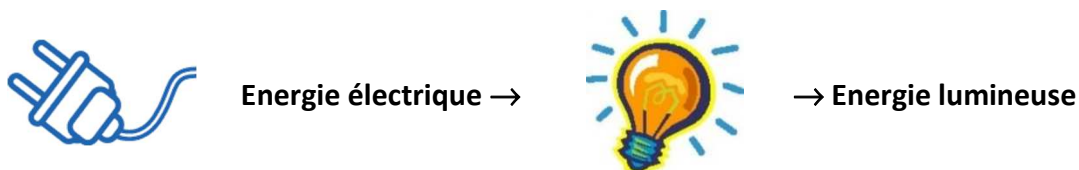


ENERGIE LUMINEUSE

1. Introduction

La lumière artificielle est générée par des ampoules. Ces dernières réalisent la conversion de l'énergie électrique en énergie lumineuse :



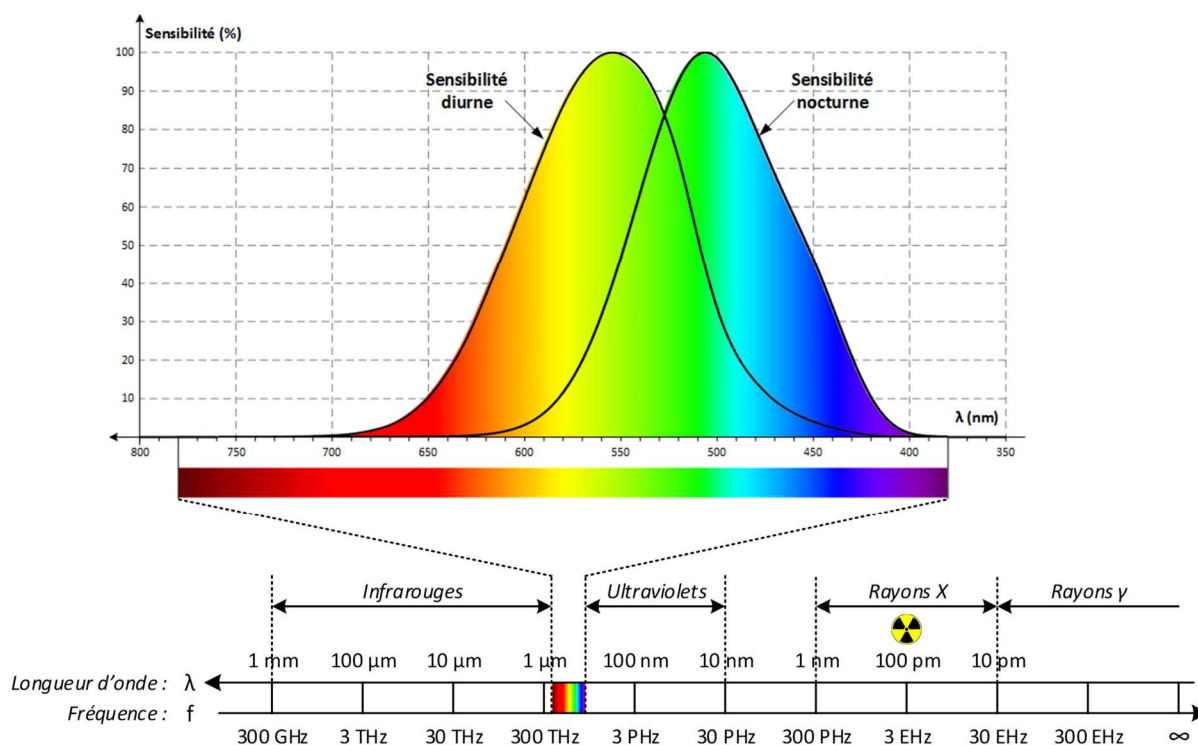
Une ampoule placée dans un luminaire a pour fonction d'éclairer une surface, un volume. Le récepteur est l'œil humain qui ne peut détecter toutes les radiations émises par l'ampoule. Donc, on ne tiendra compte que de l'énergie émise qui puisse être vue par un œil humain.

2. La lumière

La lumière est une onde électromagnétique perçue par l'œil. Elle se caractérise par une fréquence et une longueur d'onde :

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Avec : λ : longueur d'onde en mètre (m)
 c : vitesse ou célérité de la lumière ($c \approx 300\,000$ km/s)
 f : fréquence en Hertz (Hz)



3. Grandeurs photométriques

3.1. Flux lumineux et flux énergétique

Notée Φ , le flux lumineux s'exprime en lumen (lm). Il caractérise l'énergie lumineuse fournie par une source lumineuse dans tout l'espace qui l'entoure pondéré par la sensibilité de l'œil humain.

Si on tenait compte de toutes les radiations émises, y compris celles qui ne sont pas visible par l'œil humain, on trouverait **un flux énergétique Φ_e en Watt**. Il s'agit alors de la puissance du rayonnement émis par la source.

Exemple : le flux énergétique émis par le Soleil est $\Phi_e = 3,92.10^{26} \text{ W}$

3.2. Intensité lumineuse

Notée I , l'intensité lumineuse s'exprime en Candela (Cd). L'intensité lumineuse dans une direction donnée est l'énergie lumineuse située dans un cône autour de cette direction.

$$I = \frac{\Phi}{\Omega}$$

Avec : I : intensité lumineuse en Cd
 Φ : flux lumineux en lm
 Ω : angle solide en stéradian (sr)

3.3. Angle solide et surfaces éclairées

Noté Ω , un angle solide s'exprime en stéradian (sr). Un angle solide est l'analogue tridimensionnel de l'angle plan. L'angle plan étant défini, dans l'espace bidimensionnel, comme le rapport de la longueur de l'arc sur le rayon d'un cercle, l'angle solide, dans l'espace tridimensionnel, est défini de façon analogue comme le rapport de la superficie de tout ou partie d'une sphère sur le rayon au carré.

- Dans le cas d'une source lumineuse ponctuelle S qui éclaire en toutes directions, l'angle solide est dit plein :

$$\Omega = \frac{4\pi.R^2}{R^2} \rightarrow \Omega = 4.\pi$$

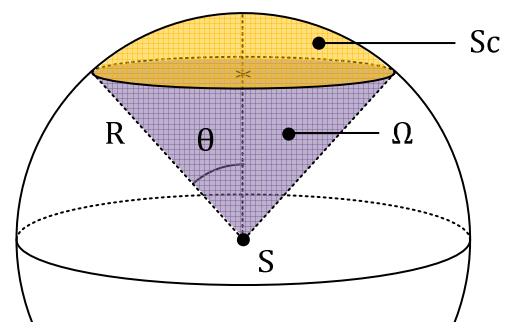
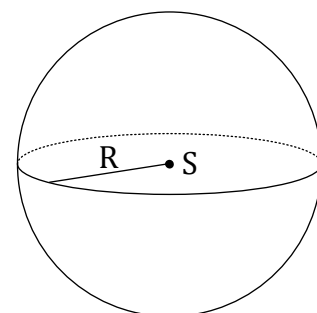
Rappel : La surface d'une sphère est $S = 4\pi.R^2$.

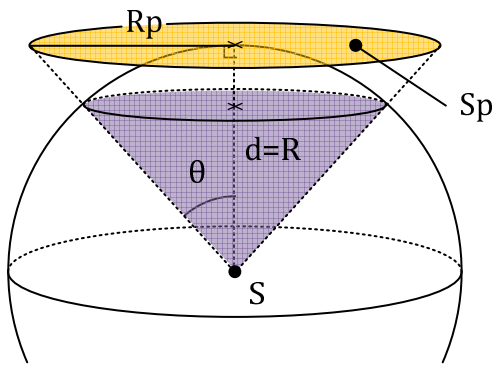
- Dans le cas d'une source lumineuse ponctuelle S qui émet un cône de lumière d'angle générateur θ , l'angle solide Ω est :

$$\Omega = 2\pi.(1-\cos\theta)$$

Ce cône découpe sur la sphère de rayon R une calotte de surface S_c :

$$S_c = \Omega.R^2$$





La surface plane Sp alors éclairée, de rayon Rp est :

$$S_p = \pi \cdot R_p^2$$

Avec :

$$R_p = d \cdot \tan \theta$$

Soit :

$$S_p = \pi \cdot (d \cdot \tan \theta)^2$$

Où d est la distance perpendiculaire au plan depuis la source lumineuse ($d = R$).

3.4. Éclairement lumineux

Noté E, l'éclairement s'exprime en lux (lx). Il caractérise le flux lumineux reçu par unité de surface. Un lux est l'éclairement d'une surface qui reçoit, d'une manière uniformément répartie, un flux lumineux d'un lumen par mètre carré. C'est de la lumière reçue.

$$E = \frac{\Phi}{S_c}$$

Avec :

E : éclairement en lx

Φ : flux lumineux en lm

S_c : surface de la calotte éclairée en m^2

$$E = \frac{I}{d^2}$$

Avec :

E : éclairement en lx

I : intensité lumineuse en Cd

d : distance en m

Loi de l'inverse du carré des distances : L'éclairement varie en fonction inverse du carré des distances source / surface éclairée :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2}$$

Exemple : Une lampe, supposée ponctuelle, placée à 3 m d'une surface, l'éclaire 9 fois moins que si cette surface se trouve à 1 m de la lampe.

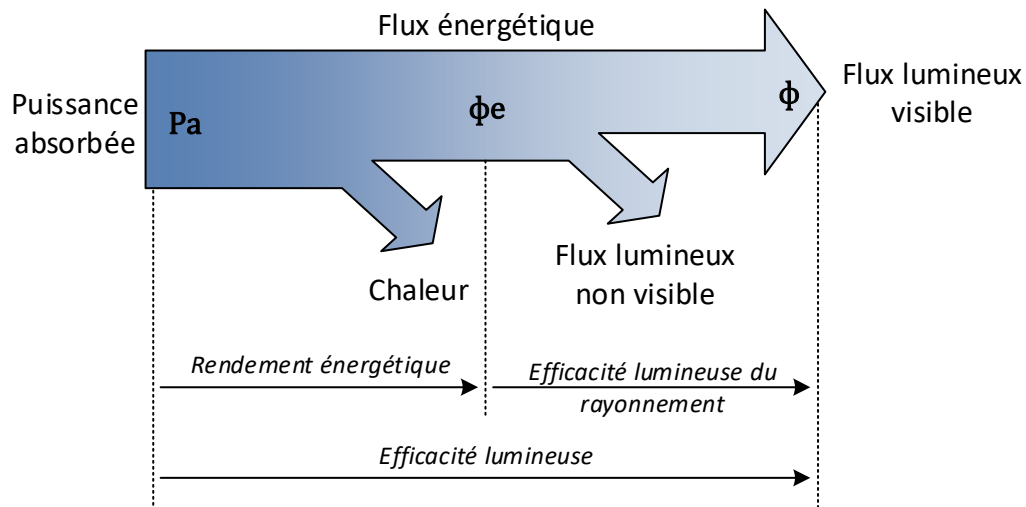
3.5. Luminance

Notée L, la luminance (en cd/m^2) est la réémission ou la réflexion plus ou moins partielle de lumière. Elle est mesurée à proximité de la source.

Le mot « brillance » a été remplacé en 1948 par le mot luminance pour apprécier l'éclat d'un objet.

3.6. Bilan énergétique

Le bilan énergétique d'une source lumineuse peut être représenté comme suit :



3.6.1. Rendement énergétique

Noté ρ , le rendement énergétique (en %) est le rapport du flux énergétique sur la puissance consommée. Il caractérise les pertes sous forme de chaleur :

$$\rho = \frac{\Phi_e}{P_a}$$

Avec : ρ : rendement énergétique en %
 Φ_e : flux énergétique en W
 P_a : puissance consommée ou absorbée en W

3.6.2. Efficacité lumineuse du rayonnement

Noté K , l'efficacité lumineuse du rayonnement (en lm/W) est le rapport du flux lumineux sur le flux énergétique. Il caractérise les pertes sous forme de lumière non visible :

$$K = \frac{\Phi}{\Phi_e}$$

Avec : K : efficacité lumineuse du rayonnement en lm/W
 Φ : flux lumineux en lm
 Φ_e : flux énergétique en W

3.6.1. Efficacité lumineuse

Notée η , l'efficacité lumineuse (ou rendement lumineux en lm/W) est le rapport du flux lumineux sur la puissance absorbée. Il caractérise l'ensemble des pertes de la source lumineuse :

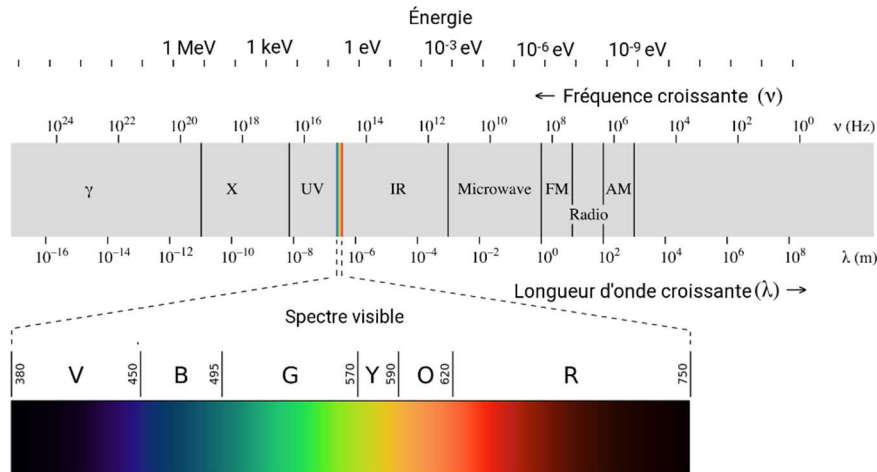
$$\eta = \frac{\Phi}{P_a}$$

Avec : η : efficacité lumineuse en lm/W
 Φ : flux lumineux en lm
 P_a : puissance consommée ou absorbée en W

4. Caractéristiques lumineuses

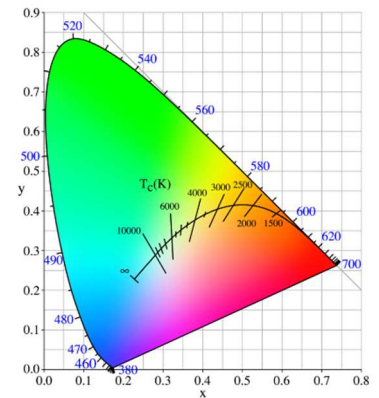
4.1. Spectre lumineux

Le **spectre lumineux visible** est la partie du spectre électromagnétique visible pour l'humain. Le spectre d'une lumière est le résultat de son analyse spectrale.



4.2. IRC

L'**indice de rendu de couleur**, ou **IRC**, rend compte de la capacité d'une source de lumière artificielle à restituer les nuances de couleur d'une surface. Compris entre 0 et 100, il est établi par rapport aux couleurs rendues avec une source de référence de même température de couleur. Ces deux facteurs, température de couleur et indice de rendu des couleurs, permettent de qualifier sommairement une source de lumière.



Classification des indices IRC

IRC > 90	Appréciation exacte des couleurs (galerie de peinture, examens cliniques, ...)
80 < IRC < 90	Eclairage agréable (habitations, hotels, magasins, écoles, ...)
60 < IRC < 80	Bon rendu des couleurs (ateliers sans problème de couleur)
50 < IRC < 60	Pas d'exigence de rendu des couleurs (fonderie, mécanique lourde, stockage, ...)

4.3. Température de couleur

La **température de couleur** caractérise une source de lumière par comparaison à un matériau idéal émettant de la lumière uniquement par l'effet de la chaleur.

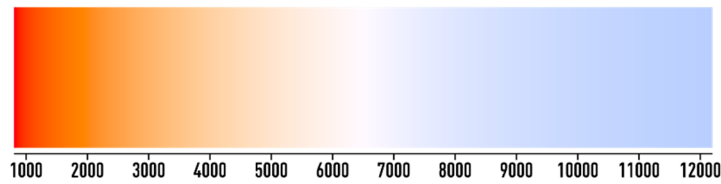


Figure 1 : Couleur du rayonnement d'un corps noir entre 800 et 12 000 K, pour un observateur en lumière du jour D65.

La température de couleur d'une source lumineuse est comparée à celle du corps noir qui absorberait tous les rayonnements, et n'émettrait que par effet thermique. La température de couleur d'un luminaire va d'environ 1 800 K pour une bougie à approximativement 10 000 K pour un arc électrique ; le rayonnement solaire direct a une température de couleur d'environ 5 500 K.

Plus la température de couleur est faible, plus la couleur est dite « chaude » et tire sur l'orange. Plus la température de couleur est grande, plus la couleur est dite « froide » et tire sur le bleuté.







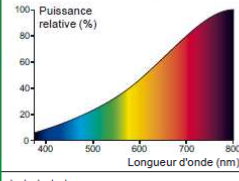
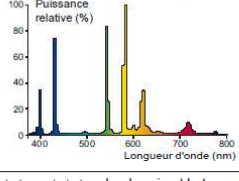
4.4. UGR




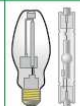
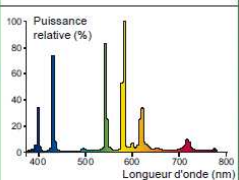
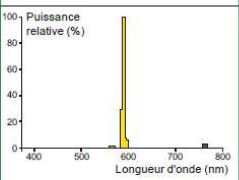
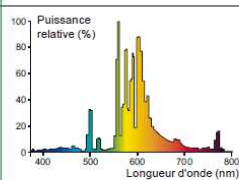
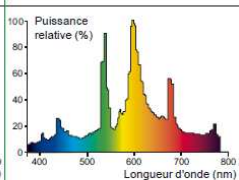
La valeur **UGR** (**Unified Glare Rating** en anglais) est une mesure pour mesurer le taux d'éblouissement produit par la luminosité dans un environnement précis. L'éblouissement étant définie par le CIE par les « conditions visuelles dans lesquelles il y a un contraste excessif ou une distribution inappropriée des sources lumineuses qui gêne l'observateur ou limite sa capacité à distinguer les détails et les objets ». Ainsi, l'éblouissement d'inconfort est mesuré par la méthode d'évaluation du taux d'éblouissement unifié UGR de la CIE.

La **norme EN 12464-1** donne une valeur maximale à ne pas dépasser pour chaque application. Ce nombre qui varie de 10 (plus faible) à 30 (plus élevé) est proportionnel au risque d'éblouissement.

Valeur UGR	Application
16	Dessins techniques, postes de travail CAO/DAO
19	Activités de bureaux
22	Espaces d'accueil
25	Salle d'archives, escaliers, ascenseurs
28	Zones de circulation

5. Caractéristiques des principaux types d'ampoules

Types de lampes		Lampes à incandescence			Lampes fluorescentes		LED
		 Lampes basiques	 Lampes halogène BT	 Lampes halogène TBT	 Lampes compactes fluorescentes	 Tubes fluorescents	 Diodes électro-luminescentes
Élément associé nécessaire au fonctionnement		-	-	Transformateur électromagnétique ou électronique	Ballast électronique intégré ou externe (idem tube fluorescent)	Ballast ferromagnétique + starter + éventuel condensateur ou ballast électronique	Driver électronique (intégré ou non)
L'application							
Puissance lumineuse d'une lampe (puissances les plus courantes)		400 à 1000 lm (40 à 100 W)	2000 à 10 000 lm (100 à 500 W)	400 à 1000 lm (20 à 50 W)	300 à 1600 lm (5 W à 26 W)	850 à 3500 lm (14 à 58 W)	Réseau de LED comparable aux lampes à incandescence ou fluorescentes (quelques watts par LED)
Efficacité lumineuse (Lm / W)		5 à 15	12 à 25		45 à 90	40 à 100	10 à 60 (en progrès constant)
Qualité de l'éclairage		Spectre lumineux Il détermine la qualité de la lumière (plus le spectre est plein, plus il se rapproche de la lumière du soleil) 					Spectre lumineux modulable
Rendu des couleurs		★★★★★			★★ ou ★★★ selon le prix et le type de lampe		Nombreuses possibilités de rendu et d'ambiance
Ambiance		Chaude			Variable de froid à assez chaude		
Installation	Hauteur	2 à 15 m		2 à 15 m	Moyenne	15 à 12 m	Nombreux cas de figures
	Remarques			Eclairage direct ou indirect		Montage suspendu, encastré ou en saillie	
Nombre de commutation (on / off)		★★★★ (élevé)			★★ (quelques fois par heure)		★★★★★ (Illimité)
Temps d'allumage		Instantané			Quelques secondes (quasiment instantané avec certains ballasts électroniques)		Instantané
Utilisation	Eclairage intérieur	■ Résidentiel, commerces, restaurants	■ Projecteur, spot, éclairage indirect dans les logements ou les commerces	■ Logement, ■ Commerces : spots, vitrines ■ Eclairage en lieu humide : salle de bain, piscine	■ Logement ■ Bureaux, hall ■ Commerces	■ Bureaux, écoles, salles blanches ■ Industrie : entrepôts, ateliers ■ Grandes surfaces : supermarchés, garages, commerces, gymnases	■ Actuellement : □ Feux routiers, panneaux de signalisation □ décoration, □ éclairage portatif ou isolé fonctionnant sur batterie.
	Eclairage extérieur				■ A l'abris, à l'entrée des bâtiments	■ Eclairage d'un cheminement piéton sur les ponts et les passerelles	■ En développement : □ en remplacement des lampes à incandescence ou fluorescentes
L'investissement initial							
La lampe	Fourchette de prix (puissances les plus courantes)	0,5 à 10 \$ (40 à 100 W)	5 à 30 \$ (100 à 500 W)	2 à 50 \$ (20 à 50 W)	2 à 50 \$ (5 à 26 W)	2 à 30 \$ (14 à 58 W)	10 à 20 \$ pour les lampes de substitution aux lampes à incandescence
	Prix maxi	25 \$	120 \$	55 \$	100 \$	70 \$	
Associated components		-	-	■ Transformateur : □ électronique : 10 à 50 \$ □ ferromagnétique : 7 à 20 \$	■ Ballast électronique : de 15 à 200 \$ ■ Ballast ferromagnétique : de 7 à 20 \$ + starter : de 0,5 à 15 \$		Driver électronique si externe : 15 à 200 \$
Le luminaire		Fourchette de prix	10 à 30 \$		15 à 60 \$		10 à 30 \$
L'exploitation et la maintenance							
Durée de vie	Fourchette	1000 à 2000 h	2000 à 4000 h		5000 à 20 000 h	7500 à 20 000 h	40 000 à 140 000 h
	Remarques	Durée de vie divisée par 2 en cas de surtension > 5%			50 % plus longue avec des ballasts électroniques externes par rapport au ballasts ferromagnétiques		Indépendante de la fréquence de commutation
Consommation moyenne pour émettre 10 000 lm pendant 10 h		10 kWh	5 kWh	5 kWh	1,7 kWh	1,7 kWh	2 kWh
Bilan							
Points forts ☺		☺ Allumage instantané			☺ Faible coût d'exploitation : peu de maintenance		☺ Très longue durée de vie
Points faibles ☹		☺ Possibilité de commutations fréquentes			☺ Economies d'énergie		☺ Insensible aux chocs et vibrations
		☹ Investissement réduit			☹ Ne supporte pas les commutations fréquentes		☺ Nombre de commutations non limité
		☹ Faible efficacité, 95 % de l'énergie dissipée sous forme de chaleur qui nécessite une bonne ventilation			☹ Les versions monotube avec ballast magnétique et les lampes compactes d'entrée de gamme génèrent un papillotement visible (flicker)		☺ Allumage instantané
		☹ Forte consommation			☹ Se substituent avantageusement aux lampes à incandescence		☹ Encombrement du transformateur
		☹ Coût d'exploitation élevé : maintenance fréquente			☹ Nécessite de nombreux luminaires, encombrement		
		☹ Encombrement du transformateur			☹ Peu esthétique en version		
Notes		Technologie destinée à régresser. Dans le cadre de programme d'économie d'énergie, certains pays (Australie, Californie, Canada, Cuba, Grande-Bretagne,...) planifient l'interdiction progressive des lampes à incandescence.			Technologie la plus répandue pour de très nombreux usages. Excellent rapport qualité/prix.		Technologie émergente

Types de lampes		Lampes à décharge, haute intensité			
		 Lampes à vapeur de mercure haute pression	 Lampes à vapeur de sodium basse pression	 Lampes à vapeur de sodium haute pression	 Lampes à iodures métalliques
Élément associé nécessaire au fonctionnement		Ballast ferromagnétique sans amorçeur	Ballast ferromagnétique + amorçeur + éventuel condensateur ou ballast électronique (pour lampe jusqu'à 150 W)		
L'application					
Puissance lumineuse d'une lampe (puissances les plus courantes)		3200 à 10 000 lm (80 à 250 W)	3900 à 20 000 lm (26 à 135 W)	7000 à 25 000 lm (70 à 250 W)	7000 à 40 000 lm (70 à 400 W)
Efficacité lumineuse (Lm / W)		30 à 65	110 à 200	40 à 140	70 à 120
Qualité de l'éclairage	Spectre lumineux Il détermine la qualité de la lumière (plus le spectre est plein, plus il se rapproche de la lumière du soleil)				
	Rendu des couleurs	★★	★	★★★	★★★★
	Ambiance	Blanc froid	Monochromatique orange	Dominante jaune	Dominante blanche
Installation	Hauteur	> 3 m	-	> 3 m	> 3 m
	Remarques		En hauteur ou au sol		
Nombre de commutation (on / off)		★ (quelques fois par jours)			
Temps d'allumage		Plusieurs minutes pour atteindre le niveau d'éclairement nominal.			
Utilisation	Eclairage intérieur	■ Industrie, entrepôts		■ Pour le sodium blanc seulement : centres commerciaux, entrepôts, hall	■ Centres commerciaux, hall, gymnases ■ Usines ateliers ■ Horticulture ■ Théâtre, scène
	Eclairage extérieur	■ Eclairage public ■ Docks	■ Tunnels, autoroutes ■ Eclairage de sécurité ■ Balisage de piste d'aéroport	■ Routes, monuments ■ Tunnels, aéroports, docks, parking, parcs	■ Rues piétonnes, stades ■ Eclairage de sécurité ■ Eclairage de chantier ■ Aéroport
L'investissement initial					
La lampe	Fourchette de prix (puissances les plus courantes)	8 à 30 \$ (80 à 250 W)	40 à 150 \$ (26 à 135 W)	20 à 90 \$ (70 à 250 W)	30 à 150 \$ (70 à 400 W)
	Prix maxi	200 \$ (1000 W)	170 \$ (180 W)	290 \$ (1 000 W)	500 à 1000 \$ (2000 W)
Associated components		■ Ballast électronique : de 80 à 400 \$ ■ Ballast ferromagnétique : de 20 à 200 \$ (fortes puissances : de 80 à 600 \$) + amorçeur : de 15 à 100 \$			
Le luminaire		Fourchette de prix : 100 à 200 \$			
L'exploitation et la maintenance					
Durée de vie	Fourchette	8 000 à 20 000 h	12 000 à 24 000 h	10 000 à 22 000 h	5 000 à 20 000 h
	Remarques	50% plus longue avec des ballasts électroniques externes par rapport au ballasts ferromagnétiques			
Consommation moyenne pour émettre 10 000 lm pendant 10 h		2,5 kWh	0,7 kWh	1 kWh	1 kWh
Bilan					
Points forts 🟢		🟢 Faible coût d'exploitation : peu de maintenance			
Points faibles 🔴		🟢 Economies d'énergie			
		🟢 Eclairage très puissant			
		🔴 Coût d'investissement élevé			
		🔴 Temps d'allumage long voire très long (de 2 à 10 minutes)			
		🟢 Fonctionnent jusqu'à -25°C en dégageant peu de chaleur			
Notes		En régression : remplacé par des lampes à vapeur de sodium haute pression ou à iodures métalliques	En régression	Technologie la plus utilisée dans l'éclairage public en extérieur	Tendance à remplacer avantageusement les lampes à vapeur de sodium haute pression

6. Eclairage par type de bâtiment / pièce

6.1. Eclairage par type de bâtiment

	Spécificités Type de lieu	Caractéristiques de la tâche visuelle (norme d'éclairage intérieur)	Caractéristiques de l'éclairage	Caractéristiques et type de luminaire	Gestion : lumière naturelle et présence
Bureaux	Bureau individuel	– $E_m^*=500lx$ – Ecran de visualisation (UGR<19) – IRC>80	Eclairage général Eclairage d'appoint	Système optique intensif et prix concurrentiel : encastrés, suspension, lampadaire	Importante : présence et lumière du jour
	Open space				Importante et modulable : présence et lumière du jour
Ecole	Salle de classe	– $E_m^*=500lx$ – UGR<19 – IRC>80	Eclairage général	Système optique intensif ou spécifique asymétrique pour tableau : encastrés, plafonniers, muraux fixés par potence	Importante : surtout lumière du jour
Hôpitaux	Salles blanches (étanche aux poussières)	– $E_m^*=500lx$ ou $1000lx$ – UGR<19 – IRC>90	Eclairage général Eclairage d'appoint	Étanche par le dessous du luminaire (IP54 ou IP65) : encastré, plafonnier	N'est pas la priorité
	Couloirs	– $E_m^*=200lx$ – UGR<22, le champ visuel peut être dirigé vers le haut (personnes alitées) – IRC>80	Eclairage général	Eclairage indirect : luminaire de corniche, applique, luminaire indirect	Important mais uniquement présence (pièce borgne)
	Salles de repos	– $E_m^*=300lx$ – UGR<19, le champ visuel peut être dirigé vers le haut (personnes alitées) – IRC>80	Eclairage général Eclairage d'appoint	Indirect pour ambiance et directif pour auscultation avec idéalement suspension directe indirecte double allumage	Importante : surtout lumière du jour
Salles de sport	Grande hauteur et chocs mécaniques	– Valeurs suivant sports et niveau de compétition (→ voir NF EN 12193) – Le champ visuel peut être dirigé vers le haut (smash)	Eclairage général	Résistant mécaniquement et de grande puissance : projecteurs, suspension, plafonnier	Importante : surtout lumière du jour
Usine	Grande hauteur et poussière	Suivant activité : – $E_m^*=200$ à $1000lx$ – UGR<19 à 25 – IRC>40 à 90	Eclairage général Eclairage d'appoint	Étanche et de grande puissance : projecteurs, suspension, plafonnier Appoint : variable suivant les besoins	Si lumière naturelle
Petits magasins	Faible hauteur	Zones de vente, suivant activité : – $E_m^*=300lx$ – UGR<22 – IRC>80	Eclairage général Eclairage d'accentuation	Eclairage général : downlight, suspension Eclairage d'accentuation : spots orientables intensifs encastrés ou sur rail (donc déplaçables)	N'est pas la priorité
Grands magasins	Grande hauteur	Zones de vente, suivant activité : – $E_m^*=300lx$ – UGR<22 – IRC>80	Eclairage général Eclairage d'accentuation	Eclairage général : ligne continue Eclairage d'accentuation : spots sur rail, éclairage vitrine, suspension asymétrique	Si lumière naturelle
Hôtels	Chambres	– $E_m^*=300lx$ – UGR<19 – IRC>80	Eclairage général Eclairage d'appoint Eclairage d'accentuation	Choix esthétique : suspension, applique, lampadaire, lampe de chevet...	Suivant parti pris architectural, lumière du jour

6.2. Eclairage par type de pièce

	Spécificités Type de lieu	Caractéristiques de la tâche visuelle (norme d'éclairage intérieur)	Caractéristiques de l'éclairage	Caractéristiques et type de luminaire	Gestion : lumière naturelle et présence
Toilettes	Lieu confiné Utilisation courte	– $E_m^*=200lx$ – $UGR<25$ – $IRC>80$	Eclairage général au plafond	Spot ou plafonnier LED étanche	Importante pour la présence (détecteur/minuterie)
Salle d'eau Lavabo	Lieu humide	– $E_m^*=200lx$ – $UGR<25$ – $IRC>80$	Eclairage général mural et au plafond	IP44 et classe II : réglette salle de bain au- dessus du miroir, downlight ou hublot au plafond	N'est pas la priorité
Escaliers	Géométrie complexe (verticale), lieu de passage, position de l'observateur très changeante	Champ visuel changeant suivant montée ou descente : – $E_m^*=150lx$ – $UGR<25$ – $IRC>80$	En sous face des escaliers et/ou sur les paliers	Luminaire à faible luminance et résistant mécaniquement type hublot	Importante pour la présence (fonction Corridor)
Couloirs	Géométrie allongée, lieu de passage	– $E_m^*=100lx$ – $UGR<25$ – $IRC>80$	Eclairage général au plafond	Luminaire encastré type spot ou downlight	Importante pour la présence (fonction Corridor)
Hall d'accueil	Lieu symbolique	– $E_m^*=100lx$ – $UGR<22$ – $IRC>80$	Peu d'exigences, priorité à l'esthétique	Luminaire à l'identité forte comme des suspensions ou des lampadaires	N'est pas la priorité
Cantines	Lieu convivial et exigeant	– $E_m^*=200lx$ – $UGR<22$ – $IRC>80$	Eclairage général au plafond	Luminaire esthétique et efficace, typiquement une suspension	Peut être intéressant pour la gradation en fonction de la lumière naturelle