



Principes et Méthodes de la Lumière

*Le guide technique pour
des décisions éclairées*

distri^{si}gn

Sommaire

PARTIE 1 — INTRODUCTION

1. Qu'est-ce que la lumière ?	p.4
2. Que peut-on mesurer ?	p.4

PARTIE 2 — CONCEPTS

3. Radiométrie	p.5
4. Spectroradiométrie	p.6
5. Photométrie	p.7
6. Colorimétrie	
Luminance	p.8
Perception des couleurs	p.8
Mélange des couleurs	p.9
Spécification de la couleur d'une source	p.10-12
Température de couleur	p.13
Température de couleur corrélée	p.14-15

PARTIE 3 — INSTRUMENTATION

7. Radiomètre	p.16
8. Photomètre	p.17-20
9. Colorimètre à trois filtres	p.21-22
10. Spectroradiomètre	p.23

PARTIE 4 — CONCLUSION

Conclusions	p.24
-------------------	-------------

PARTIE 5 — RÉFÉRENCES

Références	p.25
------------------	-------------

INTRODUCTION

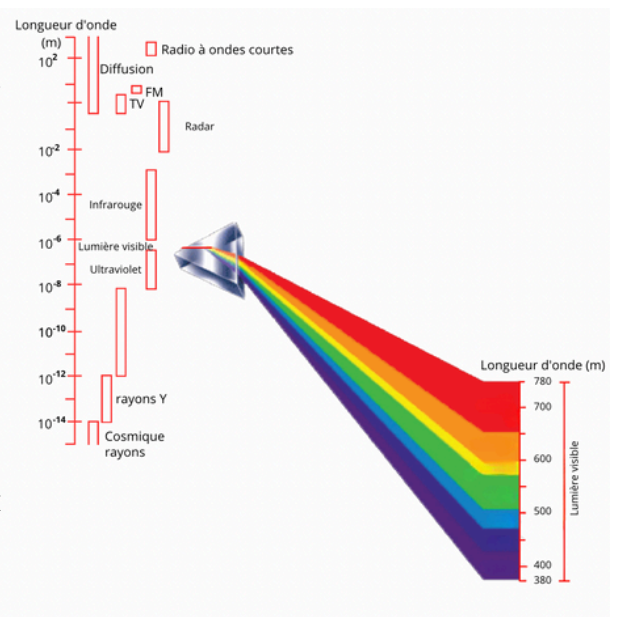
La lumière constitue un élément fondamental de la perception visuelle. Elle fournit l'ensemble des informations nécessaires à l'observation et à l'analyse de notre environnement. Les formes et les couleurs ne deviennent perceptibles que lorsque la lumière émise ou réfléchiée par les objets atteint l'œil humain et déclenche le processus de vision.

1. Qu'est-ce que la lumière ?

La lumière est une forme d'énergie faisant partie d'un spectre plus large : le spectre électromagnétique. Ce dernier comprend les ondes électriques, les ondes radio, les micro-ondes jusqu'aux rayons gamma. Le spectre de la lumière visible ne représente qu'une portion limitée de cet ensemble, comprise entre 380 nm et 760 nm. De manière générale, on inclut également dans la définition de la lumière les régions infrarouge et ultraviolette.

La détection de la lumière constitue un processus fondamental qui exige une compréhension approfondie. Dans le domaine de l'optique, cette notion reste parfois complexe, notamment en raison de l'introduction régulière de nouvelles terminologies et de nouveaux concepts.

La mesure de la lumière représente un véritable défi, notamment lorsqu'il s'agit de déterminer quoi mesurer et comment le mesurer avec précision.

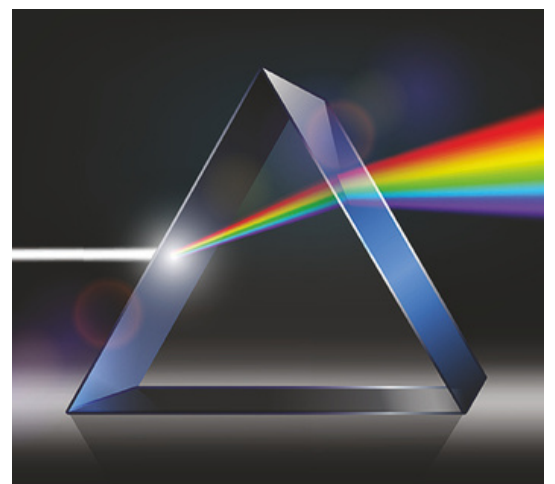


2. Que peut-on mesurer ?

De manière générale, il est possible de mesurer la quantité totale d'énergie lumineuse émise par une source ou reçue par une surface. Cette énergie peut couvrir une partie du spectre visible, incluant également les rayonnements ultraviolets et infrarouges. L'énergie peut être mesurée à une longueur d'onde précise ou sur une plage de longueurs d'onde.

Un autre domaine d'intérêt concerne la couleur. Celle-ci est une propriété intrinsèque de la lumière et peut être mesurée puis quantifiée.

La science dédiée à la mesure de la lumière est appelée photométrie. Elle constitue une branche spécifique de la radiométrie, discipline plus large qui englobe la mesure du rayonnement électromagnétique en dehors du spectre visible.



CONCEPTS

3. Radiométrie

La radiométrie est la science qui étudie et mesure le rayonnement électromagnétique (EM). Le spectre plus large couvert par cette discipline repose sur des constantes physiques universelles.

Les paramètres étudiés concernent la puissance rayonnée ainsi que sa distribution spatiale et angulaire.

Les quatre concepts fondamentaux de la radiométrie sont :

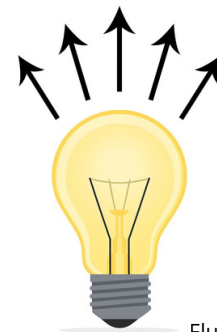
- Flux radiant (Radiant Flux)
- Intensité radiante (Radiant Intensity)
- Radiance
- Irradiance

Flux radiant

Le flux radiant correspond à la puissance totale rayonnée par une source ou reçue par une surface.

Il peut également être défini comme le débit d'énergie rayonnante traversant une surface donnée ou émise dans un angle solide déterminé.

L'unité du Système International (SI) du flux radiant est le watt (W).



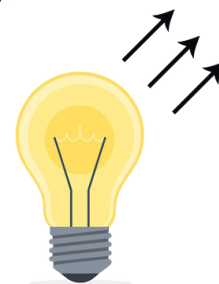
Flux radiant
Puissance totale (Watts)

Intensité radiante

L'intensité radiante désigne la densité angulaire de puissance émise dans une direction donnée par une source.

Elle correspond à la somme de l'énergie contenue dans l'ensemble des rayons émis dans cette direction par la source (autrement dit, la puissance par angle solide).

L'unité SI de l'intensité radiante est le watt par stéradian (W/sr).

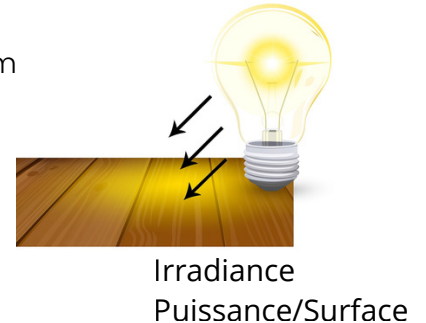


Intensité radiante
Puissance/Angle solide

Irradiance (Éclairement énergétique)

L'éclairement énergétique correspond à la mesure du flux radiant incident sur la surface d'un objet, exprimé par unité de surface.

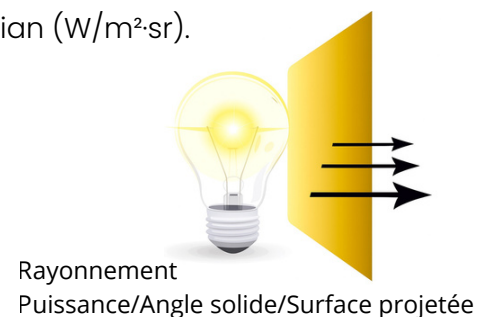
L'unité SI de l'éclairement énergétique est le watt par mètre carré (W/m²).



Radiance (Luminance énergétique)

La luminance énergétique désigne la densité de l'intensité radiante totale émise par unité de surface projetée.

L'unité SI de la radiance est le watt par mètre carré et par stéradian (W/m²·sr).



4. Spectroradiométrie

La spectroradiométrie consiste à mesurer l'énergie lumineuse en fonction de chaque longueur d'onde du spectre électromagnétique.

Les mesures peuvent être effectuées sur l'ensemble du spectre ou sur une bande spécifique de longueurs d'onde.

Radiance spectrale

La radiance spectrale d'une source lumineuse correspond à la somme de toutes les énergies mesurées sur un spectre donné.

Il est également possible de déterminer la valeur énergétique individuelle à une longueur d'onde précise, exprimée en nanomètres (nm), grâce à la mesure de radiance spectrale.

L'unité SI de la radiance spectrale est le watt par mètre carré, par stéradian et par nanomètre (W/m²·sr·nm).

Irradiance spectrale

L'irradiance spectrale représente la mesure de l'intensité radiante totale par unité de surface projetée, en fonction de la longueur d'onde.

L'unité SI de l'irradiance spectrale est le watt par mètre carré et par nanomètre (W/m²·nm).

5. Photométrie

La photométrie est la science qui mesure les attributs psychophysiques de l'énergie électromagnétique visible par l'œil humain.

Le terme lumineux (ou luminous en anglais), utilisé dans ce contexte, fait référence à la lumière perçue et définit la photométrie comme une discipline liée à la perception visuelle humaine.

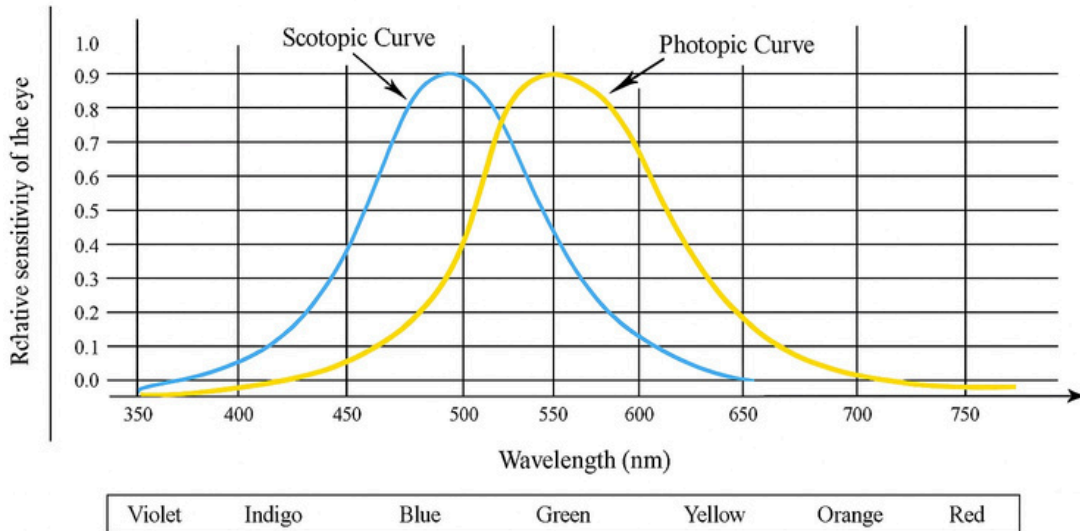


Fig. 2.3a Approximate relative sensitivity of the average human eye to different wavelength

La photométrie s'est constituée en science moderne en 1942, lorsque la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) a défini la réponse moyenne de l'œil humain à la lumière.

Les chercheurs de la CIE ont étudié un large échantillon d'yeux humains adaptés à la lumière, puis compilé ces données dans la fonction de luminosité standard de la CIE (CIE Standard Luminosity Function), couramment appelée courbe photopique.

Cette courbe traduit la perception chromatique dans des conditions normales d'éclairage, tandis que la courbe scotopique décrit la perception achromatique en faible luminosité.

Les grandeurs photométriques sont directement liées aux grandeurs radiométriques correspondantes, à travers la fonction de luminosité normalisée par la CIE.

On peut considérer cette fonction comme une fonction de transfert, comparable à un filtre, qui modélise le comportement moyen de l'œil humain face à la lumière (voir Fig. 2.3b).

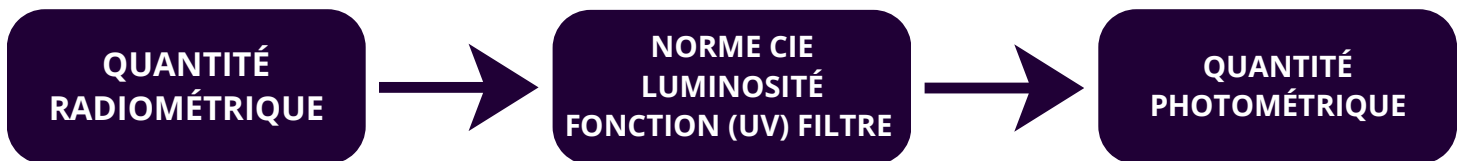


Fig. 2.3b - Relation entre les unités radiométriques et photométriques

La photométrie repose sur quatre grandeurs fondamentales, le flux lumineux, l'intensité lumineuse, l'éclairage et la luminance.

Luminance

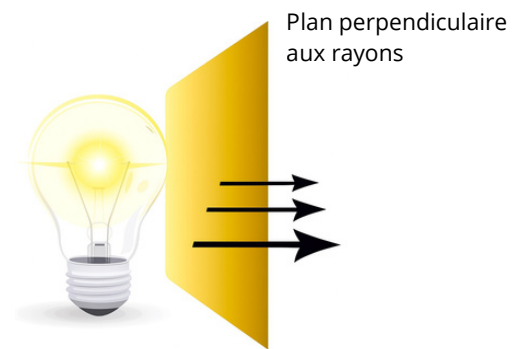
Également appelée brillance photométrique, la luminance mesure le flux lumineux émis ou réfléchi par une surface plane et uniforme.

Elle peut être interprétée comme l'intensité lumineuse émise par unité de surface projetée.

L'unité de mesure est la candela par mètre carré (cd/m^2), également appelée nit.

L'unité britannique non métrique correspondante est le foot-lambert (fL).

$$1 \text{ fL} = 1 \text{ candela} / \pi \text{ ft}^2$$



Luminance
Puissance totale / angle solide / surface projetée

6. Colorimétrie

Couleur

La couleur est une caractéristique de la lumière déterminée par sa composition spectrale et par son interaction avec l'œil humain.

Il s'agit donc d'un phénomène psychophysique, dont la perception est subjective et dépendante de la sensibilité individuelle de l'observateur.

Perception des couleurs

L'œil humain fonctionne de manière comparable à un appareil photo : le cristallin forme l'image de la scène observée sur la rétine, sensible à la lumière.

Cette rétine contient deux types de récepteurs : les bâtonnets et les cônes.

Les cônes sont divisés en trois catégories, chacune réagissant à une portion spécifique du spectre lumineux : les cônes sensibles au bleu, ceux sensibles au vert, et ceux sensibles au rouge.

L'interaction de ces trois types de récepteurs génère le signal interprété par le cerveau comme une sensation colorée.

Cette théorie, aujourd'hui largement admise, est connue sous le nom de théorie trichromatique de la vision.

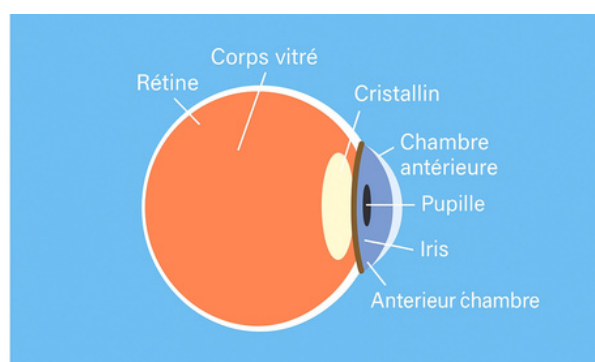


Fig. 2.4.2 – Œil humain

Mélange des couleurs

Isaac Newton fut le premier à démontrer et à expliquer la composition de la lumière blanche en la décomposant, à l'aide d'un prisme de verre, en ses couleurs spectrales constitutives.

Lorsqu'on ajoute plusieurs lumières colorées, cela signifie que des lumières présentant différentes compositions spectrales sont combinées.

L'effet perçu par le cerveau peut alors correspondre à n'importe quelle couleur du spectre visible, par exemple le jaune, ou à une couleur non spectrale, absente du spectre monochromatique, comme le violet.

La création de couleurs par addition de lumières colorées est appelée mélange additif.

Dans ce cas, l'œil humain réagit de manière additive, c'est-à-dire que la stimulation combinée des trois types de cônes produit la perception de nouvelles couleurs.

La figure 2.4.3a illustre le résultat du mélange de trois lumières primaires : le rouge, le vert et le bleu.

Ces trois couleurs sont dites primaires, et leur combinaison engendre les secondaires : le cyan, le magenta et le jaune.

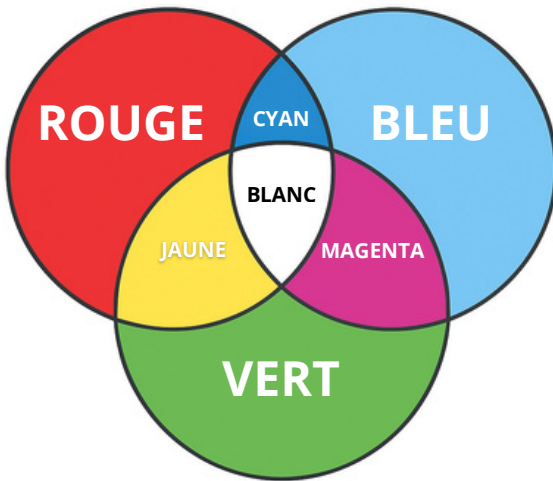


Fig. 2.4.3a - Mélange additif des couleurs



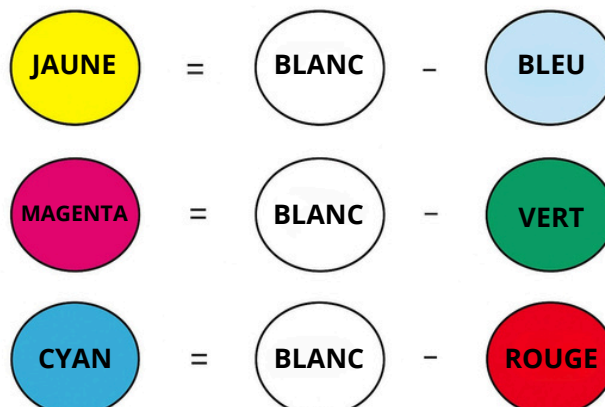
Fig. 2.4.3b - Mélange soustractif simple

La couleur d'un objet est déterminée par ses pigments.

Ces substances chimiques absorbent certaines parties du spectre lumineux incident et réfléchissent le reste, donnant ainsi à l'objet sa couleur apparente.

Le mélange de pigments colorés suit un processus appelé mélange soustractif (voir fig. 2.4.3b).

Chaque pigment ajouté retire une portion supplémentaire de la lumière incidente, réduisant la quantité de lumière réfléchie vers l'œil.



Spécification de la couleur d'une source lumineuse

Au fil du temps, différentes méthodes ont été développées afin de quantifier la couleur et de faciliter sa communication de manière plus fiable et plus précise.

Ces approches visent à exprimer la couleur de façon numérique, un peu comme on exprime la longueur ou le poids à l'aide d'unités standards.

La spécification et la mesure de la couleur d'une source lumineuse peuvent être classées selon trois principales méthodes colorimétriques :

- Colorimétrie trichromatique
- Température de couleur
- Spectroradiométrie

Colorimétrie trichromatique

La colorimétrie trichromatique repose sur la théorie trichromatique de la vision des couleurs, selon laquelle l'œil humain possède des récepteurs sensibles à trois couleurs primaires : le rouge, le vert et le bleu.

Toutes les autres couleurs perçues résultent de la combinaison de ces trois composantes fondamentales.

Le système le plus reconnu est celui défini en 1931 par la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), qui a établi un Observateur Standard et défini trois fonctions de correspondance colorimétrique : $x(\lambda)$, $y(\lambda)$ et $z(\lambda)$ (voir Fig. 2.4.4.1).

Les valeurs trichromatiques XYZ sont calculées à partir de ces fonctions standard.

Ces valeurs, ainsi que l'espace colorimétrique Yxy associé, constituent la base du système colorimétrique CIE encore utilisé aujourd'hui.

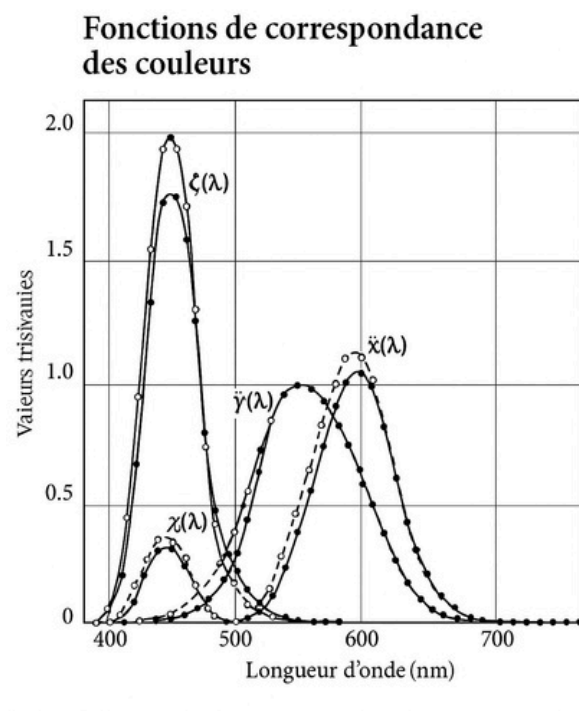


Fig. 2.4.4.1 – Fonctions de correspondance des couleurs

Diagramme de chromaticité CIE 1931 Yxy

Les valeurs trichromatiques XYZ sont utiles pour définir une couleur, mais elles sont difficiles à représenter visuellement.

Pour remédier à cela, la CIE a défini en 1931 un espace colorimétrique bidimensionnel indépendant de la luminance : le diagramme Yxy.

Dans cet espace, Y représente la luminance, tandis que x et y sont les coordonnées de chromaticité, calculées à partir des valeurs trichromatiques XYZ selon les formules suivantes :

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

La principale limite du système de 1931 réside dans le fait que les distances égales sur le diagramme ne correspondent pas à des différences perçues égales entre les couleurs, en raison des non-linéarités de la vision humaine.

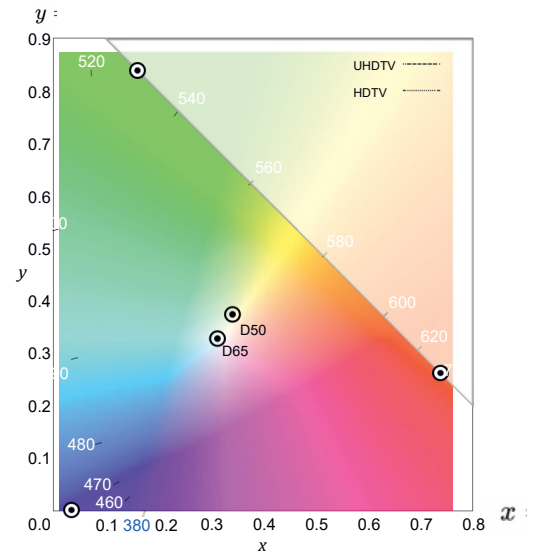


Fig. 2.4.4.1.1 - Diagramme de chromaticité (1931)

Diagramme de chromaticité CIE 1976 UCS

Le diagramme UCS (Uniform Chromaticity Scale) a été élaboré afin de corriger les limites du système de 1931.

Son objectif était de fournir une distribution plus homogène des couleurs perçues pour une luminance équivalente.

Le diagramme CIE 1976 UCS utilise les coordonnées u et v, introduites pour différencier ce système du modèle antérieur de 1960 (CIE-UCS).

Les coordonnées de chromaticité u et v sont également calculées à partir des valeurs trichromatiques XYZ, selon les formules suivantes :

$$u = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \quad v = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z}$$

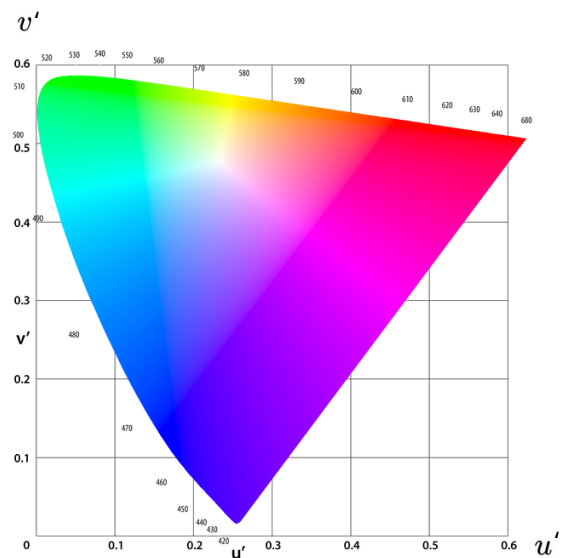


Fig. 2.4.4.1.2 - Diagramme UCS (1976)

Coordonnées de Helmholtz

Une autre représentation colorimétrique utilisée dans le système CIE repose sur les coordonnées de Helmholtz, également appelées longueur d'onde dominante et pureté.

Ces paramètres sont plus étroitement liés aux aspects visuels de la teinte (hue) et de la chromaticité (chroma). La longueur d'onde dominante (DW) d'une couleur correspond à la longueur d'onde du spectre dont la chromaticité se situe sur la même droite reliant le point de la couleur observée (S) au point de l'illuminant (N).

Pour la mesure des sources lumineuses, le point de l'illuminant est défini par les coordonnées $x = 0,333$ et $y = 0,333$.

La pureté (ou pureté d'excitation) est déterminée par le rapport entre la distance N-S (du point de l'illuminant au point échantillon) et la distance N-DW (du point de l'illuminant à la courbe spectrale), selon la formule suivante :

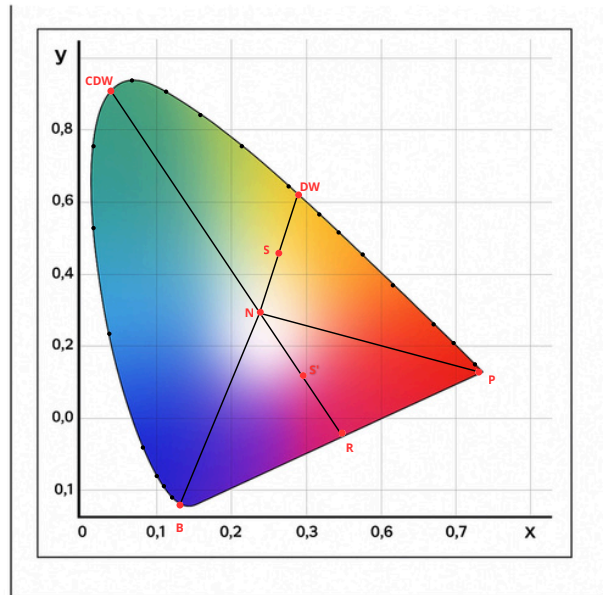


Fig. 2.4.4.1.3 - Coordonnées de Helmholtz

$$\text{Pureté} = \frac{N - S}{N - DW}$$

Cette méthode ne s'applique qu'aux couleurs spectrales, c'est-à-dire celles qui apparaissent dans le spectre visible.

Lorsqu'il s'agit de couleurs non spectrales (qui ne figurent pas dans le spectre visible et se situent à l'intérieur du triangle défini par les points N, R et B), on utilise la notion de longueur d'onde dominante complémentaire (CDW).

Dans ce cas, le point d'intersection P, censé représenter la longueur d'onde dominante, ne correspond à aucune longueur d'onde réelle.

On prolonge alors la droite N-P en sens inverse pour déterminer la longueur d'onde dominante complémentaire.

La pureté pour une couleur non spectrale est alors calculée selon la formule :

$$\text{Pureté} = \frac{N - S}{N - P}$$

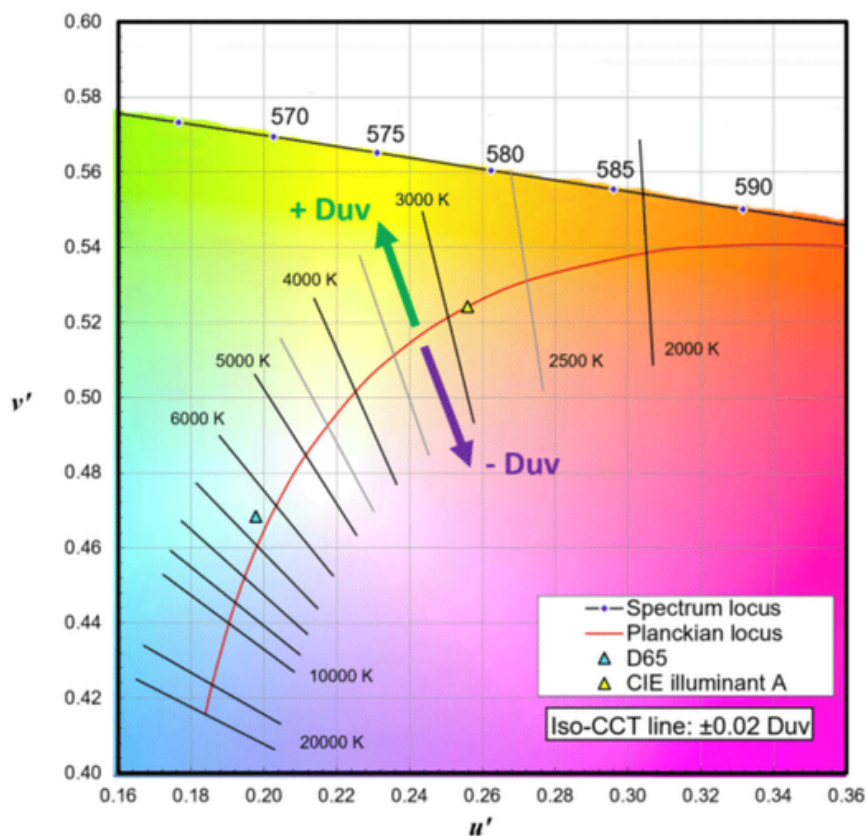
Les notions de longueur d'onde dominante et de pureté sont couramment utilisées pour la spécification des couleurs dans les LED.

Température de couleur

Le concept de température de couleur découle du changement apparent de couleur qu'un objet présente lorsqu'il est chauffé à différentes températures. Lorsque la température d'un objet augmente, son rayonnement émis se modifie, entraînant un changement de teinte.

Un cas particulier est celui du radiateur idéal, appelé corps noir, défini comme un objet incandescent capable d'émettre un rayonnement avec une efficacité de 100 % lorsqu'il est chauffé. Un corps noir idéal émet une lumière dont la couleur dépend directement de sa température. Sur le diagramme CIE, cette relation est représentée par une courbe appelée locus du corps noir (ou locus de Planck). La couleur du rayonnement évolue progressivement : du rouge profond vers l'orange, puis le jaune, et enfin le blanc bleuté à mesure que la température augmente. La plupart des sources lumineuses naturelles, comme le Soleil, les étoiles ou le feu, se situent très près de ce locus de Planck.

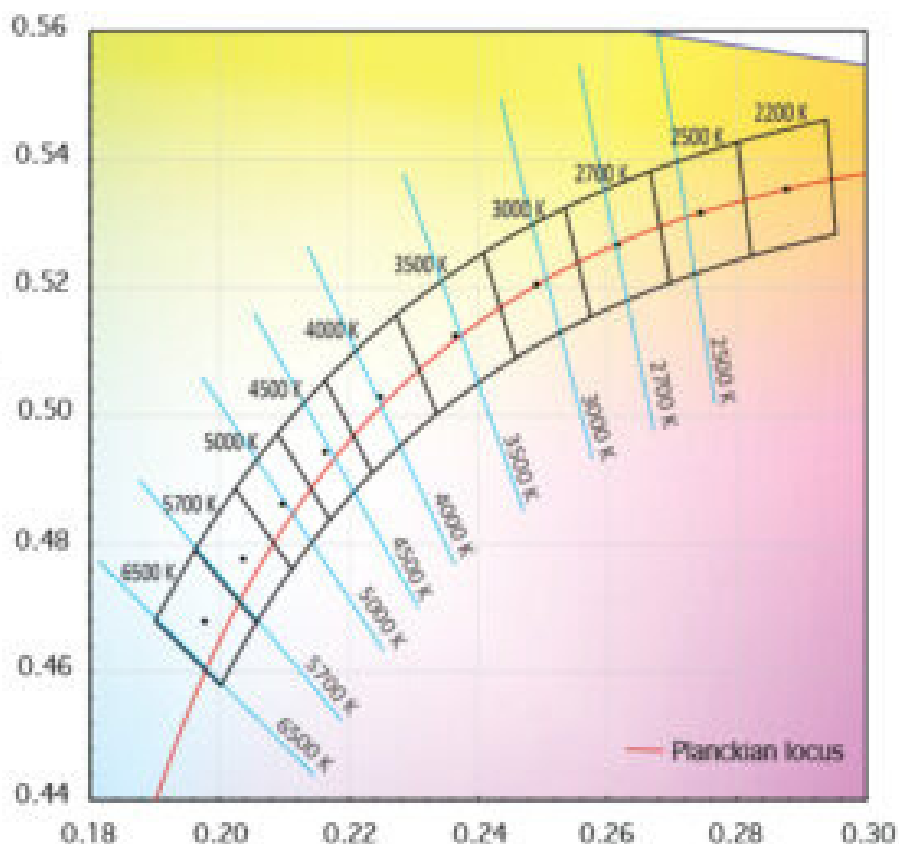
Certaines sources lumineuses artificielles présentent une couleur similaire à celle d'un corps noir porté à une température donnée. Dans ce cas, il est pratique de classer la source selon sa température de couleur, exprimée en Kelvins (K). Les températures de couleur typiques s'étendent de 1 500 K à 10 000 K. Tant que la lumière observée se rapproche du comportement d'un corps noir, les mesures de température de couleur sont très précises. Ce concept est particulièrement utilisé pour classer les blancs et constitue une référence essentielle pour les fabricants d'éclairage et d'écrans.



Température de couleur corrélée

La température de couleur s'applique strictement aux sources lumineuses pouvant être précisément comparées à un corps noir idéal. Ce concept a ensuite été étendu pour inclure les sources émettant une lumière pouvant être proche, mais non identique à celle d'un corps noir. L'expression température de couleur corrélée (CCT) est utilisée pour décrire la lumière émise par ces sources. La CCT correspond à la température à laquelle un corps noir émet une lumière dont la teinte est la plus proche de celle de la source étudiée. La valeur de la CCT est déterminée en identifiant la droite isotherme sur laquelle se situe la couleur de la source lumineuse. Ces droites isothermes regroupent les points correspondant à des couleurs perçues comme visuellement équivalentes. Le paramètre uv est utilisé pour indiquer la déviation par rapport au locus du corps noir ; la tolérance maximale pour uv est fixée à $\pm 0,02$.

La température de couleur corrélée n'est pas adaptée pour caractériser les sources lumineuses présentant un spectre étroit, ne suivant pas la courbe du corps noir, comme c'est le cas pour les LEDs, par exemple.



Spectroradiométrie

Différentes courbes de distribution spectrale de puissance peuvent produire le même effet visuel que nous appelons « couleur ». Cela signifie que la couleur d'une source lumineuse ne renseigne pas nécessairement sur la nature de sa distribution spectrale. Autrement dit, deux sources lumineuses présentant la même couleur (dans les coordonnées x , y ou selon la température de couleur) peuvent posséder des distributions spectrales totalement différentes. L'inverse, en revanche, est vrai : connaître la distribution spectrale de puissance d'une lumière permet de décrire précisément sa couleur. (Se reporter à la figure 2.4.4.3 pour les exemples de courbes de distribution spectrale correspondant à différents illuminants normalisés de la CIE.)

Ainsi, la méthode spectroradiométrique constitue le moyen le plus précis et complet pour spécifier la couleur. Les données spectrales obtenues peuvent être analysées visuellement et/ou comparées à celles d'une autre source lumineuse. Cependant, la meilleure utilisation de ces données consiste à calculer les valeurs trichromatiques CIE, en intégrant mathématiquement la distribution spectrale avec les fonctions de correspondance colorimétrique de la CIE. Ces valeurs trichromatiques servent ensuite à déterminer les coordonnées de chromaticité et la luminance, fournissant ainsi une description complète et quantitative de la couleur.

- 1 Illuminant standard D65 :
Lumière du jour moyenne (incluant la région du spectre ultraviolet), présentant une température de couleur corrélée de 6 504 K.
- 2 Illuminant standard C :
Lumière du jour moyenne (excluant la région du spectre ultraviolet), présentant une température de couleur corrélée de 6 774 K.
- 3 Illuminant standard A :
Lumière incandescente présentant une température de couleur corrélée de 2 856 K.

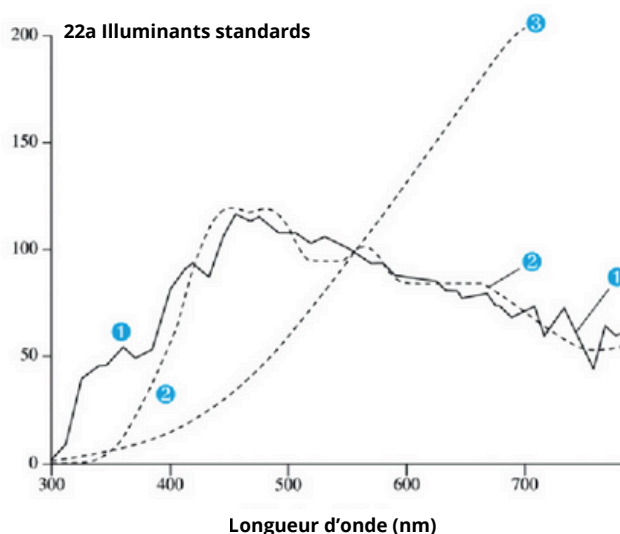


Fig. 2.4.4.3 - Distribution spectrale des illuminants normalisés de la CIE

INSTRUMENTATION

7. Radiomètre

Un radiomètre est un instrument utilisé pour mesurer l'intensité de l'énergie rayonnante. La majorité des radiomètres utilisent un capteur photodétecteur unique. Pour mesurer le rayonnement émis dans un spectre donné, ou pour adapter le radiomètre à une certaine réponse spectrale, on emploie généralement un filtre optique. Ce filtrage optique constitue une solution simple et économique pour cibler une bande spectrale précise.

Dans l'industrie, les radiomètres sont principalement utilisés pour mesurer l'irradiance et la radiance. Lorsque l'objectif est de quantifier le flux de rayonnement émis par une source, on mesure la radiance. En revanche, lorsque l'on s'intéresse au niveau d'exposition, on mesure l'irradiance ou l'irradiance intégrée.

Applications du radiomètre

Le radiomètre est couramment utilisé dans l'industrie pour quantifier les rayonnements situés en dehors du spectre visible, notamment dans les domaines ultraviolet (UV) et infrarouge (IR).

La lumière UV est particulièrement exploitée pour de nombreuses applications industrielles, telles que :

- le durcissement des photo-résines dans la fabrication de semi-conducteurs ;
- le durcissement des émulsions pour l'impression ou la fabrication de plaques d'exposition ;
- les tests de solidité des couleurs ;
- et certaines applications biologiques

Pour effectuer une mesure UV à l'aide d'un radiomètre, il est nécessaire de définir la réponse spectrale adaptée (plage et longueur d'onde de crête), en fonction de l'application visée.

En dehors de l'UV, le rayonnement infrarouge constitue également un paramètre clé dans les mesures radiométriques, car tous les matériaux émettent un rayonnement infrarouge en fonction de leur énergie thermique. La mesure infrarouge repose sur le principe du thermomètre radiatif, utilisé pour déterminer la température d'un objet sans contact direct. Ce type de radiomètre, souvent appelé pyromètre optique, utilise différents filtres spectrales selon les applications et les plages de température. Pour des informations complémentaires sur la détection infrarouge et la mesure de température, se référer à la publication "The Wonders of Temperature".

8. Photomètre

Méthode d'étalonnage

Outre la valeur f_1 , la méthode d'étalonnage du photomètre est également un facteur déterminant pour évaluer son adéquation à une application donnée. Par exemple, un photomètre présentant une valeur f_1 relativement élevée peut néanmoins offrir une bonne précision si la source lumineuse mesurée et la lampe étalon utilisée lors de l'étalonnage présentent des spectres similaires. Il existe deux principales méthodes d'étalonnage des photomètres :

1. Étalonnage à l'aide d'une lampe standard, c'est la méthode la plus courante. Ces lampes (généralement à filament de tungstène) sont certifiées et traçables auprès de laboratoires nationaux de référence. Le photomètre est ajusté jusqu'à ce que la valeur mesurée corresponde à la valeur de référence fournie pour la lampe étalon.

2. Étalonnage à l'aide d'un détecteur standard, cette méthode utilise des capteurs intégrés dont la réponse spectrale correspond parfaitement à la courbe CIE $V(\lambda)$. Une lampe reste nécessaire pour générer le flux lumineux, mais son intensité peut varier tant qu'elle demeure stable. Le détecteur standard mesure d'abord le flux émis par la lampe, puis le photomètre est ajusté jusqu'à obtenir une lecture équivalente. Ces détecteurs peuvent eux-mêmes être certifiés et traçables selon les normes nationales.

Facteur de correction colorimétrique

La correspondance entre le couple capteur/filtre et la courbe CIE $V(\lambda)$ est généralement moins précise aux extrémités du spectre visible. Ainsi, la température de couleur de la lampe utilisée lors de l'étalonnage joue un rôle crucial. La plupart des photomètres sont étalonnés à l'aide d'une lampe au tungstène, ce qui assure une excellente précision pour la mesure de sources incandescentes, halogènes ou solaires.

En revanche, ces instruments ne conviennent pas à la mesure de sources monochromatiques ou à bande étroite (par ex. : LED bleues ou blanches). Les erreurs de mesure peuvent également être significatives avec les lampes à décharge (tubes fluorescents, etc.), qui présentent des pics spectraux marqués. Pour compenser ces écarts, les photomètres modernes intègrent une fonction de facteur de correction colorimétrique (CCF). Cette fonction permet d'ajuster l'erreur résultant de la différence entre la réponse spectrale du capteur et la courbe CIE $V(\lambda)$.

Le CCF peut être calculé lorsque les réponses spectrales du capteur et de la distribution spectrale de la source lumineuse sont connues. Une méthode alternative consiste à transférer les données de mesure d'un étalon primaire (par exemple issues d'un spectroradiomètre) vers le photomètre en ajustant la valeur du CCF. Le CCF peut également servir de fonction d'étalonnage utilisateur, ce qui est particulièrement utile lorsque la traçabilité interne des étalons est requise.

Applications des photomètres

Il existe une grande variété de mesures photométriques à effectuer. Sans surprise, une mauvaise utilisation des instruments photométriques par l'utilisateur peut devenir une source majeure d'erreur. Pour beaucoup d'opérateurs, la principale difficulté réside dans la méconnaissance des caractéristiques du type de mesure requis. Les tentatives de conversion incorrecte entre unités entraînent souvent des erreurs importantes. Par exemple, l'erreur la plus fréquente consiste à utiliser un luxmètre (lumen/m²) pour déterminer un flux lumineux (lumen), ou à utiliser un luminancemètre (candela/m²) pour déterminer une intensité lumineuse (candela).

Il existe quatre principaux instruments photométriques :

- le luminancemètre,
- le luxmètre (illuminancemètre),
- le fluxmètre lumineux,
- et le mesureur d'intensité lumineuse

Luminancemètre

La luminance, c'est-à-dire la quantité d'énergie lumineuse visible émise par une source, peut être déterminée à l'aide d'un luminancemètre.

La luminance est une grandeur directionnelle, ce qui implique de préciser :

- l'angle d'acceptation de l'instrument,
- la surface mesurée,
- et la géométrie de mesure par rapport à la source,
- afin d'assurer une interprétation correcte des résultats.

Ces paramètres sont essentiels, car la majorité des sources lumineuses ne sont pas parfaitement lambertiennes (c'est-à-dire qu'elles n'émettent pas la même luminance dans toutes les directions) et présentent souvent une non-uniformité de luminance sur leur surface. Comme la mesure est dirigée vers la source, celle-ci doit être effectuée à l'aide d'un système optique de visée. L'angle de champ et l'angle couvert par la lentille de l'objectif doivent être limités, afin d'éviter la collecte de lumière provenant de zones du dispositif observé situées sous des angles légèrement différents.

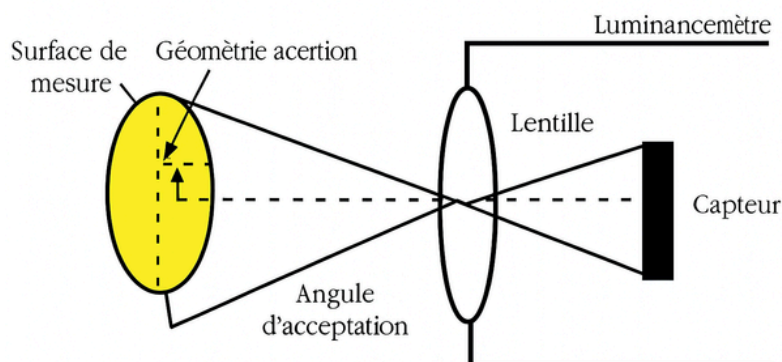


Fig. 3.2.3.3 – Technique de mesure de luminance avec un système

Les mesures de luminance sont essentielles pour divers produits tels que les feux de signalisation, les téléviseurs et les feux arrière des véhicules automobiles.

Luxmètre

L'éclairement représente la quantité d'énergie lumineuse visible qui atteint la surface d'un objet. Les mesures d'éclairement sont particulièrement sensibles aux erreurs causées par la lumière incidente hors axe.

Par définition, la lumière arrivant sur le plan de mesure doit être proportionnelle au cosinus de l'angle d'incidence.

Cependant, en raison de l'intégration complète du capteur dans la tête du détecteur ou dans le luxmètre lui-même, de nombreux appareils ne respectent pas naturellement la loi du cosinus et ne collectent donc pas correctement la lumière.

Pour corriger cette dérive, les luxmètres sont équipés d'un diffuseur cosinus, placé devant le capteur et le filtre.

Il est important de noter que chaque système génère une réponse au cosinus différente, ce qui entraîne des erreurs variables selon l'angle d'incidence, en fonction de la géométrie du dispositif.

Ainsi, il est essentiel de connaître la réponse au cosinus du système lorsqu'on compare les mesures d'éclairement issues de différents luxmètres, en particulier pour des mesures hors axe.

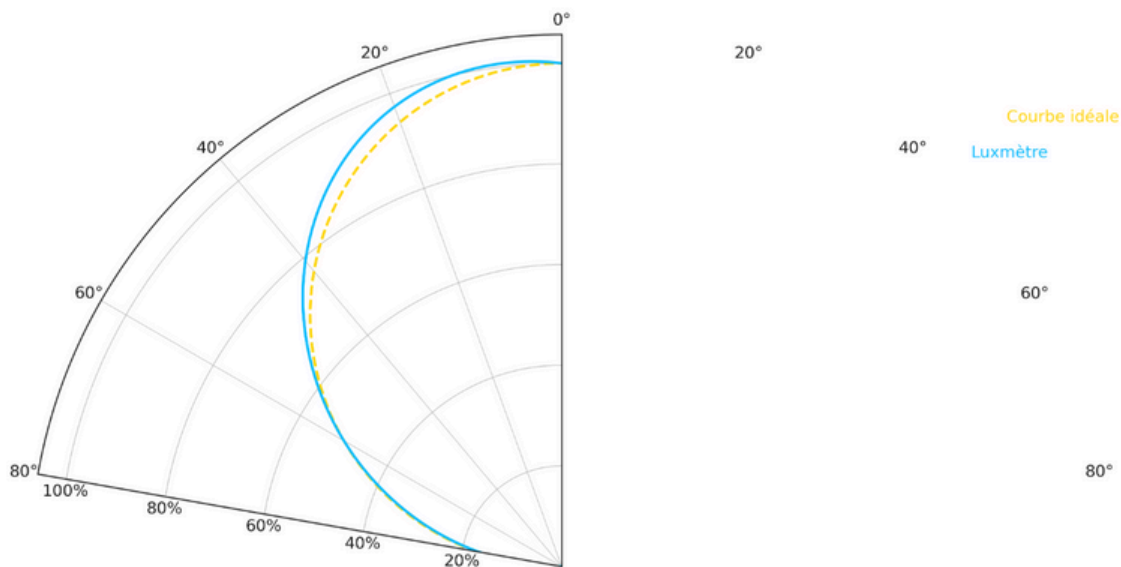


Fig. 3.2.3.2 - Exemple de réponse au cosinus d'un luxmètre

Les mesures d'éclairement sont largement utilisées pour évaluer la qualité de l'éclairage ambiant, notamment afin de déterminer si un espace est suffisamment éclairé pour la lecture ou le travail.

Par exemple, un bureau correctement éclairé doit présenter un niveau d'éclairement d'environ 300 lux.

Les luxmètres sont également utilisés pour calculer la valeur en lumens ANSI, notamment dans le cadre de la mesure des systèmes de projection.

Cette méthode consiste à réaliser neuf mesures d'éclairement (en lux), à en faire la moyenne, puis à multiplier ce résultat par la surface de mesure (en mètres carrés) correspondant à la zone couverte par ces neuf points.

Fluxmètre lumineux

La mesure du flux lumineux consiste à déterminer la quantité totale de lumière visible émise par une source lumineuse. Une sphère d'intégration est souvent utilisée pour rassembler l'ensemble du flux lumineux et le diriger vers la tête du détecteur.

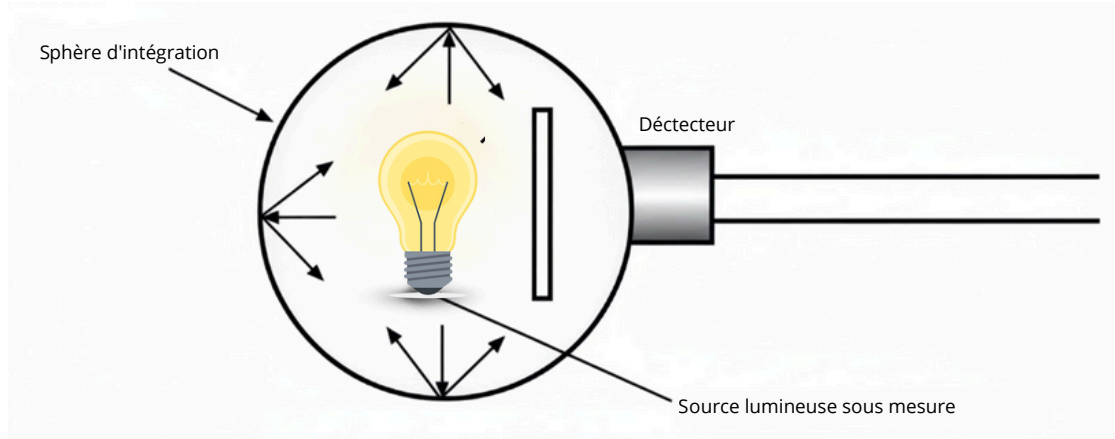


Fig. 3.2.3.3 - Mesure du flux lumineux total à l'aide d'une sphère d'intégration

La sphère d'intégration doit être suffisamment grande pour contenir la source lumineuse à mesurer. En règle générale, plus la sphère est grande, plus les erreurs de mesure du flux lumineux sont faibles, notamment lorsqu'il s'agit de comparer différentes sources lumineuses.

À titre d'exemple : étalonner une lampe tubulaire de 1,5 m dans une sphère de 2,5 m de diamètre contre un petit étalon incandescent produira environ la moitié de l'erreur qu'un étalonnage dans une sphère de 2 m.

L'étalonnage d'une telle sphère peut être réalisé à l'aide de lampes étalon de transfert, traçables aux normes nationales reconnues.

Cependant, pour garantir une mesure fiable, une sphère d'intégration doit présenter une géométrie parfaitement sphérique, un revêtement intérieur uniforme et diffusant, une homogénéité élevée de réflexion interne.

Ces exigences rendent la fabrication de sphères de grande qualité particulièrement coûteuse, et nécessitent souvent une adaptation spécifique à chaque application de mesure. C'est pourquoi il existe très peu de fluxmètres lumineux polyvalents réellement adaptés à un usage général.

Mesureur d'intensité lumineuse

L'intensité lumineuse représente la puissance lumineuse émise dans une direction donnée par unité d'angle solide. Elle est utilisée pour quantifier la puissance directionnelle d'une source lumineuse.

Comme son nom l'indique, la mesure d'intensité lumineuse implique des contraintes géométriques importantes, notamment la distance de mesure, la direction d'observation et la valeur de l'angle solide utilisé pour effectuer la mesure. Les sources lumineuses étant rarement spatialement homogènes, les mesures d'intensité nécessitent de définir précisément dans quelle direction et sur quel angle solide la mesure doit être réalisée.

Afin de mesurer l'intensité lumineuse d'une source de manière fiable, il est nécessaire d'utiliser un dispositif normalisé définissant précisément :

- l'angle solide couvert par la mesure,
- et l'orientation répétable de la source lumineuse selon une direction spécifiée.

Autrement dit, ces appareils doivent être configurés en fonction de la géométrie de la source testée.

En pratique, il n'existe aucun mesureur d'intensité lumineuse universel prêt à l'emploi.

Comparer les résultats de deux instruments différents n'a aucun sens tant que leurs géométries de mesure ne sont pas strictement identiques.

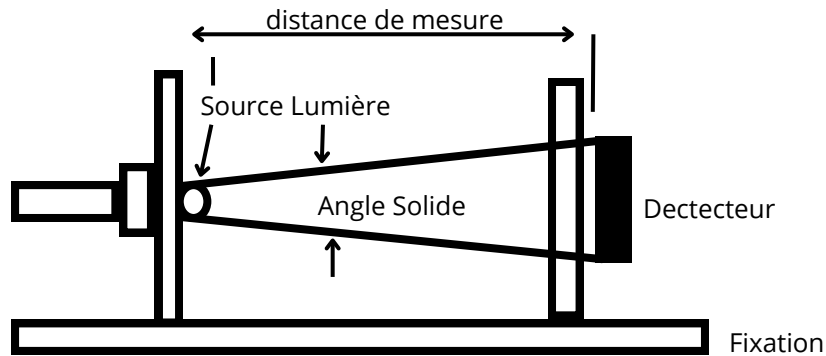


Fig. 3.2.3.4 - Exemple de dispositif de mesure de l'intensité lumineuse

Note :

- L'angle solide peut être calculé à partir de la surface du détecteur et de la distance de mesure.
- Le détecteur sert à mesurer le flux lumineux (en lumens).

9. Colorimètre à trois filtres

Les instruments conçus pour mesurer la lumière colorée, utilisant trois filtres dont les sensibilités spectrales correspondent aux fonctions colorimétriques trichromatiques de la CIE, sont appelés colorimètres à trois filtres.

En plus des mesures de chromaticité, ces appareils incluent généralement une des quatre mesures photométriques de base : luminance, éclairement, intensité lumineuse, ou flux lumineux.

Ces instruments utilisent des photodiodes de haute qualité, associées à des filtres montés en série. La lumière incidente est convertie par le détecteur en signaux correspondant directement aux valeurs trichromatiques XYZ normalisées. Cependant, l'ajustement aux courbes trichromatiques CIE standard ne peut être réalisé qu'avec une précision limitée.

Des écarts apparaissent en raison des restrictions propres aux courbes CIE définies, de la sensibilité variable des capteurs dans l'instrument. Ces écarts restent acceptables tant que la source lumineuse présente une distribution énergétique continue sur tout le spectre visible. En revanche, l'erreur peut devenir importante en présence de pentes spectrales abruptes ou de raies spectrales étroites.

C'est pourquoi les colorimètres à trois filtres conviennent mal aux sources présentant des pics spectraux prononcés, telles que les lampes à décharge (cf. Fig. 3.2.3.5a), ou les LED à bandes spectrales étroites (cf. Fig. 3.2.3.5b).

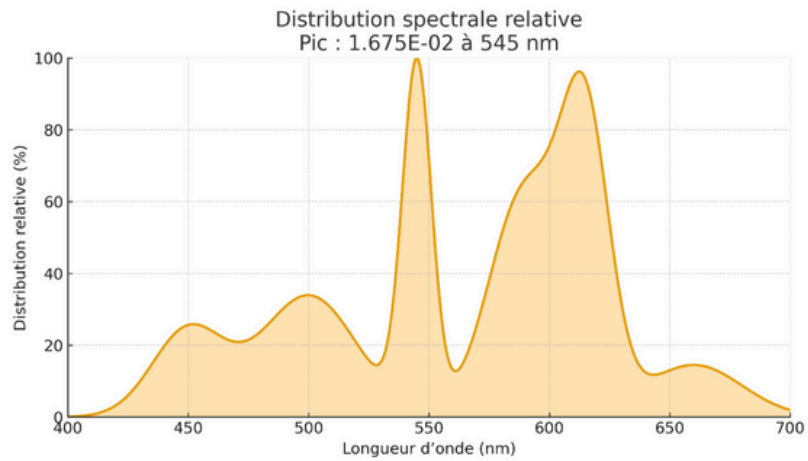


Fig. 3.2.3.5a - Distribution énergétique spectrale comportant des raies spectrales

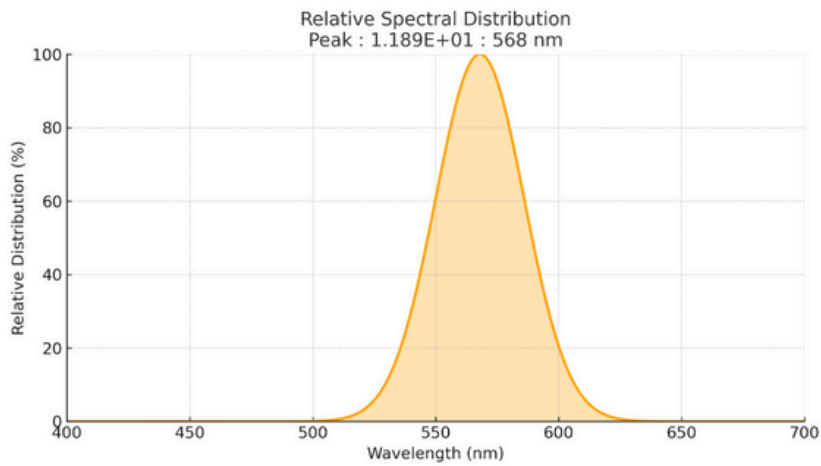


Fig. 3.2.3.5b - Distribution énergétique spectrale d'un émetteur à bande étroite

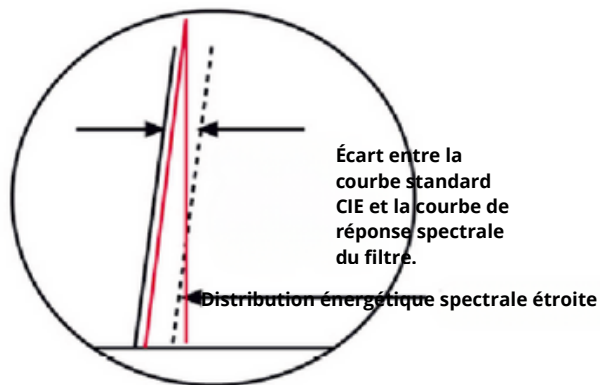
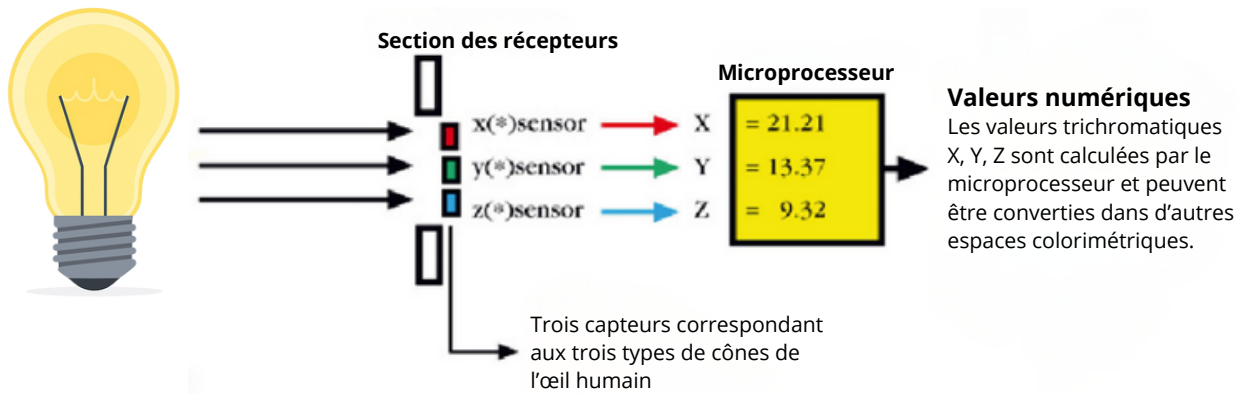
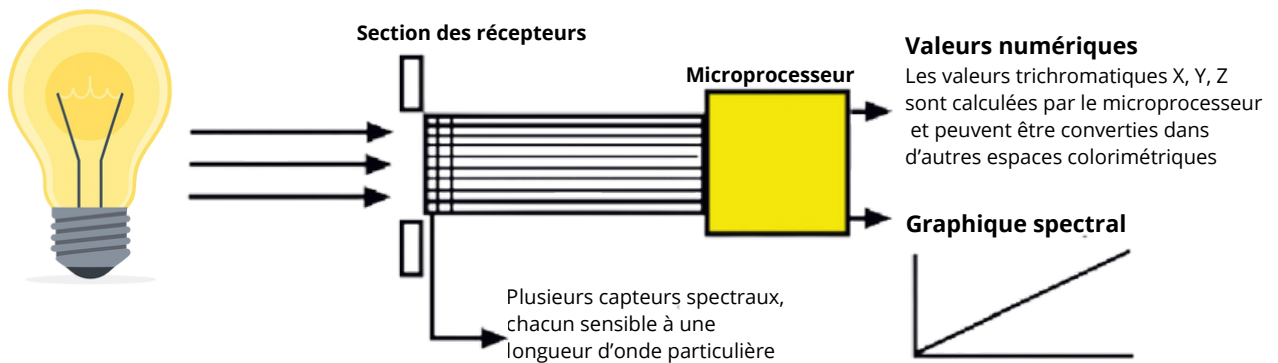


Fig. 3.2.3.5c - Erreur de mesure due à l'écart entre la courbe trichromatique CIE et la réponse spectrale de l'instrument

Méthode tristimulus



Méthode Spectroradiométrique



10. Spectroradiomètre

Les spectroradiomètres sont les instruments les plus adaptés pour mesurer la distribution énergétique spectrale d'une source lumineuse.

Ils permettent de déterminer non seulement les grandeurs radiométriques et photométriques, mais aussi les grandeurs colorimétriques.

Ces appareils enregistrent le spectre de rayonnement de la source et calculent les paramètres nécessaires, tels que la chromaticité et la luminance.

La dispersion de la lumière dans un spectroradiomètre est généralement réalisée à l'aide de prismes ou de réseaux de diffraction.

Les courbes CIE $V(\lambda)$ et les fonctions colorimétriques CIE sont intégrées dans le logiciel et utilisées pour traiter les données issues de la distribution spectrale mesurée de la source testée.

Ainsi, les erreurs de mesure associées aux photomètres et colorimètres à filtres sont éliminées avec l'usage d'un spectroradiomètre.

Cependant, pour obtenir des résultats fiables, le spectroradiomètre doit présenter :

- une sensibilité suffisante,
- une linéarité élevée,
- une faible lumière parasite,
- une faible erreur de polarisation,
- et une bande passante spectrale de 5 nm ou moins.

CONCLUSION

Les radiateurs non thermiques, tels que les lampes à décharge (caractérisées par une distribution énergétique spectrale discontinue) et les sources à bande étroite, ne peuvent être mesurés avec précision que par des méthodes spectrales.

Comparés aux colorimètres à trois filtres, les spectroradiomètres présentent néanmoins certaines limites, notamment en termes de rapidité de mesure, de coût et de portabilité.

En résumé

Lorsque des mesures de lumière très précises sont nécessaires, la méthode spectroradiométrique est la plus fiable et la plus complète.

Elle enregistre l'intégralité des caractéristiques spectrales de la lumière, puis les traite mathématiquement pour obtenir les données radiométriques, spectroradiométriques, photométriques et colorimétriques.

Cependant, si la portabilité, la rapidité de mesure ou le coût sont prioritaires, les photomètres à filtres restent préférés.

Dans ce cas, il est essentiel de bien connaître :
la valeur f_1 du photomètre,
et sa méthode d'étalonnage.

Ces informations permettent de déterminer si l'instrument est adapté à la source lumineuse testée, en fonction de sa distribution énergétique spectrale.

Enfin, il est recommandé de choisir des instruments réalisant des mesures directes de luminance, d'éclairement, d'intensité lumineuse ou de flux lumineux, sans conversion entre géométries de mesure, afin d'éviter les erreurs importantes.

En conclusion

Une bonne compréhension des caractéristiques mesurables de la lumière et de celles qui doivent être quantifiées selon chaque situation garantit que les paramètres radiométriques et photométriques sont correctement définis pour une application donnée.

Cette publication ne prétend pas être exhaustive ; elle expose les principes essentiels que l'utilisateur doit connaître pour réaliser des mesures lumineuses fiables.

Les recommandations fournies sont basées sur des problèmes fréquemment rencontrés dans les échanges entre fournisseurs et utilisateurs.

RÉFÉRENCES

Billmeyer, Fred W (1981).

Principes de la technologie de la couleur, 2^e édition. Wiley & Sons, New York.

Hutson, Geoffrey, H. (1990).

La télévision en couleur, 2^e édition. McGraw-Hill Book Company Europe, Angleterre.

The Photonics Dictionary – A Four-Book Set (1993).

États-Unis d'Amérique.

Joseph B. Murdoch.

Ingénierie de l'éclairage : de la lampe d'Edison au laser. Macmillan Publishing Company, Angleterre.

D. Allan Roberts.

Termes de radiométrie/photométrie. Dans The Photonics Design and Applications Handbook, 1993, États-Unis d'Amérique.

Daniel C. McCarthy.

La sphère intégrante aide à l'étalonnage absolu des lampes. Photonics Spectra, décembre 1998, États-Unis d'Amérique.

Richard Distl.

Mesurez ce que vous voyez. Photonics Spectra, mai 2000, États-Unis d'Amérique.

Ian K. Edwards.

Counting Coup – Photométrie : origine de la science et application aux équipements portatifs. LD&A, décembre 1993.

Clarence E. Rash et Everette McGowin III.

Mesurer la lumière. Information Display 9/96. SID, 1996.

Kenneth A. Miller.

Colorimétrie : méthodes et outils. Dans The Photonics Design and Applications Handbook, 1993, États-Unis d'Amérique.



distrisignm

www.distribsign.com

12 rue Amiral de Grasse 06000 Nice
2026