

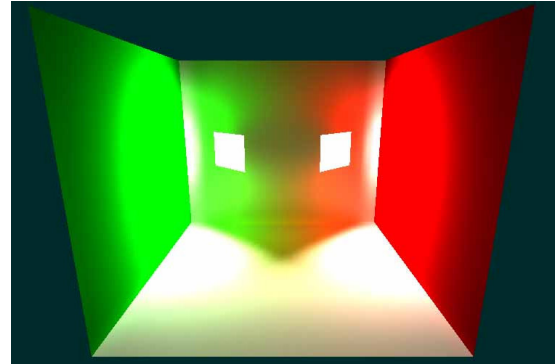
Synthèse d'Images

Elmar Eisemann

Elmar.Eisemann@inrialpes.fr

Basé sur les cours de
C. Soler, N. Holzschuch,
E. Boyer, E. Boyer

Global Illumination La lumière indirecte



Modélisation de l'éclairage

- Modélisation physique :
 - Équation de l'éclairage
- Résolution de l'équation :
 - Solution formelle
 - Solutions approchées
 - Lancer de rayons
 - Radiosité
 - Solutions exactes
 - Monte-Carlo

Éclairage global, éclairage local

- Jusqu'ici, des propriétés locales :
 - Modèles de Gouraud, de Phong, lissage
- On s'intéresse au problème global

Équation de l'éclairage

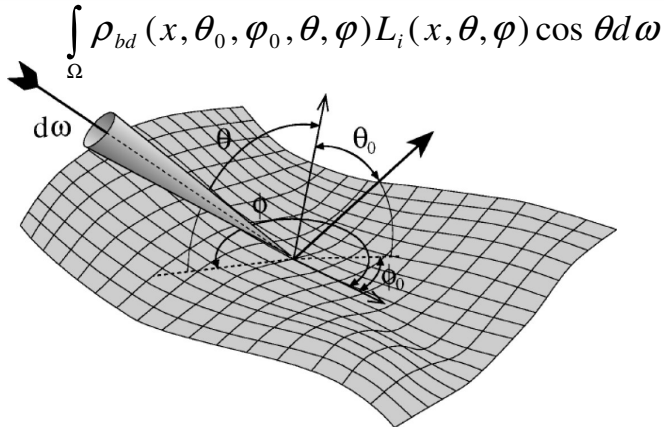
- Hypothèses :
 - Équilibre énergétique
 - Conservation de l'énergie lumineuse
 - Pas d'échanges entre différentes formes d'énergie, mais pourrait être intéressant
- Énergie lumineuse en un point :
 - Énergie émise
 - Plus énergie réfléchie

Équation de l'éclairage

- Équilibre énergétique :
$$L(x, \theta_0, \varphi_0) = L_e(x, \theta_0, \varphi_0) + \int_{\Omega} \rho_{bd}(x, \theta_0, \varphi_0, \theta, \varphi) L_i(x, \theta, \varphi) \cos \theta d\omega$$
- Radiance totale = radiance émise + radiance réfléchie

Notations

$$L(x, \theta_0, \varphi_0) = L_e(x, \theta_0, \varphi_0) +$$



Équation de l'éclairage

Spatial dans scène

$$L(x, \theta_0, \varphi_0) = L_e(x, \theta_0, \varphi_0) +$$

$$\int_{\Omega} \rho_{bd}(x, \theta_0, \varphi_0, \theta, \varphi) L_i(x, \theta, \varphi) \cos \theta d \omega$$

Équation de l'éclairage

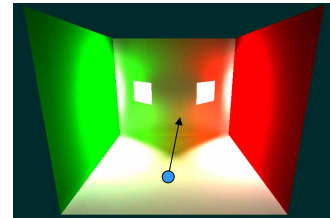
$$L(x, \theta_0, \varphi_0) = L_e(x, \theta_0, \varphi_0) +$$

$$\int_{\Omega} \rho_{bd}(x, \theta_0, \varphi_0, \theta, \varphi) L_i(x, \theta, \varphi) \cos \theta d \omega$$

Équation de l'éclairage

$$L(x, \theta_0, \varphi_0) = L_e(x, \theta_0, \varphi_0) +$$

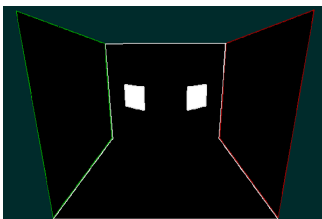
$$\int_{\Omega} \rho_{bd}(x, \theta_0, \varphi_0, \theta, \varphi) L_i(x, \theta, \varphi) \cos \theta d \omega$$



Équation de l'éclairage

$$L(x, \theta_0, \varphi_0) = L_e(x, \theta_0, \varphi_0) +$$

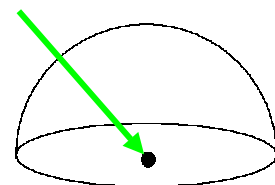
$$\int_{\Omega} \rho_{bd}(x, \theta_0, \varphi_0, \theta, \varphi) L_i(x, \theta, \varphi) \cos \theta d \omega$$



Équation de l'éclairage

$$L(x, \theta_0, \varphi_0) = L_e(x, \theta_0, \varphi_0) +$$

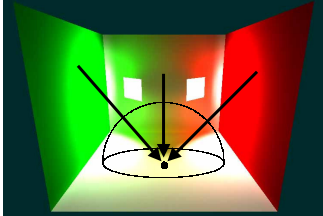
$$\int_{\Omega} \rho_{bd}(x, \theta_0, \varphi_0, \theta, \varphi) L_i(x, \theta, \varphi) \cos \theta d \omega$$



Équation de l'éclairage

$$L(x, \theta_0, \varphi_0) = L_e(x, \theta_0, \varphi_0) +$$

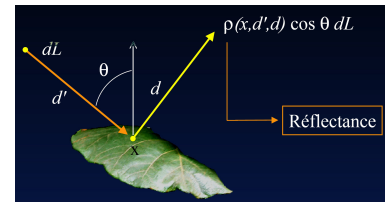
$$\int_{\Omega} \rho_{bd}(x, \theta_0, \varphi_0, \theta, \varphi) L_i(x, \theta, \varphi) \cos \theta d\omega$$



Équation de l'éclairage

$$L(x, \theta_0, \varphi_0) = L_e(x, \theta_0, \varphi_0) +$$

$$\int_{\Omega} \rho_{bd}(x, \theta_0, \varphi_0, \theta, \varphi) L_i(x, \theta, \varphi) \cos \theta d\omega$$



BRDF

- *Bi-directional Reflectance Distribution Function* (BRDF)
- Rapport entre la radiance dans la direction sortante et le flux de radiance dans la direction entrante

La BRDF est une *distribution*

- Elle va de 0 à $+\infty$ (inclus)
- Unité sr^{-1}
- Deux cas particuliers :
 - Réflecteur diffus idéal
 - Réflecteur spéculaire idéal

Réflecteur diffus idéal

- BRDF uniforme :
 - Ne dépend pas des directions
 - La radiance réfléchie est identique dans toutes les directions

$$\rho_{bd}(\theta_0, \varphi_0, \theta, \varphi) \equiv \rho$$

Réflecteur spéculaire idéal

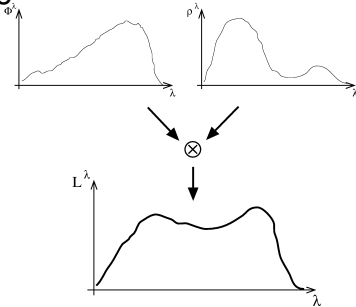
- La BRDF est une distribution de Dirac
 - Distribution de Dirac normalisée δ

$$\rho_{bd}(\theta_0, \varphi_0, \theta, \varphi) =$$

$$2\delta(\sin^2 \theta_0 - \sin^2 \theta) \cdot \delta(\varphi_0 - \varphi \pm \pi)$$

Variation spectrale

- La BRDF dépend aussi de la longueur d'onde



Équation de l'éclairage - difficile à résoudre

- Équilibre énergétique :

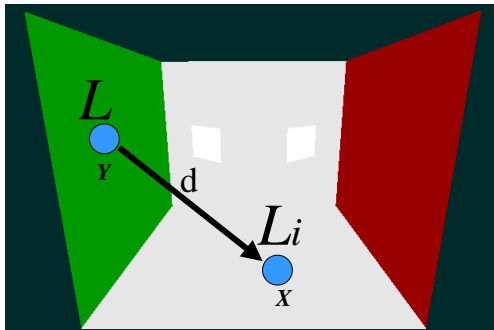
$$L(x, \theta_0, \varphi_0) = L_e(x, \theta_0, \varphi_0) +$$

$$\int_{\Omega} \rho_{bd}(x, \theta_0, \varphi_0, \theta, \varphi) L_i(x, \theta, \varphi) \cos \theta d\omega$$

- Radiance totale = radiance émise + radiance réfléchie

Équation de l'éclairage - difficile à résoudre

$$L_i(X, d) = L(Y, d)$$



Résolution formelle de l'équation

- Opérateur de réflexion
 - Opérateur intégral R
 - Opère sur la distribution de radiance
 - Défini par :

$$(RL)(x, \theta_0, \varphi_0) =$$

$$\int_{\Omega} \rho_{bd}(x, \theta_0, \varphi_0, \theta, \varphi) L_i(x, \theta, \varphi) \cos \theta d\omega$$

Résolution formelle de l'équation

$$(RL)(x, \theta_0, \varphi_0) =$$

$$\int_{\Omega} \rho_{bd}(x, \theta_0, \varphi_0, \theta, \varphi) L_i(x, \theta, \varphi) \cos \theta d\omega$$

$$L(x, \theta_0, \varphi_0) = L_e(x, \theta_0, \varphi_0) +$$

$$\int_{\Omega} \rho_{bd}(x, \theta_0, \varphi_0, \theta, \varphi) L_i(x, \theta, \varphi) \cos \theta d\omega$$

$$= L_e(x, \theta_0, \varphi_0) + (RL)(x, \theta_0, \varphi_0)$$

Solution formelle (2)

- L'équation devient :

$$L = L_e + RL$$

- Donc : $L = [I - R]^{-1} L_e$
- En utilisant une série de Neumann :

$$L = \sum_{n=0}^{\infty} (R^n) L_e$$

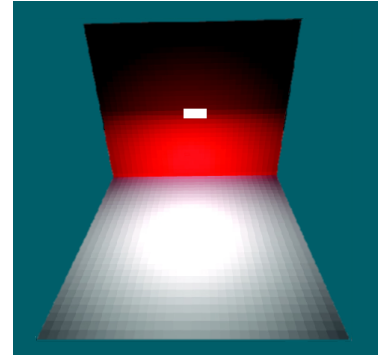
Qu'est-ce que cette équation représente?

Interprétation physique

$$L = \sum_{n=0}^{\infty} (R^n) L_e$$

- Radiance émise (L_e)...
- plus radiance réfléchié une fois (RL_e)...
- plus radiance réfléchié deux fois (R^2L_e)...
- plus radiance réfléchié trois fois...

Interprétation physique



$$L_e + (RL_e) + (R^2L_e) + (R^3L_e) + \dots$$

Concrètement, cette équation ?

- Très joli... et complètement inutile
- Pas de solution analytique
- L'éclairage a des besoins spécifiques
 - Frontières d'ombre, reflets...
 - La résolution doit prendre en compte ces spécificités

Radiosité

- Hypothèse de simplification :
 - Toutes les surfaces sont diffuses
- Radiance, BRDF,... indépendantes de la direction
- Simplification de l'équation
- Discrétisation de l'équation simplifiée
- Résolution de l'équation discrétisée

Radiosité

$$L(x, \theta_0, \varphi_0) = L_e(x, \theta_0, \varphi_0) +$$

$$\int_{\Omega} \rho_{bd}(x, \theta_0, \varphi_0, \theta, \varphi) L_i(x, \theta, \varphi) \cos \theta d\omega$$

- Forme simplifiée de l'équation de rendu :

$$B(x) = E(x) + \rho_d(x) \int_{y \in S} B(y) V(x, y) \frac{\cos \theta \cos \theta'}{\pi r^2} dy$$

- Discrétisation de cette équation :

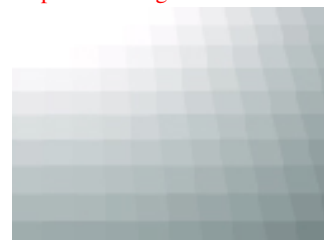
$$B_i = E_i + \rho_i \sum_{j=1}^n F_{ij} B_j$$

Radiosité

- Discrétisation de cette équation :

$$B_i = E_i + \rho_i \sum_{j=1}^n F_{ij} B_j$$

Comment peut-on imaginer cette discrétisation?



Facteur de forme

- F_{ij} : facteur de forme
 - Purement géométrique
 - Proportion d'énergie transmise de l'un à l'autre
 - Méthodes de calcul :
 - Quadratures
 - Approximation point-surface
 - Approximations discrètes (hémicube)

Facteur de forme

- F_{ij} : facteur de forme
 - Purement géométrique
 - Proportion d'énergie transmise de l'un à l'autre

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i A_j} \iint v(x, y) \frac{\cos(\theta) \cos(\theta')}{\pi d(x, y)^2} dx dy$$

L'équation discrétisée

- On regroupe tous les éléments :

$$\begin{bmatrix} B_0 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_0 \\ \vdots \\ E_n \end{bmatrix} + [\rho_i F_{ij}] \begin{bmatrix} B_0 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix}$$

- Ou, en utilisant des vecteurs :

$$\mathbf{B} = \mathbf{E} + \mathbf{MB}$$

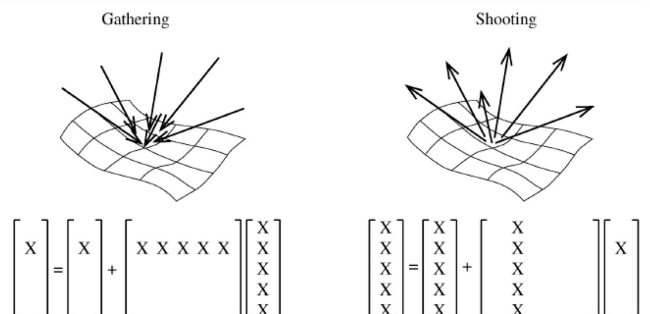
Radiosité : avantages

- Toutes les surfaces sont diffuses
- Solution globale (on peut se promener)
- Fonction continue ?
 - calculer des valeurs aux sommets
 - interpolation entre les sommets

Résolution du système

- Equation Matricielle : $\mathbf{B} = \mathbf{E} + \mathbf{MB}$
- Méthodes de relaxation : ➔ point fixe
 - Gathering
 - relaxation de Jacobi
 - relaxation de Gauss-Seidel
 - Shooting
 - relaxation de Southwell

Gathering vs. Shooting



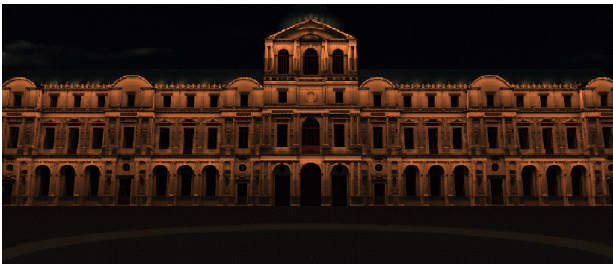
Gathering/shooting

- Shooting :
 - Premières images plus vite
 - Éclairage direct dans les premières itérations
 - Besoin de stocker l'énergie pas encore renvoyée
- Gathering :
 - Plus lent pour les premiers résultats
- Pour la convergence totale de la scène
 - même temps de calcul

Radiosité : exemple



Radiosité : exemple (2)



Radiosité : résumé

- Calculs très long
 - Accélération possible,
 - Radiosité hiérarchique
 - Clustering
 - Instanciation
- Affichage rapide
 - Sauf si 10^{700} polygones... ;)

Slides

- Contributions de:
 - Briceno, H., Notes du cours SI, UFRIMA
 - Boyer, E., Notes du cours SI, UFRIMA
 - Holzschuch, N., « Notes du cours DEA-IVR, ENSIMAG, Création d'Images Virtuelles ». 2005-2006
 - Frédo Durand and Barbara Cottler, SI, MIT
- Images taken from various sources:
IF ANY IMAGE IN THIS PRESENTATION IS NOT ALLOWED TO BE USED, PLEASE CONTACT ME AND I WILL DELETE IT!
TO MY BEST KNOWLEDGE ALL IMAGES CAN BE USED FOR UNIVERSITY COURSES.