

"Analyse énergétique des bâtiments" Notes de Cours  
Préparé par D. Mather

## **LT1 : ASPECTS DES SYSTÈMES D'ÉCLAIRAGE**

1. Introduction
2. Définitions générales
3. Luminaires
4. Flux d'énergie à travers un système d'éclairage simple
5. Calculs de la méthode Lumen
6. Références pour les "bonnes pratiques"

## **Aperçu du module**

Ce module présente des concepts sélectionnés dans la conception et l'analyse des systèmes d'éclairage intérieur, en mettant l'accent sur la performance énergétique.

Résultats d'apprentissage visés par le cours :

- Appliquer les calculs énergétiques de base à une variété de composants et de systèmes ayant un impact sur l'utilisation de l'énergie dans les bâtiments.
- Reconnaître les effets interactifs entre les différents composants et systèmes du bâtiment en ce qui concerne l'utilisation de l'énergie.

# 1. Introduction

Examinons les principaux objectifs de l'éclairage intérieur :

L'objectif de la conception est de répondre aux besoins des utilisateurs finaux pendant la durée de vie de l'installation - qui peut être de plusieurs années - en tenant compte des éléments suivants :

- Fournir l'éclairage nécessaire
- Coût raisonnable du capital
- Exigences raisonnables en matière d'entretien
- Coût énergétique raisonnable
- Intégration architecturale (apparence)
- Aménité visuelle (par exemple, esthétique de la lumière)
- Impacts sur l'environnement
- D'autres ?

qui comprend des dispositions pour :

- Performance visuelle
- Confort visuel
- Sécurité

qui sont affectées par :

- L'éclairement (par exemple, la "luminosité")
- Distribution/uniformité de la luminance
- Rendu des couleurs/apparence de la lumière
- Éblouissement
- Scintillement

Une brève discussion utile sur certaines de ces considérations :

Chapitres 2 et 3 de "Nonresidential Lighting & Electrical Power Distribution : A Guide to Meeting or Exceeding California's 2019 Building Energy Efficiency Standards"

California Lighting Technology Center, UC Davis, 2019.

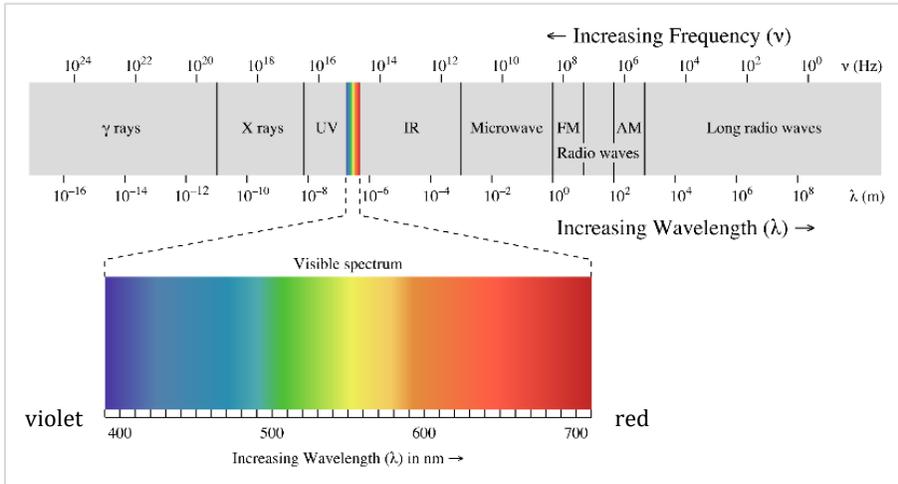
<https://cltc.ucdavis.edu/publication/nonresidential-lighting-electrical-power-distribution-guide-2019-building-energy>

*(Cette référence est facultative et n'est fournie qu'à titre d'information).*

## 2. Définitions générales

### Lumière

Énergie rayonnante évaluée visuellement (ondes/photons électromagnétiques)



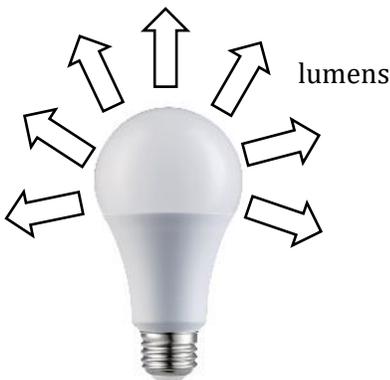
### Source lumineuse (par exemple, lampe ou réseau de LED)

- Convertit l'électricité en lumière (entrée = électricité, sortie utile = lumens)
- Peut être remplaçable (par exemple, une lampe), ou
- Peut être un composant intégral (c'est-à-dire permanent) d'un luminaire, par exemple un réseau de LED.

### Flux lumineux

Quantité totale de lumière visible produite (sortie) par une source lumineuse (dans toutes les directions).

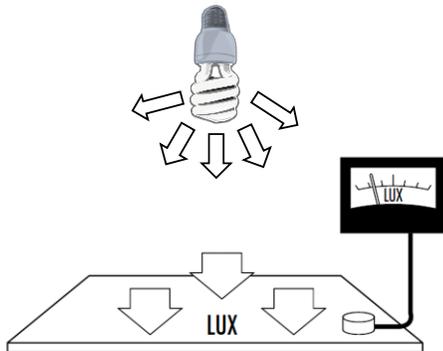
Unités de mesure = lumens (lm).



## L'intensité lumineuse

Flux lumineux incident sur une surface, par unité de surface.

Unités :            lux (lx)                            1 lx = 1 lm/m<sup>2</sup>  
                         footcandle (fc)                    1 fc = 1 lm/ft<sup>2</sup>



## Niveaux d'éclairage recommandés

L'"Illuminating Engineering Society" publie des niveaux d'éclairage recommandés pour différentes tâches.

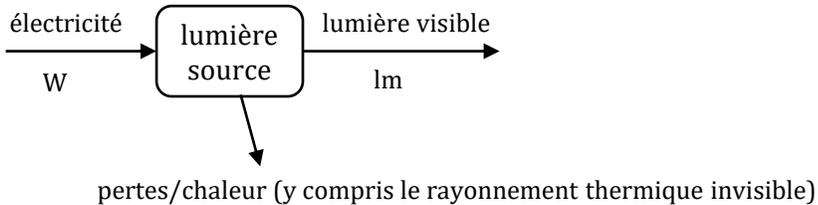
### Exemples de recommandations tirées du "IESNA Lighting Handbook" (9<sup>th</sup> Edition, 1999)

Catégorie	Type de tâche visuelle	fc	lux	Exemple Espace/Tâche
A	Tâches effectuées occasionnellement	3	30	Garage de stationnement
B	Orientation simple/visites courtes	5	50	Corridor
C	Espaces de travail/tâches simples	10	100	Restauration
D	Contraste élevé/grande taille	30	300	Bureau (général)
E	Contraste élevé/petite taille	50	500	Lecture/écriture
F	Faible contraste/petite taille	100	1,000	Rédaction manuelle
G	Seuil de vision de près	300 - 1k	3k - 10k	Salle d'opération

## Efficacité lumineuse

Pour une source lumineuse, rapport entre la lumière émise et la puissance électrique absorbée.

$$\text{luminous efficacy} = \frac{\text{lumens}}{\text{watts}} \quad \left( \frac{\text{output}}{\text{input}} \right)$$



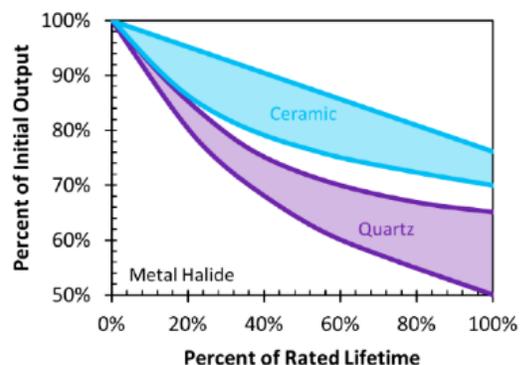
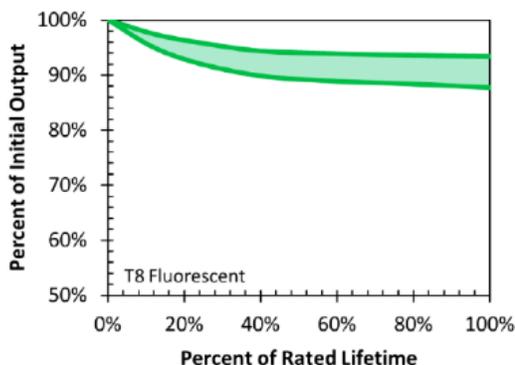
## Durée de vie nominale (d'une source lumineuse)

Durée de fonctionnement cumulée au bout de laquelle environ 50 % (d'une population importante) des lampes devraient être grillées.

## Amortissement du lumen / Entretien du lumen (d'une source lumineuse)

Se réfère à la diminution du flux lumineux d'une source lumineuse au fil du temps.

### Caractéristiques de maintien du flux lumineux pour des sources lumineuses sélectionnées



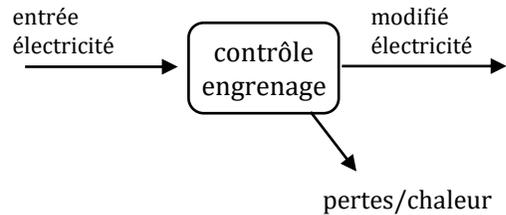
Reference: Michael Royer, "Lumen Maintenance and Light Loss Factors: Consequences of Current Design Practices for LEDs", September 2013, Pacific Northwest National Laboratory.

## Engrenage de contrôle

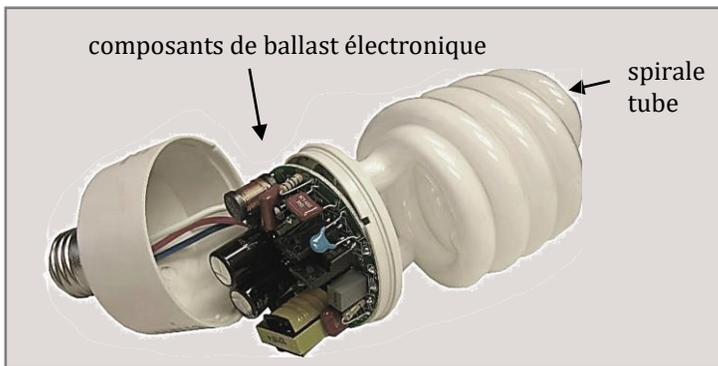
Un composant qui contrôle/adapte l'énergie électrique fournie à la source lumineuse, par exemple en modifiant la tension, la fréquence, etc. (Essentiellement un "adaptateur de puissance" pour les sources lumineuses qui ne peuvent pas être directement alimentées par le courant alternatif général). Nous pouvons considérer l'appareillage de commande comme un dispositif de conversion d'énergie.

Lampes à décharge (par exemple fluorescentes) = "ballast".

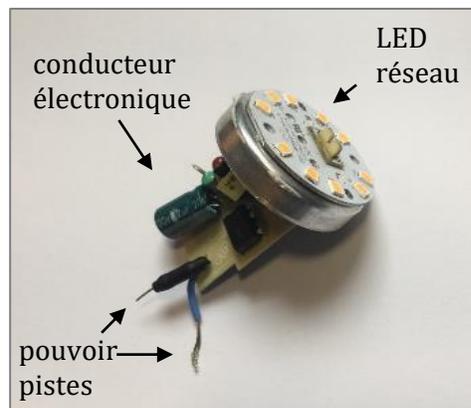
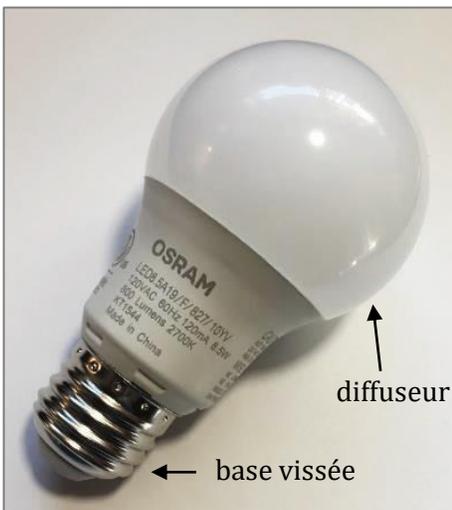
Pilote" de la matrice de LED



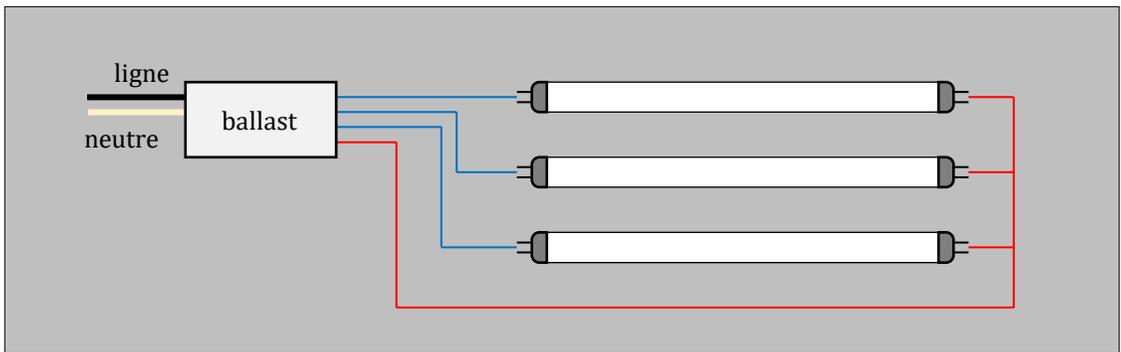
Lampe fluorescente compacte à visser :



Lampe LED à visser :

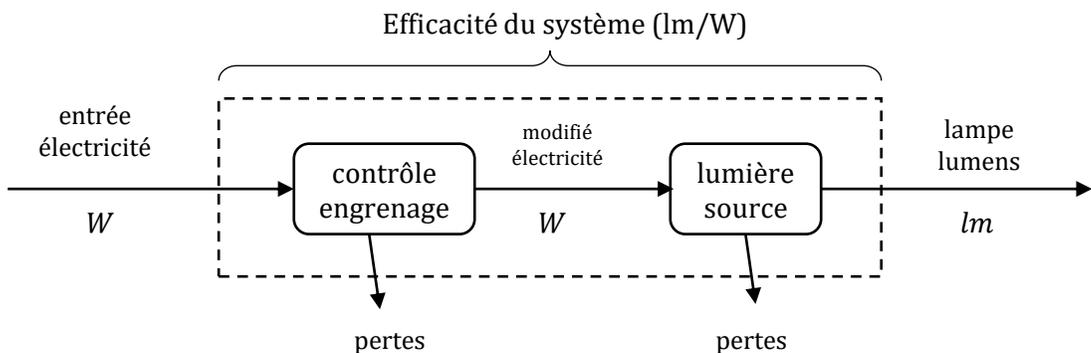


## Schéma de câblage : Lampes tubulaires fluorescentes avec ballast à 3 lampes



### Efficacité du système

Ce terme est parfois utilisé pour décrire le rapport entre les lumens produits par les sources lumineuses et la puissance électrique d'entrée du dispositif de commande.



### Densité de puissance lumineuse (LPD)

Consommation électrique totale (watts de circuit) de l'équipement d'éclairage installé par unité de surface. Cette consommation peut être évaluée pour un espace/une pièce particulier(e) ou pour l'ensemble d'un bâtiment.

Unités de mesure :  $W/m^2$  ou  $W/ft^2$ .

Exemple : Considérons une pièce d'une superficie de  $200 m^2$  et 35 luminaires (90 W chacun).

$$\text{Puissance totale} = 35 \times 90 \text{ W} = 3150 \text{ W}$$

$$\text{LPD} = 3150 \text{ W} \div 200 \text{ m}^2 = 15,8 \text{ W/m}^2$$

### 3. Luminaires

Un luminaire est un appareil qui :

- Distribue la lumière produite par une ou plusieurs sources lumineuses
- Fournit des moyens de fixation et de protection des sources lumineuses
- Fournit les moyens de connecter les sources lumineuses à l'alimentation électrique
- Peut comprendre un dispositif de contrôle

Il convient d'établir une distinction importante entre deux types de luminaires différents, que nous désignerons par la terminologie suivante :

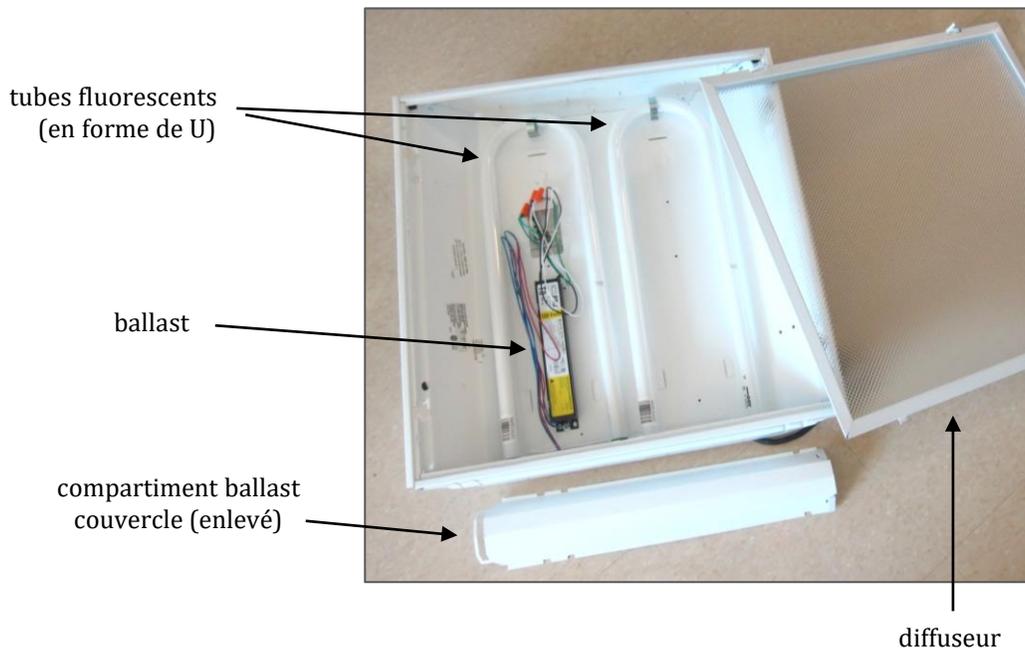
#### "Luminaire à source remplaçable

- Les lampes sont insérées dans des douilles qui font partie du luminaire. Les lampes peuvent être changées/remplacées (par exemple, lampes à incandescence, fluorescentes ou LED).

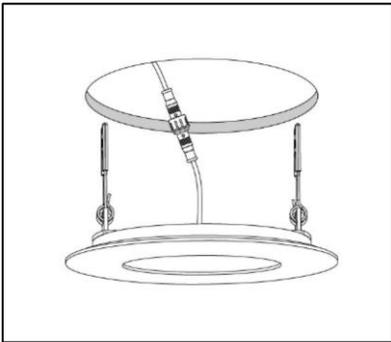
#### "Luminaire à source intégrale

- Les sources lumineuses font partie intégrante du luminaire. C'est le cas des luminaires à LED (par exemple, les émetteurs font partie du luminaire).

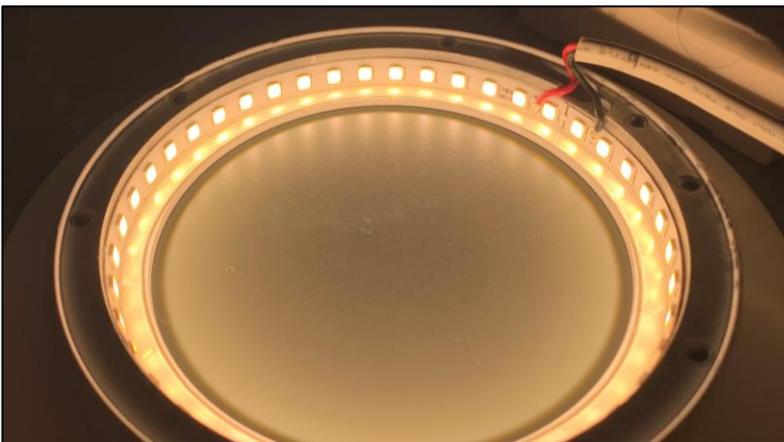
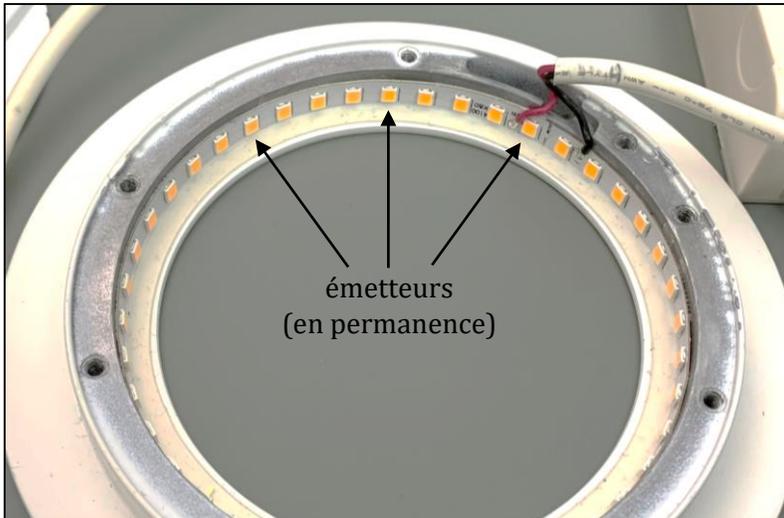
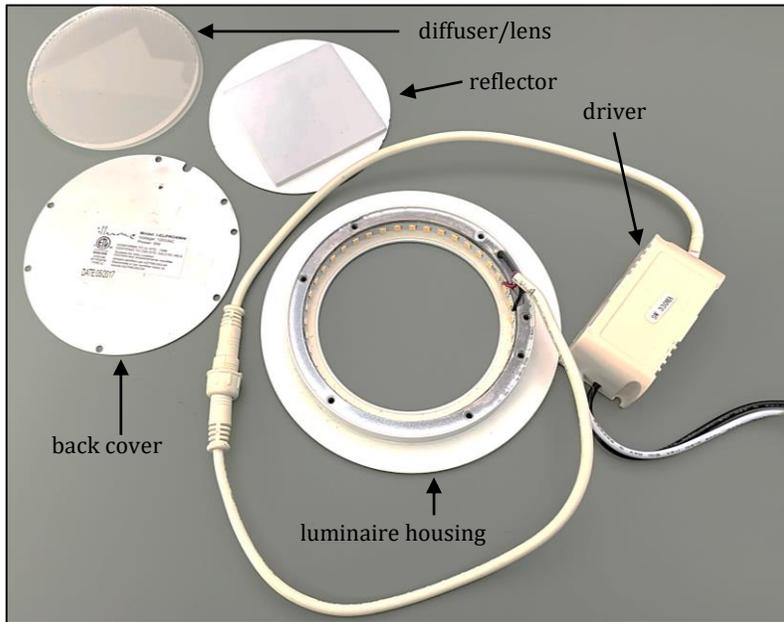
*Exemple de luminaire fluorescent de plafond :*



*Exemple de luminaire encastré avec réseau de LED intégré :*



*(suite page suivante)*



Remarque : le fond n'est pas conçu comme un indicateur de l'intensité lumineuse réelle (c'est-à-dire de la luminosité). Il a été capturé pour permettre de voir les émetteurs allumés. (La puissance réelle de chaque émetteur est "d'une intensité aveuglante").

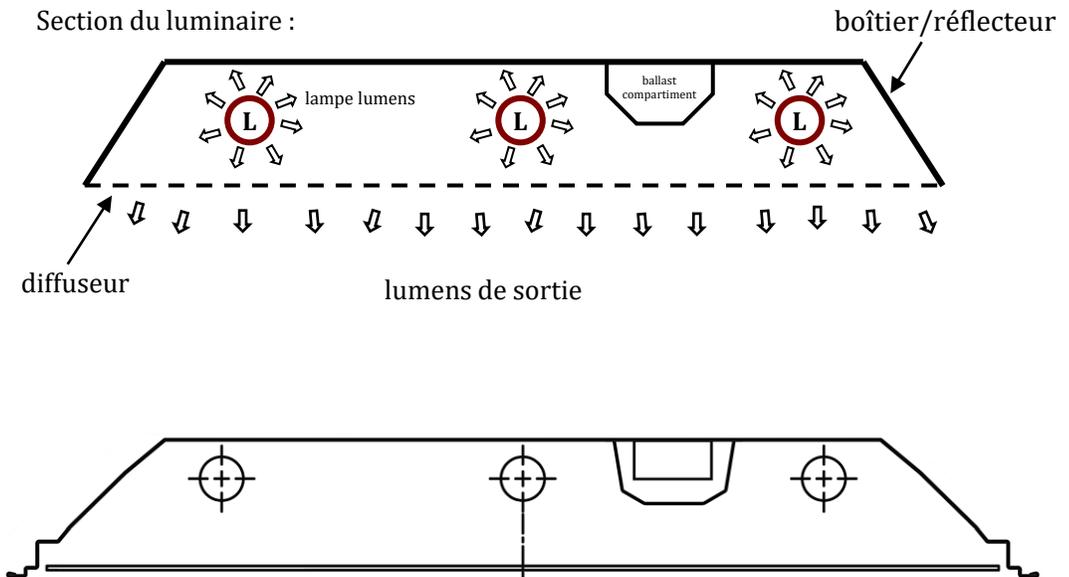
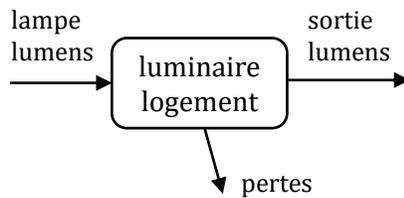
**Plus de définitions :**

**Efficacité des luminaires**

*Ce terme s'applique principalement aux luminaires à source remplaçable.*

Rapport entre le total des lumens sortant d'un luminaire et le total des lumens produits par les lampes qu'il contient.

$$\text{luminaire efficiency} = \frac{\text{output lumens}}{\text{lamp lumens}}$$



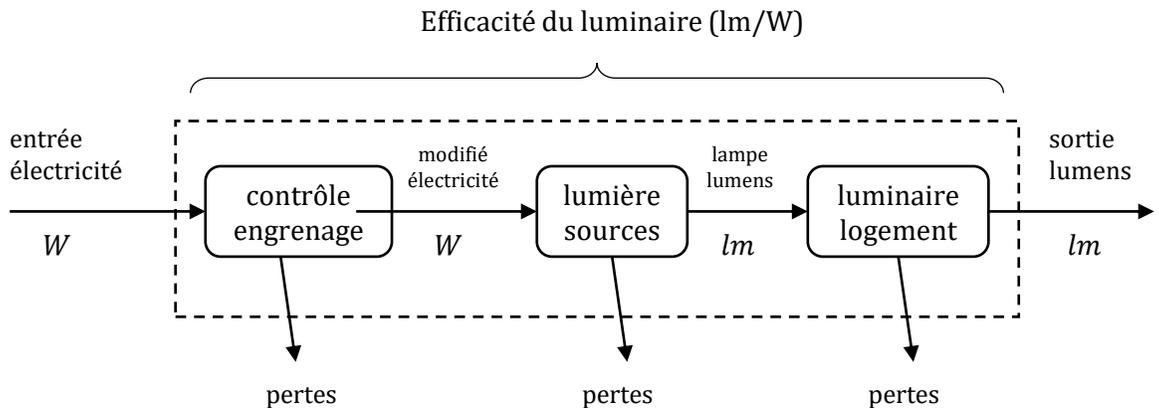
*Note : Dans les cas où il est nécessaire de mentionner l'efficacité d'un luminaire à source intégrale, celle-ci est considérée comme étant de 100 %.*

## Efficacité du luminaire

Ce terme s'applique à la fois aux luminaires à source intégrale et aux luminaires à source remplaçable.

Rapport entre le nombre total de lumens sortant d'un luminaire et la puissance électrique qui lui est fournie.

$$\text{luminaire efficacy} = \frac{\text{output lumens}}{\text{input electricity}} \left( \frac{\text{lm}}{\text{W}} \right)$$



*A part :*

Si nous devons utiliser la nomenclature :

$\phi$  = lumens de la lampe = lm

$\chi$  = lumens de sortie = lm

$\dot{W}_{el}$  = électricité consommée = W

$\varepsilon_s$  = efficacité du système =  $\phi / \dot{W}_{el}$  = lm/W

$\eta_L$  = efficacité du luminaire =  $\chi / \phi$  = sans dimension (ou %)

$\varepsilon_L$  = efficacité du luminaire =  $\chi / \dot{W}_{el}$  = lm/W

Ensuite :

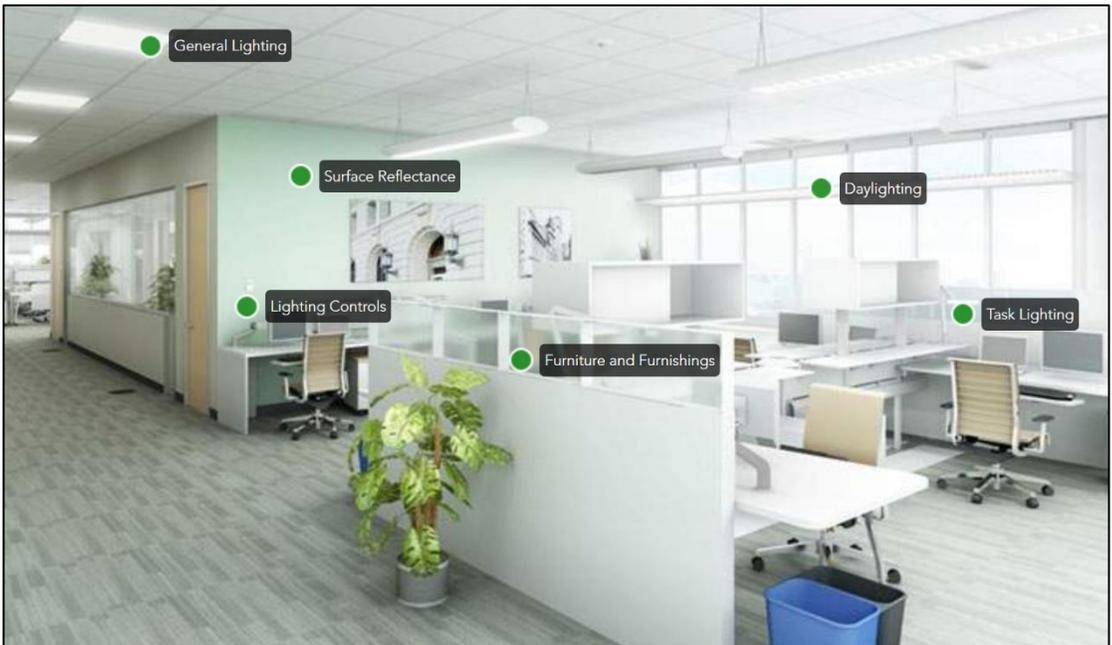
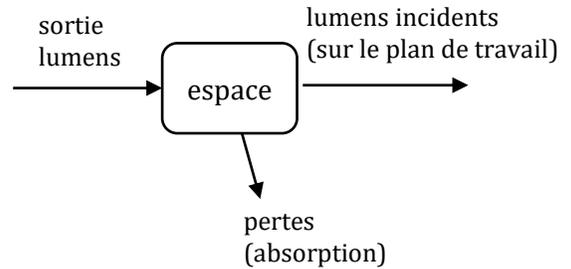
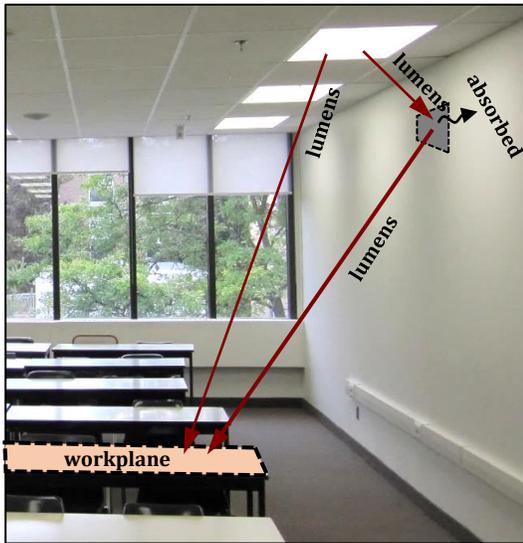
$$\varepsilon_L = \varepsilon_s \cdot \eta_L = \left( \frac{\phi}{\dot{W}_{el}} \right) \left( \frac{\chi}{\phi} \right) = \frac{\chi}{\dot{W}_{el}}$$

*(Fin de l'aparté)*

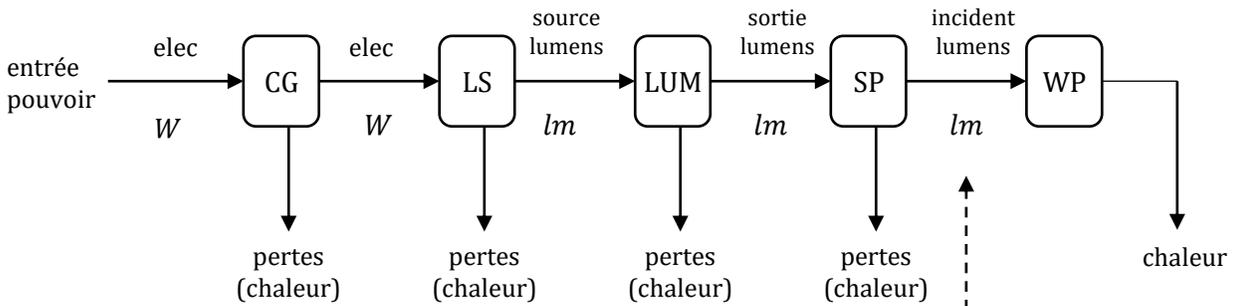
## 4. Flux d'énergie à travers un système d'éclairage simple

Les lumens émis par les luminaires pénètrent dans l'espace éclairé. Une partie d'entre eux peut être absorbée par les surfaces (par exemple, les murs, le mobilier) avant d'atteindre la surface cible/le plan de travail. Les finitions de la pièce (par exemple, les couleurs de peinture, la réflectance des surfaces) et d'autres facteurs ont un impact important sur l'absorption par ces surfaces.

On peut considérer que l'espace a une efficacité dans la transmission des lumens de sortie vers la cible visée.



## Diagramme simplifié des flux d'énergie pour un système d'éclairage



CG = organe de commande

LS = source lumineuse (lampes)

LUM = boîtier du luminaire

SP = espace (c'est-à-dire la pièce)

WP = plan de travail (c'est-à-dire cible)

Remarque : nous pourrions diviser les lumens incidents en "éclairage utile" + "éclairage excédentaire"

## 5. Calculs de la méthode Lumen

### "La méthode Lumen

- Pour un éclairage horizontal moyen cible, la méthode peut être utilisée pour déterminer le nombre de luminaires nécessaires.
- Il s'agit d'une méthode très simplifiée applicable à un éclairage général, uniforme et axé sur les tâches. Les hypothèses simplificatrices sont les suivantes
  - Pièce fermée, intérieure, rectangulaire.
  - Surfaces à réflexion diffuse (murs, plafonds, etc.).
  - Espacement uniforme des luminaires et utilisation d'un seul type de luminaire.
  - La pièce est vide.

Note : La méthode a été développée à l'origine pour les luminaires à source remplaçable (RSL), mais elle peut être adaptée aux luminaires à source intégrée (ISL). Dans la discussion qui suit, la méthode sera d'abord présentée sur la base de l'application aux RSL, puis les modifications pour l'appliquer aux ISL seront discutées.

### La méthode Lumen : Luminaires à source remplaçable

Équation de l'éclairage :

$$\phi_T = \frac{E \cdot A}{C_U \cdot L_{LF}}$$

$\phi_T$  = Total des lumens de la source initiale (lm)

$E$  = Éclairage moyen maintenu sur le plan de travail (lux)

$A$  = Surface du plan de travail (m<sup>2</sup>)

$C_U$  = Coefficient d'utilisation (sans dimension)

$L_{LF}$  = Facteur de perte de lumière (sans dimension)

$\phi_T$  (lm)

Total des lumens produits par toutes les sources dans tous les luminaires, lorsqu'ils sont neufs (c'est-à-dire les lumens initiaux).

$$\phi_T = N \cdot n \cdot F$$

$N$  = nombre de luminaires

$n$  = nombre de lampes par luminaire

$F$  = flux lumineux par lampe (lm), à l'état neuf

Note : Le flux lumineux initial total produit par toutes les lampes d'un luminaire =  $n \cdot F$  .

$C_U$  (dimensionless)

Indicateur de l'efficacité globale du luminaire et de la pièce à fournir des lumens au plan de travail. Cette valeur est influencée par

- les caractéristiques du luminaire (y compris l'efficacité), et
- Caractéristiques de la pièce, notamment la géométrie (par exemple, le "ratio de cavité de la pièce") et la réflectance des surfaces (par exemple, le plafond, les murs, le sol).

Exemple de données sur le coefficient d'utilisation d'un luminaire particulier

**2GT8 3 32 A12 1/3**

**Report LTL 7421**

**Lumens per lamp - 2850 – Lum. eff. - 80.1%**

**S/MH (along) 1.2 (across) 1.4**

**Coefficient of Utilization**

Ceiling	80%			70%			50%		
Wall	70%	50%	30%	70%	50%	30%	50%	30%	10%
0	95	95	95	93	93	93	89	89	89
1	88	84	81	85	82	79	79	76	74
2	80	74	69	78	72	68	70	66	62
3	74	66	59	72	64	58	62	57	53
4	68	58	52	66	57	51	55	50	46
5	62	52	45	61	52	45	50	44	40
6	58	47	40	56	47	40	45	39	35
7	54	43	36	52	42	36	41	35	31
8	50	39	33	49	39	32	38	32	28
9	47	36	30	45	36	29	35	29	25
10	44	33	27	43	33	27	32	27	23

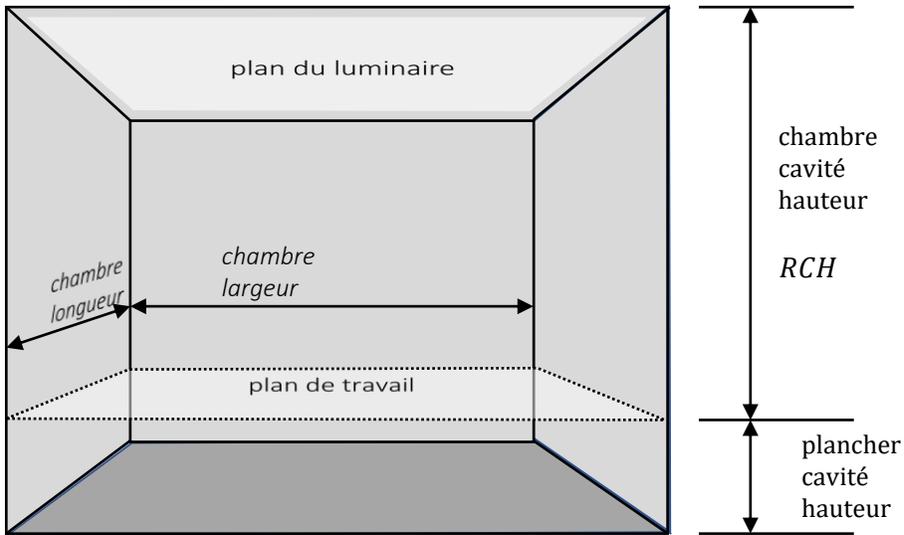
RCR

luminaire  
l'efficacité  
est indiquée

Diviser la valeur  
tabulée par 100  
pour déterminer  
 $C_U$

Remarque : par défaut, la réflectance du sol est de 20 %.

$$\text{Rapport entre la pièce et la cavité} = RCR = \frac{5 \cdot RCH \cdot (L + W)}{L \cdot W}$$



$L_{LF}$  (sans dimension)  $0 < L_{LF} \leq 1$

Facteur d'ajustement tenant compte des conditions susceptibles d'affecter les performances du système au fil du temps, telles que

- la dépréciation du flux lumineux de la source lumineuse ; l'épuisement de la lampe
- dépréciation de la saleté des luminaires ; dépréciation de la saleté de la surface de la pièce

par exemple  $L_{LF} = SLMF \cdot LSF \cdot LMF \cdot RSMF$

$SLMF$  = source lumen facteur de maintenance

$LSF$  = facteur de survie de la lampe

$LMF$  = facteur d'entretien du luminaire

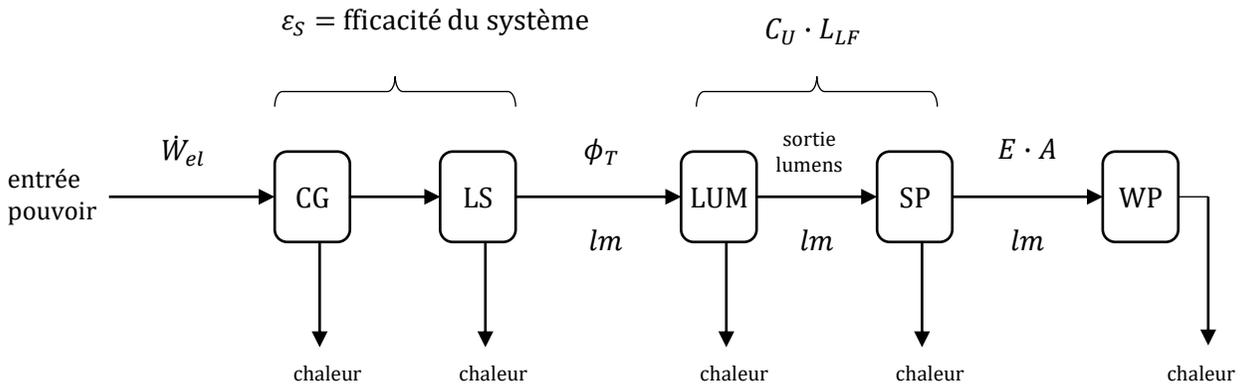
$RSMF$  = facteur d'entretien de la surface de la pièce

Un concepteur s'appuiera sur des manuels de conception, des avis techniques et d'autres informations pour sélectionner les valeurs appropriées à une application particulière.

Outil en ligne pour les calculs de la méthode Lumen :

<https://www.visual-3d.com/tools/interior/>

Visualisation de l'équation d'éclairage (pour un luminaire à source remplaçable)



$$\phi_T = \frac{E \cdot A}{C_U \cdot L_{LF}}$$

$$\dot{W}_{el} = \frac{\phi_T}{\epsilon_S} = \frac{E \cdot A}{\epsilon_S \cdot C_U \cdot L_{LF}}$$

## La méthode Lumen : Luminaires à source intégrale

Pour un ISL, il n'y a pas de mesure des lumens "à l'intérieur" du luminaire. Au lieu de cela, la seule mesure des lumens est celle de la sortie du luminaire (c'est-à-dire ceux qui quittent le luminaire). La signification de  $\phi_T$  doit donc être mise à jour si nous voulons continuer à utiliser la même équation d'éclairage. Ainsi, sera désormais considéré comme le *total des lumens initiaux du luminaire* (c'est-à-dire les lumens de sortie de tous les luminaires).

$$\phi_T = \text{total initial luminaire lumens (lm)} = N \cdot D$$

$N$  = number of luminaires

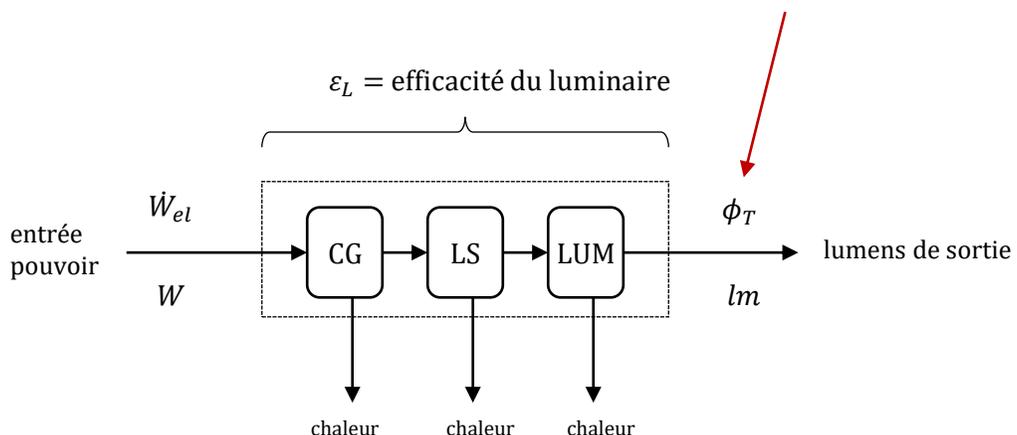
$D$  = initial delivered (output) lumens per luminaire, lm

Avec cette modification, l'équation d'éclairage reste la même :

$$\phi_T = \frac{E \cdot A}{C_U \cdot L_{LF}}$$

(Remarque : dans le diagramme précédent, les lumens de sortie du luminaire seraient égaux aux lumens de source si l'efficacité du luminaire était de 100 %. C'est la raison pour laquelle l'efficacité du luminaire est définie à 100 % pour les ISL, simplement pour que la procédure de calcul fonctionne).

Adaptation de l'équation d'éclairage à une ISL



## 6. Références pour "Bonnes pratiques"

Il existe toute une série de codes, de normes et de lignes directrices en matière d'efficacité énergétique qui donnent aux concepteurs des indications sur les "bonnes pratiques" à suivre pour certains aspects de la conception des bâtiments.

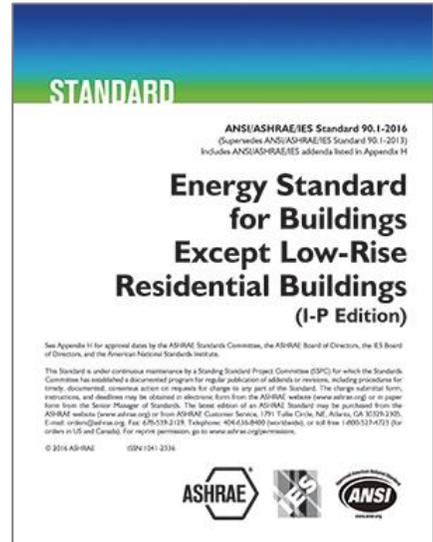
"Bonne pratique" = niveau minimum de performance que l'on peut généralement atteindre pour la plupart des scénarios de conception grâce à l'utilisation de systèmes, d'équipements, de techniques de conception, etc. qui sont généralement disponibles.

Note : "Bonne pratique" ≠ "Meilleure pratique".

### Exemple

ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2016, "Energy Standard for Buildings, Except Low-Rise Residential Buildings" (norme énergétique pour les bâtiments, à l'exception des bâtiments résidentiels de faible hauteur).

- En ce qui concerne l'éclairage : "Bonnes pratiques vers 2016 : niveaux d'éclairage ciblés, efficacité raisonnable des luminaires.



### Exemple d'allocations de densité de puissance d'éclairage pour un "type d'espace" selon ASHRAE 90.1-2016

Type d'espace	LPD, W/m <sup>2</sup>
Salle de classe	9.9
Corridor	7.1
Salle de réunion	11.5
Bureau (privé)	10.0
Bureau (ouvert)	8.7
Toilettes	9.1
Cage d'escalier	6.2

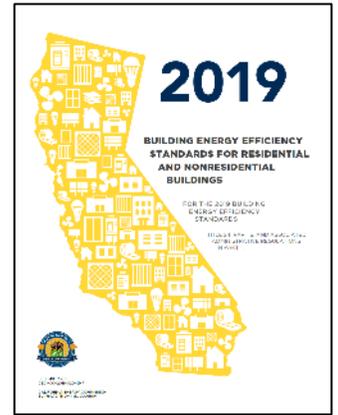
## Exemple

"Normes d'efficacité énergétique pour les bâtiments résidentiels et non résidentiels (2019)"

Commission californienne de l'énergie, 2018.

<https://www.energy.ca.gov/publications/2008/2019-building-energy-efficiency-standards-residential-and-nonresidential>

[https://www.energy.ca.gov/sites/default/files/2021-06/CEC-400-2018-020-CMF\\_0.pdf](https://www.energy.ca.gov/sites/default/files/2021-06/CEC-400-2018-020-CMF_0.pdf)

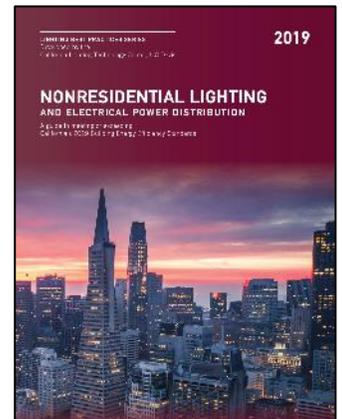


"Éclairage non résidentiel et distribution d'énergie électrique : Un guide pour atteindre ou dépasser les normes californiennes d'efficacité énergétique des bâtiments de 2019".

California Lighting Technology Center, UC Davis, 2019.

<https://cltc.ucdavis.edu/publication/nonresidential-lighting-electrical-power-distribution-guide-2019-building-energy>

<https://cltc.ucdavis.edu/publication-type/guides>



The original versions of the tables in this section can be found in the **2019 Energy Standards for Residential and Nonresidential Buildings**. These tables are used for determining what is required for compliance with the Energy Code and in the process of calculating lighting energy budgets.

**Table 140.6-B:**  
**Complete Building Method Lighting Power Density Values (W/ft<sup>2</sup>)**

Type of Use	Allowed Lighting Power
Assembly Building	0.7
Financial Institution Building	0.65
Industrial/Manufacturing Facility Building	0.6
Grocery Store Building	0.95
Gymnasium Building	0.65
Library Building	0.7
Healthcare Facility	0.9
Office Building	0.65
Parking Garage Building	0.12