

L'éclairage LED à l'usage du secteur de l'électrotechnique

1/12/2017

VOLTA

L'éclairage LED à l'usage du secteur de l'électrotechnique

1/12/2017

Cette brochure a été développée dans le cadre du projet 'Slimme Verlichting'.

Avec le soutien de :



Ceci est une publication de Volta
Avenue Marly 15/08
1120 Bruxelles

info@volta-org.be

www.volta-org.be

© Volta 2017

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, stockée dans une base de données automatisée ou publiée sous quelque forme ou par quelque moyen que ce soit, électronique, mécanique, à l'aide de photocopies, enregistrement ou tout autre forme, sans l'autorisation écrite préalable de l'éditeur.

1. Introduction

Les LED's ont, en un temps record, pris le pas sur toutes les autres sources lumineuses et ne peuvent plus être ignorées, aujourd'hui, par notre secteur. Une très grande partie des luminaires récemment installés utilisent cette technologie. En outre, dans les luminaires existants, les lampes classiques sont de plus en plus souvent remplacées par des LED's économes en énergie.

La révolution LED a conduit à de nombreuses innovations et offre toute une gamme de possibilités techniques que nous n'aurions jamais cru possible. Le revers de la médaille est la complexification importante et rapide de l'éclairage.

Pour l'installateur électrotechnique, l'éclairage n'est qu'une petite partie de l'ensemble des tâches qu'il doit mener à bien. Cette diversité ne lui permet donc pas de tout connaître en détail. Volta, en collaboration avec le Laboratoire pour la Technologie de la Lumière de la KU Leuven, a donc décidé de soutenir, par différents canaux, l'installateur électrotechnique dans sa transition vers la technologie LED.

Cette brochure a été rédigée dans ce cadre. Elle présente un large aperçu de la technologie de l'éclairage, allant des propriétés de base de la lumière et des LED's, aux aspects pratiques auxquels sera confronté un installateur.



Figure 1 : lampes LED's de substitution : une source de type LED est intégrée dans une armature existante en remplacement d'une source lumineuse classique.



Figure 2 : armature LED : l'armature a été développée et optimisée pour des LED's.

2. Les bases de l'éclairage

La lumière est tout autour de nous, mais finalement, la lumière, c'est quoi ?

Et bien ... la lumière est une petite partie du spectre électromagnétique, spectre qui comprend notamment les ondes radio, les micro ondes et les rayons X. Nos yeux sont sensibles à la partie du rayonnement électromagnétique dont les longueurs d'onde sont comprises entre 380 nm (nanomètre) et 780 nm. On parle d'ultra violet pour les longueurs d'onde juste inférieures à 380 nm et d'infra rouge pour celles juste supérieures à 780 nm.

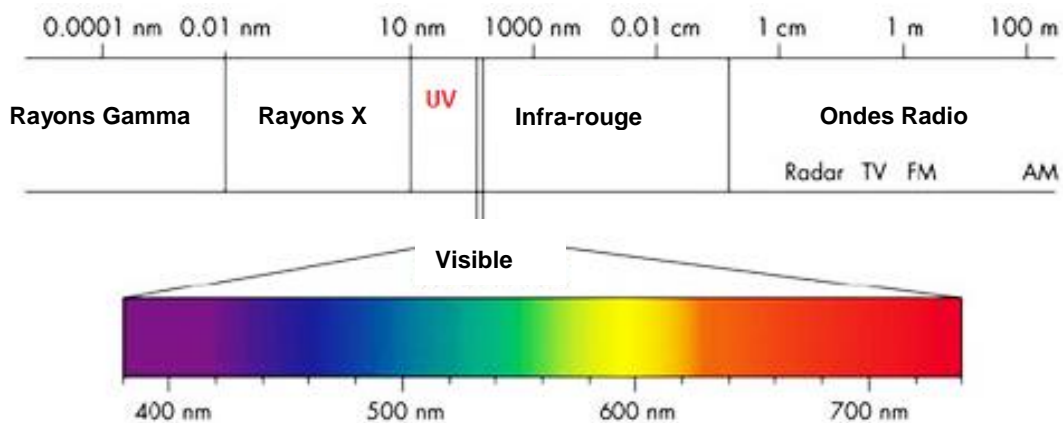


Figure 3 : la lumière est une petite partie du spectre électromagnétique.

Dans la partie visible du spectre, nous retrouvons toutes les couleurs de l'arc-en-ciel, chaque couleur correspond à une longueur d'onde spécifique. Notez que les couleurs pastel et le blanc ne se trouvent pas dans les couleurs de l'arc-en-ciel, ces couleurs sont le résultat de la combinaison de différentes longueurs d'onde.

La lumière de chaque source lumineuse est caractérisée par la combinaison de différentes longueurs d'onde et est représentée par son « spectre ».

Le rapport entre ces différentes longueurs d'onde détermine la couleur de la lumière telle que nous la percevons, mais aussi la façon dont les couleurs des objets éclairés vont nous apparaître.

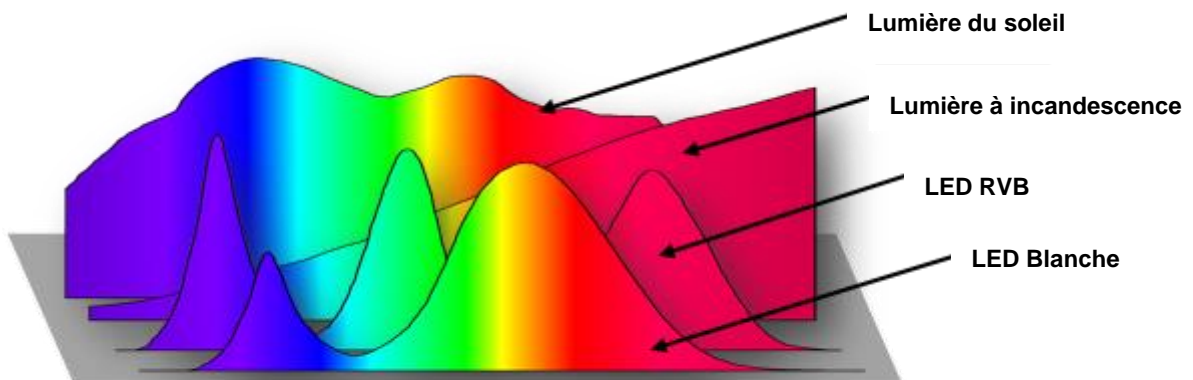


Figure 4 : quelques exemples des spectres de différentes sources lumineuses. Comme les spectres de ces sources sont totalement différents, nous percevons de manière différente les couleurs des objets éclairés par ces sources.

La plupart des sources lumineuses ont un spectre relativement large, qui contient souvent aussi des ultraviolets et des infrarouges. Ainsi, dans le cas de la lumière du soleil et de la lumière d'une ampoule à incandescence, la lumière visible n'est qu'une petite partie de leur spectre complet. **Cela explique pourquoi les ampoules à incandescence sont si inefficaces d'un point de vue énergétique ! Bien que 95 % de l'électricité soit**

convertie en rayonnement électromagnétique, seule une petite partie est visible, presque tout le reste est infrarouge.

Nous pouvons analyser un spectre de deux manières...

La surface délimitée par la courbe donne de l'information sur la quantité d'énergie contenue dans le spectre.

L'étude de ce paramètre s'appelle la photométrie. Les grandeurs les plus connues utilisées en photométrie sont l'éclairement (en lux) et le flux lumineux (en lumen)

La forme de la courbe détermine la couleur que nous percevons.

Dans ce cas ci, nous parlons de colorimétrie ou de mesure des couleurs. La température de couleur d'une lampe (par exemple 2700K) est la propriété colorimétrique la plus connue.

3. Photométrie, la mesure de la lumière

La photométrie est la partie de l'optique qui traite de la mesure de la quantité d'énergie lumineuse. Parce que nous ne sommes intéressés que par la lumière visible, la sensibilité de l'œil humain est prise en compte dans les grandeurs photométriques.

Dans ce chapitre, nous n'examinerons que les grandeurs photométriques pertinentes pour l'installateur électrotechnique.

3.1. La sensibilité de l'œil

Nos yeux n'ont pas la même sensibilité pour toutes les longueurs d'onde dans le spectre visible. La figure 3 montre la sensibilité moyenne de nos yeux aux différentes longueurs d'onde de la lumière. Nous voyons sur ce graphique que nos yeux sont beaucoup plus sensibles à la lumière verte/jaune qu'au bleu ou au rouge.

Si nous prenons une LED bleue (450 nm) et une LED verte (550 nm) pour lesquelles la quantité d'énergie du spectre est identique, la LED verte nous apparaîtra nettement plus lumineuse !

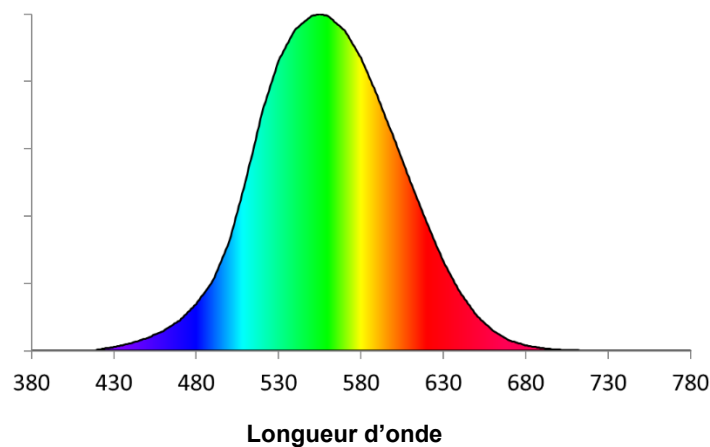


Figure 5 : courbe V_λ : sensibilité de l'œil humain pour les différentes longueurs d'onde de la lumière visible.

Il est donc évident que la puissance lumineuse (en watts) n'est pas une bonne variable pour la mesure de la lumière. Par conséquent, nous allons multiplier la proportion de chaque longueur d'onde dans le spectre par la sensibilité de l'œil pour cette longueur d'onde. La somme de chacun de ces résultats (ou l'intégrale, comme on l'appelle mathématiquement) donne une meilleure idée de la façon dont nous percevrons la lumière.

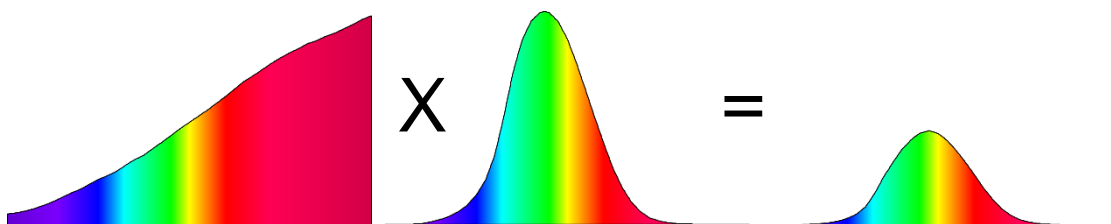


Figure 6 : distribution de l'énergie pour les différentes longueurs d'onde (dans cet exemple : une lampe halogène X la sensibilité de l'œil pour chaque longueur d'onde = ce que nous voyons.

Dans l'éclairage, nous travaillons avec des unités telles que lumen, lux, candela, etc. Ces unités expriment chacune, d'une manière différente, une puissance, mais en tenant compte de la sensibilité de nos yeux.

Dans les paragraphes suivants, nous allons expliquer ces unités courantes de l'éclairage.

3.2. Le flux lumineux (Lumen)

De toutes les unités utilisées en photométrie, le flux lumineux (exprimé en lumen) est le plus facile à comprendre.

Un lumen est simplement la puissance contenue dans un « paquet » donné de lumière, en tenant compte de la sensibilité de l'œil humain. Le lumen est généralement utilisé pour indiquer **la quantité de lumière provenant d'une certaine source de lumière, sans tenir compte de la façon dont cette lumière est distribuée dans la pièce.**



Figure 7 : nombre de lumen : quantité totale de lumière émise par la lampe.

Avec les technologies conventionnelles d'éclairage, il était habituel de classer les lampes en fonction de leur puissance électrique. Par exemple, nous parlons d'une « ampoule de 60 watts ». Puisque chaque lampe avait la même efficacité pour une même technologie, c'était correct.

Avec les LED's, c'est vraiment différent ! Deux lampes LED's avec la même puissance électrique, n'émettent pas nécessairement la même quantité de lumière.

Le flux lumineux (lumen) est donc l'outil correct pour comparer les lampes LED's.



Figure 8 : cette lampe émet 290 lm. Le fabricant indique que cela correspond approximativement à une ampoule à incandescence de 25W. La puissance électrique d'une lampe LED (6W) n'est pas un bon outil de comparaison.

3.3. L'efficacité lumineuse (Lumen/Watt)

L'efficacité lumineuse indique avec quelle efficacité une certaine source lumineuse convertit sa puissance électrique en lumière. Le mot « efficacité » est également utilisé à la place de « efficacité lumineuse ». Techniquement, ce n'est pas tout à fait correct, mais c'est d'usage courant.

Les lampes LED's ont énormément progressé en matière de rendement lumineux. Au début des années 2000, lorsque les premières LED's sont apparues sur le marché, elles avaient une efficacité de seulement 10 à 20 lumens par watt. A peine mieux qu'une ampoule incandescente ! Leur efficacité lumineuse a, depuis lors, augmenté exponentiellement. On trouve actuellement des produits LED's qui, par rapport à toutes les autres sources lumineuses conventionnelles, sortent réellement du lot en terme d'efficacité lumineuse.

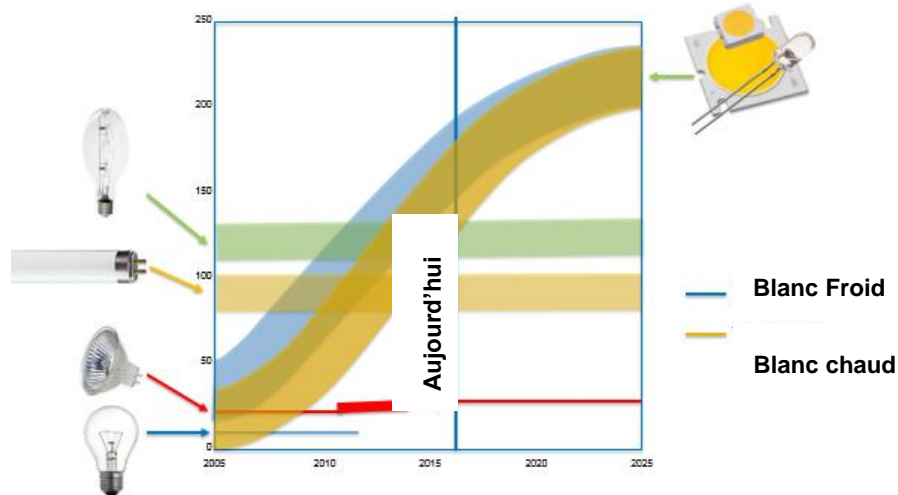


Figure 9 : L'évolution de l'efficacité lumineuse des LED's par rapport aux autres sources lumineuses.

3.4. L'intensité lumineuse (Candela) et la courbe photométrique

Outre la quantité de lumière émise par une lampe, il est également important de connaître la distribution spatiale de cette lumière.

Pour indiquer la quantité de lumière émise dans une certaine direction, nous utilisons l'intensité lumineuse, exprimée en candela (souvent abrégé en « cd »). Cette unité indique quelle quantité de lumière quitte la lampe dans une direction particulière.

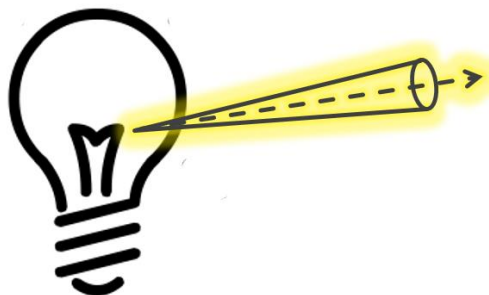


Figure 10 : candela, le flux lumineux qui est émis par la source lumineuse dans une certaine direction.

Dans l'éclairage, nous sommes principalement intéressés par les variations du flux lumineux en fonction de la direction. Ces variations sont représentées par les courbes photométriques.

En principe, la courbe photométrique est une figure tri-dimensionnelle qui indique la quantité de lumière qui est émise dans chaque direction.

En pratique, le rayonnement lumineux présente souvent une symétrie de rotation qui permet de simplifier cette figure complexe en un graphique à deux dimensions. Si la lampe n'émet pas la lumière de manière

totallement symétrique, le flux lumineux est alors caractérisé par 2 ou 4 graphiques qui représentent chacun une direction différente.

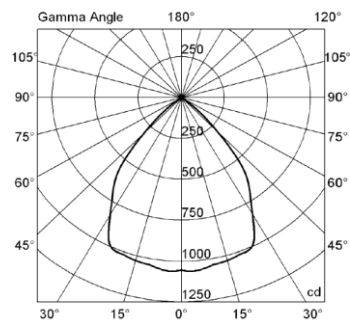


Figure 11 : courbe photométrique d'une lampe, le flux lumineux est principalement émis au droit du luminaire. Aucune lumière n'est par contre émise vers le plafond.

Nous ne sommes généralement pas intéressés par des valeurs absolues de candela, mais bien par leur variation. C'est pour cette raison que, dans une courbe photométrique, le nombre de candelas est généralement divisé par le nombre total de lumens. Cela facilite la comparaison des graphiques pour de lampes qui émettent des quantités différentes de lumen.

3.5. L'éclairage lumineux (lux)

L'éclairage lumineux est l'unité avec laquelle l'installateur électrotechnique sera le plus souvent en contact. Et, contrairement aux unités précédentes, l'installateur peut mesurer, avec des outils simples, l'éclairage sur le chantier.

L'éclairage lumineux (lux) indique la quantité de lumens qui arrivent sur une certaine surface ou, en d'autres termes, avec quelle intensité une surface est éclairée.

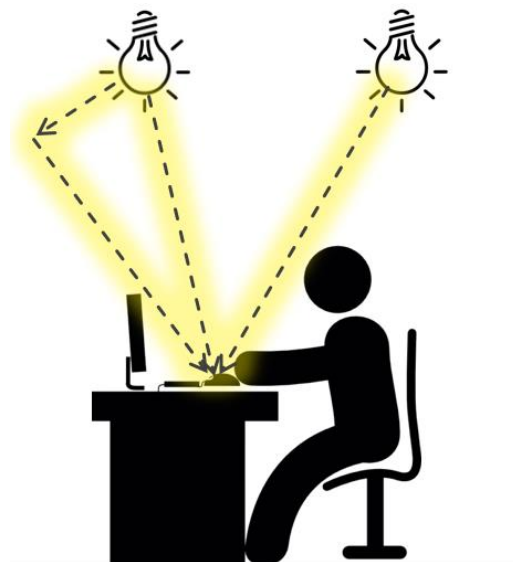


Figure 12 : l'éclairage lumineux : la quantité de lumière qui arrive sur une certaine surface.

L'éclairage lumineux en un certain endroit d'une pièce est déterminé par la combinaison des contributions de tous les luminaires dans la pièce avec, bien sûr, celle de la lumière solaire entrante. La couleur des murs, du plafond, du sol et des meubles a également une grande influence car une grande partie de la lumière qui tombe sur une surface ne vient pas directement du luminaire, mais bien de la réflexion de la lumière sur les différentes surfaces. L'éclairage lumineux peut varier considérablement dans une pièce.

Afin d'être en mesure d'effectuer une certaine tâche efficacement et en toute sécurité, les exigences minimales pour l'éclairage lumineux sont définies dans la norme EN12464. Dans cette norme, l'uniformité de l'éclairage dans une pièce et un certain nombre d'autres paramètres sont déterminés. Ces exigences varient en fonction de la destination de l'espace et de la tâche à accomplir : dans un endroit où un travail de précision doit être effectué, elles sont bien sûr beaucoup plus strictes que dans une salle de stockage par exemple.

Dans sa phase de conception, une installation d'éclairage est dimensionnée sur la base de simulations informatiques (Dialux) pour répondre à ces exigences. Après l'installation, l'éclairage lumineux est vérifié avec un luxmètre. D'autres éléments liés à la conception d'un éclairage sont détaillés plus loin dans cette brochure.

3.6. La luminance (cd/m^2)

Avec l'éclairage lumineux, nous connaissons la quantité de lumière incidente sur la surface que nous regardons. En fonction de ses propriétés de réflexion, cette surface réfléchit une partie de cette lumière dans la direction de notre œil, de sorte que nous pouvons percevoir à quel point cette surface est « claire ». Nous appelons cela la luminance.



Figure 13 : la luminance : la quantité de lumière qui part d'une surface et arrive à notre œil.

Par exemple, la luminance d'un mur éclairé dans une pièce diminuera si elle est repeinte dans une couleur plus sombre. Une cellule photométrique installée dans cette pièce mesurera alors une luminance inférieure. Pour obtenir la même valeur lux, il peut alors être nécessaire de paramétrer à nouveau la cellule.

3.7. Mesurer la lumière : le flux lumineux et l'intensité lumineuse

Des paramètres tels que le flux lumineux et la courbe photométrique sont caractéristiques d'une source lumineuse. Les mesurer nécessite un équipement spécialisé et un certain savoir-faire. Ces mesures sont donc rarement réalisées sur chantier, mais plutôt en laboratoire.



Figure 14 : sphère d'intégration ou Sphère de Ulbrich. La lampe est placée dans la sphère. Un détecteur, qui est protégé du rayonnement direct de la lampe, peut mesurer, grâce au revêtement blanc de la sphère, une moyenne de la lumière de la lampe. Le flux lumineux peut facilement être calculé à partir de cette moyenne.



Figure 15 : photogoniomètre en champ proche. Une caméra tourne autour de la lampe. Le flux lumineux et les courbes photométriques peuvent être déterminés à partir des données ainsi mesurées.

3.8. Mesurer la lumière : l'éclairement lumineux

L'éclairement lumineux est un paramètre qui doit être mesuré sur le terrain, car il dépend non seulement de la source lumineuse elle-même, mais aussi de l'espace qui l'entoure. En effet, le positionnement des luminaires, la lumière solaire incidente, la couleur des murs, la géométrie de la pièce, ... ont une influence très importante sur l'éclairement lumineux.

Un équipement de mesure approprié existe, il s'agit du luxmètre.



Figure 16 : mesure sur le terrain avec un luxmètre.

Travailler avec un luxmètre est assez simple... Vous placez le détecteur dans les endroits requis (généralement ces endroits sont définis par la norme EN12464 pour chaque application spécifique). La valeur mesurée en lux s'affiche directement.

Les luxmètres sont disponibles dans une grande gamme de prix. La précision de la mesure est bien évidemment liée au niveau de prix.

Il existe trois raisons principales pour lesquelles des luxmètres peuvent donner une valeur différente :

- **L'angle de mesure**

Un luxmètre doit traiter les faisceaux lumineux incidents sur son détecteur selon des angles différents. En pratique, les luxmètres semblent montrer des écarts de mesure plus importants pour de plus grands angles d'incidence.

- **Le spectre**

Un luxmètre doit suivre, le mieux possible, la courbe de sensibilité de l'oeil. Ce niveau de précision semble avoir une influence très importante sur le prix de revient d'un tel appareil.

En pratique, les luxmètres sont calibrés avec une lampe halogène, de sorte que l'éclairage généré par des spectres similaires (par exemple une lampe à incandescence ou une lampe LED de couleur blanc chaud) sera généralement mesuré de manière assez correcte. Plus la lumière mesurée est bleue (couleur plus froide), plus l'appareil devra être précis.

Ce niveau de précision est indiqué par le paramètre $f1'$. Il peut être trouvé dans la fiche technique de tout bon instrument de mesure.

- **L'état de l'appareil**

Un luxmètre commencera à mesurer moins correctement après une longue utilisation. Pour garantir une mesure correcte, l'appareil est recalibré chaque année afin de corriger le vieillissement et la pollution.

4. La colorimétrie, la mesure de la couleur

4.1. Le fonctionnement de l'oeil

Pour comprendre la théorie de la couleur et toutes ses particularités, il est utile d'avoir une idée du fonctionnement de l'oeil.

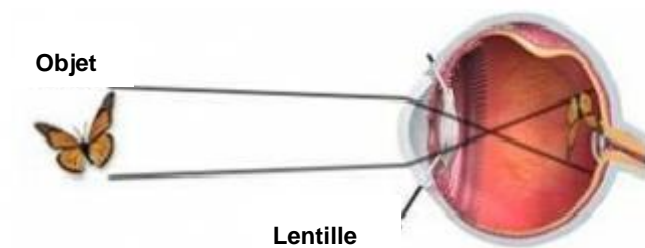


Figure 17 : la création d'une image dans notre œil.

Un rayon lumineux, avec un spectre donné, arrive au niveau de notre œil. Il sera projeté sur la rétine via le cristallin. Dans la rétine se trouvent les bâtonnets et les cônes. Ce sont des capteurs qui vont détecter la lumière et envoyer les signaux correspondants à notre cerveau. Vous pouvez comparer ces bâtonnets et cônes avec les pixels d'une caméra vidéo.

Pour notre vision centrale, pendant la journée, nous utilisons principalement les cônes. Il y a 3 types de cônes : un premier type est particulièrement sensible à la zone des rouges, un deuxième type à la zone des verts et un troisième type à la zone des bleus. En combinant les informations de 3 cônes adjacents, notre cerveau peut déterminer la couleur de ce « pixel ».

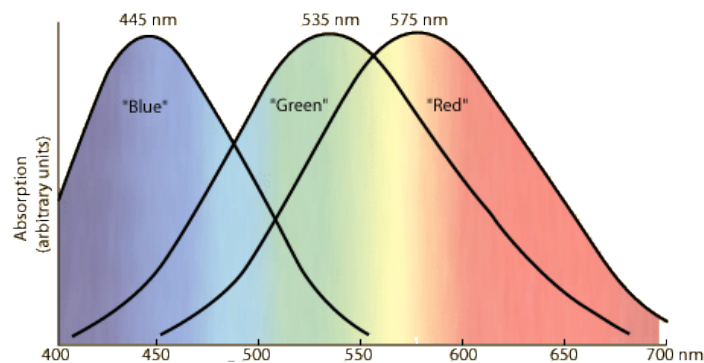
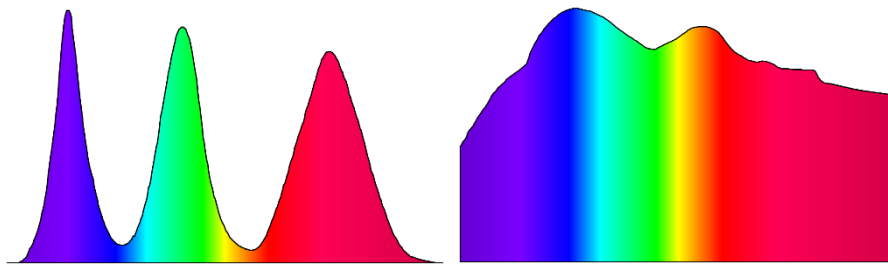


Figure 18 : les courbes de sensibilité des trois types de cônes.

Comme nous n'avons que trois types de capteurs de couleur, une grande partie de l'information fournie par le spectre est en fait perdue. Des spectres différents peuvent donc donner des résultats identiques au niveau des cônes et conduire à la même perception de couleur.

L'exemple le plus facile à comprendre est celui d'une LED RVB. En ajustant le rapport mutuel du rouge, du vert et du bleu, nous pouvons stimuler les cônes de notre œil de presque toutes les manières possibles et ainsi créer toutes les couleurs possibles. Bien qu'avec une LED RGB nous ne puissions jamais obtenir le même spectre que, par exemple, celui de la lumière du soleil, nous pouvons faire en sorte que nos yeux perçoivent la couleur de la lumière de la LED RVB et celle du soleil comme identiques.



**Figure 19 : à gauche : le spectre d'une LED RGB.
A droite : le spectre de la lumière du soleil.
Deux spectres totalement différents, mais, pour notre oeil, exactement la même couleur !**

Les bâtonnets sont présents en plus grand nombre que les cônes et fonctionnent donc dans des conditions de très faible luminosité. Il n'y a qu'un seul type de bâtonnet qui, par conséquent et contrairement aux cônes, ne donne aucune information sur la couleur. C'est pour cette raison que nous ne pouvons pas distinguer les couleurs au crépuscule.

4.2. La représentation de la couleur

Chaque combinaison différente de rouge, vert et bleu pour laquelle les cônes sont stimulés correspond à une certaine couleur que nous pouvons percevoir.

Toutes ces possibilités (et donc toutes les couleurs que nos yeux sont capables de reconnaître) peuvent être représentées dans le diagramme de couleur ci-dessous dit diagramme trichromatique.

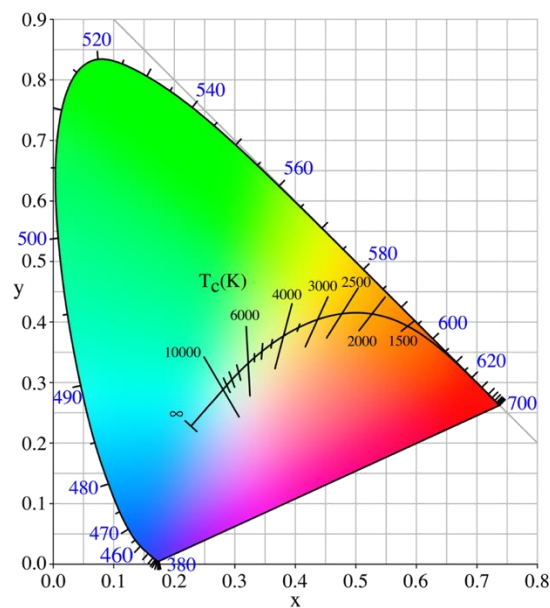


Figure 20 : le triangle des couleurs reprenant les coordonnées trichromatiques intègre toutes les couleurs que nous pouvons percevoir.

Les couleurs y sont représentées par leurs coordonnées xy. Par exemple, $x = 0,6$ $y = 0,4$ nous donne une couleur orange, tandis que $x = 0,2$ $y = 0,7$ correspond à un vert.

Notez que vous ne trouvez pas, dans ce diagramme, de couleurs comme le gris, le vert foncé, le brun, ... C'est parce que ce diagramme ne fournit pas d'informations sur la luminosité. Techniquement parlant, le gris est identique au « blanc foncé » et le brun à « l'orange foncé ».

4.3. La température de couleur

Il existe différentes nuances de blanc. Elles sont caractérisées par la température de couleur en Kelvin (K). Une température de couleur plus basse indique une teinte plus chaude (plus orange ou jaune). Une température de couleur plus élevée correspond à un ton plus froid (bleu).



Figure 21 : lampes LED's avec une température de couleur différente. De gauche à droite : de 1.000K à 10.000K. (source: Suriya Kankliang).

Le choix de la température de couleur dépend de l'application. Quelques exemples :



Figure 22 : pour les zones d'accueil (par exemple dans les hôtels), les gens optent généralement pour des températures de couleur chaudes (2700 à 3000K).



Figure 23 : dans les bureaux, le blanc neutre est préféré. On place habituellement du 4000K.



Figure 24 : dans les hôpitaux, les gens choisissent un blanc plus froid encore, par exemple 5000K. Cela donne une impression de propreté.

4.4. Les lampes avec des températures de couleur variables

De plus en plus de lampes LED's permettent de créer différentes nuances de blanc avec la même lampe.

Cela peut prendre différentes formes :

- « **Dim-to-warm** »

Alors que lorsqu'on dimme une LED, sa température de couleur reste constante, les ampoules à incandescence et les lampes halogènes auront une température de couleur plus chaude lorsque l'on diminue leur luminosité. Nous sommes tellement habitués à cette variation dans les applications résidentielles que la gradation à température de couleur constante d'une lampe LED peut sembler anormale.

C'est pour cette raison que l'on trouve maintenant sur le marché des lampes LED's qui imitent cet effet en combinant des LED's de couleur ambre et des LED's blanches. En s'assurant que la proportion de lumière des LED's ambre augmente lors de la diminution de luminosité, un rendu similaire à celui de la lampe à incandescence est obtenu.

Ce principe "dim-to-warm" est surtout destiné aux applications où l'on remplace simplement les ampoules à incandescence par des lampes LED's. On le retrouve donc principalement dans les lampes LED's de substitution, mais certains luminaires LED's proposent aussi cette option.



Figure 25 : deux lampes LED identiques avec système « dim-to-warm » : à gauche, pas de dimming, à droite, fortement dimmé. La différence de température de couleur est parfaitement visible.

- « **Tunable white** »

Avec le système « tunable white », la température de couleur d'un luminaire peut être réglée à l'intérieur d'une certaine plage. Habituellement, ces luminaires fonctionnent avec une combinaison de LED's blanches froides et chaudes dont le rapport relatif détermine la température de couleur du luminaire.



Figure 26 : luminaire avec « Tunable White ». Différentes nuances de blanc peuvent être obtenues.

Contrairement au « dim-to-warm », les systèmes de contrôle d'un « tunable white » sont plus complexes, généralement basés sur le protocole DALI ou sur un protocole similaire.

Les luminaires avec « tunable white » sont généralement utilisés dans les situations où l'on désire appliquer le principe du Human Centric Lighting. L'intensité de la lumière et sa température de couleur peuvent être adaptées aux besoins de l'utilisateur.

Nous développons ce principe du Human Centric Lighting dans un chapitre ultérieur de cette brochure.

- **Les lampes dont la couleur est entièrement réglable**

Certains luminaires LED's et lampes LED's vont encore un pas plus loin et peuvent, en plus de la lumière blanche, créer d'autres couleurs.

Ici, on mélange des LED's de 3 couleurs de base différentes, chacune de leur combinaison permet d'obtenir une couleur spécifique.

La plupart du temps, ces lampes fonctionnent sur le principe RVB (RGB) mais il existe d'autres options qui sont approfondies au chapitre 4.11.

Ces lampes sont utilisées pour un éclairage permettant des effets lumineux d'effet plutôt que pour un éclairage général.



Figure 27 : en mélangeant des LED's de différentes couleurs, presque toutes les couleurs peuvent être obtenues. On utilise habituellement des LED's rouges, vertes et bleues, parfois complétées par des LED's blanches.

4.5. Le rendu des couleurs

Comme nous l'avons vu dans les paragraphes précédents, notre œil peut interpréter de la même manière des spectres de lumière pourtant différents.

En réalité, la situation est encore plus complexe, car nous voyons presque toujours des spectres de lumière réfléchi. Ainsi, non seulement le spectre de la source lumineuse est-il important, mais également le spectre de la lumière réfléchi par l'objet que nous regardons.

Par exemple, si nous regardons une orange qui est éclairée avec une lampe LED RVB, l'orange aura une couleur plutôt rouge car une source lumineuse de type RVB a très peu d'orange dans son spectre, de sorte que cette couleur peut difficilement être reflétée !



Figure 28 : à gauche : LED blanche au phosphore. A droite : LED RVB.

La comparaison d'une LED RGB avec une LED blanche classique illustre un cas extrême de différence dans le rendu des couleurs. Mais de grandes différences dans le rendu des couleurs peuvent également être observées entre différentes LED's blanches classiques.

Un bon rendu des couleurs est une qualité importante pour une source lumineuse. Le rendu des couleurs est en effet primordial pour certaines applications. Si nous prenons le cas d'un magasin de vêtements : il est ici important que l'acheteur puisse correctement percevoir la couleur du textile. Un rendu des couleurs de qualité moyenne peut gâcher le plaisir de l'achat !

4.6. IRC – L'indice de rendu des couleurs

Une méthode relativement ancienne, mais encore largement utilisée pour décrire par un nombre le rendu des couleurs est l'IRC ou le Ra.

Le principe est simple : on prend 8 ou 15 échantillons de couleurs définies dans la méthodologie et on les éclaire avec une lampe de référence puis avec la lampe témoin. La différence dans le rendu des couleurs est mesurée et représentée par un nombre. « 100 » signifie que les couleurs des échantillons se correspondent parfaitement avec les deux lampes. Plus le nombre est petit, plus la différence de rendu des couleurs est grande.

La moyenne de ces différences pour les 15 échantillons de couleur est la valeur IRC. Quand on n'utilise que les 8 premiers échantillons de couleur, on parle de Ra.



Figure 29 : bon IRC (gauche) vs IRC moyen (droite).

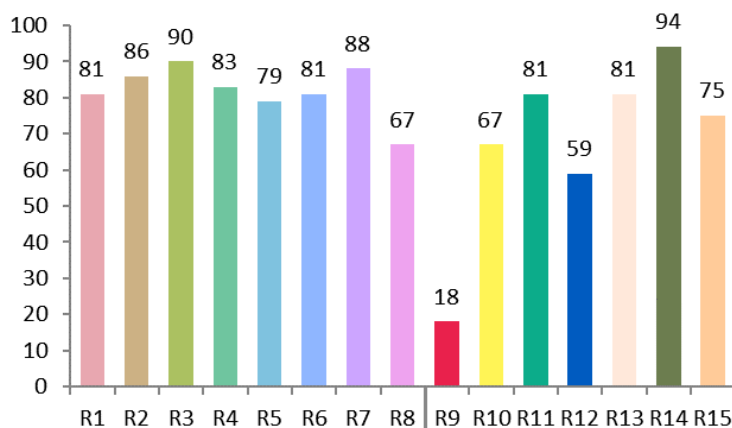


Figure 30 : résultat d'une mesure d'IRC. La différence de rendu de couleur entre la lampe d'essai et la lampe de référence a été déterminée et représentée sur ce graphique pour 15 échantillons. L'IRC est la moyenne de toutes les mesures et s'élève à 74. Le Ra est la moyenne des 8 premières mesures et est de 82.

Les spectres des sources lumineuses de référence et les échantillons de couleurs sont parfaitement connus. Le seul paramètre à introduire est le spectre de la lampe d'essai. Dès qu'il est connu, le calcul des différences de couleur n'est plus qu'une simple tâche mathématique qu'un ordinateur effectue en un rien de temps.

Ra / IRC	But
65-80	Eclairage extérieur
80-90	Eclairage intérieur standard
>90	Espaces pour lesquels un bon rendu des couleurs est crucial (magasin, cabinet médical, ...)

Figure 31 : valeurs de référence pour le Ra et l'IRC.

4.7. IRC et LED – Pas toujours une combinaison réussie

Les LED's ont souvent des difficultés à rendre correctement les tons rouges profonds. Ces nuances de rouge sont cependant importantes pour obtenir un rendu des couleurs agréable. Ces nuances de rouge sont testées dans le 9^{ème} échantillon de couleur (R9), mais lorsque l'on effectue la moyenne (l'IRC), cette information très importante est souvent perdue.

C'est pour cette raison que, dans la documentation des lampes LED, cette valeur R9 est spécifiée séparément et en complément de la valeur de l'IRC. La combinaison de l'IRC et du R9 donne une image plus précise du rendu des couleurs.

4.8. TM30 – Une alternative récente

Le choix des échantillons pour déterminer l'IRC n'est pas optimal car la plupart de ces échantillons sont des nuances de couleur non saturées. Dans ce cadre, les valeurs IRC et Ra ne correspondent pas toujours à la façon dont nous ressentons la lumière. C'est pourquoi il était nécessaire de trouver une meilleure alternative.

Un groupe de travail international a lancé cette alternative à l'IRC et au Ra en 2015 : il s'agit du TM30. On travaille maintenant avec 99 échantillons soigneusement sélectionnés et comprenant un grand nombre de couleurs saturées. La correspondance entre le nombre calculé et notre perception de la lumière est bien meilleure avec cette nouvelle méthode.

Le principe est identique au calcul de l'IRC. La moyenne des 99 écarts de couleur est maintenant appelée Rf où le f représente la fidélité, ou la véracité de la couleur.

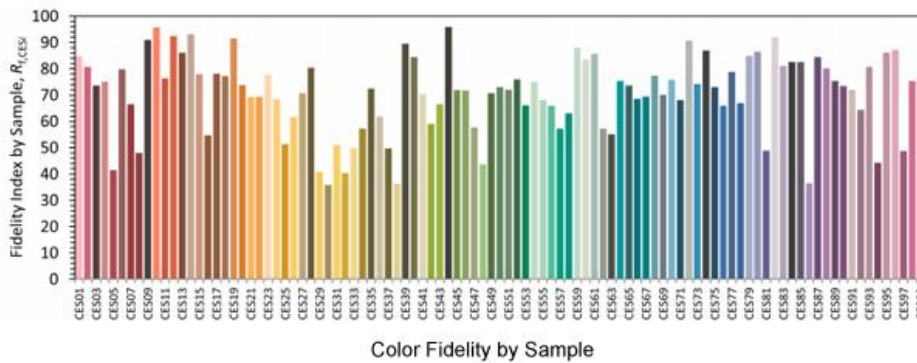


Figure 32 : résultat d'une mesure de Rf. 99 différences de couleur ont été calculées. La moyenne de ces différences donne le Rf.

4.9. Gamme de couleur

TM30 fournit une autre valeur de mesure : Rg qui indique l'influence de la source lumineuse sur la saturation des couleurs.

Pour un Rg de 100, la saturation des couleurs n'est, en moyenne, pas modifiée.

Si cette mesure est inférieure à 100, les couleurs apparaissent moins saturées et donc légèrement plus pastel. Un espace sera moins coloré et apparaîtra donc plus gris qu'il ne l'est en réalité. Le rendu de ce type de lumière n'est généralement pas considéré comme agréable.

Si Rg est supérieure à 100, les couleurs apparaissent plus saturées. Ainsi, les teintes roses virent au rouge, le vert pastel devient un vert franc, et ainsi de suite... Ce type de rendu nous paraît plutôt agréable.

Cependant, si Rg devient trop élevé (> 115), il est possible que nous ressentions la saturation des couleurs comme trop forte et cela peut nous incommoder après un certain temps. Dans les magasins, cependant, ce choix peut être intéressant car la marchandise sera plus attrayante.

Sur les photos ci-dessous, la même pièce est éclairée avec différentes sources lumineuses. Les différences sont remarquables. (Portez une attention particulière aux objets rouges et oranges)



Figure 33 : la saturation des couleurs est assez naturelle. ($R_f = 92 / R_g = 101$)



Figure 34 : les couleurs sont sur saturées. Ce type de lampe peut être intéressante pour l'éclairage des magasins. ($R_f = 64 / R_g = 120$)

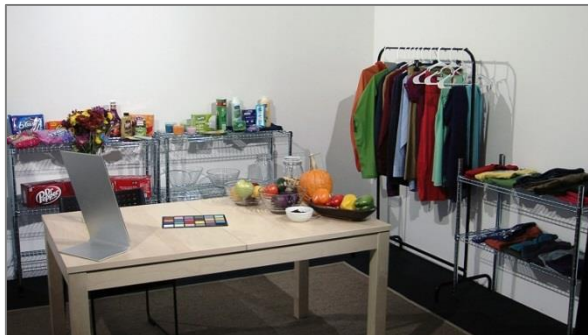


Figure 35 : les couleurs sont sous saturées. La pièce a l'air légèrement grise. ($R_f = 66 / R_g = 79$)

4.10. Les systèmes de mélange des couleurs

Il existe différentes lampes LED's sur le marché qui permettent de choisir librement la couleur de la lumière. Différentes techniques sont possibles, chacune avec leurs avantages et leurs inconvénients. Les plus courantes sont :

- **RVB (RGB)**

Le système le plus simple consiste à uniquement combiner une LED rouge, une verte et une bleue. Le choix de ces couleurs est inspiré par la façon dont nos yeux perçoivent la couleur. Cela nous permet de créer, avec seulement 3 couleurs de base, une très large gamme de couleurs, en ce compris des nuances de blanc.

Un inconvénient majeur du système RVB est qu'il existe de grands écarts entre les spectres des LED's rouges, vertes et bleues. Cela rend la qualité du rendu des couleurs extrêmement faible. Ces lampes ne sont donc pas adaptées à l'éclairage général. Elles peuvent par contre être utilement employées pour créer des effets de couleur ou pour accentuer certains éléments.

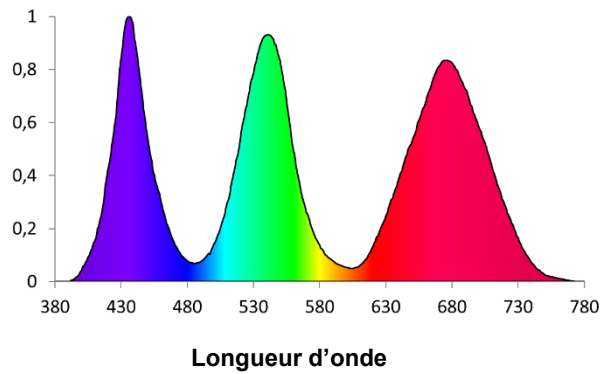


Figure 36 : le spectre d'une LED RGB qui génère de la lumière blanche. Notez qu'il y a un grand trou dans, par exemple, les teintes jaune et orange. Un bon rendu des couleurs avec cette lumière « blanche » n'est pas possible.

- **RVBW**

En ajoutant une LED blanche à un système de mélange RVB, une lumière blanche avec un rendu des couleurs acceptable peut être obtenue. Les lampes basées sur ce système peuvent être utilisées aussi bien pour l'éclairage général que pour accentuer et donner des effets de couleur.

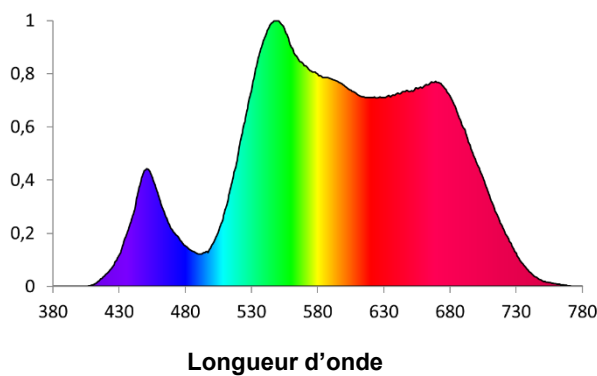


Figure 37 : combinaison de LED RVB avec une LED blanche (RVBW). Le rendu des couleurs est principalement déterminé par la qualité de la LED blanche. Les LED's RGB peuvent être utilisées pour ajuster la couleur.

- **Blanc froid/Blanc chaud**

Une LED blanche froide et une LED blanche chaude sont combinées dans un système de mélange. On ne peut alors créer que des nuances de blanc comprises entre ces deux nuances de base. Malgré cette limitation, la qualité du rendu des couleurs est plus élevée qu'avec les systèmes de mélange précédents et ce pour toutes les nuances.

4.11. « Blue Light Hazard » – Les dangers de la lumière bleue

Pour produire une LED blanche, vous démarrez à partir d'une puce LED bleue. En conséquence, les LED's sont régulièrement associées au « Blue Light Hazard », c'est-à-dire au risque qu'un excès de lumière bleue puisse endommager les yeux.

Cette crainte n'est cependant pas justifiée...

La proportion de bleu dans une LED de teinte blanc chaud est du même ordre de grandeur que celle dans une ampoule à incandescence. Lorsque la température de couleur augmente, la proportion de lumière bleue augmente également. Cependant, cette propriété ne s'applique pas seulement aux LED's, mais également à toutes les sources de lumière, y compris la lumière du soleil.

Lors de l'évaluation du risque de lésions oculaires, nous travaillons avec des groupes de risque : de RG0 (pas de risque) à RG3 (risque élevé).

Presque toutes les armatures LED's tombent dans le groupe où le risque est nul (RG0).

Les puces LED's et les modules LED's peuvent parfois être classés dans le groupe de risque RG1 (risque faible) voire dans le groupe RG2 (risque moyen). En pratique, cela signifie que regarder ces LED's en étant proche de la source et pendant une longue période peut provoquer des lésions oculaires.



Figure 38 : si un produit tombe dans le groupe de risque RG2 (risque moyen), ce marquage doit être appliqué.

En principe, nous détournons automatiquement le regard lorsque nous regardons une source lumineuse classée en RG2. Si nous réprimons ce réflexe, des dommages oculaires peuvent survenir. Cela peut se produire lors du montage d'un module LED.

Bien qu'il n'y ait aucun risque pour l'utilisateur final, il est sage, en tant qu'installateur, de prendre vos précautions et de porter des lunettes de protection lorsque vous travaillez sur ces modules.

5. LED

5.1. Le fonctionnement d'une LED

Comme toutes les diodes, une LED a un côté positif et un côté négatif. Le côté positif (anode) consiste en un réseau cristallin, dans lequel des électrons sont manquants et laissent des trous. Le réseau cristallin du côté négatif (cathode) a par contre trop d'électrons.

Lorsque nous laissons un courant électrique parcourir une diode dans le sens passant, les électrons se déplacent du côté négatif vers le côté positif. Dès qu'un électron libre tombe dans un trou du réseau du côté positif (on parle alors de recombinaison), il émet son énergie excédentaire sous la forme d'un photon (particule lumineuse).

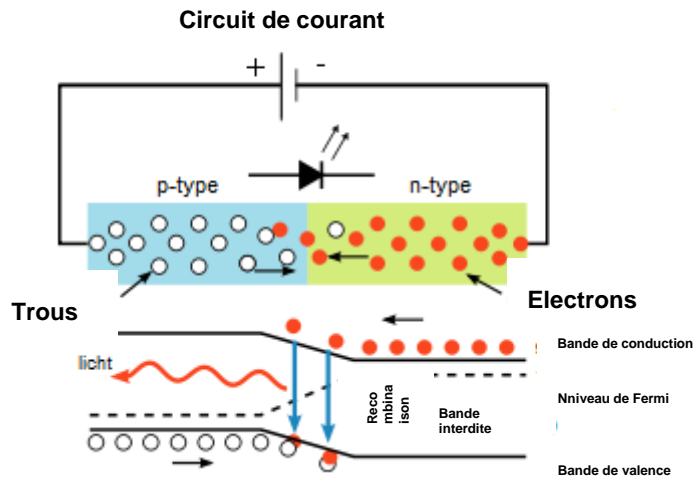


Figure 39 : représentation schématique du fonctionnement d'une LED.

La composition des réseaux cristallins détermine la longueur d'onde du photon émis et donc la couleur de la lumière que la LED va émettre.

La différence d'énergie de l'électron avant et après la recombinaison détermine quelle longueur d'onde est émise. Comme les différentes recombinaisons possibles dans une même diode présentent seulement une petite variation dans la différence d'énergie, la longueur d'onde émise sera approximativement la même. Le spectre d'une LED sera donc toujours constitué d'une distribution de Gauss à bande étroite (voir la figure 40).

Les LED's ne peuvent donc générer que des couleurs saturées (les couleurs de l'arc-en-ciel). Pour les nuances désaturées (comme le blanc, le rose, ...), un spectre beaucoup plus large est nécessaire. C'est donc impossible à réaliser directement avec une seule LED.

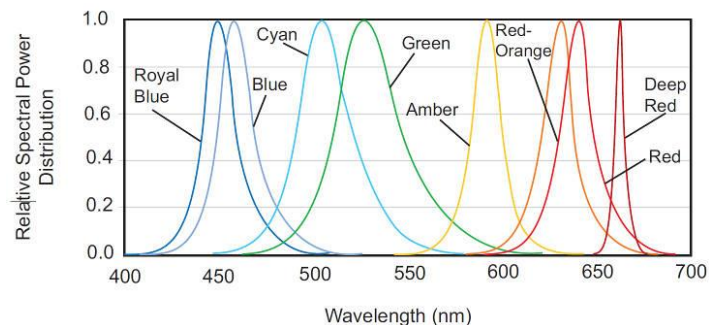
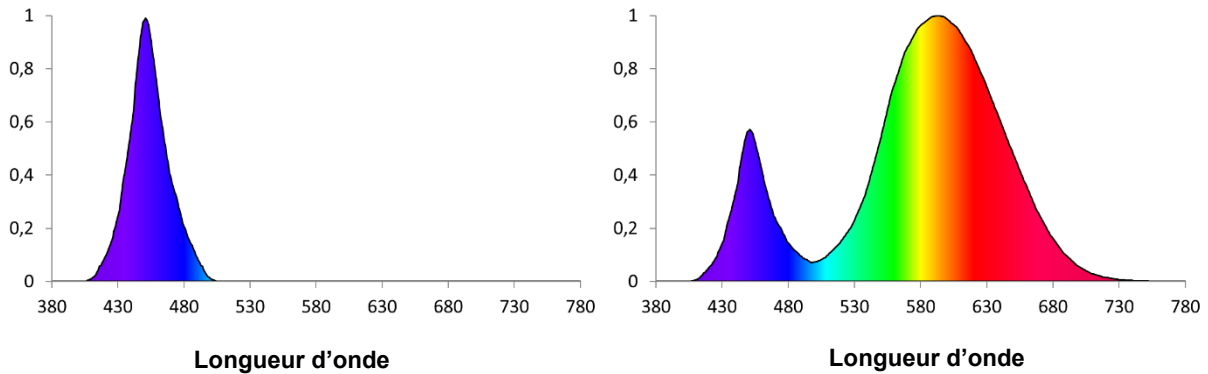


Figure 40 : les spectres de différentes LED's (source : Philips Lumiled).

5.2. Les phosphores

Pour la production de LED's blanches, les LED's bleues sont utilisées en combinaison avec des matériaux ayant des propriétés fluorescentes.

Ces matériaux, appelés phosphores, absorbent une partie de la lumière bleue et la convertissent en d'autres longueurs d'onde (vert, jaune, rouge, ...). La combinaison finale de ces longueurs d'onde donne une lumière blanche.



**Figure 41 : à gauche : le spectre d'une LED bleue.
A droite : la même LED bleue avec du phosphore. Une partie de la lumière bleue a été convertie en d'autres couleurs par le phosphore. La combinaison des différentes longueurs d'onde donne une lumière blanche.**

Habituellement, la couche de phosphore est placée directement sur la puce LED. Cette géométrie présente un inconvénient majeur : la puce LED réchauffe fortement le phosphore, ce qui a une influence négative importante sur les performances de la LED.



Figure 42 : la façon traditionnelle d'appliquer du phosphore directement sur la puce LED. Cela conduit à la couleur jaune typique lorsque la puce LED est éteinte.

Une alternative intéressante est de séparer la LED et le phosphore en appliquant, par exemple, le phosphore sur un support placé à une certaine distance de la LED.

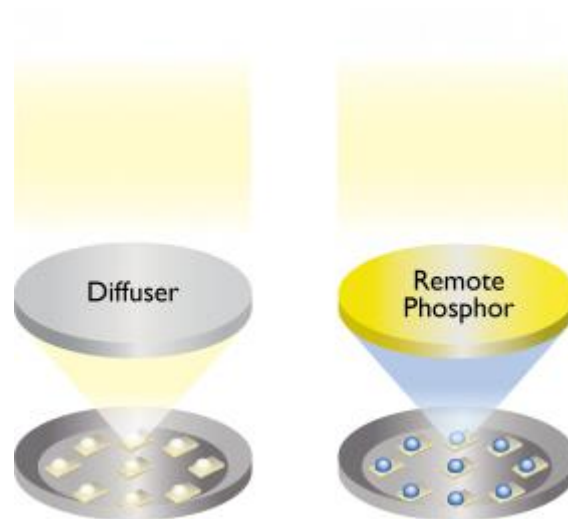


Figure 43 : à gauche : Conception traditionnelle d'une LED blanche, le phosphore est directement déposé sur la LED. A droite: conception avec Remote Phosphor (phosphore déporté), en utilisant des LED's bleues. Une couche de phosphore est appliquée ici sur le diffuseur.

Comme le phosphore chauffe moins, nous obtenons des lampes LED's qui durent plus longtemps, sont plus efficaces et auront un changement de couleur moindre pendant leur durée de vie.

5.3. Le niveau d'intégration

Quand nous parlons de « LED », nous remarquons que les gens donnent des significations différentes à ce mot. Les produits LED's peuvent être caractérisés par leurs différents niveaux d'intégration, même si tous ces niveaux sont communément et erronément appelés « LED ».

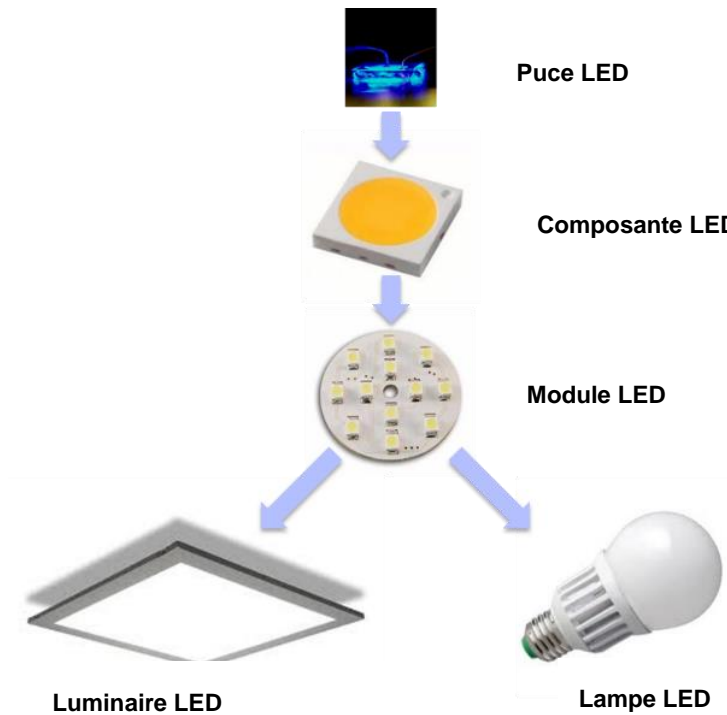


Figure 44 : les différents niveaux d'intégration des produits « LED's ».

En principe, un installateur n'utilise que des produits LED's finis (luminaires et lampes LED's). Dans certains cas, des modules LED's sont également utilisés (par exemple des rubans LED's). Les modules LED's ne sont pas des produits finis, et les aspects mécaniques, optiques et thermiques doivent encore être pris en compte lors de l'installation. Les modules LED's sont généralement accompagnés de directives d'installation, souvent négligées. Cela peut pourtant avoir une influence significative sur les performances, et surtout sur la durée de vie du module LED.

6. Les drivers LED's

6.1. Introduction

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, les LED's doivent être contrôlées avec un courant continu constant, nécessitant une tension relativement faible. Les drivers LED's sont destinés à faire fonctionner les LED's dans ces conditions optimales. En outre, les drivers LED's peuvent également être utilisés pour dimmer les LED's.

Dans ce chapitre, nous allons passer en revue les différents types de drivers LED's et leurs caractéristiques techniques les plus importantes.

Selon le type de module LED, il est conseillé de choisir entre une alimentation LED à tension ontrôlée ou à courant contrôlé.

6.2. Driver LED pour pilotage en tension

Un driver pour un pilotage en tension veillera à ce qu'il y ait une tension constante à la sortie. Le courant s'adapte alors en fonction de la charge. Si la charge devient trop importante, un certain seuil de courant sera dépassé et le système se mettra en sécurité.



Figure 45 : une partie du marquage d'un driver LED pour pilotage en tension. Clairement reconnaissable à l'indication de tension et de puissance.

Comme les LED's fonctionnent toujours avec un courant constant, la conversion de cette tension constante en un courant constant devra être effectuée sur le module LED en lui-même. Cela peut être réalisé par une simple résistance, mais il arrive que des circuits électroniques relativement complexes soient également utilisés afin de limiter les pertes qui surviennent lors de cette conversion.



Figure 46 : module LED avec résistance afin de limiter le courant.



Figure 47 : module LED avec un circuit plus complexe pour convertir une tension en un courant constant.

6.3. Driver LED pour pilotage en courant

Un driver pour pilotage en courant fonctionne de manière inverse... Le driver essaie de maintenir le courant constant en ajustant la tension en fonction de la charge. Si la tension devient trop élevée, le système se mettra en sécurité.

Ce type d'alimentation est un concept totalement neuf dans le monde de l'électricité et provoque encore beaucoup de confusion: toutes les LED's doivent en effet être connectées en série, ce qui n'est pas intuitif pour l'installateur.

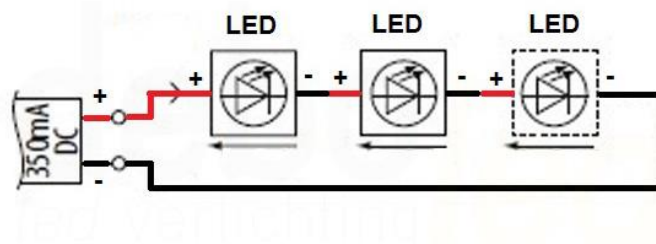


Figure 48 : lampes LED's en série.

De plus, une connexion en série signifie que la tension totale devient élevée lorsque de nombreuses LED's sont connectées en série. Cela peut entraîner un risque d'électrocution. En raison de ce risque, le nombre de modules qui peuvent être connectés à une même alimentation est en fait limité.



Figure 49 : alimentation constante : fournit 900 mA. La somme des tensions directes des LED's (connectées en série) doit être comprise entre 27 et 42V. L'alimentation ne fonctionnera pas correctement si trop peu de LED sont connectées !

Souvent, pour les pilotages en courant, les alimentations électriques ont non seulement une tension maximum mais aussi une tension minimale. Dans notre exemple (figure 49), elle est de 27V. Si nous connectons trop peu de LED's à notre alimentation et que la tension minimale n'est pas atteinte, le courant peut aller bien au-delà de ses spécifications. Dans certains cas, il peut arriver que le courant soit trop élevé et que les modules LED's connectés soient endommagés.

6.4. Driver LED universel

Il existe également des drivers LED qui peuvent fournir soit une tension constante soit un courant constant. Ce principe a surtout de grands avantages en matière de logistique. Certains appareils ont des commutateurs DIP qui permettent d'effectuer le choix manuellement. D'autres appareils détectent eux-mêmes le type de charge et peuvent travailler dans 2 zones : tension constante ou courant constant.

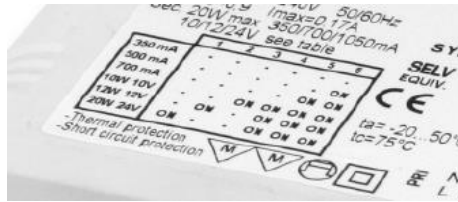


Figure 50 : driver LED universel : peut être réglé comme source de tension ou de courant : 350mA, 500mA, 10V, 12V ou 24V.



Figure 51 : driver LED universel : détermine automatiquement si une tension constante (12V) ou un courant constant (350mA) est requis pour les LED's connectées.

6.5. Le facteur de puissance

Idéalement (une ampoule à incandescence en est un bon exemple), le courant d'alimentation d'un dispositif prend la forme d'une parfaite sinusoïde. Pour de nombreux équipements ce n'est pas le cas... En électricité, nous disposons de deux quantités pour exprimer cette situation : le facteur de puissance et le cos phi. Bien qu'ils aient de nombreux éléments communs, ce sont deux phénomènes totalement différents. Le facteur de puissance indique à quel point le courant dévie du sinus idéal. Le cos phi indique le déphasage entre la tension et le courant, déphasage résultant d'une charge inductive ou capacitive.

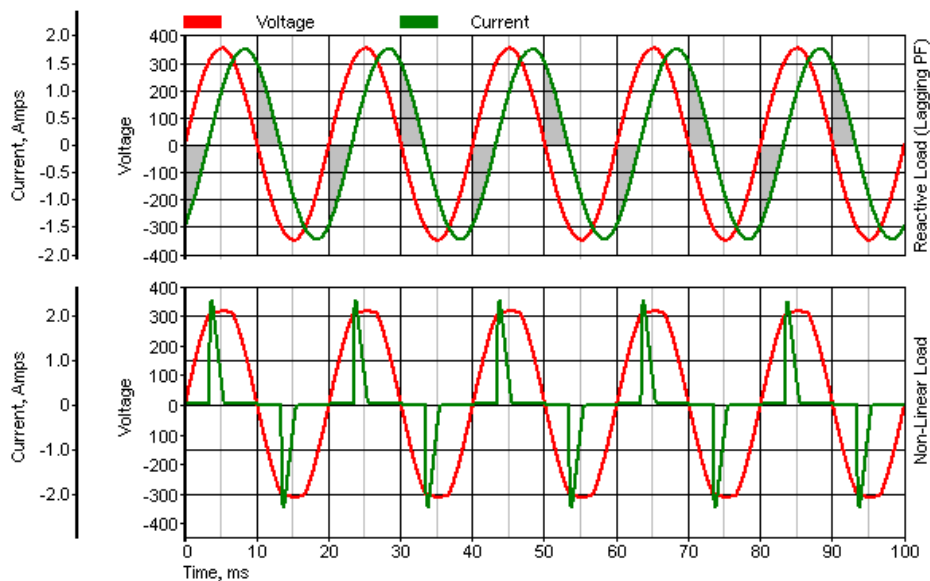


Figure 52 : cos phi (partie supérieure) vs facteur de puissance (partie inférieure).

Un faible facteur de puissance et un faible $\cos \phi$ conduisent à un appareil nécessitant des courants plus élevés du réseau électrique en comparaison avec un appareil de même puissance et de meilleure qualité. Cela entraîne des pertes de câble plus élevées et donc un plus grand échauffement. Bien sûr, les fusibles réagiront également aux courants plus élevés. Ceci signifie que, pour un même courant, moins de puissance peut être retirée du système.

Pour les circuits électroniques tels que les drivers LED's, c'est le facteur de puissance qui pose un problème. L'électronique contenue dans le driver peut générer un courant dont la forme diffère grandement d'un sinus. Dans les cas extrêmes, le courant est presque en forme d'aiguille.

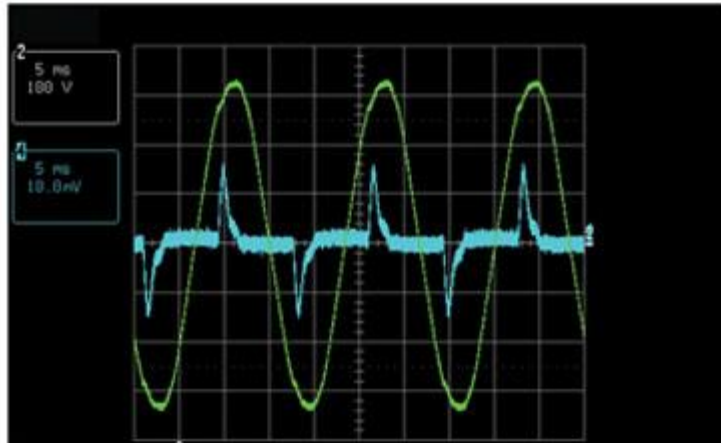


Figure 53 : en bleu la forme du courant pour un tube LED de qualité inférieure, en vert la tension.

Dans l'exemple de la figure 53, nous avons remplacé une lampe fluorescente par un tube LED. La lampe fluorescente originale consomme, ballast inclus, 40W et a un $\cos \phi$ de 0,86. Le tube LED consomme seulement 18W et a un facteur de puissance de 0.3. Si nous calculons les courants à partir de ces données, nous avons un courant de 0,20 A pour la lampe d'origine et de 0,26 A pour la lampe LED de remplacement.

La lampe LED de remplacement aura donc un courant beaucoup plus élevé que la lampe d'origine, malgré sa plus faible puissance !

6.6. Le courant d'appel ou courant d'enclenchement

Le courant d'appel dans l'éclairage LED est un problème très souvent sous-estimé. Comme tous les appareils électroniques, les alimentations LED's occasionnent un certain courant d'appel.

Un courant d'appel (ou courant d'enclenchement) est un phénomène à court terme qui survient immédiatement après la mise sous tension de l'appareil.

Les condensateurs à l'intérieur de l'appareil veulent se recharger le plus rapidement possible et tirent donc une grande quantité d'électricité du réseau électrique.

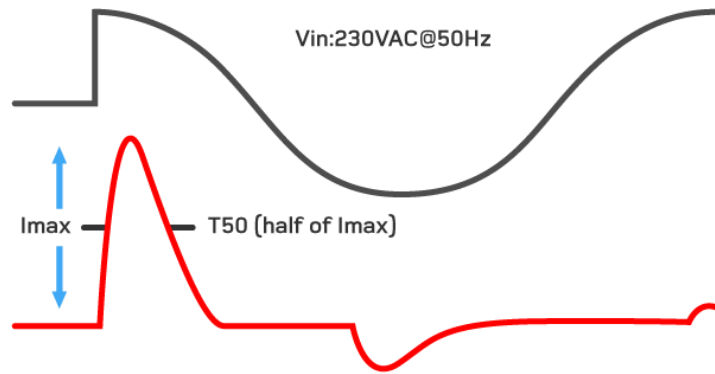


Figure 54 : en haut : la tension du réseau, qui est brusquement activée. En bas : la forme du courant du driver LED.

Un pic d'activation est visible sur la figure ci-dessus. En haut, vous pouvez voir comment la tension secteur est soudainement activée et puis continue comme un sinus.

En bas, vous voyez le résultat dans la forme du courant. Immédiatement après la mise sous tension, il se produit un courant d'appel beaucoup plus élevé que le courant normal de l'appareil. Ce courant d'appel est décrit d'une part par son intensité et d'autre part par la durée du phénomène.

Une installation électrique est prévue pour pouvoir absorber ces courants d'appel. Selon leur type de courbe (B, C, D), les fusibles automatiques peuvent tolérer un courant d'appel dont l'intensité est égale à plusieurs fois celle de leur courant nominal. Habituellement, cela suffit, mais avec l'éclairage LED, il arrive souvent qu'un nombre relativement élevé de luminaires soient allumés exactement au même moment, de sorte que les courants d'appel de chacun de leurs drivers génèrent, ensemble, au niveau du réseau, un courant d'appel très important.

L'intensité et la durée de ce phénomène d'enclenchement dépendent de la conception interne du driver, de l'impédance du réseau électrique (distance au transformateur, diamètre des câbles, ...) et enfin du moment de la mise en tension. Il va de soi que si la mise en tension a lieu au moment où la sinusoïde est proche de son point nul, le courant d'appel sera minime. Plus on se rapproche du sommet du sinus, plus le risque de faire sauter le disjoncteur est grand. Cela explique pourquoi les problèmes liés aux courants d'enclenchement ne se produisent pas toujours et ne sont souvent mis en évidence que plus tard.

Les courants d'enclenchement peuvent causer d'autres problèmes... Ils peuvent également endommager tous les types de contacts comme, par exemple, un interrupteur pour l'éclairage ou un relais dans un détecteur ou dans un module relais.

Les informations sur les courants d'enclenchement ne sont pas fournies par tous les fabricants. Ceux qui le font correctement fournissent habituellement l'intensité et la durée du courant d'appel. Certains fabricants indiquent en outre combien de leurs appareils peuvent être connectés à un certain type de disjoncteur.

7. L'effet stroboscopique

Nous parlons d'effet stroboscopique lorsque la quantité de lumière émise par une source lumineuse change périodiquement.

Si ces variations ont une fréquence inférieure à 80Hz (cycle de marche et d'arrêt : 80 fois par seconde), on parle de « scintillement » de la source lumineuse. Une personne « normale » peut voir ce scintillement à l'œil nu.

Au dessus de 80Hz, on parle d'effet stroboscopique. La variation de la lumière n'est plus directement visible, mais les mouvements peuvent être perçus de manière saccadée.

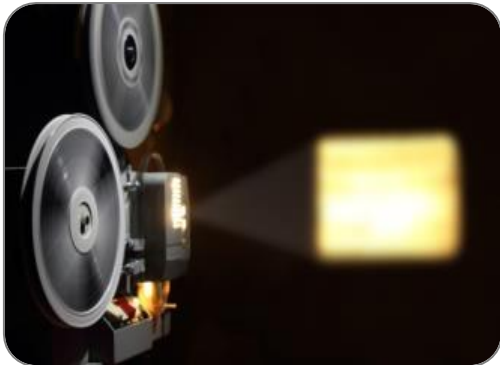


Figure 55 : scintillement de la source lumineuse.

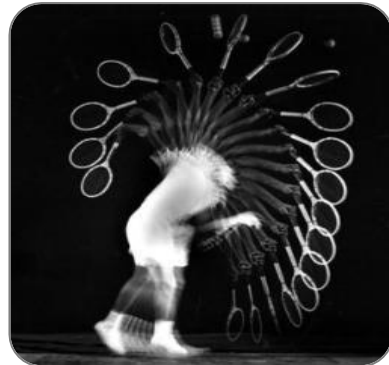


Figure 56 : effet stroboscopique.

Bien que, la plupart du temps, nous ne puissions pas réellement voir l'effet stroboscopique, il génère une surcharge pour les parties de notre cerveau qui sont responsables du traitement de la vision. Cela peut causer des **maux de tête** et de la **fatigue**. Les **problèmes de concentration** sont souvent aussi liés à cet effet stroboscopique.

Comme les LED réagissent beaucoup plus rapidement que les autres sources lumineuses aux variations du courant électrique, elles sont beaucoup plus sensibles aux effets stroboscopiques.

La présence ou l'absence d'effet stroboscopique n'est pas déterminée par la LED elle-même, mais par la qualité de son driver. Celui-ci peut être externe ou interne, comme par exemple, dans une lampe LED de substitution.

7.1. Les causes de l'effet stroboscopique

Au niveau des luminaires, il existe 2 causes possibles à cet effet stroboscopique :

- **Le réseau électrique**

Un effet stroboscopique peut se produire si l'alimentation électrique du luminaire ne lisse pas suffisamment la sinusoïde de la tension du réseau.

Comme une LED émet de la lumière aussi bien dans la partie positive que dans la partie négative du sinus, elle ne scintille pas à 50Hz, mais bien à 100Hz.

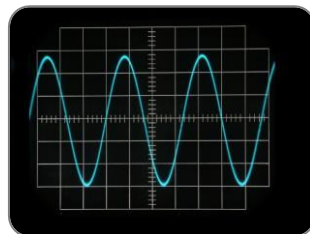


Figure 57 : La sinusoïde de la tension du réseau.

Une des causes majeures de l'effet stroboscopique est un manque physique de place au niveau du driver qui empêche l'installation des éléments nécessaires au lissage. Bien que cela puisse se produire dans tous les types de drivers, nous constatons que les lampes LED's de substitution et les lampes LED's sans driver présentent le plus fréquemment cet effet stroboscopique.

- **Gradation PWM (LMI)**

En fonction de la fréquence choisie pour la gradation PWM, un effet stroboscopique peut apparaître. Certains variateurs LED's fonctionnent avec des fréquences de l'ordre de 200 Hz. C'est nettement trop bas et cela peut causer des perturbations.

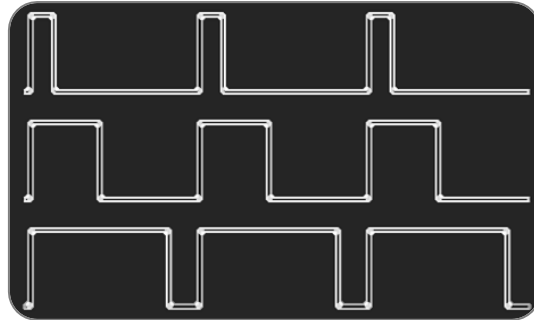


Figure 58 : formes d'ondes PWM. Des impulsions plus larges (en bas) conduisent à ce que la LED émette plus de lumière.

Au-dessus de 1 kHz, la lumière est généralement considérée comme stable. Les appareils de qualité supérieure fonctionneront donc, au minimum, avec cette fréquence. Malheureusement, la plupart des fabricants de produits LED avec gradation PWM n'indiquent pas la fréquence PWM utilisée.

7.2. Déterminer l'effet stroboscopique

Jusqu'à présent, mesurer l'effet stroboscopique n'était pas facile. Il existait diverses méthodes, mais elles n'étaient pas toujours précises et elles se contredisaient dans certains cas.

Des recherches récentes ont abouti à une toute nouvelle méthode permettant d'exprimer par un seul nombre l'impact de l'effet stroboscopique d'une source lumineuse : il s'agit du **SVM ou Stroboscopic Visibility Measure**. Cette méthode n'est pas encore souvent utilisée actuellement, mais cela va changer dans les années à venir.

Il existe cependant quelques moyens simples pour déterminer l'existence ou non d'un effet stroboscopique. On peut ainsi détecter un effet stroboscopique en agitant simplement un crayon. Si le crayon bouge de manière fluide, on peut conclure avec certitude que la lumière est stable. Dès qu'on a l'impression qu'il y a plusieurs crayons (comme le montre l'image ci-dessous), il y a un effet stroboscopique.

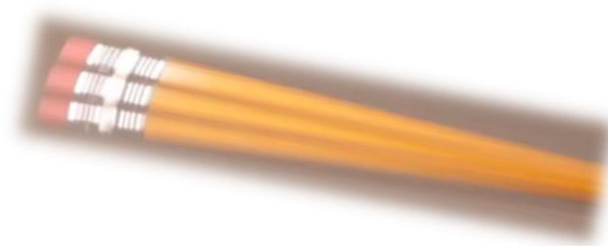


Figure 59 : impact de l'effet stroboscopique de la lumière sur la manière de voir un crayon en mouvement.

8. La gradation des LED's

8.1. Introduction

La quantité de lumière fournie par une LED est presque parfaitement proportionnelle au courant qui la traverse. Et si ce courant change brusquement, la quantité de lumière émise change de la même manière en une fraction de seconde.

Cela fait des LED's les sources lumineuses dont l'intensité est la plus facile à moduler... Et pourtant, cela se passe souvent mal !

Dans ce chapitre, nous approfondirons les problèmes rencontrés.

8.2. La gradation directe

Idéalement, nous pourrions moduler l'intensité lumineuse d'une LED en ajustant directement les paramètres électriques de la LED elle-même. Cela fournit, si correctement mis en œuvre, une gradation très précise. Nous pouvons dimmer les LED's en ajustant le courant. En général, il y a 2 façons d'y parvenir :

- **Modification de l'intensité du courant – Modulation d'amplitude**

La manière la plus élémentaire de dimmer une LED est simplement d'ajuster la quantité de courant qui l'alimente.

La quantité de lumière fournie par une LED est en effet presque parfaitement proportionnelle au courant circulant dans la LED.

- **Modulation de largeur d'impulsion (PWM)**

Une autre méthode de gradation d'une LED est de l'allumer et de l'éteindre à grande vitesse. Si le cycle est assez rapide, nous percevons cela comme une gradation de la LED.

Les deux méthodes ont leurs avantages et leurs inconvénients...

En pratique, le PWM est le plus populaire, car il est très facile à réaliser dans un environnement numérique. La gradation par modulation d'amplitude nécessite un peu plus de matériel et est donc plus coûteuse.

Comme son nom l'indique, la gradation par modulation d'amplitude ne fonctionne qu'avec des modules LED's à contrôle en courant. Cependant, de nombreux produits LED's sont contrôlés en tension et connectés en parallèle, ils ne peuvent donc être modulés qu'avec le PWM.

Un inconvénient majeur du PWM est que le courant et l'émission de lumière suivent une onde carrée. Le fabricant du variateur doit sélectionner une fréquence pour le PWM pendant la conception. Plus cette fréquence est élevée, plus le PWM causera d'interférences et plus il sera difficile pour le fabricant de respecter les normes. A l'opposé, une fréquence trop basse peut rendre le PWM visible.

8.3. Problèmes avec la gradation directe

Si elle est correctement mise en place, la gradation directe est la garantie d'une utilisation sans faille.

8.4. Gradation par découpage de phase

Les lampes de substitution sont généralement alimentées en 230V et l'électronique entre la LED et la tension du réseau empêche l'émission lumineuse de la LED d'être directement modulée. Nous appliquons alors un dimming par découpage de phase. Une partie du sinus de la tension de secteur est en fait supprimée. Comme moins d'énergie est envoyée à la source lumineuse, celle-ci émet moins de lumière.

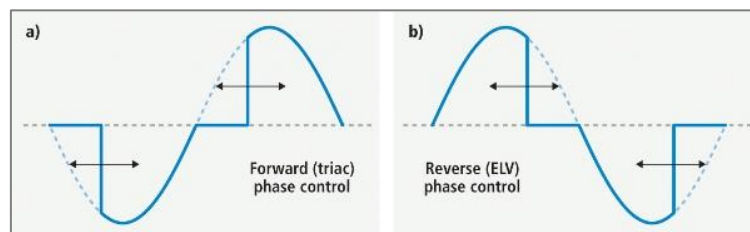


Figure 60 : deux manières d'effectuer un dimming par découpage de phase. A gauche : coupure de début de phase (ou de phase ascendante). A droite : coupure de fin de phase (ou de phase descendante).

Ce principe fonctionne parfaitement avec les ampoules à incandescence, mais avec les lampes LED's, cela n'est pas garanti...

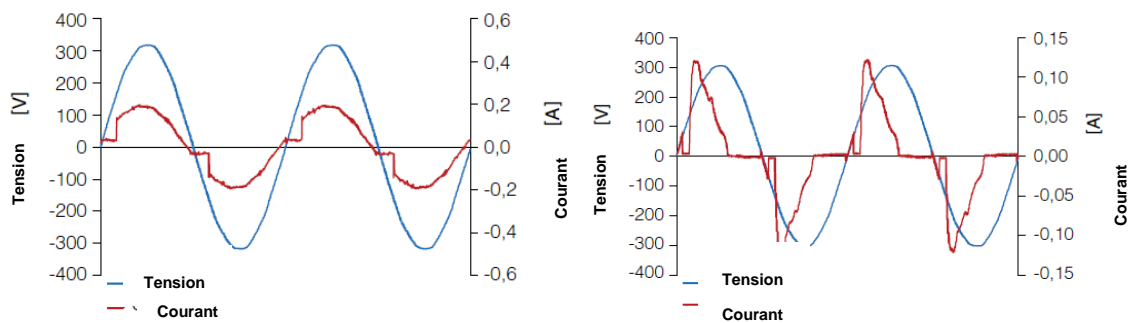


Figure 61 : forme du courant avec deux lampes non dimmées. A gauche : lampe à incandescence. A droite : lampe LED.

La figure ci-dessus montre la forme réelle du courant pour une ampoule à incandescence (à gauche) et pour une source LED (à droite). Alors que le courant au travers de l'ampoule à incandescence montre un sinus presque parfait, celui de la lampe LED a une forme très erratique. On peut clairement voir que les lampes LED's se comportent complètement différemment des lampes à incandescence.

Un driver standard pour lampe LED n'est pas dimmable par découpage de phase. En effet, l'une des tâches d'un driver pour LED est de maintenir un courant constant à travers la LED, et ce, même si la tension du réseau change. Selon ce principe, le driver de la LED essaiera de contrecarrer l'influence de la gradation et tirera plus de puissance du réseau pour compenser la gradation.

Avec des circuits électroniques spécialement développés, il est possible de s'assurer qu'une lampe LED est modulée par découpage de phase. Le type de gradateur utilisé, ses réglages, le nombre de lampes dans le circuit, le câblage, le réseau électrique, ... sont autant de facteurs que le concepteur de l'électronique ne contrôle pas, mais qui participent au bon fonctionnement du système. Il est donc évident que concevoir une lampe LED qui réagit de manière correcte dans toutes les circonstances est très difficile.



Figure 62 : lampe LED ouverte. Le driver LED dimmable est situé dans le culot de la lampe.

8.4.1. Problèmes avec le découpage de phase

Les fabricants de gradateurs et de lampes publient des tableaux qui indiquent quelles combinaisons lampe / gradateur fonctionnent bien. Ces tableaux sont une bonne indication, mais dans la pratique, ils ne garantissent pas toujours une parfaite compatibilité. Tester vous-même la configuration est fortement recommandé. Mais à quoi devez-vous faire attention ?

La plupart des défauts de compatibilité sont faciles à détecter, nous n'avons pas grand chose à dire à ce sujet. Il va sans dire que les LED's doivent facilement émettre moins de lumière, ne doivent pas clignoter ou bourdonner.

D'autres problèmes possibles n'apparaissent souvent pas immédiatement mais seulement plus tard. Il s'agit souvent de défauts, apparemment mineurs, que l'utilisateur, au bout d'un moment, considèrera comme de plus en plus dérangeants.

Avec certaines combinaisons lampe/variateur, il est possible, lorsque la lampe est allumée dans la position de gradation la plus basse, que la source LED n'émette pas de lumière et qu'elle ne réagisse que lorsque le niveau de gradation est relevé. En conséquence, l'utilisateur peut conclure, à tort, qu'il y a un défaut.

Assurez-vous également que toutes les sources soient modulées de manière synchronisée. Il est possible, surtout lors de leur mise sous tension, que les différentes lampes réagissent avec une fraction de seconde de différence, ce qui peut être gênant.

Vous devez également tenir compte du fait que les circonstances générales au moment de l'installation sont souvent différentes de celles lors de l'utilisation. Des bruits sur le chantier peuvent vous empêcher d'entendre les bourdonnements. La lumière du jour qui entre dans la pièce peut également masquer le scintillement des LED's pour des faibles niveaux de luminosité.

8.5. Gradateurs de phase universels

La plupart des fabricants de gradateurs ont des gradateurs de phase universels pour les LED's de leur gamme. Le principe de fonctionnement est toujours basé sur le principe du découpage de phase, mais grâce à une charge minimale plus faible et à des algorithmes de gradation adaptés, ces gradateurs sont compatibles avec une plus large gamme de lampes LED's. Certains de ces gradateurs permettent à l'installateur de choisir lui-même l'optimum parmi les différents algorithmes. La majorité de ces gradateurs n'est disponible que dans une version à 3 fils (c'est-à-dire avec connexion du conducteur neutre). Il existe actuellement également des solutions à 2 fils, spécialement conçues pour les rénovations où il n'y a pas de conducteur neutre au point de commutation.

Conseils :

- Vérifiez si la lampe est bien un modèle dimmable.
- Achetez des lampes (et des gradateurs) de marques connues. Il est plus probable que leur compatibilité ait été testée.
- Sélectionnez des gradateurs avec coupure de fin de phase (ou de phase descendante). Les installations existantes contiennent souvent des gradateurs avec coupure de début de phase (ou de phase ascendante) qui sont insuffisamment compatibles avec les LED's dimmables.
- Ne mélangez pas différents types de lampes sur un même gradateur.
- Respectez la charge minimale du gradateur, en particulier avec les modèles les plus anciens.

8.6. Les signaux de fréquence tonales

Une plainte qui revient souvent est que les lampes LED's clignotent pendant un certain temps mais à certains moments seulement. Cela se passe parfois très discrètement et ce n'est presque pas remarqué, mais dans certains cas, cela peut prendre des proportions très inquiétantes.

La raison en est généralement trouvée avec les signaux de fréquence tonales, également appelés signaux CAB (signaux de commande centrale à distance). Ce sont des signaux que les opérateurs du réseau superposent aux 50 Hz de la tension du réseau pour commuter à distance les composants de leur réseau, par exemple les compteurs jour / nuit ou l'éclairage public.

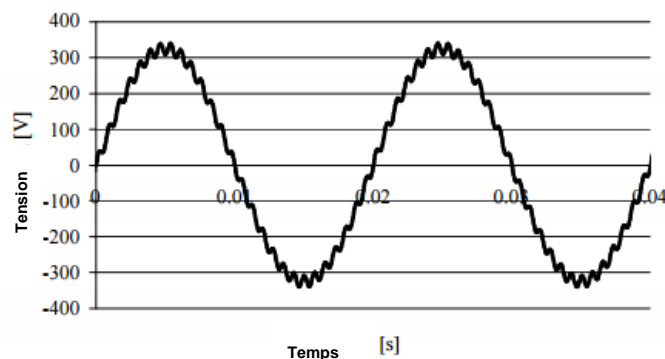


Figure 63 : signal CAB de 1350Hz superposé à la tension de réseau de 50Hz.

Les signaux CAB ne circulent sur le réseau que quelques fois par jour pendant environ 10 secondes à chaque fois. À ces moments, nous entendons un bourdonnement provenant des boîtes à fusibles, des transformateurs, ... Mais les drivers LED's peuvent également rencontrer des problèmes avec ces signaux. C'est principalement lorsque le driver est utilisé en combinaison avec des gradateurs de phase que les LED's peuvent se mettre à scintiller.

Le niveau de problème généré par ces signaux CAB est très spécifique à la région dans laquelle on se trouve. Ce sont la fréquence du signal en combinaison avec sa puissance qui sont déterminantes.

Il y a sur le marché, depuis de nombreuses années déjà, des gradateurs qui sont équipés de filtres CAB, mais ils ne fonctionnent généralement pas correctement avec les LED's. Certains modèles plus récents ont de nouveaux algorithmes embarqués qui, dans de nombreux cas, peuvent filtrer correctement les perturbations causées par les signaux CAB.

Une autre option consiste à utiliser des filtres de blocage de la fréquence tonale TF. Ceux-ci garantissent que les signaux TF n'atteignent pas l'installation d'éclairage. Ces appareils offrent une bonne solution, mais sont relativement coûteux pour les applications résidentielles où des gradateurs de phase sont majoritairement utilisés.

8.7. Les protocoles de gradation (de dimming)

La gradation par coupure de phase est rarement utilisée dans l'éclairage professionnel. Au lieu de cela, les informations de gradation sont délivrées au luminaire via un bus de données séparé. Par conséquent, les LED sont non seulement modulées avec une plus grande précision, mais de nombreuses options supplémentaires sont également offertes.

Il existe différents systèmes sur le marché pour moduler les LED's. Ci-dessous, nous en donnons un bref aperçu :

1-10V

C'est le bus le plus simple pour connecter un ou plusieurs luminaires à un contrôle. Tous les luminaires dans un même groupe de connexion vont réagir de manière synchrone. Il est nécessaire d'utiliser différents bus 1-10V pour contrôler l'éclairage dans différentes zones.

En principe, le bus 1-10V ne peut pas éteindre complètement la lampe. Pour une extinction totale, un relais commandé séparément est utilisé. Il interrompt la tension d'alimentation du luminaire. La principale raison de cette manière de procéder était la consommation de veille élevée pour les ballasts TL il y a 20 ans. Cependant, ce problème a été résolu avec les alimentations LED's modernes. Les fabricants choisissent d'éteindre les LED's lorsque la tension sur le bus 1-10V tombe en dessous de 1V.

DALI (Digital Addressable Lighting Interface)

Ce bus numérique peut commander, individuellement ou en groupe, jusqu'à 64 luminaires. DALI peut être appliqué à différentes échelles. Il peut être utilisé dans de très petits systèmes où un capteur communique avec un ballast, mais également dans de grandes installations où un ou plusieurs systèmes DALI sont intégrés dans un système de gestion de bâtiment.

DALI a très peu d'exigences techniques au niveau du câblage : l'ordre des différents composants et la topologie ne jouent en effet aucun rôle. Seule la longueur du câblage dépend de la section du câble utilisée (par exemple 300m par 1,5mm²).

Chaque luminaire situé sur le bus DALI reçoit une adresse propre et peut être intégré à différents groupes. Cet adressage intervient lors de la mise en service et doit être partiellement répété en cas de remplacement d'un composant défectueux dans le système.

DALI permet également de travailler avec transmission des données. Aucun adressage n'est fait et tous les ballasts écoutent toutes les commandes qu'ils reçoivent. Un grand nombre des possibilités offertes par DALI ne sont alors plus d'application, mais la mise en service est par contre plus simple.

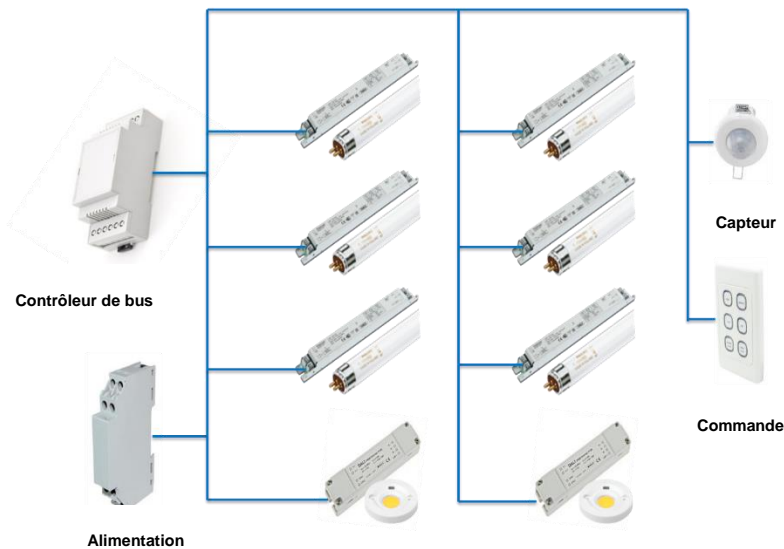


Figure 64 : installation DALI typique avec différentes commandes et ballasts.

DMX

... est un protocole qui vient du secteur du divertissement et n'a donc pas du tout été développé avec l'idée d'un éclairage général en tête.

Les fonctionnements de DALI et de DMX sont complètement différents. Chez DMX, toute l'intelligence du système est centralisée, ce qui permet de gérer le niveau d'éclairage de chaque lampe plusieurs dizaines de fois par seconde à travers le bus. Cette façon de travailler garantit la synchronicité de toutes les lampes et la non perception des erreurs éventuelles de communication. Un inconvénient de cette approche centralisée est qu'il ne peut y avoir qu'une seule opération à la fois dans un système DMX.

DMX est donc plus particulièrement utilisé dans les applications d'éclairage général où des effets très rapides de lumière et de couleur sont nécessaires et où les différentes lampes doivent fonctionner de façon absolument synchrone. Pour la plupart des autres applications en éclairage général, on choisira plutôt DALI.

Le câblage DMX est plus critique que celui pour un système DALI. Dans le cas de DMX, un système doit être câblé en ligne droite d'un périphérique à l'autre, et les fractionnements ne sont pas permis. 32 appareils sont autorisés par circuit. Si plus de 32 appareils sont nécessaires, il est possible d'utiliser des splitters ou des répéteurs DMX.

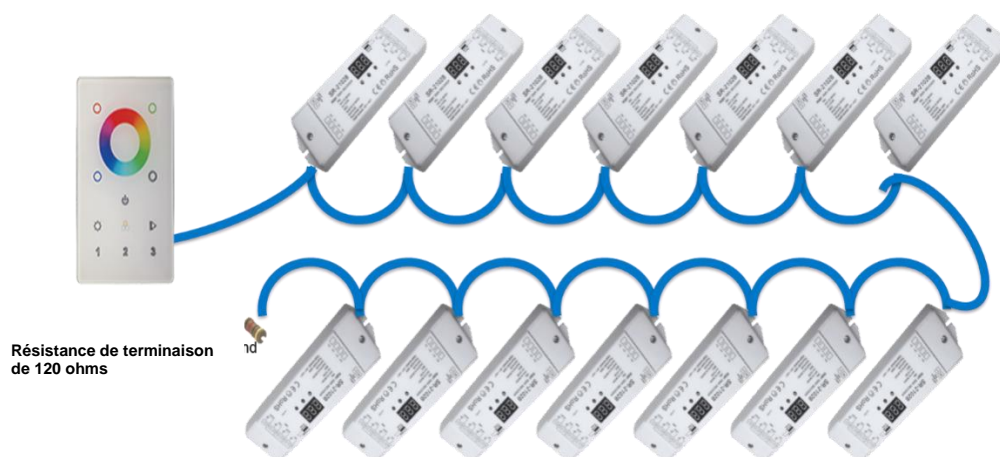


Figure 65 : installation DMX. Un contrôle, plusieurs ballasts connectés en ligne et une résistance de terminaison de 120 ohms.

8.8. Les protocoles de gradation sans fil

Les protocoles sans fil ont de nombreux avantages... Ils offrent tout particulièrement une bonne alternative à la gradation par découpage de phase lors de rénovations où il n'y a pas (assez) de câbles bus pour utiliser des protocoles câblés.

Un inconvénient est la prolifération de normes différentes. Chaque fabricant utilise son système propre. Certains fabricants ont des systèmes basés sur un système standardisé tel que Zigbee ou Bluetooth 4.0. Ce choix garantit que des produits de différentes marques peuvent parfois être compatibles. Plus de transparence est cependant requise dans ce domaine.

La plupart des protocoles sans fil utilisent un réseau Mesh. Cela signifie que tous les composants du réseau (lampes, interrupteurs, ...) transmettent les signaux. Le réseau s'organise de manière à ce que les signaux arrivent en chacun de ses points de manière aussi fiable que possible. S'il y a, par exemple, une source d'interférence sur le trajet entre deux lampes, le réseau se réorganisera pour que le signal arrive par un chemin différent.

9. La planification de l'éclairage

L'apparition de l'éclairage LED a eu un impact majeur sur la conception de l'éclairage. En comparaison avec les sources lumineuses traditionnelles, les dimensions compactes de la source LED offrent au fabricant une plus grande liberté pour faire varier aussi bien la lumière en elle-même que la forme du luminaire. Et l'installateur électro-technique peut également, grâce à ces solutions LED's plus flexibles, offrir plus de diversité dans ses solutions. Ce chapitre va vous aider dans ce domaine.

Réussir un plan d'éclairage n'est pas difficile. La clé du succès est de prendre le temps. Vous ne pouvez pas démarrer sans de bonnes informations sur le projet. N'hésitez pas à contacter le client. Vous trouverez souvent, grâce à ces conversations, une première approche appropriée au projet. Vous pouvez ensuite affiner votre proposition grâce aux programmes de calcul et ainsi obtenir un plan parfait.

9.1. Les exigences

Que l'on vous demande un plan d'éclairage pour une maison, un bureau ou un entrepôt, il y a de nombreuses options possibles pour le mettre en œuvre. Il semble facile de savoir comment répondre aux exigences pour un petit investissement. Malheureusement, on oublie parfois de prendre en compte l'aménagement, l'architecture ou la consommation d'énergie. Les souhaits spécifiques du client ou de l'utilisateur sont également importants.

Vous devez tout d'abord savoir quelles sont les pièces à éclairer et quel est leur usage. Par exemple, les plans d'éclairage pour un espace uniforme d'un entrepôt à rénover ou pour un nouveau hall de production seront différents. Il arrive aussi que la solution doive être flexible pour répondre aux différentes applications envisagées.

Pour une étude d'éclairage, vous devez aussi obtenir un plan à l'échelle, de préférence complété par un plan d'implantation. Rappelez-vous que l'éclairage des postes de travail connus sera moins coûteux que l'éclairage de l'espace dans son entièreté. Mettez également en évidence des caractéristiques spéciales telles que des couleurs différentes, des objets importants ou des éléments particuliers de l'architecture (colonnes, parties de fenêtres, ...).

Les normes et la législation fixent des exigences minimales pour un environnement de travail productif et sûr. Via le site Internet du CSTC, par exemple, vous pouvez vérifier quelles sont les normes générales et quelles sont les lois applicables. Vérifier auprès du client si des règles spécifiques s'appliquent, entre autres, en matière d'efficacité énergétique (telle que BREEAM) ou en matière de sécurité (poussière, humidité, risque d'explosion, ...). Bien sûr, l'éclairage d'urgence ne peut pas être négligé.

Demandez également au client s'il souhaite une certaine apparence ou atmosphère. Nous savons que l'éclairage dans un magasin de vêtements peut vouloir donner l'impression d'un magasin permettant de bonnes affaires avec des réductions de prix importantes ou, au contraire, faire penser au point de vente d'un designer exclusif. Cette stratégie d'image s'applique également à d'autres projets comme des bureaux ou des entrepôts. Souvent, un manager veut se positionner face à un concurrent.

9.2. La conception lumière

Lorsque toutes ces informations ont été collectées, vous pouvez commencer la conception. Si vous n'êtes pas familier avec ce genre de travail, commencer par regrouper les exigences dans une liste et par voir les possibilités qui en découlent. Compléter la liste avec des idées déjà utilisées ou vues dans d'autres projets.



Figure 66 : positionnement surprenant des luminaires.
Source : IALD
Copyright: Rohan Venn



Figure 67 : élégante accentuation avec des OLED.
Source : IALD,
Copyright: Naomi Castillo Photography

Certains fabricants ou distributeurs de luminaires présentent des idées inspirantes sur des sites comme Pinterest.

Vous pouvez imaginer de nouvelles solutions en visualisant comment l'espace apparaîtra et sera utilisé. Une astuce consiste à accentuer ce que l'utilisateur verra. Contrairement au sol ou à la table de travail, les surfaces verticales telles que les murs, les colonnes ou les objets deviennent plus visibles et contribuent grandement à l'image lumineuse.

Découvrez quelles sont vos options pour l'éclairage général. Vous pouvez réfléchir d'une part à l'orientation et d'autre part à la tâche. Peut-être voulez-vous ici aussi souligner certains éléments spécifiques dans l'espace ? Cela peut être fait avec un beau luminaire décoratif, un travail sur la lumière et l'ombre, ou une mise en lumière surprenante. Sachez qu'une bonne relation entre l'éclairage général et l'éclairage d'accentuation déterminera l'atmosphère dans l'espace.

La position des luminaires jouera un rôle important sur l'atmosphère de la pièce. Il est possible d'éclairer le sol, le mur ou le plafond. Si vous choisissez un montage au plafond, les luminaires peuvent être encastrés ou installés en saillie, voire même suspendus. Avec un éclairage direct, la lumière est directement envoyée sur la surface de travail, ce qui est souvent une approche économe en énergie. L'utilisation de l'éclairage indirect peut contribuer à un meilleur ressenti de l'espace. Enfin, vous pouvez également faire varier la grille d'espacement.

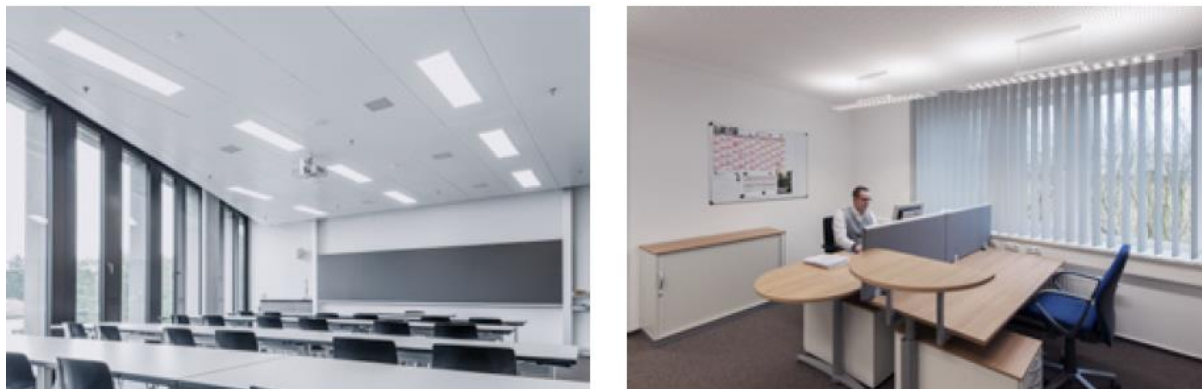


Figure 68 : à gauche : Eclairage direct. A droite : éclairage partiellement direct, partiellement indirect

Choisissez ensuite parmi la liste d'idées celle que vous préférez. La réalisation de ce choix nécessite une certaine connaissance de l'éclairage pour laquelle cette brochure peut vous guider. Dans certaines situations, vous prendrez également en compte l'éblouissement qui peut s'avérer gênant, les ombres portées ou les reflets. Finalisez votre plan d'éclairage en choisissant quelques luminaires adaptés à vos besoins parmi la large gamme disponible. Si nécessaire, demandez au revendeur quelles sont les possibilités qui entrent dans les limites du budget.

9.3. La vérification par calcul/simulation

Il est nécessaire de vérifier si votre proposition répond aux exigences. Atteignez-vous les niveaux d'éclairement requis là où c'est nécessaire ? La répartition de la lumière sur les murs est-elle telle que vous l'aviez imaginée ?

Les simulations sont particulièrement adaptées à la vérification de l'estimation du nombre de luminaires et de la puissance requise. Pour ne pas perdre trop de temps avec ces simulations, vous devriez commencer avec un croquis sur papier avant de travailler avec le logiciel.

Les logiciels libres tels que Dialux et Relux offrent la possibilité de concevoir un espace avec une forme et une couleur spécifiques, et de placer des luminaires dans la configuration voulue. Les fichiers données des appareils sont chargés à partir des catalogues fournis par les fabricants d'éclairage eux-mêmes. On peut ainsi choisir un modèle spécifique avec la puissance désirée. Les simulations peuvent servir, par exemple, à valider le respect des normes. L'exactitude des calculs dépend, dans une large mesure, de votre maîtrise du logiciel. Si vous introduisez une donnée incorrecte, le résultat ne sera pas fiable.

Dans ce cadre, un paramètre important est la valeur donnée au facteur de maintenance. Si vous mesurez le niveau d'éclairement dans une pièce, il sera moins élevé après quelques années d'usage qu'au moment de l'installation. En effet, la pièce et les luminaires se salissent et la lumière n'est plus aussi bien diffusée/réfléchi. Il est aussi possible que certains luminaires défectueux n'aient pas été remplacés. Enfin, la source LED elle-même émettra, petit à petit, moins de lumière, principalement sous l'influence de la chaleur. Par exemple, pour garantir 500 lux minimum dans un bureau sur toute sa durée d'utilisation, 600 lux seront probablement nécessaires au moment de l'installation. Le facteur de maintenance tient compte, entre autres, du facteur de dépréciation et de l'éclairement initial. Le choix du facteur de maintenance détermine la fréquence de rafraîchissement de la pièce et des luminaires.

La longue durée de vie de la LED rend le choix du facteur de maintenance un peu plus difficile. Le luminaire LED peut éventuellement avoir une durée de vie plus longue que nécessaire. Nous devons donc savoir quelle quantité de lumière est encore produite à la fin de la durée d'utilisation réelle de la pièce. Pour une salle de classe, cela peut être 20 000 heures, pour un entrepôt 75 000 heures. La baisse de l'éclairement est définie par la valeur « Lx » de la LED, par exemple L80 : 50 000h. Une telle valeur signifie que la moitié des LED's conserve encore 80% de leur flux lumineux d'origine après 50 000 heures de fonctionnement. Pour ce même luminaire LED, un facteur de maintenance de 0,82 pourrait être proposé dans l'exemple de la classe, tandis qu'une valeur de 0,64 pour l'entrepôt sera un meilleur choix. Vous trouverez des informations

complémentaires dans l'article « Eclairage LED : durée d'utilisation ou durée de vie » sur www.lichttechnologie.be.

Le logiciel peut vous aider à rédiger le dossier de votre conception d'éclairage. Vous pouvez choisir de regrouper toutes les informations importantes lors de l'impression des résultats :

- Résumé de l'étude avec les résultats pour les niveaux d'éclairage, l'uniformité et l'éblouissement.
- Sélection du schéma de maintenance et des luminaires (image, courbe photométrique, puissance électrique, flux lumineux, température de couleur).
- Position des luminaires dans un plan d'échelle.
- Simulations de la manière dont espace sera illuminé.

Pour valider les résultats, il est fait référence aux normes telles que la norme 12464-1 pour les lieux de travail. Cette norme indique le niveau d'éclairage souhaitable sur le lieu de travail afin de pouvoir travailler de façon optimale. Pour cela, l'éclairage moyen en fin de durée d'utilisation et son uniformité sont spécifiés aussi bien pour la surface de travail que pour son environnement. Pour l'environnement, le logiciel tient compte de l'environnement immédiat, du fond, des murs et du plafond. Cette approche contribue à créer un milieu de travail productif, sur et agréable. En outre, une attention particulière est accordée à la reconnaissance des visages, à l'éblouissement des luminaires, à la couleur de la lumière et au rendu des couleurs. Afin de se conformer à la norme, il y a donc plus à contrôler que simplement l'éclairage sur une table.



Figure 69 : rendu du design lumineux d'un bureau dans DIALux EVO.

9.4. Suivi

Parcourez les résultats du calcul/simulation avec le client. Expliquer les hypothèses formulées, telles que le schéma de maintenance ou les couleurs utilisées. Vous pouvez également compléter les résultats de calcul du logiciel par un croquis conceptuel, un plan pas à pas, une visualisation et des fiches techniques des produits utilisés. Des explications sur la consommation énergétique et des propositions de niveaux de gradation sont également pertinentes. Certaines photos de propositions similaires pourraient être un facteur décisif pour votre client. Cet échange est également un excellent moment pour faire quelques propositions sur la maintenance ou le réglage de l'éclairage après l'installation.



VOLTA

Marlylaan 15/8 Avenue du Marly
Brussel, 1120, Bruxelles

T 02 476 16 76

info@volta-org.be
www.volta-org.be