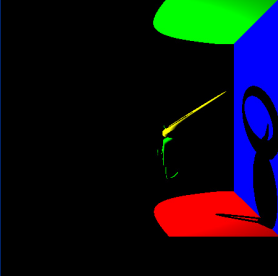
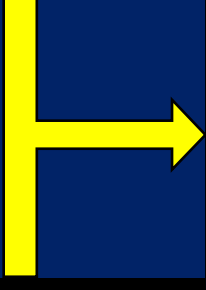


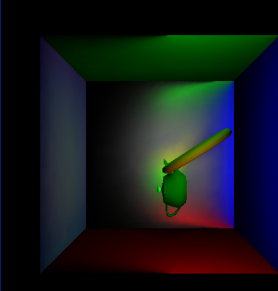
Eclairage Global Par Cache d'Eclaircissement et de Luminance

Illumination Globale

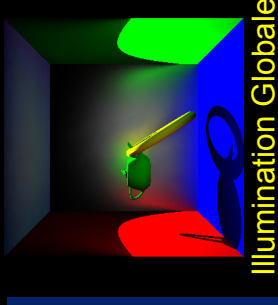
Pourquoi?



Direct



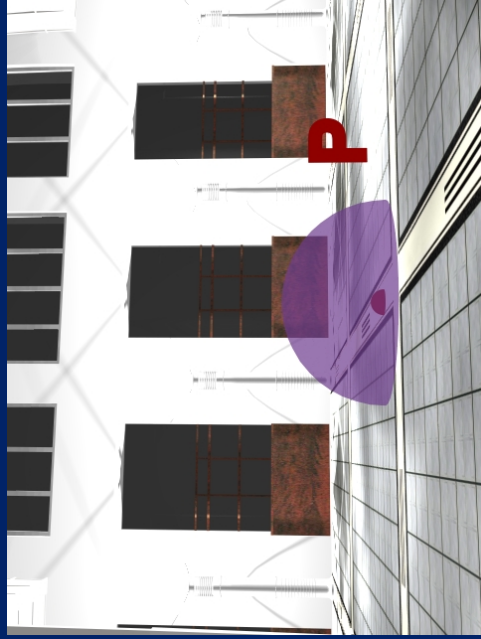
Indirect



Illumination Globale

Illumination Globale

Comment?



$$L_o(P, \omega_o) = \int L_i(P, \omega_i) * BRDF(\omega_o, \omega_i) * \cos(\theta) d\omega_i$$

Illumination Globale

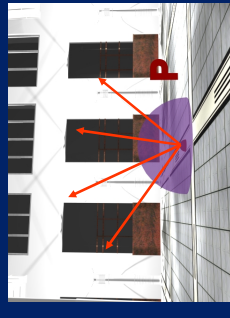
Comment?

$$L_o(P, \omega_o) = \int L_i(P, \omega_i) * BRDF(\omega_o, \omega_i) * \cos(\theta) d\omega_i$$

Pas de solution analytique

Méthodes numériques

- Radiosité
- Suivi de lumière
- Suivi de chemins
- ...



Plan

Méthodes de calcul d'illumination globale

Cache d'éclairage (Irradiance Caching)

Cache de luminance (Radiance Caching)

Quelques images...

Conclusion

Problèmes ouverts

Plan

Méthodes de calcul d'illumination globale

Cache d'éclairage (Irradiance Caching)

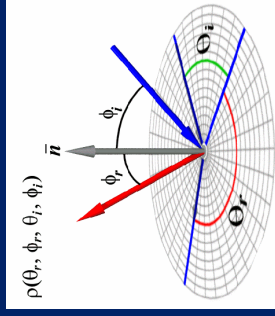
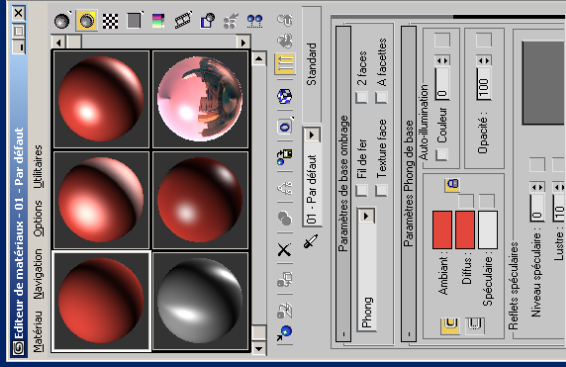
Cache de luminance (Radiance Caching)

Quelques images...

Conclusion

Problèmes ouverts

BRDF



Radiosité

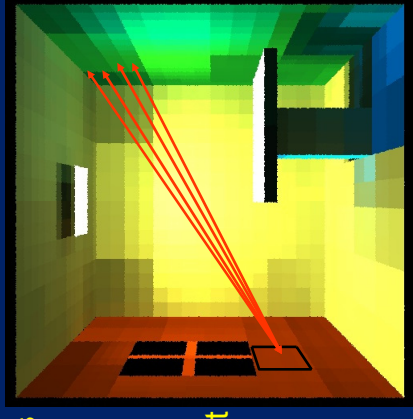
Modeling the interaction of light between diffuse surfaces
Goral et al., SIGGRAPH 1984

Méthode par éléments finis

→ Discrétisation des surfaces

Echanges énergétiques entre éléments de surface 2 à 2

Possibilité de stockage du résultat dans des textures d'illumination (Light Maps)



Radiosité

Modeling the interaction of light between diffuse surfaces
Goral et al., SIGGRAPH 1984



 Bonne qualité
Rendu final rapide

 Temps de calcul
Discretisation
Limité aux surfaces diffuses

Suivi de lumière

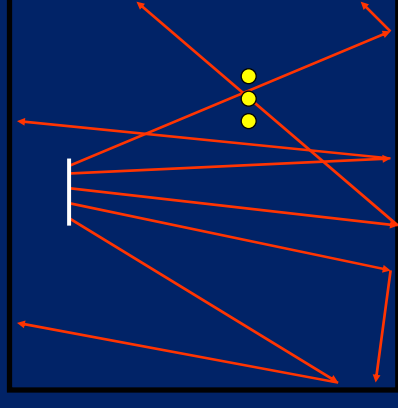
Realistic Image Synthesis using Photon Mapping
H.W. Jensen, A.K. Peters ed., 2001

Méthode stochastique

→ Monte Carlo

Passe 1:

- Tracé du chemin lumineux depuis les sources



Suivi de lumière

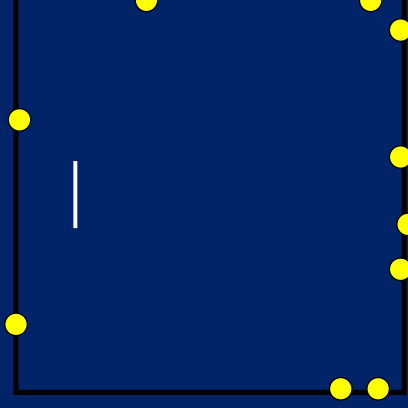
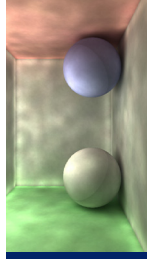
Realistic Image Synthesis using Photon Mapping
H.W. Jensen, A.K. Peters ed., 2001

Méthode stochastique

→ Monte Carlo

Passe 1:

- Tracé du chemin lumineux depuis les sources
- Stockage des impacts dans un kD-Tree



Passe 2: Reconstruction de l'éclairage

Suivi de lumière

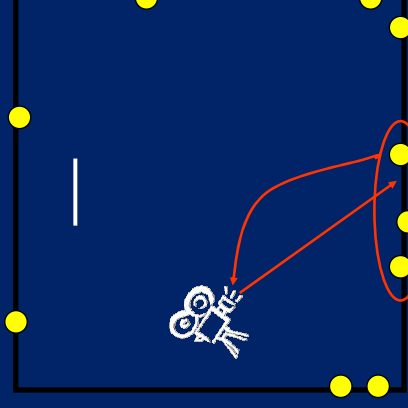
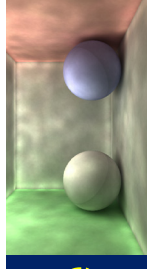
Realistic Image Synthesis using Photon Mapping
H.W. Jensen, A.K. Peters ed., 2001

Méthode stochastique

→ Monte Carlo

Passe 1:

- Tracé du chemin lumineux depuis les sources
- Stockage des impacts dans un kD-Tree

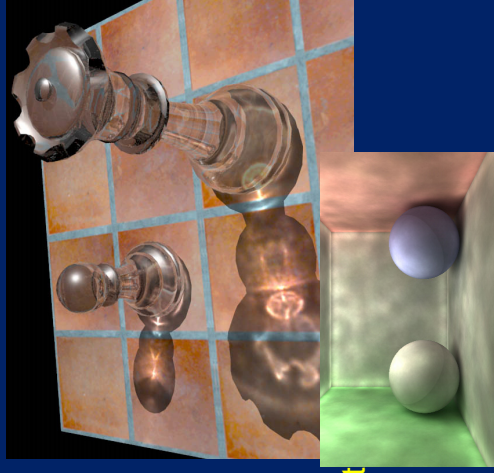


Passe 2: Reconstruction de l'éclairage

Suivi de lumière

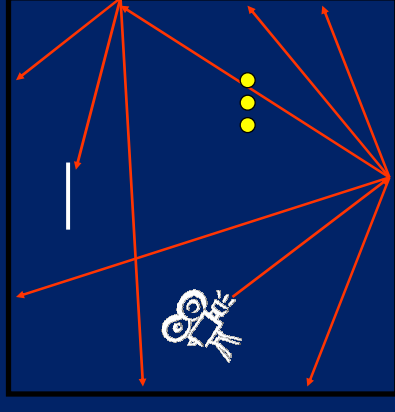
Realistic Image Synthesis using Photon Mapping
H.W. Jensen, A.K. Peters ed., 2001

- 🕒 Généricité (phénomènes représentables)
Implémentation simple
- 🕒 Temps de calcul
Sous échantillonnage
Limité aux surfaces diffuses ou parfaitement spéculaires



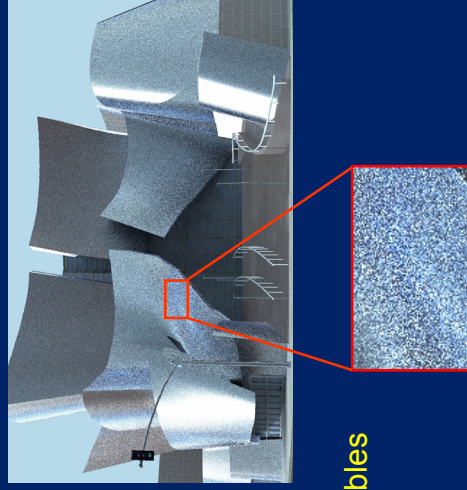
Suivi de chemins

- ➡ Méthode stochastique
Monte Carlo
- Tracé du chemin lumineux inverse (depuis la caméra)



Suivi de chemins

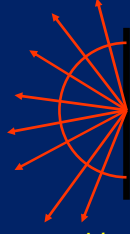
- 🕒 Généricité (BRDFs utilisables)
Implémentation simple
- 🕒 Temps de calcul
Sous échantillonnage
Certains phénomènes difficilement représentables



Plan

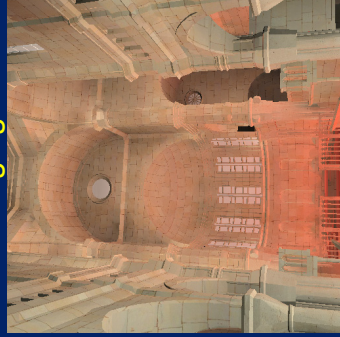
- Méthodes de calcul d'illumination globale
- Cache d'éclairage (Irradiance Caching)
- Cache de luminance (Radiance Caching)
- Quelques images...
- Conclusion
- Problèmes ouverts

Observations



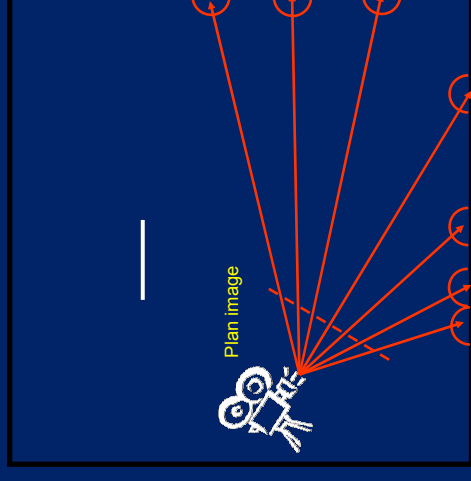
Complexité du calcul d'éclairage indirect

L'éclairage indirect change graduellement



Principe

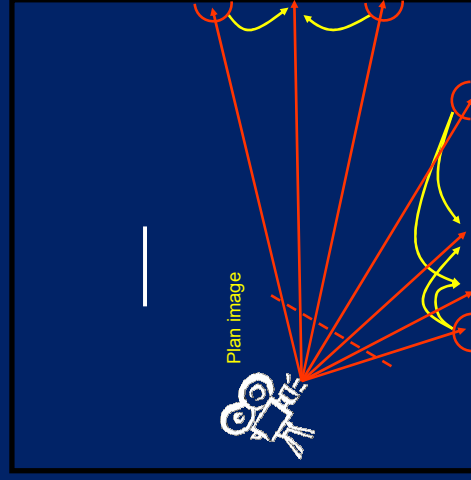
Basé sur le suivi de chemins



Suivi de chemin classique

Principe

Basé sur le suivi de chemins



↷ = Interpolation

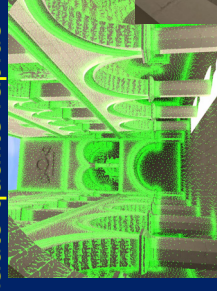
Irradiance Caching

Principe

Calcul épars de l'éclairage indirect

Interpolation

Rendu haute qualité rapide



Plan

Méthodes de calcul d'illumination globale

Cache d'éclairage (Irradiance Caching)

- Calcul et zone d'utilisation d'un enregistrement
- Interpolation
- Extrapolation par gradients
- Algorithme final

Cache de luminance (Radiance Caching)

Quelques images...

Conclusion

Problèmes ouverts



Plan

Méthodes de calcul d'illumination globale

Cache d'éclairage (Irradiance Caching)

- Calcul et zone d'utilisation d'un enregistrement
- Interpolation
- Extrapolation par gradients
- Algorithme final

Cache de luminance (Radiance Caching)

Quelques images...

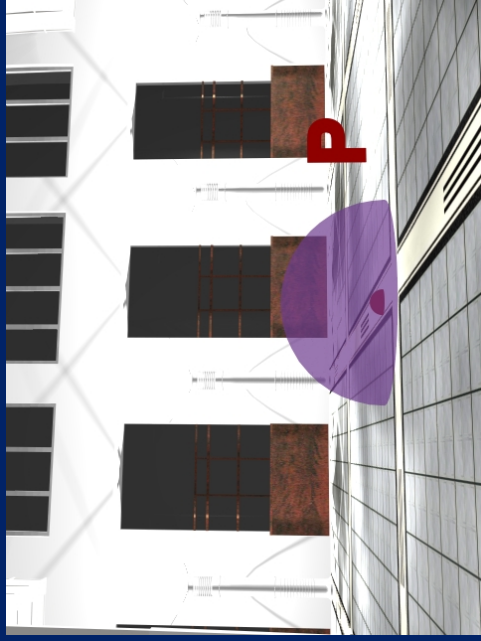
Conclusion

Problèmes ouverts



Calcul d'un enregistrement

Cas général

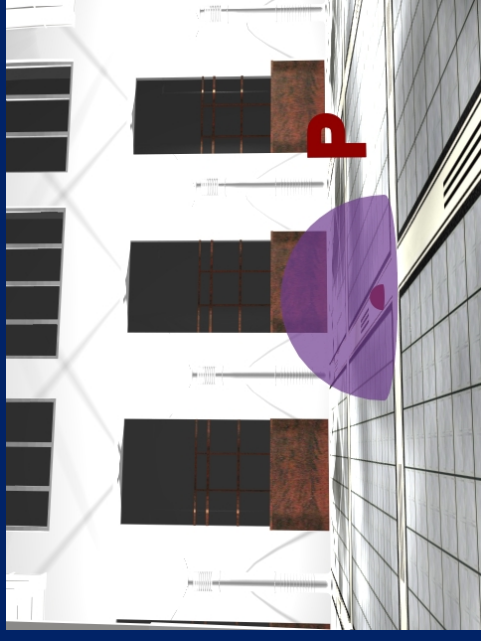


$$L_o(P, \omega_o) = \int L_i(P, \omega_i) * BRDF(\omega_o, \omega_i) * \cos(\theta) d\omega_i$$



Calcul d'un enregistrement

Interreflections diffuses



$$L_o(P, \omega_o) = \rho_d \int L_i(P, \omega_i) * \cos(\theta) d\omega_i$$



Calcul d'un enregistrement

Interreflections diffuses

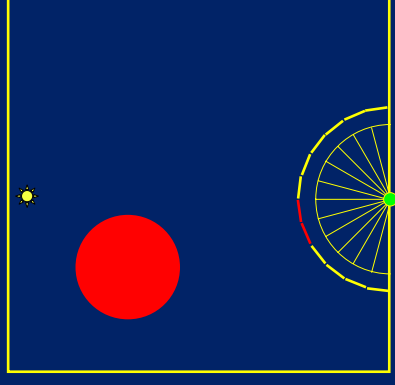
$$L_o(P, \omega_o) = \rho_d \int L_i(P, \omega_i) \cdot \cos(\theta) d\omega_i$$

$E_i(P)$

→ $L_o(P) = \rho_d E_i(P)$

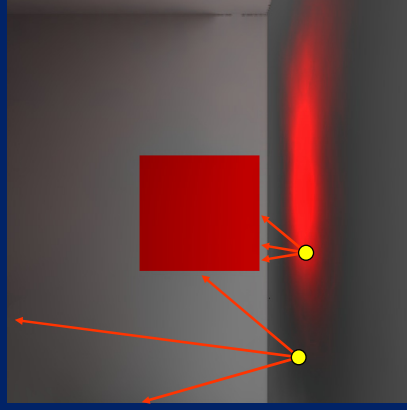
Calcul d'un enregistrement

En pratique



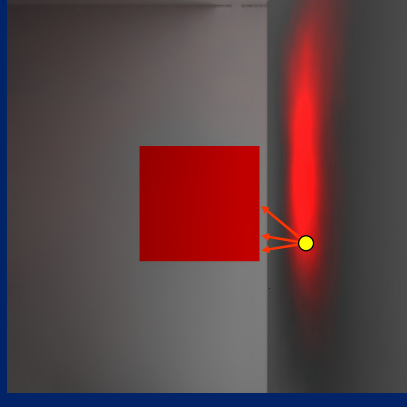
Echantillonnage stratifié

Calcul d'un enregistrement



Zone d'utilisation

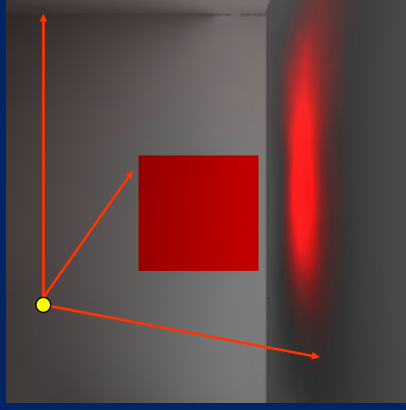
Observation :
L'éclairage indirect change +/- vite



Objets proches = changement rapide

Zone d'utilisation

Observation :
L'éclairage indirect change +/- vite



Objets lointains = changement lent

Zone d'utilisation

Observation :
L'éclairage indirect change +/- vite

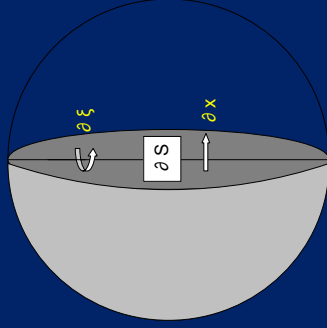
Conséquence :
Il est nécessaire d'adapter la densité de l'échantillonnage

Quantitatif

Idée :
Estimer le taux de changement de l'éclairage dans le voisinage
→ Calculer une borne supérieure

Zone d'utilisation

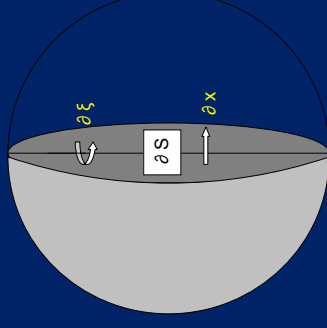
Modèle "split sphere"



Idée : Situation avec changement d'éclairage maximal

Zone d'utilisation

Modèle "split sphere"



Dev't Taylor 1^{er} degré
de l'éclairage:

$$\varepsilon \leq \left| \frac{\partial E}{\partial x} (x-x_0) + \frac{\partial E}{\partial \xi} (\xi-\xi_0) \right|$$

position orientation

Zone d'utilisation

Fonction de pondération



$$w_k(P) = \frac{1}{\frac{\|P-P_k\|}{R_k} + \sqrt{1-n \cdot n_k}} > 1/a$$

Distance

Divergence des normales



Cache d'éclairage et de luminance – P. Gautron 34

Zone d'utilisation

Fonction de pondération



$$w_k(P) = \frac{1}{\frac{\|P-P_k\|}{R_k} + \sqrt{1-n \cdot n_k}} > 1/a$$

Moyenne harmonique des distances des points visibles depuis P_k

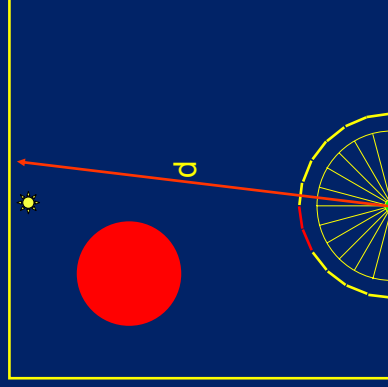
$$\frac{1}{R_k} = \sum \frac{1}{d_i}$$



Cache d'éclairage et de luminance – P. Gautron 35

Zone d'utilisation

En pratique



Echantillonnage stratifié



Cache d'éclairage et de luminance – P. Gautron 36

Plan

Méthodes de calcul d'illumination globale

Cache d'éclairage (Irradiance Caching)

Calcul et zone d'utilisation d'un enregistrement

Interpolation

Extrapolation par gradients

Algorithme final

Cache de luminance (Radiance Caching)

Quelques images...

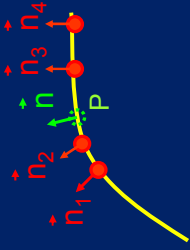
Conclusion

Problèmes ouverts



Cache d'éclairage et de luminance – P. Gautron 37

Interpolation



$$E(P) = \frac{\sum_{k \in S} E_k w_k(P)}{\sum_{k \in S} w_k(P)}$$

$$S = \{k / w_k(P) > 1/a\}$$

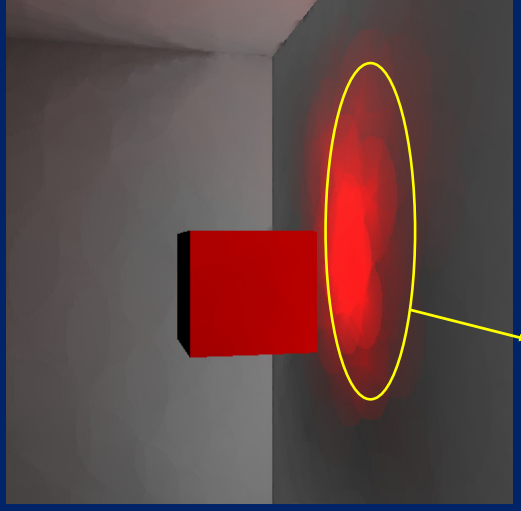
Interpolation

En pratique

Stockage des enregistrements dans un arbre octree

Rendu : requêtes dans l'octree

Interpolation



Éclairage constant dans la zone d'utilisation

Plan

Méthodes de calcul d'illumination globale

Cache d'éclairage (Irradiance Caching)

Calcul et zone d'utilisation d'un enregistrement

Interpolation

Extrapolation par gradients

Algorithme final

Cache de luminance (Radiance Caching)

Quelques images...

Conclusion

Problèmes ouverts

Gradients

Observation :

L'éclaircissement indirect change graduellement



Il n'est pas constant / déplacement et rotation



Simple interpolation insuffisante

Qualitatif

Idée :

Estimer le changement de l'éclaircissement dans le voisinage



Gradients



Cache d'éclaircissement et de luminance – P. Gautron 42

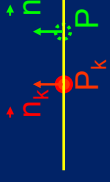
Gradients

Calculer le changement en fonction

de la rotation



du déplacement

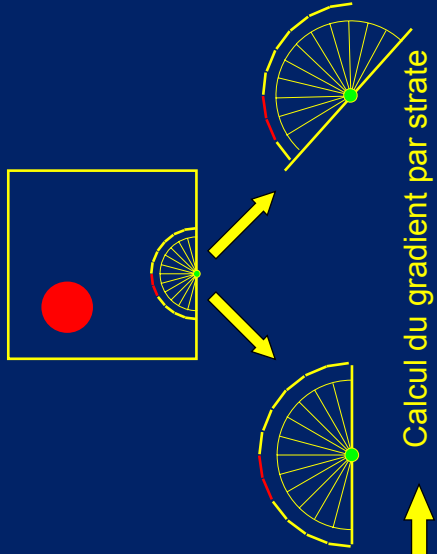


Cache d'éclaircissement et de luminance – P. Gautron 43

Gradient de rotation

Irradiance Gradients
Ward et al., EGWR 1992

Quel est le changement d'éclaircissement si on pivote la surface?



Calcul du gradient par strate



Cache d'éclaircissement et de luminance – P. Gautron 44

Gradient de rotation

Rappel : gradient en coordonnées sphériques

$$\vec{\nabla} f = \frac{\partial f}{\partial r} \vec{1}_r + \frac{1}{r \sin \phi} \frac{\partial f}{\partial \phi} \vec{1}_\phi + \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial \theta} \vec{1}_\theta$$



Cache d'éclaircissement et de luminance – P. Gautron 45

Gradient de rotation

Simplifications

$$\vec{\nabla} f = \underbrace{\frac{\partial f}{\partial r}}_0 \vec{1}_r + \frac{1}{r \sin \phi} \underbrace{\frac{\partial f}{\partial \phi}}_0 \vec{1}_\phi + \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial \theta} \vec{1}_\theta$$

E indépendant de r Limité au cas diffus

Choix arbitraire : $r = 1$

Gradient de rotation

Simplifications

$$\vec{\nabla} f = \frac{\partial f}{\partial \theta} \vec{1}_\theta$$

$$\vec{\nabla} E = \frac{\partial E}{\partial \theta} \vec{1}_\theta$$

$$E = \frac{\pi}{MN} \sum_{j=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} L_{j,k}$$

E obtenu par Monte Carlo
(échantillonnage uniforme du cosinus)

Gradient de rotation

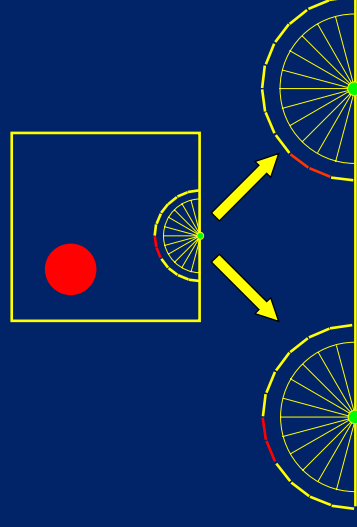
$$E = \frac{\pi}{MN} \sum_{j=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{L}_{j,k} \cos \theta_j$$

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} E = \frac{\partial E}{\partial \theta} \vec{1}_\theta &= \frac{\pi}{MN} \sum_{j=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} -\tilde{L}_{j,k} \sin \theta_j \vec{1}_{\theta_j,k} \\ &= \frac{\pi}{MN} \sum_{j=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} -L_{j,k} \frac{\sin \theta_j \vec{1}_{\theta_j,k}}{\cos \theta_j} \\ &= \frac{\pi}{MN} \sum_{j=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} -L_{j,k} \tan \theta_j \vec{1}_{\theta_j,k} \end{aligned}$$

avec $\vec{1}_{\theta_j,k}$ = vecteur du plan pointant dans la direction $\Phi_k + \pi/2$

Gradient de translation

Improved Radiance Gradient Computation
Kivvánek et al., SCCG 2005



Transfert d'une strate à l'autre

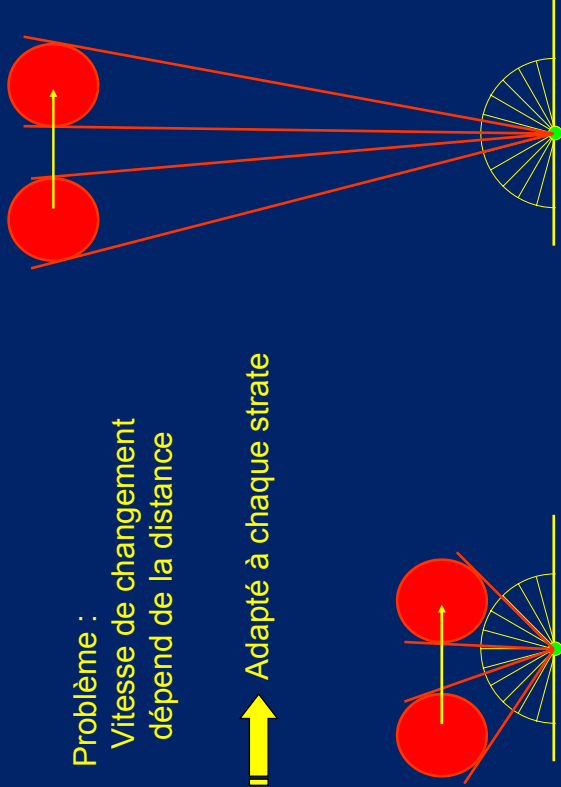
Gradient de translation

Problème :

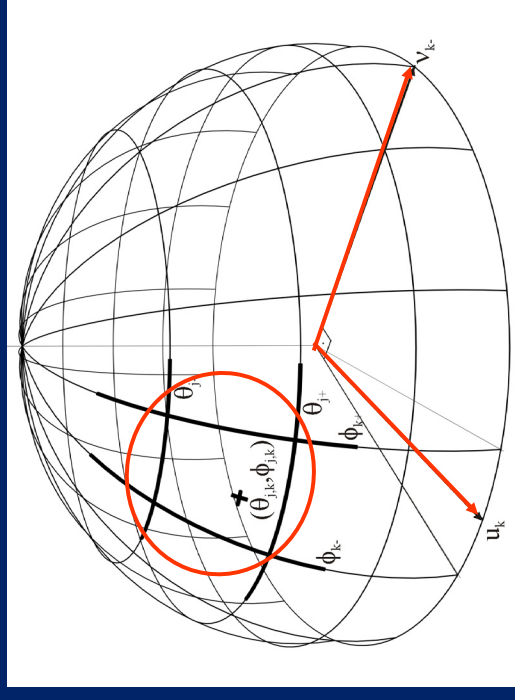
Vitesse de changement
dépend de la distance



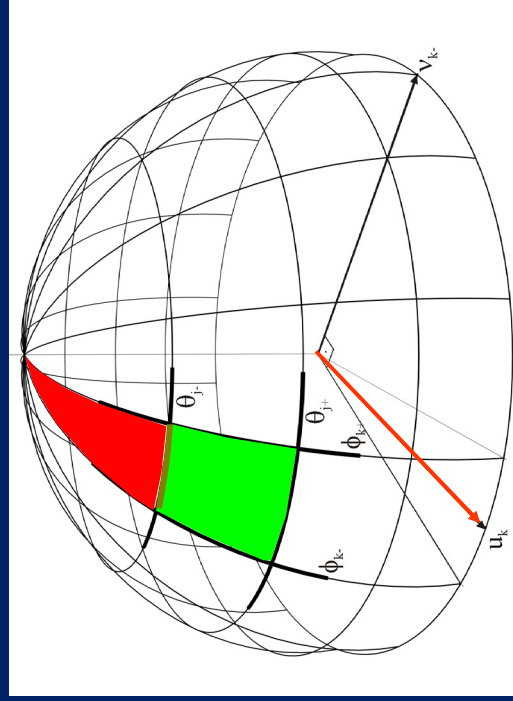
Adapté à chaque strate



Calcul pour une strate



Calcul pour une strate



Calcul pour une strate

Mouvement des parois : changement d'aire

Changement d'aire : changement angle solide

Changement angle solide : changement de
l'éclairage incident

Gradient de translation

Sommation des changements

Fonction de pondération : ici $H_l^m = \cos$

$$\vec{\nabla} \lambda_l^m = \sum_{k=0}^{N-1} \hat{u}_k \left[\frac{2\pi}{N} \sum_{j=1}^{M-1} \frac{\cos \theta_{j-} \sin \theta_{j-}}{\min\{r_{j,k}, r_{j-1,k}\}} (L_{j,k}^i - L_{j-1,k}^i) H_l^m(\theta_{j,k}, \phi_{j,k}) + \hat{v}_k \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} \frac{1}{\sin \theta_{j,k} \min\{r_{j,k}, r_{j,k-1}\}} (L_{j,k}^i - L_{j,k-1}^i) H_l^m(\theta_{j,k}, \phi_{j,k}) \right],$$

Gradient de translation

Sommation des changements

Fonction de pondération : ici $H_l^m = \cos$

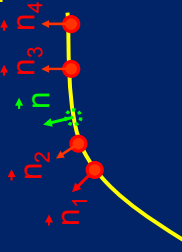
$$\vec{\nabla} \lambda_l^m = \sum_{k=0}^{N-1} \hat{u}_k \left[\frac{2\pi}{N} \sum_{j=1}^{M-1} \frac{\cos \theta_{j-} \sin \theta_{j-}}{\min\{r_{j,k}, r_{j-1,k}\}} (L_{j,k}^i - L_{j-1,k}^i) H_l^m(\theta_{j,k}, \phi_{j,k}) + \hat{v}_k \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} \frac{1}{\sin \theta_{j,k} \min\{r_{j,k}, r_{j,k-1}\}} (L_{j,k}^i - L_{j,k-1}^i) H_l^m(\theta_{j,k}, \phi_{j,k}) \right],$$

Changement d'aire

Changement de luminance incidente

Pondération

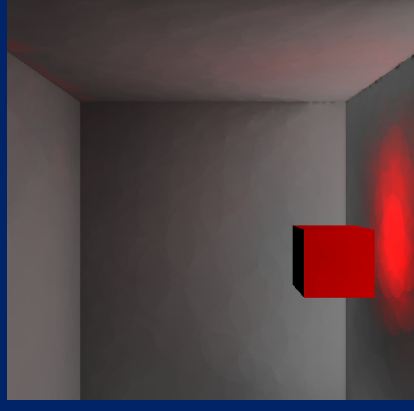
Interpolation par gradients



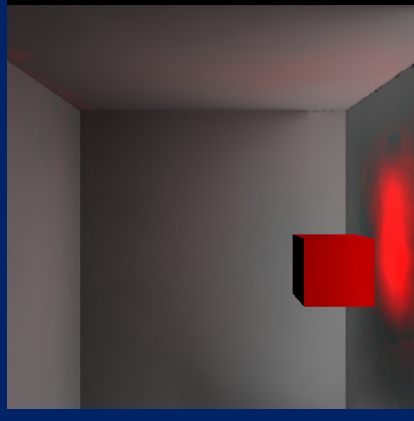
$$E(P) = \frac{\sum_{k \in S} \left[E_k + (\vec{n}_k \times \vec{n}) \vec{\nabla}_r E_k + \vec{D} \vec{\nabla}_t E_k \right] w_k(P)}{\sum_{k \in S} w_k(P)}$$

$$S = \{ k / w_k(P) > 1/a \}$$

Interpolation par gradients



Sans



Avec

Plan

Méthodes de calcul d'illumination globale

Cache d'éclairage (Irradiance Caching)

Calcul et zone d'utilisation d'un enregistrement
Interpolation
Extrapolation par gradients

Algorithme final

Cache de luminance (Radiance Caching)

Quelques images...

Conclusion

Problèmes ouverts



Cache d'éclairage et de luminance – P. Gautron 58

Irradiance Caching

Pour chaque pixel (i, j) de l'image

Calculer le point visible par (i, j)

Requête dans l'octree: peut-on interpoler?

Si oui

Renvoyer la valeur **interpolée**

Sinon

Calculer un nouvel enregistrement

Stocker l'enregistrement dans l'octree

Renvoyer la valeur **calculée**

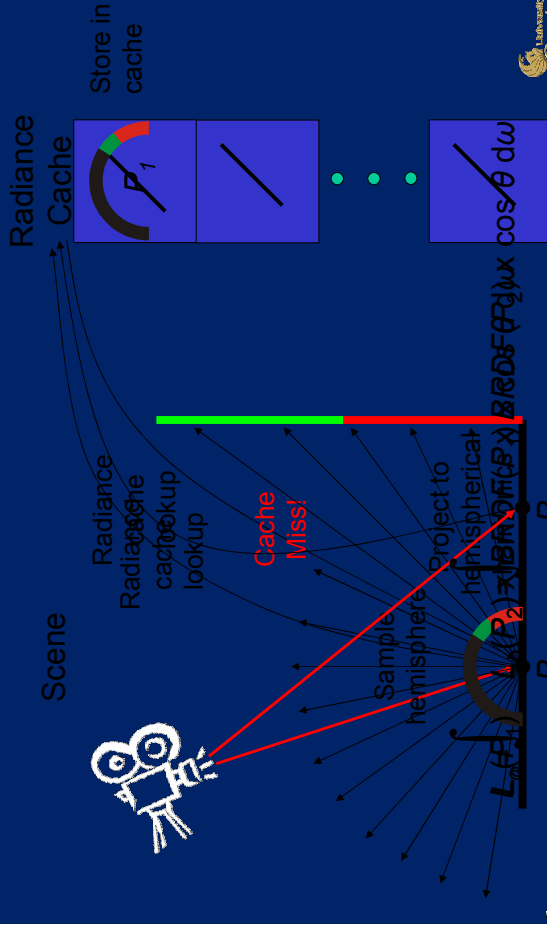
Fin si

Fin pour



Cache d'éclairage et de luminance – P. Gautron 59

Radiance Caching



Cache d'éclairage et de luminance – P. Gautron 60

Plan

Méthodes de calcul d'illumination globale

Cache d'éclairage (Irradiance Caching)

Cache de luminance (Radiance Caching)

Quelques images...

Conclusion

Problèmes ouverts



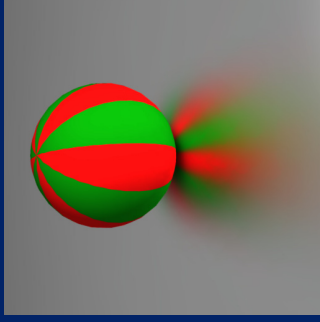
Cache d'éclairage et de luminance – P. Gautron 61

Observations

Irradiance Caching limité aux interreflections diffuses

Composante non diffuse calculée par path tracing classique

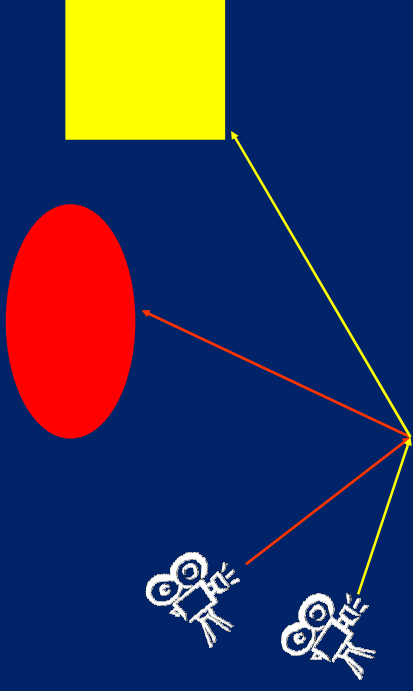
↳ Temps de calcul et bruit



Eclairage spéculaire indirect change graduellement

Idée : adapter IC aux IR spéculaires

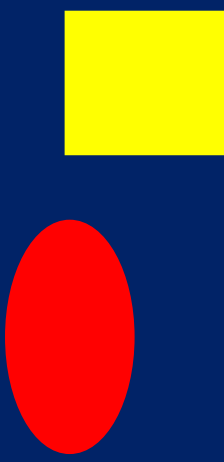
Vers le spéculaire



Dépendance du point de vue

→ Représentation directionnelle de la luminance incidente

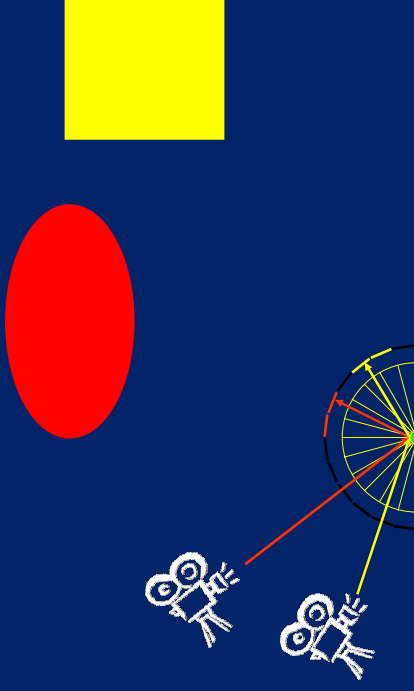
Vers le spéculaire



Fonction de luminance incidente

Variable pour tout point de vue

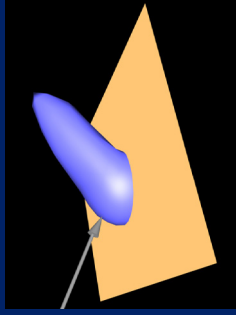
Vers le spéculaire



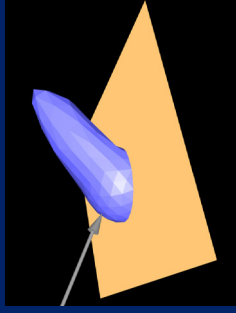
Fonction de luminance incidente

Variable pour tout point de vue

Fonction hémisphérique



≈



Fonction d'origine



Approx. Linéaire par morceaux

Besoin d'une meilleure méthode



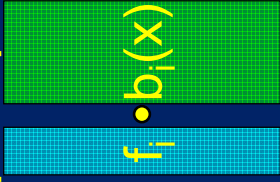
Meilleure approximation



Calcul rapide d'intégrales

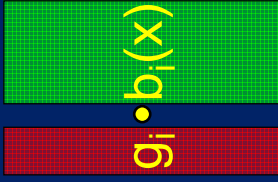
Rappel : polynômes orthogonaux

$$f(x) = f_i \cdot b_i(x)$$

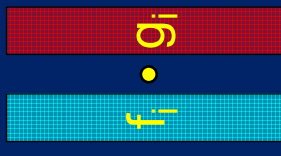


$$f_i = \int f(x)b_i(x)dx$$

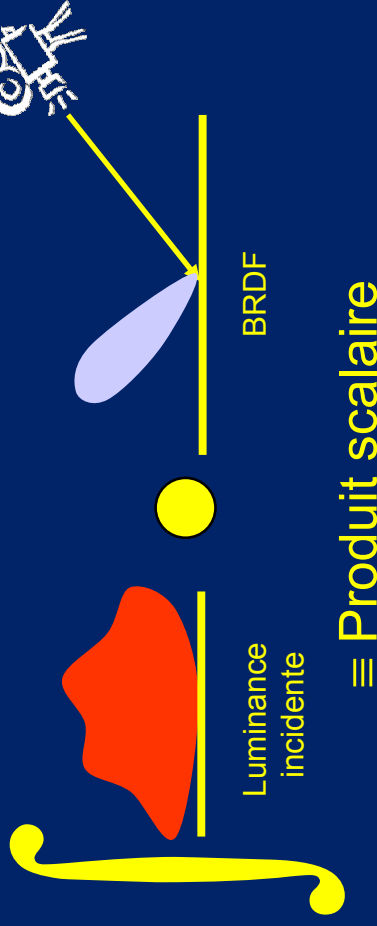
$$g(x) = g_i \cdot b_i(x)$$



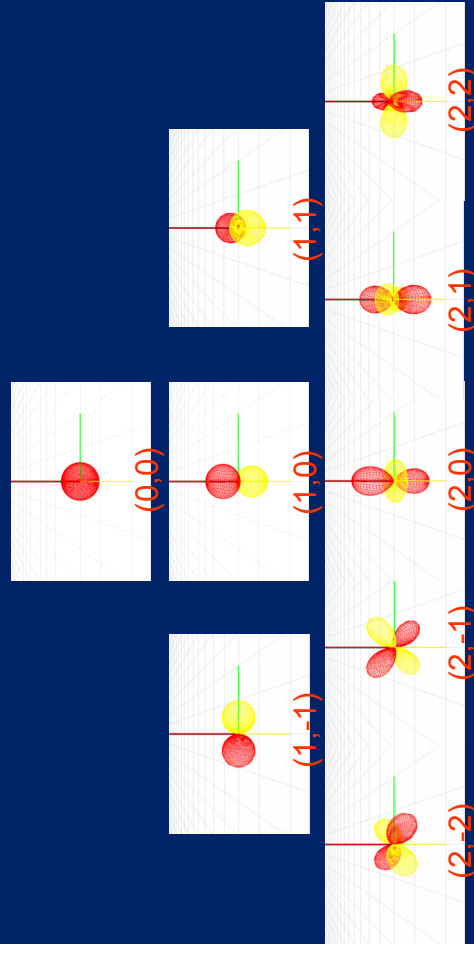
$$\int f(x)g(x)dx = f_i \cdot g_i$$



Application à l'illumination globale

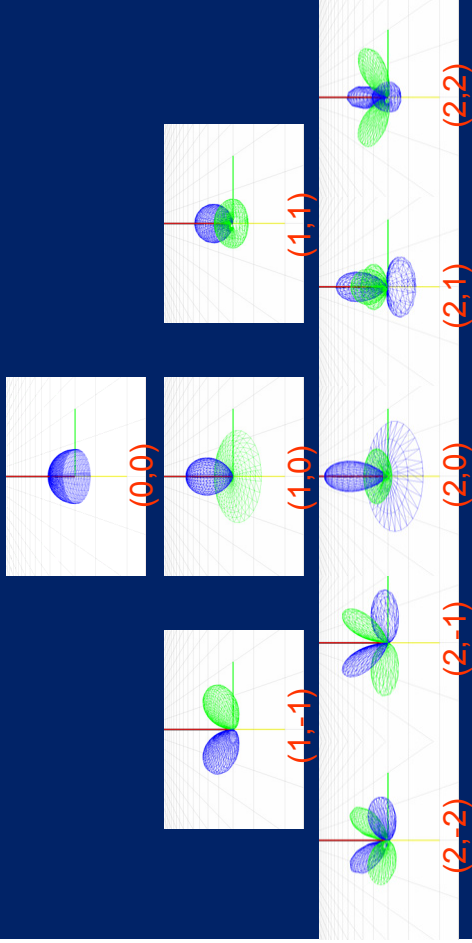


Harmoniques sphériques



Harmoniques hémisphériques

A Novel Hemispherical Basis for Accurate and Efficient Rendering
Gautron et al., EGSR 04



Harmoniques (hémi)sphériques

Harmoniques sphériques

$$Y_l^m(\theta, \phi) = K_l^m \Phi_l^m(\phi) P_l^m(\cos \theta)$$

Harmoniques hémisphériques

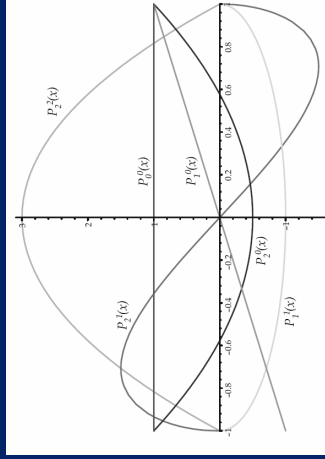
$$H_l^m(\theta, \phi) = \tilde{K}_l^m \Phi_l^m(\phi) P_l^m(2\cos \theta - 1)$$

avec

$$K_l^m = \sqrt{\frac{(2l+1)(l-|m|)!}{4\pi(l+|m|)!}} \quad \tilde{K}_l^m = \sqrt{2} K_l^m$$

$$\Phi_l^m(\phi) = \begin{cases} \sqrt{2} \cos(m\phi) & \text{si } m > 0 \\ \sqrt{2} \sin(-m\phi) & \text{si } m < 0 \\ 1 & \text{si } m = 0 \end{cases}$$

Polynôme de Legendre "associé"



$$(-l-m) P_l^m(x) = x(2l-1) P_{l-1}^m(x) - (l+m-1) P_{l-2}^m(x)$$

$$P_m^m(x) = (-1)^m (2m-1)!! (1-x^2)^{m/2} \quad (2m-1)!! = \prod_{i=1}^{2m-1} i$$

$$P_{m+1}^m(x) = x(2m+1) P_m^m(x)$$

Harmoniques (hémi)sphériques

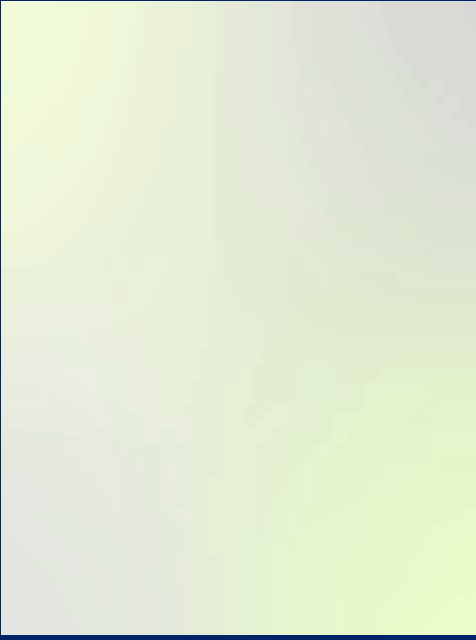
Avantages:

- Simplicité d'utilisation
- Compacité de la représentation
- Possibilité de rotation

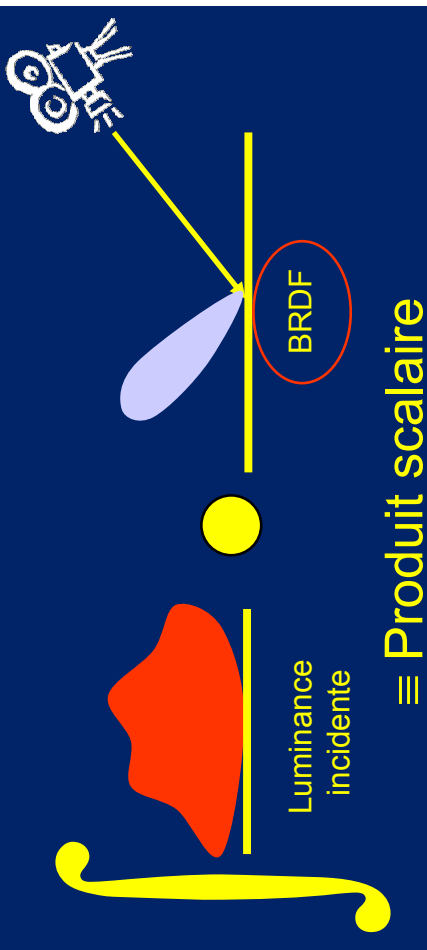
Inconvénient:

- Limité aux basses fréquences

Harmoniques (hémi)sphériques



Radiance Caching



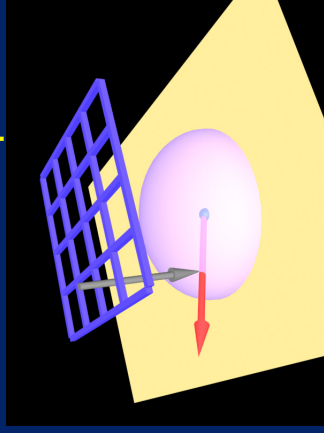
Luminance
incidente

BRDF

≡ Produit scalaire

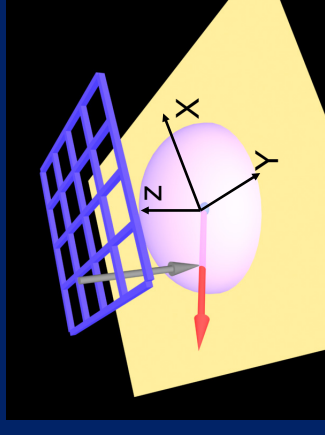
Représentation des BRDF

BRDF = Fonction 4D
→ Paramétrisation parabolique

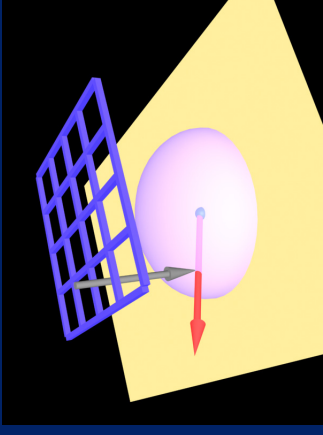


$$f(x,y) = (1/2)(1+x^2+y^2), \quad x^2+y^2 \leq 1$$
$$x = x \quad y = y \quad z = f(x,y)$$
$$x = (1/2)(1+x/(z+1))$$
$$y = (1/2)(1+y/(z+1))$$

Représentation des BRDF



Représentation des BRDF



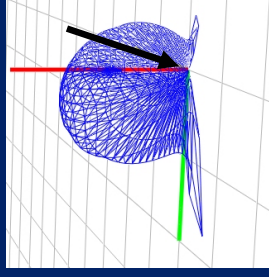
Pour chaque direction discrétisée, calcul des coefficients

$$f^m(\omega_o) = \int f_r(\omega_o, \omega_i) B_r^m(\omega_i) d\omega_i$$

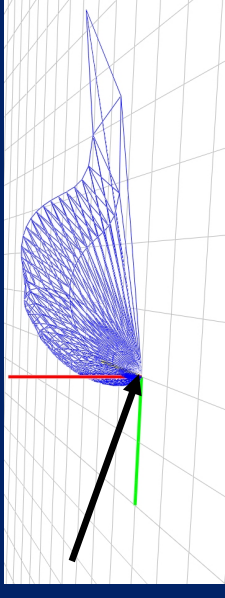
Monte Carlo

Représentation Adaptative

Pourquoi?



Basse fréquence
"(H)SH-Friendly"



Haute Fréquence

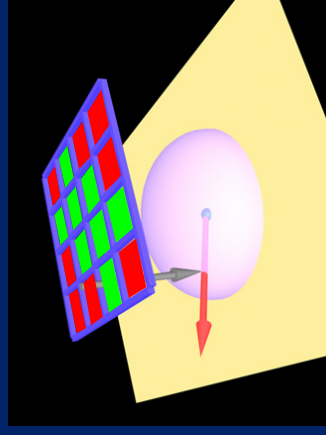
BRDF de Ward avec les mêmes paramètres

Représentation Adaptative

Comment?

BRDF = Fonction 4D

→ Paramétrisation parabolique



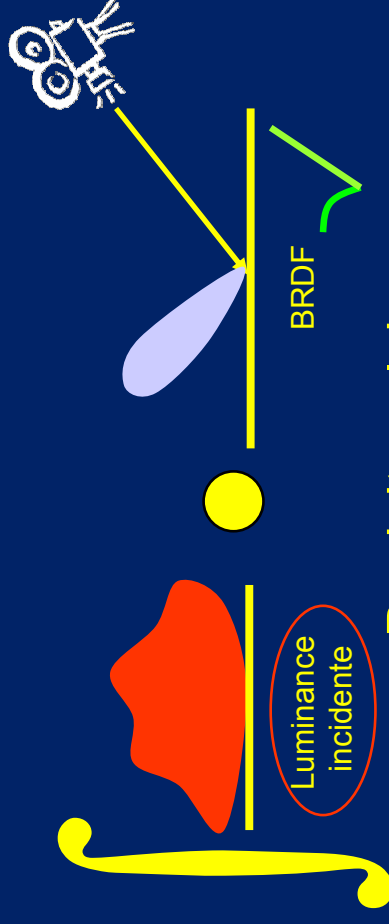
Non HSH → Monte Carlo

→ Monte Carlo

HSH → RC

→ RC

Radiance Caching



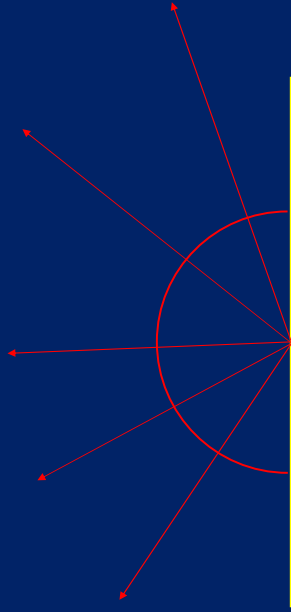
Luminance incidente

BRDF

≡ Produit scalaire

Luminance Incidente

$$\lambda_i^m(P) = \int L_i(P, \omega) B_l^m(\omega) d\omega_i$$



Échantillonnage identique à Irradiance Caching

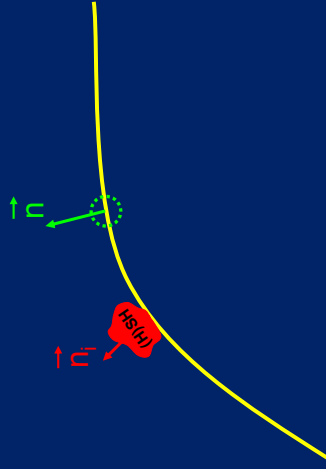
Luminance Incidente

$$\lambda_i^m(P) = \int L_i(P, \omega) B_l^m(\omega) d\omega_i$$

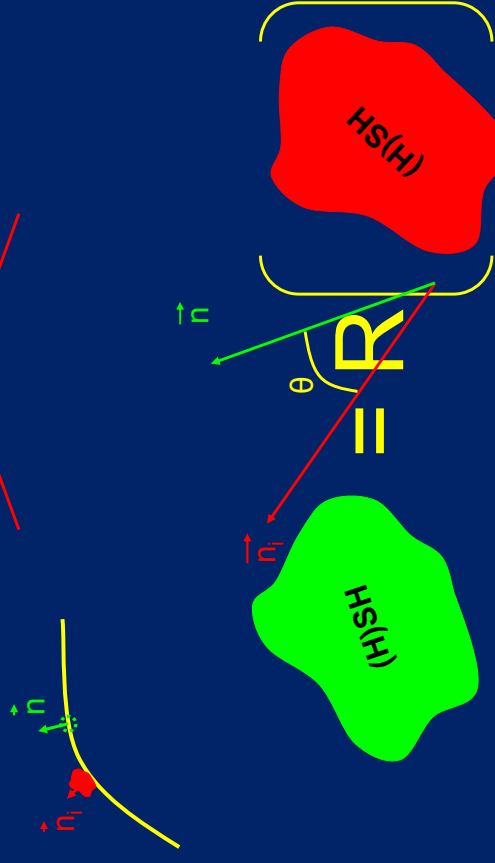


Échantillonnage identique à Irradiance Caching

Gradient de luminance



~~Gradient de rotation~~



Matrice de rotation

Gradient de translation

Sommation des changements comme IC

Fonction de pondération : ici $H_l^m = (H)SH$

$$\vec{\nabla} \lambda_l^m = \sum_{k=0}^{N-1} \hat{u}_k \frac{2\pi}{N} \sum_{j=1}^{M-1} \frac{\cos \theta_{j-1} \sin \theta_j}{\min\{r_{j,k}, r_{j-1,k}\}} \left[\begin{array}{l} H_l^m(\theta_{j,k}, \phi_{j,k}) \\ H_l^m(\theta_{j,k-1}, \phi_{j,k-1}) \end{array} \right]$$

$$\hat{v}_k = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} \frac{1}{\sin \theta_{j,k} \min\{r_{j,k}, r_{j,k-1}\}} \left[\begin{array}{l} H_l^m(\theta_{j,k}, \phi_{j,k}) \\ H_l^m(\theta_{j,k-1}, \phi_{j,k-1}) \end{array} \right]$$

Changement d'aire

Changement de
luminance incidente

Pondération

Plan

Méthodes de calcul d'illumination globale

Cache d'éclairage (Irradiance Caching)

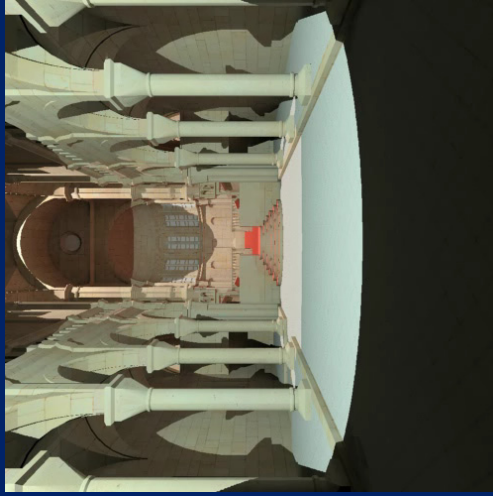
Cache de luminance (Radiance Caching)

Quelques images...

Conclusion

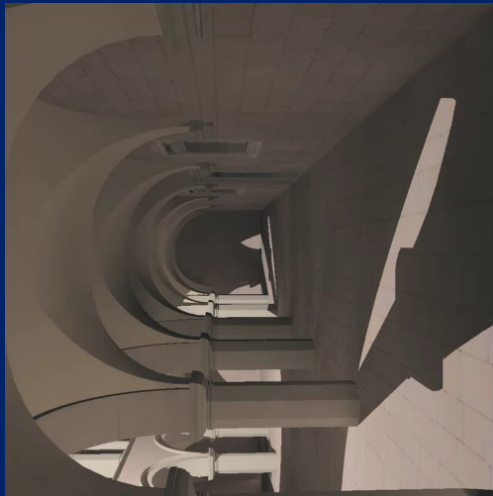
Problèmes ouverts

Irradiance Caching



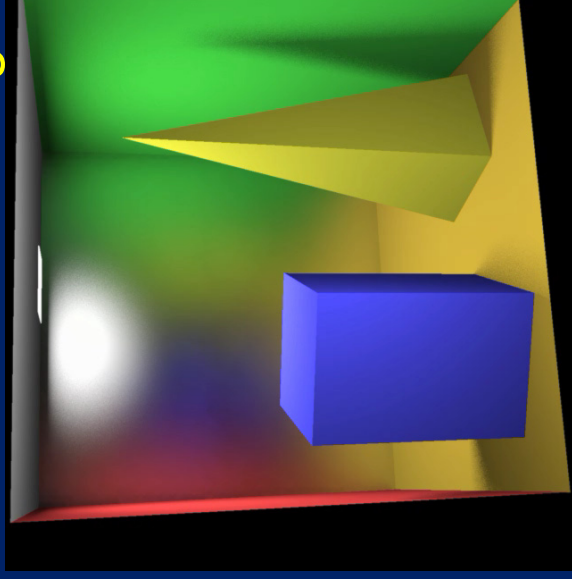
Sibenik Cathedral

Irradiance Caching

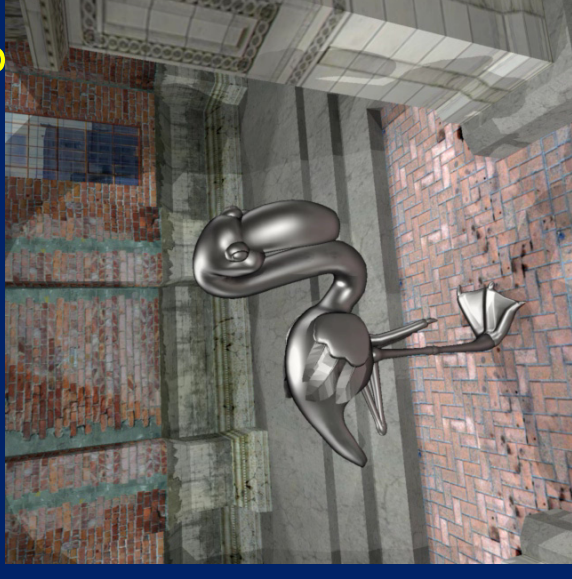


Sponza Atrium

Radiance Caching



Radiance Caching



Monte Carlo

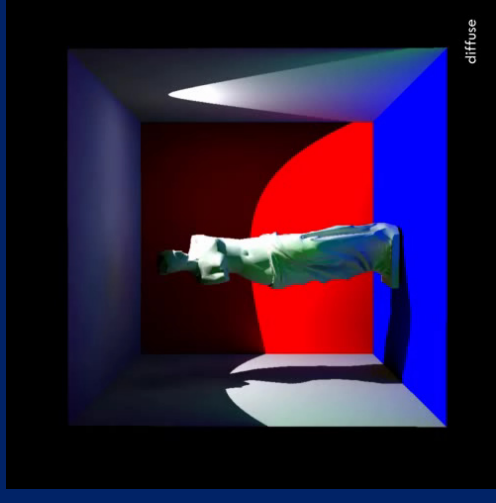


5 min/image



Radiance Caching

Radiance Caching



Plan

Méthodes de calcul d'illumination globale

Cache d'éclairage (Irradiance Caching)

Cache de luminance (Radiance Caching)

Quelques images...

Conclusion

Problèmes ouverts



Cache d'éclairage et de luminance – P. Gautron 94



Cache d'éclairage et de luminance – P. Gautron 95

Conclusion

Méthode d'illumination globale

Basé sur échantillonnage épars et interpolation

Gradients pour interpolation de plus haut degré

Interréflexions diffuses et spéculaires basse fréquence

Haute qualité



Cache d'éclairage et de luminance – P. Gautron 95

Problèmes ouverts

BRDF et fonction de luminance incidente haute fréquence

Réfraction

Diffusion sous surfacique

Scènes avec objets animés



Cache d'éclairage et de luminance – P. Gautron 96



Cache d'éclairage et de luminance – P. Gautron 97

Un peu de lecture...

A Ray Tracing Solution for Diffuse Interreflection, Ward et al. SIGGRAPH 1988

Irradiance Gradients, Ward et al., EGWR 1992

Radiance Caching for Efficient Global Illumination Computation,
Křivánek et al., IEEE TVCG 2005

Improved Radiance Gradients, Křivánek et al., SCCG 2005

Radiance Cache Splatting: A GPU-Friendly Global Illumination Algorithm,
Gautron et al., EGSR 2005

A Novel Hemispherical Basis for Accurate and Efficient Rendering,
Gautron et al., EGSR 2004

Physically Based Rendering: From Theory to Implementation,
Pharr et al., Morgan Kaufmann ed., 2004



Cache d'éclairage et de luminance – P. Gautron 97