

Éclairage LED : la chimie au service de la qualité de la lumière

D'après la conférence de Gautier Renoux, co-président du groupe Renoux et dirigeant de plusieurs d'entreprises liées à la production de diodes électroluminescentes (LED).

1 Historique de l'éclairage

L'éclairage au fil du temps

Depuis cinquante ans, le secteur de l'éclairage a connu trois révolutions technologiques majeures. On est passé de l'ampoule Edison, apparue

à la fin du xix^e et au début du xx^e siècle, qui était une ampoule à incandescence¹, à

1. Une ampoule incandescente utilise la lumière créée par le passage d'un courant électrique dans un filament métallique fin. Cette émission de lumière est d'origine thermique.

Contexte : évolution des sources

- Incandescente → Fluocompacte → LED
 - Mutation profonde de l'éclairage
 - 3 ruptures technologique en 50 ans.

Figure 1

L'évolution technologique de la lumière.



Figure 2

Rappel sur l'origine de la perception de la couleur.

Les promesses de la LED

- Efficacité et faible consommation
- Longue durée de vie et robustesse
- Compacité et flexibilité
- Facilité de fabrication

Figure 3

Les avantages de l'éclairage LED par rapport aux autres technologies.

l'ampoule fluorescente², bien connue sous le nom d'ampoule à économie d'énergie, puis à la technologie LED (**Figure 1**). Ces transformations ont profondément bouleversé les producteurs d'ampoules : on est passé d'une ère où l'ampoule était indispensable pour s'éclairer à celle de la LED, qui inaugure l'ère du luminaire, rendant l'ampoule elle-même facultative.

La **figure 2** est une illustration volontairement simplifiée pour rappeler ce qu'est la lumière. Les objets ne produisent pas de lumière. Ce que nous percevons, c'est la lumière réfléchie par un objet, ce qui nous permet d'en apprécier la couleur, la texture et la forme. C'est la lumière blanche qui révèle la nature de l'objet : avec une lumière de mauvaise qualité, comme illustré ici, la perception que nous en avons sera elle aussi de mauvaise qualité.

L'arrivée de l'éclairage LED

La LED a apporté de nombreuses promesses (**Figure 3**), dont la première est celle d'une efficacité énergétique et d'une faible consommation, une promesse qui a été tenue. Son efficacité dépasse largement celle des anciennes ampoules : on est passé d'une ampoule à filament de 100 W à une fluocompacte d'environ 25 W, et aujourd'hui, pour obtenir un flux lumineux équivalent, une source de seulement 6 W suffit. La longue durée de vie et la robustesse sont également

2. L'ampoule fluorescente est un enroulement de tube, dans lequel un gaz est excité par des électrons, produisant ainsi de la lumière.

une réalité, car le semi-conducteur qui produit cette lumière blanche, la LED, offre une durée de vie très élevée lorsqu'il est bien utilisé.

La compacité est un autre atout, car on parvient désormais à produire des photons³ dans un espace très réduit, avec des capacités de production lumineuse très élevées.

Enfin, la facilité de fabrication est évidente si l'on compare la production de tubes sous vide ou de tubes fluocompacts contenant de la vapeur de mercure à la fabrication d'un semi-conducteur.

Quelques limites sont toutefois illustrées par les deux spectres présentés sur la **figure 4**. Le premier correspond à celui d'une LED classique, et le second à celui du spectre solaire. On constate que certaines couleurs manquent dans le spectre de la LED, et qu'un pic de lumière bleue est présent.

Nous avons tous entendu parler des problèmes liés à la lumière bleue⁴, que ce soit avec les écrans ou avec l'éclairage à LED. On observe notamment une vallée spectrale dans les bleus turquoise, ainsi qu'une montée dans les teintes chaudes. Ainsi, contrairement à l'incandescence, qui reproduisait le spectre parfait du Soleil, le spectre de la LED ne le respecte pas parfaitement.

3. Les photons sont des « particules de lumière ». Nous pouvons ici considérer qu'il s'agit d'unité de lumière.

4. La lumière bleue cause des problèmes de vue. Principalement connue pour être émise par les écrans, elle est aussi émise par d'autres sources de lumière.

2 Les besoins de la chimie pour le futur de l'éclairage

Le mode de fonctionnement d'une LED

Un objectif majeur pour notre entreprise est de corriger cette anomalie spectrale, marquée par la présence de lumière bleue, qui n'est pas acceptable pour un éclairagiste soucieux de concevoir des éclairages plus respectueux de l'Homme et de son confort (**Figure 5**).

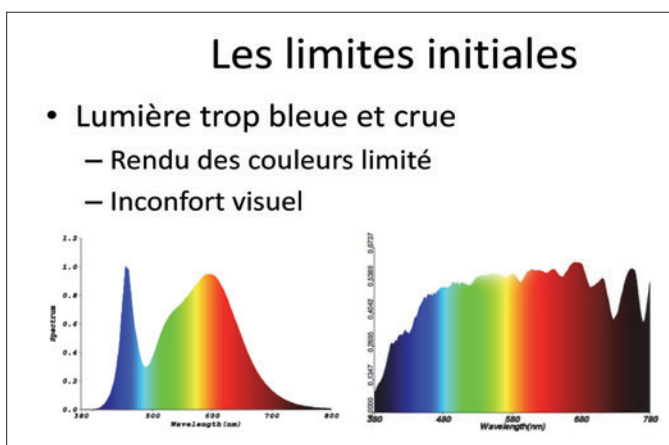


Figure 4

Comparaisons des spectres lumineux d'une LED classique (à gauche) et de la lumière naturelle (à droite).

Performance & efficacité Notre défi actuel

- **Réduire la consommation → réduire l'impact environnemental**
 - Allier qualité de lumière et efficacité énergétique
 - Substrats et phosphores jouent un rôle clé

Figure 5

Les perspectives d'évolutions de la technologie LED.

Pour y parvenir, nous intervenons sur le substrat et le phosphore en traitant le composé semi-conducteur.

Examinons de plus près ce qu'est un semi-conducteur. Schématiquement, on pourrait le comparer à un burger : un empilement de couches de matériaux. On y trouve un corps de lampe « dopé P », riche en électrons libres, une couche active où sont générés les photons, et un semi-conducteur « dopé N » contenant des trous (*Figure 6*). Les électrons, attirés par ces trous, produisent des photons de manière très efficace. L'ensemble repose sur un réflecteur.

La *figure 7* illustre ces couches en place, avec le substrat qui joue à la fois un rôle mécanique et de réflecteur, tout

en mettant en évidence les électrons qui s'échappent du processus.

La composition chimique d'une LED

Le substrat, qui sert de support à la LED, joue un rôle crucial dans la dissipation thermique (*Figure 8*). En effet, l'échange d'électrons génère de la chaleur, qu'il est indispensable d'évacuer pour éviter un vieillissement prématuré de la LED. Sans cette dissipation, les composants de la LED se dégradent, et une surchauffe altère ses performances. Le montage du substrat assure à la fois la stabilité et la fiabilité mécanique du dispositif, en maintenant en place les

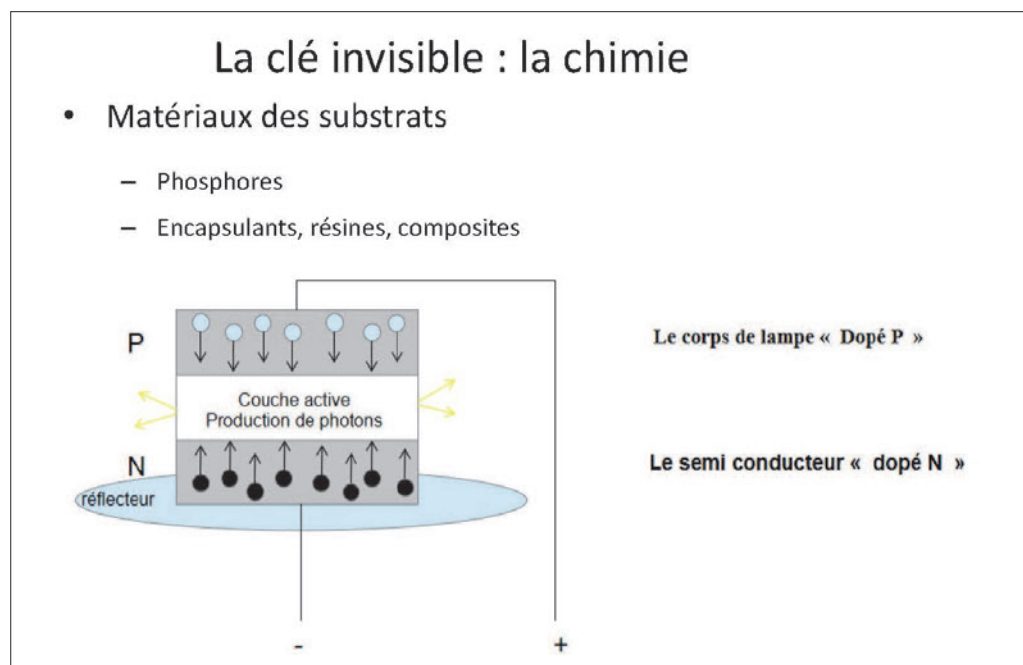


Figure 6

Les composants chimiques d'une LED.

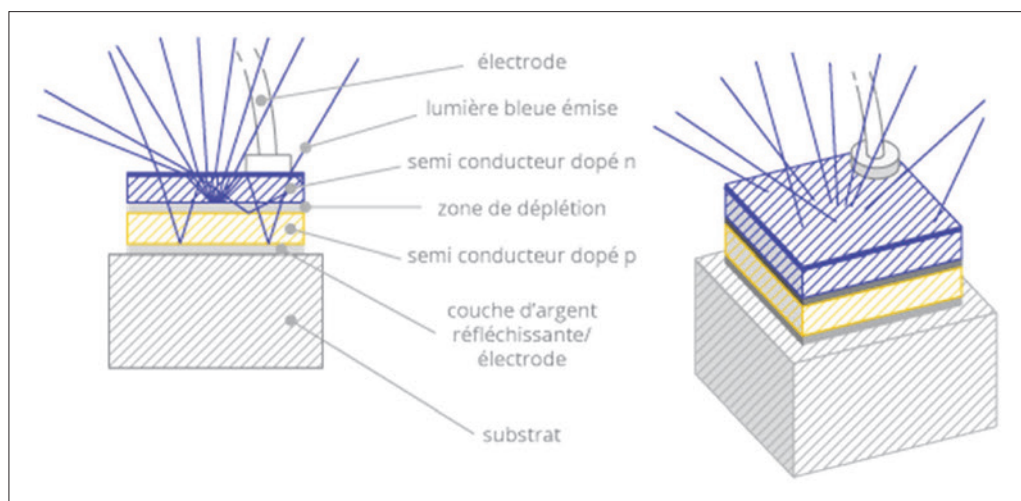


Figure 7

Représentation schématique de l'émission de lumière par une LED.

différents éléments. Enfin, l'efficacité et la performance – c'est-à-dire la manière dont les photons sont dirigés vers le flux lumineux utile – dépendent directement de la conception mécanique de ce substrat.

Grâce à l'utilisation de phosphores, M. Nakamura (lauréat du prix Nobel en 2014 avec I. Akasaki et H. Amano) a réussi à développer des LED aux longueurs d'onde et

aux puissances variées. Un phosphore est un ensemble de matériaux qui permet de contrôler précisément les longueurs d'onde et l'intensité des émissions lumineuses. Cela a permis de concevoir des LED blanches adaptées à l'éclairage, offrant une stabilité suffisante. Il est désormais possible de maîtriser ce qu'on appelle la « température de couleur » (qu'il s'agisse d'un blanc chaud, d'un blanc froid,

Le substrat

- Support de la LED, rôle fondamental
 - Dissipation thermique = lutte contre vieillissement du semiconducteur
 - Stabilité et fiabilité mécanique
 - Performance et efficacité, diriger les photons vers le flux utile.

Figure 8

Illustration du rôle clé d'un composant : le substrat.

etc.), et donc d'obtenir l'ambiance lumineuse souhaitée.

Parlons des phosphores. Leur histoire est fascinante, puisqu'elle a même valu un prix Nobel de physique. Monsieur Nakamura a mis au point une LED bleue à haute puissance. En y ajoutant un phosphore – un composé capable de produire une phosphorescence sous l'effet de

la lumière bleue –, on obtient finalement de la lumière blanche (**Figure 9**). En combinant le bleu avec une phosphorescence jaune, grâce à un phosphore jaune, on parvient à créer du blanc. Enfin, à partir de 1984, on a réussi à produire une LED blanche performante, utilisable pour l'éclairage.

Cette technologie offre une qualité de rendu des couleurs satisfaisante, mais surtout une stabilité chromatique : les propriétés du phosphore permettent de contrôler et d'ajuster la température de couleur, qu'il s'agisse d'un blanc chaud, neutre ou froid. C'est un point crucial, car nous avons tous été confrontés à des ampoules LED bas de gamme, où l'excès de lumière bleue donne un éclairage froid et désagréable.

Les phosphores

• Transformateurs de lumière bleue en blanc

Les travaux sur le nitrure de gallium ont permis de surmonter les difficultés techniques pour obtenir des jonctions p-n et créer des LED bleues de forte intensité. Shuji Nakamura en plus de cette invention a créé un revêtement de phosphore jaune sur une puce de LED émettant de la lumière bleue.

2014 Prix Nobel de physique avec Isamu Akasaki et Hiroshi Amano pour l'invention des diodes électroluminescentes bleues.

- Qualité de rendu des couleurs
- Stabilité chromatique

Figure 9

Explications sur le rôle d'un composant majeur : les phosphores.

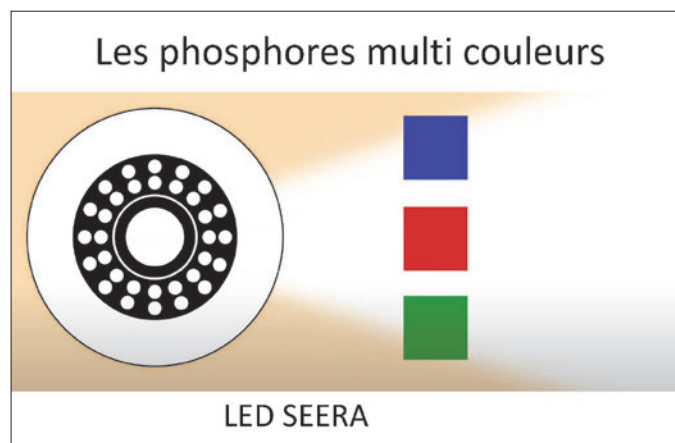


Figure 10

Présentation des phosphores multi-couleurs, une innovation du groupe Renoux.

3 La contribution du groupe Renoux

L'invention des phosphores multi-couleurs

Au sein du groupe Renoux, pour concevoir les LED adaptées à nos besoins en éclairage, nous n'avons pas opté pour la lumière bleue classique, difficile à concilier avec les exigences de qualité lumineuse. Nous sommes partis d'un spectre ultraviolet non visible, que nous filtrons et traitons à l'aide de phosphores tricolores pour reconstituer un blanc parfait (**Figure 10**).

La **figure 11** illustre les résultats obtenus et compare une LED classique à notre LED SEERA. Les anomalies liées au spectre bleu ont disparu, et le spectre obtenu est bien plus homogène. Il offre en

particulier une richesse en nuances, permettant de choisir entre un blanc chaud ou un blanc froid selon les besoins.

L'avancée que représente cette invention : évaluation des résultats

Pour mieux appréhender cette transformation, nous utilisons des phosphores plus épais et plus complexes, ce qui, malheureusement, réduit l'efficacité de la LED. Afin de compenser cette perte, nous employons des substrats plus élaborés, composés de matériaux variés, pour limiter les pertes thermiques (**Figure 12**). Les phosphores, de plus en plus sélectionnés et perfectionnés, sont développés en collaboration avec des entreprises spécialisées en chimie. L'objectif est de les qualifier au mieux et de minimiser les pertes de lumière. Enfin, comme je l'ai mentionné, l'extraction des lumens par watt⁵ reste un critère essentiel, car elle détermine l'efficacité globale du produit final.

Soulignons la qualité de l'outil que représente la LED SEERA. Elle offre aux éclairagistes un moyen précieux pour comparer les qualités de lumière. Par exemple, l'indice de rendu des couleurs (IRC) permet d'évaluer les performances chromatiques d'une LED par rapport à une autre. La **figure 13** présente des diagrammes synthétisant, à

5. Le lumen par watt est une unité de mesure qui permet de quantifier la quantité de lumière émise par unité de puissance électrique fournie.

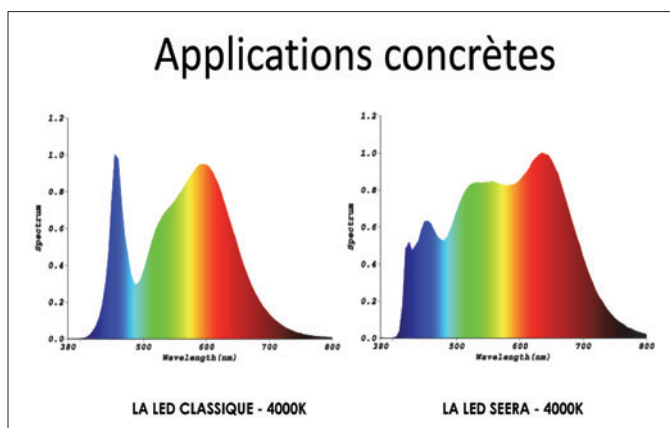


Figure 11

Spectre d'émission lumineuse obtenu avec une LED SEERA utilisant des phosphores multi couleurs.

Efficiency énergétique et qualité lumineuse

- Substrats = moins de pertes thermiques
 - Phosphores = conversion plus efficace
 - Plus de lumens par watt, moins d'énergie consommée

Figure 12

Analyse énergétique des LED SEERA.

La qualité perçue

- IRC, température de couleur, TM-30
 - Confort visuel et bien-être
 - Expérience vécue au-delà des chiffres

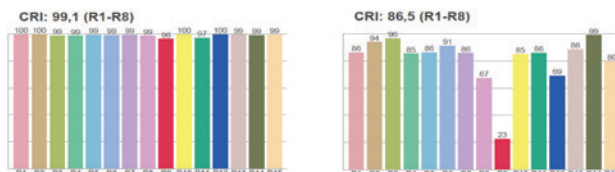


Figure 13

Évaluation de la qualité de l'éclairage à travers l'analyse de plusieurs teintes.

partir des réponses à quinze longueurs d'onde spécifiques, les scores obtenus par la LED testée.

4 Perspective

Les perspectives liées au développement dans le domaine de la chimie sont, bien entendu, les suivantes :

- optimiser au maximum les phosphores pour en améliorer les performances,
- réduire la dépendance aux terres rares,
- privilégier des matériaux plus nobles (*Figure 14*).

L'objectif reste de garantir des performances chromatiques supérieures, tout en explorant des fonctions spécifiques, comme les LED circadiennes. Ces dernières permettent, par exemple, d'adapter la température de couleur au fil de la journée : des blancs chauds le matin, des blancs plus froids en journée et des blancs plus chauds le soir.

Enfin, il est essentiel de se concentrer sur la durabilité et

l'éco-conception, des enjeux majeurs pour notre industrie, comme pour les autres secteurs.

Quelques pistes de réflexion pour les chercheurs, chimistes et électroniciens sur les axes de progrès :

- miser sur la durabilité et la qualité de la lumière plutôt que sur la quantité produite (*Figure 15*). Une question mérite d'être posée : avons-nous réellement besoin d'une telle abondance de lumière ? Si sa qualité est optimale, comme le démontrent les indices de rendu des couleurs (IRC) très élevés, il est possible que nous puissions réduire nos besoins lumineux, et par conséquent, notre consommation énergétique ;
- équilibrer efficacité énergétique et impacts environnementaux liés à l'extraction et à la production. La recherche en chimie, notamment sur les phosphores et les substrats, est cruciale pour renforcer la durabilité des solutions. Cependant, il convient de ne pas se laisser aveugler par la quête exclusive d'efficacité énergétique, qui domine actuellement les priorités de recherche. Un peu de modération s'impose.

Un exemple concret à considérer : aujourd'hui, l'éclairage représente 3,1 % de la consommation énergétique totale d'un foyer français bien équipé en LED, soit environ 25 euros par an. Bien que ce coût ne soit pas négligeable, il reste modeste. Dans ce contexte, est-il vraiment judicieux de privilégier un

Perspectives

- Phosphores moins dépendants des terres rares
- Performance chromatique grandissante
 - LED circadiennes pour le bien-être
 - Durabilité et écoconception
 - Efficience des phosphores et substrat

Figure 14

Les défis chimiques à relever pour l'avenir.

éclairage offrant 5 à 10 lumens par watt supplémentaires, si cela se fait au détriment de la durabilité et de la qualité ? Le jeu en vaut-il vraiment la chandelle ?

Perspective : les vrais progrès !

- Efficience VS Durabilité
- Qualité de la Lumière VS Quantité de lumière
- Efficacité énergétique VS Extraction et pollution de la production.

*Selon RTE, un ménage consomme en moyenne 4792 kWh/an. **3,1 % de cette consommation est dédiée à l'éclairage soit environs 25€.***

Figure 15

Les progrès réalisés par l'invention de la LED SEERA et ses effets concrets.

Conclusion : une ligne de conduite

L'objectif reste d'améliorer sans cesse les performances de nos éclairages, qu'il s'agisse de leur efficacité énergétique ou de leur qualité : optimisation de l'efficacité lumineuse, confort visuel accru, et une chimie innovante au service de la planète et du bien-être humain.

Cela passe notamment par la recherche de nouveaux matériaux, toujours plus respectueux de l'environnement (**Figure 16**).

Conclusion

- Sans la chimie, pas de qualité de lumière
 - Performance + efficience + confort visuel
 - La chimie au service de la planète et de l'humain

Figure 16

L'importance de la chimie dans l'éclairage.