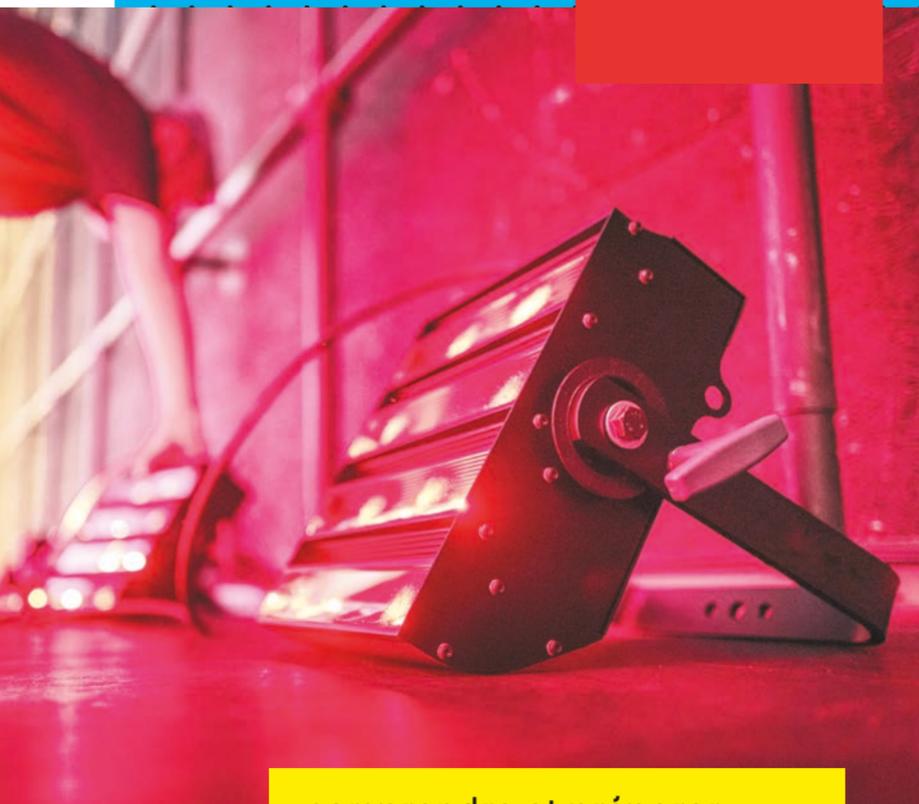


agence  
culturelle  
grand est



comprendre et préparer  
la transition vers la LED

guide

**comprendre  
et préparer  
la transition  
vers la L€D**

agence culturelle grand est.  
édition

Halogènes, tubes fluos, lampes à décharge... etc. Les sources d'éclairage utilisées pour le spectacle vivant sont nombreuses. Les lampes halogènes qui équipent nos Plans Convexes ou découpes se taillent néanmoins la part du lion.

Mais ça c'était avant, et cet avant constitue pour beaucoup de techniciennes et techniciens la plus grande part de l'histoire de leur métier. Les salles de diffusion et de création de spectacles sont conçues en ce sens et sont innervées d'arrivées électriques afin d'alimenter chaque projecteur depuis un gradateur, lui-même piloté par un pupitre.

Après avoir conquis les salles de musiques actuelles, la LED faisait son apparition sur les scènes de théâtre et était souvent réservée à un usage spécifique, notamment quand la quantité d'électricité manquait ou quand la recherche esthétique pouvait être secondaire. Car oui, le projecteur à LED ne cohabitait pas les cases attendues du théâtre : qualité et température de couleur de la lumière blanche, qualité de la couleur, puissance, silence de fonctionnement, gradation. Les blancs, pour ne parler que d'eux, étaient si peu qualitatifs qu'il était inimaginable d'en mettre sur scène.

Cette image-là, d'inadéquation avec l'éclairage scénique, a collé à la peau des projecteurs à LED alors que bien des injonctions politiques encourageaient d'y porter les investissements sous couvert de développement durable. Les techniciennes et techniciens du spectacle vivant s'affichaient alors en réfractaires du changement.

Puis, la LED a mûri. Après avoir montré sa valeur qualitative, sa gestion des blancs,

de la température de couleur et des couleurs, elle pouvait prendre toute sa place sur scène. Le mur des réticences allait commencer à s'effriter. Les avantages de la LED sur l'halogène sont maintenant indéniables.

Malgré cela, les freins à sa généralisation sur scène sont réels :

- On sait « travailler » l'halogène et dès lors, pourquoi changer ?

- La LED demande un fort investissement financier. Outre les projecteurs et le pupitre à renouveler, la distribution électrique est à repenser et les réseaux numériques à généraliser.

- La programmation des pupitres est nouvelle ainsi que l'usage même des projecteurs. La formation et l'envie de changement sont des incontournables.

- L'artiste doit habituer son regard à une nouvelle lumière, mais aussi s'ouvrir à de nouvelles possibilités.

Malgré ces freins, le changement est inéluctablement guidé par la directive européenne écoconception qui va vraisemblablement interdire la vente des ampoules halogènes fin 2024.

Ce guide technique, écrit par Nicolas Fandard du domaine d'O, lieu référence du passage à la LED, est un appui sans faille pour vous accompagner dans ce changement.

Quand ce dernier sera fait et abouti, la généralisation des projecteurs automatisés viendra, ce qui permettra d'améliorer la sécurité des techniciennes et techniciens en limitant le travail en hauteur.

Voilà encore une évolution à venir.

		page
1	LES PRÉALABLES	5
2	LA LED: TYPOLOGIES ET TECHNOLOGIES	35
3	LA LED: QUESTIONS ESTHÉTIQUES	59
4	LA LED: BÉNÉFICES, INCONVÉNIENTS ET ADAPTATIONS	71
5	GÉRER LA MUTATION DES MÉTIERS DE LA LUMIÈRE	99
6	CONCLUSION: ET DEMAIN?	135
	LEXIQUE	139

les termes **sur fond jaune** renvoient au lexique

1

# LES PRÉALABLES

la lumière et la LED

6

physique et technique

10

# la lumière et la LED

L'apparition et le déploiement des sources LED sont à l'origine d'une profonde transformation des usages en vigueur dans le secteur d'activité du théâtre. Elles mettent un terme à plus d'un siècle de règne de l'éclairage incandescent. Pour beaucoup d'intervenants du secteur, cette mutation de l'halogène vers la LED survient de façon brusque et soudaine. Pour autant, s'agit-il vraiment d'une révolution ? Comment la LED s'inscrit-elle dans l'évolution des sources d'éclairage pour le spectacle ? Son adoption est-elle souhaitable et justifiée ?

## DE LA LUMIÈRE DU JOUR À LA FLAMME

La lumière naturelle émise par le soleil a été la seule source d'éclairage jusqu'à la domestication du feu (- 400 000 ou peut-être - 560 000 ans, cette date est actuellement en discussion). Par la suite, la flamme a constitué la seule source d'éclairage artificielle jusqu'au milieu du XVIII<sup>e</sup> siècle où apparurent les premières expérimentations d'éclairage électrique.

Les **premières représentations théâtrales** se sont tenues pendant l'Antiquité, durant toute cette période les spectacles étaient joués en plein air et éclairés par la lumière naturelle dont les variations (depuis le lever, jusqu'au coucher du soleil) pouvaient être exploitées. À cette époque, pour tenter d'expliquer le phénomène lumineux, les philosophes émettent l'hypothèse d'un rayon émis par l'œil qui permettrait la vision (théorie de l'émission).

Plus tard, à l'**époque médiévale**, après une interruption de quelques siècles, les spectacles réapparaissent dans les églises où, dès le XI<sup>e</sup> siècle, ils sont éclairés par la lumière extérieure filtrée par les vitraux, avec le soutien de quelques chandelles. Entre les XIII<sup>e</sup> et XVI<sup>e</sup> siècles, tout en conservant leur nature liturgique, les spectacles sortent des églises pour en occuper leurs parvis, puis les places publiques des cités.

À la **Renaissance** (XVII<sup>e</sup> siècle), les premiers spectacles en salle ont partiellement continué à être éclairés par la lumière naturelle à travers des fenêtres donnant sur l'extérieur (théâtre du Marais à Paris, théâtre de Schouwburg à Amsterdam) avant de totalement laisser la place aux chandelles. À cette époque, René Descartes pose les bases de l'optique géométrique et Isaac Newton met en évidence la composition chromatique de la lumière par sa décomposition en différents rayonnements lumineux colorés, parvenant ainsi à une avancée considérable dans l'explication du phénomène physique de la lumière.

## DE LA FLAMME AU FILAMENT

Les chandelles composées de suif de mouton (ou de bœuf) et d'une mèche de chanvre, ne fournissent pas un éclairage généreux, elles sont onéreuses, doivent être souvent remplacées (leur durée de vie n'est que de 20 minutes) et se consomment en produisant une épaisse fumée et une forte odeur, toutes deux très inconfortables.

Les premiers perfectionnements des appareils d'éclairage thermique apparaissent à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle et se manifestent par des **lampes à huile** équipées de réflecteurs (lampe Argand, Quinquet) dont la capacité d'éclairage est (selon les différentes sources) 6 à 12 fois supérieure à celle d'une chandelle.

Au début du XIX<sup>e</sup> siècle, **le gaz et l'électricité** vont permettre la mise au point de nouveaux systèmes d'éclairage complètement innovants. Le pouvoir éclairant du gaz est environ 2 fois supérieur à celui de l'huile mais sa combustion produit beaucoup de fumée et le risque d'incendie est immense, son usage commence à être abandonné à la suite de plusieurs drames (200 morts à l'opéra de Nice et 384 morts au théâtre du Ringtheater de Vienne la même année, en 1881. 84 morts à l'Opéra-comique de Paris en 1887).

En remplaçant le gaz dans les théâtres dès la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, l'électricité annonce les débuts de l'éclairage contemporain. Après avoir adapté les lampes aux anciens becs de gaz et utilisé les canalisations pour y placer les câbles, l'électricité permet l'apparition de nouveaux appareils d'éclairage mobiles et de plusieurs sources d'éclairage de natures différentes (lampe à incandescence, lampe à arc, tube fluorescent). Le pouvoir éclairant d'un arc électrique est environ 50 fois supérieur à celui du gaz.

L'arrivée de l'électricité a permis une vraie révolution de l'éclairage scénique en affirmant la fonction dramaturgique de la lumière, en permettant l'arrivée de nouveaux effets spectaculaires et en offrant les conditions favorables à l'apparition de l'éclairagiste.

## DE L'INCANDESCENCE À L'ÉLECTROLUMINESCENCE

**Aujourd'hui, les sources à incandescence encore majoritairement utilisées au théâtre, sont en voie de disparition et l'utilisation de la Diode Électroluminescente (LED) semble être la seule alternative. Le projecteur d'éclairage était un objet électrique, il devient un objet électronique.**

Le principe de la LED fût découvert il y a plus d'un siècle (Henry Round, 1907) en appliquant une tension aux bornes d'un cristal de carbure de silicium. À la même époque, Albert Einstein décrit la nature de la lumière en définissant le photon, ouvrant ainsi la porte à de nouvelles applications (notamment le LASER). Parallèlement, le développement de la photométrie (Voir aussi : La photométrie, p.12) et de la colorimétrie (Voir aussi : La colorimétrie, p.24), soutenu par la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), accompagne les innovations du secteur de l'éclairage.

En 1962 Nick Holonyak met au point la première LED émettant un rayonnement rouge et établit avec elle une préfiguration de la lampe du futur. Toutefois, les premières applications se limitent à l'utilisation des LED comme voyants lumineux. En 1972, George Craford conçoit la première LED émettant un rayonnement jaune puis en 1993 les travaux de Shuji Nakamura permettent l'apparition de la première LED émettant un rayonnement bleu qui permettra d'aboutir en 1995 à la première LED « blanche ». Le **premier projecteur à source LED** fût présenté en 1997 par la société Color Kinetics lors du salon de Dallas (Lighting Dimensions International, LDI).

Depuis sa naissance, la LED blanche n'a cessé de se développer et de se perfectionner. Au début des années 2000 avec l'introduction des **premières LED « de puissance »**, tous les grands groupes du secteur de l'éclairage se sont emparés du développement des LED « blanches » en intervenant sur le perfectionnement des différents éléments qui la composent (semi-conducteur, **substrat**, alimentation, boîtier...) (Voir aussi : Le fonctionnement d'une LED, p.36) pour en améliorer l'efficacité lumineuse et la composition chromatique. À partir du début des années 2010, la LED commence à procurer un éclairage performant et de qualité.

La LED destinée à l'éclairage est le fruit de longues années de recherches. Cette innovation a été permise grâce à la généralisation de l'électricité et aux avancées de la recherche scientifique qui se sont produites au long du XX<sup>e</sup> jusqu'au début du XXI<sup>e</sup> siècle.

Aujourd'hui la LED tente légitimement de **s'affirmer comme l'évolution la plus aboutie d'une longue lignée de sources d'éclairage artificiel**. Cette évolution n'est pas achevée et ne le sera certainement que lorsqu'une nouvelle technologie viendra la remplacer en mettant un terme à son développement. L'ardeur déployée en Recherche et Développement (**R&D**) par les différents acteurs du secteur, a produit en très peu de temps des résultats qualitatifs et quantitatifs surprenants. L'état actuel de cette technologie convient tout à fait aux exigences esthétiques d'un éclairage de spectacle, pourtant, un certain nombre d'utilisateurs de matériel d'éclairage du secteur du spectacle vivant s'inquiète de son niveau de maturité et de sa versatilité, s'interroge sur la nécessité de remplacer les lampes à incandescence et repousse l'échéance du changement.

En bouleversant les usages et les représentations, l'adoption de la LED est incontestablement à l'origine d'un **changement qu'il faut gérer et accompagner**. Cette transformation n'a que très timidement et très récemment commencée dans le secteur d'activité du théâtre, elle semble pourtant inéluctable. Il semble cohérent que l'éclairage de scène se synchronise avec son époque, durant toute l'histoire de l'éclairage scénique les sources et les appareils d'éclairage n'ont cessé d'évoluer et de se perfectionner en bénéficiant de la recherche et du développement mis en œuvre pour l'éclairage industriel et domestique.

# physique et technique

Pour aborder sereinement la technologie LED, il faut pouvoir en apprécier les différentes caractéristiques et en mesurer l'efficacité.

La lumière est un phénomène physique très complexe à appréhender et souvent contre-intuitif. Au cours de l'histoire, différents modèles se sont succédés ou opposés pour tenter de la représenter et ses aspects mystérieux ont toujours été à l'origine de nombreuses métaphores. Comment évaluer et décrire les performances des sources LED ? Selon quels critères observables, quels principes physiques et quelle valeur esthétique ?

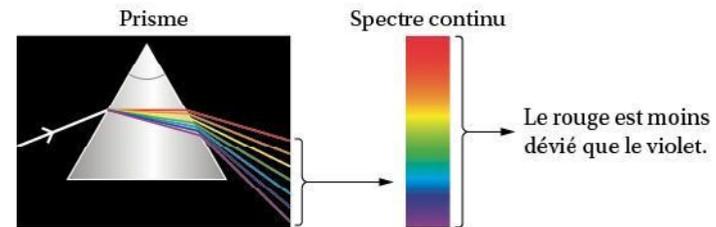
## LA DÉFINITION DE LA LUMIÈRE

Au XVII<sup>e</sup> siècle, Isaac Newton affirme que la lumière est de nature corpusculaire (particule de matière) tandis qu'au début du XIX<sup>e</sup> siècle, Thomas Young et Augustin Fresnel affirment au contraire que la lumière est de nature ondulatoire. Depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle, à la suite des travaux de Max Planck puis d'Albert Einstein, il est admis que la lumière est un phénomène beaucoup plus complexe, à la fois corpusculaire et ondulatoire.

La lumière est une énergie générée par la matière et peut se représenter sous la forme d'une particule d'énergie (**le photon**) et d'une **onde électromagnétique**. C'est le **déplacement ondulatoire** très rapide (environ 300 000 km/seconde) du photon qui constitue le rayonnement lumineux. L'ensemble de ces différents rayonnements lumineux colorés, mis en évidence par

Isaac Newton au XVII<sup>e</sup> siècle, compose toute la gamme du spectre « visible » par l'œil humain. Ces rayonnements dont les longueurs d'ondes sont comprises entre 380 et 780 nanomètres environ, sont interprétés par notre système optique comme un dégradé de couleur « arc-en-ciel ».

### Dispersion de la lumière par un prisme



© digiSchool

Depuis l'apparition au XIX<sup>e</sup> siècle d'appareils et de sources de lumière de plus en plus performants, la nécessité d'évaluer la « quantité de lumière » ainsi que ces différentes caractéristiques colorimétriques est bien réelle. Malgré l'incontestable complexité de compréhension et de perception humaine du phénomène lumineux, il était nécessaire de trouver le moyen d'y parvenir.

## Zoom sur le photon

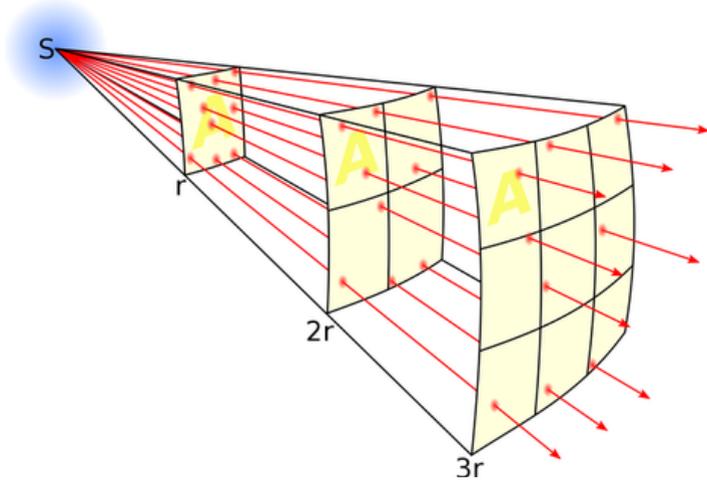
Le photon est une particule de masse et de charge électrique nulles. A l'échelle terrestre la vitesse du photon semble incroyablement élevée : il parcourt 7,5 fois le tour de la terre en 1 seconde, d'après la théorie de la relativité d'Einstein cette vitesse est indépassable. Le photon a la capacité de se propager dans le vide (particularité des ondes électromagnétiques) et donc de voyager dans l'univers, ce qui permet à la lumière du soleil de nous parvenir, dès que l'on commence à prendre un peu de recul en s'éloignant de la Terre, sa vitesse de déplacement est beaucoup moins impressionnante :  
Le photon parcourt la distance de la Terre à la Lune en 1,25 seconde, il parcourt la distance de la Terre à Mars en 3 minutes et 2 secondes, il parcourt la distance de la Terre à Proxima du Centaure (étoile la plus proche de notre système solaire) en 4 ans et 3 mois, il parcourt la distance de la Terre jusqu'au centre de notre galaxie en plus de 25 000 ans, il parcourt la distance de la Terre à Andromède (galaxie la plus proche de la nôtre) en 2,5 millions d'années !

# LA PHOTOMÉTRIE

## La définition

La photométrie a pour objectif d'évaluer le rayonnement lumineux tel qu'il est perçu par la vision humaine et d'étudier la transmission de ce rayonnement d'un point de vue quantitatif. Les bases de la photométrie ont été rassemblées dans un livre publié en 1729 par Pierre Bouguer à qui la paternité du premier photomètre ainsi que la **loi en carré inverse** sont attribués, même s'il en existe des traces plus anciennes. Cette discipline a réellement commencé à se développer à partir du moment où le perfectionnement des appareils d'éclairage est devenu un enjeu économique et technologique suffisamment important pour qu'il devienne nécessaire de comparer convenablement leurs différentes performances.

### Loi en carré inverse



© Wikipédia - Borb

Loi physique postulant qu'une quantité physique (énergie, force, ou autre) est inversement proportionnelle au carré de la distance de l'origine de cette quantité physique.

La naissance de la Commission Internationale de la Photométrie (lors de l'exposition universelle de Paris en 1900) est une initiative de l'industrie du gaz pour tenter de résister au succès du développement de l'électricité. Elle fût pourtant remplacée en 1913 par la **Commission Internationale de l'Éclairage (CIE)** en incluant l'industrie de l'électricité. Au début de la photométrie, les valeurs dépendaient de l'appréciation de chaque opérateur qui les effectuait. Au XX<sup>e</sup> siècle, des standards de perception visuelle humaine ont été établis permettant aux données photométriques d'être obtenues par

calcul indépendamment de toute appréciation subjective d'un observateur. La CIE a énormément contribué au développement de la photométrie. Elle a procédé à la constitution de correspondances précises entre les mesures radiométriques et la perception visuelle, à la mise en place d'unités de grandeurs standardisées et au développement de protocoles de mesures.

La photométrie repose sur la **radiométrie**. Toutes les données photométriques sont issues de mesures radiométriques. La photométrie réalise des calculs en utilisant les mesures de l'énergie du rayonnement lumineux effectuée par radiométrie à l'aide d'un photorécepteur (capteur optique) et en utilisant les standards établis de la perception visuelle. **Les quatre mesures radiométriques et leurs correspondances photométriques sont : l'intensité, le flux, la luminance et l'éclairement.** Elles permettent de caractériser le pouvoir rayonnant d'une source ou d'une surface réceptrice. **Le flux quantifie le débit lumineux, l'intensité quantifie son taux de concentration, l'éclairement quantifie sa densité surfacique et la luminance quantifie le taux de concentration lumineux perçu par l'œil.** Les représentations mentales de ces valeurs ne sont pas toujours intuitives. **En radiométrie, on parle de flux, d'intensité, de luminance et d'éclairement énergétique. En photométrie, on parle de flux, d'intensité, de luminance et d'éclairement lumineux.**

La radiométrie mesure l'ensemble des ondes électromagnétiques (des rayons  $\gamma$  aux ondes radio) tandis que la photométrie n'étudie que la perception humaine des ondes permettant la perception visuelle.

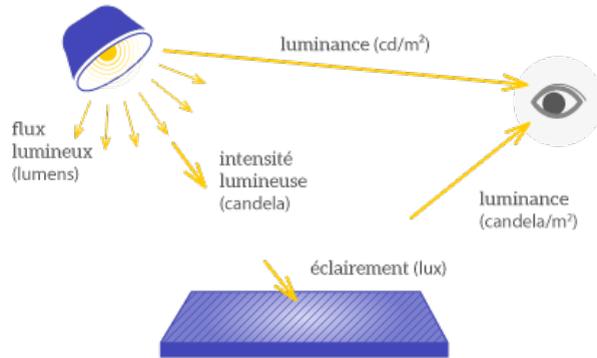
### Les quatre mesures radiométriques et leurs correspondances photométriques

Unités photométriques	
Intensité lumineuse	Candela (cd)
Flux lumineux	Candela stéradian (cd.sr) ou lumen (lm)
Luminance lumineuse	Candela par m <sup>2</sup> (cd.m <sup>2</sup> )
Éclairement lumineux	Candela stéradian par m <sup>2</sup> (cd.sr.m <sup>2</sup> ) ou lux (lx)

Unités radiométriques	
Intensité énergétique	Watt par stéradian (W.sr)
Flux énergétique	Watt (W)
Luminance énergétique	Watt par stéradian par m <sup>2</sup> (W.sr.m <sup>2</sup> )
Éclairement énergétique	Watt par m <sup>2</sup> (W.m <sup>2</sup> )

Seule la candela est reconnue par le système international (SI), le lumen et le lux ne le sont pas.

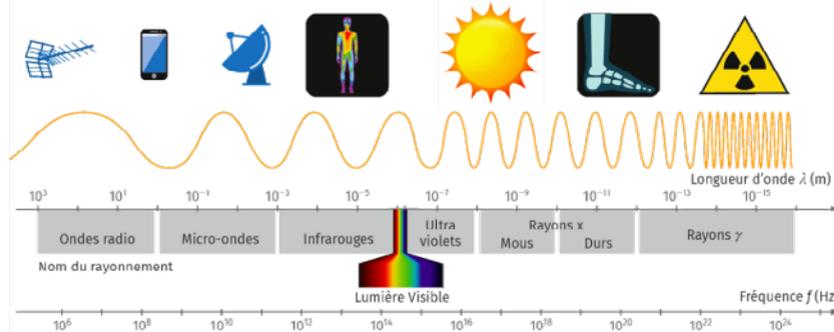
## Les grandeurs photométriques



© 2023 leclairage.fr

Selon la longueur d'onde, on classe le spectre électromagnétique en sept sous-domaines principaux : les rayons  $\lambda$ , les rayons X, les ultraviolets, le visible, les infrarouges, les micro-ondes et les ondes radio.

## La grande famille des ondes électromagnétiques



© Lelivrescolaire.fr

## Le flux lumineux

Le **flux lumineux** (exprimé en lumen) est devenu l'information photométrique la plus facilement disponible. Il nous permet d'évaluer la quantité de lumière d'une source ou d'un appareil d'éclairage. Le flux lumineux d'une source nous renseigne sur son pouvoir de rayonnement dans toutes les directions, indépendamment de l'utilisation qui peut en être faite : en effet, **le flux lumineux d'une source lumineuse n'est pas identique au flux lumineux de l'appareil d'éclairage dans lequel elle est destinée à être utilisée. Le flux lumineux sortant de l'appareil d'éclairage (flux lumineux utile) est composé des seuls rayonnements focalisés et dépend donc de la qualité de conception et de réalisation de son système optique pour limiter les rayonnements perdus.** Le rapport entre le flux lumineux utile et le flux lumineux nominal de la source se nomme le rendement lumineux, c'est lui qui nous renseigne sur la qualité du système optique d'un appareil d'éclairage. **Plus un appareil focalise la lumière plus son rendement lumineux est faible** (plus le corps de l'appareil est long, plus la quantité de rayonnements perdus est importante), ainsi une Découpe courte aura un meilleur rendement lumineux qu'une Découpe longue et une cyclode aura un meilleur rendement lumineux qu'une Découpe. Du point de vue du flux lumineux, il est donc important de comparer des appareils de conception optique identique. Le flux, le rendement et l'efficacité lumineuse nous renseigne sur la qualité de conception et de réalisation d'un projecteur.

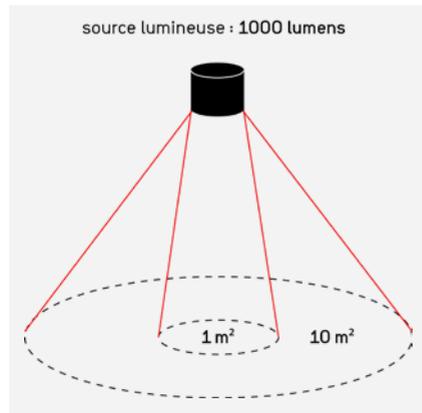
## Les pertes optiques

Dans certains cas les pertes optiques peuvent être considérables. Elles peuvent aussi être variables selon l'ouverture du zoom. Ainsi, selon la valeur de cette ouverture, le flux d'un fresnel HMI 2500W (ex : RJ 326LFV) est beaucoup moins constant que le flux d'une découpe courte HMI 2500W (ex : RJ 933SNX). Ces particularités sont bien liées au système optique du projecteur, non pas à la source de lumière qui dans cet exemple est identique. Les mêmes disparités peuvent se retrouver avec la LED. Le flux lumineux communiqué par le fabricant est toujours celui qui affiche la plus forte valeur, elle correspond à une Tcc spécifique, et à une certaine ouverture de zoom. Par ailleurs, la valeur du flux d'un projecteur mesurée dans une sphère intégrante, est supérieure à celle qui est mesurée sur le terrain à l'aide d'un luxmètre. Il faut donc être attentif aux différentes valeurs de flux.

## L'éclairage lumineux

Les valeurs d'**éclairage lumineux (Lux)** fournissent des renseignements importants pour connaître la quantité de lumière reçue par une surface dans des conditions précises. Pour que ces données soient fiables et utilisables, il faut relever avec précision la valeur d'ouverture du faisceau (**angle solide** du cône de lumière) ainsi que la distance entre la surface réceptrice et la source de lumière. Il faut aussi être vigilant aux conditions de mesures: **selon les fabricants, la mesure de l'éclairage peut s'effectuer uniquement dans l'axe optique du faisceau ou par la moyenne de l'éclairage reçu par la totalité de la surface, les chiffres peuvent alors être très différents pour un même niveau d'énergie lumineuse considéré.**

### Relation entre lux et lumen



© Agence culturelle

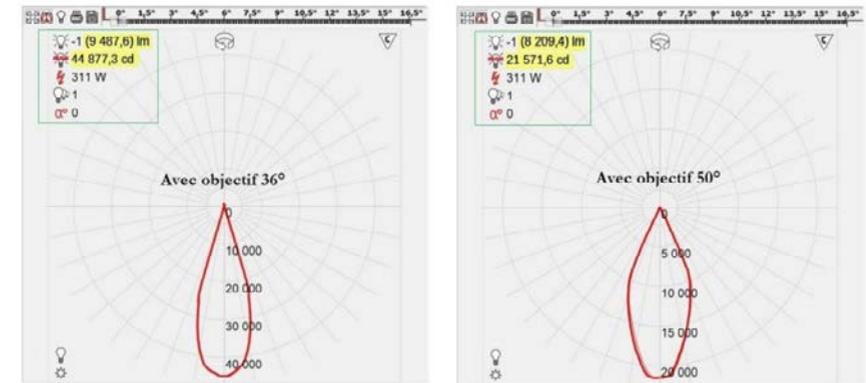
Il est possible de trouver la valeur de l'éclairage ( $E$ ) lorsque l'on connaît la valeur du flux ( $\Phi$ ) et de la surface éclairée ( $S$ ) en appliquant la formule:  $E(\text{lux}) = \Phi(\text{lumen}) \times S(\text{m}^2)$

## L'intensité lumineuse

L'**intensité lumineuse (Candela)** nous renseigne sur la concentration d'énergie lumineuse. **La concentration d'énergie lumineuse d'un projecteur est beaucoup plus importante lorsque que le faisceau est « fermé » que lorsque celui-ci est « ouvert », alors que le flux lumineux reste lui quasiment constant (en dehors des pertes optiques qui peuvent être plus ou moins importantes) lors de cette variation de focale.** Pour représenter ce mécanisme, il est possible de faire une analogie avec le débit de l'eau dans un tuyau: à débit identique, il y a beaucoup plus de pression dans un tuyau de petit diamètre que dans un tuyau de gros diamètre. Comme l'éclairage, l'intensité peut être mesurée dans l'axe optique (valeur très ponctuelle) où être rapportée à l'angle solide du faisceau (valeur moyenne), selon ces différentes conditions les chiffres

peuvent alors être très différents et à l'origine de certaines confusions. L'**intensité stérangulaire (Mean Spherical candelpower)** donne une indication de puissance relative (mesure rapportée à l'**angle solide**), elle varie considérablement selon l'ouverture du zoom d'un projecteur (dans un rapport de 3 à 4) et renseigne sur la qualité de son système optique. L'**intensité mesurée dans l'axe optique du faisceau (Center Beam Candelpower)** fournit une **valeur maximale et renseigne sur la capacité de concentration d'un système optique.** Pour un même flux lumineux, l'intensité varie selon les qualités du système optique utilisé et selon le réglage des lentilles.

### Dispersion angulaire d'un projecteur Lustr3 avec objectif XDLT 36° ou 50°



© Agence culturelle - Nicolas Fondard

Un même projecteur affiche des valeurs d'intensité lumineuse radicalement différentes selon l'objectif avec lequel il est utilisé. La légère différence de flux lumineux s'explique par une perte optique plus importante dans l'un des deux objectifs.

## La luminance

La **luminance** quantifie la perception humaine de la luminosité, lorsque l'œil de l'observateur se tourne en direction de la source. Il s'agit du flux lumineux provenant d'une surface éclairée et orientée vers l'œil. La luminance ( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ) est liée à la surface d'émission ou de réémission (lumière réfléchie), cette surface peut être celle de la source elle-même, d'une lentille, d'un filtre dépoli, d'un cyclorama, d'un écran à LED, d'un ciel bleu ou gris, etc. **La luminance permet de nous renseigner sur le niveau d'éblouissement. La luminance d'une LED nue (en dehors de tout système optique, ou de collimateur) est très élevée (de l'ordre de 30 000 000  $\text{cd}/\text{m}^2$ ) car la surface émettrice est très petite par rapport à l'intensité lumineuse délivrée.** Cet effet est atténué lorsque l'on considère l'ensemble du système à l'intérieur duquel la source LED est intégrée (collimateur + système optique). Toutefois, la luminance d'un projecteur LED reste plus élevée que celle d'un projecteur incandescent et peut se révéler gênante pour un artiste qui aurait à regarder dans

sa direction. Cette sensation peut être atténuée par l'ajout d'un filtre dépoli, certains fabricants intègrent d'ailleurs cet élément à leurs appareils.

#### Luminance des sources de lumière artificielles

Sources	Luminance
Tube fluorescent $\square$ 26mm	de 10 000 à 15 000 (cd/m <sup>2</sup> )
Tube fluorescent $\square$ 16mm	de 17 000 à 33 000 (cd/m <sup>2</sup> )
Lampe fluocompacte	de 20 000 à 70 000 (cd/m <sup>2</sup> )
Lampe aux iodures métalliques	de 200 000 à 500 000 (cd/m <sup>2</sup> )
Lampe au sodium haute pression	300 000 (cd/m <sup>2</sup> ).
Lampe au mercure haute pression	de 9 000 à 480 000 (cd/m <sup>2</sup> )
LÉD nue	30 000 000 cd/m <sup>2</sup>

### Les performances photométriques

Aucune valeur photométrique ne suffit à elle seule à décrire les caractéristiques lumineuses d'un appareil d'éclairage. Chacune d'entre elles nous renseigne sur une caractéristique particulière. Les performances photométriques sont largement mises en avant par les fabricants d'appareils d'éclairage et constituent un des fondements de leur argumentation commerciale, elles sont parfois présentées dans des conditions pouvant présenter les meilleurs résultats, pour les interpréter correctement il faut être vigilant à bien identifier le contexte dans lequel sont effectuées les mesures. Les données photométriques sont généralement disponibles sur les sites internet des fabricants au format de fichier .ies. Ils sont lisibles par le logiciel gratuit **IES** Viewer.

Les données photométriques permettent aussi aux utilisateurs de pouvoir évaluer les performances des différents appareils selon des critères et des caractéristiques comparables, aujourd'hui ces données sont essentielles lorsqu'il s'agit de devoir confronter les performances des nombreux nouveaux projecteurs LÉD entre eux et aussi de les comparer avec les projecteurs à incandescence. Cette comparaison doit s'effectuer entre éléments rigoureusement comparables, c'est-à-dire mesurables et objectivables (flux, intensité, éclairage, **température de couleur corrélée**, etc.), elle ne peut pas s'effectuer selon des caractères subjectifs auxquels est associé le vocabulaire usuel : « grain », « dureté », « douceur », « chaleur », « couleur criarde ou baveuse », etc. Ces appréciations d'ordre esthétique peuvent bien sûr être débattues mais ne sont pas objectivables et ne relèvent pas du champ de la photométrie.

Même pour les plus grands experts en physique quantique, la lumière conserve une part de mystère, Cette part de mystère ainsi que la difficulté à se représenter le phénomène lumineux, alimentent et justifient certains

jugements et certaines croyances. Elles permettent à certaines interprétations subjectives de se répandre et de s'affirmer comme des vérités.

## L'EFFICACITÉ LUMINEUSE

### Le bon indicateur

Le Watt a longtemps tenu le rôle d'indicateur de quantité de lumière d'une source, ce qui constituait une erreur : le Watt nous renseigne sur l'énergie consommée, c'est-à-dire l'énergie transformée en lumière à laquelle s'ajoute l'énergie perdue sous forme de chaleur. Or, la quantité d'énergie perdue est largement supérieure lorsqu'il s'agit d'une lampe halogène que lorsqu'il s'agit d'une LÉD. **Dès lors qu'une lampe de 10W peut produire le même flux lumineux qu'une lampe de 100W, il devient évident que le Watt n'est pas approprié pour indiquer la quantité de lumière.** Avec l'utilisation de la LÉD, l'usage du Lumen et donc du flux lumineux, s'est légitimement imposé pour représenter la quantité de lumière d'une source.

### Le rapport Lumen/Watt

L'efficacité lumineuse (en Lumen/Watt) est le rapport entre le flux lumineux utile et l'énergie consommée : autrement dit, il s'agit du rapport entre la quantité de lumière obtenue et l'énergie consommée pour l'obtenir. **L'efficacité lumineuse nominale d'une source d'éclairage n'est pas identique à l'efficacité lumineuse utile de l'appareil d'éclairage dans lequel elle est destinée à être utilisée :** un projecteur équipé de LÉD ayant une efficacité nominale de 140 lm/W n'aura malheureusement pas une efficacité utile de 140 lm/W, la qualité de ce rendement (efficacité nominale/ efficacité utile) dépend des performances du système optique du projecteur.

L'efficacité lumineuse d'un système LÉD dépend de trois paramètres : la **teinte**, le courant d'alimentation et la température d'utilisation. La teinte est intrinsèque à la LÉD et dépend de sa propre constitution, le courant d'alimentation et la température d'utilisation sont extrinsèques à la LÉD et sont liés à son intégration dans un système. Ainsi, certains projecteurs peuvent afficher une efficacité lumineuse qui peut sembler médiocre au regard de celles des LÉD qui le composent.

La LÉD est aujourd'hui la source de lumière qui offre la meilleure efficacité lumineuse tout en proposant une bonne qualité de lumière. En laboratoire, son efficacité lumineuse atteint les 300 lm/W. Sur le terrain, la LÉD blanche peut atteindre les 230 lm/W et devrait atteindre 250 lm/W dans 10 ans (en 2032). Il est théoriquement possible d'atteindre 360 lm/W dans l'hypothèse

improbable d'un rendement énergétique de 100% (c'est-à-dire, où 100% de la puissance électrique (W) consommée est transformée en rayonnement lumineux). Il sera certainement possible d'atteindre 336 lm/W en 2050 en additionnant plusieurs LED colorées pour obtenir une lumière « blanche ».

## La perception visuelle

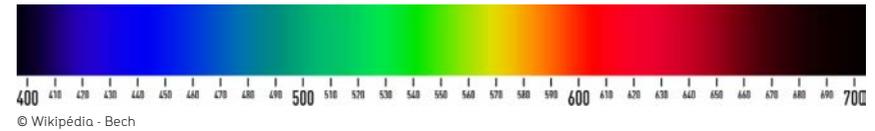
L'être humain pense intuitivement voir la lumière: par exemple, lorsqu'un faisceau lumineux traverse une fenêtre et dessine une forme géométrique sur le sol de la pièce, ou dans la forêt, lorsque le vent joue avec le feuillage qui filtre la lumière en découpant une multitude de rayons dynamiques, ou encore sur scène, lorsque le faisceau d'un projecteur se matérialise dans une ambiance de brume artificielle. Pourtant, du point de vue de la physique, **le système visuel ne permet pas de voir la lumière**. En réalité, il perçoit le rayonnement de la matière. La lumière en tant qu'**onde électromagnétique**, n'est pas visible, mais permet de « voir ». Toute la matière environnante rayonne, le plus souvent en réfléchissant les rayonnements d'une source de lumière, tel que le soleil, ce sont ces rayonnements qui parviennent jusqu'au système visuel et permettent au cerveau de synthétiser une image de son environnement.

## La lumière blanche

La lumière du jour et celle de la plupart des sources d'éclairage artificiel est généralement perçue comme « blanche ». En fait, **le système visuel synthétise mentalement cette lumière blanche à partir d'un « agrégat désordonné de rayons de toutes sortes de couleurs émis par les diverses parties des corps lumineux » (Isaac Newton)**. Le système visuel interprète la gamme des rayonnements auxquels il est sensible (rayonnements compris entre 380 et 780 nm) comme une variation chromatique couvrant la palette des couleurs de l'arc-en-ciel (du violet au rouge). Pourtant, il parvient à interpréter cette lumière richement colorée comme étant une lumière blanche. Les différentes sources lumineuses utilisées dans le spectacle (halogène, iodures, fluo, LED...) produisent chacune une composition de rayonnements chromatiques différentes qui est interprétée comme « blanche » par le système de perception visuelle.

Les travaux de James C. Maxwell au XIX<sup>e</sup> siècle, puis ceux de la CIE, ont établi que toutes les couleurs du spectre visible pouvaient être produites à partir de trois couleurs primaires (réelles ou fictives) à condition que leurs longueurs d'ondes soient suffisamment éloignées les unes des autres et que leur mélange en proportions égales produise une lumière « blanche » (blanc équi-énergétique). En réalité, à partir d'un mélange de seulement deux longueurs d'ondes complémentaires (espacées d'environ 100 à 110 nm) le système visuel est capable de percevoir une lumière « blanche ». En somme, **si le système visuel parvient à interpréter une lumière richement colorée comme étant une lumière « blanche », il est aussi capable de le faire à partir d'une lumière pauvre en rayonnements colorés.**

## Spectre de la lumière visible



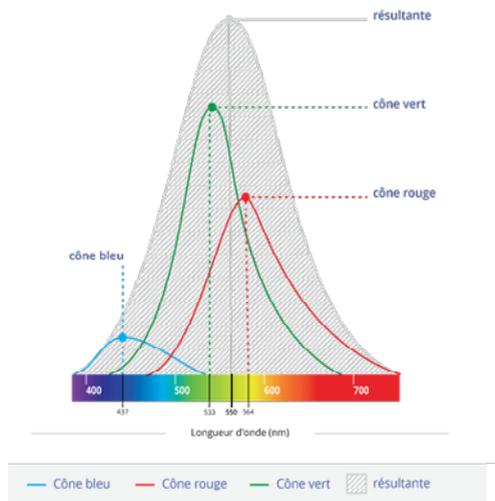
L'addition de toutes ces couleurs est perçue comme « blanche ».

## Les valeurs tristimulus

L'évaluation de la perception visuelle de la lumière est rendue complexe par certaines caractéristiques de l'appareil visuel humain: celui-ci possède plusieurs types de cellules photosensibles (les cônes et les bâtonnets) qui n'ont pas toutes le même seuil de réactivité et permettent d'adapter la vision à différents niveaux d'éclairements (nuit, jour, pénombre...). La CIE a déterminé trois niveaux d'énergie lumineuse: scotopique (nocturne), photopique (diurne) et mésopique (crépuscule). Les bâtonnets ont un seuil de détection très faible mais ne permettent pas de bien différencier les couleurs (ils assurent la vision nocturne) tandis que les cônes ont un seuil de détection beaucoup plus élevé et permettent de très bien distinguer les couleurs (ils assurent la vision diurne). **Il existe trois types de cônes (L, M, et S), leurs sensibilités respectives ne couvrent pas complètement certaines zones du spectre visible, pourtant la superposition des trois courbes de sensibilité permet au système visuel d'en percevoir l'ensemble.** Les valeurs de sensibilité aux rayonnements lumineux des trois types de cônes sont appelées valeurs tristimulus.

- Sensibilité optimale des cônes L: 560 nm (vert/jaune)
- Sensibilité optimale des cônes M: 530 nm (vert)
- Sensibilité optimale des cônes S: 420 nm (violet)

## Sensibilité des cônes

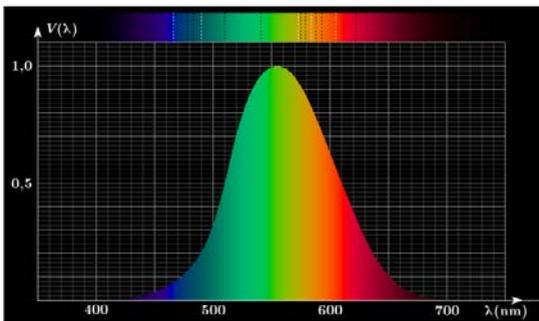


© 2023 leclairage.fr

## La courbe d'efficacité lumineuse spectrale

Les photorécepteurs de l'œil sont sensibles aux rayonnements compris entre 380 et 780 nm mais la plupart des individus ne perçoivent que les rayonnements compris entre 400 et 700 nm. Par ailleurs, du fait de la disparité de répartition et de quantité des différents types de cônes à l'intérieur de la rétine, il apparaît que **la perception visuelle humaine dépend essentiellement des rayonnements verts** (un peu des rouges et très peu des bleus). **La réactivité des cônes est maximale pour les longueurs d'onde d'environ 555 nm (vert citron)** tandis que celle des bâtonnets l'est pour celles d'environ 507 nm (vert). La CIE a ainsi pu établir une courbe d'efficacité lumineuse qui illustre la réactivité de l'œil en fonction de la longueur d'onde et constitue le standard du rendement énergétique de l'œil sur lequel se base la photométrie.

### Courbe d'efficacité lumineuse spectrale



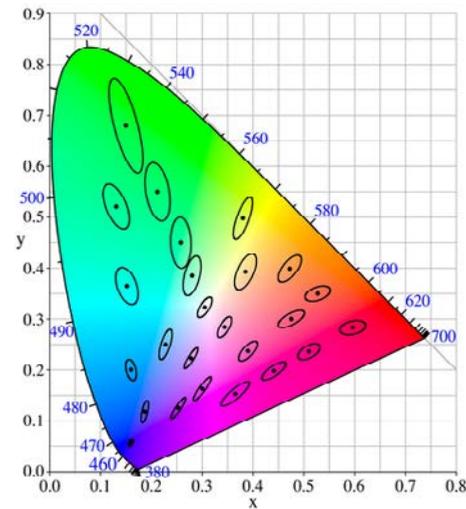
© Wikipédia - Alasjourn

## Le métamérisme

L'œil est un photorécepteur médiocre : les cellules photosensibles de la rétine sont beaucoup moins performantes que celles des capteurs photographiques (CCD ou CMOS). **Le système visuel humain est capable d'une diversité de perception insignifiante au regard de la diversité de compositions chromatiques lumineuses possibles.** La vision humaine peut percevoir de façon identique, certains spectres de compositions chromatiques pourtant différentes : ces deux perceptions identiques de spectres différents sont appelées des métamères. Il s'agit de deux stimuli différents qui donnent la même impression de couleur ; ils sont physiquement différents mais apparaissent identiques du point de vue de la perception.

Ce phénomène est connu des professionnels de l'éclairage de scène de façon empirique : deux surfaces éclairées d'une certaine façon peuvent paraître de couleur identique, tandis qu'elles peuvent paraître de couleurs différentes sous un autre éclairage. Ce principe peut être mis à profit pour des effets scéniques : par exemple, un motif peut apparaître sur une surface qui paraissait unie sous un autre éclairage. A l'inverse, **deux faisceaux lumineux perçus par l'œil comme étant de teinte identique peuvent donner des résultats différents sur le décor, les costumes ou la peau.** Cette particularité du **métamérisme** peut d'autant mieux être exploitée avec des projecteurs LED multicolores puisqu'il est possible de faire varier leur composition chromatique : il est ainsi possible de changer la perception colorée d'un décor ou d'un costume sans changer la perception colorée du faisceau de lumière. (Voir aussi : Gérer les métamères, p.123)

### Ellipses de Mac Adam



© Wikipédia

À l'intérieur de chaque ellipse les couleurs sont perçues comme identiques par l'œil humain.

# LA COLORIMÉTRIE

La colorimétrie est une discipline qui se donne pour objectif de mesurer la couleur. Elle cherche à déterminer les relations quantitatives qui existent entre les mesures physiques effectuées sur la lumière et la perception qu'on en a.

## La température de couleur

Dès le XIX<sup>e</sup> siècle, des scientifiques travaillent sur le lien pouvant exister entre la couleur d'un rayonnement lumineux et sa nature thermique. Les sources d'éclairage à incandescence (« **lumière chaude** ») dégagent beaucoup de chaleur et effectivement un lien est constaté entre la température du filament et la dominante chromatique de la lumière produite. Pour pouvoir quantifier cette variation chromatique, il est alors imaginé un référent absolu (appelé « **corps noir** ») dont la couleur ne dépendrait que de son échauffement. Plus il chauffe, plus il devient lumineux, au cours de cette variation de température il rayonne dans toutes les longueurs d'ondes du spectre visible.

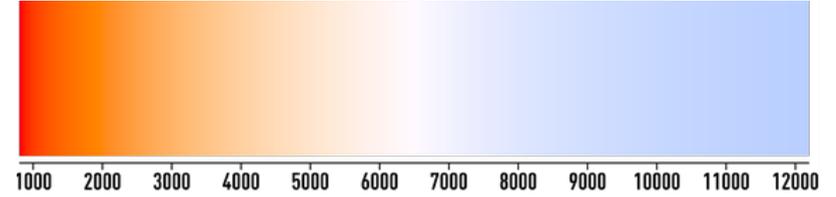
La dominante chromatique peut donc être évaluée selon la température, cette valeur se nomme la **température de couleur (Tc)** et s'exprime en **Kelvin (K)**. Toute source dont l'émission de lumière est d'origine thermique se comporte comme le « corps noir » et sa température de couleur peut donc être déterminée selon ce modèle théorique. Au contraire, lorsqu'il s'agit d'une source de « **lumière froide** » (fluor, HMI, et aujourd'hui la LED), il n'existe plus aucun lien entre l'échauffement et les caractéristiques chromatiques de la lumière produite : la référence au modèle du « corps noir » est impossible. Il a donc fallu construire un nouvel espace théorique pour pouvoir évaluer la composition chromatique des rayonnements lumineux.

## Les illuminants

Devant la grande diversité des sources d'éclairages et de leurs compositions chromatiques respectives, la CIE propose dès 1931 d'établir des modèles spectraux qui tiendraient lieu de référence pour chacune d'entre-elles et faciliteraient le travail des fabricants. Ces sources virtuelles sont appelées des **illuminants**, ils sont désignés par une lettre (A, B, C, D, ID, E, FL, HP) à laquelle est accolé un chiffre pour certaines d'entre-elles. Il y a ainsi 42 illuminants répartis en huit catégories, chaque catégorie correspond à une classe spécifique (incandescence, fluorescence, iodures, lumière du jour, etc.); à l'intérieur de chaque catégorie, les illuminants se distinguent

entre eux par leur **température de couleur** et leur composition chromatique. Il n'y a pas de catégorie d'illuminant de référence pour les sources LED. En 2015, la CIE réfléchissait à la conception d'une catégorie d'illuminant L pour correspondre aux différents spectres des LED. Cette idée semble avoir été abandonnée. La **conformité des sources de lumière à leur illuminant de référence**, permet d'évaluer la justesse du rendu des couleurs des différentes matières éclairées par cette source de lumière. Cette méthode d'évaluation se nomme l'indice de rendu des couleurs (IRC).

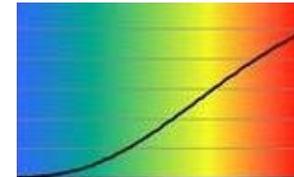
### Rayonnements émis par le corps noir selon sa température



© Wikipédia - Bhutajata

Couleur du rayonnement émis par un corps noir entre 800 et 12 200 kelvins (K). Le « point blanc » est à 6500 K (illuminant D65).

### Illuminant A



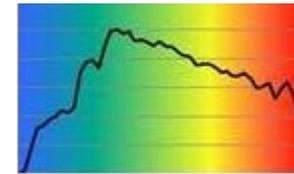
© 2023 Konica Minolta Sensing Europe B.V.

Défini en 1931, l'illuminant A est destiné à représenter un éclairage à filament de tungstène. Sa température de couleur est d'environ 2856K.

Axe des abscisses : longueur d'onde.

Axe des ordonnées : quantité de rayonnement.

### Illuminant D65



© 2023 Konica Minolta Sensing Europe B.V.

Défini en 1964, le D65 est devenu l'illuminant de lumière du jour de référence. Sa température de couleur est de 6504K.

Axe des abscisses : longueur d'onde.

Axe des ordonnées : quantité de rayonnement lumineux.

## L'indice de rendu des couleurs (IRC)

Cette méthode a été initiée en 1937 par la société Philips. Dès 1948 elle fût utilisée par la CIE qui finit par l'accepter officiellement en 1965. **La mesure de l'IRC s'effectue sur une palette réduite de huit couleurs (TSS : Test Color Samples).** A l'origine, cette palette semblait suffisante pour évaluer la restitution des couleurs d'une source lumineuse, en réalité ce choix permettait surtout de pouvoir attribuer une valeur d'IRC correcte aux tubes fluorescents, tout en étant opérante pour les autres sources. En 1974, la CIE élargit cette palette à 6 couleurs supplémentaires sans que ce changement n'apporte de grands avantages, d'autant que ces couleurs n'entrent pas dans le calcul qui détermine l'IRC. Les dernières évolutions de la méthode d'évaluation de l'IRC datent de 1995.

Cette méthode permet d'attribuer une note Ra (sur une échelle de 0 à 100) relative à la capacité des sources de lumière à restituer correctement les couleurs de la palette TSS par rapport à leur **illuminant** de référence. D'après la définition donnée par la CIE, il s'agit d'une «évaluation quantitative du degré d'accord entre la couleur **psychophysique** d'un objet éclairé par l'illuminant en essai et celle du même objet éclairé par l'illuminant de référence, l'état d'adaptation chromatique ayant été correctement pris en compte». Il s'agit donc surtout de la mise en conformité d'une source à évaluer avec son illuminant de référence. Car en effet, s'il est courant de penser que l'IRC s'évalue en comparaison de la lumière du jour, il s'évalue en réalité par rapport à l'illuminant de référence de la source de lumière à considérer (par exemple : l'illuminant A pour les lampes à filament de tungstène). L'IRC ne suffit pas à qualifier précisément la qualité d'une source lumineuse : deux sources avec une valeur d'IRC et une température de couleur identiques peuvent restituer les couleurs de façon différente. Cette particularité met en évidence la chose suivante : au regard de l'IRC, plusieurs perceptions différentes d'une même couleur sont possibles sans que l'une d'elles ne relève pour autant d'une mauvaise restitution. Dès lors, il n'est pas simple de s'y retrouver.

L'IRC est insatisfaisant sur plusieurs points. La valeur de l'IRC est seulement l'expression d'une évaluation quantitative (rayonnement énergétique), elle n'est pas l'expression d'une évaluation qualitative qui dépend de critères subjectifs esthétiques et culturels propre à l'observateur. En outre, il est généralement admis qu'une différence de 5 points sur l'échelle de l'IRC n'est pas significative pour l'œil et qu'une valeur au-dessus de 80 est bonne. **L'IRC présente donc des faiblesses : d'une part, deux sources en ayant une même valeur peuvent restituer certaines couleurs de manière différente, et d'autre part, l'œil n'est pas suffisamment performant pour faire la différence entre des valeurs d'IRC de 80 et de 85.**

À la suite du développement et de l'apparition des LED sur le marché de l'éclairage, l'IRC est de plus en plus contesté et critiqué, y compris au sein de la CIE, pour ses insuffisances et incapacités à établir correctement leurs performances colorimétriques et à tenir compte de certaines préférences esthétiques.

## Palette des couleurs de calcul de l'IRC (IRC-15)



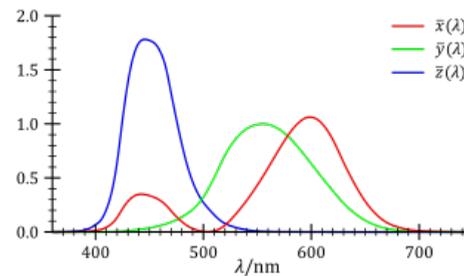
© energie-environnement.ch, plateforme des services cantonaux de l'énergie et de l'environnement (Suisse)

Seules les couleurs R1 à R8 sont prises en compte pour le calcul de l'IRC. Cet espace chromatique est limité et ne contient pas de couleurs saturées.

## L'espace de chromaticité

Dès le début des années 1930, la CIE s'attèle à développer un « espace de chromaticité ». À la suite des travaux menés par John Guild et William D. Wright, la CIE établit une triple fonction colorimétrique pour les primaires **RGB** selon la sensibilité spectrale de l'œil : la représentation graphique des trois courbes indique la quantité de chaque couleur primaire nécessaire pour produire l'équivalent d'une lumière « blanche ».

### Observateur CIE (fonctions colorimétriques)



© Wikipédia - Acdx

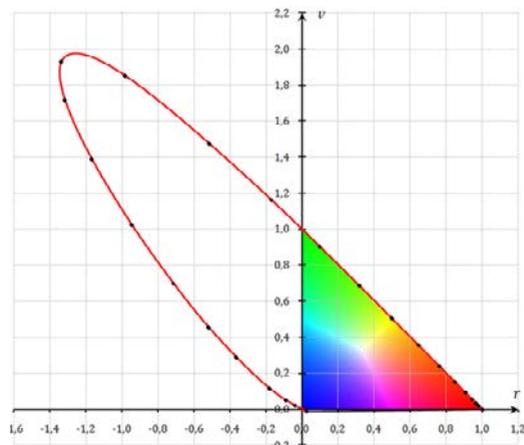
La CIE a défini en 1931 les fonctions colorimétriques de l'observateur de référence. Elles représentent la réponse chromatique d'un observateur normalisé.

## Le modèle RGB

En 1931 ces travaux aboutissent à la construction d'un diagramme de chromaticité appelé « **CIE 1931 RGB** », inspiré du **triangle chromatique de Maxwell**. Il se base sur trois rayonnements « primaires » choisis arbitrairement (Rouge : 700nm/1cd.m<sup>2</sup>, Vert : 546.1nm/4,5907cd.m<sup>2</sup>, Bleu : 435.8nm/0,0601cd.m<sup>2</sup>). Dans cet espace, le blanc de référence est un blanc neutre (dit équi-énergétique) composé d'un mélange des trois primaires RGB en proportions identiques. Cette représentation permet de dissocier deux composantes de la couleur : la chromaticité et la luminosité, mais ne permet pas de différencier les deux paramètres constitutifs de la chromaticité : la **teinte** et la **saturation**. Elle présente un autre défaut : elle est dépendante

des trois primaires choisies arbitrairement qui ne permettent pas d'optimiser l'espace chromatique, certaines couleurs visibles n'y sont pas localisables et possèdent des coordonnées négatives.

### Espace de chromaticité CIE 1931 RGB



© Wikipédia - Alasjourn

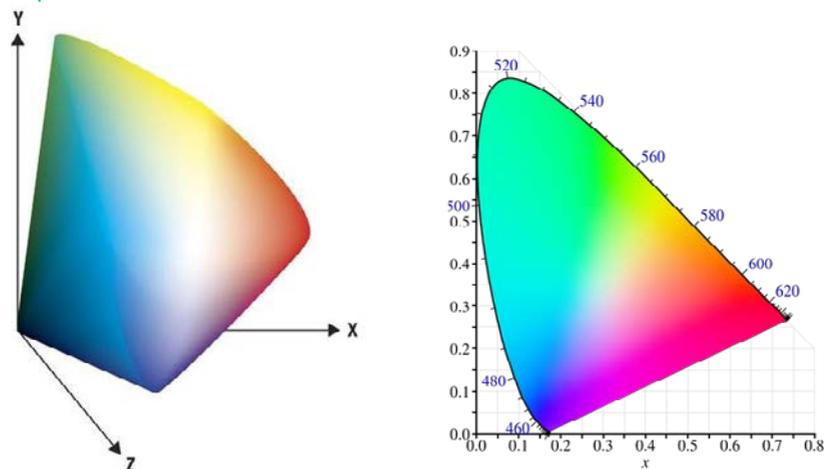
La courbe rouge (appelée Spectrum locus) en forme de nageoire, délimite la zone de l'ensemble des couleurs visibles par l'œil humain. Certaines couleurs visibles par l'œil humain ne sont donc pas localisables à l'intérieur du triangle.

## Le modèle XYZ

La même année Dean Brewster Judd y apporte des améliorations en proposant le diagramme « **CIE 1931 XYZ** » qui constitue encore aujourd'hui la référence de la colorimétrie. Ce système est basé sur trois primaires fictives: X, Y et Z qui possèderaient chacune une composante **RGB**. Contrairement au système RGB, il est imaginé pour intégrer toutes les couleurs théoriquement visibles et leur attribuer des coordonnées positives; il est compatible avec le modèle RGB, le blanc équi-énergétique est composé d'un mélange en proportion identique des trois primaires XYZ.

Les trois composantes (X, Y et Z) de cet espace tridimensionnel, représentent respectivement la **teinte**, la **luminance** et la **saturation**. À chaque triplet de coordonnées XYZ correspond une seule et unique couleur perçue par un œil humain « standard ». Afin de faciliter la définition des couleurs en matière de luminance et de chromaticité, la CIE a établi un modèle bidimensionnel appelé diagramme « CIE xy » (aussi appelé « CIE Yxy » ou « CIE xyY ») à partir de son modèle tridimensionnel XYZ. Les valeurs x et y sont calculées à partir des trois composantes X, Y et Z. La valeur z peut être déduite des deux autres par la relation:  $x + y + z = 1$ . Ce diagramme ne tient pas compte de la luminance, les valeurs x et y déterminent la chromaticité, les couleurs qui y sont représentées sont de luminance égale.

### Espace de chromaticité CIE 1931 XYZ & XY

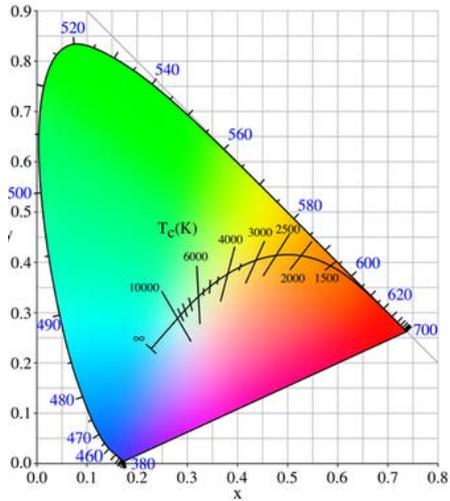


© 2016, Gilles Boisclair, Le monde en Images, CCDMD

© Wikipédia - BenRG

Grace à ce nouveau diagramme, il est désormais possible de situer les sources lumineuses selon leurs coordonnées chromatiques x et y. Pour accompagner ce diagramme, la CIE a déterminé une courbe qui définit le comportement chromatique du « corps noir » selon l'élévation de sa température. Cette courbe s'appelle la **courbe de Planck** (Planckian locus ou courbe du **corps noir**); la **température de couleur TC** peut donc être localisée sur cette courbe parmi tous les rayonnements lumineux. Lorsque les coordonnées chromatiques d'une lumière blanche ne se situent pas exactement sur la courbe de Planck, on peut déterminer sa **température de couleur corrélée TCC (ou température de couleur proximale)** en suivant une ligne perpendiculaire à cette courbe.

## Courbe de Planck



© Wikipédia

La courbe de Planck permet de déterminer la Tcc de n'importe quelle source de lumière «blanche» non thermique. Elle s'accompagne d'une série de lignes qui lui sont perpendiculaires et servent à localiser les rayonnements chromatiques de Tcc identiques mais de teintes différentes (delta UV).

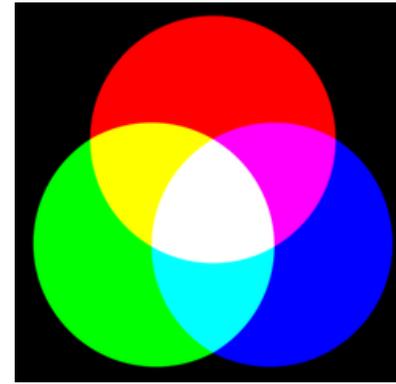
**La courbe de Planck permet de déterminer la température de couleur de n'importe quelle lumière blanche non thermique, ce qui est très appréciable aujourd'hui avec la LED.** Cette courbe s'accompagne d'une série de lignes qui lui sont perpendiculaires : elles servent à localiser les rayonnements chromatiques de TCC identique mais de teinte différente. Cette différence est nommée **Delta UV ( $\Delta UV$ )**. Lorsque le  $\Delta UV$  est positif la teinte dérive vers le vert et lorsque le  $\Delta UV$  est négatif la teinte dérive vers le magenta.

Sur la base du diagramme xy, la CIE propose en 1960 un nouveau diagramme : « CIE 1960 UVW ». C'est le modèle de référence pour les calculs de température de couleur et d'IRC. Il est remplacé en 1976 par le toujours actuel diagramme « CIE U'V'W' ».

## L'addition

**Les caractéristiques chromatiques d'un rayonnement lumineux peuvent être modifiées par principe additif.** Lorsqu'on éclaire une même surface avec plusieurs projecteurs ayant des distributions spectrales différentes, cette surface prend une teinte dominante qui est la résultante de l'addition des différents spectres : un nouveau spectre ayant ses propres caractéristiques s'en trouve alors créé. Ainsi, lorsqu'on éclaire une même surface avec trois projecteurs dont l'un émet des rayonnements Rouges, l'autre des rayonnements Verts et le dernier des rayonnements Bleus, la surface nous apparaît comme étant éclairée par une lumière blanche, résultante de l'addition des trois rayonnements Rouges, Verts et Bleus.

## Principe additif

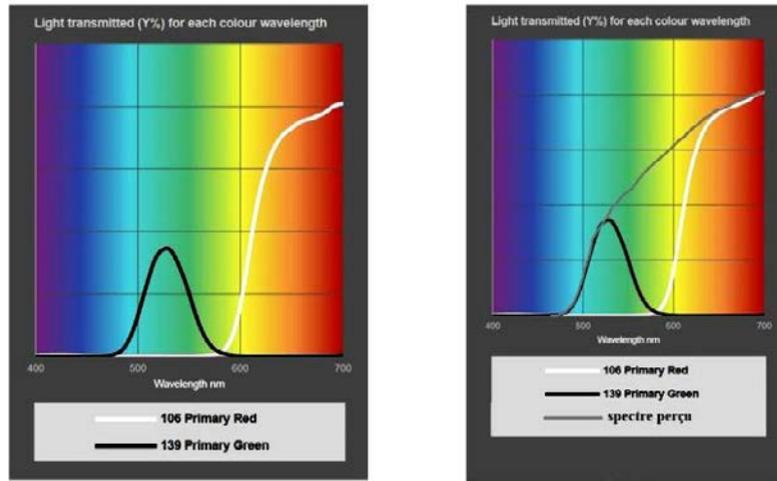


© Wikipédia - Quark67

L'addition de trois rayonnements colorés (Rouge, Vert, Bleu) sur une même surface est perçue comme celui d'un unique rayonnement «Blanc». Modifier les proportions du mélange de ces rayonnements permet d'obtenir des nuances colorées.

Lors d'une addition entre deux spectres lumineux, deux configurations peuvent se produire : les deux spectres peuvent avoir certaines longueurs d'ondes en commun ou au contraire ils peuvent n'en avoir aucune. Dans le premier cas, les énergies respectives des longueurs d'ondes communes se cumulent et modifient ainsi la teinte dominante perçue par notre système visuel. Dans le deuxième cas, ce qui se produit est moins intuitif : notre système visuel perçoit une nouvelle teinte dominante sans que les longueurs d'ondes lui correspondant ne soient émises ni par l'un ni par l'autre des deux spectres. **Notre système de perception visuelle synthétise une image mentale dont la teinte est intermédiaire à celles des deux spectres additionnés, il est capable de nous faire percevoir la teinte correspondant à une longueur d'onde qui n'est pas émise.** Par exemple, si l'on additionne théoriquement les rayonnements d'une source émettant des rayonnements de l'ordre de 500 nm, avec ceux d'une source émettant des rayonnements de l'ordre de 600 nm, l'œil aura l'impression d'une seule source émettant des rayonnements de l'ordre de 550 nm. L'exemple le plus convainquant est certainement celui de la gamme des couleurs à dominante Magenta (« les pourpres »). Aucune longueur d'onde spécifique ne correspond à ces couleurs pourpres, elles ne peuvent être obtenues qu'à partir du mélange de Bleu et de Rouge et donc de deux longueurs d'ondes appartenant chacune à l'une des extrémités du spectre.

## Addition de deux spectres



© Agence culturelle - Nicolas Fandard

Toutefois, au-delà des avantages apparents, le principe additif trichrome peut présenter certains inconvénients : **la trichromie ne permet pas d'obtenir toutes les couleurs perceptibles par l'œil, ni d'obtenir certaines couleurs saturées, ni d'obtenir une lumière blanche suffisamment riche pour permettre une bonne perception visuelle de toutes les couleurs.** Par ailleurs, le mélange de plusieurs rayonnements primaires produisant un rayonnement perçu comme blanc (donc désaturé), le mélange d'au moins deux rayonnements primaires de teintes différentes induit une désaturation des teintes obtenues. Le niveau de désaturation peut être faible lorsqu'il s'agit du mélange de deux teintes assez proches, mais il devient important dès lors qu'elles sont distantes d'environ 100 nm ou qu'une troisième teinte est introduite. Par exemple, lorsqu'il s'agit de mélanger du Rouge et du Vert, la teinte secondaire obtenue (Orange/Jaune) n'est pas complètement saturée. Il en est de même pour les teintes secondaires Cyan et Magenta.

## La soustraction

Comme son nom l'indique, le principe soustractif se définit par opposition au principe additif. Il s'agit donc d'extraire certaines longueurs d'ondes sélectionnées pour n'en garder que certaines autres. Ce principe est très largement utilisé en éclairage de scène depuis au moins le XIX<sup>e</sup> siècle où sont apparus les premiers filtres colorés fabriqués en matière gélatineuse d'origine animale (d'où leur nom de gélatine). Selon ce principe, l'ajout d'un filtre Rouge devant une source de lumière ne laisse passer que les rayonnements rouges (de 600 à 750 nm environ) tandis qu'il absorbe les autres ; les rayonnements absorbés sont réémis sous forme de rayonnements infrarouges,

donc de chaleur. Chaque filtre possède un coefficient d'absorption et de transmission qui renseigne sur sa capacité à transmettre et à absorber la quantité de lumière émise en amont. Ainsi par exemple, le filtre bleu L713 (J. Winter Blue) de Lee filters possède un facteur de transmission  $\mathcal{U}$  de 0,5% (sur une source halogène), c'est-à-dire que 99,5% de la quantité de lumière initiale est perdue en chaleur ! Au total, la perte d'énergie est encore plus conséquente si l'on considère que ce filtre est utilisé sur une source halogène qui elle-même ne restitue sous forme de lumière que 5% de l'énergie consommée : la part d'énergie consommée pour obtenir cette lumière bleue ne représente que 0,025% du total de l'énergie consommée, c'est-à-dire que 99,975 % de l'énergie consommée par le projecteur est perdue ! Il est à noter que les filtres dichroïques, présents dans beaucoup de projecteurs asservis, présentent un meilleur facteur de transmission que les filtres classiques (polyester ou polycarbonate) et offrent donc un meilleur rendement énergétique.

La trichromie, lorsqu'elle est utilisée à l'intérieur d'un projecteur asservi (et donc d'un appareil unique équipé d'une seule source lumineuse blanche) agit par principe soustractif : trois filtres colorés (Cyan, Magenta, Jaune) de **saturation** progressive pouvant s'insérer dans le faisceau. Pourtant, lorsqu'au moins deux filtres sont insérés, les rayonnements issus de chacune des deux soustractions s'ajoutent entre eux selon le principe additif. En réalité les principes additifs et soustractifs sont très liés. Ainsi, les faisceaux de lumière de deux projecteurs filtrés (soustraction) se mélangent lorsqu'ils éclairent le même objet (addition). Selon sa couleur, l'objet éclairé ne réfléchit qu'une partie des rayonnements lumineux (soustraction) qui se mélangent avec les rayonnements des projecteurs et ceux réfléchis par les autres différents objets éclairés (addition)...

## Principe soustractif



© Wikipédia - Quark67

La soustraction simultanée d'au moins trois rayonnements colorés (généralement le Cyan, le Magenta et le Jaune) d'une même source de lumière «blanche», entraîne une absence de lumière (noir). Modifier les proportions du mélange de ces rayonnements permet d'obtenir des nuances colorées.

# 2

## LA LED: TYPOLOGIES ET TECHNOLOGIES

le fonctionnement d'une LED

36

le tri qualitatif chez le fabricant

41

les différents types de LED

43

les effets lumineux de la LED

47

l'étalonnage (ou calibration) de la LED

57

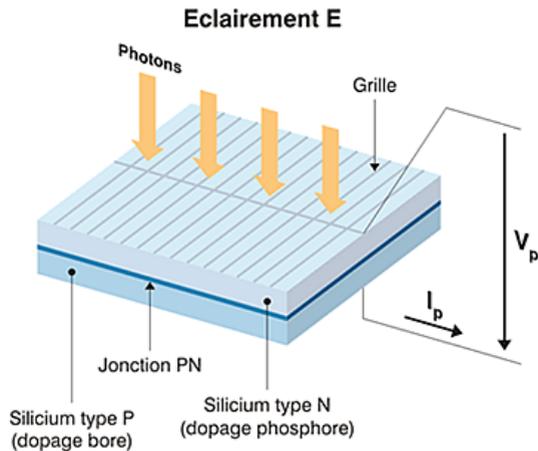
# Le fonctionnement d'une LED

## L'ÉLECTROLUMINESCENCE

La LED est une source lumineuse qui contrairement aux autres ne contient pas d'éléments gazeux, en cela, il s'agit d'une « **source solide** ». Son fonctionnement relève de la physique quantique des **semi-conducteurs**.

Une LED (comme toutes les diodes) est une juxtaposition de **deux semi-conducteurs** dopés de façon antagoniste : l'un au phosphore (dopage N = négatif) l'autre au bore (dopage P = positif). Le semi-conducteur N présente un surplus d'électron, tandis que le semi-conducteur P en présente un déficit. Lorsque l'on applique une tension aux bornes de cette **jonction P-N**, le surplus d'électrons de la couche N vient combler le déficit d'électrons de la couche P. Au cours de ce transfert, les électrons changent de niveau d'énergie, une partie de leur énergie est émise sous formes de **photons** : il y a émission de lumière par **électroluminescence**.

### Jonction P-N



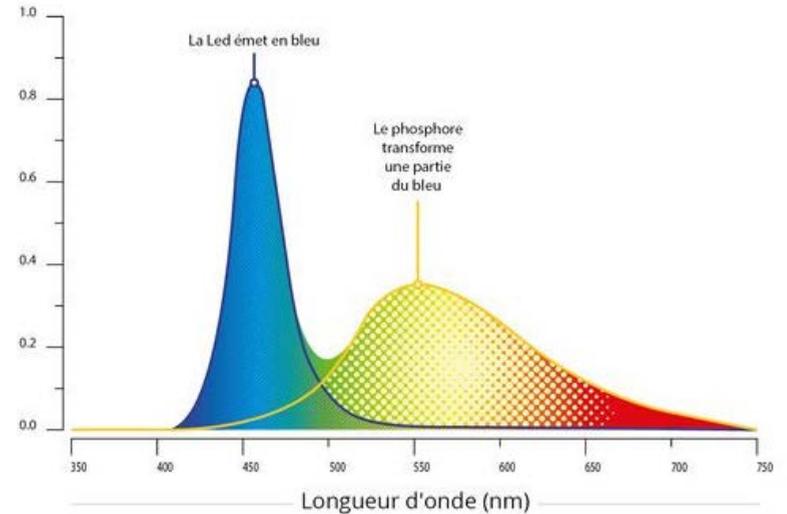
© Énergie, Architecture et Climat, faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme (LOCI) Université catholique de Louvain (Belgique), réalisé avec le soutien du Service Public de Wallonie - Département de l'Énergie et du Bâtiment durable

## LA COULEUR

Selon le matériau du **semi-conducteur** choisi (ex : arséniure et phosphore de gallium, arséniure d'indium) il est possible de prévoir le niveau d'énergie du **photon** émis et donc de déterminer la longueur d'onde correspondant à la **teinte du rayonnement lumineux** que l'on veut obtenir (Rouge, Vert, Bleu, Ambre, Citron, etc.). La teinte de chaque LED est garantie pour une plage d'alimentation spécifique. Cette teinte est donc liée à l'ampérage qui lui est délivré.

Chaque LED a une plage de longueurs d'ondes réduites, c'est pourquoi **la LED qui émet de la lumière blanche n'existe pas** : la LED « blanche » est en réalité une LED bleue à laquelle est ajoutée un ou plusieurs **luminophores** (substance qui émet de la lumière par fluorescence lorsqu'elle subit une excitation). Ainsi, les caractéristiques chromatiques d'une LED blanche dépendent des caractéristiques chimiques des luminophores qui réémettent le rayonnement bleu en déplaçant le spectre d'émission vers des longueurs d'onde plus grandes.

### LED blanche

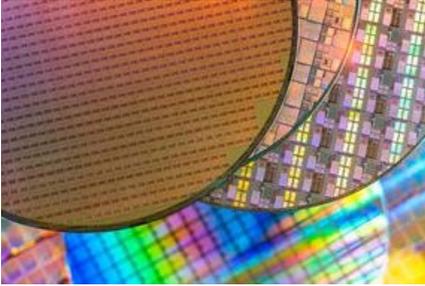


© 2023 leclairage.fr

# LES SEMI-CONDUCTEURS

Ils sont fabriqués par séries sur une même plaque composée de différentes couches en forme de galette (« **wafer** ») puis découpés à l'unité. Les semi-conducteurs dopés sont fabriqués par **épitaxie sur un matériau appelé substrat**. Ce substrat doit posséder une très bonne conductivité thermique et avoir des propriétés **crystallographiques** très proches de celles du semi-conducteur. Les matériaux les plus utilisés sont le saphir, le carbure de silicium, le nitrure de gallium, le silicium, le diamant et le graphite.

## Wafer



© 123RF.com

## Processus de fabrication d'une LED

Étapes	Process
1.	Choix des matériaux primaires
2.	Croissance du substrat
3.	Épitaxie
4.	Métallisation du côté dopé N
5.	Métallisation du côté dopé P
6.	Découpe laser
7.	Packaging

Il peut être distingué **trois types d'architectures principales de semi-conducteurs**: le semi-conducteur à structure latérale « conventionnelle » (la plus répandue, LED de faible et moyenne puissance, majorité des COB), le semi-conducteur à structure verticale, et le semi-conducteur à structure latérale « flip chip » (LED de forte puissance, principalement utilisé pour l'éclairage extérieur).

## Histoires et géographies du semi-conducteur

Découvert au XIX<sup>e</sup> siècle, le semi-conducteur est une substance (élément ou composé chimique solide) qui n'est ni un conducteur, ni un isolant. Il peut être soit l'un, soit l'autre, selon diverses conditions. Sa résistance électrique est à la fois proche de celle d'un matériau conducteur et de celle d'un matériau isolant. Cette propriété est un moyen très intéressant pour contrôler un courant électrique. Pour faciliter le transfert des électrons à l'intérieur du semi-conducteur, il est nécessaire d'avoir recours à une modification de sa structure moléculaire en y remplaçant certains atomes par d'autres : cette technique s'appelle le dopage. La fabrication des semi-conducteurs est un processus complexe, hautement technologique et partiellement tenu secret, qui a lieu dans une « salle blanche » (salle où il y a très peu de particules dans l'air). Son cycle de R&D et de production est considérablement long et coûteux.

Le semi-conducteur est un composant indispensable et très répandu dans l'industrie des matériels informatiques, électroniques et numériques. Il est présent partout : ordinateur, tablette, smartphone, mais aussi : matériel médical, aéronautique, automobile, organisation des moyens de production (industrie 4.0), etc. Il sert aussi de base à la fabrication des LED.

Essentiellement fabriqués aux USA jusqu'au milieu des années 1970, la production est aujourd'hui principalement localisée en Asie (particulièrement à Taïwan et en Corée du sud). Depuis 2020, il faut faire face à une pénurie temporaire de semi-conducteurs qui devrait perdurer jusqu'au moins 2023. Les principales raisons en sont : l'accroissement de la demande, à laquelle s'ajoutent la guerre commerciale entre les USA et la Chine, ainsi que la mise à l'arrêt temporaire de plusieurs usines de fabrication (pandémie mondiale de Covid 19, mauvaises conditions météo).

## LE BOÎTIER

Ces « puces » sont ensuite intégrées dans un boîtier qui permet de recevoir toutes les fonctionnalités additionnelles nécessaires (protection mécanique, connexion électrique, optique primaire, **luminophore**...). Il en existe plusieurs types : le boîtier plastique (PLCC, Plastic Leaded Chip Carrier), le boîtier sur embase céramique (très bonne conduction thermique, adapté pour les LED de forte puissance), le boîtier sur embase aluminium, le boîtier avec ou sans dôme (le dôme est en verre ou en silicone, il exerce une influence sur l'extraction et l'angle d'émission : c'est l'optique primaire de la LED). Il existe aussi des montages sans boîtier : les puces des COB sont directement soudées sur le circuit imprimé.

## Le tri qualitatif chez le fabricant

Une fois fabriquées, les LED subissent une épreuve sélective de tri qualitatif « **binning** » selon généralement au moins l'un des critères suivants : le flux lumineux, la colorimétrie et la tension. Les critères qualitatifs de ces tris permettent aux fabricants de projecteurs de pouvoir satisfaire leur demande selon le niveau d'exigence de leur cahier des charges.

### La différence entre une LED et un LASER

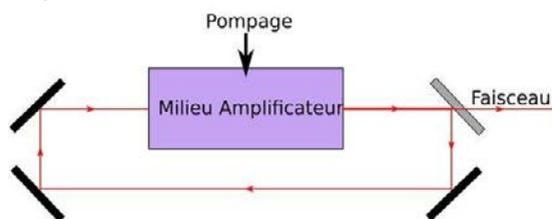
La LED et le LASER se ressemblent, leurs lumières respectives ont toutes deux la même origine : une diode, ils peuvent chacun être utilisés comme source de lumière pour les vidéoprojecteurs ou les projecteurs d'éclairage (le Xtylos de Clay Paky est équipé d'une source LASER RGB. Le Cobra d'Ayrton est équipé d'une source LASER phosphore, (LASER bleu combiné à un luminophore).

La lumière émise par un LASER est quasi-monochromatique, elle est réduite à une gamme très étroite de longueurs d'ondes. Les plus courantes sont : Rouge 650nm, Rouge 635nm, Vert 520nm, Bleu 445nm et Bleu 405nm. Les LED de couleurs émettent chacune dans une bande spectrale beaucoup plus large.

Un faisceau LASER est très focalisé et très directionnel. La surface de la source lumineuse LASER est extrêmement petite (quelques microns), c'est pour cette raison que le faisceau diverge très peu. Un LASER est un amplificateur de lumière. La lumière est amplifiée à l'aide de miroirs dans une cavité résonnante. Le caractère directionnel résulte de cette cavité où est produite et amplifiée la lumière LASER.

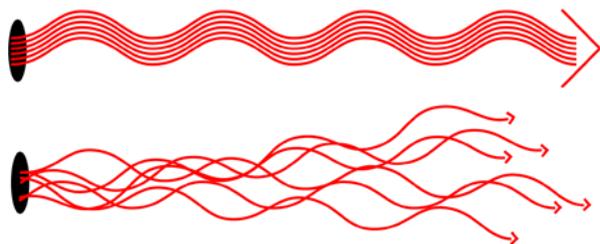
Le LASER est une source de lumière dite « cohérente » car l'émission de photons est ordonnée contrairement aux autres sources (naturelles ou artificielles) pour lesquelles l'émission de photons s'effectuent de manière désordonnée (lumière « non cohérente »). En physique, deux sources d'ondes sont parfaitement cohérentes si leur fréquence et leur forme d'onde sont identiques et si leur différence de phase est constante. La cohérence est une propriété des ondes qui permet une interférence constante dans le temps et l'espace. La cohérence de la lumière LASER est à la fois spatiale et temporelle. Cette cohérence permet de transporter une importante quantité d'énergie lumineuse sur de longues distances.

### Amplification LASER



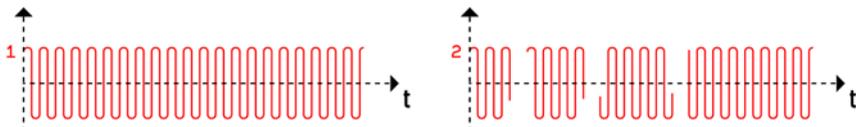
© Wikipédia - ©Lucas phys20

### Lumière cohérente et incohérente



© Agence culturelle

### Cohérence temporelle



© Agence culturelle

1. Train d'ondes de longue durée
2. Suite de trains d'ondes de courtes durées ayant entre eux des différences de phases aléatoires

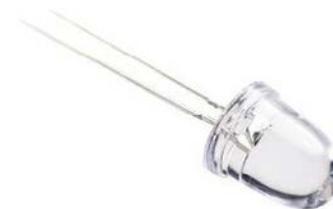
# les différents types de LED

D'abord considérées comme des composants électroniques standards, les LED sont devenues multiples et diverses. Dans le domaine de l'éclairage, l'évolution des performances des LED s'est faite en deux temps : d'abord en cherchant le maximum de flux lumineux, ensuite en améliorant les performances colorimétriques. Comment appréhender au mieux cette technologie pour pouvoir se familiariser avec elle ? Quels en sont les différentes caractéristiques et les principes de fonctionnement ?

## LA LED DIP (OU LED TRAVERSANTE 5MM)

C'est la plus connue et aussi la plus ancienne, elle est utilisée depuis les années 1970 comme voyant lumineux, elle est aussi la première LED à avoir été utilisée pour l'éclairage mais son rendement n'est pas optimal (30 à 50lm/W). Son angle de diffusion est de l'ordre de 30° à 60°.

### LED Dip



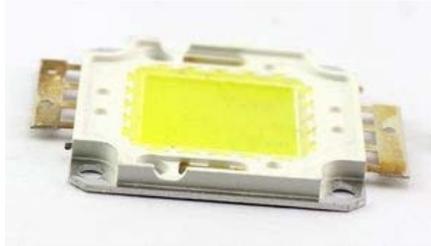
© Agence culturelle - droits réservés

# LES LED MULTIPUCES

## LED SMD (Surface Mounting Device) ou CMS (Composant Monté en Surface)

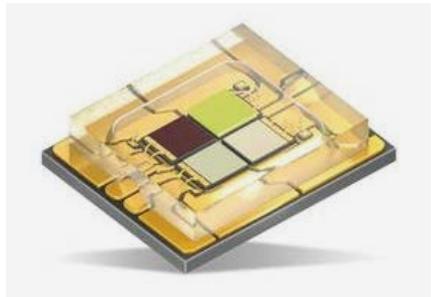
C'est une LED multi-puces c'est-à-dire qu'elle contient **plusieurs LED sur une même base**, il en existe de nombreuses variantes. Plus la superficie de la LED SMD est importante, plus sa luminosité est grande. Son rendement dépasse les 80 lm/W et son angle de diffusion est de l'ordre de 120° à 140°, elle est extra plate et de taille variable. Une seule LED SMD peut contenir des « chips » (puces) de couleurs différentes (**RGB**, par exemple).

### La LED SMD (Surface Mounting Device)



© Agence culturelle - droits réservés

### LED SMD 4 couleurs



© 2023, OSRAM GmbH

## LED High-Power

C'est une LED SMD amenée **au maximum de ses capacités** (ce qui la rend plus fragile) à laquelle on ajoute un collimateur (une lentille), son angle de diffusion est d'environ 45°, elle est principalement montée sur des culots GU10 ou MR16 (en remplacement des lampes à réflecteur dichroïque).

### LED High-Power

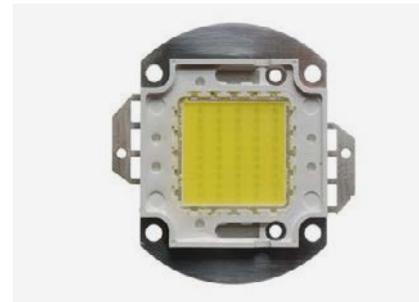


© 123RF.com

## LED COB (Chip On Board)

Comme la LED SMD, c'est une **LED multi-puces extra-plate mais de plus forte densité**: elle concentre un grand nombre de LED de très petites tailles (qui peuvent être de différentes couleurs) sur une petite surface, ce qui complexifie la gestion de la dissipation thermique. Contrairement à la LED SMD, elle constitue un produit fini (elle ne se fixe pas par soudure) qui incorpore une interface thermique. Son rendement dépasse les 120 lm/W et son angle de faisceau est de 80°. Les lampes domestiques LED à filament d'aspect « vintage » sont des LED COB avec un angle de diffusion de 360°.

### LED COB



© 123RF.com

Les LED les plus utilisées au théâtre  
Les appareils d'éclairage conçus pour le spectacle vivant  
utilisent principalement des LED multi-puces SMD ou COB.

## LES MODULES DE LED

C'est un **ensemble (LED + gestion électronique + circuit imprimé) prêt à s'intégrer** à des appareils de différentes conceptions. Il répond à une volonté de standardisation du marché de l'éclairage et d'interchangeabilité d'un « moteur lumineux » entre des produits différents de plusieurs fabricants.

### Module de LED



© 123RF.com

# les effets lumineux de la LED

## LA DÉPRÉCIATION

La **dépréciation** qualifie la **diminution progressive du flux lumineux** relatif au vieillissement d'une source de lumière. Tous les types de sources lumineuses sont concernés et l'évaluation de la dépréciation s'effectue généralement en faisant la moyenne d'une série de mesure. Dans le cas des LED, leur durée de vie utile étant très longue et leur apparition sur le marché plutôt récente, les valeurs utilisées sont des estimations plutôt que des mesures. Les fabricants utilisent des périodes d'évaluation plus courtes et extrapolent les résultats pour arriver à des prévisions.

La dépréciation du flux lumineux d'une LED est appelée « **durée de vie utile** » et s'exprime en général par une durée (en heures) accompagné d'une mention de type LxBy où y représente le pourcentage de LED qui ne peut pas atteindre la durée x de maintien du flux lumineux. Par exemple, la mention L70B60 associée à une durée de 50 000 heures, signifie qu'au moins 60% (y) des LED de ce lot auront encore 70% (x) de leur flux lumineux initial après 50 000 heures d'utilisation. Il est fréquent que seule la mention Lx apparaisse (sans la mention By). Cela signifie implicitement que la valeur Lx concerne 50% du lot. La mention By n'apparaît que lorsque l'échantillon concerné est supérieur ou inférieur à 50%. Ainsi, lorsque la mention L70 apparaît seule, elle concerne implicitement 50% du lot.

L'**IES (Illuminating Engineering Society of North America)** a approuvé plusieurs méthodes d'évaluation (tests) du comportement des LED dans le temps et d'estimation de leur longévité. Ainsi le test IES-LM-80 a été conçu pour mesurer la dépréciation du flux lumineux des LED (en dehors des appareils d'éclairage dans lesquels elles seront intégrées), et le test IES-TM-21 permet d'en faire l'extrapolation sur une plus longue durée.

Il existe aussi des tests qui s'appliquent aux appareils d'éclairages dans lesquels sont intégrées des sources LED. Ainsi, le test IES-LM-84 réalise des mesures pendant 6000 heures (soit l'équivalent de 250 jours ou 8,3 mois, non-stop) sur des appareils d'éclairage complet à une température de 25°C (+/- 5°C) et selon des cycles d'allumage de 11 heures pour 1 heure d'extinction. À partir de ces mesures, le test IES-TM-28 permet de faire une extrapolation pour estimer la dépréciation. À titre d'exemple, ce test permet d'indiquer qu'un projecteur S4 LED Lustr2 fournira encore 70% de son **intensité lumineuse** nominale après 54 000 heures d'utilisation. Ainsi, il est possible d'estimer qu'un projecteur qui serait utilisé sur 50 spectacles par an et allumé à raison de 30 heures par spectacle aurait encore 70% de sa luminosité initiale après 36 ans d'utilisation à cette cadence. Les fabricants qui font réaliser ces tests peuvent s'assurer de la durabilité de leur produit et étendre les durées de garantie. Ainsi depuis 2018, le fabricant ETC a étendu les durées de garantie (5 ans pour les projecteurs et 10 ans pour les dalles de LED).

## LA DÉCROISSANCE DU FLUX LUMINEUX («DERATING»)

La sensibilité de la LED à la chaleur se caractérise par deux effets : une réduction de sa durée de vie et une diminution de son flux lumineux.

Le «**derating**» qualifie la réduction de flux lumineux qui apparaît avec l'augmentation de la température de la LED. Concrètement, après cinq minutes d'utilisation, une LED émettra moins de lumière qu'elle n'en émettait au moment de son allumage. Cette réduction du flux est variable selon la couleur d'émission de la LED : **l'Ambre et le Rouge sont plus sensibles à l'échauffement que le Bleu, le Vert et le Blanc. La réduction de flux peut atteindre jusqu'à 30% du flux lumineux nominal d'un projecteur mais sera inégalement répartie entre les différentes couleurs qui entrent dans la composition chromatique, ce qui peut avoir pour effet de modifier la teinte en plus de diminuer le flux.** Si cela peut ne pas poser de problème pour certaines applications, il n'en est pas de même dans le cas de l'éclairage d'un spectacle où les projecteurs ne s'allument pas tous au même moment : lorsqu'un projecteur est allumé en s'ajoutant à un groupe de projecteurs déjà allumés depuis plus de cinq minutes, il est attendu qu'il fournisse exactement le même flux et la même teinte que ceux déjà allumés dont la température interne s'est élevée.

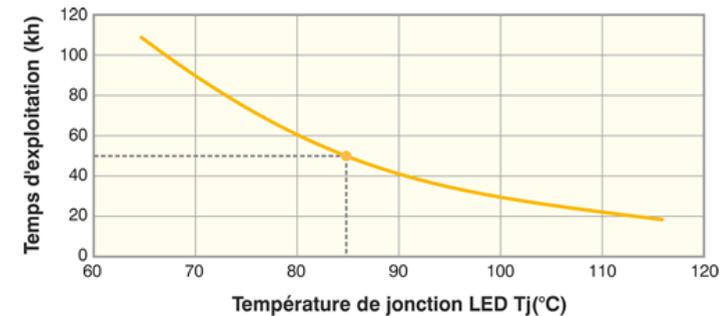
Pour que les résultats soient conformes aux attentes, il faut donc limiter l'élévation de la température par une bonne dissipation thermique du boîtier LED et de l'ensemble de l'équipement électronique du projecteur. **Plus l'élévation de température sera contrôlée et maintenue à des valeurs raisonnables, plus l'effet « derating » sera atténué.** Certains fabricants de projecteurs intègrent à leurs projecteurs un algorithme de compensation qui vient contrer l'effet « derating ». Le principe est simple : à leur allumage le flux des LED est bridé. Au fur et à mesure qu'elles montent en température la bride est inversement relâchée pour augmenter le flux lumineux et contrer l'effet « derating ». Le flux lumineux peut donc ainsi rester constant à tout moment de l'utilisation.

Par ailleurs, pour protéger les LED d'un trop fort échauffement la plupart des fabricants intègrent à leurs projecteurs un **dispositif de protection** qui diminue automatiquement le flux lumineux pour abaisser leur température en cas de surchauffe. Cela s'avère essentiel pour protéger les LED dans des environnements où la chaleur ambiante est élevée.

### Longévité de la LED

Pour avoir un fonctionnement et une durée de vie optimale, les LED ne doivent pas subir des températures au-delà de 80/85°C.

Variation de la durée de vie d'une LED en fonction de la température d'utilisation



© Énergie, Architecture et Climat, Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme (LOCI), Université catholique de Louvain (Belgique), réalisé avec le soutien du Service Public de Wallonie - Département de l'Énergie et du Bâtiment durable

La durée de 50 000 heures (axes des ordonnées) est atteinte pour une température de 85°C (axes des abscisses). La température de jonction est la température interne de la LED.

## LA GRADATION

La **gradation** consiste en la capacité de moduler le flux lumineux d'une source d'éclairage. Le fait de pouvoir y parvenir dépend essentiellement du principe physique sur lequel est conçu la source lumineuse.

En raison de sa nature la lampe à incandescence se gradue bien et facilement. La gradation des lampes à incandescence s'effectue **par découpage de phase à l'aide d'un équipement externe relativement simple (le gradateur)** dont l'élément principal est le triac (triode for alternative current). À l'inverse, la LED ne se gradue pas facilement et une bonne qualité de gradation est difficile à obtenir. Contrairement aux lampes à incandescence l'équipement électronique complexe qui permet la gradation des LED n'est pas déporté : grâce à sa petite taille et son faible poids, il est intégré à l'appareil d'éclairage. Un projecteur LED ne se branche donc pas sur un gradateur, il se branche sur une simple alimentation électrique et ne nécessite pas d'appareil complémentaire pour la gradation de son flux lumineux. Toutefois, il faut préciser que certaines lampes LED à usage domestique sont équipées d'un « driver » qui permet leur utilisation avec un gradateur en remplacement d'une lampe à incandescence (c'est par exemple le cas des lampes à miroirs dichroïques utilisées dans les rampes). Cependant, la qualité de la gradation n'atteint pas les exigences souhaitées pour l'éclairage d'un spectacle.

Dans le cas des LED, la gradation de la lumière s'effectue selon le principe de la **Modulation de Largeur d'Impulsions** (MLI ou PWM : Pulse With Modulation). Il s'agit d'un **hachage de la tension** : la LED alterne entre les valeurs « éteinte » et « allumée » à une fréquence suffisamment rapide pour que l'œil ne la voit pas s'éteindre, suivant le principe de la persistance rétinienne, plus la durée de l'état « éteint » est longue par rapport à la durée de l'état « allumée », plus la LED semblera être allumée à faible intensité. Lorsque les deux durées sont identiques, la LED semblera être allumée à 50% de son flux maximal. Toutefois, la résolution de la gradation obtenue selon ce principe n'est pas suffisamment qualitative pour satisfaire aux exigences du spectacle vivant. Pour y remédier, chaque fabricant de projecteurs apporte ses propres ajustements. La solution la plus couramment utilisée est de recourir à **deux canaux DMX** (définition 16 bits à l'aide de deux canaux de 8 bits chacun) pour piloter l'intensité du projecteur : cette solution offre la possibilité d'obtenir 65 536 niveaux d'**intensité lumineuse** entre 0 et 100% de luminosité (contre seulement 256 sur un seul canal DMX en 8 bits) et permet ainsi un bon lissage de la courbe de gradation. Toutefois, certaines consoles-lumière ne peuvent pas gérer l'intensité sur 16 bits. Pour cette raison, certains fabricants choisissent de n'utiliser qu'un seul canal DMX pour gérer l'intensité, en ajoutant en contrepartie une interpolation de valeurs sur 16 bits qui est gérée directement en interne par le projecteur.

Contrairement à la courbe de gradation des lampes à incandescence, celle des LED est linéaire. Il est **toutefois possible de modifier ce paramètre**. La plupart des fabricants de projecteurs proposent généralement un choix de quelques courbes différentes, dont au moins l'une d'elle reprend les caractéristiques de la gradation des lampes à incandescence.

En plus de la gradation 16 bits qui permet un bon lissage de la courbe de gradation, certains projecteurs intègrent une **correction Gamma** qui augmente la finesse de la perception de la gradation de la lumière. Dans certains cas ce paramètre est transparent pour l'utilisateur, tandis que dans d'autres il lui est accessible.

## LE SCINTILLEMENT («FLICKERING»)

Le scintillement (ou « **flickering** ») caractérise la perception visuelle de fluctuations de la **luminance** d'une source lumineuse. Ce papillonnement de l'intensité lumineuse est une conséquence des caractéristiques du courant électrique alternatif.

En Europe, la fréquence du courant électrique alternatif est de 50Hz (50 périodes par seconde), ainsi une lampe à incandescence s'allumera et s'éteindra 100 fois en une seconde sans que cela ne soit perceptible : l'importante inertie thermique du filament de tungstène amortit les effets du « flickering » le rendant imperceptible. Dans le cas d'une lampe à incandescence, l'amplitude de modulation est de l'ordre de 5 à 15% de l'**intensité lumineuse** nominale.

Les lampes à décharges (HMI, Fluos, etc.) qui ne possèdent pas d'inertie thermique comparable à celle d'un filament sont beaucoup plus exposées au « flickering ». Pour y remédier elles sont alimentées par des ballasts électroniques dont les caractéristiques (fréquences élevées, signal carré...) permettent elles aussi de rendre l'effet « flickering » imperceptible. Dans le cas des lampes à décharges, l'amplitude de modulation est de l'ordre de 40 à 80% de l'intensité lumineuse nominale.

En raison de leur alimentation en courant continu et de leur allumage instantané, **les LED sont encore plus exposées à l'effet « flickering »**. Pour que celui-ci soit imperceptible, le système d'alimentation (« driver ») doit assurer une régulation et un lissage de la tension en plus de son redressement. Dans le cas des LED, l'amplitude de modulation est de l'ordre de 100% de l'intensité lumineuse nominale, le scintillement est donc à son amplitude maximale.

Dans le cas des **LÉD graduables**, le principe de la **Modulation de Largeur d'Impulsions** utilisé pour permettre la gradation de la lumière (allumage/extinction par hachage de la tension) va lui aussi générer un scintillement. Pour que celui-ci ne soit pas perceptible, il doit s'effectuer à une fréquence d'au moins 600 Hz. Toutefois, il arrive qu'une fréquence suffisamment élevée pour que le « flickering » des LÉD graduables ne soit pas perceptible à l'œil, puisse malgré tout l'être par les caméras lors des captations. Généralement les fabricants de projecteurs proposent la possibilité de sélectionner plusieurs fréquences pour pouvoir s'adapter correctement aux différentes situations. Ainsi, le fabricant ETC préconise une fréquence de 1 200 Hz en spectacle, 15 000 Hz en captation et 25 000 Hz en captation « slow motion ».

## LA RESTITUTION DES COULEURS

Il est généralement admis que l'**IRC** n'est pas adapté pour nous renseigner de façon pertinente sur la capacité de restitution des couleurs d'une source lumineuse. Pour remédier à cette insuffisance, l'**IES (Illuminating Engineering Society of North America)** a développé un **nouvel outil** beaucoup plus perspicace dont la dernière version est appelée IES-TM-30-20 (abrégée en TM-30). La méthode TM-30 indique des résultats selon différents indices et propose des représentations graphiques très éloquentes.

La **méthode TM-30** utilise un nuancier de 99 couleurs de référence (rappelons que l'IRC n'en utilise que 8) uniformément réparties en **teinte** et en **saturation** pour être les plus représentatives possibles des couleurs réelles (divisés en 7 types : nature, peau, textile, peinture, plastique, imprimé et système de couleurs). Ce nuancier sert de référence pour calculer un indice Rf (indice de fidélité des couleurs, « fidelity index »).

L'indice Rf se situe sur une échelle de valeurs comprises entre 0 et 100. Il peut se diviser en quatre sous-valeurs détaillées :

Rf<sub>skin</sub> : fidélité du rendu de la peau

Rf<sub>#</sub> : fidélité par teinte

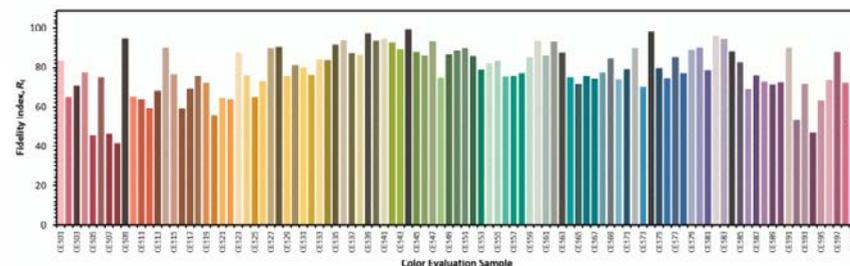
Rc<sub>#</sub> : variation chromatique par teinte

Rf,CES<sub>#</sub> : fidélité par échantillon.

La méthode TM-30 nous renseigne aussi sur le niveau de **saturation** des couleurs à l'aide de l'indice Rg (indice de saturation) qui se situe sur une échelle de valeurs comprises entre 60 et 140 où la valeur 100 représente la saturation parfaite (une valeur comprise entre 60 et 100 indique une couleur désaturée et inversement pour les valeurs comprises entre 100 et 140). Enfin, la méthode TM-30 nous indique la **température de couleur corrélée (TCC)** ainsi que la valeur du **ΔUV** de la source lumineuse. **Autant d'informations précieuses qui ne sont pas communiquées par l'IRC.**

(Voir aussi : Le modèle XYZ, p.28)

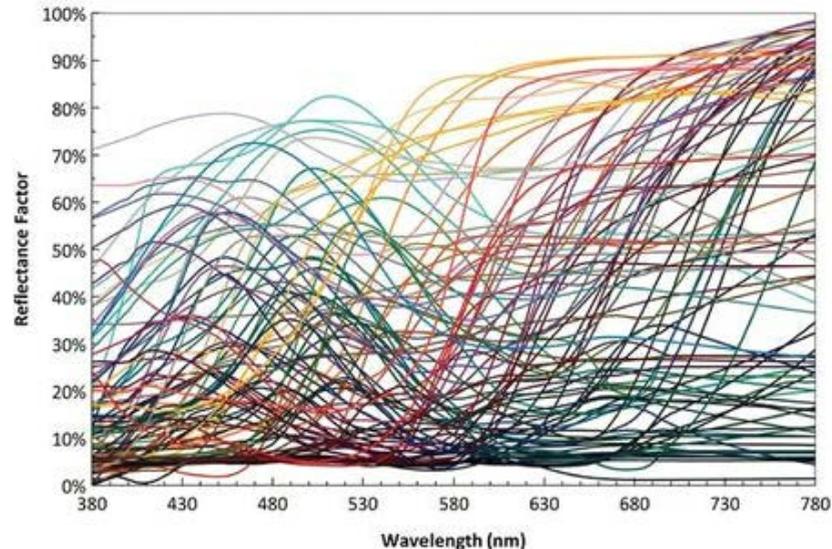
### TM-30 / indice Rf



© 2023 leclairage.fr

Indice de fidélité Rf pour chacune des 99 teintes.

### TM-30 / spectre de réflectance

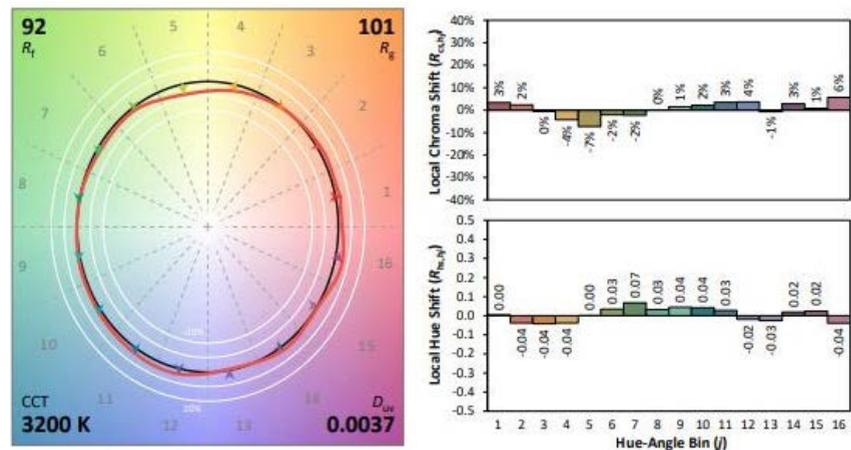


© 2023 leclairage.fr

Spectres de réflectance des 99 échantillons.

Les différentes représentations graphiques proposées par la méthode TM-30 permettent de facilement visualiser les différents résultats. Sur la représentation graphique vectorielle principale apparaît un cercle noir qui représente la source de référence et sur lequel se superpose un cercle rouge représentant la source mesurée. Jusqu'à 4500K, l'illuminant de référence est le corps noir. Au-delà, les illuminants sont calculés par mélange d'un illuminant de type corps noir avec un illuminant de type lumière du jour. Il est alors très facile d'observer les distorsions des teintes et des saturations entre la source de référence et la source mesurée: des flèches dirigées vers l'intérieur ou l'extérieur du cercle noir indiquent les écarts de saturation tandis que les flèches dirigées latéralement sur le périmètre du cercle indiquent les écarts de teinte. La méthode TM-30 propose les résultats des indices Rf et Rg sous la forme de barre-graphes.

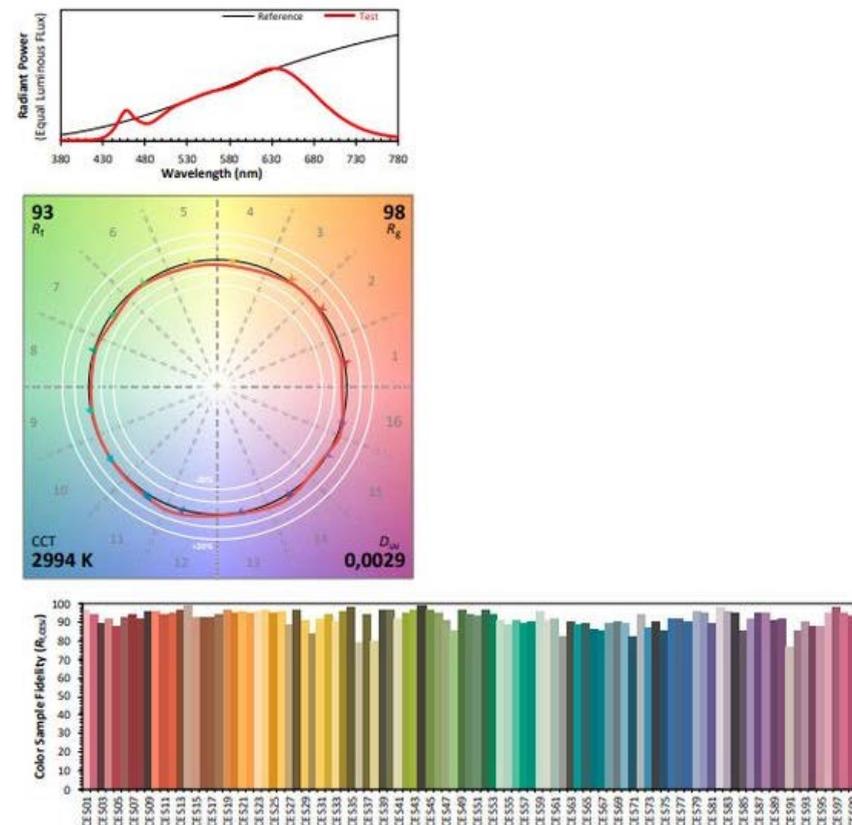
### Valeurs TM-30 d'un projecteur ETC S4 Lustr3



©2023 ETC

Rapport partiel du rendu des couleurs ANSI/IES TM-30.

### Valeurs TM-30 d'un projecteur Robert Juliat Sully Blanc Chaud



© Robert Juliat

Rapport du rendu des couleurs ANSI/IES TM-30 :

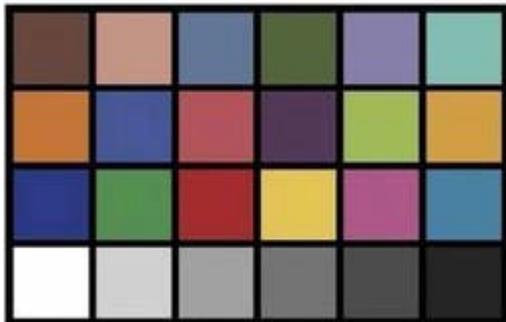
1. Courbe de référence vs courbe du projecteur.
2. Principaux résultats (R<sub>f</sub>, R<sub>g</sub>, CCT, Delta UV).
3. Rendu des couleurs par teinte.

**La méthode TM-30 enrichit les critères d'évaluation de la fidélité et de la perception des couleurs.** La comparaison entre deux produits différents est plus juste avec l'indice R<sub>f</sub> qu'avec l'indice Ra (IRC) et certains produits affichent une valeur R<sub>f</sub> en dessous de leur valeur Ra. En vertu de cet aspect qualitatif, de plus en plus de fabricants communiquent les résultats de la méthode TM-30 où les indices R<sub>f</sub> et R<sub>g</sub> sont des paramètres discriminants capables de mettre en évidence les performances colorimétriques des projecteurs à sources LED.

Dès 2007, la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) reconnaissait la faiblesse de l'IRC, notamment à l'égard des LED. Depuis 2015 elle reconnaît l'intérêt de la méthode TM-30 et de l'avantage de l'indice Rf par rapport au Ra. Toutefois, l'IRC constitue toujours la référence officielle. Aujourd'hui, les deux indices cohabitent et les fabricants adoptent de plus en plus le TM-30.

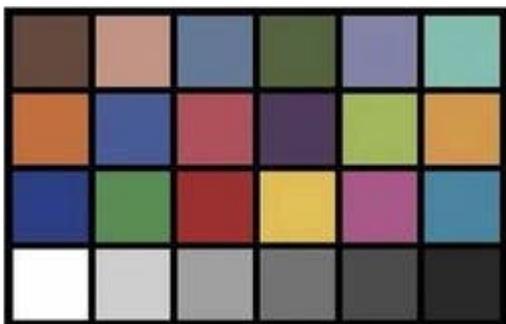
Certains fabricants de projecteurs communiquent un autre indice destiné aux équipes de captation vidéo : l'indice TLCI (Television Lighting Consistency Index) il s'agit d'une valeur (sur une échelle de 0 à 100) représentant la réponse en couleur qui découlerait de l'utilisation d'une caméra vidéo et qui permet d'anticiper les éventuelles corrections à apporter en post-production.

#### Valeurs TLCI d'un projecteur DeSisti F14 superLED «Tungsten» et F20 «Daylight»



© DE SISTI

Rapport du rendu des couleurs TLCI / SUPER LED F14 - 400W - Tungsten - TLCI-2012 : 96.



© DE SISTI

Rapport du rendu des couleurs TLCI / SUPER LED F20 - 1500W - Daylight - TLCI-2012 : 96.

## l'étalonnage (ou calibration) de la LED

Malgré la qualité du tri effectué en sortie de fabrication, **chaque LED est unique** et possède des caractéristiques spectrales qui lui sont propres. Les disparités sont généralement minimales mais peuvent provoquer des **divergences de teintes** entre différents projecteurs d'un même type. Avec le temps ces disparités peuvent s'accroître, d'autres peuvent apparaître et ainsi augmenter les incohérences entre les différentes sources d'éclairage. Pour y remédier, il est possible de procéder à un étalonnage des LED.

L'**étalonnage** est un processus qui est effectué pour **assurer la cohérence de la luminosité des couleurs**, il permet d'assurer **la continuité de la qualité de la lumière** délivrée par un projecteur et l'harmonisation des projecteurs d'un même type entre eux. L'étalonnage a pour objet la continuité de l'homogénéité colorimétrique et la constance de l'**intensité lumineuse**.

L'étalonnage des projecteurs multicolores s'effectue en comparaison du « point blanc » de référence (lumière blanche étalon du projecteur). Il consiste essentiellement à déplacer les coordonnées du point de couleur échantillonné (lumière blanche du projecteur à calibrer) vers les coordonnées du point de couleur cible (lumière blanche de référence). En ajustant la luminosité de chaque LED (Rouge, Vert, Bleu, Ambre, Citron, etc.) le « point blanc » du projecteur peut être modifié jusqu'à ce qu'il corresponde au « point blanc » de référence. Ce processus d'étalonnage fournit un facteur de compensation individuel pour chacune des LED composant la matrice colorée. Lorsqu'ils sont appliqués à chacune des LED, ces facteurs de compensation permettent à **tous les projecteurs d'obtenir des teintes similaires** dans la totalité de leur espace de chromaticité.

Une fois correctement étalonnés, les projecteurs d'un même type bénéficient d'une **homogénéité colorimétrique** et d'une **intensité lumineuse constante et durable** permettant de pouvoir les utiliser ensemble, ou même avec des projecteurs provenant d'un autre parc de matériel sans constater d'anomalie chromatiques.

Ce type d'étalonnage ne concerne que les projecteurs à **source multicolores** où il est possible d'ajuster chaque couleur de LED pour que l'ensemble compose une lumière blanche qui coïncide avec la lumière blanche référence. Il n'est pas possible d'en faire autant avec les projecteurs à sources LED blanches puisque le « point blanc » de référence est déterminé par celui de la LED blanche et non par une composition chromatique ajustable comme dans le cas des projecteurs multicolores.

# 3

## LA LED: QUESTIONS ESTHÉTIQUES

les évolutions esthétiques au théâtre

60

les modèles typiques de la lumière «blanche»

62

un nouveau potentiel de créativité

69

Lorsqu'il est question d'éclairage scénique, la question de l'esthétique est essentielle. Quelles sont les caractéristiques esthétiques des projecteurs LED et peuvent-elles satisfaire les intentions artistiques théâtrales ? Pourquoi la lumière des LED peut-elle être parfois perçue négativement ?

## les évolutions esthétiques au théâtre

À travers les derniers siècles, les intentions et les finalités esthétiques n'ont cessé d'évoluer au rythme des innovations techniques mais aussi des évolutions sociales, culturelles, économiques et politiques. Si en premier lieu l'éclairage a été considéré sous son aspect le plus utilitaire comme un moyen permettant de « voir » le spectacle, il a très vite été appelé à **répondre à des enjeux d'ordre esthétique**, à devenir **un assistant du jeu des acteurs** et **un moyen de mise en scène**.

Dès le XVII<sup>e</sup> siècle (Nicola Sabbattini), la disposition des chandelles et des lampes à huile était étudiée pour **mettre en valeur l'esthétique en usage à cette époque où le devant de la scène, les artistes et les toiles peintes** étaient les seuls éléments éclairés. Au XIX<sup>e</sup> siècle, l'apparition des appareils d'éclairage au gaz permet d'éclairer le plateau sur toute sa profondeur tout en modulant l'**intensité lumineuse** ; l'exploration de nouvelles esthétiques devient donc possible en déployant les artistes sur l'ensemble du plateau et en nuanciant la lumière (Adolphe Appia) par l'alternance des scènes nocturnes avec des scènes plus éclairées. Toutefois à cette époque, en venant bousculer les repères établis, l'éclairage au gaz et ses caractéristiques esthétiques (forte luminosité modulable jusqu'à la quasi-obscureté)

sont l'objet de vives critiques. De la même manière, il sera reproché un peu plus tard à l'électricité de produire une lumière trop statique par opposition au vacillement de la lumière produite par inflammation d'un combustible (chandelle, huile, gaz). Pourtant, avec les possibilités de mobilité des sources d'éclairages et de coloration de la lumière, l'électricité a permis l'apparition d'esthétiques nouvelles et de la dramaturgie de la lumière.

Le XX<sup>e</sup> siècle verra apparaître différentes esthétiques de la lumière : le « **plein feu** » de lumière franche, où les projecteurs sont à la vue du public pour ne rien lui cacher et qu'il n'oublie pas qu'il est au théâtre (Bertold Brecht), la lumière « blanche » directionnelle et « découpée » en zones dramatiques (Jean Vilar), la lumière « colorée » du music-hall, la lumière d'influence picturale où l'ombre et le clair-obscur sont sublimés (Giorgio Strehler, Patrice Chéreau), la lumière cinématique et spectaculaire des concerts de grande ampleur. Au cours du XX<sup>e</sup> siècle ces dominantes esthétiques se sont succédé, ont alterné ou ont coexisté ; tout en restant les principales influences esthétiques, elles s'inscrivent aujourd'hui dans une dynamique de mélange et d'hybridation.

**Chaque période de transition entre une ancienne et une nouvelle technologie d'éclairage s'est accompagnée de critiques négatives relatives à la perception des couleurs et à la sensation provoquée par les nouvelles caractéristiques de la lumière. En modifiant notre perception des couleurs, l'utilisation de la LED s'inscrit dans cette dynamique.** Pourtant, les récentes évolutions du matériel et de la technologie (LED, projecteurs asservis, réseau...) ne modifient pas le processus de conception de la lumière de spectacle et permettent de s'adapter aux différentes esthétiques. Les avancées techniques qui coïncident depuis toujours avec les transformations économiques, sociales et esthétiques, peuvent permettre d'explorer de nouveaux territoires artistiques et esthétiques, mais nécessitent un certain temps pour se faire accepter.

# les modèles typiques de la lumière «blanche»

## LA TERMINOLOGIE

Il règne parfois une grande confusion sur la terminologie employée pour caractériser les projecteurs LED, notamment les diverses **variantes de lumière « blanche »** qui peuvent être rencontrées.

Les projecteurs multicolores (dont la source lumineuse est constituée de LED de plusieurs couleurs) peuvent être qualifiés de « **polychromes** » et ce principe additif peut alors être qualifié de « polychromie ». Cette appellation fait écho à celle de « trichromie » qui caractérise les principes additifs à trois couleurs (RVB ou CMJ). L'appellation « polychromie » suggère que plusieurs couleurs (entre 3 et 8 sont utilisées sur les projecteurs actuels) sont utilisées pour composer une lumière « blanche » par principe additif.

À l'inverse, les projecteurs dont la source lumineuse est constituée de LED d'une seule couleur (« blanc chaud » ou « blanc froid ») sont souvent qualifiés à tort de « **monochromes** », par opposition aux projecteurs « polychromes ». Pourtant les sources « blanc chaud » et « blanc froid » sont elles aussi des sources polychromes, puisqu'elles émettent en continu dans une très grande partie du spectre visible. Le terme de « monochrome » est donc inapproprié pour les caractériser.

Dès lors qu'elles sont toutes polychromes, quelle appellation utiliser pour différencier les projecteurs dont la source lumineuse est constituée de LED « multicolores » de ceux dont la source lumineuse est constituée uniquement de LED « blanches » ? L'appellation « blanc additif » peut paraître juste pour qualifier les projecteurs dont la source lumineuse est constituée de LED « multicolores », et ainsi les différencier des projecteurs « blanc chaud » et « blanc froid ».

## LA LUMIÈRE «BLANCHE» DE RÉFÉRENCE

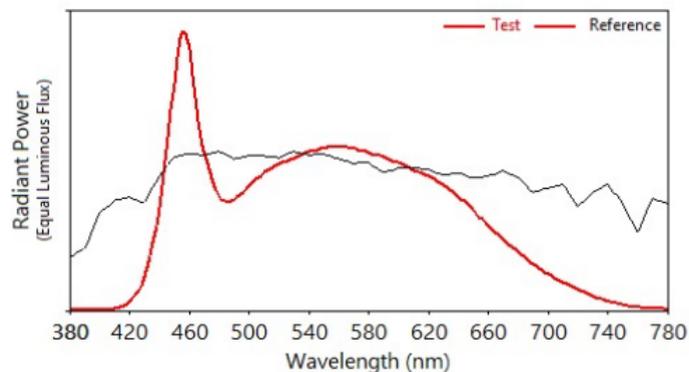
La composition chromatique et la **température de couleur** d'une lumière blanche sont liées à la **nature de la source lumineuse émettrice**. Durant le XX<sup>e</sup> siècle, la différence se faisait essentiellement entre les projecteurs à **incandescence** produisant une lumière « chaude » (de 2700 K à 3200 K) et les projecteurs à sources froides produisant une lumière « froide » (de 5000 K à 6500 K). L'écrasante majorité des projecteurs de théâtre fonctionnant avec des lampes à incandescence, celle-ci y constitue la lumière « blanche » de référence et présente les mêmes caractéristiques spectrales à travers les différents projecteurs (PC, Fresnel, Découpe, PAR, etc.) indépendamment du fabricant. Depuis l'apparition de la LED, un même projecteur (par exemple une Découpe) peut être disponible en différentes déclinaisons qui proposent chacune une différente composition chromatique de lumière « blanche » : le « blanc chaud », le « blanc froid », le « blanc variable », et le « blanc additif ». À cela, s'ajoutent les différences pouvant exister d'un fabricant à l'autre, selon le choix des LED utilisées : il y a donc différents « blancs chauds », différents « blancs froids », différents « blancs variables », et différents « blancs additifs ». Cette **complexification** peut paraître déroutante et perturber le choix, puis l'usage, du matériel d'éclairage.

## LE «BLANC FROID»

Le « blanc froid » est celui de la **LED « blanche » historique**, telle qu'elle fût inventée au milieu des années 1990 à partir d'une LED bleue et d'un **lumiphore** Jaune. La qualité de la lumière produite dépend essentiellement de la qualité des luminophores qui atteignent aujourd'hui des niveaux de qualité très satisfaisants. Certaines de ces LED affichent de très bonnes valeurs de TM-30 et d'**IRC** (supérieures à 90). Toutefois, leur TCC (comprise entre 5000 K et 6500 K) ne correspond pas au standard de référence que représente encore l'halogène (3000/3200 K) pour l'éclairage de théâtre, où les sources de TCC élevée (HMI, Fluo, etc.) sont généralement réservées à des usages spécifiques et ponctuels. Pourtant, les éclairages de théâtre utilisent abondamment les filtres **CTB** pour « refroidir » le « blanc chaud » des projecteurs halogènes à des valeurs de l'ordre de 5000/6000 K (voire plus dans certains cas). D'autre part, **le « blanc froid » est le blanc de référence pour les éclairages de concerts, de plateau de TV et de cinéma**. Dès lors que ce « blanc froid » est capable d'atteindre un niveau de qualité aussi satisfaisant (nettement supérieur à celui des HMI ou des fluos) il n'est pas impossible qu'il s'impose un jour comme nouveau standard de référence

pour l'éclairage de théâtre. Cette hypothèse est pour le moment mise à mal par l'existence du « blanc chaud » qui séduit à priori d'avantage par sa ressemblance avec l'halogène.

#### Distribution spectrale RJ 963SX blanc froid



© Robert Juliat

Distribution spectrale du projecteur Robert Juliat Charles-953SX « blanc froid » en comparaison de l'illuminant de référence « daylight ».

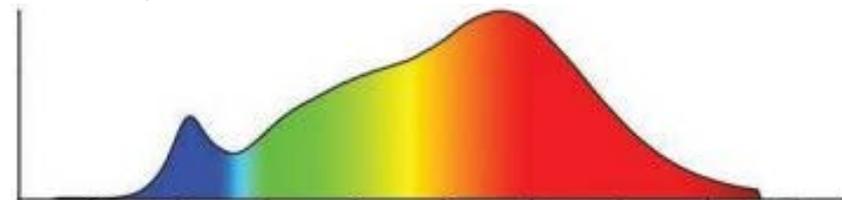
## LE «BLANC CHAUD»

Le « blanc chaud » est obtenu selon le même principe que le « blanc froid » à la différence que les **luminophores** sont choisis pour produire une lumière dont les caractéristiques spectrales sont assez **proches de celles des lampes à incandescence** et dont la TCC en est comparable (comprise entre 2700 K et 3200 K). Comme pour le « blanc froid », le choix et la qualité des luminophores, ainsi que le choix de la LED émettrice Bleue (ou Violette), sont déterminants pour la qualité du résultat. La LED « blanc chaud » n'a pas une aussi bonne efficacité lumineuse que la LED « blanc froid » en raison de la complexité des luminophores nécessaires à son obtention. Certaines de ces LED offrent une composition spectrale relativement **proche de celles des lampes halogènes** et peuvent afficher de très bonnes valeurs de TM-30 et d'**IRC** (supérieures à 90), c'est la raison pour laquelle, lors du remplacement de projecteurs halogènes, les projecteurs « blanc chaud » sont prioritairement et instinctivement envisagés par certains. Pour autant, il ne faut pas s'attendre à un remplacement à l'identique : si leur utilisation sans filtre peut effectivement être très comparable (voire indétectable par l'œil,

en raison du **métamérisme**) à des sources à incandescence, il n'en est pas de même lorsqu'elles sont utilisées avec des filtres soustractifs en raison de certaines différences spectrales significatives (dans les Bleus, les Cyans et les Rouges).

Ainsi, les **teintes** obtenues par l'ajout d'un filtre soustractif sur un projecteur LED « blanc chaud » ne sont pas identiques à celles obtenues par l'ajout du même filtre soustractif sur un projecteur halogène. Cette caractéristique est considérablement renforcée lorsqu'il s'agit d'un projecteur LED « blanc froid ».

#### Distribution spectrale RJ 654SX blanc chaud



© Robert Juliat

Distribution spectrale du projecteur Robert Juliat Charles-654SX « blanc chaud ».

Axe des abscisses : longueur d'onde.

Axe des ordonnées : quantité de rayonnement lumineux.

## LE «BLANC MÉDIUM»

Même si celui-ci n'est pas représenté parmi les appareils d'éclairage scénique, il faut noter l'existence d'un « blanc médium » dont la TCC est comprise entre 4000 K et 4500 K. Il est en situation de devenir le standard en **éclairage muséographique**. L'usage de ce « blanc médium » est intéressant dans des espaces intérieurs, où il intervient en complément de la lumière du jour.

## LE «BLANC VARIABLE»

Certains projecteurs proposent une alternative qui **combine le « blanc froid » et le « blanc chaud »** et offrent la possibilité de pouvoir faire varier la composition spectrale de la lumière blanche en variant la TCC. Les projecteurs fonctionnant sur ce modèle sont équipés de deux moteurs de LED : un « chaud » et un « froid ». En faisant varier la proportion de l'un par rapport à l'autre, il est possible d'obtenir une lumière blanche évoluant entre les deux valeurs extrêmes définies par l'un et par l'autre. A titre d'exemple, un projecteur équipé de LED 2800 K et 6600 K (comme le Fresnel DeSisti F14 HP VW), peut ainsi faire varier sa TCC entre ces deux valeurs. Malheureusement, en raison du principe de conception de ce système, l'**intensité lumineuse** varie avec la TCC : dans notre exemple, l'intensité lumineuse sera maximale lorsque la TCC se situera autour de 4700 K (où toutes les LED sont allumées) tandis qu'elle sera minimale lorsque la **température de couleur corrélée** se situera autour de 2800 K ou de 6600 K (où seulement la moitié des LED sont allumées). Par ailleurs, la transition du « blanc chaud » vers le « blanc froid » (ou l'inverse), constitue un changement de coordonnées chromatiques linéaire qui ne suit pas la courbe du **corps noir**, sauf lorsqu'un algorithme a été intégré à cet effet.

## LE «BLANC ADDITIF»

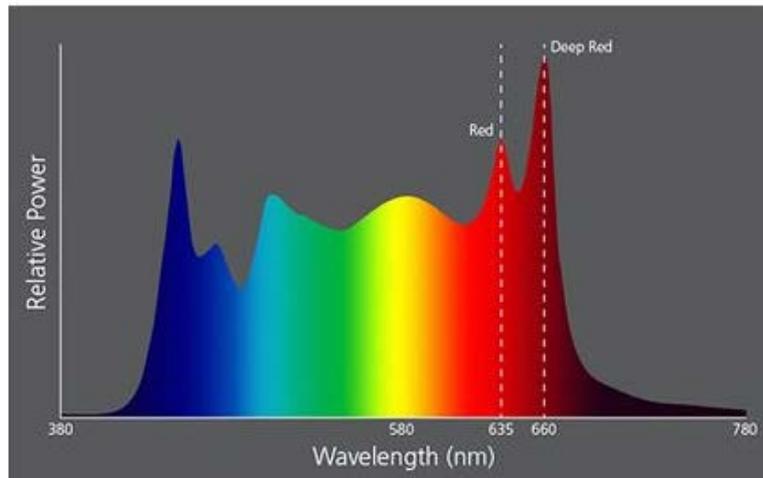
Il est aussi possible d'obtenir une **lumière blanche selon le principe additif**. Le « blanc additif » est obtenu en ajoutant entre-elles des **plages de longueurs d'ondes spécifiques** qui correspondent chacune à une teinte différente. La LED grâce à sa petite taille et à ses différentes **teintes** possibles, permet d'intégrer le principe additif à l'intérieur d'un seul **projecteur à sources multicolores**. **La possibilité de modifier la composition chromatique de la lumière en ajoutant entre eux des rayonnements lumineux de teintes différentes est jusqu'à aujourd'hui une spécificité exclusive à la LED (et au LASER qui est aussi une diode).**

La LED permet aussi d'enrichir la composition chromatique d'un système trichrome (**RGB** ou **CMY**) et d'en compenser certaines insuffisances en **ajoutant des teintes supplémentaires aux trois teintes primaires**. (Voir aussi : L'addition, p.30) Sur ce principe, il existe des projecteurs multicolores qui additionnent jusqu'à huit teintes différentes. Ainsi, en supplément du trio classique Rouge, Vert et Bleu, il est fréquent de trouver le Blanc (pour améliorer la qualité du blanc additif, son **IRC** et obtenir des couleurs « pastelées »), l'Ambre (pour obtenir des jaunes/orangés plus saturés et des rouges plus denses), et le Citron (pour obtenir des jaunes plus saturés,

augmenter l'IRC et augmenter le **flux lumineux**). Certains projecteurs intègrent aussi le Cyan, le Bleu royal et le Rouge profond, dans le but de proposer une lumière blanche très riche et ajustable, tout en proposant une plus large palette de teintes et de **saturation**.

Le choix des teintes et de leur nombre relève d'un compromis entre les exigences esthétiques et les limites physiques. Jusqu'à une certaine limite, augmenter le nombre de teintes différentes permet d'élargir et d'enrichir la composition chromatique de la lumière, au-delà de cette limite, l'ajout de teintes supplémentaires ne permet plus d'étendre le spectre ni d'améliorer sa répartition de façon suffisamment significative, et peut au contraire renforcer la désaturation. **Il est constaté que pour atteindre une grande richesse colorimétrique à partir des trois primaires classiques (Rouge, Vert et Bleu), il est nécessaire d'ajouter une couleur correspondant au pic de sensibilité de la perception visuelle (Citron), de compléter par deux couleurs intermédiaires (Ambre et Cyan), et pour peaufiner, de rajouter une couleur à chacune des extrémités du spectre (Bleu royal/Indigo et Rouge profond).**

Plus un projecteur intègre de teintes différentes dans sa composition chromatique, plus la phase de **R&D** nécessaire à un résultat optimal est longue et complexe. Les récentes avancées technologiques permettent d'obtenir des flux lumineux de plus en plus importants vers les extrémités du spectre (Bleu royal/Indigo et Rouge profond), là où la perception visuelle est la moins sensible. L'utilisation des LED Citron et Menthe permet de densifier la bande spectrale médiane, au-delà du simple ajout de leurs dominantes chromatiques respectives. De plus en plus de fabricants explorent ces possibilités. Les projecteurs conçus sur ce principe additif permettent d'obtenir une grande gamme de lumières « blanches », de teintes, et de TCC différentes, en affichant de très bonnes valeurs de TM-30 et d'IRC (supérieures à 90). Ce sont des projecteurs très polyvalents qui permettent de mettre à profit les spécificités exclusives de la LED et permettent d'en tirer tous les avantages.



© 2023 ETC

Distribution spectrale du projecteur ETC S4 Lustr3 «multicolore».

Quelques points forts de la LED « couleur »

Ajouter des rayons lumineux pour modifier la composition chromatique est une spécificité de la LED.

Avec la LED, on peut ajouter des teintes supplémentaires aux trois couleurs primaires.

Le recours à certaines LED permet de densifier la bande spectrale médiane.

Certains projecteurs LED intègrent d'autres couleurs pour arriver à un blanc profond et plus riche.

## un nouveau potentiel de créativité

La LED peut satisfaire aux exigences esthétiques et dramaturgique de l'éclairage de théâtre, et son utilisation s'inscrit parfaitement dans l'espace scénographique tel qu'il est établi depuis plus d'un siècle. Mais la LED permet aussi d'explorer de nouveaux espaces et d'élargir le champ des possibles.

La **petite taille et la maniabilité** de la LED ont été les premiers atouts à être exploités pour l'éclairage de théâtre. Elle est parfaitement adaptée pour s'intégrer à des éléments de décors et éclairer certains détails en étant très près de l'objet à souligner sans être visible du public. Elle participe ainsi à la structuration de l'espace scénographique. Sa faible consommation électrique et l'utilisation de petites batteries, permettent même de l'intégrer à des accessoires mobiles ou des costumes. Les objets semblent générer eux-mêmes la lumière. Elle se prête aussi très bien à la conception de structures volumétriques ou de surfaces lumineuses, ces objets scénographiques lumineux font alors partie intégrante de la conception scénographique et esthétique du spectacle. Lorsque les LED utilisées pour leur conception le permettent, ces objets peuvent devenir dynamiques en variant d'intensité et de couleur pixel par pixel (matricage ou LED mapping), créant ainsi de nouvelles formes animées et devenant des acteurs physiques de la scène.

La LED offre aussi la possibilité d'agir différemment sur le **découpage rythmique** de la séquence-lumière du spectacle. Il est en effet possible d'obtenir des temps d'allumage et d'extinction beaucoup plus rapide qu'avec des projecteurs à **incandescence** et ainsi permettre des enchaînements instantanés entre deux états lumineux, ou encore créer des effets stroboscopiques.

C'est certainement avec les **projecteurs multicolores** et leur possible travail d'exploration de la couleur que les perspectives offertes par la LED sont les plus vastes. Si dans un premier temps, en utilisant un projecteur LED à sources multicolores il peut sembler naturel de chercher à reproduire une teinte d'après le résultat obtenu par l'ajout d'un filtre sur un halogène,

la possibilité de pouvoir modifier cette teinte par rapport à la réalité du décor, des costumes, ou d'une scène spécifique devient vite très appréciable. Pour s'adapter à la réalité de la scène, ou pour répondre à un besoin nouveau, il devient possible de créer très rapidement des teintes précises à l'aide de sa propre créativité. Pour participer à l'esthétique et à la narration d'un spectacle, il est aussi possible d'imaginer des transitions ou des animations colorées de différentes natures, des plus subtiles aux plus brusques. Par exemple, il est tout à fait envisageable de représenter de façon très réaliste un lever ou un coucher de soleil par une variation de TCC et d'intensité lumineuse de chaque projecteur qui se développerait sur 30 ou 40 minutes, voire sur toute la durée du spectacle. Il est possible d'imaginer des transitions entre deux états lumineux où seule la couleur dominante change. Ces transitions peuvent s'effectuer sur une durée assez longue et ne devenir perceptible que lorsqu'elles sont abouties (à la manière d'un lever ou d'un coucher de soleil) ou au contraire, peuvent se succéder de façon instantanée et tranchée, pour marquer le rythme de l'action.

## La LED et l'innovation ailleurs

Au-delà des sources lumineuses et de ses applications à l'éclairage de spectacles, la LED (et le LASER) permet d'innover dans de différents domaines où la R&D est dynamique. En voici quelques exemples.

Le chercheur et prix Nobel Gérard Mourou, travaille (en partenariat avec le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, CEA), à réduire la durée de vie des déchets atomiques à 30 minutes grâce au LASER. Il s'agit d'une piste assez sérieuse pour neutraliser les déchets nucléaires.

La théorie de l'électronique à ondes lumineuses («lightwave electronics») promet des calculs réalisés par ordinateur, un million de fois plus rapide que les calculs actuels.

Le rayonnement rouge (670 nm) des LED peut être utilisé pour le traitement de la vision et conduire à des améliorations lorsqu'elle est déclinante.

La société Lucibel propose un «masque anti-ride» qui permet une régénération cellulaire, en utilisant le rayonnement rouge (635 nm) des LED.

# LA LED: BÉNÉFICES, INCONVÉNIENTS ET ADAPTATIONS

les bénéfices	72
les freins	77
les différences et adaptations possibles	82
le facteur humain	93
la composante budgétaire	96

Il semble raisonnable de vouloir remplacer une ancienne technologie par une nouvelle, à condition que celle-ci apporte certains avantages et qu'elle représente une amélioration. Comparativement à l'éclairage incandescent, quels sont les réels bénéfices de l'utilisation de la LED ? Son usage peut-il entraîner des conséquences négatives ? Pourquoi l'adoption de la LED s'est-elle généralisée à l'ensemble des applications d'éclairage ?

## les bénéfices

Impact environnemental, exigences de sobriété, économies d'énergie avérées ou supposées : un point sur les bénéfices de la LED qui, pour être réels, doivent être accompagnés d'un changement de paradigme et d'une réelle volonté des équipes. Consommer moins, c'est aussi faire des choix techniques plus légers.

## LES ÉCONOMIES D'ÉNERGIE

Le mode de production industrielle qui s'établit dès le début du XIX<sup>e</sup> siècle est un grand émetteur de CO<sub>2</sub> et un **gros consommateur d'énergie grise**. Aujourd'hui plusieurs études montrent que les premiers signes du réchauffement climatique se font sentir dès l'avènement de l'ère industrielle, par conséquent ce mode de production est fortement remis en question sous la pression de plus en plus forte de quelques organisations qui s'emparent des grands enjeux environnementaux et climatiques. Si cette prise de conscience se diffuse et se généralise, on peut regretter que les choses ne changent pas assez vite : certains intérêts peuvent s'opposer, les alternatives sont rarement satisfaisantes, le mode de consommation est rarement remis en cause, les comportements peinent à évoluer, etc. Cette question est immensément complexe et plurifactorielle. La LED ne peut pas prétendre à transformer le mode de production industrielle, mais elle peut limiter les impacts sur l'environnement en réduisant la consommation d'énergie nécessaire à produire un éclairage artificiel.

## L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

L'impact environnemental d'une source lumineuse est principalement déterminé par deux facteurs : le premier est l'efficacité à produire de la lumière au regard de la quantité d'énergie consommée, le second est la durée de vie.

Précisément, les sources LED se caractérisent par une faible consommation d'électricité (40% de moins que les lampes fluorescentes et 80% de moins que les lampes à incandescence) et par une longue durée de vie (8 à 16 fois plus que les lampes fluocompactes et 25 à 50 fois plus que les lampes à halogènes).

Lors de sa **fabrication et de son recyclage** (ou de sa destruction), une source lumineuse (comme toute autre production humaine industrielle ou artisanale) a un impact environnemental, qui s'ajoute à celui généré par la consommation d'énergie pour son fonctionnement. Au regard de sa longue durée de vie et de sa faible consommation électrique, la LED constitue actuellement la source lumineuse la plus performante lorsqu'il s'agit de limiter la consommation d'énergie et les impacts environnementaux. Selon l'agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME, récemment

rebaptisée : agence de la transition écologique) l'impact environnemental des LED est bien inférieur à celui des lampes à **incandescence** : la LED pourrait permettre jusqu'à 85% de réduction des impacts comparativement à l'halogène. Cependant, il reste une marge de progression importante sur les phases de fabrication et de recyclage et notamment de la récupération de métaux « stratégiques » (indium, gallium) et des poudres **luminophores** composées de terres rares (yttrium) (Voir aussi : La couleur, p.37). Le recyclage de la LED demande des moyens adaptés (séparation du verre, des plastiques, de la partie électronique) et des études visant à le rendre plus performant sont en cours. Écosystème (anciennement appelé Recylum), l'éco-organisme en charge de la collecte des ampoules usagées en France, déploie des efforts en R&D pour optimiser le recyclage. Cette question du recyclage concerne l'ensemble des productions humaines et notamment l'ensemble des déchets informatiques et électroniques dont le volume est de plus en plus conséquent, il s'agit d'un des enjeux le plus important pour réduire l'impact des extractions minières : il y a environ 40 à 50 fois plus d'or dans une tonne de déchet informatique que dans une tonne de minerai.

## LE DÉVELOPPEMENT DURABLE

Les appellations « développement durable » et « écoresponsabilité » ont tellement imprégné l'ensemble de la société (collectivités, médias, publicités, entreprises, etc.) qu'il est parfois permis de douter de la sincérité de certaines démarches pouvant relever de la simple posture, ou du « greenwashing », plutôt que d'une réelle prise de conscience.

Pourtant, le changement climatique menace la stabilité internationale et les conditions physico-chimiques qui permettent l'existence et le maintien de la vie humaine. Face à la réalité de l'urgence environnementale et climatique, l'écoresponsabilité en tant que conception du développement inscrit dans une perspective de long terme et intégrant les contraintes écologiques à l'ensemble des activités humaines (consommation, production, transport, interactions sociales...) devrait être une valeur commune, universelle et intangible. C'est bien dans cette dynamique et plus précisément dans celle qui accompagne une meilleure gestion de la ressource électrique que s'inscrit le recours à l'utilisation de la LED.

En 2016, la part de la consommation mondiale d'électricité pour l'éclairage était estimé à environ 416 Gigawatts (GW), soit l'équivalent de la production de 480 centrales nucléaires « moyennes », simultanément la part de cette même consommation avec la LED comme source unique d'éclairage était évaluée à seulement 163 GW, soit une économie de 252 centrales nucléaires. Le remplacement de toutes les sources d'éclairage par des sources LED permettrait d'**économiser l'énergie produite par 60 %** du parc nucléaire mondial.

Une récente étude dévoile que le passage à la LED a permis de réduire les émissions mondiales de CO2 de 1.5% en 2017 soit 570 millions de tonnes (162 centrales à charbon).

## L'ÉCO-CONCEPTION

À l'échelle européenne, la directive **Éco-conception (ou EcoDesign)** est une initiative ayant pour objectif de **réduire l'empreinte carbone**. Le principe de l'éco-conception n'est pas de proposer une nouvelle méthode de conception, mais d'intégrer les facteurs environnementaux dans les méthodes classiques de conception, avec pour principal objectif la réduction de la consommation des appareils électriques et électroniques et la conception d'appareils durables. En 2012, cette directive a exclu du marché européen les lampes à incandescence jugées insuffisamment efficaces (seulement 5% de l'énergie consommée est restituée sous forme de lumière tandis que 95% l'est sous forme de chaleur). Sur cette même voie, elle a exclu les lampes halogènes en 2018, les tubes fluorescents et les lampes fluo-compactes seront exclues en 2023.

Comparatif des rendements énergétiques de différentes sources

Sources lumineuses	Énergie restituée sous forme de lumière (% d'énergie consommée)	Énergie perdue	Efficacité lumineuse en Lumen par Watt (lm/W)	Durée de vie (en h)
Incandescence	5%	95%	12 à 20	1000
Incandescence aux halogènes	7%	93%	15 à 30	2000
Fluocompacte	NC	NC	50 à 80	8000
LED	de 50% à 80%	de 20% à 50%	100 à 200	20000 à 50000

Grâce aux pressions effectuées sur l'union européenne par un groupement d'associations internationales (**PEARLE, PLASA, VPLT, ALD**) œuvrant dans le domaine de l'éclairage pour l'industrie de « l'Entertainment » (cinéma, audiovisuel, spectacle vivant), presque toutes les sources spécifiques utilisées par ce secteur ont été exemptées. Toutefois, cette exemption a un caractère provisoire. La réglementation Éco-conception répondant à un cycle de cinq ans, il est très probable que les exemptions qui ont été accordées soient remises en question, surtout si des substituts sont disponibles pour tous les appareils d'éclairage. Il est tout aussi probable que les acteurs qui interviennent dans la fabrication des lampes halogènes arrêtent leur fabrication face à la faible demande que représente le secteur de « l'Entertainment ». Les autres continents sont aussi concernés par des règlements similaires, ce qui devrait finir par entraîner la fin de la fabrication des lampes à incandescence. Quoiqu'il en soit, même s'il ne restait qu'un seul fabricant de lampes halogènes, celles-ci ne seront réglementairement commercialisables dès que l'exemption prendra fin. Il faut donc s'attendre et se préparer à la fin de l'halogène à plus ou moins court terme, l'horizon 2024/2030 semblant plutôt probable.

### Les textes fondateurs de la directive Éco-conception :

- La Directive 2005/32/CE du 6 juillet 2005
- Le Règlement (CE) No 244/2009 du 18 mars 2009
- Le Règlement (UE) No 1194/2012 du 12 décembre 2012
- Le Règlement (UE) 2019/2020 de la commission du 1<sup>er</sup> octobre 2019

## LA SOBRIÉTÉ ÉNERGÉTIQUE

La sobriété énergétique consiste à **réduire la consommation d'énergie en évitant les excès**. Les moyens d'y parvenir dépendent de la conception du matériel (**éco-conception**) mais aussi du type d'utilisation qui en est faite, concrètement, la réelle faible consommation électrique des projecteurs LED ne doit pas inciter à la surconsommation et les projecteurs LED ne doivent pas rester plus longtemps ou plus souvent allumés au prétexte qu'ils consomment moins.

Mais la sobriété énergétique vise aussi à ne pas utiliser des équipements surdimensionnés. Il y a plusieurs années la LED cherchait à atteindre les intensités lumineuses des lampes à **incandescence** et à décharge, aujourd'hui elle est capable de les surpasser. Il faut donc veiller à s'équiper raisonnablement selon ses besoins.

## les freins

Plusieurs actrices et acteurs du secteur culturel ont rapidement trouvé un intérêt à la LED et l'ont intégrée avec succès : dès 2003 pour la télévision, l'événementiel et le live, dès 2009 pour les musées. Le secteur du théâtre (et par extension celui de l'Opéra et de la Danse qui y sont apparentés) ne semble pas vouloir s'en accommoder, ni vouloir remettre en question ses usages courants. Faut-il s'inquiéter de l'utilisation de cette technologie et en retarder l'échéance ? Comment parvenir à identifier les différents obstacles pour pouvoir mieux les surmonter ?

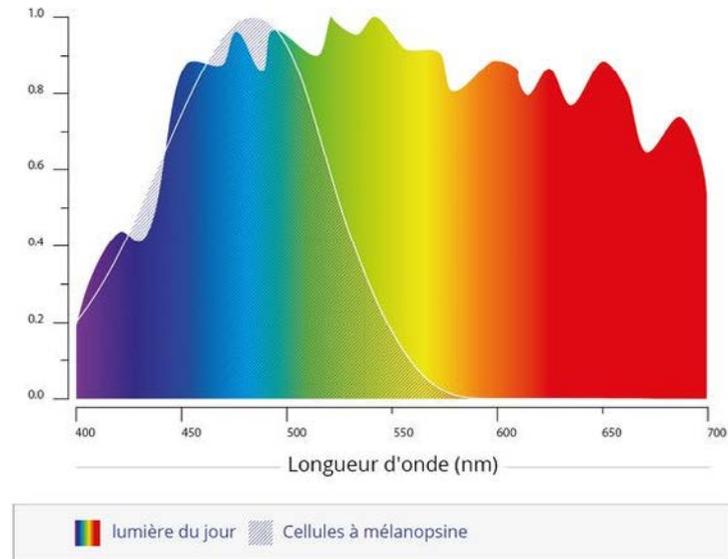
## LA LUMIÈRE BLEUE : UN RISQUE SANITAIRE

### La lumière bleue : effets sur l'œil

En 2010, l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (**ANSES**) a publié un rapport d'expertise sur les effets sanitaires des systèmes d'éclairage utilisant des LED. Parmi les effets identifiés comme étant préoccupants, figurent un **risque de toxicité de la lumière bleue** sur l'œil (surtout chez l'enfant), ainsi qu'un risque d'éblouissement. Les LED blanches à forte composante chromatique bleue et à forte **luminance** (c'est-à-dire à forte sensation visuelle de luminosité) sont ainsi directement incriminées. Les médias ont relayé ce rapport sans en avoir complètement analysé les 310 pages et certaines interprétations ont

largement contribué à alimenter les légendes urbaines. En 2019, l'ANSES publie une nouvelle expertise qui confirme ce risque de phototoxicité lié aux émissions de lumière bleue tout en précisant que les données disponibles ne permettent pas de déterminer avec précision l'importance du risque de pathologie oculaire. Ce nouveau rapport souligne toutefois que les sources d'éclairage domestique à LED de type « blanc chaud » présentent un faible risque de phototoxicité et ne se distinguent pas en cela des sources d'éclairages « traditionnelles ». D'autre part, cette étude met en évidence la perturbation des rythmes biologiques (rythme circadien) par une exposition nocturne à une lumière riche en rayonnements bleus.

#### Cellule à mélanopsine et lumière du jour



© 2023 leclairage.fr

Sensibilité des cellules à mélanopsine de l'œil. Ces cellules ont un effet sur le rythme circadien (cycle veille-sommeil, vigilance, constriction pupillaire). Leur sensibilité se situe dans les radiations bleues.

## L'intensité, la durée et la fréquence d'exposition

En mars 2019, la **Commission Internationale de l'Éclairage (CIE)** a tenu à s'exprimer sur ce sujet, et plus particulièrement sur l'amalgame fait par les médias entre les LED et le « danger de la lumière bleue » (« blue light hazard »), expression présumée pour décrire conjointement le risque de dommages oculaires réels et l'influence sur le bien-être en général : « La référence aux « dangers de la lumière bleue » devrait être réservée au risque photochimique sur la rétine, usuellement associé à l'exposition à

des sources de lumière vive, comme le soleil ou les arcs de soudure... L'expression « dangers de la lumière bleue » ne devrait pas être utilisée pour faire référence aux dérèglements du rythme circadien ou aux troubles du sommeil. » Le risque des **dommages photochimiques** dépend de la longueur d'onde, il est maximal dans la gamme bleue du spectre visible (entre 435 et 440 nanomètres), mais il dépend aussi énormément de l'intensité, de la durée et de la fréquence d'exposition. La Commission Internationale pour la Protection contre les Rayonnements Non Ionisants (**ICNIRP**, « **International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection** ») a publié des recommandations sur les limites d'exposition. Or, dans des conditions d'usage raisonnables et habituelles, l'exposition aux sources d'éclairage « blanches » (dont les niveaux de rayonnements bleus sont moins élevés que ceux d'un éclairage naturel par ciel bleu) n'atteint pas les seuils nécessaires pour s'exposer à un danger aigu.

Simultanément à la déclaration de la CIE, l'Association Française de l'Éclairage (**AfE**) reconnaît les effets des rayonnements bleus sur le **cycle du sommeil** ainsi que par une vive exposition sur les photorécepteurs de l'œil. Elle se veut toutefois rassurante et rappelle quelques règles « d'hygiène lumineuse » en insistant sur l'importance d'une bonne exposition à la lumière naturelle pour limiter l'impact de l'exposition aux écrans en soirée et sur l'importance de porter des lunettes de soleil par beau temps pour se protéger du soleil, principale et plus forte source de rayonnements bleus à laquelle l'Humain est confronté quotidiennement et naturellement.

### Et le soleil alors ?

L'émission optimale des rayonnements du soleil se situe aux environs de 504 nm (bleu-vert). Contrairement à ce que l'on pourrait croire de façon intuitive, le soleil émet plus de rayonnements bleus que de rayonnements jaune ou orangé.

## Quantité de rayonnements bleus

Sources lumineuses	Quantité de rayonnements bleus
Lumière du jour à midi	40%
LED 4000K	Entre 27% et 32%
LED 3000K	20%
LED 2700K	Entre 17% et 20%
Halogène 3000K	13%
Haute Pression de Sodium	10%

Proportion de rayonnements bleus selon le type de sources.

## Les précautions à prendre

Il est donc possible d'affirmer que les rayonnements bleus sont toxiques pour la rétine dans la mesure où ils peuvent l'atteindre de façon suffisamment intense et pendant une durée suffisamment longue, ce qui est peu probable dans des circonstances normales d'éclairage (il n'est pas considéré comme normal de regarder fixement une source de lumière intense, qu'il s'agisse du soleil, d'un arc électrique ou d'une LED de forte puissance). Il faut néanmoins veiller à protéger les enfants (dont la cornée et le cristallin ne filtrent pas le bleu) des fortes expositions aux radiations bleues, notamment celles de la lumière du soleil, en été ou aux sports d'hiver. Les rayonnements bleus issus des sources d'éclairage LED ne sont pas plus toxiques que ceux issus de la lumière naturelle et leur taux est inférieur à ceux du soleil au zénith. Il est possible de limiter les effets de dérèglement du cycle circadien par l'exposition aux écrans en respectant une distance raisonnable vis-à-vis d'eux et en favorisant un éclairage environnant suffisant. De plus, il est possible de modifier automatiquement la **température de couleur** de son écran à partir d'une heure définie en début de soirée pour en limiter les rayonnements bleus.

En matière d'éclairage pour le spectacle vivant, il s'agit donc essentiellement d'être vigilant lorsqu'il est question d'éclairer la totalité de la scène avec une lumière bleue de très forte intensité, pendant un très long moment, surtout si des enfants participent au spectacle. D'autre part, ne perdons pas de vue que le travail dans l'obscurité et l'absence de lumière naturelle constitue le risque oculaire le plus courant auquel les différents acteurs de la scène (les artistes, mais aussi et surtout les techniciens) sont exposés.

## Comparaison de luminances

Surfaces lumineuses	Luminance en candela/m <sup>2</sup>
Soleil au zénith	1 000 000 000
Lampe aux iodures métalliques	De 200 000 à 500 000
Tube fluorescent T16	De 17 000 à 33 000
Neige (ou papier blanc) au soleil	25 000
Ciel bleu	De 1 000 à 20 000
Pleine lune	2 000
Écran Oled	De 1 000 à 1500
Écran LCD-TFT	De 250 à 500

Quantité de lumière à laquelle nos yeux sont exposés.

On peut observer que l'œil humain s'expose à une luminosité de 5 à 20 fois plus intense face à l'éclairage naturel extérieur que face à des écrans. En outre, dans le cas de l'éclairage naturel (ciel bleu ou soleil en secteur enneigé) la surface lumineuse est immensément plus grande que celle d'un écran, augmentant encore la quantité de lumière à laquelle l'œil est exposé.

## LES CONSÉQUENCES SUR LE « VIVANT » EN PÉRIODE NOCTURNE

Certains médias se sont récemment fait l'écho de troubles qui seraient produits sur l'environnement par les **éclairages urbains** à LED, les études disponibles portent principalement sur les conséquences sur le « vivant » de la lumière artificielle en période nocturne et non spécifiquement des conséquences de l'éclairage LED. Il est constaté une augmentation de la mortalité et un appauvrissement de la diversité des espèces animales et végétales dans les milieux éclairés la nuit, quel que soit la nature de la source de lumière. En réalité, il peut arriver que certains luminaires d'éclairage public équipés de lampes à décharge soient remplacés par des équipements LED surdimensionnés pour leur usage, accentuant ainsi inutilement la quantité de lumière répandue. Pourtant, la technologie LED est parfaitement adaptée à l'éclairage public : elle propose des luminaires graduables et plus facilement pilotables, ainsi que des optiques plus performantes et permet ainsi de cumuler économie d'énergie et ajustement de la luminosité en fonction de l'heure, ce qui n'est pas possible avec les lampes à décharge.

# les différences et adaptations possibles

Une technologie nouvelle nécessite toujours des changements qui la dépassent. S'adapter à la technologie LED, c'est aussi revoir ses principes d'éclairage, modifier son référentiel esthétique et choisir des projecteurs adaptés.

## LE PRINCIPE D'ÉCLAIRAGE

Les projecteurs à source LED peuvent répondre aux besoins et aux exigences techniques, esthétiques et dramaturgique de l'éclairage de théâtre: il est possible de diriger et de concentrer la lumière vers un endroit précis, de modeler le faisceau avec des lentilles (zoom, focale), des couteaux, des gobos, des prismes, des iris, des diffuseurs, etc. Son utilisation ne remet pas en question la définition de l'espace scénographique, les projecteurs peuvent être installés là où ils sont nécessaires et il est possible de n'éclairer que ce qui doit être éclairé, quand cela doit être éclairé. (Voir aussi: Les évolutions esthétiques au théâtre, p.60) La façon d'éclairer la scène et les caractéristiques du matériel utilisé sont donc sensiblement identiques.

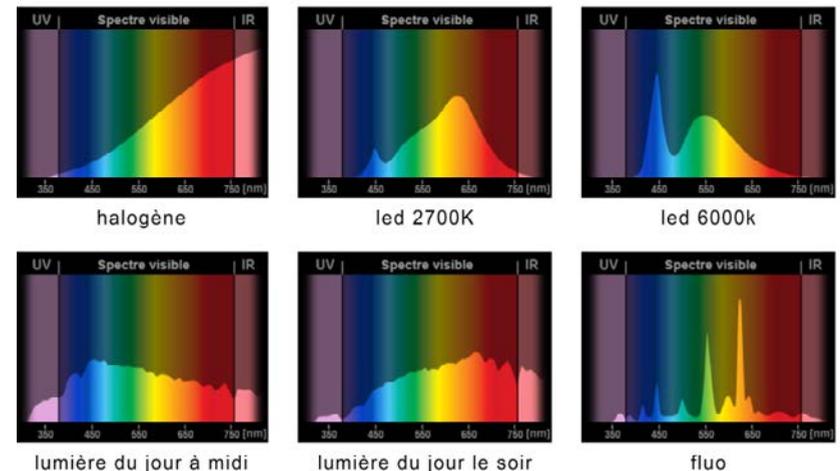
Pourtant, les projecteurs à source LED ont quelques particularités qui les différencient de leurs équivalents incandescents, et certains appareils n'ont pas réellement d'équivalent en raison de spécificités liées à leur source de lumière. Les principales différences résident dans la non-reproductibilité de certaines caractéristiques connues et dans l'apparition de nouvelles qu'il faut apprendre à connaître. Il faut alors abandonner certains schémas de pensée et en recréer de nouveaux.

## LES RÉFÉRENCES ESTHÉTIQUES

Du fait de ses différentes compositions chromatiques possibles, la LED modifie certaines références esthétiques. La composition chromatique de la lampe halogène, très riche en rayonnements rouges et orangés, pauvre en rayonnements bleus, constituait la **référence de base** de l'éclairage au théâtre depuis les années 1930. Cette composition chromatique est quasiment identique d'une lampe halogène à une autre: il y a toutefois quelques nuances entre certaines lampes selon qu'elles sont calibrées à 3000K ou à 3200K. Pour modifier la composition chromatique de ce type de source, il faut leur ajouter un filtre. Pour obtenir une lumière bleue par exemple, il faut ajouter un filtre qui absorbe (en restituant de la chaleur) tous les rayonnements à l'exception des bleus. (Voir aussi: La soustraction, p.32)

Aujourd'hui, les sources LED proposent **différentes compositions chromatiques** et aucune d'elles n'est exactement identique à la composition chromatique de la lampe halogène: une LED « blanc chaud » calibrée à 3000K s'en rapproche globalement mais en reste éloignée si l'on considère les deux extrémités du spectre (le bleu et le rouge).

### Comparaison de spectres lumineux



© energie-environnement.ch, plateforme des services cantonaux de l'énergie et de l'environnement (Suisse)

# LES PROJECTEURS

## Les projecteurs à sources multicolores

La possibilité de concevoir des projecteurs à sources multicolores (composées de LED de différentes couleurs) est l'innovation majeure occasionnée par la LED, c'est aussi celle qui vient le plus perturber les références colorimétriques des utilisateurs. En raison de leurs petites tailles, plusieurs LED peuvent être assemblées à l'intérieur d'un même appareil d'éclairage tout en donnant l'impression qu'il s'agit d'une source unique. Ainsi, il est possible d'ajouter trois, quatre, cinq, six, sept ou huit types de LED rayonnant chacune dans une plage chromatique (teinte) différente. Les teintes les plus répandues sont : Bleu Royal (ou Indigo), Bleu, Cyan, Vert, Menthe, Citron, Ambre, Rouge, Rouge profond. Ce principe permet d'obtenir une gamme de lumières « blanches » et « colorées » plus ou moins saturées, dont la richesse dépend de la qualité et du nombre de teintes qui entrent dans la composition chromatique. Par conséquent, il est possible de définir la teinte et la saturation de la couleur de la lumière en ajustant les proportions de chaque composante chromatique. (Voir aussi : L'addition, p.30) Les filtres qui ont accompagné les évolutions de l'éclairage électrique depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle en deviennent obsolètes.

### Exemple de projecteurs multicolores à découpe

Fabri-cant*	Modèle	Profil colorimétrique (principe additif)	Flux lumineux $\phi$ (lumen) en sortie de projecteur	IRC	Zoom
ADB	Orkis	6 couleurs : Rouge, Vert, Bleu, Ambre, Cyan, Citron	6 000 max	97	12°/30° ou 22°/50°
ADB (Clay Paky)	Actoris Profile FC	6 couleurs : Rouge, Vert, Bleu, Ambre, Citron, Bleu roi	NC	>97	15°/30° ou 25°/50°
Cameo	P2 FC	5 couleurs : Rouge, Vert, Bleu, Ambre, Citron.	NC	93	15°/30° ou 25°/50°

Chauvet professionnel	Ovation Rêve E-3	6 couleurs : Rouge, Vert, Bleu, Ambre, Menthe, Bleu roi.	13 300 max	95,4	15°/30° ou 25°/50°
	Ovation E930-VW	5 couleurs : Rouge, Vert, Bleu, Ambre, Citron.	8 614 max	86	
	Ovation E-2 FC	5 couleurs : Rouge, Vert, Bleu, Ambre, Citron.	5 608 max	93	
Coemar	LEDko HD Fullspec-trum 6 HD	6 couleurs : Rouge, Vert, Bleu, Ambre, Citron, blanc.	11 200 max	>90	15°/35° ou 25°/50° ou 28°/40°
Elation	KL Profile FC	5 couleurs : Rouge, Vert, Bleu, Ambre, Menthe.	10 600 max	93,5	6°/50°
	COLOUR 5 Profile	5 couleurs : Rouge, Vert, Bleu, Ambre, Menthe.	4 100 max	>94	focales fixes uniquement
ETC	S4 LED serie 3 Lustr X8	8 couleurs : Rouge, Vert, Bleu, Ambre, Citron, Cyan, Rouge profond, Indigo.	10 889 max	98	15°/30° ou 25°/50°
	Color-Source Spot jr	4 couleurs : Rouge, Vert, Bleu, Citron.	5 700 max	82	25°/50°
Prolights	Ecl Profile CT+	6 couleurs : Rouge, Vert, Bleu, Ambre, Menthe, Bleu roi.	9 800 max	97	15°/30° ou 25°/50°
	EclProfile FS	4 couleurs : Rouge, Vert, Bleu, Citron.	6 100 max	86	
	EclProfile HDTWC	6 couleurs : Rouge, Vert, Bleu, Ambre, Citron, Bleu roi.	6 415 max	89	
Robe Lighting	T11 Profile	5 couleurs : Rouge, Vert, Bleu, Ambre, Citron.	12 000 max	95	5°/50°
Robert Juliat	Sully 4C	4 couleurs : Rouge, Vert, Bleu, Citron.	7 730 max	93	28°/54° ou 16°/35° ou 11°/26°
Spotlight	Profile Hyperion 300 6C	6 couleurs : Rouge, Vert, Bleu, Ambre, Citron, Cyan.	7 045 max	>95	15°/30° ou 25°/50°
Strand Lighting (Varilite)	LEKO LED Profile Full Color	6 couleurs : Rouge, Vert, Bleu, Ambre, Citron, Cyan.	8 000 max	>94	15°/35° ou 25°/50°

## Le « PAR à LED »

Si les projecteurs équipés de systèmes optiques (lentilles et réflecteurs) tel que les Découpes, les Fresnels, mais aussi les Rampes et les Cycliodes, ont été répliqués en de nouveaux modèles incluant des sources LED de façon relativement similaire, il n'en est pas de même pour le « PAR ». Du reste, cela n'a pas vraiment de sens de parler de « PAR à LED » puisque rappelons-le, « PAR » (Parabolized Aluminium Reflector) est le nom d'un système composé d'une lampe encapsulée entre son propre réflecteur et sa propre lentille. Le **projecteur « PAR »** n'est qu'une « boîte de conserve » vide (qui porte d'ailleurs le nom de « PAR Can » chez les anglosaxons) servant de réceptacle à la lampe « PAR » qui centralise et lui confère toutes ses caractéristiques optiques. Il existe différents modèles de lampes PAR64. Chaque modèle est qualifié d'après son angle d'ouverture, conformément à certaines classifications : CP60, CP61, CP62, et CP95 (code LIF : Lighting Industry Federation) ou VN5P, NSP, MFL, WFL et VWFL (code NEMA : National Electrical Manufacturers Association). Pour une même référence (ex : CP61), les angles de faisceaux diffèrent selon les fabricants.

Il existe bon nombre de projecteurs à source LED (généralement basés sur des sources multicolores de 3 à 7 couleurs, avec parfois un zoom motorisé, parfois un système de « lentilles » interchangeable) qui peuvent se substituer au « PAR » mais aucun ne peut revendiquer ce nom au sens strict du terme, l'appellation « PAR à LED » est pourtant souvent utilisée dans la réalité. Actuellement, un **système combiné « réflecteur/LED/lentille »** sur le modèle de la lampe « PAR » n'existe pas et on peut émettre l'hypothèse qu'il n'existera jamais. L'industrie du spectacle ne représente qu'une toute petite part du volume de production des fabricants de lampes ou de LED, il n'est pas surprenant que le « PAR » qui a été développé pour d'autres industries (phares de voitures, de trains, d'avions...) avant d'être détourné vers la scène, ne soit pas l'objet d'une recherche de reproduction LED.

## Le « BT »

La singularité des **projecteurs « BT »**, dont la dénomination et les particularités se fondent sur la nature de leur alimentation électrique (la basse tension, plus précisément la très basse tension : TBT), ne peut pas être reproduite par la LED. Ces projecteurs, au rang desquels il faut compter les BT 250, 500, 1000, et la légendaire rampe Svoboda, fonctionnent avec des lampes 24V. Le **filament de ces lampes offre l'avantage d'être beaucoup plus petit** et concentré que celui d'une lampe 230V et peut ainsi être placé précisément au point foyer d'un réflecteur parabolique pour permettre d'obtenir des faisceaux parallèles étroits et denses, ou un « mur de lumière » par l'addition de plusieurs rampes Svoboda.

Comme pour le « PAR » ce sont ici aussi les caractéristiques de la lampe qui confèrent leur spécificité au projecteur. Pourtant, si cette spécificité propre au filament et à la tension du courant électrique n'est pas transposable à la LED, il existe néanmoins des projecteurs LED capables de composer des faisceaux intenses et serrés ou des « rideaux de lumière », pouvant s'y substituer (Clay Paky, Axcor Beam 300. Clay Paky SharBar, par exemple).

## Le « PC » versus les projecteurs modulaires et polyvalents

L'utilisation du projecteur PC (plan convexe) à lentille claire, constitue une **spécificité et une quasi-exclusivité française**. Ce type de projecteur est absent de la plupart des autres pays du monde et la France va certainement elle aussi devoir apprendre à s'en passer. En raison de ses caractéristiques optiques, la lentille claire ne s'adapte pas aussi bien que la lentille martelée (« pebble ») sur un projecteur PC à source LED. Il est toutefois assez simple de s'abstenir d'utiliser des PCs à lentille claire : lorsqu'ils sont utilisés avec des diffuseurs, les PCs à lentille claire peuvent facilement être remplacés par des PCs à lentille martelée ou des projecteurs à lentille Fresnel. Lorsqu'ils sont utilisés sans diffuseur, ils peuvent facilement être remplacés par des coupes équipées d'un zoom ou d'une focale fixe ; il faut alors bien anticiper la taille d'ouverture du faisceau nécessaire à obtenir le résultat attendu, pour pouvoir choisir le bon système optique lors de la mise en œuvre.

La **modularité et la polyvalence** sont des caractéristiques qui s'observent de plus en plus parmi les nouveaux modèles de projecteurs. Certains fabricants (ETC, Chauvet, Prolights, ...) proposent des corps de projecteurs sur lesquels peuvent se greffer différents systèmes optiques. Ces « boîtes à lumières » (ou « lanternes ») peuvent ainsi servir de base à l'assemblage d'une découpe avec zoom ou focale fixe, d'un projecteur Fresnel ou d'un projecteur Cycliode. Cela permet de pouvoir constituer un parc de projecteurs avec un nombre d'accessoires optiques plus important que le nombre de « lanternes », afin d'avoir la capacité de s'adapter à un maximum de situations tout en réduisant les coûts d'investissement. Afin de satisfaire les personnes pour lesquelles la manutention et le stockage des différents systèmes optiques apparaissent trop contraignants, il est récemment apparu des objectifs hybrides très polyvalents. Le fabricant Robe Lighting a développé pour le théâtre et les plateaux TV une Découpe à sources multicolores (T11) équipée d'un zoom à plage très étendue (5°/50°) dont la lentille claire peut très simplement être remplacée par une lentille martelée ou une lentille Fresnel, proposant ainsi un véritable projecteur « couteau suisse ». Pour parvenir à développer un tel système optique, ce fabricant a tiré profit de son expérience des projecteurs asservis. Une telle plage de zoom n'avait encore jamais été proposée sur une Découpe tandis qu'elle était déjà disponible sur de nombreux projecteurs asservis. Sur le même principe, la marque Elation propose une découpe (KL Profile FC) avec un zoom 7°/50°.

## Les projecteurs asservis

Le secteur du théâtre considère encore parfois que les projecteurs asservis (ou motorisés) sont réservés aux salles de concerts, à l'événementiel, à la télévision ou plus généralement à tout ce qui revêt un caractère de « divertissement » et de « spectaculaire » desquels il cherche à se démarquer. Pourtant, même s'il est vrai que ces appareils d'éclairage motorisés ont réellement commencé à se développer au début des années 1980 pour répondre à la demande de ce type d'industrie, les premières traces d'automatisation et de commande à distance du faisceau lumineux d'un projecteur ont eu lieu dans un théâtre en 1906 (Edmund Sohlberg, Kansas City, Missouri). L'appareil était équipé d'un **changeur de couleur électromécanique et d'un jeu de cordes et de poulies** qui permettaient à un opérateur d'en modifier l'orientation et l'ouverture du zoom.

Plusieurs brevets de projecteurs automatisés furent déposés en Amérique du Nord dans les années 1920 et 1930. Les premières expérimentations d'envergure ont été menées par la Century Lighting (qui deviendra Strand Lighting) dès le début des années 1950 pour les besoins du cinéma (Cecil B. DeMille) puis au début des années 1960 pour ceux du théâtre (Washington Square Theatre) et de la comédie musicale (Peter Pan). Au début des années 1970 en Europe, le théâtre de Bâle innove avec une installation unique de 200 projecteurs Niethammer motorisés (pan/tilt, couleur, zoom, intensité) et un système de contrôle numérique unique en son genre.

En 1981, le contexte technologique le permettant, la réalité économique des prestataires le nécessitant, et la quête du spectaculaire le motivant, la créativité et l'enthousiasme de quelques-uns a permis différentes innovations simultanées : le VL1, issu de la collaboration du groupe Genesis avec le prestataire Showco (qui donnera naissance à la société Vari-Lite), le PanCan (à l'initiative d'un ancien éclairagiste de Pink Floyd) et le Telescan (de la société française Caméléon). Les années 1980 ont vu rapidement apparaître de nouveaux fabricants de projecteurs (Vari-Lite, Morpheus, High End Systems, Clay Paky, Martin, ...) et avec eux les préconfigurations des projecteurs asservis actuels.

Cette technologie bénéficie aujourd'hui de 40 années de **R&D** et d'expérience de la scène. Ses évolutions ont suivi celles des microprocesseurs, des processeurs de signaux numériques et des microcontrôleurs, la plupart de ces appareils sont fiables et robustes et aujourd'hui équipés de LED. Certains sont conçus plus spécifiquement pour répondre aux exigences esthétiques du théâtre avec une attention particulière portée sur la qualité de la **gradation**, de la couleur et sur l'absence de bruit. Leur polyvalence permet de les utiliser dans toutes les situations et il est pertinent de s'interroger sur leur utilisation qui peut s'avérer précieuse lorsqu'il s'agit de gagner du temps, notamment en tournée (montage, réglage).

### Projecteurs traditionnels vs asservis

Avec l'utilisation de la LED, la frontière qui a pu exister entre les projecteurs « traditionnels » et les projecteurs asservis est en train de s'estomper pour certainement disparaître un jour. Il conviendrait alors de faire la seule distinction entre les projecteurs qui se pilotent sur un seul paramètre (intensité) et ceux qui se pilotent sur plusieurs paramètres.

#### Exemple de projecteurs asservis

Fabricant*	Modèle	Profil colorimétrique	Flux lumineux (lumen) en sortie de projecteur	IRC	Zoom
Ayrton	Huracan Profile TC	Soustractif : Blanc froid 6 800 K + trichromie CMU	33 900 lm max	>95	6°/60°
Cameo	Opus SP5 FC	Additif : 5 couleurs : Rouge, Vert, Bleu, Ambre, Jaune	9 000 lm max	>90	6°/44°
Chauvet	Maverick Silens 2 Profile	Soustractif : Blanc froid 6 000 K + trichromie CMU	10 000 lm max	>95	5°/58°
Clay Paky	Sinphonia Profile 600	Additif : 5 couleurs : Rouge, Vert, Bleu, Ambre, Citron	12 050 lm max	>95	5°/60°
	Axcor Profile 600 HC Teatro	Soustractif : Blanc froid 5 600 K + trichromie CMU	14 000 lm max	>90	5°/55°

Elation	Fuze Profile	Additif : 5 couleurs : Rouge, Vert, Bleu, Ambre, Menthe	10 100 lm max	92	7°/42°
	Fuze Max Profile	Additif : 5 couleurs : Rouge, Vert, Bleu, Ambre, Menthe	21 000 lm max	92	7°/52°
	Artiste Monet	Soustractif : Blanc froid 6 500 K + système Spectra-color CMYRGB	45 000 lm max	>72 (84 avec filtre HCRI)	6.8°/55°
	Artiste Mondrian	Soustractif : Blanc froid 6 500 K + système Spectra-color CMYRGB	51 000 lm max	>72 (84 avec filtre HCRI)	3°/45°
High End Systems	Solaframe 3000 HF	Soustractif : Blanc froid 6 000 K + trichromie CMY	24 400 max	>95	7°/55°
	Solaframe 3000 Theatre	Soustractif : Blanc froid 6 000 K + trichromie CMY	15 000 lm max	91	7°/42°
	Halcyon Platinum HF	Soustractif : Blanc froid 6 000 K + trichromie CMY	29 700 lm max	93	6°/64°
JB Lighting	M18 Profile	Additif : 5 couleurs : Rouge, Vert, Bleu, Ambre, Jaune	25 000 lm max	95	6.5°/54°
Robe Lighting	T1 Profile	Additif : 5 couleurs : Rouge, Vert, Bleu, Ambre, Citron	12 600 lm max	>95	7°/49°
	T2 Profile	Additif : 5 couleurs : Rouge, Vert, Bleu, Ambre, Citron	22 000 lm max	>95	5°/55°
	Esprite HCF	Soustractif : Blanc froid 6 000 K + trichromie CMY	19 000 lm max	96	5.5°/50°
	Forte HCF	Soustractif : Blanc froid 6 000 K + trichromie CMY	28 000 lm max	96	5°/55°
Vari*Lite	VL5 LED Wash	Additif : 6 couleurs : Rouge, Vert, Bleu, Ambre, Citron, Cyan	14 000 max	>90	8°/35°

## LES CARACTÉRISTIQUES DES PROJECTEURS LED

### La diversité des projecteurs

S'il faut à plus ou moins court terme faire le deuil des lampes PAR et BT, il ne faut pas pour autant imaginer y perdre en diversité et sombrer dans la nostalgie, de la même façon que certains types de lampe ont permis par le passé l'apparition de certains projecteurs, **la LED permet et permettra encore l'apparition de nouveaux projecteurs ayant leurs propres spécificités.** D'autre part, il est plus que probable que certains appareils non destinés par conception à l'industrie du spectacle, seront à leur tour détournés de leur usage premier pour éclairer la scène, comme le furent en leur temps la lampe PAR, le tube fluorescent, ou la lampe à haute pression de sodium. En observant le marché des projecteurs LED, il semblerait que la tendance soit plutôt dirigée vers un accroissement de la diversité que vers une diminution.

### La longévité des projecteurs

Il est souvent admis d'emblée que la longévité des projecteurs LED est moindre que celle des projecteurs halogènes. En effet, si la source de lumière possède une durée de vie nettement supérieure (estimée à plus de 50 ans pour certaines d'entre-elles, en usage régulier et ordinaire) à celle des sources « classiques », ce n'est pas le cas des équipements électroniques qui l'accompagnent, dont l'estimation de la durée de vie n'est d'ailleurs pas communiquée. On peut raisonnablement supposer devoir remplacer certains composants électroniques à une échéance plus ou moins longue (10, 15, 20 ans ?) alors qu'il n'y a aucune certitude quant à la pérennité et la continuité d'approvisionnement de ces composants et circuits électroniques. Il n'y a pas non plus de certitude concernant la continuité de fabrication de certaines LED, qui peuvent pourtant être amenées à être changées à la suite d'un choc ou d'une défaillance prématurée. Cette réalité rappelle le concept d'obsolescence programmée qui depuis presque un siècle peut potentiellement toucher l'ensemble du mode de production industrielle, et dont l'une des toutes premières victimes fût le filament de tungstène des lampes incandescentes, dont la durée de vie fût considérablement réduite dans les années 1920. Il faut toutefois rester optimiste et garder confiance envers les fabricants de projecteurs de théâtre qui connaissent bien la réalité du terrain, qu'il s'agisse des difficultés budgétaires qui déterminent l'incapacité à renouveler le matériel régulièrement ou qu'il s'agisse de la réelle volonté des différents utilisateurs de travailler avec du matériel fiable, performant et durable.

La **durée de vie de la LED** dépend beaucoup des conditions et du contexte de son utilisation, elle dépend aussi de la conception de l'appareil d'éclairage dans lequel elle est intégrée. La LED étant sensible à la chaleur, elle doit être accompagnée d'un bon système de dissipation thermique qu'il soit passif, actif, ou relevant d'une combinaison des deux. La LED, et l'ensemble du système électronique auquel elle appartient, sont aussi très sensible à l'eau et à l'humidité. Hélas, chaque fabricant ne propose pas une gamme de projecteurs dont l'indice de protection (IP) soit suffisant pour un usage en extérieur. Il y a une réelle difficulté à éclairer sereinement un spectacle qui se déroulerait en extérieur, dans un endroit non couvert, lorsque les projecteurs n'ont pas un indice de protection qui soit au moins IP65.

## L'obsolescence programmée, c'est quoi ?

L'obsolescence programmée se définit juridiquement par « l'ensemble des techniques, y compris logicielles, par lesquelles le metteur sur le marché d'un produit vise à en réduire délibérément la durée de vie » et constitue un délit puni par la loi française depuis 2015.

# le facteur humain

**Changer c'est renoncer, prendre le temps, mais d'abord et surtout s'informer précisément afin de faire un choix adapté aux caractéristiques de la salle et aux moyens humains. Force est de constater qu'un certain nombre de mythes continuent de circuler au sujet de la LED. Son utilisation peut occasionner une perte de repères au sein des équipes qui ont leurs habitudes et leurs croyances. En avoir conscience, c'est déjà préparer le changement...**

## LES IDÉES REÇUES

Les affirmations approximatives et inexactes à l'égard de la LED sont encore répandues dans le secteur du théâtre, même si l'on peut commencer à observer qu'elles tendent à s'affaiblir. Elles reposent essentiellement sur des **préjugés**, des croyances, de la pseudo-connaissance et aussi sur le souvenir des perceptions occasionnées lors de la rencontre avec les premiers projecteurs LED du début des années 2000 (généralement une « barre » ou un « PAR » **RGB**) dont les prouesses esthétiques, bien qu'encourageantes et prometteuses, pouvaient être très contestables.

Au-delà des préjugés et des croyances qui s'opposent à une bonne analyse et une bonne appréhension de la LED, l'idée seule de son utilisation peut susciter l'inquiétude. Elle représente l'inconnue, elle impose une **remise en question des pratiques, des usages, de certaines conventions**, elle engendre une perte des repères et une mise en danger. Surmonter ces obstacles pour s'adapter et faire face au changement demande des efforts qui ne sont pas spontanés. Face à la crainte de perdre un savoir-faire et une maîtrise des outils classiques, l'arrivée de la LED peut être mal admise et représenter une réelle difficulté qu'il faut surpasser.

La résistance au changement est un mécanisme d'adaptation du cerveau qui conduit à vouloir éviter les situations potentiellement inconfortables qui peuvent troubler notre sécurité, nos croyances, nos valeurs, nos besoins, notre équilibre. C'est une stratégie de survie : notre cerveau réagit pour nous éviter une souffrance réelle, anticipée ou imaginée.

## LA PERTE DE REPÈRES

L'utilisation des projecteurs LED bouleverse certains repères établis par l'utilisation des projecteurs halogènes. Pour y faire face, il est donc bienvenu de chercher de **nouveaux repères adaptés à baliser ce nouvel environnement**. Il est toutefois tentant de s'accrocher à certains repères familiers devenus superflus, quitte à les recréer de manière artificielle. Prenons un exemple : une des caractéristiques des lampes à filament consiste dans leur variation de **température de couleur** selon les changements d'intensité : ce qui signifie que la couleur de la lumière n'est pas la même lorsque l'intensité du projecteur est à 15% ou à 100% de ses capacités. Ce résultat est totalement lié à la technologie utilisée, il s'agit d'une conséquence qui pourrait être interprétée comme une imperfection, à laquelle nous avons été contraint de nous adapter depuis que nous faisons varier l'intensité des lampes incandescentes. Ce résultat n'est ni le fruit d'une volonté, ni celui d'une demande effectuée par un éclairagiste ou par un constructeur de projecteurs auprès d'un fabricant de lampes. Cette caractéristique intrinsèque à la technologie des lampes à filament est souvent à l'origine de difficultés (pour produire une lumière « froide » à basse intensité par exemple). Pourtant, l'absence de cet effet est regrettée sur les projecteurs LED, si bien que certains fabricants de projecteurs proposent une fonction logicielle pour simuler cette variation de couleur en accompagnant les changements d'intensité (appelée « Red shift », « Amber shift » ou « Dim shift »). De la même façon qu'au début de l'usage de l'électricité on a cherché à reproduire la lumière du gaz par mimétisme, la LED cherche aujourd'hui à reproduire un maximum de caractéristiques de l'halogène, même lorsqu'elles sont dispensables.

Cette fonction logicielle peut néanmoins avoir une réelle utilité lorsqu'il s'agit d'utiliser simultanément des projecteurs LED et des projecteurs halogènes, en leur assurant ainsi un comportement identique. À l'avenir, lorsque l'halogène aura totalement disparu, cette fonction ne sera peut-être plus proposée sur les projecteurs.

## LA TRADITION

L'importance de la « tradition » peut constituer un frein à l'utilisation des projecteurs LED. Le secteur du théâtre revendique une certaine tradition à laquelle il tente de se conformer et dans laquelle il tente de rester inscrit. La tradition en tant qu'héritage du passé et instrument de transmission d'informations, d'opinions et de croyances non remises en question, s'oppose au changement et encourage une forme de conservatisme. En France, depuis l'époque de Molière, une tradition théâtrale transmet et perpétue une mémoire et un modèle qui se diffuse en imprégnant les discours et les pratiques de l'ensemble des acteurs de ce secteur d'activité. L'identité professionnelle des techniciens de théâtre est fréquemment fondée sur une tradition artisanale riche de techniques ancestrales ancrées dans l'histoire qu'ils veulent sauvegarder ; dans ce contexte, l'innovation est scrutée avec méfiance.

## LA TEMPORALITÉ

On peut observer à travers l'histoire du théâtre que **les changements sont parfois longs à se mettre en place et à être acceptés unanimement**. Même lorsqu'une nouveauté est bien acceptée, sa diffusion peut prendre du temps. En France, il aura fallu attendre près de 200 ans après les recommandations de plusieurs scénographes (Leone de Sommi, Joseph Furttentbach) pour que le public soit plongé dans l'obscurité, en 1937, face à la généralisation de l'éclairage électrique, Louis Jouvet regrettait l'époque du quinquet, aujourd'hui, il est encore possible d'acheter des lampes évacuateurs, alors que cette technologie a été abandonnée depuis 40 ans, l'emploi du terme « jeu d'orgues » persiste, alors que l'utilisation du gaz a été abandonnée il y a 150 ans et que les systèmes de contrôle actuels (qu'il convient mieux de nommer console ou pupitre) ne lui ressemblent ni par leur fonctionnement ni par leur aspect.

Au regard de ces différents éléments, il n'est pas très surprenant que la LED ait besoin de temps pour s'installer et se faire accepter au théâtre.

# la composante budgétaire

L'ampleur du budget d'investissement et des moyens à mobiliser constitue aussi un obstacle déterminant au remplacement de tout un parc d'éclairage. Ce seul élément peut entraver la mutation vers la LED. De même, à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, l'installation de l'électricité dans les théâtres s'est faite très lentement (en dehors des quelques grands théâtres parisiens) car la plupart des directrices et directeurs reculaient devant les frais nécessités par son installation.

## LE PLAN PLURIANNUEL D'INVESTISSEMENT

Lorsqu'il s'agit de renouveler un parc de 200 projecteurs, d'adapter l'architecture des réseaux (courants forts et courants faibles) et de remplacer le système de contrôle de la lumière, il faut pouvoir disposer d'un budget important. Par conséquent, il est essentiel d'avoir anticipé cette dépense et d'avoir sensibilisé les financeurs suffisamment longtemps à l'avance sur ce sujet. Au regard de l'importance de cet investissement, il apparaît très peu accessible de pouvoir s'offrir en une seule fois un parc de matériel d'éclairage complet, en dehors du cadre de la construction d'une nouvelle salle. Il est généralement nécessaire de devoir scinder ce projet d'achat en différentes tranches par la mise en place d'un plan pluriannuel d'investissement en ayant recours aux compétences du responsable financier de sa structure. Il s'agit alors de phaser le renouvellement du parc d'éclairage au plus près de ses besoins et de son contexte d'activité en identifiant des « lots » qui peuvent se distinguer et s'isoler (par exemple : « les projecteurs servant à l'éclairage de face », « toutes les Découpes de type X », etc.).

## L'ACHAT OU LA LOCATION ?

Face à l'actuelle **versatilité du marché des projecteurs d'éclairage**, à la complexité d'identifier les futurs standards, au risque de ne pas pouvoir proposer un parc de projecteurs qui puisse satisfaire tout un chacun, et à la difficulté de pouvoir assurer la maintenance et le dépannage soi-même, la location longue durée ou ponctuelle peut s'envisager. Cette solution offre la garantie d'avoir toujours du matériel « à jour », de bénéficier des dernières innovations ou évolutions et de s'affranchir des contraintes d'entretien et de maintenance. Cette possibilité peut s'envisager pour l'ensemble du matériel lumière ou simplement pour une partie qui viendrait compléter un parc réduit à quelques projecteurs élémentaires.

# GÉRER LA MUTATION DES MÉTIERS DE LA LUMIÈRE

les impératifs matériels

100

une nouvelle organisation du travail

115

de l'halogène vers la LED

126

accompagner le changement

132

adopter le bon état d'esprit

134

Lorsque le sujet de la mutation de l'halogène vers la LED est abordé, les projecteurs sont parfois les seuls objets considérés. Pourtant, cette mutation concerne tous les éléments nécessaires à l'éclairage scénique. L'ensemble du système est concerné : les projecteurs bien sûr, mais aussi le système de contrôle (console) et les moyens de transmission des données (réseau Ethernet et DMX). Quels sont les paramètres à considérer avant de choisir le matériel ? Comment organiser le travail de sa mise en œuvre ? Quelles connaissances et quelles compétences sont nécessaires ?

## les impératifs matériels

La versatilité et le dynamisme du marché de l'éclairage scénique bousculent les repères qui étaient établis depuis plusieurs années. Comment choisir le matériel ? Selon quels critères et pour quels besoins ? Quelle place occupe la console et comment communique-t-elle avec les projecteurs ?

## LA NUMÉRISATION DE LA CHAÎNE DE L'ÉCLAIRAGE

La transformation de l'éclairage scénique s'inscrit dans un contexte global de numérisation et de connectivité de l'ensemble des outils utilisés par les sociétés humaines, il s'agit d'un ajustement conforme et simultané aux aspirations de celles-ci.

Cette transformation ne se limite pas à une substitution de l'**incandescence** par la luminescence. Le projecteur n'est pas le seul maillon de la chaîne à être concerné par la numérisation, les équipements liés à son fonctionnement, et qui en permettent une utilisation optimale, le sont aussi. Cette transformation se manifeste par la numérisation de l'ensemble de la chaîne de l'éclairage : le système de contrôle et de pilotage de la lumière, ainsi que l'architecture du réseau de transfert de données, doivent être adaptés pour permettre de disposer des moyens nécessaires à une bonne gestion de l'éclairage LED.

La numérisation de l'ensemble de la chaîne de la lumière peut être considérée comme une transformation systémique. Cette transformation s'inscrit dans une dynamique évolutive de l'ensemble des éléments constitutifs de l'éclairage électrique. Elle ne s'inscrit pas dans une dynamique de rupture. La véritable révolution dans le domaine de l'éclairage scénique a eu lieu à la suite du remplacement de la flamme par l'électricité, avec l'apparition du projecteur mobile, de l'éclairagiste, du pupitre numérique, et en raison des nouvelles possibilités dramaturgiques, scénographiques et esthétiques offertes par cette technologie. Même en moindre quantité, l'électricité est toujours nécessaire. L'éclairage scénique d'aujourd'hui découle de celui initié dans la 1<sup>ère</sup> moitié du XX<sup>e</sup> siècle, grâce à l'utilisation de l'électricité. La LED, tout en apportant certaines innovations considérables, s'inscrit dans cette continuité.

## LE PARC DE PROJECTEURS

### Définir les besoins

L'instruction du choix du matériel doit systématiquement se faire en fonction des objectifs, des contraintes, et des enjeux esthétiques qui peuvent être propres à chacun. Cela n'est pas spécifique à la LED et s'applique à tout type de choix de matériel. Il faut chercher à identifier l'essentiel, l'incompressible, le fondamental et s'orienter vers la solution permettant de s'en rapprocher au mieux.

Il est bien sûr essentiel de tenir compte des dimensions et des contraintes « naturelles » du lieu. Les dimensions vont définir le nombre d'appareils nécessaires. En raison de la polyvalence et des caractéristiques de certains projecteurs LED (**sources multicolores**, asservis, ...), le nombre d'appareils peut être réduit en comparaison du nombre de projecteurs halogènes nécessaires dans le même espace. Les contraintes « naturelles » vont définir les caractéristiques des appareils. Par exemple, dans une zone où il est très difficile d'accéder aux projecteurs pour les régler (bord de scène, porteuse au-dessus du public, ...) il pourrait être préférable d'installer des projecteurs asservis dans le cadre d'une installation fixe.

Questionner la nature et la fréquence de l'activité peut aider à orienter les choix. L'activité porte-t-elle sur la diffusion ou sur la conception et la tournée de spectacles ? Est-elle liée à une discipline artistique spécifique ou au contraire est-elle pluridisciplinaire ? Les différents spectacles proposés au cours de la saison s'enchaînent-ils rapidement ou non ? Sont-ils présentés en alternance ? etc.

**Les besoins doivent aussi être définis en fonction des moyens et des ressources disponibles et plus particulièrement du budget d'investissement.** Pour convenir à un budget d'investissement modeste, il peut par exemple être intéressant de faire évoluer son parc de matériel bien entretenu avec une solution « **retrofit** », qui consiste en un remplacement du « bloc lumière », moins onéreux que le remplacement complet du projecteur.

Mais la question fondamentale est celle qui porte sur les choix esthétiques liés aux performances chromatiques, à la qualité de la lumière « blanche », à la richesse de la plage de couleurs disponibles et à la qualité de la **gradation**. Il est impératif de pouvoir déterminer des critères d'exigence sur ces points pour pouvoir orienter son choix avec justesse vers le matériel adapté.

## Répondre aux besoins

Le choix du matériel et du fabricant peut apparaître comme une difficulté. **Le panorama de l'éclairage de scène a été modifié, l'offre s'est diversifiée, s'est élargie, et les fabricants qui proposent les produits les plus pertinents ne sont pas obligatoirement ceux avec lesquels on avait l'habitude de travailler.** Certains fabricants ont investi rapidement et massivement dans la **R&D** de la technologie LED tandis que d'autres se sont lancés plus tard, sans toujours avoir les moyens de R&D suffisants, en donnant parfois l'impression d'y aller par obligation, sans trop y croire. Durant cette période de transition de nouvelles marques sont apparues (Ayrton, Prolights, ...), d'autres se sont rapidement emparés de la LED (JB Lighting, ETC, Chauvet, ...) et il n'est pas impossible que certaines marques s'éteignent comme c'est déjà arrivé par le passé (Socem, Cremer, Scénilux, ...). **Pour le moment, il faut faire face à la perte de repères et à l'absence de recul et d'expérience vis-à-vis de nouveaux produits établis sur une nouvelle technologie.** Par ailleurs, alors que depuis de nombreuses années l'halogène institue le « blanc » standard

de référence et que l'on doit obligatoirement avoir recours aux filtres soustractifs si l'on veut modifier sa composition chromatique, il faut aujourd'hui parvenir à se détacher de cette référence et apprendre à composer avec les quatre modèles types de lumière « blanche » proposées par la LED.

Lorsque l'on est parvenu à sélectionner un type de lumière « blanche » correspondant à ses besoins, il reste encore à **identifier le produit** qui correspond le mieux à ce que l'on en attend. En effet, il était relativement simple de choisir une Découpe halogène parmi les différentes propositions : elles étaient équipées de la même lampe et fonctionnaient sur le même gradateur, deux éléments qui n'entraient pas dans les critères de sélection puisque externes, le choix portait uniquement sur les performances optiques, la qualité de conception, et l'attachement pour la marque. Aujourd'hui, pour choisir une Découpe LED parmi les différentes propositions, le choix doit aussi porter sur la qualité des LED et sur la qualité de leur **gradation** puisque ces deux éléments sont internes. Il est donc impératif de pouvoir convenablement comparer les projecteurs avant d'arrêter ses choix, d'abord en se procurant toutes les données photométriques (Voir aussi : La photométrie, p.12) et colorimétriques (Voir aussi : La colorimétrie, p.24) disponibles auprès des fabricants (**fichiers IES**, TM30, etc.), puis en demandant à les tester sur site en condition scénique.

Quel que soit l'objet sur lequel porte le choix final, il faut veiller à constituer un parc de projecteurs cohérent et homogène et éviter une trop grande disparité entre les différents fabricants ou les différents modèles de projecteurs. Il faut éviter l'éparpillement et une complexification inutile de la gestion de l'éclairage.

## Choisir entre le blanc et la couleur

**Le choix entre les projecteurs LED à sources « blanches » et ceux à sources « multicolores » constitue l'une des principales préoccupations. Cette question est d'autant plus épineuse que la lumière « blanche » est un assemblage de rayonnements colorés et que les sources « multicolores » sont aptes à fournir une lumière « blanche » par principe additif.**

Lorsqu'un même projecteur existe en plusieurs déclinaisons, la version « blanc froid » offre plus de **flux lumineux** que la version « blanc chaud ». Ces deux versions offrent chacune plus de flux lumineux que la version « multicolore » (même si la différence de flux entre le « blanc chaud » et le « blanc additif » des sources multicolores n'est pas toujours très importante). Ce rapport vaut uniquement lorsque l'on compare les lumières « blanches » de ces trois déclinaisons d'un même projecteur. Dès que l'on compare des lumières « colorées » (ce qui nécessite d'avoir recours à des filtres sur les sources « blanc froid » et « blanc chaud »), ce rapport s'inverse au bénéfice du projecteur à source multicolore.

Prenons un exemple en comparant des lumières semblablement « colorées » dont chacune serait produite par l'une des trois déclinaisons d'un même projecteur (« blanc froid », « blanc chaud » et « multicolore »). En premier lieu, lorsque l'on place un filtre identique devant chacun des projecteurs à sources « blanc froid » et « blanc chaud », il apparaît de façon évidente que la **teinte** de lumière obtenue n'est pas identique sur les deux projecteurs. Cela s'explique par la différence de composition spectrale de leurs deux sources. Ces deux projecteurs ne pourront jamais produire une lumière de teinte identique, qu'ils soient utilisés avec ou sans filtre. À l'inverse, le projecteur « multicolore » est capable de produire des teintes semblables à celles obtenues avec les projecteurs à sources « blanc froid » et « blanc chaud » équipés d'un filtre. De plus, lorsque l'on compare des lumières « colorées », le **flux lumineux** du projecteur « multicolore » est généralement plus important que celui d'un projecteur à source « blanc froid » ou « blanc chaud » équipé d'un filtre qui agit par principe soustractif. (Voir aussi : L'addition, p.30, La soustraction, p.32) Plus le taux de transmission du filtre est faible, plus le flux lumineux des projecteurs à sources « multicolores » est supérieur à celui de ceux à sources « blanches ». En raison du taux de transmission très faible que peuvent présenter certains filtres soustractifs, cette différence de flux lumineux peut être réellement considérable (notamment dans les teintes bleues, violettes et magenta).

Les projecteurs LED à sources « blanches » sont intéressants lorsqu'il s'agit de les utiliser pour les propriétés de leur lumière « blanche ». Certains projecteurs LED à sources « blanc froid » de fort flux lumineux (série Charles ou Zep2 de Robert Juliat, par exemple) sont très appropriées pour remplacer les Découpes ou les fresnels HMI qui sont généralement utilisés ponctuellement pour les spécificités de leur lumière « blanche ». D'une manière générale, les projecteurs LED à sources « blanches » sont intéressants pour toutes les réalisations qui ne nécessitent pas de recourir à de la lumière « colorée ». Ils sont intéressants lorsqu'ils sont utilisés sans filtre, pour les spécificités de leur composition spectrale et de leur flux lumineux. Les LED « blanches » sont notamment adaptées pour l'éclairage de la salle réservée au public et pour l'éclairage des parties communes, elles le sont tout particulièrement pour l'éclairage des expositions et l'utilisation en muséographie, et plus largement dans les domaines de l'urbanisme et de l'éclairage domestique.

**Avec les projecteurs LED à sources « blanches » il n'est pas possible de reproduire de façon précise une teinte obtenue par l'ajout d'un filtre sur un projecteur halogène (le résultat sera toutefois plus proche de l'original avec un projecteur « blanc chaud » qu'avec un projecteur « blanc froid »).** Pour cette raison, les projecteurs LED à sources « blanches » sont à l'origine de difficultés lorsqu'il est nécessaire de reproduire les teintes d'un éclairage initialement réalisé avec des projecteurs halogènes. Ils manquent de souplesse dans leur approche de la lumière « colorée » comparativement aux projecteurs à sources « multicolores » qui sont beaucoup plus agiles et polyvalents, et totalement aptes à reproduire les teintes d'un éclairage initialement réalisé avec des projecteurs halogènes.

Les éclairages des productions théâtrales sont principalement composés de lumière colorées, même s'il s'agit principalement de teintes pastelées. Par conséquent, dès lors que le recours à la lumière « colorée » (même dans les teintes les plus pastelées) est une nécessité, les **projecteurs à sources « multicolores »** capables de produire une large gamme de lumières « blanches » et de lumières « colorées » de toutes **saturation**s, semblent offrir le meilleur compromis en tirant tous les avantages de la LED.

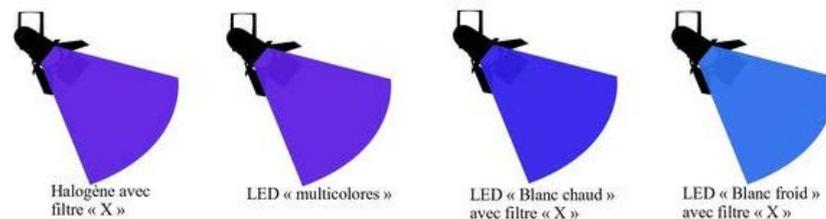
#### Comparaison d'un même filtre bleu sur trois sources « blanches » différentes



© Agence culturelle - Nicolas Fandard

Le résultat obtenu est différent selon la nature spectrale de la source sur laquelle le filtre est utilisé.

#### Comparaison d'un même filtre bleu sur trois sources « blanches » différentes + une source LED « multicolore »



© Agence culturelle - Nicolas Fandard

Un projecteur LED multicolore de qualité permettra généralement de se rapprocher le plus précisément possible de la couleur que l'on cherche à reproduire.

# LA CONSOLE D'ÉCLAIRAGE

**Les projecteurs LED doivent être contrôlés selon plusieurs paramètres (intensité, couleur, strobe, et parfois zoom, focus, pan, tilt, iris, gobo, prisme, couteaux, ...) et nécessitent l'action d'une console adaptée et d'un pupitre performant.**

## L'évolution

Les différences entre les jeux d'orgues à gaz, les systèmes de contrôle à rhéostats, les premières consoles informatisées et les consoles numériques actuelles sont nombreuses et diverses, bien qu'il s'agisse dans tous ces cas d'interfaces permettant l'élaboration et la restitution de divers états lumineux.

Le fabricant Américain Strand Lighting est le précurseur de nos consoles modernes. En 1935, il conçoit le premier système (Light Console) qui permet à un opérateur de piloter l'éclairage en voyant ce qui se passe sur la scène. Il s'agit d'un clavier qui commande des gradateurs reliés à des arbres motorisés par des embrayages magnétiques. Strand conçoit la première console « à mémoires » (Strand KTV) en 1959 mais devant le coût prohibitif que représente son achat, seul quelques grands opéras s'en emparent. Les consoles « à mémoire » ne commencent à se répandre qu'à partir de 1973 (Strand MMS). En 1975, Strand lance la première console (Strand LightBoard) équipée d'un système d'affichage visuel sur écran et expérimente pour la première fois le concept des circuits **LTP**. Le Suédois AVAB présente sa première console (AVAB 2000) en 1975 puis l'Américain ETC présente la sienne (Megacue) en 1977. Durant les années 1980, tandis qu'apparaît le futur standard DMX512, se développent de nouvelles marques (MA lighting, Flying Pig, Avolites, ...) qui deviennent rapidement importantes (En 1999, Flying Pig a fusionné avec High End Systems, marque qui appartient aujourd'hui à ETC). Les années 1990 sont marquées par plusieurs innovations liées à l'accroissement de l'usage des projecteurs asservis et des changeurs de couleurs. En 1994, l'Américain Flying Pig innove en sortant la première console (Wholehog II) équipée d'écrans tactiles, permettant la gestion simultanée de multiples séquences (« **Cuelists** ») et introduisant le concept de programmation « tracking ». En 1997, l'Allemand MA Lighting présente une console comparable (GrandMA) qui en plus des écrans tactiles, de la gestion de multiples séquences, et de la programmation tracking, intègre des faders motorisés. Ces consoles s'appuient chacune sur un logiciel puissant, performant, évolutif et proposent une approche nouvelle, efficace et intuitive du pilotage des différents attributs des projecteurs. Elles ont constitué les fondements sur lesquels reposent les consoles actuelles (GrandMA 3, Hog 4, Eos Apex, ...).

Au début de leur histoire, les projecteurs asservis étaient contrôlés par une console spécifique et son opérateur dédié, qui agissaient de façon simultanée avec une console d'éclairage traditionnel et un deuxième opérateur. Il fallait donc deux opérateurs et deux consoles, pour contrôler un système composé d'éclairage traditionnel et de quelques projecteurs asservis. A cette époque, certaines consoles traditionnelles étaient spécifiquement conçues pour les concerts (Avolites QM500, Celco Gold, ...) tandis que d'autres l'étaient pour le théâtre (Avab Viking, Strand Galaxy, ...) et se différenciaient par leurs fonctions et par leur aspect (une console QM500 ou Gold possédait chacune plus de 200 faders, tandis qu'une console Viking ou Galaxy n'en possédait qu'une petite dizaine). Il y avait donc trois typologies de consoles : asservis, concert, et théâtre. Aujourd'hui cette distinction n'existe plus, les consoles les plus performantes sont conçues pour contrôler indifféremment les projecteurs asservis et traditionnels dans une même approche, et elles peuvent tout aussi bien piloter l'éclairage d'un spectacle de théâtre, d'un concert, d'un opéra, ou d'un plateau TV.

## La fonction

Une console est un outil au service de la lumière auquel il est indispensable de recourir. La programmation (appelée aussi « pupitrage », ou « encodage ») de la console lumière est la clé indispensable au parfait pilotage des projecteurs LED et asservis. Pourtant, cet élément fondamental n'est pas toujours suffisamment pris en considération.

**Les consoles performantes sont toutes capables de répondre aux différents besoins de l'éclairage d'un spectacle et de parvenir avec plus ou moins de commodité et d'ergonomie aux résultats souhaités. Il y a généralement plusieurs façons de parvenir à un même résultat. Tout l'enjeu est de réussir à en identifier la façon la plus rapide, efficace, et ayant le meilleur impact sur les interactions entre les différents éléments de la lumière du spectacle (**Cuelists, Presets, Effets, Macros, etc.**).**

Certaines fonctions ou différents éléments de syntaxe et diverses notions de terminologie peuvent varier d'un fabricant à l'autre ou d'un modèle à l'autre, mais l'approche globale, les concepts et les processus de programmation sont assez similaires. La plupart des consoles d'éclairage partagent une même approche des principaux éléments : l'enregistrement des **Cues** et des Presets, l'accès aux différents attributs des projecteurs, la gestion des Cuelists, certains codes couleurs, les protocoles de transmission de données, etc. Le flux opérationnel de programmation est toujours le même : « Patcher » les différents appareils pour communiquer avec eux, créer des groupes d'appareils pour les sélectionner rapidement, créer des Presets pour pouvoir facilement rappeler ou modifier un « motif » (couleur, position, modelage du faisceau, intensité), composer et enregistrer des états lumineux (Cues), concevoir des séquences temporisées de plusieurs états lumineux (Cuelists).

Les consoles sont organisées autour de plusieurs espaces personnalisables ayant des fonctions différentes :

- Un espace dédié à la programmation appelé « Programmeur », composé principalement d'un pavé numérique, d'un pavé de commande, d'encodeurs (roues) et d'une ligne de commande.
- Un espace dédié à la restitution appelé « Playbacks », composé d'un Playback principal (appelé « Séquentiel » au théâtre) et de Playbacks secondaires (« Faders » et touches d'exécution configurables).
- Un espace transversal composé d'écrans tactiles dédié à la visualisation des différentes valeurs et permettant des accès rapides et directs vers tous les différents éléments.

## Les concepts importants

Les consoles actuelles demandent au pupitreur d'être familiarisé avec certains **concepts fondamentaux** qui les distinguent des consoles traditionnelles jusqu'ici utilisées dans les théâtres français. La plupart de ces concepts sont connus et utilisés depuis de longues années par certaines consoles et sont adoptés par quasiment toutes aujourd'hui.

C'est notamment le cas du mode de **fonctionnement « Tracking »** au moyen duquel seuls les changements sont enregistrés, dans une séquence-lumière. Le mode « Tracking » s'oppose au mode de fonctionnement à deux registres de restitution (« scène » et « préparation ») qui était en vigueur sur les consoles traditionnelles utilisées dans les théâtres. En vertu du mode « Tracking », lors de l'enregistrement d'une nouvelle **Cue**, les valeurs d'un projecteur qui sont identiques à celles de la Cue précédente, ne sont pas enregistrées. Elles sont « pistées » depuis la dernière fois où elles ont changé d'état, jusqu'à la prochaine fois où elles en changeront. Si un projecteur est allumé dans la Cue 1 et qu'il n'est jamais éteint, il restera allumé jusqu'à la fin du spectacle, mais ne sera enregistré que dans la Cue 1. Pour qu'un projecteur soit éteint dans une Cue, il ne doit pas en être absent, il doit y être présent avec une valeur d'intensité de 0.

Le mode Tracking a une incidence sur la programmation ainsi que sur la restitution. Pour qu'une Cue contenant un « Noir scène » demeure à coup sûr un « Noir scène » et ne soit pas parasitée par d'éventuelles corrections en amont dans la séquence, elle doit être l'objet d'une action spéciale (« Block » ou « Break »). Lorsqu'une modification effectuée sur une Cue ne doit pas avoir de répercussions sur les Cues suivantes, elle doit être enregistrée d'une façon spécifique (« Cue only »).

Lors de la restitution d'une « Cuelist » en mode Tracking, les différentes Cues peuvent s'empiler : si une Cue est envoyée avant que la précédente ait terminée sa temporisation d'apparition (fade In), les deux Cues termineront chacune leur apparition avec le temps de temporisation qui leur avait été assigné, sans que l'une ne prenne la place de l'autre de façon brutale.

Grâce au mode Tracking les consoles peuvent prépositionner elles-mêmes certains attributs (pan/tilt, focus, zoom, couteaux, couleur) lorsque les projecteurs ne sont pas allumés (« Move in black ») évitant ainsi au pupitreur d'avoir à réaliser lui-même ce « nettoyage » de programmation par un travail fastidieux.

Même si dans un premier temps celui-ci peut sembler déroutant, il ne faut pas avoir peur du mode « Tracking ». Les consoles actuelles y sont adaptées et dès lors que l'on travaille avec des projecteurs à plusieurs paramètres, il devient indispensable. Il est nécessaire de se familiariser avec ce concept qui présente de nombreux avantages lorsqu'il est correctement compris et utilisé.

Il est tout aussi nécessaire de se familiariser avec le concept de « Programmeur ». Le Programmeur permet de programmer les Cues, les Presets, les Effets, les Macros, et tout ce qui peut être programmé et enregistré... Toutes les valeurs que l'on peut y visualiser sont potentiellement enregistrables et il est possible de les filtrer pour n'en enregistrer que certaines d'entre-elles. Si l'on ne souhaite pas enregistrer les valeurs qui s'y trouvent, il faut le « nettoyer » (« Clear »). Le Programmeur ne permet pas de visualiser les valeurs provenant d'éléments déjà enregistrés (Cues, Effets, Presets, etc.) lorsqu'elles sont restituées sur scène. Sur certaines consoles l'action du Programmeur est prioritaire sur la restitution des Cuelists, tandis que sur d'autres consoles, il ne l'est pas par défaut, mais peut le devenir (« Freeze »).

## Le pupitreur

Une console aussi performante soit-elle ne fonctionne pas sans l'action d'un pupitreur. Elle parvient aux résultats attendus avec plus ou moins d'efficacité selon la qualité de l'action du pupitreur. En cas de mauvaise restitution d'un état lumineux, ou de quelque résultat ne correspondant pas aux attentes, il est fort probable que cela soit dû à l'opération du pupitreur. En effet, il n'est pas aussi infaillible que la console et les dysfonctionnements sont généralement d'origine humaine.

Dans les années 1980, le metteur en scène Matthias Langhoff (*Le Rapport Langhoff, 1987*) reprochait aux consoles numériques (qui équipaient tous les théâtres depuis peu de temps) de ne pas être adaptées aux productions théâtrales et de rallonger terriblement la durée des filages techniques en raison de la trop longue durée nécessaire à l'enregistrement des états lumineux. Les consoles de cette époque étaient certainement moins rapides et moins efficaces que les consoles actuelles, mais le facteur déterminant de la durée de programmation était déjà le pupitreur, non pas la console.

Les consoles actuelles sont devenues des **outils hautement évolués et spécialisés** ayant pour objectif de faire gagner du temps et de l'efficacité au pupitreur, à condition que celui-ci en ait la maîtrise et qu'il soit à l'aise avec. Une console puissante demande un long temps d'apprentissage et de compréhension pour pouvoir travailler de façon rapide, précise et sereine,

en ayant la maîtrise de chaque fonction. Pour cette raison, il est plutôt rare de trouver un pupitreur qui ait la parfaite maîtrise de plusieurs modèles de consoles surtout lorsqu'elles ne proviennent pas du même fabricant. Pour rester performant, un pupitreur doit pratiquer très régulièrement, toujours rester en éveil pour suivre les évolutions logicielles de sa console, et toujours chercher à s'améliorer.

Un pupitreur passe beaucoup de temps sur sa console et l'ergonomie est un paramètre important. Le poste de travail (table et fauteuil) doit bien sûr être fonctionnel et adapté, mais la console doit elle aussi répondre à des critères d'ergonomie et d'aisance. Les différentes possibilités de personnalisation de l'espace de travail offertes par les consoles permettent d'en améliorer le confort à son gré. Les fabricants proposent plusieurs formats de leurs consoles. Cette solution a le mérite de pouvoir satisfaire tous les budgets, mais les plus petits modèles n'offrent pas toujours les mêmes commodités que les plus grands. Il faut en tenir compte lors du choix d'une console ; un pupitreur doit être satisfait de sa console, et prendre du plaisir à travailler avec.

### Consoles



Apex 20



Hog4

© 2023 ETC

Les consoles actuelles se ressemblent par leur aspect, leurs capacités et leurs fonctionnalités.

## UNE ARCHITECTURE RÉSEAU ADAPTÉE

### L'électricité

Les projecteurs LED ne nécessitent pas la même **configuration de réseau électrique** que les projecteurs halogènes. En théorie, il est possible d'utiliser 8 à 20 fois moins de cuivre pour constituer l'architecture du réseau électrique d'une salle qui ne serait équipée que de projecteurs LED. La puissance disponible au **TGBT** peut elle aussi être considérablement amoindrie comparativement à celle que nécessite une installation halogène.

Pour **piloter plusieurs projecteurs halogènes** indépendamment les uns des autres, chacun doit être raccordé à son propre gradateur par un câble électrique à trois conducteurs 2.5mm<sup>2</sup>. Ainsi, pour pouvoir piloter 8 projecteurs halogènes indépendamment les uns des autres, 8 gradateurs et 8 câbles 3G2.5 sont nécessaires. En revanche, il est possible de piloter indépendamment 8 projecteurs LED branchés sur une seule et même alimentation 16A. En vertu de leur faible consommation électrique, il est possible de brancher de nombreux projecteurs LED sur une seule alimentation 16A. Pour les gammes Sully et Tibo (150W), le fabricant Robert Juliat indique qu'il est possible de brancher jusqu'à 22 projecteurs sur une même alimentation 16A.

L'utilisation des lourds et volumineux câbles multipaires devient superflue. Il suffit d'un, deux ou trois prolongateurs desservant l'extrémité d'une porteuse pour raccorder électriquement l'ensemble des projecteurs qui y sont accrochés. Le câblage s'effectue en « **Daisy Chain** » c'est-à-dire que tous les projecteurs câblés sur la même ligne 16A sont reliés entre eux. Pour assurer cette partie du câblage, les projecteurs sont reliés électriquement entre eux par des « liens » (**PowerLink** avec connectique **PowerCon**) légers et facilement manipulables qui ne nécessitent pas d'avoir recours à des biplites, triplites ou multiprises encombrantes.

### Le protocole DMX

Le **protocole standardisé** DMX512 est basé sur la norme RS-485. Il a été défini par l'**USITT (United Institute of Theater Technology)** en 1986, mis à jour en 1990 puis en 2004 (DMX512-A). La trame DMX permet de transmettre 512 canaux d'informations à travers une liaison physique constituée de deux paires torsadées. Les données sont transmises sous la forme d'une succession d'octets (8 bits) qui peuvent exprimer chacun 256 niveaux de valeur (de 0 à 255) pour chaque attributs (intensité, couleur, position, faisceau...). Pour les attributs qui nécessitent plus de précision (pan/tilt, couteaux, intensité, ...), le codage des informations peut se faire sur 16 bits (65 536 niveaux de valeurs possibles) en utilisant deux canaux.

Les projecteurs LED nécessitent des **moyens de transmission des données** beaucoup plus conséquent que les projecteurs halogènes, pour lesquels une seule liaison DMX entre la console et le local gradateur suffisait à contrôler jusqu'à 512 projecteurs indépendamment les uns des autres. Aujourd'hui, cette même liaison DMX ne permet plus de contrôler que seulement 34 projecteurs ETC S4 Lustr2 (mode 15 canaux) ou 3 projecteurs Ayrton Magic Panel 602 (mode 160 canaux) ou un seul projecteur Ayrton Dream Panel Twin (mode 272 canaux).

Un ensemble de 512 canaux DMX s'appelle : un Univers DMX. Ce qui signifie que deux Univers regroupent 1024 canaux DMX. Dans le cas d'une salle totalement équipée en projecteurs LED, il faut pouvoir disposer de suffisamment d'Univers DMX pour pouvoir travailler convenablement (4, 8, 12, X, univers, selon les configurations). Lorsque l'on cherche à quantifier le nombre d'Univers DMX nécessaires dans une salle, il faut toujours en prévoir quelques-uns supplémentaires pour les éventuels besoins particuliers d'un spectacle accueilli.

## Le port Ethernet

Il est nécessaire d'avoir recours à un grand nombre de canaux DMX pour piloter un système d'éclairage composé uniquement de projecteurs LED et asservis. Les consoles actuelles proposent généralement 4, 6 ou 8 sorties DMX sur connecteur XLR5 (soit autant d'Univers DMX assignables), mais sont généralement capables de piloter plus de 8 Univers DMX. Par exemple, une GrandMA 2 fullsize n'est équipée que de 8 sorties DMX (4096 canaux) alors qu'elle est capable de gérer deux fois plus de canaux (8192). En réalité, la console peut **piloter simultanément 4096 canaux** par les 8 sorties DMX (XLR5) et 4096 canaux par un port Ethernet (RJ45). Elle peut aussi piloter l'ensemble des 8192 canaux par un port Ethernet sans utiliser les sorties DMX. L'utilisation d'un port Ethernet a pour avantage de faire circuler les données relatives aux 16 Univers DMX sur un seul câble. Il est théoriquement possible de faire transiter plus de 32 768 Univers DMX à travers un câble Ethernet en utilisant le protocole Artnet et 63 999 Univers DMX en utilisant le protocole sACN. La GrandMA3 full Size est capable de gérer nativement 12 288 canaux (24 Univers) et d'en gérer jusqu'à 250 000 (488 Univers) en ajoutant des processeurs externes. L'EOS APEX est capable de gérer nativement 24 576 canaux (48 Univers).

### Nombre de canaux contrôlables par un seul câble selon le protocole

Câble	Protocole	Nombre de canaux contrôlables
Câble DMX	DMX 512	512
Câble Ethernet	Artnet	16 777 216
Câble Ethernet	sACN	32 767 488

## Les nodes et splitters

L'architecture du réseau peut prendre différentes formes selon la configuration et les contraintes du lieu. Dans tous les cas, le **schéma du réseau est un amalgame entre une distribution DMX et une distribution Ethernet**. Très peu de projecteurs LED sont équipés d'un port Ethernet, le recours aux câbles DMX est donc indispensable. Lorsque l'on utilise un port Ethernet en sortie de console pour communiquer avec les projecteurs, il faut faire transiter le signal par au moins un convertisseur (**Node** DMX/Ethernet) pour redistribuer le signal DMX vers les projecteurs à travers une liaison standard (XLR5). Il y a plusieurs façons d'envisager la répartition des **Splitters** DMX et des Nodes DMX/Ethernet. Par exemple, la console peut être reliée par une liaison Ethernet à une baie de brassage qui accueille un « gros » Node (8/12 Univers) ainsi que les splitters DMX de chaque Univers par lesquels sont distribués les signaux vers les différents projecteurs. Ou encore, la console peut être reliée par une liaison Ethernet à un **Switch** qui redistribue le signal vers différents « petits » Nodes (1 ou 2 Univers) disposés au plus près des projecteurs. Quel que soit le schéma d'architecture du réseau, les Splitters et les Nodes deviennent indispensables.

### Convertisseurs Ethernet/DMX (Nodes)



Swisson, XND 4B, 4R et 8R



Enttec Datagate MK2



Artistic licence datalynx II

© 2023 Swisson / © 2023 ESL

## La norme RDM

La norme **RDM (Remote Device Management)** a été publiée en 2006 par l'**ESTA (Entertainment Services and Technology Association)** et se présente comme une **extension du signal DMX512-A** avec lequel elle entrelace ses informations. Elle offre la possibilité d'une communication bidirectionnelle entre un émetteur (la console ou un contrôleur spécifique) et différents récepteurs (projecteurs, nodes, switch, ...). Il est ainsi possible de recevoir des informations de la part des différents récepteurs depuis la console.

Ce moyen de gestion à distance permet, entre autres, de visualiser et de modifier l'adresse DMX ou le mode d'un projecteur qui aurait été non, ou mal, configuré lors du montage. Bien que la norme RDM soit standardisée, il existe parfois des incompatibilités entre certains nodes et certaines consoles qui conduisent à bloquer ce retour d'information. L'ESTA s'intéresse à ce problème qui devrait très certainement se résoudre. Certains projecteurs non compatibles avec le RDM peuvent aussi dans certains cas perturber le réseau.

L'utilisation du RDM offre un réel avantage lorsqu'il est question de travailler avec une grande quantité de projecteurs LED et qu'il faut intervenir pour modifier rapidement la configuration de l'un d'entre eux, surtout s'il se trouve au-dessus d'un élément de décor. Elle s'avère très précieuse dès lors qu'il est question de modifier une option (par exemple la courbe de **gradation** ou l'activation du « red shift ») sur l'ensemble des projecteurs. Cette opération s'effectue depuis la console en quelques secondes.

## Le Wi-fi

La possibilité de transmission du signal DMX/RDM par **ondes Wi-fi** peut s'avérer intéressante pour certaines configurations d'autant plus que certains projecteurs intègrent un récepteur Wi-fi (S4 LED Lustr3). Il existe aujourd'hui des routeurs Wi-fi capables de diffuser jusqu'à 10 Univers DMX (City Theatrical, Multiverse Transmitter).

### Transmission de signal DMX en Wi-fi



Lumenradio, Stardust Transmitter WiFi DMX, 8 Univers



CityTheatrical, Multiverse receiver WiFi DMX, 1 Univers



CityTheatrical, Multiverse Transmitter WiFi DMX, 10 Univers

© 2023 ETC

# une nouvelle organisation du travail

De façon évidente et prévisible, les différents changements induits par l'utilisation de la LED impliquent d'adapter certaines pratiques, de changer quelques habitudes et de repenser diverses pratiques. Quels sont les réels changements ? Quelle nouvelle organisation mettre en place ?

## L'ADAPTATION DU PROCESSUS DE TRAVAIL

### Préparer le montage

Avec les projecteurs traditionnels, il est possible de débiter un montage sans avoir effectué d'autres opérations préparatoires que la vérification de la quantité et de la disponibilité des projecteurs et des gradateurs demandés. Le schéma de câblage s'improvise alors pendant le montage et à la fin de celui-ci, le Patch de la console est réalisé suivant l'identification de tous les gradateurs utilisés. Peu importe l'ordre dans lequel les projecteurs sont raccordés aux gradateurs, puisque chaque gradateur est « patché » dans la console avec le numéro d'identifiant (généralement appelé : Channel) correspondant à celui du projecteur auquel il est raccordé. Enfin, les gradateurs étant généralement tous pilotés sur le même Univers DMX, il n'y a aucun risque d'interversion ou de confusion entre différents Univers.

Lorsque l'on travaille avec des projecteurs LED qui nécessitent d'utiliser **plusieurs Univers DMX**, un minimum de **travail préalable** est nécessaire avant de commencer un montage. Avant d'entreprendre le câblage DMX, il faut auparavant avoir choisi le mode dans lequel vont fonctionner les projecteurs pour pouvoir **déterminer le nombre de canaux** DMX nécessaires, leur distribution et répartition sur les différents Univers, ainsi que les adresses DMX à affecter aux projecteurs. La méthode qui doit alors s'appliquer est l'inverse de la méthode traditionnelle : les différents projecteurs doivent d'abord être « patchés » dans la console afin d'obtenir les différentes adresses DMX et de définir la répartition des Univers, selon le nombre total de canaux DMX nécessaires. Cette opération peut aussi s'effectuer au bureau au moyen d'un ordinateur et du logiciel « OnPC » ou « Offline » de la console, ou à l'aide d'un logiciel de CAO dédié aux techniques de la scène par conception (Wysiwyg, VectorWorks Spotlight, ...).

Ce logiciel de CAO doit servir à éditer des documents clairs et précis où apparaissent les différentes informations nécessaires à effectuer le montage sans erreur (adresses DMX, adresses IP, attribution des Univers, sens de câblage, etc.) qui doivent être remis à l'équipe qui se charge de la mise en œuvre du matériel lumière. Il est préférable d'établir des **documents standards** qui reprennent systématiquement les mêmes symboles et les mêmes codes couleurs afin de familiariser l'équipe et de lui faire gagner ainsi en efficacité. L'objectif de ces documents est de rendre opérationnel le plan fourni avec la fiche technique du spectacle, en évitant d'y apporter des ratures et des annotations qui le rendraient difficilement compréhensible, ralentiraient la mise en œuvre, et favoriseraient les erreurs. Cette opération est d'autant plus justifiée lorsque le plan fourni est conforme aux projecteurs halogènes, et qu'il doit être adapté pour des projecteurs LED. Il est bien sûr conseillé de faire valider ce document par le responsable de l'éclairage du spectacle, avant de débiter le montage.

Ce type de document **doit être réalisé pour tout type d'événement**, y compris ceux pour lesquels il n'aurait été formulé aucune requête spécifique relative à l'éclairage (concert, gala, conférence, convention, ...). D'un point de vue professionnel, et par respect pour l'équipe de techniciens en charge de la mise en œuvre, il est difficilement concevable d'effectuer un montage sans un document graphique clair et précis. La réalisation de ce type de document peut s'avérer relativement simple et rapide lorsqu'elle s'effectue à partir d'un modèle présentant toutes les caractéristiques techniques de la salle (système d'accroche et de levage, cadre, velours, bibliothèques de projecteurs, code couleur, etc.) qui doit être conçu au préalable.

## Choisir un régisseur-lumière ou un pupitreur ?

Après avoir effectué le travail préparatoire en amont du montage, le régisseur-lumière encadre l'équipe qui se charge de la mise en œuvre des projecteurs. La coordination et la **cohésion du travail de l'équipe** est indispensable. Les tâches à réaliser sont plus variées (configurations des projecteurs, câblage DMX) que lors d'un montage traditionnel et il faut être vigilant à ce qu'elles soient toutes correctement accomplies. L'équipe s'organise autour de processus identifiés et reproduisibles, où des tâches distinctes peuvent être attribuées à ses différents membres.

Le régisseur-lumière favorise l'**autonomie de son équipe** en y maintenant un bon niveau de compétence et de motivation, ce qui lui permet de pouvoir s'absenter de la scène pour effectuer d'autres tâches comme :

- La **gestion du routage et du brassage** des signaux de transmission d'informations (DMX, Ethernet), afin que ceux-ci aboutissent à l'endroit où ils sont attendus par l'équipe de techniciens.
- La **gestion de la console**, où certaines tâches peuvent être effectuées sur cette phase des opérations. Il est possible de piloter la console depuis la scène à l'aide d'un smartphone ou d'une tablette, mais cette solution n'offre pas une très grande ergonomie. Elle doit être réservée à des opérations assez basiques et ponctuelles. Cette solution est très appréciable pendant la phase de réglage, pour piloter l'allumage et l'extinction des projecteurs, ou encore pour orienter et ajuster le faisceau d'un projecteur asservi en tenant soi-même le rôle de « doublure lumière ». Fatalement, plus le régisseur-lumière est assidu de sa console, plus il a des chances de devenir performant.

Le régisseur-lumière doit être vigilant à ce que tout le matériel (projecteurs, consoles, **nodes**, **splitters**, etc.) soit **maintenu à jour**. Il doit donc assurer une veille technologique et se tenir informé des évolutions des différents firmwares et softwares, puis les installer le cas échéant après avoir pris connaissance des nouvelles fonctionnalités. Sur sa console, il doit élaborer un fichier « modèle » (« template ») qui contient les bibliothèques des projecteurs de la salle, les **Presets**, les Effets, les **Macros**, les éléments de personnalisation... qui sert de base pour chaque nouveau spectacle.

Selon différents éléments contextuels, tels que l'envergure du lieu, la charge de travail liée à la densité de la programmation artistique, les compétences disponibles, etc. il peut être envisageable que le régisseur-lumière et le pupitreur soit la même personne ou au contraire, il peut être préférable d'avoir recours à deux personnes distinctes. Lorsque la programmation artistique est dense, il arrive très fréquemment qu'au moins deux régisseurs lumières se succèdent sur un même spectacle. Il est donc tout à fait envisageable qu'il y ait une répartition des tâches et que l'un d'eux tienne plutôt le rôle de pupitreur tandis que l'autre tient un rôle plus classique. Dans tous les cas, cette répartition des tâches doit s'effectuer en concertation avec les intéressés et il est préférable qu'elle prenne en considération les aptitudes et les compétences de chacun.

Ce régisseur-lumière « 2.0 » devrait aussi savoir adopter le point de vue de l'éclairagiste. Lorsqu'il est question de faire une adaptation, il faut avoir en tête les enjeux de la conception d'un éclairage, et veiller à respecter les exigences et les intentions artistiques qui ont animé la conception du spectacle.

## Faciliter le travail des techniciens

Excepté les nouvelles tâches de paramétrage et de câblage DMX des projecteurs, les principes fondamentaux sur lesquels repose le travail des techniciens en charge de la mise en œuvre du matériel, restent les mêmes. Ils bénéficient toutefois de quelques avantages appréciables d'un point de vue ergonomique, permis par la technologie LED.

Les pesants et encombrants câbles multipaires, distribués sur les porteuses pour répondre aux besoins de l'éclairage halogène, ne sont plus nécessaires. Ils sont aujourd'hui remplacés par une moindre quantité de simples prolongateurs, beaucoup moins lourds et facilement manipulables. Les liaisons entre les projecteurs s'effectuent avec des câbles **PowerLink**, généralement courts (de 1 à 3m) et donc légers. Pour améliorer encore l'aisance du travail des techniciens, il est possible de remplacer les câbles PowerLink et DMX par des câbles hybrides (ou câbles combinés) qui regroupent les deux sous la forme d'un seul câble.

La **spécificité du câblage « Daisy Chain »** des projecteurs, permet de pouvoir très facilement et rapidement retourner un projecteur qui aurait été installé dans le mauvais sens, en lui faisant effectuer une rotation à 180° : il suffit de débrancher les connecteurs **PowerCon** et XLR à l'arrière du projecteur, sans intervenir sur le câblage fixé à la porteuse, puis de les rebrancher lorsque le demi-tour est réalisé. Pour parvenir à ce résultat avec un projecteur halogène, il faut d'abord débrancher l'extrémité de son câble, après être parvenu à le dégager parmi un paquet de câbles comprimés par des liens de fixation, puis procéder à l'opération inverse une fois la rotation terminée et le paquet de câbles correctement refixé sur la porteuse.

Lors de la phase de réglage des projecteurs, les techniciens apprécient généralement beaucoup le confort thermique relatif à la très faible émission de chaleur des LED, leur évitant par l'occasion de fortes transpirations et de potentielles brûlures des mains et des avant-bras. Cette composante thermique a aussi une incidence sur la maintenance, ou plutôt sur son absence. L'intérieur du projecteur étant maintenu à une température relativement faible, il n'est plus nécessaire de changer régulièrement des pièces qui souffraient de la chaleur émise par les lampes halogènes (douilles, presse-étoupes, condenseurs, couteaux...). Par ailleurs, les techniciens n'ayant plus de lampes à changer, ils ne sont plus confrontés au changement de lampe « à chaud » qui s'impose parfois avec l'halogène, et pour lequel il faut prendre beaucoup de précaution pour ne pas se brûler. Le risque qu'une lampe ou une lentille explose pendant la phase de réglage, se trouve lui aussi écarté.

L'usage des gélâtines n'ayant plus cours avec l'utilisation des **projecteurs à sources multicolores**, les longues séances de découpages et la production de déchets qui l'accompagne s'en trouvent suspendues. Dans certains cas, un technicien pouvait être affecté plusieurs heures à cette tâche.

Étant composés d'électronique, les projecteurs LED sont par nature plus fragiles et plus sensibles aux chocs que leurs prédécesseurs halogènes, même lorsqu'ils sont robustes. Les techniciens doivent veiller à les manipuler avec précautions, sans les heurter violemment, ni les laisser basculer sur le sol. Lorsqu'ils doivent être déplacés d'un lieu à un autre, il faut éviter de les entasser les uns sur les autres à l'arrière d'un véhicule utilitaire, et privilégier le conditionnement en flight-cases. Ces précautions peuvent avoir une incidence sur la charge de maintenance, sur les éventuelles réparations, et sur la durée de vie. Lorsque les précautions sont prises, les techniciens n'ont que des tâches basiques à effectuer durant la période de maintenance annuelle (dépoussiérage, nettoyage des lentilles). Lorsqu'un appareil subit un choc ou une panne, les techniciens ne peuvent généralement pas faire grand-chose et il faut le confier au distributeur ou au fabricant.

## LA GESTION DE LA COULEUR

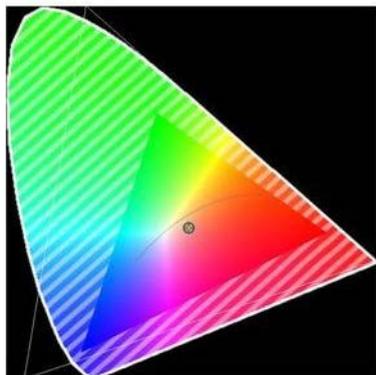
**Qu'un projecteur puisse offrir la possibilité de modifier la composition chromatique de la lumière en ajoutant entre eux des rayonnements lumineux de teintes différentes, constitue certainement la plus grande innovation permise par la LED en matière d'éclairage. Elle ouvre de nouveaux horizons et offre la possibilité d'une gestion agile des teintes d'un éclairage scénique, tout en bousculant certaines méthodes de travail. Pour parvenir aux meilleurs résultats, il est nécessaire de faire appel à un outil de gestion de la couleur performant et évolué. Pour faciliter cette gestion, les consoles proposent un certain nombre d'outils pour aider au maniement de la couleur.**

## Color Picker

Les consoles mettent à disposition de l'utilisateur un outil appelé «Color Picker». Il s'agit d'un espace colorimétrique graphique où il est possible de visualiser et de choisir la couleur souhaitée. Le terme générique de «Color Picker» regroupe différents espaces colorimétriques qu'il est possible de sélectionner selon ses préférences: **RGB**, **CMY**, **HSB (Hue, Saturation, Brightness)** ou **CCT (Color Correlated Temperature)**.

Ces espaces colorimétriques sont des espaces tridimensionnels dont les 3 composantes sont: la teinte, la saturation et la luminosité. Ce qui signifie que lorsque l'on attribue une couleur à un projecteur, on lui attribue aussi une valeur de luminosité, sans pourtant avoir aucune action sur le paramètre d'Intensité (Dim), ni obligatoirement en être conscient. **Couleur et luminosité sont intrinsèquement liées**. Ce lien n'est pas évident à faire à l'intérieur des espaces RGB ou CMY, mais il est facilement perceptible à l'intérieur de l'espace HSB qui comprend une composante «Luminosité»: Si la composante «Luminosité» indique une valeur de 75%, cela signifie que lorsque l'Intensité (Dim) du projecteur sera au maximum (100 ou Full), le projecteur ne fournira que 75% de la luminosité qu'il est capable de fournir pour la teinte et la saturation choisie.

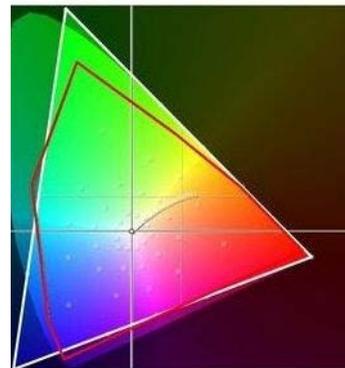
### Color Picker Grand MA3



© Agence culturelle - Nicolas Fandard

Il est possible de se déplacer dans cet espace selon trois paramètres: la teinte (x), la saturation (y) et l'intensité (B=brightness).

### Color Picker ETC EOS

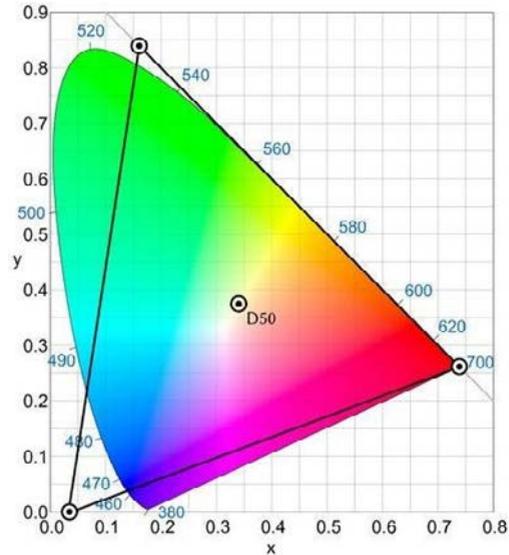


© Agence culturelle - Nicolas Fandard

La zone délimitée par un trait blanc correspond au triangle Kodak ProPhoto.  
La zone délimitée par un trait rouge correspond au Gamut d'un projecteur S4 Lustr3 X8.

Pour avoir une **bonne représentation de l'ensemble des couleurs réelles**, certaines consoles affichent le diagramme CIE xy. Sur cette représentation apparaissent des espaces plus restreints comme le triangle **ProPhoto RGB** et le **gamut** de chaque type de projecteur «patché».

Il est ainsi possible de visualiser l'espace colorimétrique dans lequel les projecteurs peuvent réellement œuvrer. Un projecteur ne peut pas produire une couleur qui se situe en dehors de son gamut. Si une partie de son gamut se situe en dehors du triangle ProPhoto (ce qui est rare), les couleurs qui s'y trouvent ne pourront pas être produites non plus. La **courbe de Planck** peut elle aussi être représentée pour fournir une aide à la gestion de la **température de couleur corrélée**.



© Wikipédia - Fred the Oyster

Le triangle ProPhoto RGP développé par kodak à l'intérieur de l'espace chromatique CIE dont il couvre 90%. Le «point blanc» indiqué correspond à l'illuminant D50. Les zones du triangle situées en dehors de l'espace chromatique CIE contiennent des couleurs imaginaires.

## Le triangle ProPhoto RGB

Le triangle ProPhoto RGB mis au point par Kodak est un espace RGB qui couvre 90% de l'espace CIE xy. Une partie (13%) de sa surface est en dehors de l'espace CIE xy, et donc en dehors de la gamme des couleurs visibles. Le Vert et le Bleu du triangle ProPhoto RGB sont des couleurs imaginaires. Un espace colorimétrique défini par 3 points de couleurs réelles ne peut pas couvrir entièrement l'espace CIE xy (en raison de sa forme particulière). L'intérêt de choisir des couleurs en dehors de l'espace des couleurs visibles est d'augmenter la gamme de couleur accessible au sein de l'espace créé, même si cela ne permet pas de toutes les intégrer.

Le triangle ProPhoto RGB est un espace colorimétrique standard largement utilisé.

## Gel Picker

Le « Color Picker » propose aussi généralement un outil appelé « Gel Picker » où l'on trouve la possibilité de **sélectionner une couleur parmi les nuances des principaux fabricants de filtres**. Cet outil ambitionne de **reproduire la teinte** de n'importe lequel de ces filtres. Dans la réalité, cela ne fonctionne pas précisément que dans très peu de cas. Pour que cela puisse fonctionner avec exactitude, il faut que chaque fabricant de projecteurs fournisse des données précises aux fabricants de consoles, ce qui est malheureusement rarement le cas. Pour reproduire précisément la couleur d'un projecteur filtré, les valeurs **RGB** spécifiques à chaque modèle de projecteurs, ainsi que le type de lampe du projecteur filtré dont on cherche à reproduire la couleur, doivent être connues de la console. Du point de vue de l'utilisateur, il serait souhaitable que des données colorimétriques fiables et précises puissent être communiquées aux fabricants de consoles, par les fabricants de projecteurs.

## Reproduire l'émulation du filament

Certains projecteurs intègrent un algorithme qui réalise **une émulation du rougissement du filament à basse intensité** (« amber drift »). Cette option généralement appelée « Red shift », « Amber shift » ou « Dim shift », peut être activée si l'objectif souhaité est de reproduire le comportement à la gradation d'un filament de tungstène. Cette option est intrinsèque au projecteur, sa gestion se fait directement sur le projecteur et ne dépend donc pas des capacités de la console utilisée. Elle peut toutefois être activée ou désactivée depuis la console grâce au **RDM**.

Lorsque le « Red shift » est associé à une courbe de **gradation** non linéaire semblable à celle d'une lampe à **incandescence** et à un algorithme qui agit sur le temps de réponse (inertie du filament), la perception visuelle de la gradation est alors très proche de celle qui est perçue avec une lampe à incandescence.

## Gérer les métamères

Deux faisceaux lumineux perçus par l'œil comme étant de couleur identique peuvent révéler de différente façon les couleurs des éléments de décors, des costumes ou de la peau, en raison de leurs différences de composition spectrale. Ces **différents spectres** qui peuvent apparaître avec la même teinte sont appelés des métamères. (Voir aussi: Le métamérisme, p.23)

Certaines consoles permettent un **maniement simple des couleurs métamères** en permettant de modifier la composition spectrale tout en conservant la teinte. Plus la source « multicolore » est composée de teintes différentes, plus il existe de possibilité de lumières métamères.

Cela donne la possibilité de choisir parmi plusieurs propositions de méta-mères selon différents critères. La sélection peut s'effectuer en privilégiant la luminosité ou l'optimisation du spectre que l'on cherche à reproduire. Elle peut aussi se réaliser par une action directe sur chaque composante du spectre, selon l'objectif recherché (mise en valeur d'un costume ou d'un élément de décor).

## Effectuer des transitions colorées

Avec les **projecteurs LED multicolores**, la transition colorée entre deux **Cues** est permise et peut participer à la narration du spectacle. Cette transition s'effectue sans difficulté lorsque les deux couleurs ont des teintes assez proches mais lorsque les teintes sont éloignées, la transition d'une couleur à une autre ne donne pas toujours satisfaction et peut emprunter un « chemin » non désiré. Elle aura parfois tendance à transiter par une couleur désaturée qui augmente la luminosité, ou bien à transiter par plusieurs teintes avant de parvenir à la définitive. Pour remédier à ces désagréments sans avoir recours à la programmation d'une ou **plusieurs Cues intermédiaires**, certaines consoles ont développé un outil (« Color path », ETC Eos) qui permet de gérer cette transition facilement en agissant sur le contrôle de la teinte, de la saturation ou de la luminosité.

## Constituer son propre nuancier

Lorsque l'on dispose de projecteurs dont les données colorimétriques ne sont pas renseignées dans la console et pour lesquels le Gel Picker fournit des résultats approximatifs, il existe une solution alternative qui consiste à **constituer soi-même son propre nuancier**. Il faut alors chercher à reproduire avec un projecteur LED, la lumière d'un projecteur halogène équipé d'un filtre, en comparant les projections de leurs deux faisceaux colorés sur un écran blanc, devant lequel il peut être intéressant de placer un échantillon de plusieurs couleurs. Lorsque les couleurs des deux sources sont perçues de façon identique, il suffit d'en enregistrer les valeurs dans un « **Preset** » du fichier modèle de la console, qui sert de base pour chaque nouveau spectacle. Cette couleur pourra ainsi être facilement utilisable pour chaque nouveau spectacle. Sur ce principe, il est possible de réaliser un large nuancier des filtres les plus souvent demandés.

Lorsque l'on cherche à se rapprocher le plus possible d'une couleur étalon (en cherchant à reproduire une couleur par comparaison avec une source halogène filtrée, par exemple), l'espace HSB est très approprié. Il permet de rechercher la couleur en agissant sur deux seuls paramètres : la teinte (Hue) et la saturation. L'action sur ces deux paramètres permet de se rapprocher rapidement de la couleur souhaitée. Il faut ensuite ajuster ces deux paramètres avec finesse (mode 16 bit ou « fine ») jusqu'à obtenir satisfaction. Il est souvent nécessaire d'agir conjointement sur le paramètre de Luminosité pour parvenir à la perception de deux couleurs identiques.

Ce **travail minutieux et exigeant**, qu'il faut prendre le temps d'effectuer sérieusement, présente l'avantage pour les opérateurs (régisseurs, pupitreurs) de se confronter aux possibilités et aux limites des projecteurs, et de pouvoir ainsi mettre en valeur leurs capacités technologiques et esthétiques.

## Utiliser le format normalisé GDTF

Le GDTF (General Device Type Format) est un **format de fichier numérique basé sur le langage XML**, créé en 2018 à l'initiative d'un fabricant de consoles (MA Lighting), d'un fabricant de projecteurs (Robe Lighting) et d'un concepteur de logiciels CAO 3D (Vectorworks). Ce fichier répertorie tous les **éléments nécessaires à faciliter la communication et l'échange de données entre projecteurs, consoles, et logiciels de conception et de visualisation 3D**. Le fichier GDTF d'un projecteur contient notamment les données photométriques, les données colorimétriques, les caractéristiques et les valeurs des différents attributs, les chartes DMX, les dimensions, le poids, le type de LED (ou de lampe), etc. Il est accompagné d'une représentation 3D de l'appareil.

Le format GDTF est défini par la **nouvelle norme DIN SPEC 15800** et est en situation de devenir un standard. Ce format universel de librairie de projecteurs pourrait être en mesure de simplifier la gestion de la couleur par la console, en lui fournissant les données colorimétriques des appareils. Du point de vue de l'utilisateur, il faut espérer que cette initiative soit grandement soutenue et que les librairies des projecteurs soient les plus complètes et les plus rigoureuses possibles. Un certain nombre de fabricants de projecteurs et de consoles reconnaissent ce format, mais sa généralisation et son optimisation devrait prendre encore un certain temps.

# de l'halogène vers la LED

Pendant toute la durée de la mutation de l'halogène vers la LED, il faudra faire face à la situation qui demande d'adapter pour la LED un éclairage initialement conçu en halogène. La réussite de cette pratique nécessite une organisation qui repose sur la connaissance, la compétence, la capacité d'analyse, et l'assurance.

## L'ÉTUDE DU PLAN DE FEU

Au préalable, il est nécessaire de bien **analyser le plan de feu** en envisageant les possibilités de substitution des projecteurs halogènes par des projecteurs LED, selon la qualité et la quantité de projecteurs demandés, ainsi que leur implantation. Cela consiste à examiner comment et par quels projecteurs LED remplacer les PCs, les Découpes, les PARs, etc. selon leurs différentes particularités. Il faut d'abord parvenir à s'affranchir des références classiques liées à la puissance consommée (1kW, 2kW, etc.). Une découpe LED de 200W ou 300W peut parfaitement égaler ou surpasser une Découpe 2kW.

Les découpes peuvent aussi être remplacées par des projecteurs asservis à couteaux (« Spot Profile »). Les PCs peuvent être remplacés par des Découpes, des Fresnels ou des projecteurs asservis (« Spot Profile » ou « Wash »). Les PARs peuvent être substitués par de nombreux projecteurs d'ambiances (« Wash ») à ouverture variable (zoom motorisé ou lentilles interchangeables). Pour les projecteurs particuliers à usage ponctuel (BT, Halogène 5kW, HMI 1,2kW, 2,5kW, etc.) il existe des solutions plus spécifiques.

## LA CONCERTATION

Après avoir terminée la première phase d'étude, il est nécessaire d'avoir **un échange oral** pour évoquer les différents aspects de l'adaptation avec la personne qui a la charge de l'éclairage du spectacle en tournée. Après lui avoir présenté le contexte, il faut pouvoir évaluer dans quel état d'esprit et avec quelle assurance elle se trouve, face à cette perspective d'adaptation. Ce contexte nouveau peut être déstabilisant et angoisser certaines personnes, il faut avant tout être à l'écoute et rassurer sur le bon déroulement des opérations, en faisant preuve de pédagogie et en expliquant tout ce qui pourrait être inconnu ou incompris. Il ne faut pas chercher à imposer à une personne qui estime ne pas en avoir la compétence, d'effectuer elle-même l'adaptation. Cela pourrait créer une situation anxiogène, se répercuter sous forme de stress sur toute l'équipe et potentiellement mettre le spectacle en danger. Il faut au contraire accompagner cette personne en lui proposant une expertise.

Certaines personnes déjà sensibilisées à la technologie LED et aux projecteurs asservis, peuvent s'afficher très détendues, curieuses et ouvertes, tout en souhaitant profiter de l'analyse et de l'expérience du responsable-lumière local, pour réaliser elles-mêmes l'adaptation.

D'autres personnes peuvent être à priori persuadées que l'adaptation sera de mauvaise qualité et peuvent chercher à obtenir des projecteurs halogènes. Face à cette situation, il faut recourir à des arguments objectifs, basés sur la photométrie, la colorimétrie, et sur la qualité des projecteurs LED proposés. Lorsqu'une personne pense ne pas pouvoir arriver au résultat souhaité avec un projecteur LED, et souhaite absolument travailler avec un projecteur halogène, il faut lui demander d'expliquer pourquoi. Cette personne doit être capable d'expliquer de façon argumentée et objective, dans quel but et avec quelle intention elle utilise tel ou tel projecteur. Réciproquement, la personne qui a la charge de réaliser l'adaptation doit être capable d'argumenter et de justifier pourquoi tel ou tel projecteur LED conviendra pour parvenir au résultat attendu. Dans la plupart des cas, les différents arguments échangés doivent permettre de trouver facilement une solution de substitution. Dans le cas des projecteurs particuliers (Halogène 5kW, HMI 1,2kW ou 2,5kW, ...) il peut être encore compliqué de proposer un substitut, ceux qui existent ne sont pas forcément déjà disponibles dans le parc lumière, et ils peuvent être difficile à trouver en location. Dans ce cas, il peut être nécessaire de recourir au projecteur originel qui est plus facile à se procurer.

Dans toutes les circonstances, il faut être capable de fournir une argumentation objective et cohérente, et être force de proposition. Il faut affirmer ses choix et faire preuve d'assurance, cela implique d'être certain d'avoir fait le bon choix de matériel et d'en avoir une parfaite connaissance.

La première prise de contact est l'occasion d'obtenir des renseignements supplémentaires à ceux déjà fournis par le plan et la conduite. Par exemple, il peut être intéressant de demander la grandeur de l'ouverture du faisceau des PCs, dans le but de les remplacer par des découpes moyennes ou courtes, dont aucune des deux n'a la même amplitude de zoom qu'un PC.

## L'ADAPTATION

L'adaptation ne s'envisage pas de la même façon avec des projecteurs à sources « blanches » qu'avec des **projecteurs à sources « multicolores »**.

Qu'il s'agisse d'un « blanc chaud » ou d'un « blanc froid », un projecteur LED à source « blanche » ne peut pas reproduire précisément une couleur par comparaison avec celle d'un halogène filtré. En raison des différences spectrales, les couleurs obtenues en utilisant le même filtre sont différentes. Dans le cas d'un projecteur LED « blanc chaud » les différences peuvent être légères, les plus gros écarts s'observent avec les filtres Rouges, Bleus, Violets et Magentas. Dans le cas d'un projecteur LED « blanc froid », les différences sont plus marquées et la grande majorité des filtres donneront des résultats très différents de ceux obtenus avec l'halogène. Une adaptation réalisée avec des projecteurs LED à sources « blanches » nécessite de faire quelques concessions et d'accepter de faire quelques compromis sur l'exactitude des couleurs d'origine.

Les projecteurs à source multicolores sont les plus appropriés pour l'adaptation d'un spectacle initialement conçu en halogène. Ils permettent d'obtenir des couleurs qui sont perçues de façon identique à celles des projecteurs halogènes équipés de filtres. Pour que le résultat soit optimal, ils nécessitent toutefois d'être maniés avec précision et avec une bonne connaissance de la gestion de la couleur permise par la console. Le nuancier de couleurs de la console (**Presets**) doit pouvoir donner entière satisfaction et proposer des **teintes** identiques à celles obtenues avec un halogène filtré. Ce nuancier doit être opérationnel, c'est-à-dire que les couleurs doivent être immédiatement disponibles. Dans le cadre d'une adaptation, la reproduction des teintes et des **saturation**s doit être la plus fidèle possible.

Les projecteurs LED multicolores demandent une considération particulière lors de la phase de corrections qui suit la phase de réglages. Avec les projecteurs traditionnels, seules les intensités sont ajustées au cours de cette phase, où il s'agit d'équilibrer et d'arranger les différents états lumineux. En revanche, la luminosité et la couleur étant intimement liées, il est parfois plus judicieux de modifier la teinte ou la saturation d'un projecteur LED que de modifier son intensité.

L'adaptation peut se faire en substituant chaque projecteur par un autre projecteur (« un pour un »), ou en essayant d'en optimiser la quantité en raison de leurs possibilités de variation chromatique, de position (pan/tilt), ou de modelage du faisceau (beam, focus). Les projecteurs ponctuels ou « spéciaux » ayant un rôle précis et unique, doivent bien sûr tous être remplacés « un pour un », sauf à être remplacés par quelques projecteurs asservis à couteaux qui peuvent être utilisés à différents moments avec des réglages différents.

Des adaptations peuvent être imaginées dans le cas des éclairages d'ambiance. Par exemple, dans le cas de l'éclairage classique d'un cyclo basé sur le mélange de deux ou trois couleurs, il est évident que le nombre d'appareil peut considérablement être réduit avec la LED. À l'identique, lorsqu'un éclairage d'ambiance est composé de plusieurs groupes de projecteurs ayant le même réglage mais ayant chacun une couleur différente, il pourrait être envisagé de les remplacer par un seul groupe de projecteurs LED qui changerait de couleur. Il peut aussi être concevable de diminuer le nombre de projecteurs au regard de la couleur qui leur est attribué. Par exemple, une ambiance obtenue par un groupe de projecteurs équipés d'un filtre à faible taux de transmission (et il y en a beaucoup) peut être obtenue par un plus petit groupe de projecteurs LED. Il faut toutefois être vigilant en réduisant le nombre d'appareils d'un éclairage d'ambiance : même si l'éclairage total peut être identique, la distribution et le nombre des ombres produites (par les artistes, les accessoires, le décor, ...) s'en trouvent modifiées, et peuvent ne pas satisfaire certains éclairagistes qui y sont sensibles.

**L'adaptation est donc un compromis entre le remplacement de chaque projecteur « un pour un », et l'optimisation de leur quantité.** Le remplacement de chaque projecteur « un pour un » ne permet pas de bénéficier de tous les avantages de la LED, mais il permet de réduire le temps de travail sur la console lors des corrections avant la représentation, puisque la séquence-lumière ne s'en trouve pas modifiée. À l'inverse, la réduction du nombre de projecteurs implique de modifier la séquence-lumière, et demande donc plus de travail sur la console en un temps relativement court, en augmentant ainsi le niveau de risque d'erreur. Cette solution n'est pas toujours possible dans le cadre de la représentation d'un spectacle en tournée, où généralement la charge de travail est déjà lourde au regard du temps imparti, et où il faut être attentif à respecter les échéances de chacun.

La personne qui se charge de l'adaptation doit tenir compte de son propre **niveau de compétence et de son aptitude à programmer la console** vite et bien. Plus l'adaptation demande du travail à la console, plus le pupitreur doit être performant. Il faut aussi tenir compte du niveau d'appréhension, ou d'assurance, affiché par la personne qui a la charge de l'éclairage du spectacle en tournée. Trop de changement peut augmenter le niveau d'inquiétude, tandis que substituer chaque projecteur par un autre projecteur peut être rassurant.

## Conseil lors du réglage

Lors du réglage des projecteurs, il est tentant d'allumer les projecteurs en « blanc », pour profiter d'un maximum de luminosité et ainsi mieux visualiser la direction et l'impact du faisceau, comme cela se pratique souvent en retirant le filtre d'un halogène. Toutefois, il est conseillé de faire les réglages de chaque projecteur avec les couleurs qui leur sont attribuées pour le spectacle. Cela a pour effet de rassurer le régisseur-lumière qui peut apprécier dès lors la justesse et la qualité des couleurs, et constater que celles-ci ont correctement été assignées à chaque projecteur dans la séquence-lumière.

## LA RESTITUTION

La restitution de la lumière d'un spectacle s'effectue au moyen d'une console lumière. Les différentes consoles n'offrent que peu de compatibilité entre-elles, car chacune propose un format de fichier spécifique. Le **standard d'échange d'information ASCII**, qui était utilisé par beaucoup de fabricants de console pour permettre de lire un fichier provenant d'une console concurrente, est en train d'être abandonné sans pour autant être remplacé. Il semblerait plutôt que les développements actuels de certains fabricants s'orientent vers l'import du format spécifique d'un autre fabricant.

Changer de console au cours de l'exploitation d'un spectacle ou d'une tournée, peut donc poser certaines difficultés. Les productions théâtrales partent rarement en tournée avec leur propre console. Elles doivent donc utiliser celle qui se trouve sur place, qui n'est pas obligatoirement celle sur laquelle avait été programmée la lumière du spectacle, ni forcément celle sur laquelle l'opérateur se sent à l'aise. Il y a la nécessité d'être vigilant sur ce point et d'en alerter la production.

Lorsqu'une compatibilité existe et que l'import de fichier est possible, il est préférable de le réaliser avant la date du montage pour pouvoir vérifier son bon fonctionnement et y intégrer certains éléments relatifs à l'utilisation des projecteurs LED. Il convient d'intégrer la séquence-lumière du spectacle accueilli dans le fichier modèle qui contient tous les éléments spécifiques aux projecteurs de la salle (Librairies, **Presets**, ...) et ceux pouvant faciliter la programmation (**Macros**, Profil, ...). Il faut ensuite « patcher » chaque projecteur avec le numéro d'identifiant qui lui est attribué, puis lui assigner une

couleur dans la séquence. Lors du passage d'une console fonctionnant sur deux registres à une console fonctionnant en mode « Tracking », il est nécessaire d'en protéger les **Cues** contenant un « Noir scène » (par un « Block » ou « break ») pour s'assurer que leur aspect ne puisse pas être transformé par d'éventuels ajouts de projecteurs dans les Cues précédentes.

Certains opérateurs lumières accompagnent les productions théâtrales en tournée avec un ordinateur portable et un logiciel de contrôle de la lumière (D: Light, White Cat, ...). Cette solution « low cost » peut présenter certains risques puisqu'elle repose sur les performances et la fiabilité d'un ordinateur dont l'usage n'est pas toujours dédié à la conduite de la lumière. En revanche, elle permet à l'opérateur de toujours évoluer dans le même environnement et lui offre un certain confort de programmation et de restitution. Certains opérateurs préfèrent donc cette solution plutôt que de travailler sur une console qu'ils connaissent peu ou pas du tout. Ces logiciels n'offrent généralement pas ou peu de fonctionnalités spécifiques aux projecteurs LED et asservis, et le nombre de canaux DMX qu'ils peuvent contrôler est insuffisant pour piloter l'ensemble d'un équipement LED. Pourtant, il est possible d'offrir à l'opérateur de ce type de logiciel, le moyen de contrôler un système complexe qui exige une grande quantité de canaux DMX. Le principe est simple: l'ordinateur est relié à la console par son port DMX IN, il agit comme une télécommande sur la console qui, elle, gère l'ensemble de l'éclairage. Les projecteurs sont patchés dans la console, l'intensité de chaque projecteur est enregistrée sur un fader, les couleurs de tous les projecteurs sont enregistrées dans une Cue et restituées par la console, un patch spécifique (« remote control ») est réalisé dans la console pour définir que tel canal DMX du logiciel doit piloter tel fader de la console. Lorsqu'une Macro est définie pour réaliser cette tâche, cette opération ressemble à celle qu'il faut effectuer pour un patch de gradateurs sur une console traditionnelle. Lorsque ces opérations ont été réalisées, l'opérateur de l'ordinateur détient donc le contrôle des intensités de chaque projecteur et il peut modifier, enregistrer et restituer la lumière du spectacle à son habitude, comme s'il s'agissait de projecteurs traditionnels et de gradateurs.

# accompagner le changement

Face à la mutation numérique de l'ensemble du matériel, l'accompagnement de l'équipe lumière dans son adaptation aux nouvelles réalités du terrain est une nécessité. Cette adaptation requiert une mise à jour des connaissances et des compétences qui doit être bien évaluée et accompagnée.

## ÉVALUER

L'ensemble des connaissances et des compétences nécessaires à une bonne utilisation de la LED peut se regrouper en quelques catégories qu'il faut pouvoir maîtriser : la console, les réseaux informatiques appliqués à la scène, les fondamentaux des projecteurs asservis et de leur programmation, les fondamentaux de la colorimétrie et de la photométrie, et une application logicielle CAO 3D spécifique aux métiers de la scène.

Il ne suffit pas de savoir évaluer les connaissances et les compétences nécessaires, il faut surtout savoir évaluer celles qui préexistent, et les compléter par celles qui font défaut.

## SE FORMER

### Les formations conventionnelles

Pendant longtemps, et jusqu'il y a encore peu de temps, la formation aux métiers du spectacle vivant se faisait « sur le tas », au contact des pairs, par transmission de « maître » à « élève », et en suivant des règles souvent

intuitives et empiriques. Si cette forme d'apprentissage présente de réels avantages à l'égard de la pratique, elle peut apparaître limitée et approximative sur le plan théorique ; de fait, elle est totalement inopérante lorsqu'il s'agit de transmettre des connaissances et des compétences nouvelles que les « anciens » ne possèdent pas.

Depuis une grosse vingtaine d'année, les métiers du spectacle vivant ont adopté une **démarche de professionnalisation** et l'offre de formations est aujourd'hui riche et variée. Certains centres de formations proposent des formations sur site et certaines d'entre-elles peuvent se composer « à la carte » suivant les compétences manquantes.

La formation des salariés permanents se fait dans le cadre d'un plan de formation qui doit recenser les actions de formation que l'employeur souhaite mettre en œuvre. Il est donc important de faire remonter les besoins spécifiques auprès de la direction. Toute entreprise, quel que soit son effectif, est soumise à l'obligation d'**adapter les compétences** de chaque salarié à son poste de travail et de maintenir ses capacités à occuper un emploi. La formation d'un salarié permanent est donc relativement accessible. Un régisseur-lumière peut ainsi bénéficier d'actions de formations pour lui permettre de s'adapter à l'évolution des technologies de son poste de travail ou de développer ses connaissances et ses compétences. La **formation des salariés intermittents** est plus complexe pour l'employeur, puisqu'elle repose avant tout sur une démarche personnelle du salarié. Les salariés intermittents ont facilement accès aux actions de formation et bénéficient d'un dispositif de prise en charge unique (Afdas). Pourtant, un grand nombre d'entre eux n'en profite pas. Lorsqu'un employeur a principalement recours à des salariés intermittents, il peut être confronté à des difficultés pour faire évoluer leurs compétences. Face à la raréfaction de certaines compétences, l'employeur ne peut qu'encourager les salariés intermittents à se former. Il est envisageable de s'adresser à un centre de formation pour organiser des actions de formation sur site en associant les salariés permanents et intermittents. Les permanents sont ainsi pris en charge dans le cadre de leur plan de formation et les intermittents dans le cadre du dispositif de l'Afdas.

### Les formations alternatives

Internet offre la possibilité de se former gratuitement depuis chez soi à l'utilisation de la plupart du matériel qu'il est nécessaire de savoir utiliser. La majorité des fabricants de consoles, de projecteurs, de périphériques réseaux ou de logiciels de CAO, proposent des **vidéos tutorielles ou des webinaires**, et peuvent même avoir leur propre chaîne YouTube pour diffuser ces contenus. Cette solution demande un plus grand investissement personnel, une grande autonomie, et s'adresse aux personnes les plus motivées, en apparence plus adaptée aux agendas des intermittents, elle peut aussi s'envisager pour les salariés permanents motivés, en organisant leurs plannings de façon adéquate.

# adopter le bon état d'esprit

De toute évidence, la mutation de l'halogène vers la LED doit s'envisager d'une **humeur positive**. Cela demande parfois de sortir des sentiers battus, d'accepter de prendre quelques risques mesurés en quittant sa zone de confort, et d'aimer relever des défis. Il y a certaines difficultés à surmonter et il est préférable de les affronter de façon volontaire, en affirmant et en consolidant ses connaissances, sans exprimer d'opposition au développement des technologies. Il est préférable de ne pas considérer la LED comme une source d'éclairage de substitution imposée par des logiques commerciales, mais plutôt comme une technologie innovante permettant de substantielles économies d'énergie et ouvrant de nouvelles perspectives artistiques.

Cette période de transition peut être vécue comme une épreuve et être **source d'anxiété** pour certaines personnes. Pour que l'accueil d'un spectacle ne se déroule pas sous tension, il est essentiel de maîtriser toutes les dimensions de l'éclairage LED, de savoir faire preuve de pédagogie, d'être force de proposition, d'accompagner, d'orienter, et d'inspirer la confiance en dégageant de l'assurance. Il faut pouvoir être convaincant face aux personnes qui doutent encore des qualités de la LED et remettent en question son usage. Il faut pouvoir être rassurant face aux personnes qui se sentent en difficulté par leur inexpérience.

Cette période de transition offre de nouvelles perspectives et permet des conditions favorables à de nouvelles expérimentations et de nouveaux apprentissages. Elle offre l'opportunité de se renouveler, de se remettre en question, et de faire preuve d'esprit critique.

6

## CONCLUSION: ET DEMAIN ?

Cette mutation ne fait que commencer ; il est probable qu'elle installe peu à peu des changements profonds, durables, et qu'elle modifie le système de pensée qui oriente les actions et l'interprétation des faits, de tous les intervenants de l'éclairage de théâtre.

**Certains usages vont se perdre, lorsque de nouveaux vont apparaître.**

Certains types de projecteurs vont disparaître, tandis que d'autres vont les suppléer. Le réfèrent halogène est un standard qui va lentement s'estomper jusqu'à disparaître. La quantité de luminosité ne sera plus évaluée en fonction de la puissance consommée. Le choix et la sélection des couleurs ne se fera plus par comparaison avec l'halogène filtré ; il se fera selon la richesse colorimétrique du projecteur choisi, d'après un fichier numérique qui contiendra ses informations colorimétriques et un nuancier personnel, ou partagé.

Il est probable que d'un lieu à un autre, les équipements en projecteurs LED soient beaucoup **plus diversifiés** qu'ils ne l'ont été auparavant avec le matériel d'éclairage traditionnel, et qu'il se produise une forme de rupture avec l'uniformité et la standardisation qui était de vigueur. Face à la vitalité du marché et à la diversité de l'offre, il faut se préparer à ce que différents types d'équipements soient choisis par les différents théâtres. Certains théâtres seront équipés avec des projecteurs « blanc chaud », tandis que d'autres le seront avec des projecteurs « multicolores », certains le seront avec les deux, certains auront intégré des projecteurs « blanc froid », des projecteurs asservis, etc. Il est toutefois possible qu'avec le temps un certain type de matériel, ou de modèle en particulier, fasse consensus et que de nombreux théâtres s'accordent sur son utilisation.

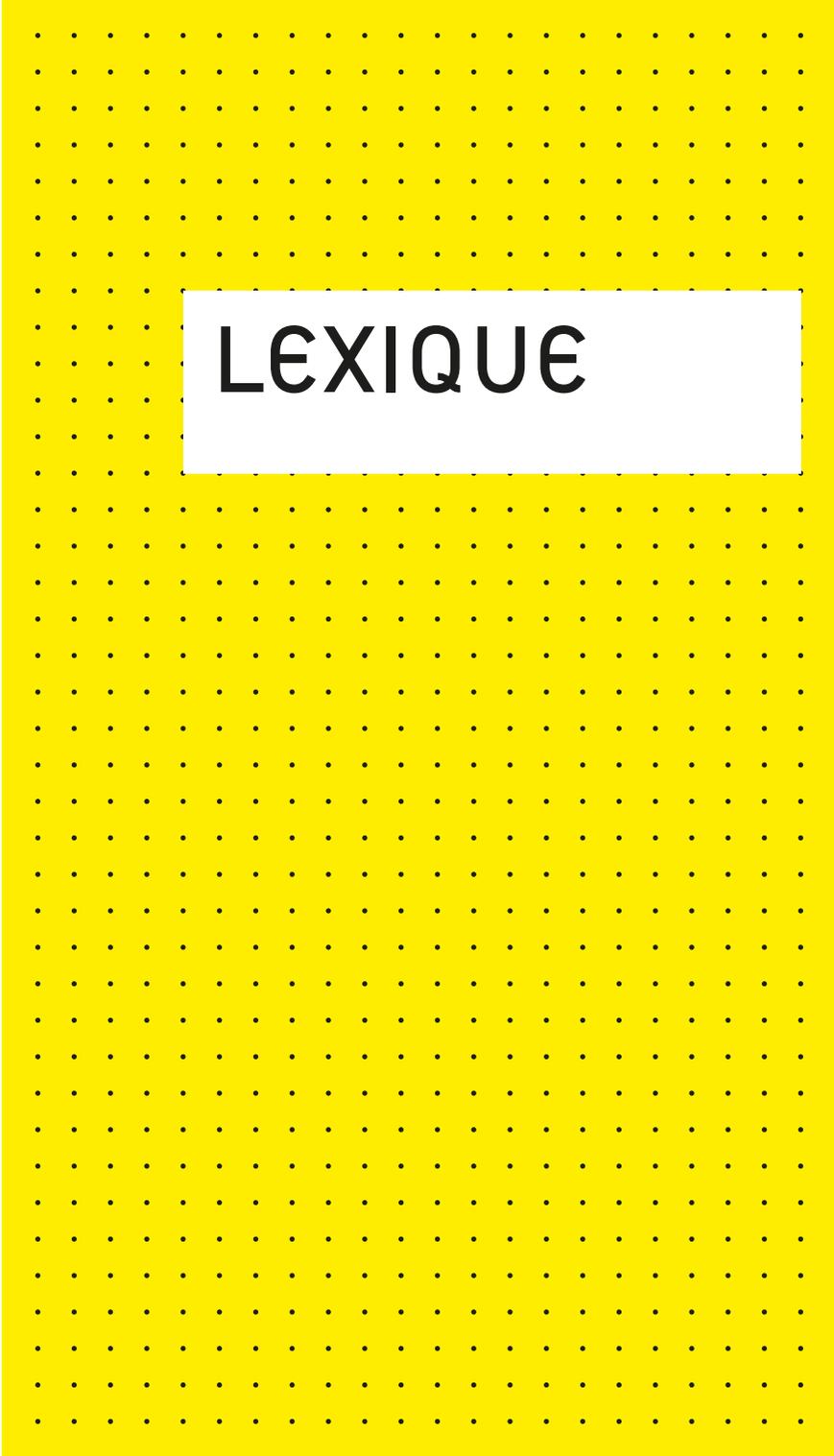
Il est vraisemblable qu'à l'avenir de plus en plus de productions théâtrales partent en tournée avec une partie du matériel d'éclairage (console et projecteurs principaux). **L'intégrité et la fidélité de l'éclairage** s'en trouvera plus facilement préservé. Cela commence d'ailleurs à s'observer avec certaines productions théâtrales (surtout étrangères), tandis que les productions de musiques actuelles en ont déjà une pratique complètement ordinaire et acquise. Cette orientation présente l'avantage d'apaiser les relations entre les productions de tournées et les lieux de représentations. Certaines tensions peuvent se créer lorsque les uns demandent aux autres de fournir du matériel spécifique très onéreux et difficile à trouver. Le matériel peut être loué le temps de la tournée, ou acheté dans une perspective d'investissement. Contrairement aux décors et aux costumes, une console ou certains projecteurs asservis peuvent facilement être réutilisés sur les prochains spectacles pendant au moins une dizaine d'années, durée suffisante à leur amortissement. Le matériel peut être choisi par l'éclairagiste d'après des caractéristiques spécifiques qui répondraient aux différents besoins, et non pas parce qu'il est d'un usage courant dans tous les théâtres. En suivant cette tendance, la quantité de projecteurs à fournir par les théâtres s'en trouverait diminuée. Les théâtres pourraient ne posséder qu'un équipement de base qui serait complété par celui de chaque spectacle accueilli.

Pour compléter leur propre matériel lorsqu'elles partiront en tournée, les productions théâtrales devront certainement apprendre à **s'adapter à utiliser du matériel différent** de celui qui était utilisé au moment de la conception, et devront être en mesure de pouvoir tirer parti de différents types de matériel. Les productions de musiques actuelles, de comédies musicales, et de certains opéras sont déjà familiarisées avec cette situation et ont su s'y adapter.

La personne qui a la charge de la gestion de l'éclairage en tournée devra certainement **cumuler des compétences d'éclairagiste, de régisseur-lumière et de pupitreur, pour pouvoir correctement adapter l'éclairage d'un spectacle**. Ce type de profil se rencontre déjà dans le secteur des musiques actuelles. Dans ce cas, la scission entre l'éclairagiste et le régisseur-lumière pourrait se faire moins nette qu'elle ne l'est généralement aujourd'hui au théâtre. Si tel n'était pas le cas, l'éclairagiste pourrait avoir une charge de travail supplémentaire pour l'adaptation de l'ensemble des dates de la tournée. Il est aussi possible que se développent des binômes éclairagiste/pupitreur (comme cela existe déjà parfois à l'Opéra ou dans les musiques actuelles) où chaque moitié du binôme possède ses propres compétences spécialisées et complémentaires de l'autre moitié, et où la qualité du résultat repose sur une relation de confiance et un langage commun.

Les **responsables techniques** des différentes salles devront rassembler les éléments suffisants (connaissances, avis d'experts, ...) pour correctement choisir le matériel selon leurs besoins et leurs moyens. Les éclairagistes et les régisseurs lumières qui tournent avec les spectacles, devront avoir les compétences suffisantes pour correctement adapter les caractéristiques de leur lumière à différents types de matériel.

La LED peut nous réserver encore des surprises et ses futures utilisations auront peut-être des impacts encore insoupçonnés sur l'éclairage des spectacles. Conjointement, les spectacles ayant recours à la réalité virtuelle (Livestream) vont certainement se développer. Les premières expérimentations s'adressent généralement à un public réduit (10 spectateurs par représentations pour *Le Bal de Paris* de Blanca Li), mais cette forme d'immersion dans un monde purement synthétique et numérique va certainement se développer et toucher un plus large public. En 2020, le rappeur Travis Scott a livré 5 concerts virtuels (images de synthèse) aux utilisateurs du jeu vidéo en ligne Fortnite, rassemblant ainsi un total de plus de 27 millions de spectateurs. Dans ce cas, La LED n'est plus seulement une source d'éclairage. Elle constitue l'ensemble de l'espace dans lequel on s'immerge et avec lequel on interagit (les décors, les accessoires, les artistes, etc.).



LEXIQUE

**A** **ADEME** Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (récemment rebaptisée: agence de la transition écologique).

**AfE** Association Française de l'Éclairage.

**ALD** Association of Lighting Designers.

**Angle solide** Un angle solide est l'analogie tridimensionnel d'un angle plan ou bidimensionnel. Il désigne une portion de l'espace délimitée par un cône non nécessairement circulaire, ainsi que la mesure de cette portion de l'espace.

**ANSES** Agence nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail.

**B** **Binning** Il s'agit du tri effectué sur les LED. Le processus de production industrielle des LED est à l'origine de différences perceptibles entre elles. Elles sont donc triées puis regroupées en lots de performances similaires. Elles sont généralement triées en fonction de leur flux lumineux, de leur température de couleur, et de leur tension.

**C** **CIE 1931 RGB** Espace colorimétrique défini par la Commission internationale de l'éclairage (CIE) en 1931 dans l'une des premières tentatives de quantification de la couleur. Cet espace est défini sur trois couleurs réelles Rouge, Vert, Bleu. Il présente l'inconvénient de recourir à des composantes négatives pour caractériser les couleurs très saturées dont les teintes sont identifiées physiquement par des longueurs d'onde inférieures à 550 nm.

**CIE 1931 XYZ** Espace colorimétrique défini par la Commission internationale de l'éclairage (CIE) en 1931 pour perfectionner l'espace RGB. Cet espace est défini sur trois couleurs virtuelles de coordonnées XYZ. Ces coordonnées permettent d'éliminer les valeurs négatives de l'espace RGB. Cet espace est le fondement de la colorimétrie scientifique.

**Commission Internationale de l'Éclairage (CIE)** Organisation qui se donne pour but la coopération internationale et l'échange d'informations entre les pays membres sur toutes les questions relatives à l'art et à la science de l'éclairage, à la couleur et à la vision, à la photobiologie et à la technologie de l'image.

**Corps noir** Objet abstrait qui absorbe parfaitement toute l'énergie électromagnétique qu'il reçoit. Cette absorption provoque l'émission d'un rayonnement thermique dont le spectre dépend uniquement de la température de l'objet. Le modèle du corps noir permit à Max Planck de découvrir la quantification des interactions électromagnétiques, qui fut un des fondements de la physique quantique.

**Courbe de Planck (Planckian locus)** Aussi appelé lieu Plankien (ou lieu de Planck, ou encore lieu du corps noir). C'est la trajectoire que suit la couleur d'un corps noir incandescent dans un diagramme de chromaticité donné, depuis le rouge profond jusqu'au bleu en passant par l'orange, le jaune, et le blanc.

**Cristallographie** Science qui se consacre à l'étude des cristaux à l'échelle atomique. Les propriétés physico-chimiques d'un cristal sont étroitement liées à l'arrangement spatial de ses atomes dans la matière.

**CTB (Color Temperature Blue)** filtre conçus pour modifier la température de couleur d'une source de lumière. Le full CTB converti une source 3200 K en 5700K.

**Cue** État lumineux qui constitue l'image (ou « tableau ») d'une « scène » (ce qui correspond en français, à une « mémoire »). Le mot « Cue » désigne aussi le signal (« top ») auquel il faut effectuer le changement d'état lumineux.

**Cuelist** Enchaînement temporisé des différents états lumineux du spectacle (séquence).

**D** **Daisy chain** Schéma de câblage où différents appareils sont reliés entre eux, les uns à la suite des autres, sur le principe d'une guirlande ou d'un collier.

**Delta UV** Écart existant entre une couleur et une lumière blanche de référence ayant toutes les deux la même température de couleur corrélée. Lorsque l'écart est positif, la lumière dérive vers le vert, lorsqu'il est négatif, elle dérive vers le magenta.

**Dépréciation** Diminution progressive du flux lumineux relatif au vieillissement d'une source de lumière.

**Derating** Réduction de flux lumineux qui apparaît avec l'augmentation de la température de la LED.

**Dopage** Action d'ajouter des impuretés à une substance pure afin de modifier ses propriétés de conductivité. Technique utilisée dans l'industrie des semi-conducteurs.

**E** **Éclairement lumineux** Grandeur photométrique qui caractérise la quantité de lumière reçue par une surface. Il s'exprime en Lux.

**Éco-conception (ou Écodesign)** Démarche qui consiste à intégrer le respect de l'environnement dès la conception d'un produit ou d'un service et au cours de toutes les étapes de son cycle de vie.

**Électroluminescence** Phénomène physique par lequel un matériau émet de la lumière lorsqu'il est soumis à un courant électrique ou à un fort champ électrique. Cette émission de lumière n'est pas liée à l'élévation de la température comme avec le phénomène de l'incandescence.

**Épitaxie** Opération qui consiste à faire croître une couche de matériau semiconducteur sur un substrat.

**ESTA (Entertainment Services and Technology Association)**

Association à but non lucratif qui regroupe les principaux acteurs professionnels du secteur de l'Entertainment (revendeurs, fabricants, sociétés de production, sociétés de location et sociétés de services).

**Étalonnage** Processus effectué pour assurer la cohérence de la luminosité des couleurs des LED. Il permet d'assurer la continuité de la qualité de la lumière délivrée par un projecteur et l'harmonisation des projecteurs d'un même type entre eux. L'étalonnage a pour objet la continuité de l'homogénéité colorimétrique et la constance de l'intensité lumineuse.

**F Flickering (ou scintillement)** Caractérise la perception visuelle de fluctuations de la luminance d'une source lumineuse. Ce papillonnement de l'intensité lumineuse est une conséquence des caractéristiques du courant électrique alternatif. Dans le cas de la LED, ce phénomène est accentué par le principe de gradation MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions) aussi appelé PWM (Pulse With Modulation).

**Flux lumineux** Grandeur photométrique fondamentale qui caractérise la puissance lumineuse d'une source, telle qu'elle est perçue par l'œil humain. Le flux lumineux est le flux énergétique pondéré par la sensibilité de l'œil humain, normalisée par la fonction d'efficacité lumineuse spectrale. Il s'exprime en Lumen.

**G Gamut** Ensemble des couleurs qu'un dispositif (par exemple un projecteur LED multicolore) peut reproduire.

**Gradation** Capacité de moduler le flux lumineux d'une source d'éclairage.

**H HSB (Hue, Saturation, Brightness) ou HSI (Hue, Saturation, Intensity)** Espace colorimétrique basé sur trois composantes définies par une approche psychologique et perceptuelle de la couleur : teinte, saturation et luminosité.

**I ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)** Association à but non lucratif qui vise à protéger les personnes et l'environnement contre les effets néfastes des rayonnements non ionisants.

**IÉS (Illuminating Engineering Society of North America)**

Association à but non lucratif qui vise à établir des recommandations scientifiques dans le domaine de l'éclairage et promouvoir les connaissances sur l'environnement lumineux vis-à-vis du grand public.

**Illuminant** En colorimétrie, un illuminant est la lumière qui éclaire un objet. Un illuminant représente une source fictive définie par les caractéristiques de son spectre d'émission.

**Incandescence** Propriété d'un corps à émettre un rayonnement lumineux lorsqu'il est soumis à une chaleur élevée. Dès que la température dépasse 500 °C, les rayonnements électromagnétiques émis appartiennent au spectre visible.

**Indice de rendu des couleurs (IRC)** Indice qui permet d'indiquer l'aptitude d'une source lumineuse à bien restituer les couleurs.

**Intensité lumineuse** Grandeur photométrique qui permet de caractériser le flux lumineux dans une direction donnée. Elle s'exprime en Candela.

**J Jonction P-N** On appelle jonction P-N la surface de contact entre deux semi-conducteurs dopés différemment, l'un ayant subi un dopage (positif) de type P (avec du bore ou de l'aluminium), l'autre ayant subi un dopage (négatif) de type N (avec du phosphore ou de l'arsenic), l'ensemble constituant une diode, c'est-à-dire un composant qui ne laisse passer le courant que dans un seul sens.

**K Kelvin** Unité de température thermodynamique du système international (SI) de symbole K. Elle correspond à une mesure absolue de la température, la température de 0 K correspond à ce que l'on appelle le zéro absolu qui correspond à une température de -273,15 °C.

**L LED (Light Emitting Diode) ou DEL (Diode Électroluminescente)** Composant électronique qui en étant traversé par un courant électrique émet une lumière par principe d'électroluminescence.

**Loi en carré inverse** L'éclairement lumineux est inversement proportionnel au carré de la distance entre la source de lumière et l'objet éclairé. Un même objet placé deux fois plus loin recevra seulement un quart de l'énergie émise.

**LTP (Latest Takes Precedence)** Système d'interprétation de données qui donne la priorité à la dernière valeur par opposition au principe HTP (Highest Takes Precedence) qui donne la priorité à la plus haute valeur.

**Lumière chaude** Se dit d'une lumière dont la teinte prédominante est jaune/orangée et dont la température de couleur est généralement comprise entre 2000 K et 3200 K.

**Lumière froide** Se dit d'une lumière dont la teinte prédominante est bleutée et la température de couleur est généralement comprise entre 5000 K et 6500 K. Du point de vue de la température de couleur, une lumière dite froide est plus chaude qu'une lumière dite chaude.

**Luminance** Seule grandeur photométrique à pouvoir quantifier une sensation visuelle de luminosité. Elle caractérise le flux lumineux provenant d'une surface éclairée qui est réfléchié dans l'œil. Elle s'exprime en Candela par mètre carré (cd.m<sup>2</sup>).

**Luminophore** Matériau qui a comme principale propriété d'émettre de la lumière colorée après avoir absorbé de l'énergie fournie par une source excitatrice. Ce principe est utilisé dans les LED blanches, les tubes fluorescent, les écrans d'ordinateur, etc.

**M** **Macro** Abréviation de «macro-commande». Il s'agit d'une suite de commandes natives d'un logiciel. Les macro-commandes sont généralement spécifiques à l'utilisateur ou à un contexte matériel. Leur utilisation évite des fautes de frappe et permet des gains de temps considérables grâce à l'automatisation de tâches complexes et répétitives.

**Métamérisme** Phénomène lié à la perception visuelle humaine selon lequel différentes couleurs produisent la même impression visuelle sans avoir la même composition spectrale.

**Modulation de Largeur d'Impulsions, MLI (ou Pulse With Modulation, PWM)** Technique utilisée pour synthétiser des signaux pseudo analogiques à l'aide de Signaux numériques carré.

**Monochrome** Qui est d'une seule couleur. Une lumière monochrome est une onde électromagnétique dont la densité spectrale d'énergie ne présente qu'une seule fréquence (une seule longueur d'onde).

**N** **Node** Unité qui permet de convertir un signal ArtNet ou sACN vers plusieurs univers DMX ou DMX RDM.

**O** **Onde électromagnétique** Une onde électromagnétique est un phénomène vibratoire qui se propage dans le vide et de nombreux milieux (transparents ou non), elle est constituée d'un champ électrique et d'un champ magnétique oscillants orthogonaux entre eux et orthogonaux à la direction de propagation.

**P** **PEARLE (Performing Arts Employers Associations League Europe)** Association Européenne qui rassemble plus de 10 000 membres au sein de théâtres, de salles de concert, de sociétés de production, d'orchestres, d'opéras, de compagnies, de festivals, de promoteurs et d'autres organisations professionnelles des arts du spectacle.

**Photométrie** La photométrie a pour objectif d'évaluer le rayonnement lumineux tel qu'il est perçu par la vision humaine et d'étudier la transmission de ce rayonnement d'un point de vue quantitatif.

**Photon** Particule élémentaire (quantum) constituant le rayonnement lumineux. Particule d'énergie sans masse, libérée par les électrons d'un atome après une phase d'excitation. L'énergie du photon (€) se mesure en électronvolt (eV) et se calcule en multipliant la fréquence de l'onde (v) par la constante de Planck (h = 6,63×10<sup>-34</sup> Joule. Seconde): € = h.v.

**PLASA (Professional Lighting And Sound Association)**

Organisme international regroupant les principaux fabricants et fournisseurs de technologies et de services de l'industrie de l'événementiel et du divertissement.

**Polychrome** Qui est de plusieurs couleurs. Une lumière polychrome est composée de différentes ondes électromagnétiques ayant des fréquences différentes (différentes longueurs d'ondes).

**PowerCON** Connecteur électrique de marque Neutrik qui existe en plusieurs versions (16A, 20A, 32A).

**PowerLink** Câble équipé d'un connecteur PowerCON à chacune de ses extrémités, qui permet de relier électriquement entre eux deux appareils.

**Preset (ou palette)** Valeur correspondant à un certain état d'un ou plusieurs attributs (ex : couleur) d'un projecteur, qui est enregistrée dans le but d'être utilisé dans des Cuelists et/ou des effets. Il s'agit d'un motif qui peut facilement et rapidement être utilisé.

**ProPhoto RGB** Espace colorimétrique RVB développé par Kodak. Il englobe plus de 90% des couleurs de surface possibles dans l'espace colorimétrique CIE.

**Psychophysique** Branche de la psychologie expérimentale qui étudie les relations entre les faits physiques et les sensations qui en résultent.

**R** **R&D (Recherche et développement)** fonction regroupant l'ensemble des processus qui assurent la faisabilité industrielle d'une invention, depuis la recherche fondamentale. Elle développe des innovations qui sont les applications industrielles et commerciales d'une découverte ou d'une invention.

**Radiométrie** La radiométrie est le domaine qui étudie la mesure de l'énergie transportée par les rayonnements. Les rayonnements électromagnétiques appartenant au spectre visible, sont l'un des objets d'étude de la radiométrie.

**RDM (Remote Device Management)** Amélioration du protocole USITT DMX512 qui permet une communication bidirectionnelle entre un contrôleur d'éclairage et les appareils compatibles RDM connectés sur une ligne DMX standard.

**Retrofit** Opération consistant à remplacer des composants anciens ou obsolètes par des composants plus récents, en changeant généralement la technologie, sans pourtant modifier la fonction.

**RGB (Red, Green, Blue) ou RVB (Rouge, Vert, Bleu)** Système de colorimétrie additive à 3 couleurs.

**S** **Saturation** Niveau de pureté d'une couleur. Une couleur totalement désaturé devient « blanche ».

**Semi-conducteur** Matériau dont la conductivité électrique est intermédiaire entre celle d'un isolant et celle d'un conducteur. Il se comporte parfois comme un isolant et parfois comme un conducteur.

**Source LED «blanc chaud»** Caractérise une LED dont la Tcc est généralement comprise entre 2700K et 3200K.

**Source LED «blanc froid»** Caractérise une LED dont la Tcc est généralement comprise entre 5000K et 6500K.

**Source LED multicolore** Source lumineuse LED composée de LED de différentes couleurs (généralement de 2 à 8). Ce principe permet de produire une lumière blanche par principe additif (« blanc additif »), obtenue en ajoutant entre-elles des plages de longueurs d'ondes spécifiques qui correspondent chacune à une teinte différente.

**Splitter** Appareil qui multiplie les signaux sur plusieurs sorties. Un splitter DMX reçoit un signal en entrée, qu'il réplique de manière identique vers plusieurs sorties.

**Substrat** Matériau sur lequel, ou dans lequel, sont fabriqués les éléments d'un dispositif ou d'un circuit électronique.

**Switch (commutateur réseau)** Équipement qui relie plusieurs câbles (ou fibres) dans un réseau informatique.

**T** **Teinte** Dominante monochromatique d'une couleur.

**Température de couleur (Tc)** Caractérise une source de lumière par comparaison à un matériau idéal (corps noir) émettant de la lumière uniquement par l'effet de la chaleur.

**Température de couleur corrélée, TCC (correlated colour temperature, CCT) ou température de couleur proximale** Concept qui a été développé pour cartographier les sources de lumières qui ne produisent pas de chaleur (sources froides) sur l'échelle unidimensionnelle de la température de couleur. On définit la température de couleur corrélée comme celle du corps noir dont la couleur se rapproche le plus de celle de la lumière à caractériser.

**TGBT (Tableau Général Basse tension)** Lien entre l'arrivée électrique et sa distribution à l'intérieur d'un bâtiment. C'est le point central de la distribution électrique d'un bâtiment.

**Triangle chromatique de Maxwell** En 1857, James Clerck Maxwell propose une nouvelle façon de répartir les couleurs avec un triangle défini par trois primaires qui forment un plan d'égale luminosité. Maxwell sépare les informations de luminosité de celles de chromaticité et utilise une notation scientifique qui renseigne uniquement sur la teinte et la saturation. Il servira de base de travail à la CIE pour développer ses différents espaces colorimétriques.

**U** **USITT (United Institute of Theater Technology)** Organisation qui vise à faire progresser les compétences et les connaissances des professionnels du théâtre, du divertissement et des arts du spectacle impliqués dans les domaines de la conception, de la production et de la technologie, et à promouvoir leurs intérêts de manière générale. C'est l'USITT qui a défini le protocole DMX512.

**V** **VPLT (Verband für Medien und Veranstaltungstechnik)** Association Allemande qui œuvre à défendre les intérêts des médias et des acteurs du secteur événementiel. L'association est activement impliquée dans toutes les normes industrielles pertinentes pour l'industrie et les processus de normalisation DIN. Elle est également impliquée dans le programme de normes techniques de l'ESTA (ANSI) aux États-Unis.

**W** **Wafer** Désigne une tranche ou une plaque très fine de matériau semi-conducteur monocristallin, utilisée pour fabriquer des composants de microélectronique.

## Bibliographie

### Ouvrages

Olivier Balagna, *Comprendre la lumière*, Sono Mag - Les cahiers techniques, 2016.

Richard Cadena, *Automated Lighting: The Art and Science of Moving Light in Theatre, Live*

*Performance, Broadcast, and Entertainment*. Focal Press Book, 2006.

Laurent Massol, *Les LED pour l'éclairage*. Dunod, 2015, 2<sup>e</sup> édition.

### Articles

Olivier Balagna, *Naissance du contrôle à distance et de l'automatisation des luminaires* in, *Revue d'histoire du théâtre*, n°273, 2017.

Jean Gervais, *L'éclairage électrique et son évolution au XX<sup>e</sup> siècle* in, *Revue d'histoire du théâtre*, n°273, 2017.

Cristina Grazioli, *Peindre avec la lumière : la naissance d'une esthétique au tournant des XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècles* in, *Revue d'histoire du théâtre*, 2017.

Patrice Guérin, *Les grandes nouveautés de l'âge industriel (fin XVIII<sup>e</sup>-début XX<sup>e</sup> siècle)* in, *Revue d'histoire du théâtre*, n°273, 2017.

Louis Juvet, *Éloge de l'ombre* in, *Revue des Arts et Métiers Graphiques*, n°spécial «L'homme, l'électricité, la vie», 1937.

Pauline Lemaigre-Gaffier, *Lumières du théâtre, lumières de la ville - L'éclairage aux XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> siècles* in *Revue d'histoire du théâtre*, n°273, 2017.

Ariane Martinez, *Éclairer l'interprète en scène* in *Revue d'histoire du théâtre*, n°273, 2017.

Benjamin Nesme, *État des lieux de l'éclairage scénique* in *AS, Actualité de la Scénographie*, n°231, 2020.

Benjamin Nesme, *Investir pour demain ?* in *AS, Actualité de la Scénographie*, n°233, 2020.

Benjamin Nesme, *La formation* in *AS, Actualité de la Scénographie*, n°234, 2020.

Benjamin Nesme, *La LED à cœur ouvert* in *AS, Actualité de la Scénographie*, n°232, 2020.

Véronique Perruchon, *Esthétiques de l'éclairage* in *Revue d'histoire du théâtre*, n°273, 2017.

Christine Richier, *La plongée du spectateur dans le noir* in *Revue d'histoire du théâtre*, n°273, 2017.

Sabine Chaouche et Jean-Yves Vialleton, *L'éclairage au théâtre (XVII<sup>e</sup>-XXI<sup>e</sup> siècles)* in *Revue d'histoire du théâtre*, n°273, 2017.

Matthias Langhoff, *Le rapport Langhoff : Projet pour le théâtre de la comédie de Genève*. Zoe, éditions, 1987.

### Rapports, études

Agence culturelle Grand Est, *Enjeux techniques et économiques de la transition de l'éclairage scénique vers la technologie LED*. 2021.

### Sitographie

Énergie*	energieplus-lesite.be
Guide de l'éclairage	leclairage.fr/led
Led Engineering Development	led-development.fr
Light Zoom Lumière - Le portail de la lumière et de l'éclairage	lightzoomlumiere.fr
Magazine «Sound Light Up»	soundlightup.com
Theatercraft - Entertainment Technology Resources & History	theatrecrafts.com

Au-delà de ses accompagnements transversaux, l'Agence produit de multiples outils didactiques et pratiques, pour répondre aux besoins spécifiques de ses publics. Ces ressources, vidéos, tutoriels, fiches pédagogiques ou encore guides, sont regroupés sous l'appellation « Les Essentiels », et concernent les techniques de la scène, le spectacle vivant et les politiques culturelles. Elles ont pour but de faciliter le montage et la mise en œuvre de projets culturels et sont accessibles à tous.



1 route de Marckolsheim  
67600 Sélestat

Saint-Martin-sur-le-Pré  
(Châlons-en-Champagne)  
Nancy  
Reims  
Sélestat

T. 03 88 58 87 58  
culturegrandest.fr  
tretto.fr  
parcsmaterielsgrandest.fr

#### Conditions d'utilisation :

Toute reproduction, intégrale ou partielle, des textes publiés dans le document n'est pas soumise à une autorisation préalable mais doit toutefois obligatoirement comporter la mention suivante :  
éditeur « Agence culturelle Grand Est »

Sous réserve de 3 conditions :

- gratuité de la diffusion
- respect de l'intégrité des documents reproduits
- citation explicite de l'Agence culturelle Grand Est comme éditeur et mention que les droits de reproduction sont réservés et strictement limités.

Les photographies et images ne peuvent être reproduites sans autorisation préalable et dès lors qu'un droit de copie serait accordé, la mention du copyright à indiquer sera transmise au demandeur par le Pôle Communication et ressources.

Auteur du guide et du lexique, recherches, élaboration du plan :  
**Nicolas Fandard**, directeur technique adjoint du Domaine d'O, Montpellier (34)

**Agence culturelle Grand Est :**  
directeur de publication  
**Julien Lesot**  
responsable éditoriale  
**Sabine Frantz d'Ours**  
coordination éditoriale  
**Alice Bertin** et **Vincent Borde**  
avant-propos et expertise technique  
**Marc Jacquemond**,  
directeur technique  
relectures et corrections  
**Alice Bertin**, **Vincent Borde**, **Alain Christmann**  
et **Marc Jacquemond**  
intervention graphique  
**Romain Stroh**

**Autres contributions :**  
relecture et correction des textes de l'auteur :  
Cécile Becker, journaliste pour Chicmédias (67)  
conception graphique :  
Atelier Poste 4  
impression :  
Ott Imprimeurs (Wasselonne)

novembre 2023  
ISBN 978-2-907441-56-8

papiers certifiés FSC®, sans acide et sans chlore  
crédit photographique :  
1<sup>er</sup> de couverture :  
© Agence culturelle - Vincent Muller

La Région  
**Grand Est**



**PRÉFET DE LA RÉGION GRAND EST**

Liberté  
Égalité  
Fraternité



Édité par l'Agence culturelle Grand Est, L'Essentiel de la LED permet d'appréhender au mieux la transition technologique des éclairages scéniques. Il ne s'agit pas seulement de changer des projecteurs mais bel et bien de repenser l'ensemble de la chaîne de la lumière artificielle et de s'accorder avec les nouvelles possibilités de création. Cette transition modifiera aussi profondément le fonctionnement des équipes techniques : de nouvelles compétences seront à acquérir. Pour la rédaction de ce vaste sujet l'Agence a fait appel à l'expertise avérée de Nicolas Fandard.

