

Photométrie

Babahenini Med Chaouki (Chaouki.Babahenini@gmail.com)

Cours de master Images et Vie Artificielle. M2

Université Mohamed Khider Biskra

2014 - 2015

Radiometrie

- L'objectif des algorithmes d'illumination globale est de calculer un état sur la distribution de lumière dans une scène.
- Pour calculer cette distribution, nous avons besoin de comprendre les quantités physiques qui représentent l'énergie lumineuse
- *Radiometrie* est la terminologie de base utilisé pour décrire la lumière. →
- Présenter la théorie de base expliquant la formation des images du point de vue photométrique et menant à l'équation fondamentale de formation des images

Radiometrie

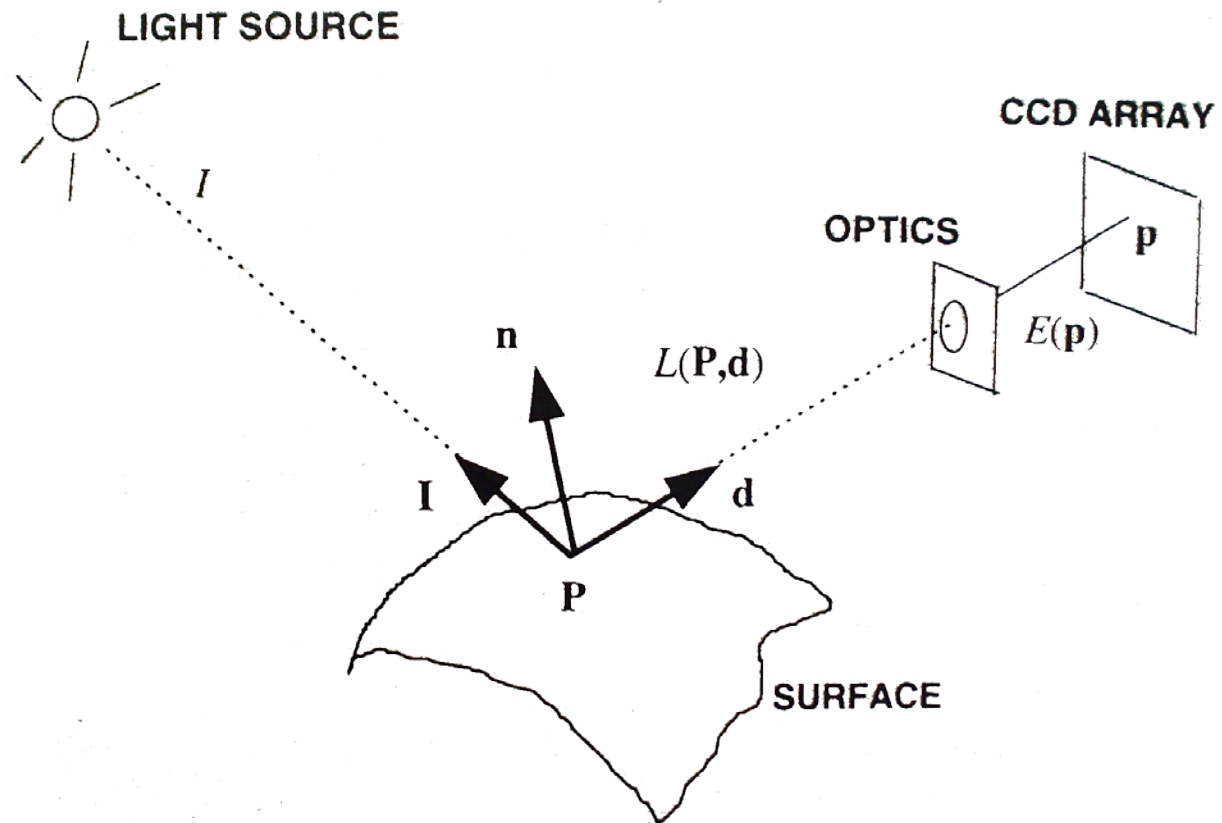
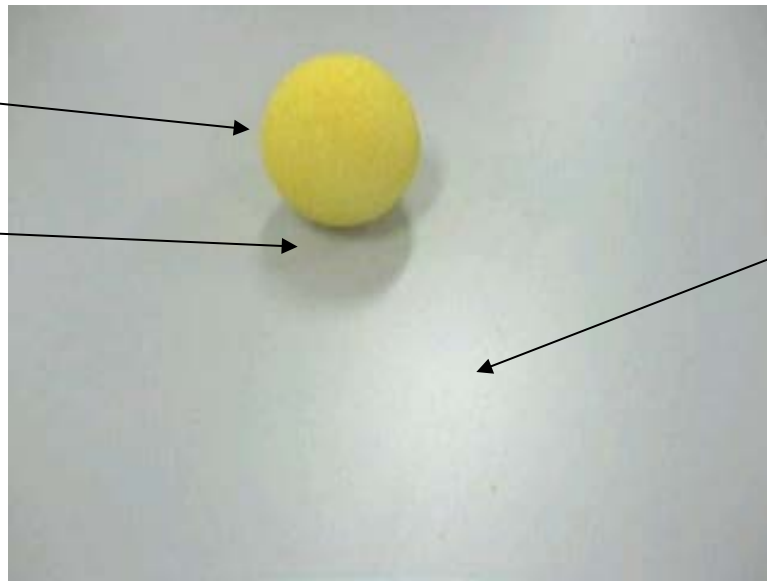


Figure 2.5 Illustration of the basic radiometric concepts.

Formation des images et photométrie

Réflexion
diffuse

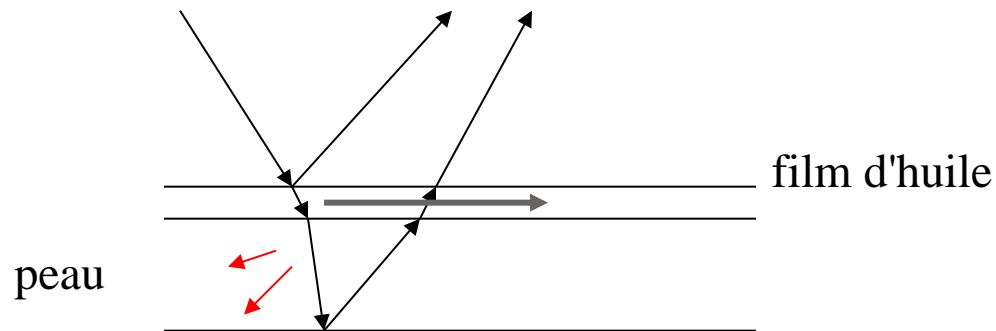
Ombre



Réflexion
spéculaire

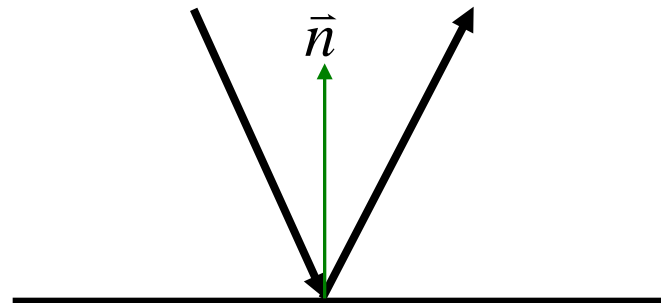
Interactions lumière/matière qu'on négligera

- absorption
- transmission
- fluorescence: absorption à une longueur d'ondes et réémission à une autre longueur d'ondes

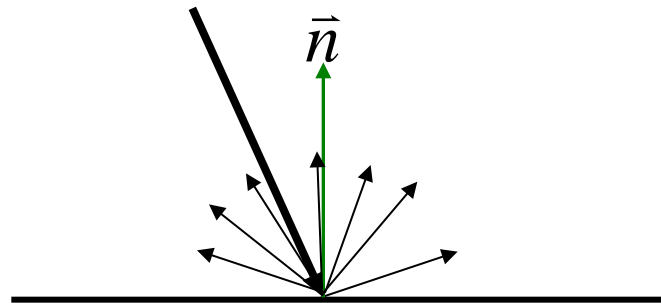


Surface

- Miroir



- Mat (lambertien)



Photons

- La quantité de base pour l'éclairement est le photon
- L'énergie (en Joule) d'un photon avec une longueur d'onde λ est: $q_\lambda = hc/\lambda$
 - c est la vitesse de la lumière
 - Dans le vide, $c = 299.792.458\text{m/s}$
 - $h \approx 6.63 \cdot 10^{-34}\text{Js}$ est la constante de Planck

Energie Radiante (Spectrale)

- L'énergie spectrale radiante, Q_λ , dans n_λ photons avec une longueur d'onde λ est

$$Q_\lambda = n_\lambda q_\lambda$$

- L'énergie radiante, Q , est l'énergie d'un ensemble de photons, elle est donnée par l'intégrale de Q_λ sur l'ensemble des longueurs d'ondes possibles:

$$Q = \int_0^\infty Q_\lambda d\lambda$$

Flux radiant

- Le *Flux radiant*, appelé aussi *puissance radiante*, est le taux de flux de l'énergie radiante par unité de temps

$$\Phi = \frac{dQ}{dt}$$

- Flux exprime la quantité d'énergie (Watts = Joule/s) arrivant sur une surface (imaginaire) par unité de temps
- Pour une longueur d'onde donnée, le *flux spectral radiant* est défini comme

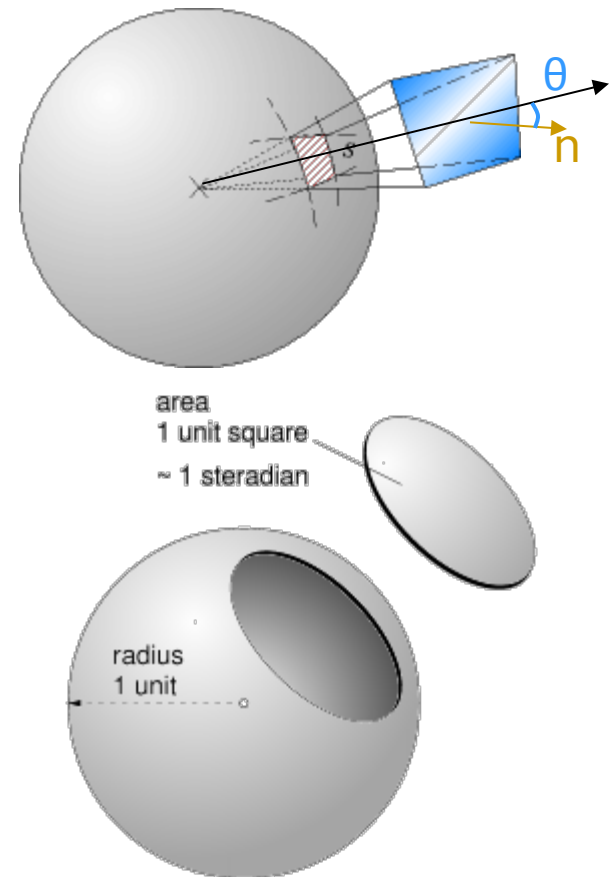
$$\Phi_{\lambda} = \frac{dQ_{\lambda}}{dt}$$

Définition: Angle solide

- Ratio entre l'aire de la surface occupé par la projection d'un objet sur une sphère et le carré du rayon de la sphère
- définit par le rapport de la section (dA) (surface élémentaire), découpée par l'intersection de la surface d'une sphère et d'un cône dont le sommet se trouve au centre de la sphère (S), au carré du rayon (r) et en fonction de l'angle (θ) formé par la droite joignant (S) et le centre de (dA).

$$\delta\omega = \frac{\delta A \cos(\theta)}{r^2}$$

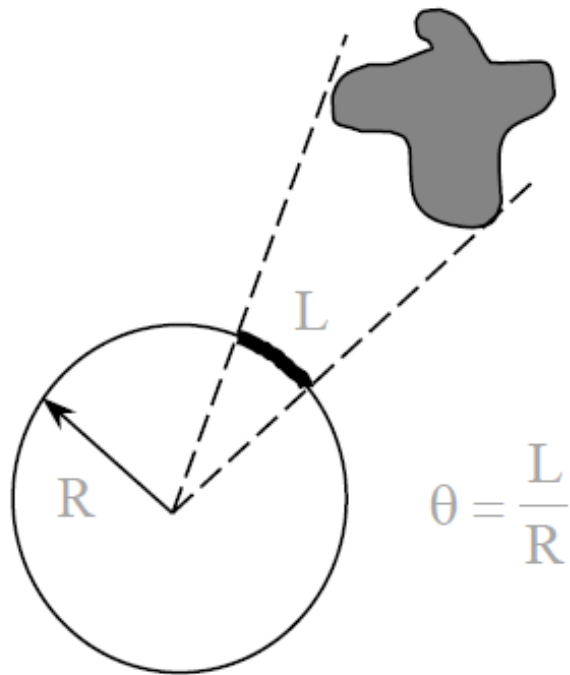
- Mesuré en stéradian (str)
- 2π sr par hémisphère



*http://www.schorsch.com/kbase/glossary/solid_angle.html
http://fr.wikipedia.org/wiki/Angle_solide

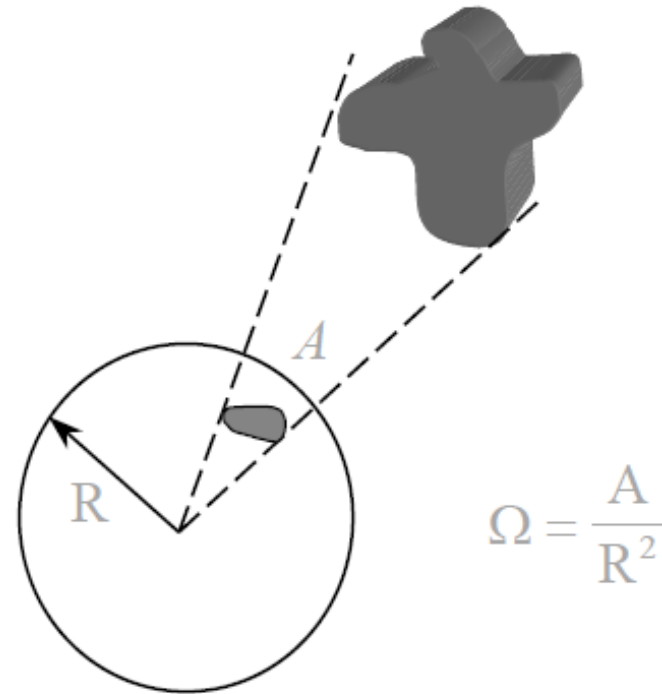
Angle solide

2D



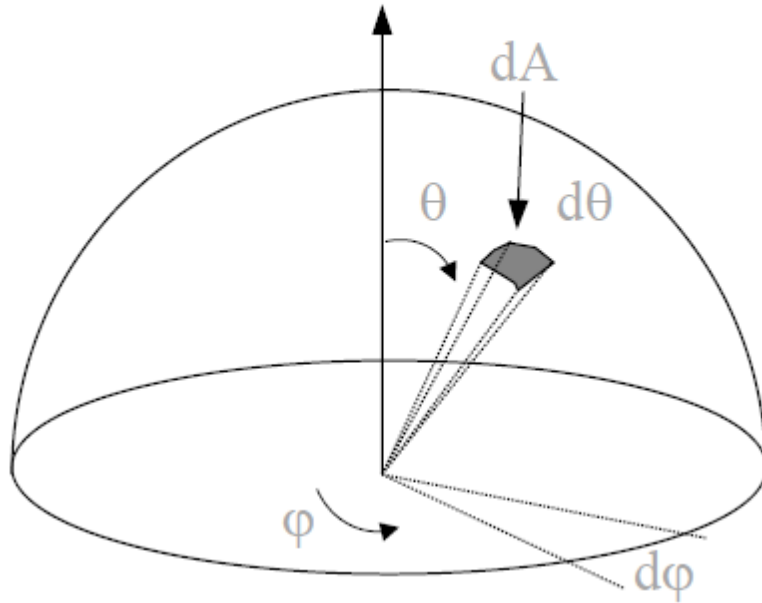
Périmètre du cercle = 2π radians

3D



Surface de la sphère = 4π steradians

Coordonnées sphériques

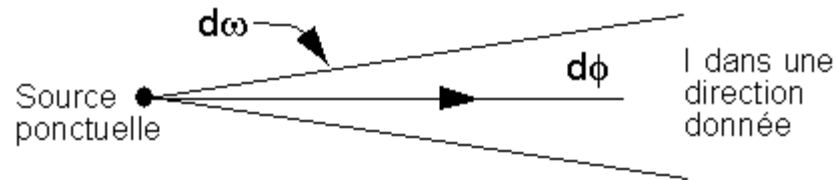


$$d\omega = \frac{dA}{r^2} = \sin \theta \, d\theta \, d\varphi$$

Aire de l'hémisphère:

$$\begin{aligned} \int_{\Omega_x} d\omega &= \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} \sin \theta \, d\theta \\ &= \int_0^{2\pi} d\varphi [-\cos \theta]_{\pi/2}^0 \\ &= \int_0^{2\pi} d\varphi = 2\pi \end{aligned}$$

Quantité photométrique importante: l'intensité (émission)



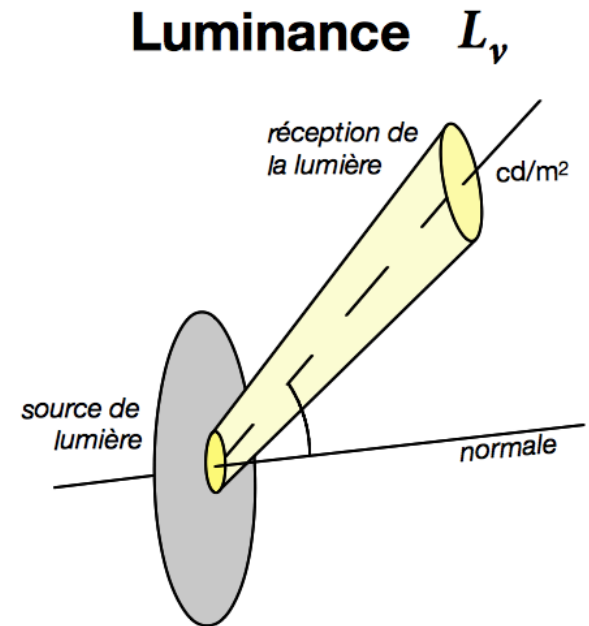
- *L'intensité* lumineuse est définie comme le flux par unité d'angle solide dans une direction donnée:

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} \quad \text{Lumens/str}$$

Définition:Luminance

- la **luminance** est la grandeur mesurable correspondant à la sensation visuelle de luminosité ou de brillance d'une surface.
- Elle caractérise l'éclat d'une source étendue, c'est-à-dire d'une source qui n'est pas perçue comme un point mais bien comme une surface (écran de télévision, sujet d'une photographie, etc).
- Elle s'exprime en candela par mètre carré ($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$).

La luminance est le flux émis par unité de surface apparente et par unité d'angle solide.

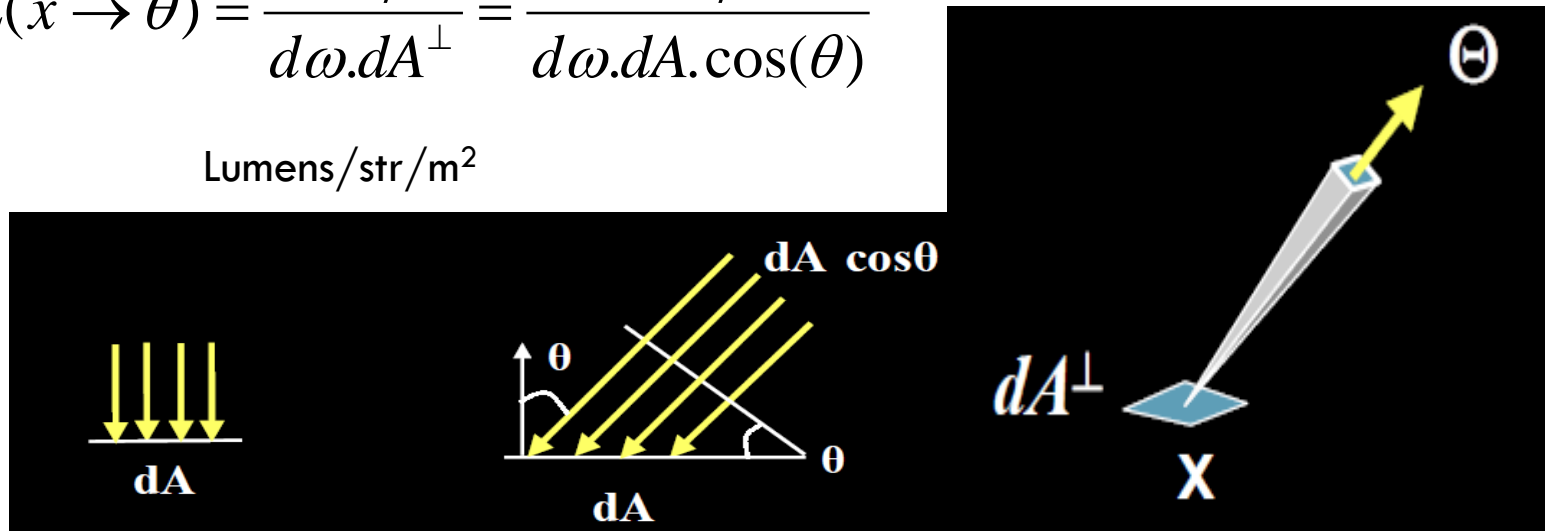


Radiance (Luminance)

- Soit le flux lumineux Φ émanant d'un point x dans une direction θ , unité de surface perpendiculaire dA à la direction et par unité d'angle solide $d\omega$.
- La **Luminance** L est définie comme le flux énergétique émis par une surface par unité d'aire et unité d'angle solide.

$$L(x \rightarrow \theta) = \frac{d^2\phi}{d\omega \cdot dA^\perp} = \frac{d^2\phi}{d\omega \cdot dA \cdot \cos(\theta)}$$

Lumens/str/m²



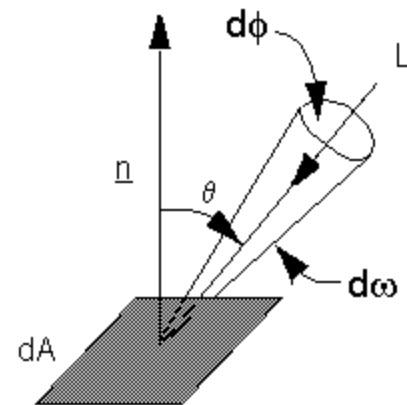
Quantité photométrique importante: l'illuminance (réception)

L'*illuminance* est la quantité de flux reçue par un élément de surface:

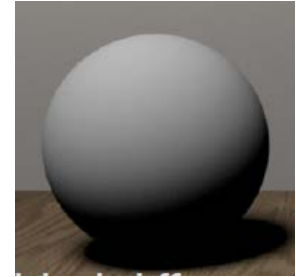
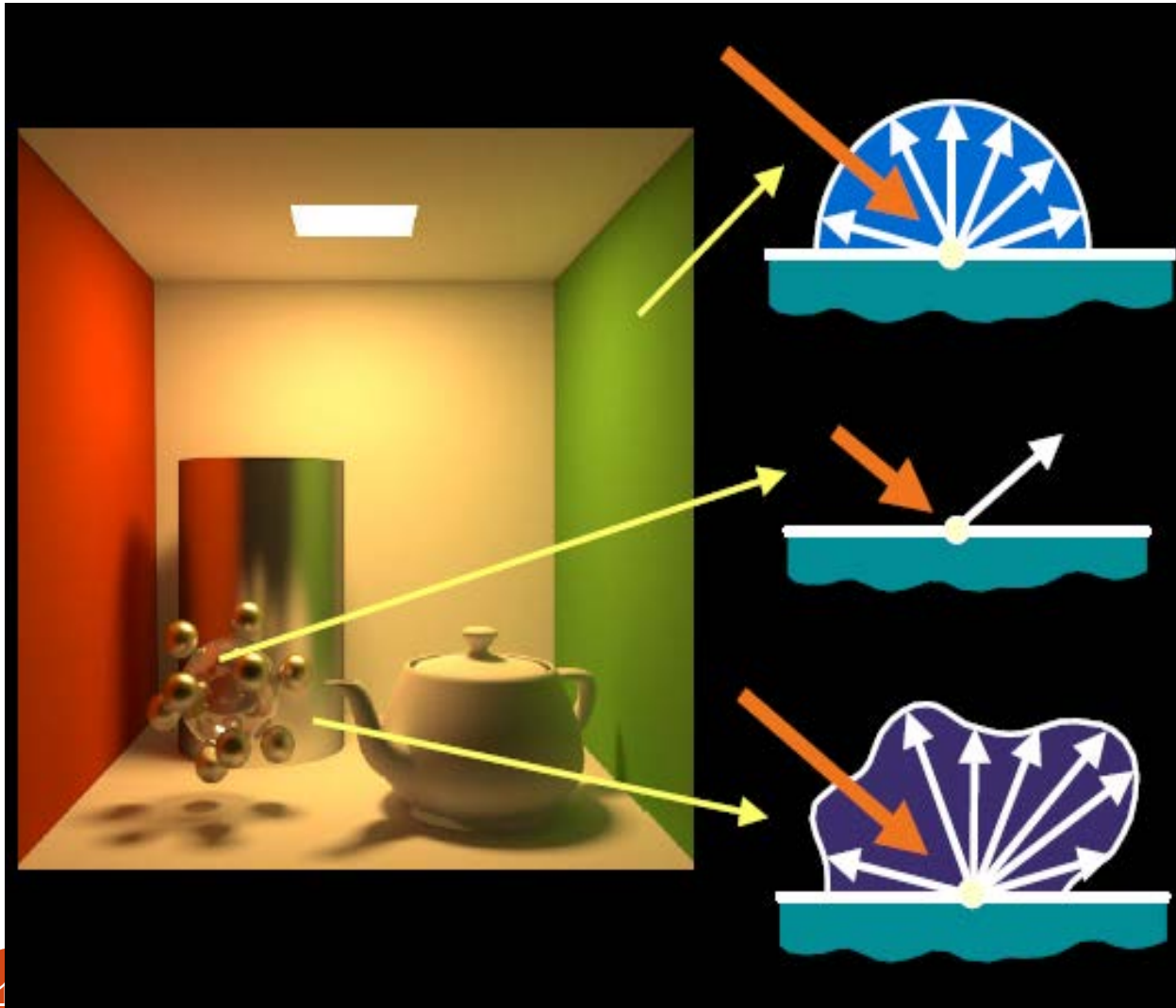
$$L = \frac{d\left(\frac{d\Phi}{dA}\right)}{d\omega \cos(\theta)} = \frac{dE}{d\omega \cos(\theta)} \longrightarrow dE = L d\omega \cos(\theta)$$

Lumens/m²

C'est la quantité photométrique à laquelle notre œil est sensible



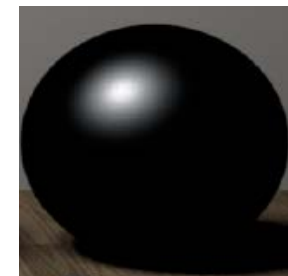
Matériaux: 3 formes



Diffusion idéal



Spéculaire idéal

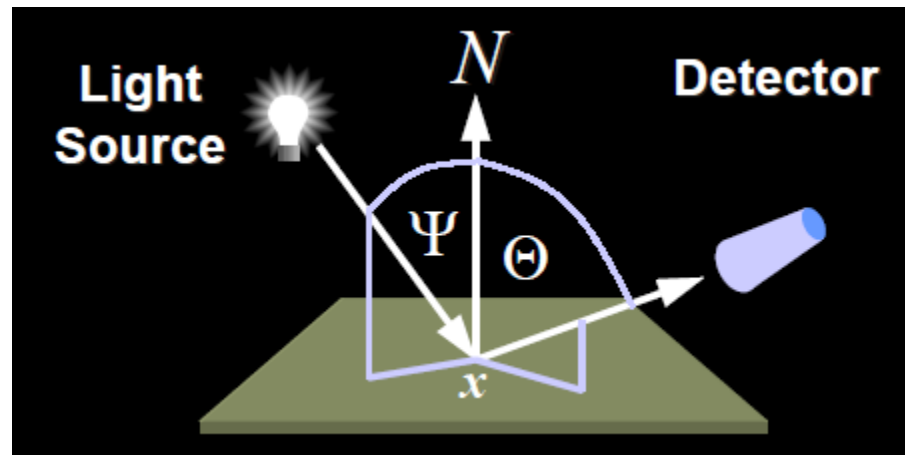


Diffusion directionnelle

BRDF

Bidirectional Reflectance Distribution Function

- ❑ Quels sont les facteurs qui déterminent la l'illuminance captée d'une scène?
 1. La quantité de lumière qui est incidente sur la surface.
 2. La proportion de cette quantité de lumière qui est diffusée en direction de l'observateur.
- ❑ Un rayon de lumière atteint une surface:
 - ❑ Arrivant d'une direction θ , et se refractant dans une direction ψ
 - ❑ Quelle quantité de lumière est réfléchiée dans cette direction θ ? → BRDF



BRDF

- ❑ La BRDF est une fonction à 4 dimensions définie comme:

$$f_r(x, \psi \rightarrow \theta) = \frac{dL(x \rightarrow \theta)}{dE(x \leftarrow \psi)} = \frac{dL(x \rightarrow \theta)}{L(x \leftarrow \psi) \cdot \cos \theta \cdot d\omega_\psi}$$

- ❑ BRDF change sur une surface (dépendante de la texture)
- ❑ $L(x \rightarrow \theta)$ est la luminance sortante
- ❑ $L(x \leftarrow \psi)$ est la radiance entrante
- ❑ $d\omega_\psi$ est l'angle solide associé à la direction incidente

Réflexion – modèle Lambertien

- Surface lambertienne: Surface matte dont la luminance émise est égale dans toutes les directions et dont la valeur ne dépend que du cos de l'angle entre la normale de la surface et la direction de la source. (papier, peinture matte)
 - La luminance de la surface reste la même peu importe de quel point de vue on l'observe.
- $L = \rho I^T n$
 - La valeur ρ est l'albedo de la surface (une constante)
 - I est un vecteur représentant la direction et l'intensité de la lumière incidente tel que $I^T n$ est l'illuminance
 - n est la normale de la surface
 - Seulement fonction de l'angle de la lumière incidente, pas de l'angle de l'observateur !

Propriétés de la BRDF

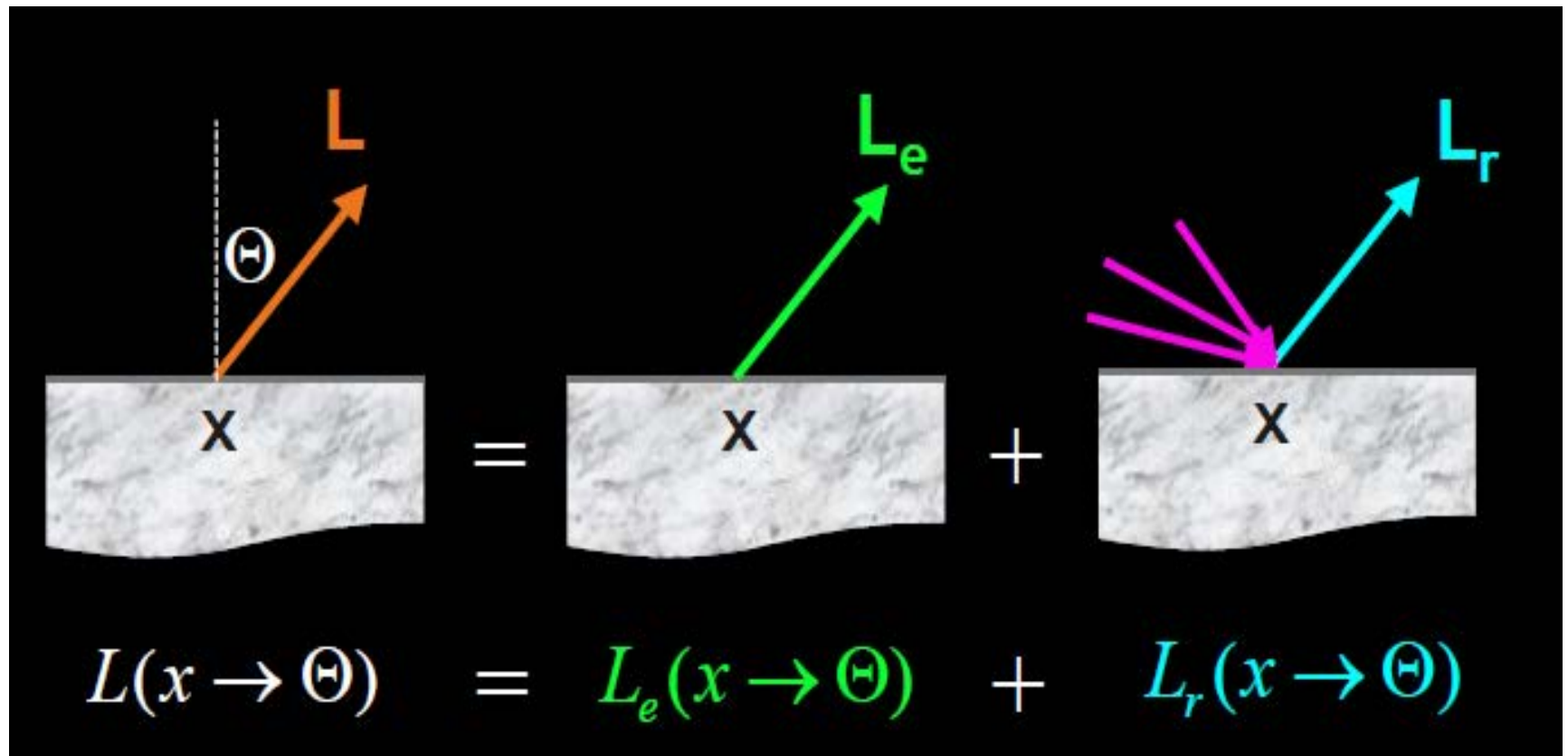
- Modèle Lambertien pur: $f_r(x, \psi \rightarrow \theta) = \frac{\rho_d}{\pi}, 0 \leq \rho_d \leq 1$
- Réciprocité: $f_r(x, \psi \rightarrow \theta) = f_r(x, \psi \leftarrow \theta)$
- Limites: $0 \leq f_r(x, \psi \leftrightarrow \theta) \leq \infty$
- Conservation de l'énergie:

$$\forall \psi, \int_{\theta} f_r(x, \psi \leftrightarrow \theta) \cdot \cos \theta \cdot d\omega_{\theta} \leq 1$$

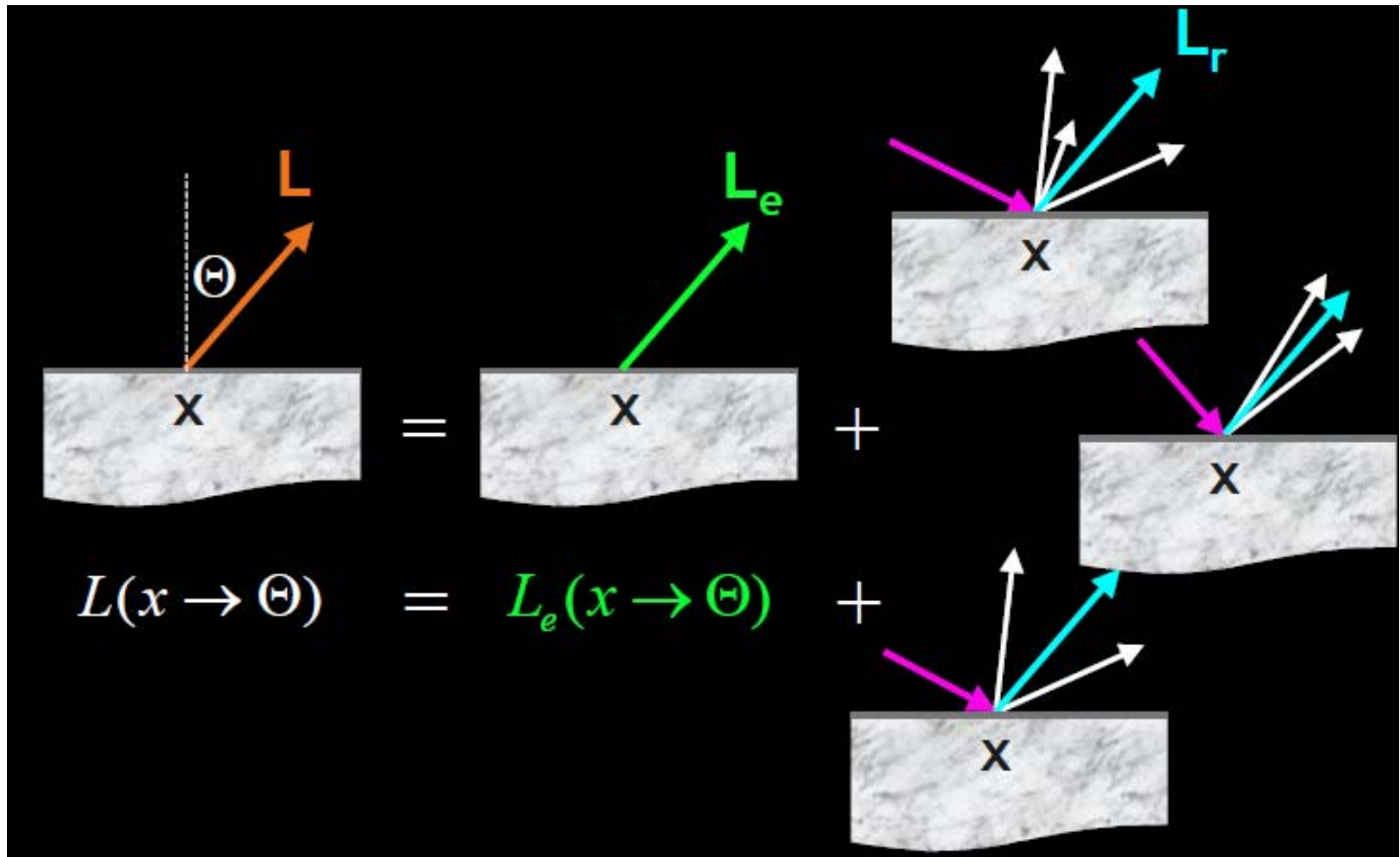
Equation du rendu (ER)

- Hypothèses :
 - Équilibre énergétique
 - Conservation de l'énergie lumineuse
 - Pas d'échanges entre différentes formes d'énergie, mais pourrait être intéressant
- ER décrit le transfère de l'énergie dans la scène,
 - Entrées: sources lumineuses, géométrie des surfaces, les caractéristiques de réflectance des surfaces.
 - Sortie: Valeurs de la luminance sur tous les points de la surface et dans toutes les directions.
- Équilibre énergétique → Radiance totale = radiance émise + radiance réfléchie

Equation du rendu



Equation du rendu



Equation du rendu

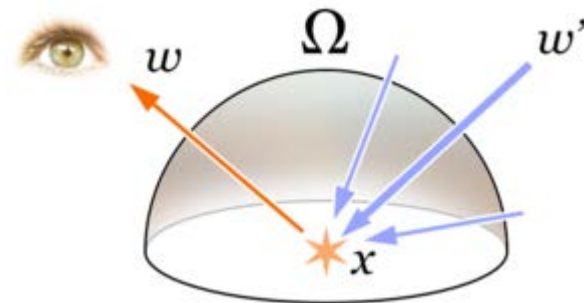
- On considère la brdf: $f_r(x, \psi \leftrightarrow \theta) = \frac{dL(x \rightarrow \theta)}{L(x \leftarrow \psi) \cdot \cos \theta \cdot d\omega_\psi}$
- En réarrangeant les termes, on obtient:

$$dL(x \rightarrow \theta) = f_r(x, \psi \leftrightarrow \theta) \cdot L(x \leftarrow \psi) \cdot \cos \theta \cdot d\omega_\psi$$

- En intégrant sur l'hémisphère entière, on obtient la radiance réfléchie:

$$L_r(x \rightarrow \theta) = \int_{\Omega} f_r(x, \psi \leftrightarrow \theta) \cdot L(x \leftarrow \psi) \cdot \cos \theta \cdot d\omega_\psi$$

- C'est l'équation du rendu

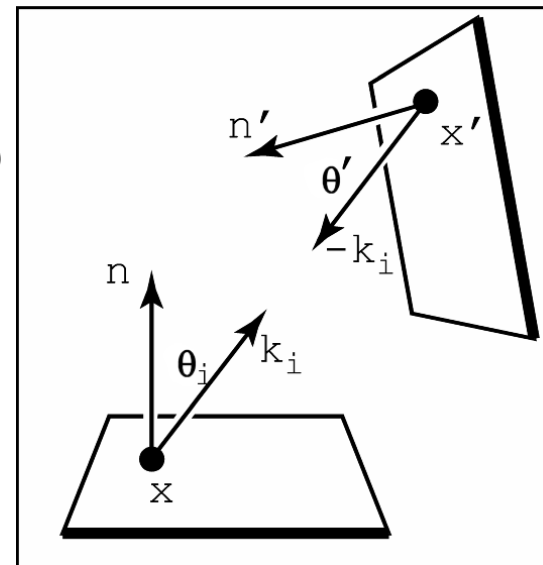


Equation de rendu 2

- Introduite simultanément par David Immel et al. et Jim Kajiya, l'équation du rendu est une équation intégrale qui donne l'équilibre lumineux en un point (hémisphère): l'intensité lumineuse qui quitte le point dans une direction donnée est égale à l'intensité émise en ce point ajoutée à l'intensité lumineuse réfléchie. Cette dernière dépend de l'intensité lumineuse incidente et d'une fonction appelée BRDF.
- Nous aurons parfois besoin de l'équation en utilisant uniquement les termes de la luminance de la surface.

- Etant donné que la radiance est constante le long de la ligne, $f_r(x, \psi \rightarrow \theta) = f_r(x, \psi \leftarrow \theta)$
L'angle solide :

$$d\omega = \frac{dA \cos \theta'}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|^2}$$



Equation de rendu 2

- En remplaçant :

$$L_r(x \rightarrow \theta) = \int_{\text{all } \mathbf{x}_i} \frac{f_r(x, \psi \leftrightarrow \theta) \cdot L_i(\mathbf{x}', \mathbf{x} - \mathbf{x}') \cdot v(\mathbf{x}, \mathbf{x}') \cdot \cos \theta_i \cdot \cos \theta' \cdot dA}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|^2}$$

- Où $v(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$ est le terme de visibilité, égal à 1 si \mathbf{x} et \mathbf{x}' sont visible mutuellement et 0 si non
- Equation integrale :
à résoudre

