

Diodes émettrices de lumière bleue : le prix Nobel de physique 2014

Claude Weisbuch (claude.weisbuch@polytechnique.fr)

Directeur de Recherche émérite au CNRS, Laboratoire PMC, École polytechnique, 91128 Palaiseau Cedex
Professeur à l'Université de Californie à Santa Barbara

Les semi-conducteurs peuvent, en principe, convertir la puissance électrique en lumière avec une efficacité de 100%. Pour l'émission dans le bleu, les nitrures semi-conducteurs (AlGaIn)N ont posé des défis majeurs en science des matériaux, à cause du manque de substrats adaptés à la croissance épitaxiale et de la difficulté d'obtenir un dopage de type p.

Les progrès dans l'obtention de matériaux de qualité, réalisés par I. Akasaki, H. Amano et S. Nakamura, lauréats du prix Nobel de physique 2014 pour ces travaux (encadré 1), ont mené au début des années 1990 à des sources de lumière sans égales, avec des perspectives d'économies d'énergie exceptionnelles.

De l'importance de l'éclairage : un peu d'histoire

L'éclairage artificiel a toujours mobilisé une part importante des ressources en énergie, 15 à 20% aujourd'hui de l'électricité dans les pays développés. Cela peut sembler beaucoup, mais le besoin d'éclairage a toujours été essentiel. Jusqu'en 1950 en Europe, entre 1 et 2 % du revenu moyen est consacré à un éclairage individuel très limité. Longtemps à base de torches, chandelles et bougies, le coût ne diminue vraiment qu'avec l'arrivée du gaz au début du XIX^e siècle, puis du kérosène extrait du charbon ou du pétrole, et enfin de l'électricité. En Grande-Bretagne il baisse d'un facteur 5 entre 1850 et 1900, puis d'un facteur 160 entre 1900 et 2000. Le besoin latent d'éclairage est illustré par la ponction qu'il exerce sur chacune des énergies « nouvelles », parce qu'à chaque fois il devient moins cher, plus pratique et

délivre une meilleure lumière : en Grande-Bretagne, l'éclairage consomme successivement 100% du gaz produit entre 1800 et 1850, de 90 % en 1850 à 75% en 1890 du pétrole, de 98% en 1870 à 60% en 1900 de l'électricité, et la consommation d'éclairage (en Tlm.h/an, unité définie dans l'encadré 2) est multipliée par 30 000 entre 1800 et 2000 (fig. 1).

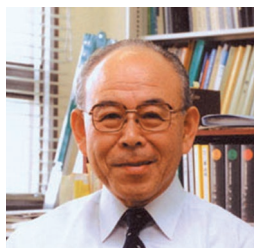
Au XX^e siècle les progrès de l'éclairage électrique sont continus, des lampes à incandescence aux lampes à décharge (vapeurs de mercure, de sodium ou d'halogénures métalliques, tubes ou lampes fluorescents). Les lampes « classiques » atteignent cependant leurs limites : les rendements de conversion plafonnent à 80 lumens par watt (unité définie dans l'encadré 2), il est difficile de moduler le flux lumineux, il y a émission dans toutes les directions, il faut un temps de « chauffe » des lampes à haut rendement qui, par ailleurs, contiennent parfois des produits toxiques...

► Les lauréats du prix Nobel de physique 2014

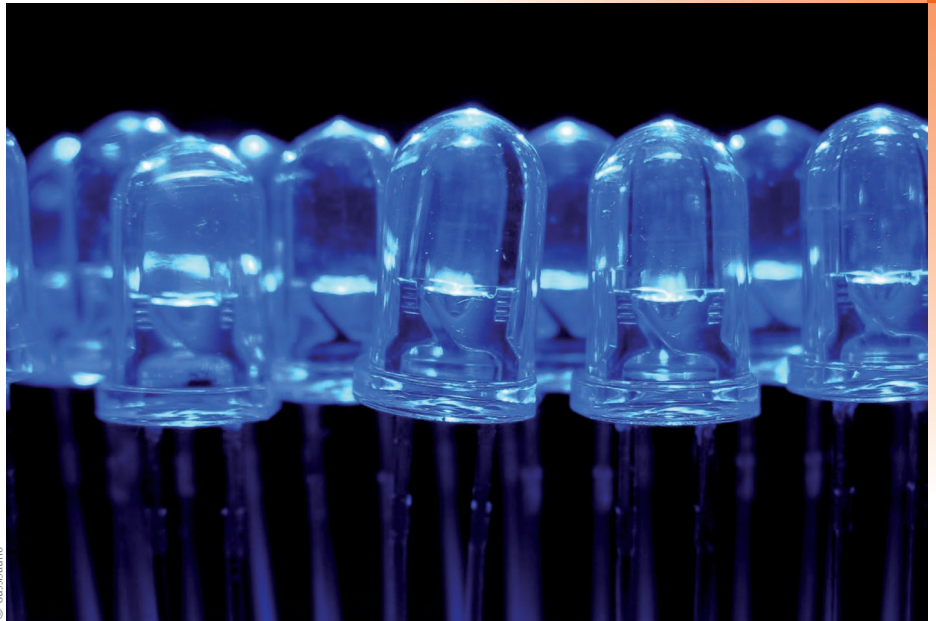
encadré 1

L'attribution du prix Nobel de physique 2014 à Isamu Akasaki, Hiroshi Amano et Shuji Nakamura « pour l'invention de LEDs bleues efficaces... », illustre à la fois la difficulté d'obtenir de telles sources et leur impact sociétal.

Isamu Akasaki (né en 1929) a mené ses recherches sur les LEDs bleues à base de nitrure de gallium avec Hiroshi Amano (né en 1960) à l'Université de Nagoya, où ils sont tous deux professeurs. Shuji Nakamura, né en 1954, travaillait sur le même sujet pour la société Nichia Chemicals (à Tokushima), qu'il a quitté en 1999 pour un poste de professeur aux USA, à l'Université de Californie à Santa Barbara (UCSB).



De gauche à droite : Isamu Akasaki, Hiroshi Amano et Shuji Nakamura.



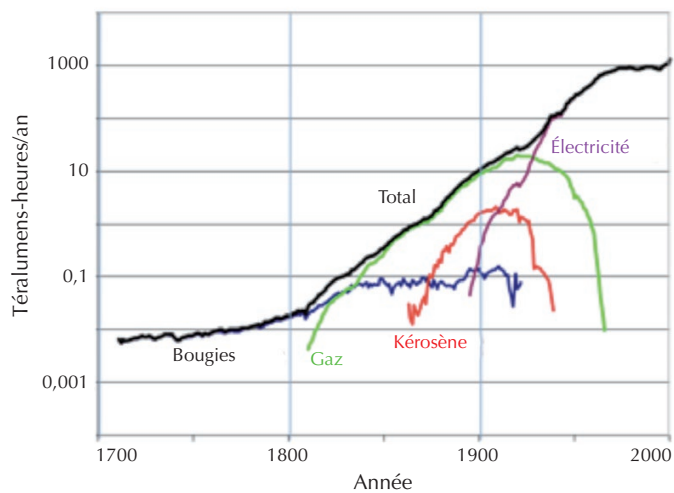
Diodes émettrices de lumière bleue (LEDs bleues).

Aux origines de l'électroluminescence

La demande est donc grande pour un nouveau mécanisme d'éclairage, plus souple et plus efficace.

L'électroluminescence, conversion directe d'électricité en énergie lumineuse dans un solide où passe du courant, est découverte par hasard en 1907 par H.J. Round, un Anglais, lors d'études sur l'effet redresseur du courant alternatif par les cristaux de carbure de silicium SiC. Sa note de vingt-et-une lignes ne suscite aucun intérêt et tombe dans l'oubli. Oleg Losev redécouvre le phénomène en Union soviétique en 1923 dans ses recherches sur des redresseurs et oscillateurs électriques en ZnO et SiC. Il publie en 1928 une explication du rayonnement en le reliant à la théorie des quanta, par analogie avec le continuum spectral des rayons X : le rayonnement serait dû au freinage des électrons *accélérés dans le cristal* par le champ électrique appliqué. Il manquait à l'époque à Losev la théorie quantique des matériaux cristallins prédisant l'existence de bandes d'énergie permises et interdites dans les isolants et semi-conducteurs.

La lumière est en fait émise par les électrons injectés dans une jonction p-n et tombant de la bande de conduction à la bande de valence. L'énergie cédée par chaque électron correspond donc à la largeur de la bande interdite du semi-conducteur, E_g , le *gap*. La lumière est émise de manière significative quand la tension appliquée est de l'ordre de E_g/e (e est la charge de l'électron), ce qui correspond à la tension de seuil de la diode (encadré 3).



1. Augmentation de la quantité de lumière produite en Grande-Bretagne entre 1700 et 2000 (en téralumens-heures par an). (Figure adaptée de R. Fouquet et P.J.G. Pearson, *The Energy Journal*, 27 (2006) 139-178.)

► Quelques définitions

encadré 2

L'efficacité lumineuse (ou *pouvoir éclairant*) d'un éclairage ne consiste pas seulement en conversion d'énergie électrique en énergie optique. Selon la longueur d'onde, l'œil sera plus ou moins impressionné par une puissance optique donnée. En vision diurne, le maximum de sensibilité de l'œil humain est situé dans le jaune-vert, à une longueur d'onde d'environ $0,555 \mu\text{m}$.

L'intensité lumineuse correspond au pouvoir éclairant d'une source lumineuse ponctuelle. Le flux lumineux est l'intensité lumineuse émise dans un angle solide donné.

L'unité d'intensité lumineuse est la *candela* (cd) : c'est l'intensité lumineuse d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de longueur d'onde $0,555 \mu\text{m}$, et dont la puissance énergétique (optique) est de $1/683$ watts. L'intensité lumineuse émise par une bougie standard est de l'ordre d'une candela.

L'unité de flux lumineux est le *lumen* (lm) : il correspond au flux émis dans un angle solide d'un stéradian par une source lumineuse isotrope dont l'intensité lumineuse vaut une candela.

Le *lumen-heure* (lm.h) correspond à la quantité de lumière rayonnée pendant une heure par un flux lumineux égal à un lumen.

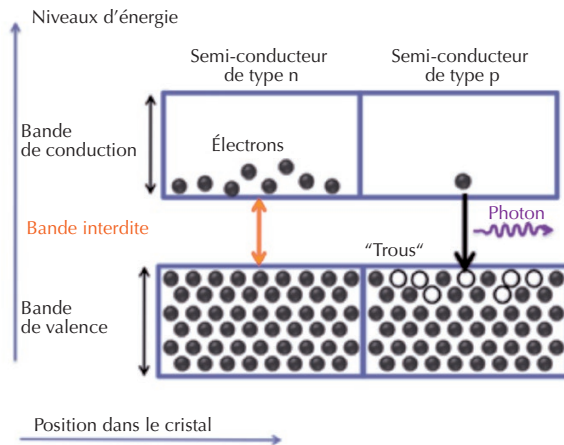
L'efficacité lumineuse spectrale est le rapport entre le flux visuel (en lumens) et le flux énergétique optique (en watts) : exprimée en lumens par watt (lm/W), elle dépend de la longueur d'onde et de la nature de la source lumineuse.

Les LEDs convertissent directement, sans chauffage, de l'énergie électrique en photons à l'intérieur d'un matériau. Le principe est simple : le courant électrique excite les électrons dans le matériau, et ceux-ci se désexcitent en émettant de la lumière. Les matériaux semi-conducteurs sont de bons candidats, puisque les électrons possèdent des niveaux excités séparés du niveau fondamental par une bande interdite E_g (le *gap*). Il suffit de porter des électrons dans la bande de conduction et de les laisser retomber dans un trou de la bande de valence, cédant leur énergie sous forme d'un photon.

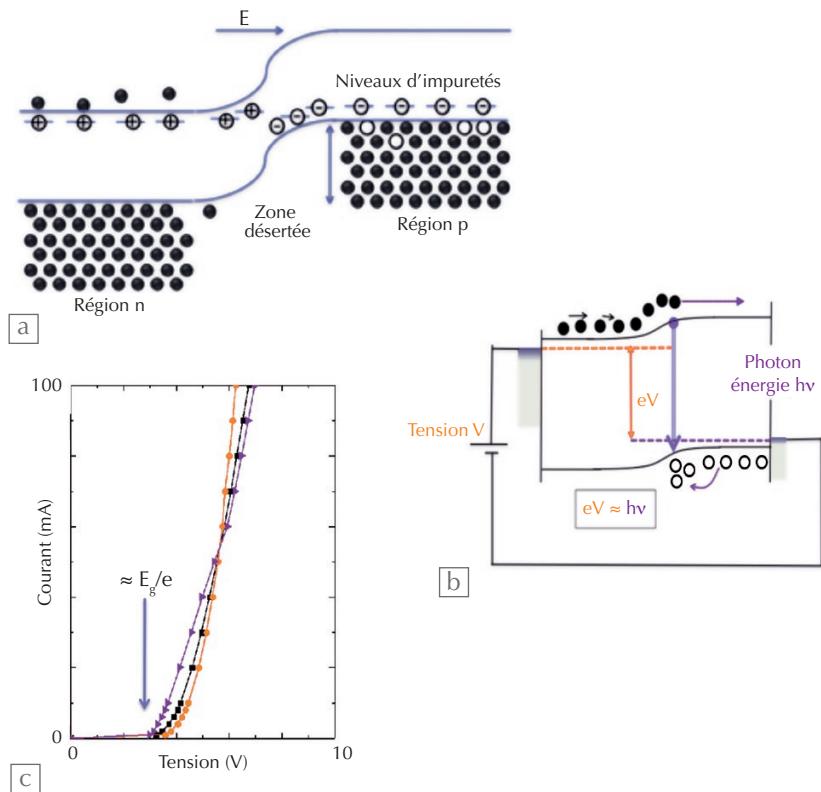
Appliquer un champ électrique dans un semi-conducteur *pur et homogène*, alors *isolant*, ne suffit pas pour exciter des électrons de la bande de valence à la bande de conduction. Il faut d'abord le rendre conducteur en le « dopant » avec des impuretés donneuses ou accepteuses d'électrons (fig. E1) : les atomes donneurs possèdent un électron supplémentaire par rapport aux atomes du semi-conducteur. Ces électrons supplémentaires, situés dans la bande de conduction, peuvent alors conduire l'électricité. De manière symétrique, les atomes accepteuses ont un électron de moins que les atomes du semi-conducteur. Ils capturent un électron de la bande de valence, laissant à leur place un trou. Les électrons de valence voisins des trous peuvent alors se déplacer de proche en proche, et assurer une conductivité électrique par trous.

Il faut ensuite créer *électriquement* un volume de semi-conducteur où coexistent électrons et trous, où un électron va se désexciter en se recombinant avec un trou, l'énergie étant conservée par émission d'un photon.

La méthode utilisée aujourd'hui, car de bien meilleur rendement, est l'injection d'électrons et de trous dans une jonction p-n, composée de deux semi-conducteurs de conductivités opposées (par électron ou trou) accolés (fig. E2a). En faisant passer du courant entre régions n et p, on injecte des électrons depuis la région n qui vont se désexciter avec un trou en émettant un photon. Dans une LED, les électrons sont remontés de la bande de valence dans la bande de conduction par la source de tension/courant extérieure (fig. E2b). Il passe un courant « significatif » quand la tension appliquée est de l'ordre de E_g/e , valeur pour laquelle le potentiel électrostatique de la jonction est compensé par la tension appliquée, et les électrons et trous passent quasi librement d'un côté à l'autre de la jonction (fig. E2c).



E1. Niveaux d'énergie des électrons dans des semi-conducteurs : les électrons se répartissent dans des bandes d'énergies permises, bande de valence ou de conduction. En incorporant de manière contrôlée certaines impuretés chimiques, un semi-conducteur peut posséder des électrons dans la bande de conduction (il est alors dit de type n, pour négatif) ou des manques d'électrons, des « trous », dans la bande de valence (type p pour positif). Il y a émission d'un photon quand un électron cède son énergie potentielle, en tombant de la bande de conduction dans un trou de la bande de valence.



E2. Principe de fonctionnement d'une LED.

- (a) Jonction p-n à l'équilibre : les électrons et les trous à l'interface se sont recombinés, créant un champ électrique E dû aux impuretés ionisées donneuses et accepteuses d'électrons. Ce champ bloque tout passage de charge d'un côté à l'autre de la zone vide de charges libres, appelée zone « désertée ».
- (b) Injection de paires électron-trou dans une jonction p-n. Les charges sont injectées à partir des régions n et p dans la zone désertée. Le surplus d'électrons et de trous se recombine en émettant des photons. Grâce à la source de tension extérieure, des électrons sont « remontés » de la région p à la région n.
- (c) Caractéristique courant-tension de LEDs. Un courant « significatif » apparaît à la tension de « seuil », pour laquelle l'énergie potentielle fournie aux électrons est de l'ordre du *gap*.

>>>

Après la guerre, des matériaux semi-conducteurs de grande pureté et très reproductibles sont obtenus par des procédés de fabrication en conditions de haute propreté. Les années 1950 voient la naissance de semi-conducteurs électroluminescents dans le proche infrarouge, dans le rouge et le vert, et même dans le bleu (avec un rendement extrêmement faible), grâce à la reprise d'expériences sur le SiC par Kurt Lehovec aux USA en 1951. Ce dernier expliquait l'électroluminescence par l'injection et la recombinaison radiative de porteurs hors d'équilibre dans les semi-conducteurs, à partir de la théorie des jonctions p-n. Grâce à la qualité des matériaux émettant dans le proche infrarouge et le rouge, des rendements de conversion électrique-optique proches de 100% étaient atteints dès les années 1960 dans ces domaines de longueur d'onde.

Les découvertes pour obtenir des LEDs bleues

Sans source efficace de lumière bleue, l'éclairage basé sur des lampes blanches à LEDs ne pouvait cependant pas exister. Il fallait des semi-conducteurs de *gap* plus grand pour atteindre les autres couleurs visibles. De nombreux semi-conducteurs candidats ont été identifiés facilement, mais ils se sont révélés très difficiles à produire et utiliser. Seuls les semi-conducteurs « nitrures », à base de composés et d'alliages de la famille (AlGaIn)N ont mené à des performances et à une fiabilité exploitables.

Néanmoins, l'utilisation de ces nitrures nécessitait de relever plusieurs défis. Un premier handicap était le manque de substrats adaptés sur lesquels élaborer des matériaux émetteurs de lumière à haut rendement. Les électrons et les trous étant délocalisés dans les semi-conducteurs, ils peuvent parcourir de nombreux sites cristallins avant de se recombiner. Il faut donc des matériaux monocristallins, avec un ordre atomique quasi parfait. Dans la plupart des cas, on obtient des matériaux de cette qualité par dépôt du composé « actif » sur un matériau faisant office de substrat. Pour qu'il y ait peu de défauts qui mèneraient à des rendements d'émission faibles, il faut que les atomes déposés (par une technique de dépôt appelée « épitaxie ») soient parfaitement « synchronisés » spatialement avec ceux

du substrat, pour éviter les défauts ponctuels ou les défauts linéaires (les dislocations). Il faut donc que substrat et matériau actif aient des mailles cristallines voisines, idéalement qu'ils soient de la même nature chimique. Pour avoir de bonnes propriétés d'émission lumineuse, il faut de plus disposer d'hétérostructures semi-conductrices, multicouches de semi-conducteurs de *gaps* différents (encadré 3), ce qui permet aussi de générer des couleurs différentes. C'est ainsi que l'épitaxie d'alliages de GaN et d'InN, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, permet d'atteindre tout le spectre visible (du proche UV pour GaN au bleu, puis au vert et au rouge, en augmentant le rapport In/Ga). En revanche, les alliages ont des mailles cristallines différentes de celle du GaN sous-jacent, ce qui augmente d'autant la difficulté à atteindre des matériaux de qualité convenable.

Pour le GaN, le premier défi a été d'obtenir des matériaux de bonne qualité avec le saphir (Al_2O_3) comme substrat, les mailles cristallines du saphir et de GaN différant de 14 %. Akasaki et Amano (en 1986) et Nakamura (en 1991) vont inventer l'utilisation d'une couche intermédiaire de nitrure très désordonnée entre substrat et matériau actif, qui va « capturer » une grande partie des défauts, diminuant ainsi leur densité d'un facteur 1000. Il en reste encore une assez forte densité, mais cela n'empêche

plus d'avoir une qualité de matériau suffisante pour obtenir de bons rendements lumineux. Les progrès ont été fulgurants : un gain en rendement d'un facteur 100 en trois ans.

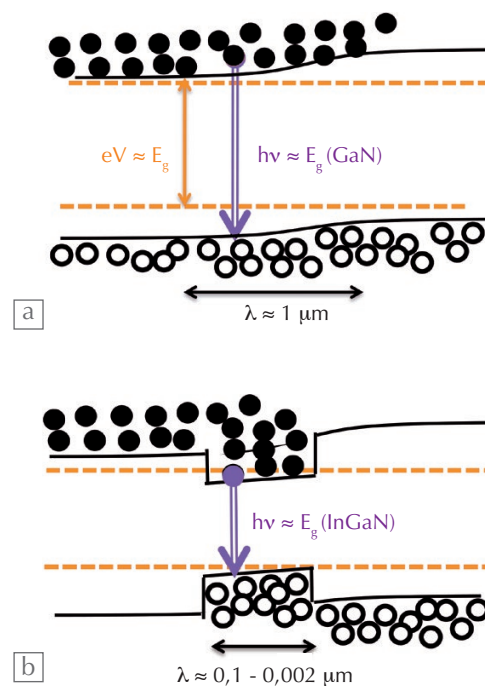
Le deuxième défi posé par les nitrures a été l'obtention de matériau dopé p pour la conductivité par trous, nécessaire pour obtenir des jonctions p-n. On a longtemps pensé qu'il y avait une impossibilité intrinsèque, comme cela est le cas pour d'autres matériaux semi-conducteurs où l'incorporation d'atomes accepteurs est automatiquement compensée par la création d'autant de défauts donneurs. Dans les nitrures, l'effet compensateur est dû à l'hydrogène incorporé pendant la croissance. Au début des années 1990, en éliminant l'hydrogène par recuit sous faisceau d'électrons (Akasaki et Amano), puis par recuit à haute température en atmosphère inerte (Nakamura), des matériaux p très satisfaisants ont été obtenus.

Puis sont venues d'autres avancées majeures :

- l'obtention de couleurs couvrant le spectre visible en variant la composition en indium de la couche active ;
- l'augmentation du rendement quantique par l'utilisation de couches ultraminces d' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, les puits quantiques.

Une grande amélioration du rendement de recombinaison est amenée par l'utilisation d'hétérostructures (fig. 2) : au lieu d'être répartis sur une longueur définie

>>>



2. Diminution du libre parcours moyen λ des porteurs dans une LED à hétérostructure.

(a) Dans une LED à homostructure, les charges sont réparties sur une grande distance, diminuant d'autant le recouvrement des fonctions d'onde d'électrons et de trous.

(b) Dans une LED à hétérostructure, les porteurs sont localisés dans une couche semi-conductrice intermédiaire, de *gap* inférieur.



par le libre parcours moyen avant recombinaison, de l'ordre du micron, les charges peuvent être concentrées dans des hétérostructures. Cela mène à une augmentation des concentrations d'électrons et trous à courant donné, qui accroît la probabilité de recombinaison radiative (pour cette invention décisive pour les lasers à semi-conducteurs pouvant fonctionner à température ambiante, Alferov et Kroemer ont reçu le prix Nobel de physique en 2000).

Les LEDs bleues à l'état de l'art ont aujourd'hui des rendements énergétiques de 60%, se décomposant en 90% de rendement quantique interne (taux de conversion électrique-optique dans le semi-conducteur), 85% d'efficacité d'extraction (taux de sortie des photons de l'intérieur vers l'extérieur du semi-conducteur), 93 % de rendement électrique (limité par les pertes électriques), 85% d'efficacité du composant (pertes dans les fils, absorption optique par le support).

Il faut noter qu'on ne comprend pas complètement pourquoi les LEDs à base de nitrures ont une si bonne efficacité. Deux points cruciaux sont discutés dans l'encadré 4.

De la LED bleue aux lampes blanches

Ayant des LEDs bleues, on peut composer leur lumière avec d'autres sources émettant des couleurs complémentaires pour obtenir une lumière blanche. Deux voies s'ouvrent : (i) associer des LEDs de couleurs complémentaires, ou (ii) prendre la lumière d'une LED bleue et la combiner avec celle émise par des matériaux fluorescents (des « phosphores ») excités par cette diode. Les deux méthodes sont utilisées, mais la seconde constitue plus de 95% du marché.

Une « bonne » source lumineuse résulte du compromis entre efficacité spectrale (beaucoup de lumens par watt optique, voir encadré 2) et bon rendu des couleurs (qui nécessite dans le spectre des composantes qui impressionnent peu la rétine). C'est pour cela que les lampes LEDs de même technologie ont une efficacité plus faible quand leur température de couleur est plus faible (couleur « chaude » contre couleur « froide ») ; pour une même puissance optique émise, la lumière de la source chaude a une efficacité spectrale plus faible, compensée pour l'utilisateur par un meilleur rendu des couleurs.

Les lampes à incandescence ont des efficacités de 15 lumens par watt (lm/W)

(émettant surtout dans l'infrarouge), les lampes fluorescentes ou à décharge délivrent de 50 à 80 lm/W, les bonnes lampes à LEDs commerciales sont aujourd'hui au-dessus de 100 lm/W.

Les limites physiques de la conversion d'électricité en lumière blanche

L'efficacité spectrale maximum d'une lampe blanche avec un rendu des couleurs « raisonnable » est de l'ordre de 400 lm/W. On peut espérer atteindre un rendement énergétique de 60% (ceci correspondrait à un rendement énergétique de la seule LED bleue au-dessus de 90%, car il y a de nombreuses sources de pertes dans une lampe). On peut donc attendre dans le futur des lampes avec une efficacité lumineuse de 240 lm/W, le double d'aujourd'hui.

L'impact des LEDs dans le secteur de l'énergie

Les LEDs doivent permettre de diviser par au moins deux la consommation d'électricité (15 à 20 % aujourd'hui) pour l'éclairage à l'échéance 2030. Cela nécessitera de très hautes performances. L'essentiel de la production de lumière, exprimée en lm.h, est obtenu aujourd'hui à partir de sources à haute efficacité, 60 lm/W et plus (lampes à décharge et tubes fluorescents), en usages extérieurs, industriels ou commerciaux, où l'usage moyen est de plus de 12 h par jour contre 1,8 h en résidentiel. Dans ces utilisations, la lampe à LEDs est directionnelle et a une grande homogénéité d'illumination : à nombre de photons émis égaux, les lampes à LEDs nécessitent deux fois moins de lumens pour obtenir une illumination égale aux lampes classiques et donc, à rendement égal, deux fois moins de puissance électrique. Dans les coûts, il faut aussi tenir compte de la durée de vie des lampes à LEDs, 100 000 heures comparé à 30 000 heures pour les meilleures lampes à décharge, entraînant une forte réduction des coûts de maintenance. Aujourd'hui, le remplacement des sources traditionnelles par les lampes à LEDs est amorti en deux ans. Dans l'analyse du cycle de vie des lampes, on peut aussi noter que la consommation des matériaux est très diminuée du fait de la durée de vie des LEDs.

► Deux bonnes surprises des nitrures

encadré 4

(mais pas encore complètement comprises)

La première surprise est la très grande efficacité des LEDs en GaN à bas courant. Ce, malgré la très forte densité de dislocations qui existe encore malgré toutes les améliorations des techniques de croissance, 10^6 à 10^8 dislocations par cm^2 , bien au-delà des valeurs qui donneraient un rendement « raisonnable » dans les autres semi-conducteurs. L'hypothèse la plus communément admise est que les électrons sont localisés dès leur injection dans le matériau par des fluctuations de composition chimique entraînant un potentiel localement variable, ce qui évite la propagation des charges vers les défauts.

La deuxième surprise (et un mystère) est que la dégradation des LEDs en fonctionnement est presque inexistante. Pour les semi-conducteurs habituels, la dégradation des émetteurs provenait de la génération de défauts supplémentaires dus à la lumière émise dans la couche. Ce mécanisme de dégradation aurait dû être encore plus efficace pour des émetteurs de photons visibles ou UV, à cause de la bien plus grande énergie des photons émis. En fait, les nitrures génèrent relativement peu de défauts et de dislocations pendant leur fonctionnement : il semble que les nitrures déposés sur saphir, orientés suivant l'axe c de leur structure hexagonale, n'ont pas de contrainte de cisaillement suivant ces plans et que les dislocations ont un glissement très empêché.

L'impact des LEDs dans les pays en voie de développement

Comme cela a été mentionné par le comité Nobel, la lampe à LEDs est très prometteuse pour augmenter la qualité de vie du 1,3 milliard de personnes dans le monde qui n'ont pas accès à l'électricité. Grâce à leur efficacité, les lampes à LEDs peuvent être alimentées à très faible coût par des cellules solaires de faible puissance, de l'ordre du watt, associées à de petites batteries de quelques watt-heures, l'ensemble étant vendu aujourd'hui 10 à 20 euros (un des avantages des lampes à LED est leur tension d'alimentation de l'ordre de 4 V, bien adaptée à la tension des cellules solaires et des batteries).

Dans les régions qui n'ont pas accès à l'électricité, la lumière est actuellement produite par des lampes à kérosène, pour un coût représentant 5 à 20% du revenu annuel par foyer. Pour une lampe produisant 10 lumens et consommant 0,05 litre/h de kérosène, le volume de carburant pendant les 50 000 heures de durée de vie d'une lampe à LED est de 2500 litres, à un coût de 5000 €. Ceci est à comparer aux 60 lumens d'une lampe solaire à LED de 1 W, coûtant 20 €. On obtient six fois plus de lumière pour 0,4 %

du coût (sans compter les avantages pour la santé de la suppression des risques d'incendie et de la pollution intérieure). Les nouvelles possibilités sont multiples : plus d'activités le soir (marchés, magasins, construction, ateliers...), possibilité d'étudier plus tard à l'école ou à la maison, etc. C'est ce large impact social qui a été aussi reconnu par le comité Nobel.

Vers une mutation de l'éclairage artificiel

Il est probable que la mutation de l'éclairage introduite par les lampes à LEDs sera aussi profonde que celle introduite par la lampe à incandescence. Jusqu'à maintenant, l'éclairage artificiel était limité par les propriétés des sources.

Les lampes à LEDs permettent de nouvelles mises en œuvre, telles que la commande de l'intensité et de la composition spectrale en fonction du besoin instantané. Par exemple, la génération de lumière le matin comportera plus de composante bleue, alors que celle du soir n'en aura plus et ira vers le rouge, pour favoriser la sécrétion de mélatonine, l'hormone qui aide à l'endormissement et dont la sécrétion est supprimée par la composante bleue de la lumière naturelle ou artificielle.

Trois débats au sujet des LEDs

- (1) Les économies d'énergie prédites supposent un besoin constant de lm.h. Certains envisagent un effet rebond : la lumière devenant moins chère et plus agréable, on en utiliserait plus.
- (2) La lumière bleue présente un danger pour la rétine à grande intensité. Or les LEDs possèdent plus de composante bleue que les autres sources.
- (3) L'utilisation de changements spectraux pour mieux adapter la lumière au cycle circadien pourrait aussi mener en cas de mauvaise utilisation à des désynchronisations du cycle.

Ces problèmes ne sont pas des freins réels à l'utilisation de lampes à LEDs, mais ils requièrent un suivi et des études pour les utiliser au mieux. ■

En savoir plus

L'historique du développement des LEDs est rappelé dans le communiqué Nobel, disponible sur le site : www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/advanced.html

On trouve un document sur les LEDs extrêmement complet, gratuit et remis à jour annuellement, "Solid State Lighting R&D Plan", sur le site du département américain de l'énergie : http://energy.gov/sites/prod/files/2015/06/f22/ssl_rd-plan_may2015_0.pdf