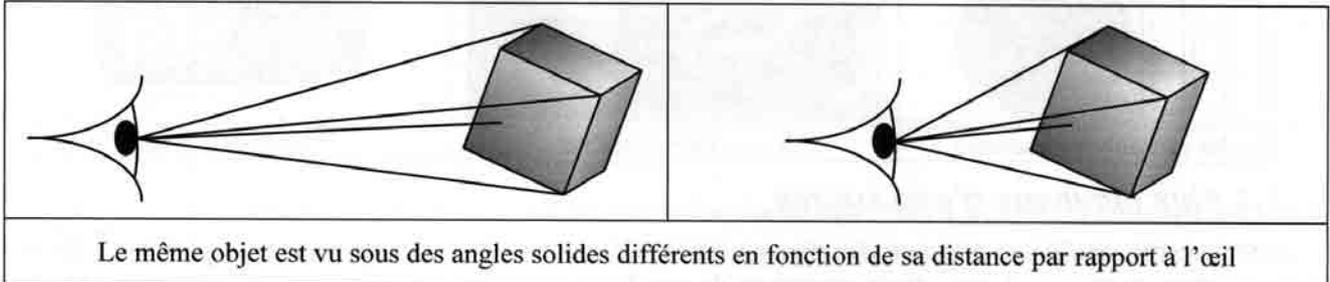


Éléments de photométrie

1. NOTIONS GÉNÉRALES DE PHOTOMÉTRIE VISUELLE

1.1. L'angle solide

Lorsque l'on observe un objet, il apparaît plus ou moins gros en fonction de sa distance par rapport à l'œil, alors que sa taille ne varie pas. La notion d'angle solide permet de quantifier ce fait observationnel, plus un objet est proche de l'œil et plus l'angle solide sous lequel il est vu est grand :



L'angle solide (généralement noté Ω) correspond à un angle en deux dimensions. Son unité pourrait être le radian², mais on le mesure dans une unité appelée le stéradian [sr].

Exemple : notre Soleil (de diamètre $1,39 \cdot 10^9$ m) est vu depuis la Terre (distance Terre-Soleil : $1,5 \cdot 10^{11}$ m) sous un angle solide $\Omega = 6 \cdot 10^{-5}$ sr.

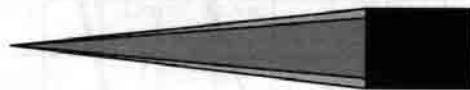


Remarque : un angle solide prend ses valeurs dans l'intervalle $[0 ; 4\pi]$

La notion d'angle solide est particulièrement importante pour une source lumineuse car elle permet de définir la portion de l'espace qui sera atteinte par les rayons lumineux. L'angle solide se matérialise par une forme conique ou pyramidale (si $\Omega < 2\pi$ sr) dont le sommet se situe au niveau de la source. Donnons quelques exemples :



Angle solide d'émission d'une lampe torche

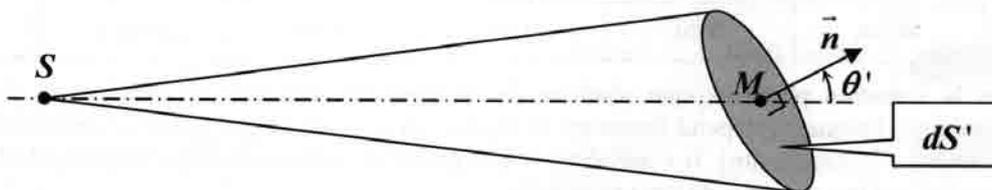


Angle solide d'émission d'un vidéoprojecteur

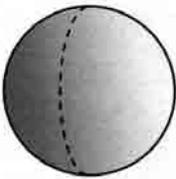
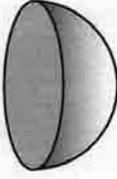
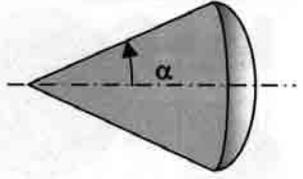
La définition mathématique de l'angle solide est donnée par la formule suivante :

$$d\Omega = \frac{\cos \theta' dS'}{R^2}$$

- $d\Omega$ désigne l'angle solide élémentaire sous lequel est vue la surface dS' [sr]
- dS' désigne l'élément de surface [m^2]
- θ' désigne l'angle entre la normale à la surface dS' et la direction SM [rad]
- R désigne la distance SM [m]

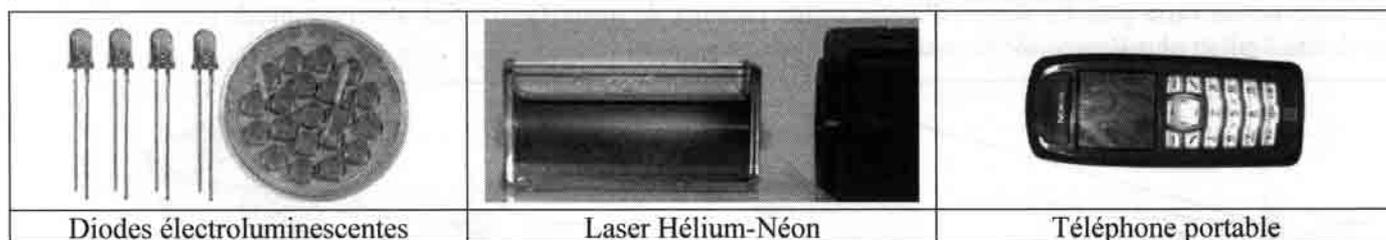


Dans la pratique, nous n'envisagerons que quelques cas particuliers d'angles solides :

| | Espace complet | Demi-espace | Cône de demi angle au sommet α |
|-------------------------|---|--|---|
| Angle solide courant | $\Omega = 4\pi$ sr | $\Omega = 2\pi$ sr | $\Omega = 2\pi(1 - \cos\alpha)$ sr |
| Forme de l'angle solide |  |  |  |

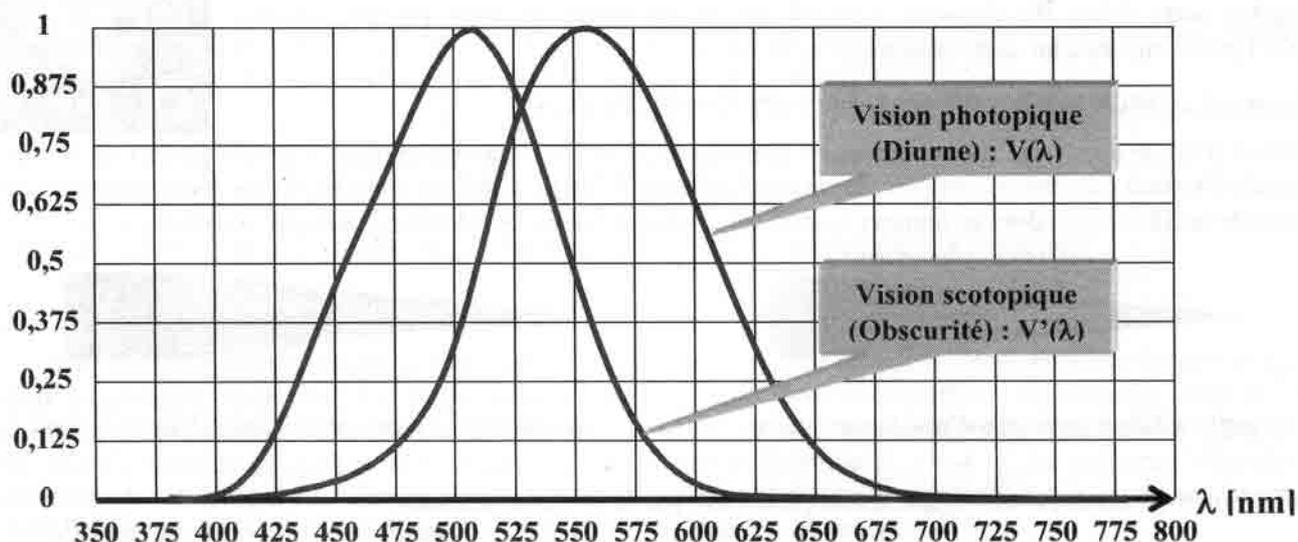
1.2. Flux énergétique d'une source électromagnétique

Le flux énergétique représente la puissance totale émise sous forme d'ondes électromagnétiques par une source. Il se mesure en watt. Des sources électromagnétiques émettant dans des domaines de longueur d'onde différents peuvent avoir le même flux énergétique (par exemple 2 watts) :



1.3. Flux lumineux d'une source

En photométrie visuelle, le détecteur de référence est l'œil. Ce dernier se comporte comme un filtre vis à vis des ondes électromagnétiques. Il possède un maximum de sensibilité situé vers $\lambda = 555$ nm en vision diurne (vision photopique), tandis que dans l'obscurité ce maximum se situe vers $\lambda = 507$ nm (vision scotopique). Le schéma suivant donne les courbes $V(\lambda)$ et $V'(\lambda)$ de sensibilité spectrale de l'œil pour les deux visions :



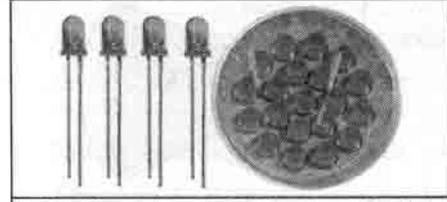
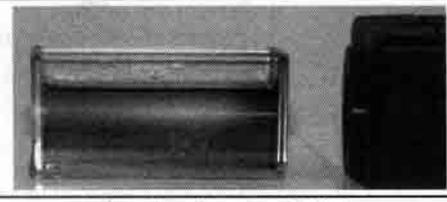
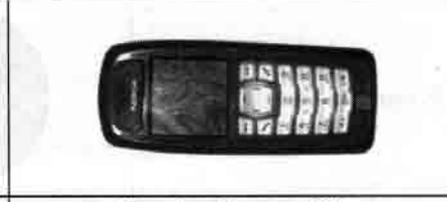
Rappelons l'équivalence entre les plages de longueur d'onde et la couleur perçue par l'œil :

| λ [nm] | 400-420 | 440-490 | 500-550 | 560-580 | 590-630 | 640-800 |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Couleur | violet | bleu | vert | jaune | orange | rouge |

Afin de traduire la sensation physiologique résultant de la sensibilité spectrale de l'œil (pour un même flux énergétique la sensation lumineuse dépend fortement de la couleur), on est amené à définir une unité pour le flux lumineux d'une source : le lumen [lm]. Il s'agit donc d'une grandeur dérivée du flux énergétique et adaptée à la vision photopique de l'œil humain prise comme référence.

Par définition : pour la longueur d'onde $\lambda = 555$ nm, un flux énergétique de 1 W correspond à un flux lumineux de 683 lm. Pour les autres longueurs d'onde, il faut multiplier par la valeur de $V(\lambda)$ correspondante (valeur lue sur la représentation graphique). En dehors de l'intervalle [350 nm ; 800 nm], les valeurs de $V(\lambda)$ seront prises nulles.

Des sources électromagnétiques de même flux énergétique (par exemple 2 watts) peuvent ainsi avoir des flux lumineux très différents en fonction des longueurs d'ondes émises :

| | | |
|---|--|---|
|  |  |  |
| Flux lumineux : 90 lm (par diode) | Flux lumineux : 394 lm | Flux lumineux : 0 lm |
| $\lambda \in [350 ; 800]$ | $\lambda = 631,5$ nm | $\lambda \sim 1$ cm |

Nous allons rencontrer dans les paragraphes suivants différentes grandeurs physiques utilisées en photométrie. Le tableau suivant récapitule les systèmes d'unités énergétiques et lumineuses de ces grandeurs :

| Grandeurs physiques | Unités énergétiques | Unités lumineuses |
|-------------------------|-------------------------------------|--------------------|
| Flux : Φ | W | lumen [lm] |
| Intensité lumineuse : I | W.sr ⁻¹ | candela [cd] |
| Éclairement : E | W.m ⁻² | lux [lx] |
| Luminance : L | W.m ⁻² .sr ⁻¹ | cd.m ⁻² |
| Émittance : M | W.m ⁻² | lm.m ⁻² |

1.4. Efficacité lumineuse d'une source

L'efficacité lumineuse d'une source permet d'obtenir le flux énergétique émis à partir de la puissance électrique absorbée :

$$\Phi = k.P_{elec}$$

- Φ désigne le flux lumineux émis par la source [lm]
- k désigne l'efficacité lumineuse de la source [lm.W⁻¹]
- P_{elec} désigne la puissance à laquelle la source consomme l'énergie électrique [W]

Remarque : l'efficacité lumineuse est parfois désignée par e_l .

Pour un flux lumineux donné, l'efficacité lumineuse déterminera donc la puissance électrique à laquelle l'énergie sera absorbée. Sa valeur doit donc être la plus importante possible tant pour l'éclairage urbain que domestique. Signalons à titre d'exemple que le seul boulevard périphérique parisien ne compte pas moins de 142057 sources lumineuses ! Donnons quelques exemples d'efficacité lumineuses pour des sources lumineuses couramment rencontrées :

| Lampe | Principales utilisations | Efficacité lumineuse classique | Couleur | Durée de vie | Photographie |
|--|---|--------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|---|
| Notre Soleil | Très diverses ! | 250 lm.W ⁻¹ | Dépend de l'heure de la journée ! | Environ 5 milliards d'années |  |
| Incandescence classique | Usages domestiques | 8 à 13 lm.W ⁻¹ | Blanc-jaune | 1000 heures |  |
| Incandescence type halogène | Usages domestiques | 15 lm.W ⁻¹ | Blanc | 2000 à 6000 heures |  |
| Tube fluorescent (à vapeur de mercure) | Usages domestiques et locaux industriels | 40 à 100 lm.W ⁻¹ | Blanche | 12 000 heures |  |
| Lampe à vapeur de sodium basse pression | Autoroutes, tunnels | 190 lm.W ⁻¹ | Jaune | 8000 heures |  |
| Lampe à vapeur de sodium haute pression | Éclairage urbain | 120 lm.W ⁻¹ | Jaune | 10 000 à 12 000 heures |  |
| Lampe à vapeur de mercure | Terrain de sport | 40 à 100 lm.W ⁻¹ | Blanc-bleu | 4 000 à 12 000 heures |  |
| Lampes fluorescentes (à vapeur de mercure) | Usages domestiques | 60 lm.W ⁻¹ | Blanc | 12 000 à 18 000 heures |  |
| Lampe à induction | Usages domestiques | 80 lm.W ⁻¹ | Blanc | 60 000 heures |  |
| Lampe xénon | Automobile, projecteurs de films | 15 à 30 lm.W ⁻¹ | Blanc | 1000 heures |  |
| Diodes électroluminescentes | Feux rouges, nombreuses applications à venir... | 45 lm.W ⁻¹ | Rouge, vert, jaune et blanc | 100 000 heures |  |

1.5. Intensité lumineuse dans une direction de l'espace

L'intensité lumineuse détermine le flux lumineux émis par unité d'angle solide dans une direction déterminée :

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

- I désigne l'intensité lumineuse rayonnée dans $d\Omega$ [cd]
- $d\Phi$ désigne le flux lumineux élémentaire émis dans $d\Omega$ [lm]
- $d\Omega$ désigne l'angle solide élémentaire [sr]

La notion d'intensité lumineuse se comprend facilement si l'on envisage le cas des sources comportant des déflecteurs (surfaces réfléchissantes et entourant partiellement la source). Le but de ces derniers est de limiter l'angle solide d'émission pour un même flux lumineux émis. L'intensité lumineuse est ainsi plus grande dans l'espace restreint de la propagation.



La même source lumineuse, quand elle est munie d'un déflecteur, permet d'augmenter l'intensité lumineuse dans une direction donnée

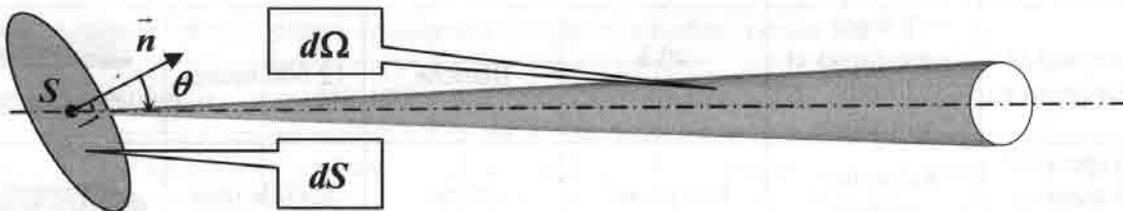
La donnée de l'intensité lumineuse dans toutes les directions de l'espace permet de définir la surface indicatrice d'une source. Elle représente le diagramme angulaire de l'intensité lumineuse rayonnée. Nous en verrons des exemples appliqués aux §3 et §4 de ce chapitre. Notons qu'une source isotrope rayonne une intensité lumineuse identique dans toutes les directions de l'espace.

1.6. Luminance d'une source étendue

En termes simples la luminance traduit la sensation lumineuse d'une surface telle qu'elle est perçue par l'œil :

$$L = \frac{d^2\Phi}{\cos\theta d\Omega dS}$$

- L désigne la luminance de la source [cd.m^{-2}]
- $d^2\Phi$ désigne le flux lumineux élémentaire émis dans $d\Omega$ par la surface émettrice dS [lm]
- θ désigne l'angle entre la normale à la surface dS et l'axe de l'angle solide élémentaire $d\Omega$ [rad]
- $d\Omega$ désigne l'angle solide élémentaire [sr]
- dS désigne la surface élémentaire d'émission [m^2]



Remarque : lorsque L ne dépend pas de θ , la source suit la loi de Lambert. Cette loi sera étudiée dans le §3 de ce chapitre. Nous verrons dans ce cas précis une formule plus simple permettant de calculer L .

Citons quelques valeurs indicatives de luminances pour des sources primaires et secondaires :

| Sources primaires | |
|---------------------------|----------------------------|
| Source | L [cd.m^{-2}] |
| Disque solaire à midi | $1,6 \cdot 10^9$ |
| Ciel couvert | $2 \cdot 10^3$ |
| Ciel très sombre | $2 \cdot 10^{-3}$ |
| Filament d'ampoule (100W) | $6 \cdot 10^6$ |
| Tube fluorescent (36W) | $10 \cdot 10^3$ |

| Sources secondaires | |
|---------------------------------------|----------------------------|
| Source | L [cd.m^{-2}] |
| Surface de la Lune au clair de Lune | $2,5 \cdot 10^5$ |
| Papier blanc à la lumière du Soleil | $3 \cdot 10^4$ |
| Papier blanc sous un clair de Lune | $3 \cdot 10^{-2}$ |
| Murs et plafonds | 50 à 150 |
| Chaussée normalement éclairée de nuit | 1 à 2 |

Mesure : la luminance d'une surface peut se mesurer à l'aide d'un luminancemètre.

Remarque : la limite de sensibilité de l'œil (pour les cônes) se situe vers $3 \cdot 10^{-2} \text{ cd.m}^{-2}$. La vision en couleur débute à partir de valeurs situées vers 10 cd.m^{-2} .

1.7. Émittance d'une source étendue

L'émittance (ou émittance) d'une source étendue représente le flux par unité de surface émis par une source primaire ou secondaire :

$$M = \frac{d\Phi_{\text{émis}}}{dS}$$

- M désigne l'émittance de la source [lm.m^{-2}]
- $d\Phi_{\text{émis}}$ désigne le flux lumineux élémentaire émis par la surface élémentaire dS [lm]
- dS désigne la surface élémentaire d'émission de la source [m^2]

Remarque : dans le cas d'une émittance uniforme de la surface, cette formule peut se simplifier :

$$M = \frac{\Phi_{\text{émis}}}{S}$$

Dans le cas d'une source secondaire, le flux émis correspond au flux réfléchi par la surface (nous excluons ici le cas

d'une absorption suivie d'une réémission). On définit alors le coefficient de réflexion par :

$$r = \frac{\Phi_{\text{réfléchi}}}{\Phi_{\text{reçu}}}$$

Citons quelques valeurs de coefficients de réflexion pour des matériaux courants :

| Matériau | Peinture | Verre | Plâtre | Ciment | Brique | Bois |
|----------|------------|-------------|--------|--------|--------|-----------|
| r [] | 0,2 à 0,75 | 0,12 à 0,81 | 0,85 | 0,4 | 0,2 | 0,1 à 0,4 |

1.8. Éclairement d'une surface

L'éclairement lumineux d'un objet est défini comme le flux lumineux par unité de surface qu'il reçoit :

$$E = \frac{d\Phi_{\text{reçu}}}{dS'}$$

- E désigne l'éclairement de la surface dS' d'un objet [lx]
- $d\Phi_{\text{reçu}}$ désigne le flux lumineux élémentaire reçu par l'objet éclairé [lm]
- dS' désigne la surface élémentaire de l'objet éclairé de la source [m^2]

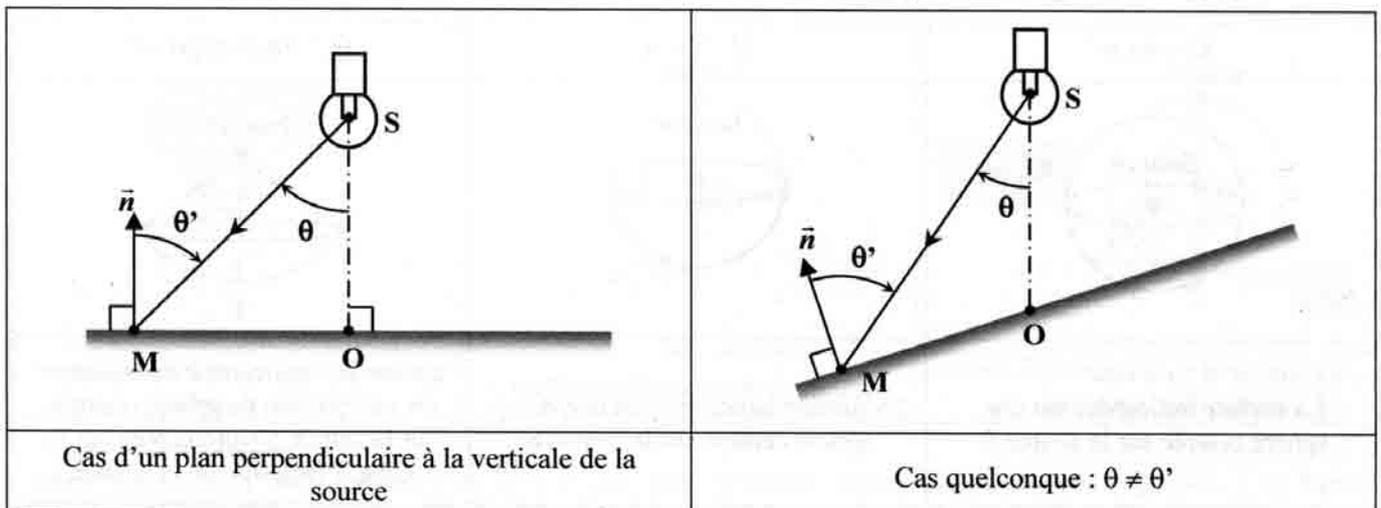
Remarque : dans le cas d'un éclairement uniforme de la surface, cette formule peut se simplifier : $E = \frac{\Phi}{S'}$

Mesure : L'éclairement d'une surface se mesure avec un luxmètre. De tels appareils donnent des mesures avec une précision de l'ordre du lux pour les éclairages courants.

La loi de Bouguer permet d'exprimer l'éclairement en fonction de l'intensité lumineuse :

$$E_M = \frac{I(\theta) \cos \theta'}{SM^2}$$

- E_M désigne l'éclairement au point M produit par la source située en S [lx]
- $I(\theta)$ désigne l'intensité lumineuse dans la direction d'angle θ par rapport à la verticale [cd]
- θ' désigne l'angle du rayon lumineux arrivant en M par rapport à la normale \vec{n} au plan éclairé
- SM désigne la distance entre la source S et le point M du plan éclairé [m]



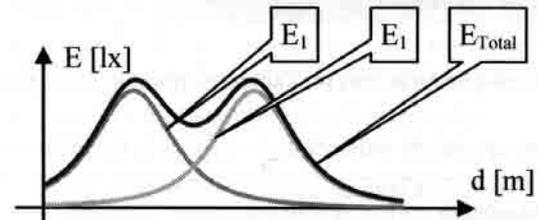
Donnons quelques valeurs classiques d'éclairément :

| Lieux | Éclairément moyen au sol | Lieux | Éclairément moyen au sol |
|---------------------------|--------------------------|--|--------------------------|
| Dehors par pleine Lune | 0,5 | Stades et locaux sportifs, studio TV ou cinéma | 1500 |
| Rue de nuit bien éclairée | 20 à 70 | Extérieur à l'ombre | 10 000 à 15 000 |
| Habitat classique | 100 | Extérieur : ciel couvert | 25 000 à 30 000 |
| Bureaux, ateliers | 200 à 3000 | Extérieur : soleil « moyen » | 50 000 |
| Grandes surfaces | 500 à 700 | Plein soleil | 50 000 à 100 000 |

Dans le cas de plusieurs sources indépendantes :

$$E_{Total} = \sum_i E_i$$

- E_{Total} désigne l'éclairément total [lx]
- E_i désigne l'éclairément produit par chaque source i [lx]



Exemple pour deux sources identiques décalées

2. APPLICATION AUX SOURCES ISOTROPES

2.1. Angle solide d'émission

L'un des meilleurs exemples de source isotrope est la source ponctuelle. Si cette source n'est pas munie de déflecteur, alors elle rayonne de façon identique dans toutes les directions de l'espace. L'angle solide d'émission vaut alors : $\Omega = 4\pi$ sr. La concentration du faisceau dans une zone de l'espace (par exemple à l'aide d'un déflecteur) réduit évidemment cette valeur.

2.2. Intensité lumineuse et surface indicatrice

Par définition, une source isotrope rayonne une intensité lumineuse identique dans toutes les directions comprises dans l'angle solide d'émission : $I_{Source\ isotrope} = I_0 = \text{constante}$

L'intensité lumineuse peut alors se calculer facilement si l'on connaît le flux lumineux émis par la source :

$$I_0 = \frac{\Phi}{\Omega}$$

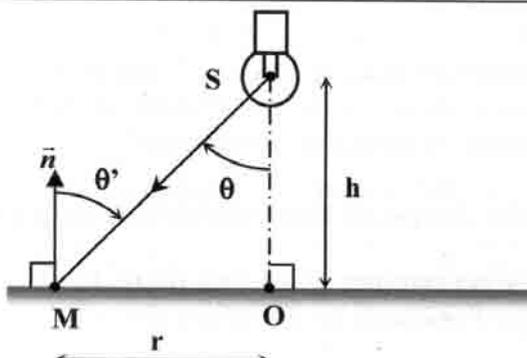
- I_0 désigne l'intensité lumineuse constante rayonnée dans toute direction comprise dans Ω [cd]
- Φ désigne le flux lumineux rayonné par la source [lm]
- Ω désigne l'angle solide d'émission [sr]

Dans notre cas, la surface indicatrice est définie comme l'ensemble des points tels que $I = I_0$. Il s'agit donc ici de l'intersection d'une sphère de rayon I_0 et centrée sur la source avec l'angle solide d'émission. Donnons quelques exemples courants :

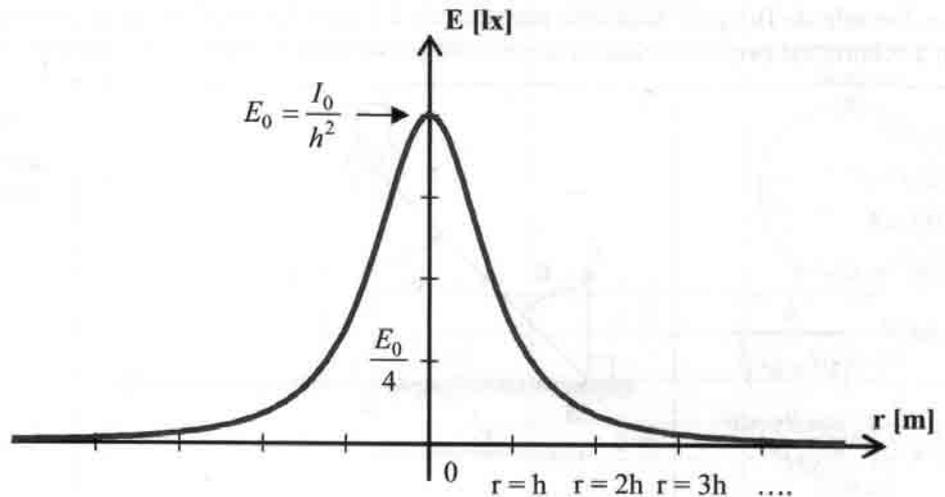
| $\Omega = 4\pi$ sr | $\Omega = 2\pi$ sr | $\Omega = 2\pi(1 - \cos\alpha)$ sr |
|---|--|--|
| | | |
| La surface indicatrice est une sphère centrée sur la source S | La surface indicatrice est une demi-sphère centrée sur la source S | La surface indicatrice de la source est une portion de sphère (centrée sur la source S) interceptée par le cône d'émission de la source. |

2.3. Éclairement d'une surface par une source ponctuelle

La formule de Bouguer peut être transformée à l'aide des relations de trigonométrie usuelles. Dans le cas où le plan à éclairer est perpendiculaire à la verticale passant par la source, on obtient les relations suivantes :

| | | |
|--|---|--|
| $\theta = \theta'$ $OM = r$ $SO = h$ $SM^2 = r^2 + h^2$ $\cos \theta' = \frac{h}{(r^2 + h^2)^{\frac{1}{2}}}$ $E_M = \frac{I_0 \cos \theta'}{SM^2}$ |  | <p>Formulations mathématiques équivalentes pour la loi de Bouguer appliquée à une source isotrope :</p> $E_M = \frac{I_0 h}{(r^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}}$ $E_M = \frac{I_0 \cos^3 \theta'}{h^2}$ |
|--|---|--|

Traçons la représentation graphique de l'éclairement en fonction de la distance r du point M au centre de la surface éclairée O . L'éclairement est maximal au centre et décroît assez rapidement quand on s'en éloigne. Il est ainsi nécessaire d'utiliser de nombreuses sources lumineuses quand on désire obtenir un éclairage à peu près constant.



3. APPLICATION AUX SOURCES SUIVANT LA LOI DE LAMBERT

3.1. Intensité lumineuse, surface indicatrice et angle solide d'émission

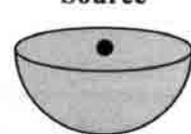
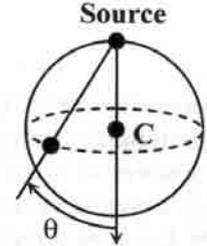
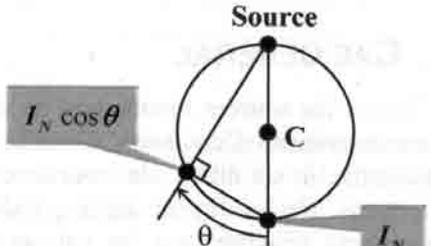
Une source suit la loi de Lambert¹ quand sa luminance ne dépend pas de la direction d'émission θ . Dans ce cas, l'intensité lumineuse dépend de la direction θ et peut se mettre sous la forme mathématique suivante :

$$I_\theta = I_N \cos \theta$$

$$I_N = \frac{\Phi}{\pi}$$

- I_θ désigne l'intensité lumineuse dans la direction θ [cd]
- I_N désigne l'intensité lumineuse rayonnée à la verticale de la source [cd]
- θ désigne l'angle du rayon lumineux par rapport à la verticale de la source
- Φ désigne le flux lumineux rayonné par la source [lm]

L'intégration des lois du §1 permet de montrer que l'angle solide d'émission vaut dans ce cas : $\Omega = 2\pi$ sr. La surface indicatrice de la source est une sphère (de centre C), la source se situant sur la sphère indicatrice.

| | | |
|--|--|--|
| <p style="text-align: center;">Source</p>  | <p style="text-align: center;">Source</p>  | <p style="text-align: center;">Source</p>  |
| <p>Angle solide d'émission : $\Omega = 2\pi$ sr (semi-espace)</p> | <p>Surface indicatrice de la source</p> | <p>Surface indicatrice de la source vue en coupe verticale</p> |

¹ Johann Heinrich (Jean Henri) Lambert (1728-1777) fut philosophe, astronome, mathématicien et physicien mulhousien. Il est l'un des fondateurs de la photométrie. Il sera également l'un des premiers à émettre l'idée du zéro absolu pour la température thermodynamique.

3.2. Luminance et émittance d'une surface suivant la loi de Lambert

Pour les sources suivant la loi de Lambert, l'intégration des relations (§1.6 et §1.7) permet de montrer deux relations concernant la luminance et l'émittance de la source. Ainsi, la luminance s'exprime simplement en fonction de l'intensité lumineuse à la verticale de la source :

$$L = \frac{I_N}{S_{Source}}$$

- L désigne la luminance de la source [cd.m^{-2}]
- I_N désigne l'intensité lumineuse à la verticale de la source [cd]
- S_{Source} désigne la surface de la source [m^2]

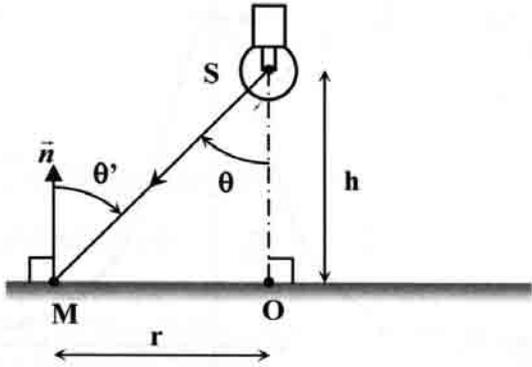
La relation précédente permet alors de calculer simplement l'émittance de cette surface par la formule :

$$M = \pi L$$

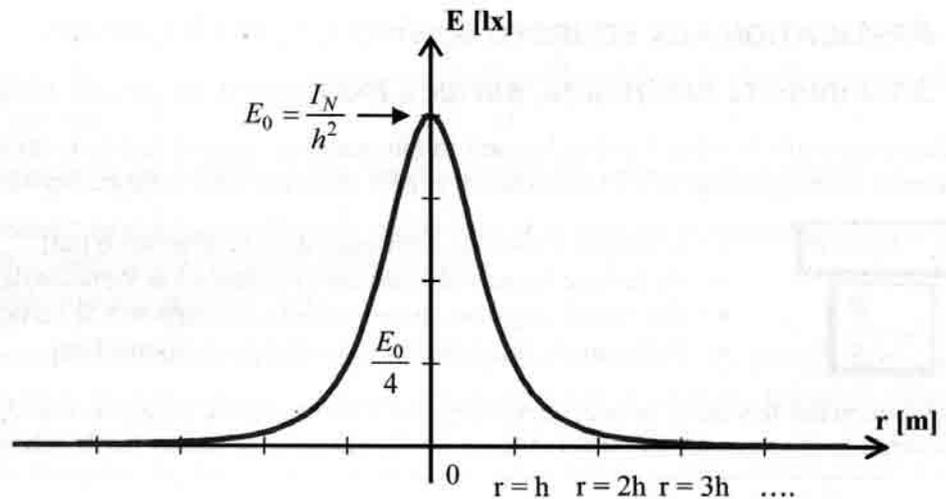
- L désigne la luminance de la source [cd.m^{-2}]
- M désigne l'émittance de cette source [lm.m^{-2}]

3.3. Éclairage d'une surface par une source suivant la loi de Lambert

La formule de Bouguer peut être transformée à l'aide des relations de trigonométrie usuelles. Dans le cas où le plan à éclairer est perpendiculaire à la verticale passant par la source, on obtient les relations suivantes :

| | | |
|--|--|---|
| $\theta = \theta'$ $OM = r$ $SO = h$ $SM^2 = r^2 + h^2$ $\cos \theta' = \frac{h}{(r^2 + h^2)^{\frac{1}{2}}}$ $E_M = \frac{I_N \cos \theta \cos \theta'}{SM^2}$ |  | <p>Formulations mathématiques équivalentes pour la loi de Bouguer appliquée à une source isotrope :</p> $E_M = \frac{I_N h^2}{(r^2 + h^2)^2}$ $E_M = \frac{I_N \cos^4 \theta}{h^2}$ |
|--|--|---|

Traçons la représentation graphique de l'éclairage en fonction de la distance r du point M au centre de la surface éclairée O . Comme pour une source isotrope l'éclairage est maximal au centre et décroît assez rapidement quand on s'en éloigne. La décroissance en fonction de r est plus importante que pour les sources isotropes.



4. CAS GÉNÉRAL

Toutes les sources lumineuses ne suivent pas nécessairement l'une des lois que nous venons d'envisager. Dans le cas général, la formule de Bouguer reste applicable à condition de connaître l'intensité lumineuse dans toutes les directions, c'est-à-dire la surface indicatrice de la source. Les constructeurs fournissent généralement les valeurs de l'intensité lumineuse dans les plans longitudinal et transversal par rapport à la source. Il est ainsi possible par lecture graphique de déterminer la valeur de l'intensité lumineuse dans chaque direction. La figure de droite donne un exemple pour un tube au néon muni d'un déflecteur.

