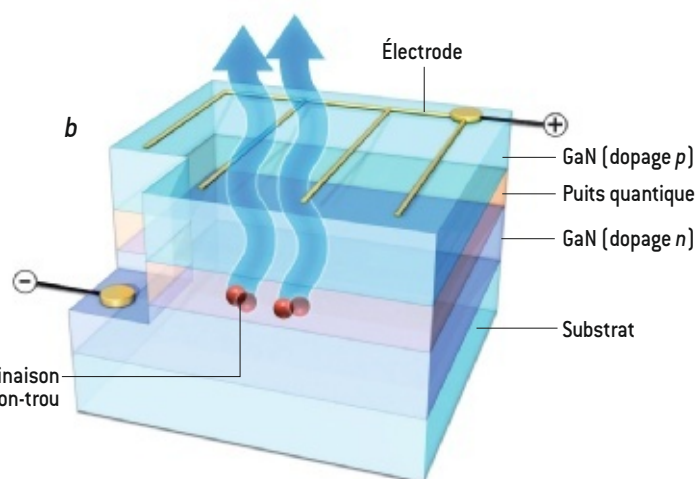
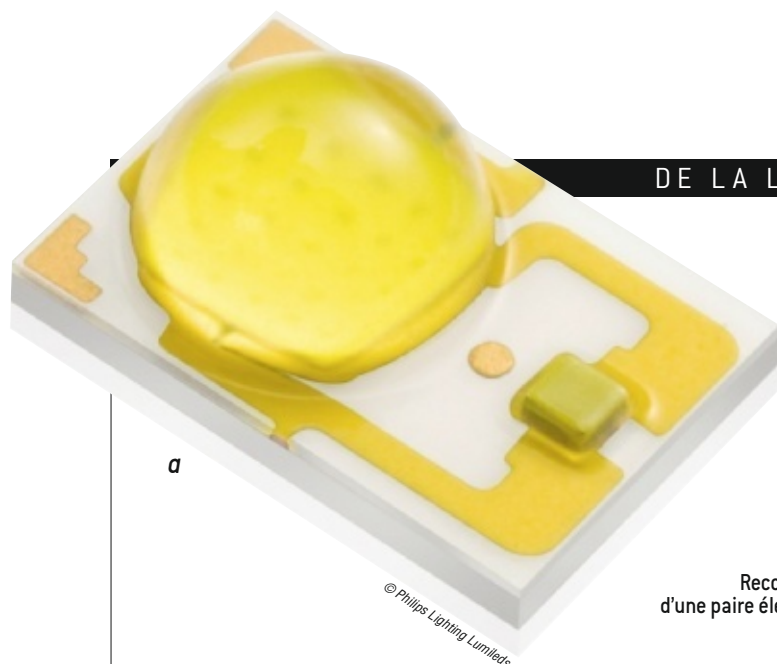




Le cœur d'une LED blanche (a) est constitué d'une LED bleue. Celle-ci (b) se compose généralement d'un substrat en saphir sur lequel sont déposées des couches de nitrure de gallium de quelques micromètres d'épaisseur. Des atomes de silicium sont incorporés dans la première couche de nitrure de gallium 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.

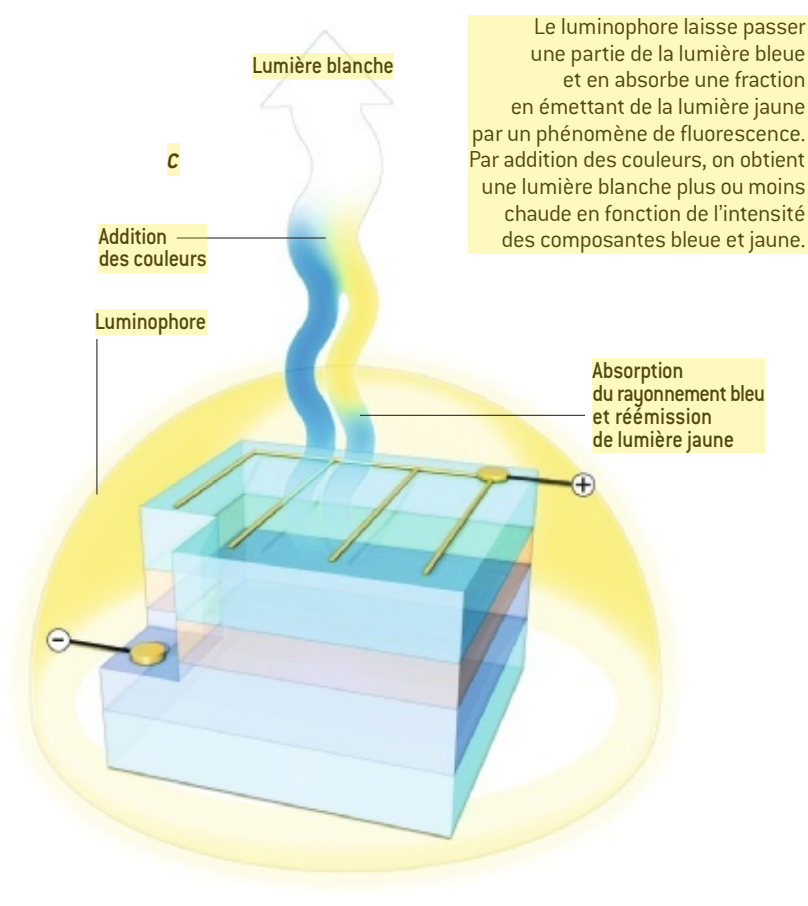
Extraire les photons

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