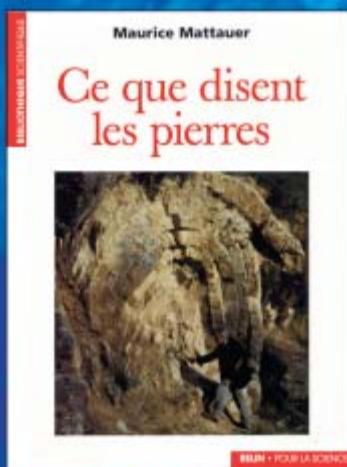




CE QUE DISENT LES PIERRES Maurice Mattauer

Ce livre vous convie à une promenade illustrée dans l'univers des pierres. À partir de l'image, Maurice Mattauer, professeur de géologie à l'Université de Montpellier, reconstitue l'histoire des roches et les grands événements dont elles sont les témoins, et invite à un «retour aux pierres», gage d'une nouvelle compréhension de la nature.

Code 075001 • 100 F
144 pages

**Voir bon de commande
page 98**

BELIN • POUR LA SCIENCE

source de nombreux conflits avec les apothicaires du voisinage. En ouvrant, le 13 janvier 1997, une unité de préparation des chimiothérapies anticancéreuses dans le Service de pharmacie, l'hôpital améliore la qualité des soins et des traitements tout en assurant la protection du personnels vis-à-vis de médicaments actifs, mais toxiques.

L'ensemble de ces innovations entraîne une augmentation importante de la dépense, qui passe de trois millions et demi de francs au début du XX^e siècle à plus de 37 millions, en 1997. Signalons toutefois que la dépense en médicaments consommés par les patients hospitalisés représentait cinq pour cent des crédits de fonctionnement en 1898 (un peu plus que les dépenses de cave et de blanchissage) et 4,6 pour cent de ceux de 1997. En fait, on doit noter que la dépense a été remarquablement stable, surtout quand on considère l'extraordinaire apport des médicaments à la guérison des maladies, au XX^e siècle. Cette stabilité est vraisemblablement due à l'industrialisation de la production des médicaments, à la bonne gestion des pharmaciens hospitaliers et à l'augmentation du coût des salaires dans les budgets hospitaliers.

En 1689, l'Hôpital des Incurables mettait au service des malades une personne non rémunérée pour sept patients ; l'Hôpital Laennec a fermé avec 1 368 salariés médecins et soignants pour 315 lits, soit 4,3 personnes par malade hospitalisé.

Avec le transfert progressif des malades et du personnel, à partir de juin 2000 dans l'Hôpital Georges Pompidou, l'histoire de cet hôpital, né en 1634 de la volonté de trois généreux

donateurs, prend fin. Les bâtiments classés monuments historiques connaîtront une seconde vie, loin des malades et des souffrances humaines, tandis que les bâtiments récents disparaîtront sous les bulldozers pour laisser place à des logements. Comme dans de nombreuses capitales, le prix des terrains en centre-ville et son corollaire (l'éloignement de la population) auront pour conséquence de reléguer les hôpitaux à la périphérie de l'agglomération urbaine. À travers son histoire, l'Hôpital Laennec illustre les péripéties cycliques de la médecine en France.

Laennec : un plaidoyer pour une médecine de qualité

Cette histoire exceptionnelle par sa durée et par son unité de lieu, d'un établissement de santé au cœur d'une capitale européenne, mériterait d'être méditée au moment où l'hôpital public et les acquis d'une médecine d'excellence sont remis en cause. L'évolution extraordinaire des soins et des traitements a été le fruit de la curiosité tenace et des initiatives audacieuses de praticiens engagés dans une compétition acharnée, et secondés par une administration... parfois dépassée, malgré (ou à cause de) l'accroissement importante de ses effectifs.

La spécialisation médicale est aujourd'hui remise en cause. Pourtant elle n'a pas empêché les reconversions incessantes et rapides liées aux impératifs de santé toujours plus exigeants, aux nouvelles techniques et à un savoir sans cesse plus élaboré, et qu'une mobilisation efficace des équipes soignantes a rendu possibles.

Alain DAUPHIN, dernier chef du Service de pharmacie de l'Hôpital Laennec, dirige le Service de pharmacie et le Laboratoire de toxicologie du Groupe hospitalier Cochin, à Paris. Christine MAZIN-DESLANDES, dernier cadre préparateur de l'Hôpital Laennec, exerce aujourd'hui dans le Service de pharmacie du Groupe hospitalo-universitaire Necker-Enfants malades.

Compte-rendu du Conseil de surveillance, Assistance publique, 1922 à 1955.

Personnel des établissements, Assistance publique, Archives AP-HP, 1871 à 1913, 1918-1929.

P. BOUSSEL, *La pharmacie hospitalière à Paris à travers les siècles. L'Hôpital et l'aide sociale à Paris*, Numéro spécial :

la pharmacie à l'hôpital, vol. 24, pp. 725-734, 1963.

F. CHAST et P. JULIEN, *Cinq siècles de pharmacie hospitalière 1495-1995*, Éditions Hervas, Paris, 1995.

Catalogue de l'exposition du Musée de l'Assistance publique-Hôpitaux de Paris, *Depuis 100 ans, la société, l'hôpital et les pauvres*, éditions de l'AP-HP, 1996.

A. DAUPHIN et C. MAZIN, *Histoire de la pharmacie de l'Hôpital Laennec à Paris*, Paris, 1999.

Ch. DE SINGLY, A. DAUPHIN, M. VOISIN, A.M. MOULIN, A. CONTREPOIS, *De l'Hôpital des Incurables à l'Hôpital Laennec, 1634-2000*, Éditions Hervas, Paris, 2000. (Les illustrations non créditées de l'article sont tirées de cet ouvrage)

Les diodes éclairent le futur

GEORGE CRAFTORD • NICK HOLONYAK • FREDERICK KISH

Les diodes électroluminescentes sont de plus en plus utilisées, et les diodes blanches remplaceront bientôt les ampoules à incandescence découvertes par Edison il y a plus d'un siècle.

En 1995, la Fondation des sciences et de la technologie du Japon a remis, comme chaque année, le prestigieux Prix du Japon à deux scientifiques du monde entier pour leurs découvertes originales en sciences ou en technologies ; Nick Holonyak, inventeur des diodes électroluminescentes, fut récompensé pour ses travaux pionniers sur les semi-conducteurs émetteurs de lumière et sur les lasers. Interrogé sur l'avenir de cette technique, N. Holonyak se contenta de pointer le doigt vers les lampes du plafond et professa : « Tout ceci va disparaître. »

De grands changements sont en cours dans le monde de l'éclairage et de l'électronique, grâce à des dispositifs semi-conducteurs : les diodes électroluminescentes. Ces diodes sont des petites lumières, rouges ou vertes le plus souvent, présentes, par exemple, dans les ordinateurs. Elles remplacent peu à peu les ampoules classiques à incandescence, dont le filament, parcouru par un courant électrique, s'échauffe par effet Joule à plus de 2 500 °C, et émet de la lumière. Pourquoi les diodes électroluminescentes détrônent-elles les ampoules centenaires ? Parce qu'elles convertissent l'électricité en lumière colorée plus efficacement que leurs cousines à incandescence ; pour la lumière rouge, par exemple, l'efficacité est dix fois meilleure. Les diodes sont également plus résistantes : certaines, composées de nitrure de gallium, fonctionnent plus de 100 000 heures, soit dix ans en utilisation régulière, tandis que les ampoules à incan-

descence ont une durée de vie 100 fois plus courte, en moyenne. Parce que leur intensité est aujourd'hui suffisante et que la palette de couleurs qu'elles offrent est large, on utilise les diodes pour fabriquer de grands écrans d'affichage. L'exemple le plus impressionnant est sans doute l'écran géant, haut de huit étages, du Nasdaq, à New York.

Les ingénieurs s'efforcent de réduire les coûts de fabrication, d'améliorer le rendement et d'élargir encore le choix des couleurs disponibles, en y intégrant la couleur blanche. Cette couleur résulte de la somme de toutes les longueurs d'onde et, par conséquent, on ne peut pas la produire directement. Il est déjà possible de combiner les lumières de diodes électroluminescentes rouges, vertes et bleues pour produire une lumière blanche, mais de telles diodes restent onéreuses. Dès qu'elles seront bon marché, elles supplanteront les ampoules à incandescence inventées par Thomas Edison.

70 pour cent des voitures déjà équipées

Les diodes électroluminescentes rouges et orange remplacent déjà les ampoules à incandescence dans de nombreuses applications. Dans l'automobile par exemple, 60 à 70 pour cent des voitures produites en Europe utilisent des diodes électroluminescentes pour les feux de freinage (les États-Unis s'orientent dans la même direction). On utilise des diodes également pour les feux arrière, les cli-

gnotants et les feux latéraux des bus et des poids lourds. D'ici une dizaine d'années, elles seront utilisées pour la plupart des feux extérieurs, rouges et orange, des véhicules. Les feux de signalisation routière en utilisent aussi de plus en plus.

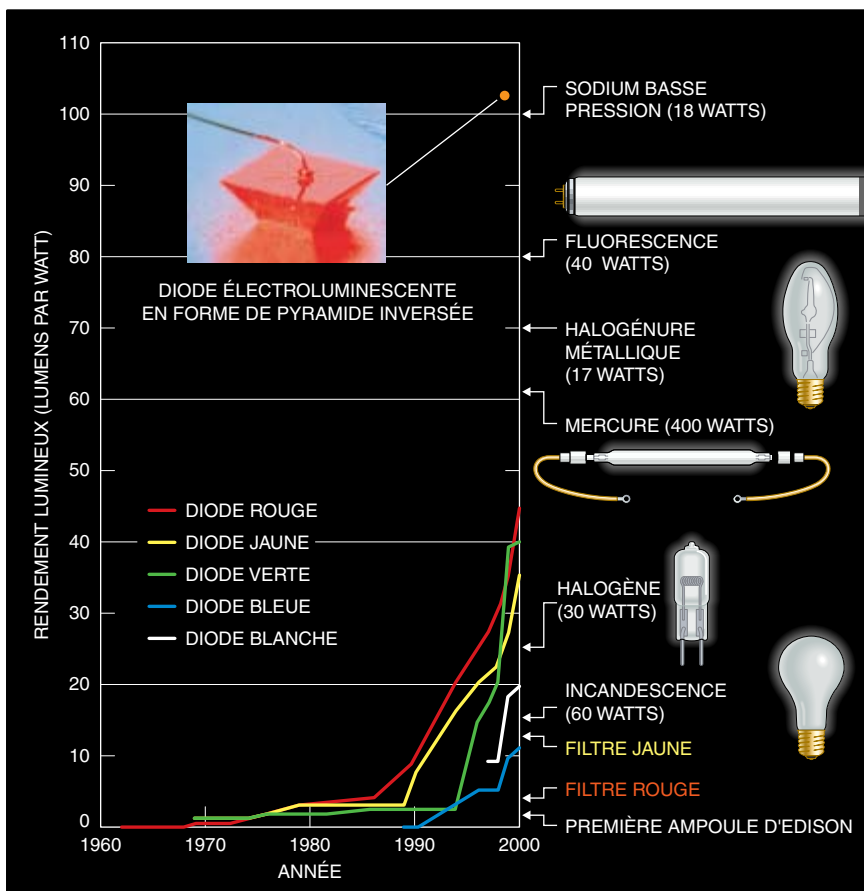
Jusqu'à présent, les feux de signalisation et les autres lampes colorées étaient des ampoules à incandescence recouvertes d'un filtre teinté. Même si les ampoules émettent une lumière qui ne coûte que quelques centimes par lumen (l'unité de mesure du flux lumineux), c'est une façon peu efficace de produire de la lumière. Un filtre rouge, par exemple, bloque environ 80 pour cent de la luminosité, de sorte que la puissance de la lumière émise par l'ampoule passe d'environ 17 à quatre lumens par watt.

Certes, chaque lumen issu d'une diode électroluminescente rouge revient à environ 90 centimes, mais la lumière émise a directement la couleur souhaitée. En outre, ces diodes ne consomment que 10 à 25 watts, tandis qu'une ampoule à incandescence de luminosité comparable consomme entre 50 et 150 watts. Ainsi, l'économie d'énergie compense le surcoût de la diode électroluminescente en un an seulement. Enfin, les coûts d'entretien et de main-d'œuvre des diodes électroluminescentes sont inférieurs à ceux des ampoules.

1. LE PLUS GRAND ÉCRAN du monde contient quelque **18 677 760** diodes électroluminescentes couvrant une surface de près de **1 000** mètres carrés. Il est placé sur la tour du marché des nouvelles technologies, le Nasdaq, à New York.



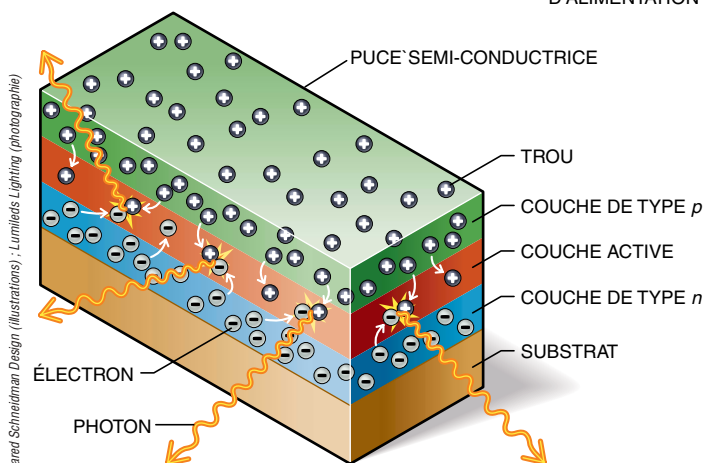
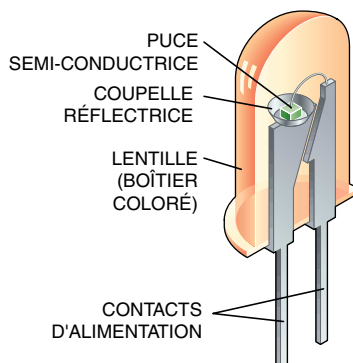
Peter Murphy



2. LES DIODES ÉLECTROLUMINESCENTES ont aujourd'hui un meilleur rendement que beaucoup d'autres types de lumière. La plus performante est une diode prototype de couleur rouge-orangée en forme de pyramide inversée.

3. LA PUCE À SEMI-CONDUCTEUR est l'élément principal de la diode électroluminescente. Une différence de potentiel appliquée sur la puce semi-conductrice repousse, vers la couche active, des «trous» (des «charges positives») de la couche de type *p*, et des électrons de la couche de type *n*. Lorsqu'ils se rencontrent, ils libèrent des photons. La «couleur» de ces photons, c'est-à-dire leur longueur d'onde, dépend de la composition chimique des couches, et non des boîtiers colorés dans lesquels les fabricants logent les diodes de manière à les identifier.

DIODE ÉLECTROLUMINESCENTE :
VUE DE L'INTÉRIEUR



Les architectes d'intérieur se sont intéressés aux diodes dès l'apparition des premiers modèles à haute luminosité et en couleur, il y a quelques années. Ils combinent des diodes électroluminescentes de différentes teintes, et créent ainsi toute une gamme de couleurs. Par exemple, une lumière blanche composée de diodes électroluminescentes rouges, vertes et bleues devient plus «froide» quand on éteint la plupart des diodes rouges et qu'on allume les bleues.

Cette flexibilité va bouleverser notre utilisation de la lumière. Jusqu'à présent, pour modifier la luminosité dans une pièce, on changeait le papier peint ou l'on repeignait la pièce d'une autre couleur. Aujourd'hui, inutile de sortir les pinces : on ajuste la proportion des différentes longueurs d'onde émises, en jouant sur les combinaisons de diodes électroluminescentes. Le *Metropolitan Museum of Art* à New York, par exemple, a déjà choisi ce type d'éclairage pour illuminer une exposition des costumes des Beatles, en 1999 ; cet éclairage met en valeur les costumes et n'endommage pas les étoffes, car la source ne dégage pas de chaleur. De même, les photographes peuvent désormais contrôler les sources de lumière artificielle sans recourir aux différents filtres placés devant les projecteurs.

La recherche médicale s'intéresse également aux propriétés de ces diodes. Dans la lutte contre le cancer, par exemple, elles facilitent le traitement local des tumeurs, par photochimiothérapie. Cette méthode vise les tumeurs malignes peu volumineuses pour lesquelles les moyens thérapeutiques classiques sont inutilisables ou inefficaces. Tout d'abord, on injecte par voie intraveineuse un agent photosensible. Il est capté préférentiellement par le tissu tumoral, qui l'élimine plus lentement que les tissus normaux. Puis on active cet agent par un rayonnement lumineux dont la longueur d'onde est adaptée ; la substance devient toxique pour les tissus quand elle est activée, de sorte qu'elle détruit les cellules cancéreuses qui ont fixé l'agent photosensible. Grâce à des assemblages de diodes électroluminescentes, on produit ainsi un faisceau uniforme qui stimule les substances photosensibles sans chauffer la peau, car les diodes électroluminescentes ne sont pas des sources lumineuses chaudes.

Au cœur d'une diode

Pour observer en détail les diodes électroluminescentes, prenons par exemple un feu rouge de bicyclette. À l'intérieur se trouvent deux piles reliées à un circuit contenant une série de cylindres transparents et incolores, de quelque huit millimètres de hauteur et cinq millimètres de diamètre : ce sont les diodes électroluminescentes. Appuyez sur le bouton «marche» et elles deviennent rouges, avec une intensité si forte qu'on a du mal à les fixer. Si vous les arrêtez, puis que vous les examinez de près, vous verrez un fil se faufilant à travers le dispositif et une sorte de coupelle miniature à mi-hauteur. Cette coupelle est un réflecteur, où se trouve une puce de la taille d'un grain de sable, le «cœur» de la diode électroluminescente. Cette puce est constituée d'un empilement de couches : la première, déposée sur un support, présente un excès d'électrons ; elle est dite de type n (pour «négatif»). Une autre, située au-dessus de la puce, présente au contraire un déficit d'électrons, ou encore un excès de particules chargées positivement, nommées «trous». Ce matériau est de type p (pour «positif»). À la jonction de ces deux couches n et p se trouve la couche dite active, d'où la lumière est émise. Lorsqu'une tension est appliquée, les électrons et les trous se dirigent vers la couche active, où ils se rencontrent, se «recombinent» et émettent des photons. Schématiquement, les électrons présents dans la couche active se désolent en «tombant» dans un trou et émettent un photon. La nature et la struc-



4. LES DIODES ÉLECTROLUMINESCENTES BLANCHES existent, mais il faudra attendre une dizaine d'années avant qu'elles ne deviennent assez puissantes pour éclairer une pièce et assez bon marché pour qu'elles soient compétitives avec les ampoules classiques.

ture atomique des différentes couches déterminent le nombre de photons émis (soit le rendement de la diode électroluminescente), ainsi que leurs longueurs d'onde.

Dans les premières diodes électroluminescentes rouges, fabriquées dans les années 1960 à partir de gallium, d'arsenic et de phosphore, les électrons rencontraient rarement les trous : un seul photon rouge était émis pour 1 000 électrons qui migraient dans la couche active. Une telle diode produisait moins d'un dixième de la lumière produite par une ampoule à incandescence de puissance comparable et pourvue d'un filtre rouge. Peu à peu, le rendement des diodes électroluminescentes augmenta, surtout vers les longueurs d'onde situées dans la zone rouge du spectre visible. Aujourd'hui, le rendement interne des diodes rouges atteint 100 pour cent, c'est-à-dire que chaque électron produit un photon. Cependant, ces photons restent piégés dans la puce, et

l'on doit «extraire» cette lumière. Ainsi, le rendement réel (ou externe) des diodes électroluminescentes rouges est d'environ 25 pour cent.

Les chercheurs ont augmenté le rendement en modifiant la composition des couches. Ils les «dopent» avec des atomes différents, nommés des «impuretés». Ce dopage modifie les caractéristiques des couches. Examinons l'exemple le plus simple, le silicium. Il appartient au groupe IV de la classification périodique des éléments, c'est-à-dire qu'il possède quatre électrons disponibles pour des liaisons avec quatre autres atomes. Dans la forme cristalline du silicium, chaque atome partage ses électrons avec les atomes adjacents. Les électrons sont engagés dans ces liaisons et ne sont pas libres de se déplacer. Lorsqu'un petit nombre d'atomes du groupe III de la classification périodique, ayant trois électrons sur leur niveau d'énergie le plus élevé, par exemple le bore, sont incorporés dans un cristal de silicium, le nombre d'électrons participant aux liaisons entre les atomes est insuffisant, et des déficits d'électrons apparaissent localement, ce qui crée des trous et rend donc ce matériau – du silicium dopé au bore – de type p . Inversement, lorsque le silicium est dopé avec du phosphore (du groupe V du tableau périodique), qui a cinq électrons disponibles, le cristal a un excès d'électrons, ce qui rend le matériau de type n . Les électrons en surnombre sont libres de se déplacer. Dans les diodes électroluminescentes, le cristal n'est pas du silicium pur, mais un mélange d'éléments des groupes III et V, tels l'aluminium, le gallium, et

Diodes électroluminescentes et lasers

Quelle est la différence entre les diodes électroluminescentes et les diodes lasers ? Les deux types sont constitués de matériaux semi-conducteurs, mais ce sont des dispositifs très différents.

Les diodes lasers sont composées d'un matériau semi-conducteur placé entre deux miroirs séparés par ce que l'on nomme une «cavité de résonance». Lorsque de l'électricité traverse le semi-conducteur, il y a émission de photons, qui sont réfléchis sur les parois de la cavité dans un sens, puis dans l'autre. Ce faisant, ils excitent des électrons qui émettent, à leur tour, des photons de la même longueur d'onde. L'intensité lumineuse augmente et, parce qu'ils se réfléchissent de conserve sur les miroirs, tous les photons «marchent au pas» : ils sont en phase (on dit aussi qu'ils sont cohérents). L'un des miroirs est



LES LECTEURS DES CODES-BARRES contiennent des lasers à semi-conducteurs.

semi-réfléchissant et permet à quelques photons de s'échapper, tous de même longueur d'onde et de même phase. Ils produisent un faisceau de lumière étroit, monochromatique et intense. Ce faisceau est l'une des principales caractéristiques d'un laser. Acéré comme un scalpel, il est utilisé pour balayer et lire les sillons des disques compacts ou les codes-barres.

Au contraire, dans les diodes électroluminescentes, les photons ne sont pas confinés dans une cavité, entre deux miroirs : ils sont «incohérents». La lumière, sous forme d'un faisceau large et diffus, est composée de plusieurs longueurs d'onde, qui sont pourtant assez proches pour que l'œil les perçoive comme étant de la même couleur.

Que la lumière blanche soit

Les diodes électroluminescentes fabriquées aujourd'hui émettent des longueurs d'onde dans l'ensemble du spectre visible, entre 400 nanomètres et 750 nanomètres. La couleur d'une diode électroluminescente classique dépend du semi-conducteur utilisé : avec les phosphures, on obtient des longueurs d'onde allant du rouge au jaune-vert et, avec les nitrures, du vert au bleu. En revanche, la lumière blanche ne correspond pas à une longueur d'onde précise, mais à un mélange de plusieurs longueurs d'onde. La production de lumière blanche à partir de diodes électroluminescentes nécessite la combinaison de plusieurs couleurs.

Étudions un diagramme de chromaticité : toutes les couleurs visibles sont représentées. Quand on dispose d'une diode rouge (R), d'une verte (V), et d'une bleue (B), on peut les combiner et produire une multitude de couleurs en jouant sur l'intensité de chacune d'elles, et l'on peut même obtenir une lumière blanche. Les diodes blanches sont ainsi souvent constituées d'une diode rouge,

d'une bleue et d'une verte. On peut aussi utiliser une diode ultraviolette dont les photons excitent un mélange de matériaux dits « convertisseurs du lumière », qui, en se désexcitant, émettent des photons « rouges », « verts » et « bleus », qui forment une lumière blanche. Cette deuxième méthode est moins efficace que la première, car on perd beaucoup de photons par dispersion et par absorption dans le matériau fluorescent.

On peut produire une lumière blanche en combinant trois couleurs, mais aussi deux, le bleu et le jaune, par exemple. En pratique, la puce d'une diode bleue à base de nitrure de gallium est recouverte d'un matériau convertisseur de lumière, qui transforme une partie des photons « bleus » émis par la diode électroluminescente en photons « jaunes », par une succession d'excitations et de désexcitations avec émissions de photons. La proportion de photons bleus convertis dépend de l'épaisseur du matériau convertisseur. En ajustant le nombre de photons bleus et jaunes, on obtient une lumière blanche. Cette troisième solution est moins onéreuse que les précédentes. En revanche, le dépôt du convertisseur nécessite une étape supplémentaire par rapport à l'utilisation directe des diodes de couleur.

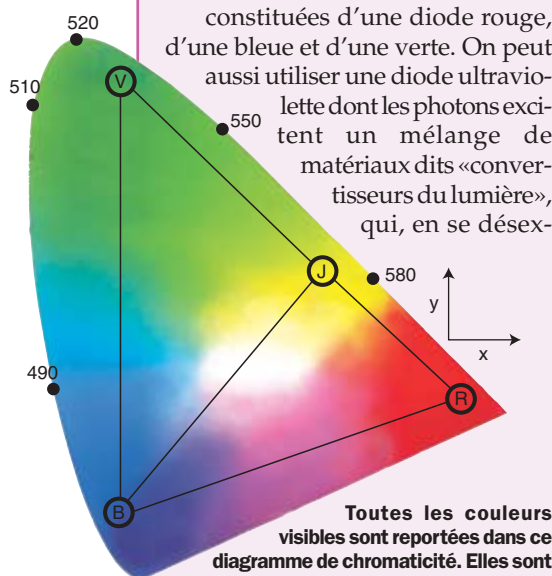
Nous avons mis au point une autre solution, qui supprime le dépôt du matériau convertisseur et réduit le coût de fabrication : on produit simultanément les photons bleus et jaunes au cœur même de la puce. Dans cette nouvelle diode blanche, la zone active de la puce (où se recombinent les électrons et les trous) n'est plus constituée d'une seule couche, mais de plusieurs, composées de différents matériaux semi-conducteurs (des nitrures de gallium capables d'émettre d'autres longueurs d'onde que le bleu-vert). Chacune des couches émet des photons d'une longueur d'onde particulière, et les photons de « couleur » différente produits par chacune des couches se combinent en une lumière blanche. Nous cherchons à optimiser le choix des longueurs d'onde et à ajuster le nombre de couches et leurs positions respectives, afin d'obtenir un blanc éclatant.

Nicolas GRANDJEAN, Centre de recherche sur l'hétéroépitaxie et ses applications à Sophia-Antipolis (CNRS)

l'indium et le phosphore par exemple, dopés avec du tellure ou du magnésium. En ajustant avec précision la concentration des éléments constitutifs, les physiciens fabriquent des diodes électroluminescentes qui émettent des longueurs d'onde rouges, orange ou jaunes. Au début des années 1970, la luminosité des diodes rouges contenant du phosphore et de l'arséniure de gallium était suffisante pour les premières calculatrices et pour les horloges à affichage numérique.

Des progrès ont encore été réalisés quand les chercheurs ont découvert que l'empilement de matériaux différents améliorerait le rendement interne de la diode. En effet, les premières diodes électroluminescentes étaient des homojonctions. Elle étaient composées d'une même couche, dopée de façon à être *n* sur une face et *p* sur l'autre, mais ne contenaient pas de couche active. Les diodes de deuxième génération sont des hétérojonctions : une couche de composition différente est introduite entre les couches *n* et *p*. Cette couche active très mince (quelques épaisseurs d'atomes) crée un « puits de potentiel » entre les couches *n* et *p*, où les électrons et les trous se recombinent. Cette couche augmente la probabilité de recombinaison et, par conséquent, le rendement.

Enfin, les cristaux que l'on fabrique aujourd'hui sont quasiment dépourvus de défauts, ce qui augmente le rendement des diodes. Une des techniques utilisées est le dépôt en phase vapeur : des gaz maintenus à haute température sont canalisés au-dessus du substrat ; ils se dégradent à cause de la température élevée, et leurs produits de décomposition se déposent en un film mince. Cette technique a été utilisée pour la première fois pour la fabrication industrielle de diodes électroluminescentes par la société Monsanto, à la fin des années 1960. En 1977, Russell Dupuis, de l'Université du Texas, mit au point un procédé différent de dépôt en phase vapeur utilisant des gaz froids dirigés sur le substrat chaud. Cette technique permet la croissance d'une grande variété de matériaux et a ouvert la porte à la fabrication des diodes de haute qualité. Shuji Nakamura, aujourd'hui à l'Université de Santa Barbara, développe chez Nichia Chemical Industries (Japon) une variante de cette



Toutes les couleurs visibles sont reportées dans ce diagramme de chromaticité. Elles sont représentées par leurs coordonnées chromatiques (x, y). Les couleurs qui constituent le contour supérieur du lobe sont des couleurs dites pures, car elles correspondent à une longueur d'onde précise (indiquée en nanomètres). Les diodes rouge (R), verte (V) et bleue (B) définissent un triangle, à l'intérieur duquel chaque couleur peut être obtenue en jouant sur l'intensité de chacune des diodes. On obtient ainsi la couleur blanche en ajoutant des photons « verts », « rouges » et « bleus », ou aussi des photons « bleus » et « jaunes » grâce à une diode jaune (J).

technique pour fabriquer, en 1993, un cristal de nitrure de gallium qui émettait de la lumière bleue, la couleur qui manquait à la panoplie des diodes électroluminescentes. En effet, les photons bleus ont une longueur d'onde plus courte, et doivent avoir une énergie supérieure à celle des photons rouges ou orange : ils sont plus difficiles à produire.

Enfin, dans la course au rendement, Michael Krames et ses collègues de la Société *Hewlett-Packard* ont établi un record en 1999 en fabriquant des diodes électroluminescentes rouges qui ont un rendement réel de plus de 55 pour cent. Ils ont enlevé le substrat (une tranche d'arséniure de gallium) originel, l'ont remplacé par une tranche transparente de phos-

phure de gallium, puis ils ont sculpté une diode en forme de pyramide inversée. Cette forme diminue le nombre de réflexions internes et augmente notablement la quantité de lumière qui s'échappe de la puce.

Une autre technologie de diodes électroluminescentes est fondée sur des matériaux organiques. L'électroluminescence des composés organiques a été observée dès les années 1960 sur l'anthracène, puis sur des polymères organiques semi-conducteurs. Depuis les années 1990, les diodes électroluminescentes organiques sont très étudiées, surtout pour la fabrication d'écrans plats flexibles. Ces diodes sont brillantes, bon marché, et disposent d'une large gamme de longueurs d'onde. Cependant, leur

Les diodes électroluminescentes éclairent les profondeurs

Lorsque les biologistes veulent filmer des animaux vivant dans les eaux profondes, tels les cachalots, ils se heurtent à de nombreuses difficultés. Ces mammifères plongent à plusieurs milliers de mètres de profondeur, où il fait nuit noire et où la pression est très élevée. En outre, toute lumière visible modifie le comportement des animaux et de leurs proies, les attire ou, au contraire, les fait fuir. L'éclairage sous-marin classique est inadapté pour les films en profondeur.

En revanche, on peut utiliser des diodes électroluminescentes compactes qui émettent une lumière dont la longueur d'onde est proche de l'infrarouge, visible par une bande vidéo, mais... pas par les animaux. Placées dans un cylindre métallique, les diodes fonctionnent comme des phares invisibles : elles illuminent les animaux présents à deux ou trois mètres de distance, sans modifier leur comportement. Le dispositif contient aussi une caméra automatique et divers équipements, tels des microphones, des capteurs

de profondeur, de température, de direction et de vitesse. Cette «caméra» est assez compacte pour être placée sur le dos d'une baleine, d'un phoque, d'un dauphin, d'un pingouin, d'une otarie, etc. On observe alors les animaux à travers les yeux de leurs congénères. À la fin du tournage, un boîtier se détache automatiquement de la caméra et remonte à la surface.

Cette caméra qui filme dans l'obscurité est le résultat de 14 années d'expérimentation. Lorsque les premières diodes électroluminescentes bleues furent commercialisées, il y a environ quatre ans, elles coûtaient 250 francs pièce, mais elles émettaient une lumière trop visible pour

les animaux qui nageaient aux alentours. En revanche, des caméras contenant des diodes électroluminescentes dont la longueur d'onde est proche de l'infrarouge évitent cet écueil, et ont été fixées sur divers animaux marins. Les biologistes ont ainsi découvert des comportements qui n'avaient jamais été observés auparavant, tels des phoques soufflant des bulles ou «chantant» lors de rituels amoureux.



CACHALOTS éclairés par les diodes électroluminescentes d'une caméra sous-marine.



Color Kinetics (haut gauche) ; Lumileds Lighting

5. LES APPLICATIONS des diodes électroluminescentes se multiplient. Quelques exemples : éclairage de vitrines et d'exposition, par exemple celle des costumes des Beatles, au *Metropolitan*

Museum of Art, à New York (a) ; feux de signalisation routière (b) ; enseignes lumineuses (c) ; tableaux de bord, clignotants et feux arrière d'automobile (d).

durée de vie reste très limitée, en comparaison des diodes électroluminescentes inorganiques.

Le grand espoir blanc

Les physiciens s'attaquent maintenant à la fabrication de diodes électroluminescentes blanches. On trouve déjà des diodes blanches dont l'efficacité est légèrement supérieure à celles des ampoules à incandescence. Certaines sont utilisées pour éclairer les écrans des téléphones cellulaires et les tableaux de bord dans certaines voitures. Leur puissance atteint environ 15 lumens par watt. En revanche, les diodes pour l'éclairage et les illuminations des monuments, par exemple, nécessitent une puissance de 100 lumens par watt. Les bénéfices potentiels d'une lumière blanche produite par des diodes bon marché sont énormes. Le marché mondial de l'éclairage lumineux est en effet estimé à 70 milliards de francs. C'est pourquoi les trois principaux acteurs de l'éclairage – *Philips*, *Osram Sylvania* et *General Electric* – investissent autant dans la recherche et dans le développement des diodes électroluminescentes blanches. Au lieu des ampoules de verre fragiles, brûlantes, remplies

de gaz, qui ne durent pas très longtemps et qui gaspillent la plupart de leur énergie sous forme de chaleur, nous pourrions disposer de meilleures sources d'éclairage. Les diodes électroluminescentes d'une automobile, par exemple, dureraient aussi longtemps que la voiture elle-même, et l'énergie de la batterie économisée grâce à ces diodes servirait à l'électronique à bord.

La société tout entière en tirerait profit. L'éclairage représente 20 à 30 pour cent de la consommation d'électricité des pays développés. Les systèmes d'éclairage standard ne convertissent au mieux que 25 pour cent de l'électricité en lumière. Si les diodes électroluminescentes blanches parvenaient à l'efficacité des diodes rouges disponibles aujourd'hui, les besoins en énergie diminueraient, et

la quantité de dioxyde de carbone émise dans l'atmosphère par les centrales électriques serait réduite de 300 mégatonnes par an. Cette perspective est attractive, mais le remplacement à grande échelle de l'éclairage public ne se fera pas avant une dizaine d'années. Aujourd'hui, les meilleures diodes électroluminescentes blanches coûtent environ trois francs par lumen, 10 à 20 fois plus qu'une ampoule à incandescence. Il faudra réduire les coûts et convaincre les consommateurs d'adopter les diodes électroluminescentes, plus chères à l'achat, mais qui durent plus longtemps. Toutefois, ils se laisseront sans doute convaincre par la solution d'avenir que représentent ces diodes : elles consomment peu d'énergie, de sorte qu'elles participent moins au réchauffement de la planète que les ampoules classiques.

George CRAFTORD, qui mit au point la première diode électroluminescente jaune, travaille à la Société *LumiLeds Lighting*, à San Jose. Nick HOLONYAK est professeur de physique et d'électronique à l'Université de l'Illinois. Frederick KISH dirige le département recherche et développement de la Société *Agilent Technologies*.

Bob JOHNSTONE, *We Were Burning : Japanese Entrepreneurs and the Forging of the Electronic Age*, Basic Books, 1999. Charles T. WHIPPLE, *Replacing the Light Bulb*, in *Photonics Spectra*, vol. 33, n° 12, pp. 104-109, décembre 1999. Neil SAVAGE, *Leds Light the Future*, in *Technology Review*, vol. 103, n° 5, pp. 38-44, septembre/octobre 2000.

