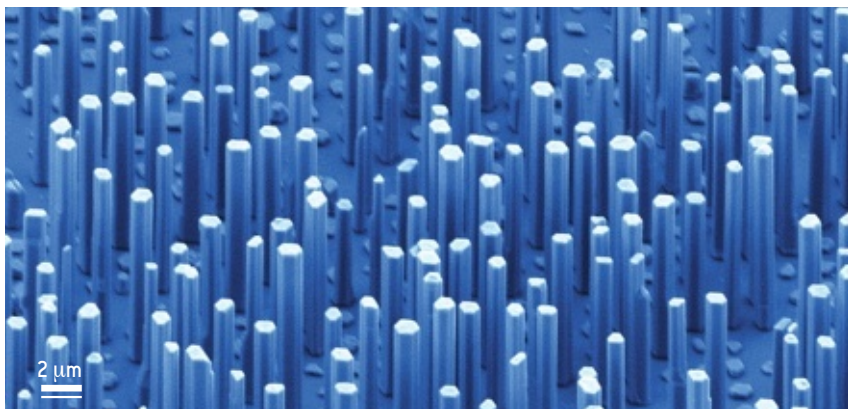
Ce problème est d'importance avec les LED au nitrure de gallium, car elles fonctionnent avec un courant intense. En effet, le nitrure de gallium étant coûteux, on l'utilise dans des dispositifs de petite taille. Dès lors, pour compenser les dimensions réduites et produire un maximum de lumière, un courant élevé, de l'ordre de l'ampère, est nécessaire. Mais, en plus d'abaisser le rendement à la prise, les effets résistifs se traduisent par un échauffement notable du dispositif, qui peut détériorer ses performances et sa durée de vie.

La qualité des matériaux et des contacts dans les LED au nitrure de gallium a connu

d'importants progrès, mais l'usage de courants intenses se heurte à un autre phénomène qui limite le rendement. L'efficacité peut chuter de plus de 50 pour cent entre sa valeur maximale obtenue à faible courant (typiquement quelques milliampères pour un dispositif de un millimètre carré) et celle mesurée à un ampère.

Ce phénomène serait dû à « l'effet Auger », où l'énergie libérée par la recombinaison électron-trou ne se retrouve pas sous forme de photon, mais est transférée à un électron de la bande de conduction sous la forme d'énergie cinétique. Comme cet effet est proportionnel au cube de la densité de porteurs de charge, il devient vite prépondérant aux courants intenses. Ainsi, les LED blanches sont généralement alimentées par un courant plus faible, de l'ordre de 0,35 ampère.

Malgré toutes les difficultés mentionnées, il est aujourd'hui possible de produire des LED bleues efficaces. Pour obtenir de la lumière blanche, la LED est encapsulée dans un luminophore, un matériau fluorescent. La lumière blanche est alors obtenue



© J. Embury, CEA/INAC

2. DES COLONNES DE NITRURE DE GALLIUM de quelques centaines de nanomètres de diamètre, observées au microscope électronique à balayage, sont une piste d'avenir pour fabriquer des cristaux sans défauts sur un substrat de silicium. Chaque colonne pourrait être transformée en une LED. Mises en parallèle, ces LED formeraient des lampes aux performances exceptionnelles.

■ L'AUTEUR



Nicolas GRANDJEAN est professeur de physique et dirige l'Institut de physique de la matière condensée à l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), en Suisse.

■ BIBLIOGRAPHIE

L. Zuppiroli et D. Schlaepfer, *Lumières du futur*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2011.

P. Mottier, *Les diodes électroluminescentes pour l'éclairage*, Hermes/Lavoisier, 2008.

B. Johnstone, *Brilliant 1: Shuji Nakamura and the Revolution in Lighting Technology*, Prometheus Books, 2007.

très compétitives, avec un rendement lumineux s'élevant jusqu'à 100 lumens par watt (pour des densités de courant de l'ordre de 35 milliampères par millimètre carré), une bonne qualité de lumière et une durée de vie de l'ordre de 50 000 heures. Cependant, le prix d'achat est l'obstacle principal à leur diffusion massive. Il faut déboursier environ 40 euros pour une lampe à LED équivalente à une ampoule à incandescence de 60 watts.

Si les prix ont baissé de 40 pour cent aux États-Unis en 2011, de nouvelles techniques de production peuvent encore les réduire. Le nitrure de gallium est aujourd'hui fabriqué sur un substrat de saphir de 100 millimètres de diamètre. Il serait possible de doubler le diamètre du substrat d'ici quelques années.

Une autre approche serait de remplacer le saphir par du silicium, qui est moins cher et dont la taille standard est de 30 centimètres de diamètre. Le nitrure de gallium produit sur du silicium rattrape en qualité celui fabriqué sur du saphir, ce qui était le principal obstacle de cette technique.

Toujours dans l'optique de fabriquer moins cher, une solution innovante consiste à faire croître le nitrure de gallium en colonnes ou pyramides de tout petit diamètre, de 0,1 à 1 micromètre (voir la figure 2). Cette technique permet non seulement d'obtenir une qualité cristalline parfaite, mais aussi un coefficient d'extraction des photons très élevé, en raison de la grande surface présentée par cette structure. La fabrication du nitrure de gallium de qualité sur un substrat de silicium permettrait d'obtenir un semi-conducteur bon marché. Cependant, il faut garder à l'esprit

que la LED n'est qu'un des éléments qui constituent la lampe. Elle ne représente que 15 à 20 pour cent du coût total. Il faut considérer, par exemple, le système d'alimentation électrique pour adapter la tension au fonctionnement de la LED.

Un autre enjeu majeur des lampes à LED est l'aspect thermique. Le rendement à la prise est dix fois supérieur à celui d'une lampe à incandescence, mais près de la moitié de l'énergie électrique est dissipée en chaleur dans le petit volume de la LED, à cause des effets résistifs et de la perte d'énergie par la fluorescence dans le luminophore. La gestion de la température est cruciale pour ne pas endommager la lampe. Des dissipateurs thermiques en aluminium évacuent la chaleur et évitent que la LED se dégrade.

Un point à considérer lors de la conception d'une lampe à LED concerne la diffusion de la lumière. Une LED est une source lumineuse ponctuelle et, *de facto*, peu agréable pour l'œil. L'une des solutions envisagées par de nombreux constructeurs consiste à intégrer un grand nombre de LED de faible puissance afin de limiter l'éblouissement. Une autre solution repose sur l'intégration du luminophore au diffuseur de la lampe.

Des lampes peu polluantes

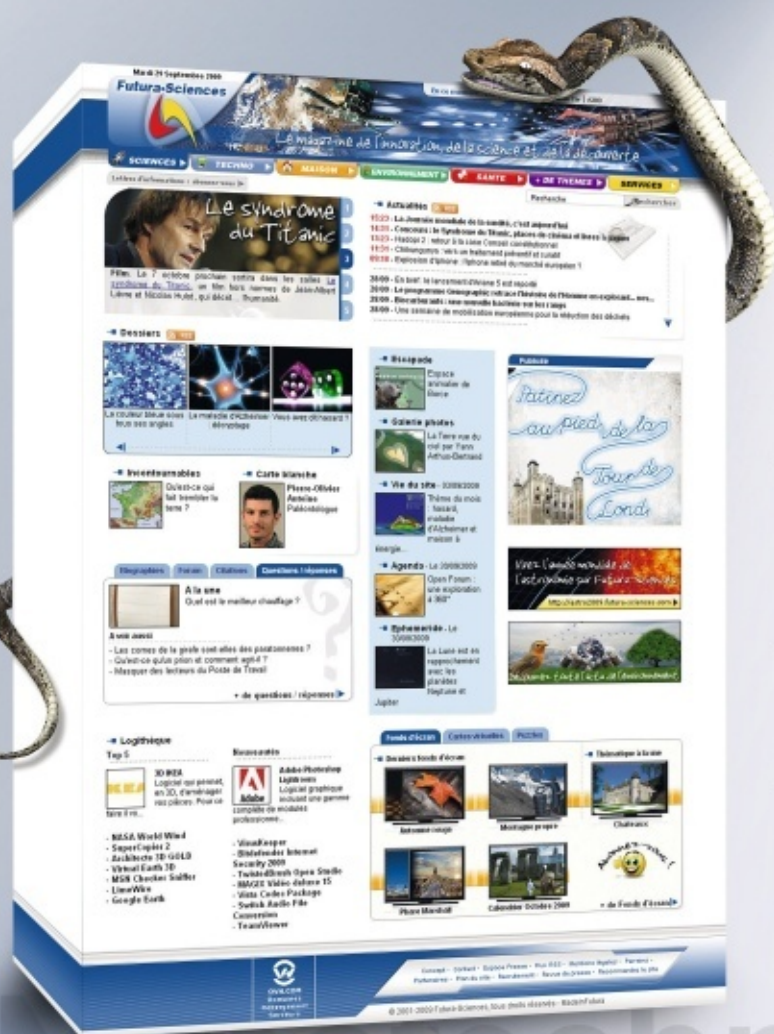
Les contraintes techniques pour le bon fonctionnement des lampes à LED blanches font qu'elles resteront probablement assez coûteuses à fabriquer. Néanmoins, si l'on tient compte de leur durée de vie exceptionnelle et de leur rendement, ces sources de lumière sont tout à fait compétitives. D'un point de vue environnemental, une étude du Département de l'énergie des États-Unis a comparé le cycle de vie, de la fabrication au recyclage, des lampes fluocompactes et des lampes à LED blanches. Les secondes sont beaucoup moins nocives et n'utilisent par exemple pas de mercure, contrairement aux premières.

La même étude compare aussi la consommation électrique de ces deux types de lampes de nouvelle génération. Aujourd'hui, les lampes à LED ont déjà un rendement équivalent, voire supérieur, à celui des lampes fluocompactes pour produire la même quantité de lumière. Elles présentent en plus d'importantes perspectives d'innovation et d'optimisation, ce qui devrait leur assurer un bel avenir. ■

Futura-Sciences, le magazine de la découverte, de la science et de l'innovation



WWW.FUTURA-SCIENCES.COM



• **Actualités** : l'actu des sciences et des technologies analysée en continu.

• **Dossiers** : du réchauffement climatique à la grippe A, les enjeux clés en images avec plus de 800 dossiers.

• **Forums** : 50 forums thématiques pour poser toutes vos questions et échanger avec 300 000 membres.

• **Questions / réponses** : des réponses simples à des questions du quotidien.

• **Services** : fonds d'écran, cartes virtuelles emploi, téléchargements, puzzles...

Retrouvez tous ces thèmes sur
www.futura-sciences.com

Grippe A

Nutrition

Environnement

Jardinage

