

Utilisation de l'échantillonnage d'importance pour la simulation d'éclairage

Daniel Meneveaux, Mickaël Ribardière

Laboratoire XLIM, AXE ASALI, Université de Poitiers
Équipe « informatique Graphique »

Contexte : la synthèse d'images réalistes

- Nombreuses applications concrètes :
 - Le cinéma



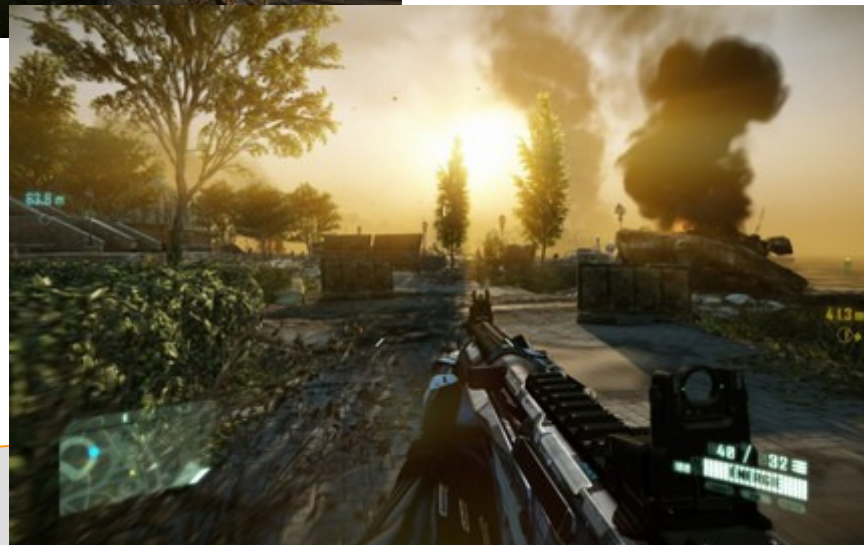
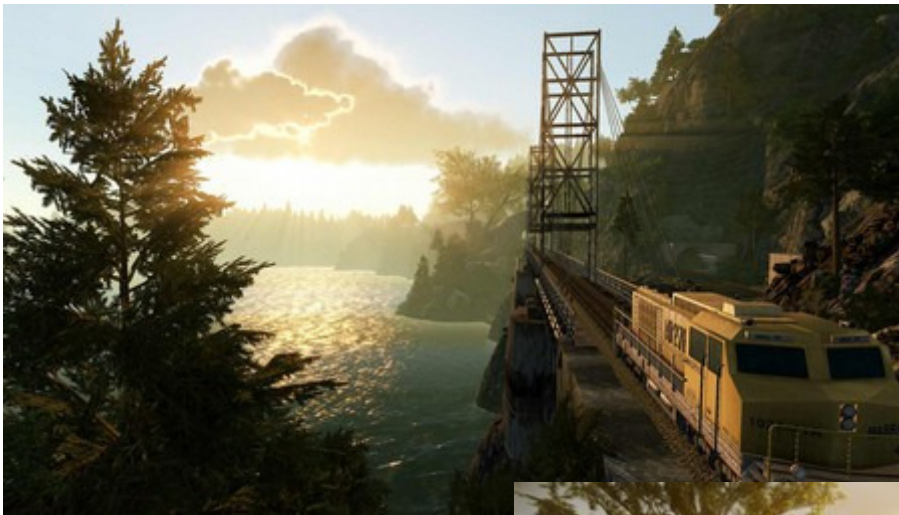
Contexte : la synthèse d'images réalistes

- Nombreuses applications concrètes :
 - L'architecture



Contexte : la synthèse d'images réalistes

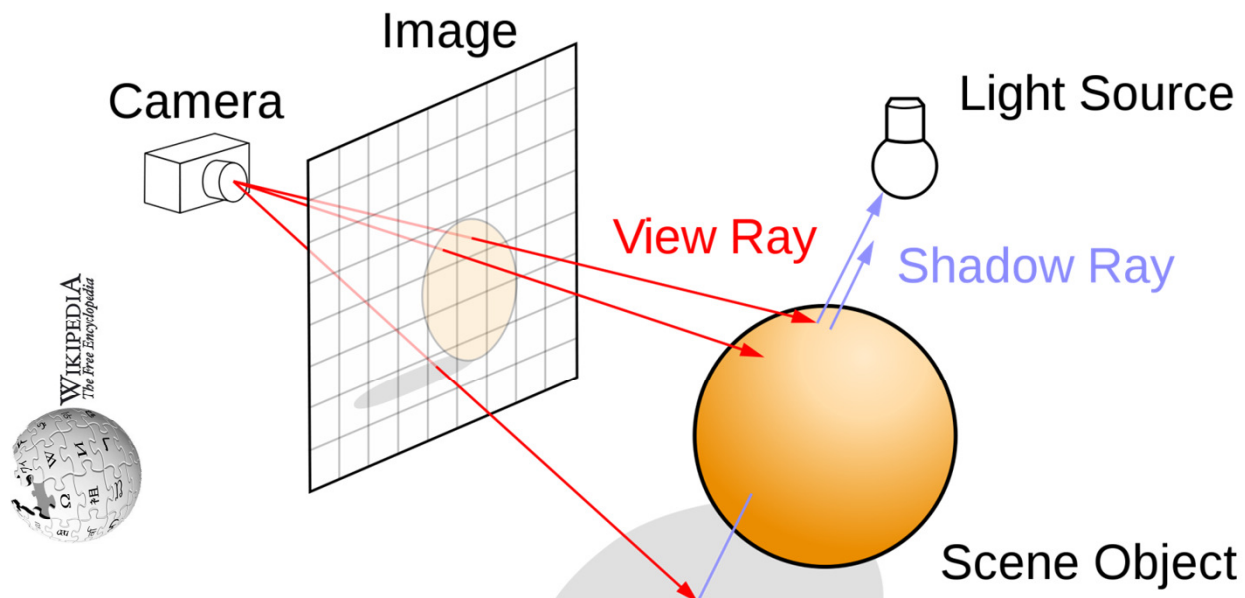
- Nombreuses applications concrètes :
 - Le jeu vidéo



etc.

Contexte : la synthèse d'images réalistes

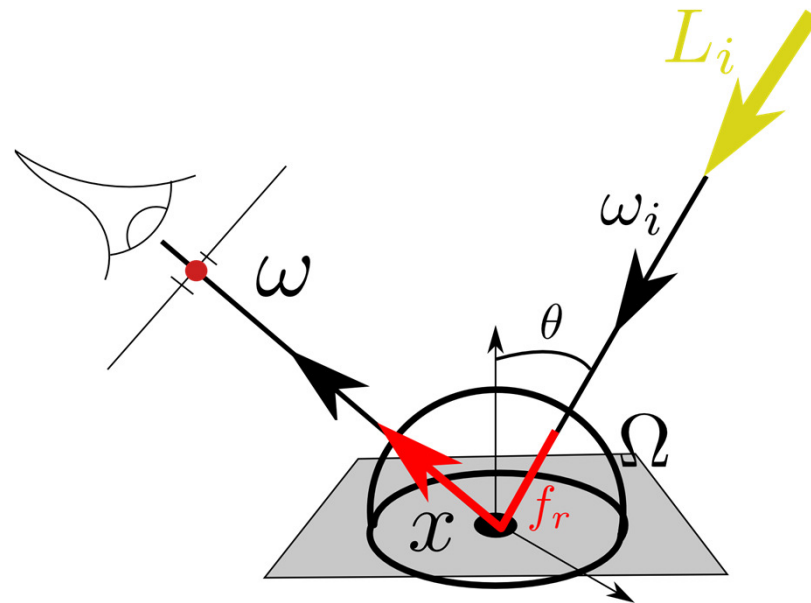
- Une image est une grille régulière à 2 dimensions
 - Un cellule est appelée *pixel*
- Objectif : évaluer la *quantité de lumière* **pour chaque pixel**
 - On parle de ***luminance*** pour qualifier cette quantité de lumière



Revenons à la synthèse d'image

- Objectif : définir la luminance passant par un pixel
 - ✓ Équation de rendu

$$L(x, \omega) = \int_{\Omega} L_i(\omega_i) f_r(x, \omega_i, \omega) \cos\theta d\omega_i$$

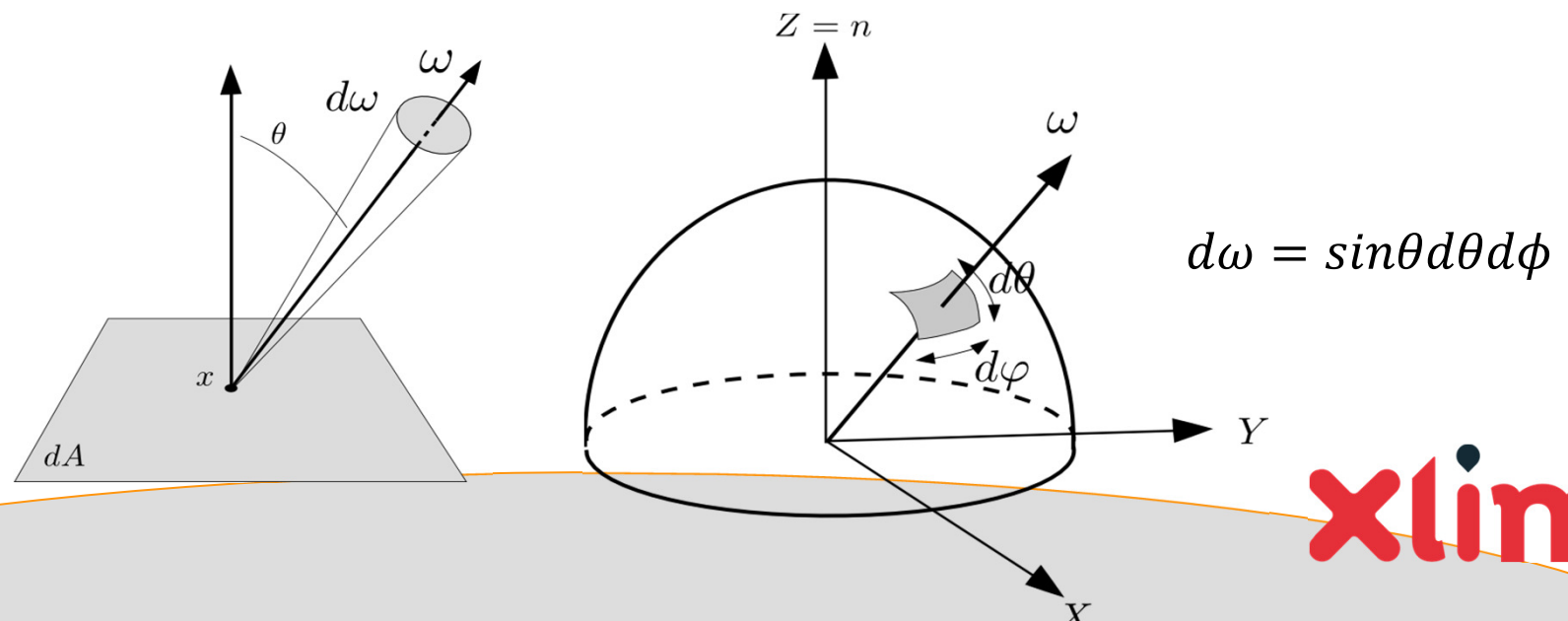


Luminance (énergétique)

- Luminance ($W.m^{-2}.sr^{-1}$) :
flux par unité d'angle solide et par unité d'aire projetée

$$L(x, \omega) = \frac{d^2\Phi}{\cos\theta d\omega dA}$$

- Grandeur la plus utilisée en synthèse d'image
- Elle est constante le long d'un chemin rectiligne...
...dans le vide

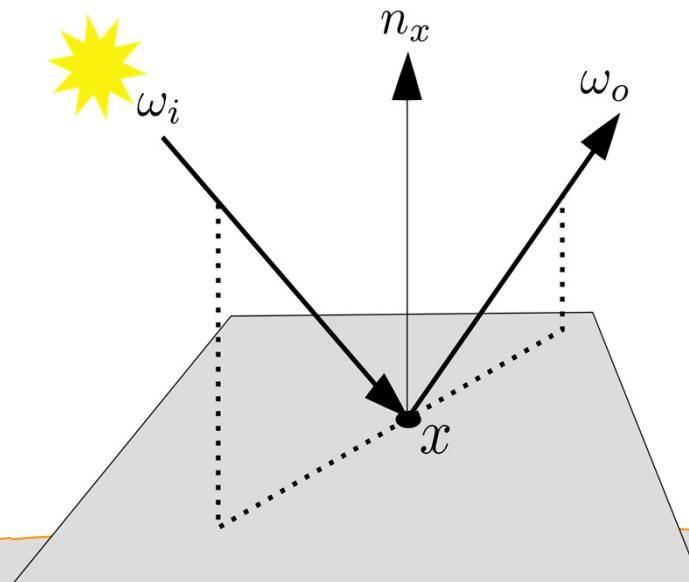


BRDF

- La BRDF est une fonction à 4 dimensions
- *Exprime la luminance réfléchie par un élément de surface dans une direction*

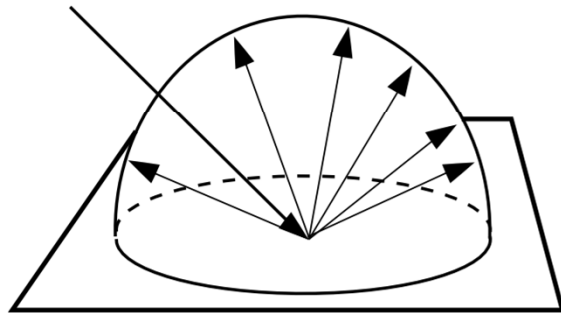
$$L(x, \omega) = \int_{\Omega} L_i(\omega_i) f_r(x, \omega_i, \omega) \cos\theta d\omega_i$$

$$f_r(x, \omega_i, \omega_o) = \frac{dL(x, \omega_o)}{dE(x, \omega_i)} = \frac{dL(x, \omega_o)}{L(x, \omega_i) \cos(n_x, \omega_i) d\omega_i}$$

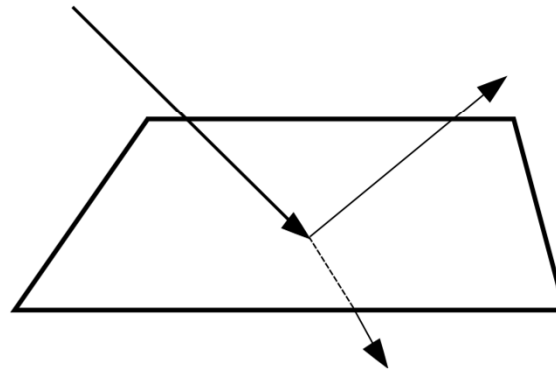
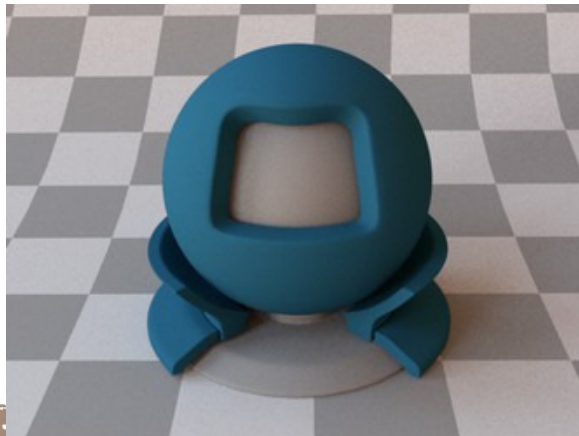


BRDF

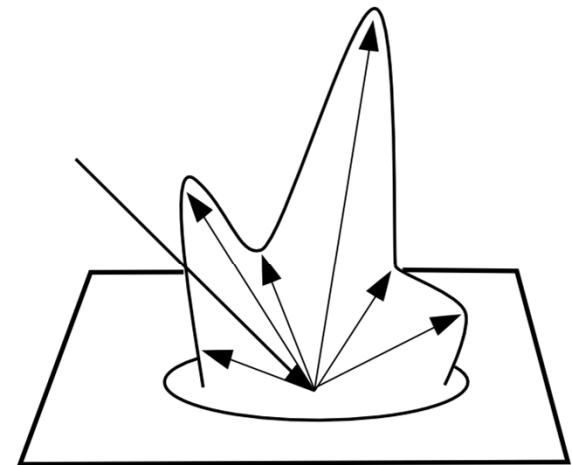
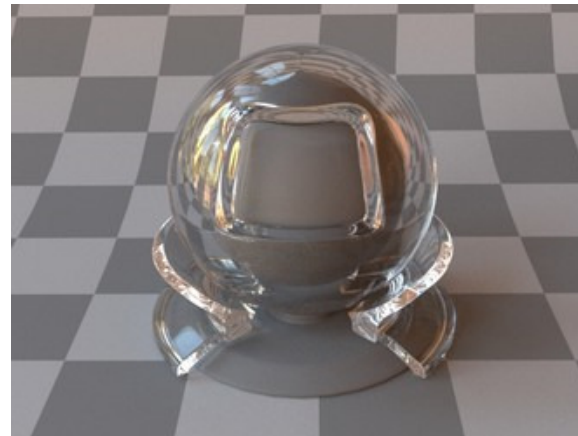
- Une classification des matériaux



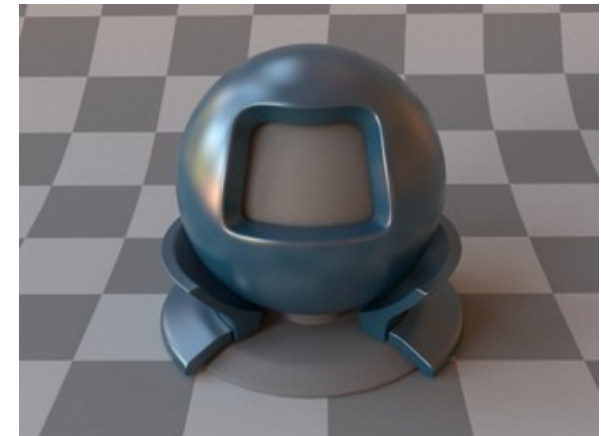
Diffus



Spéculaire / Transparent



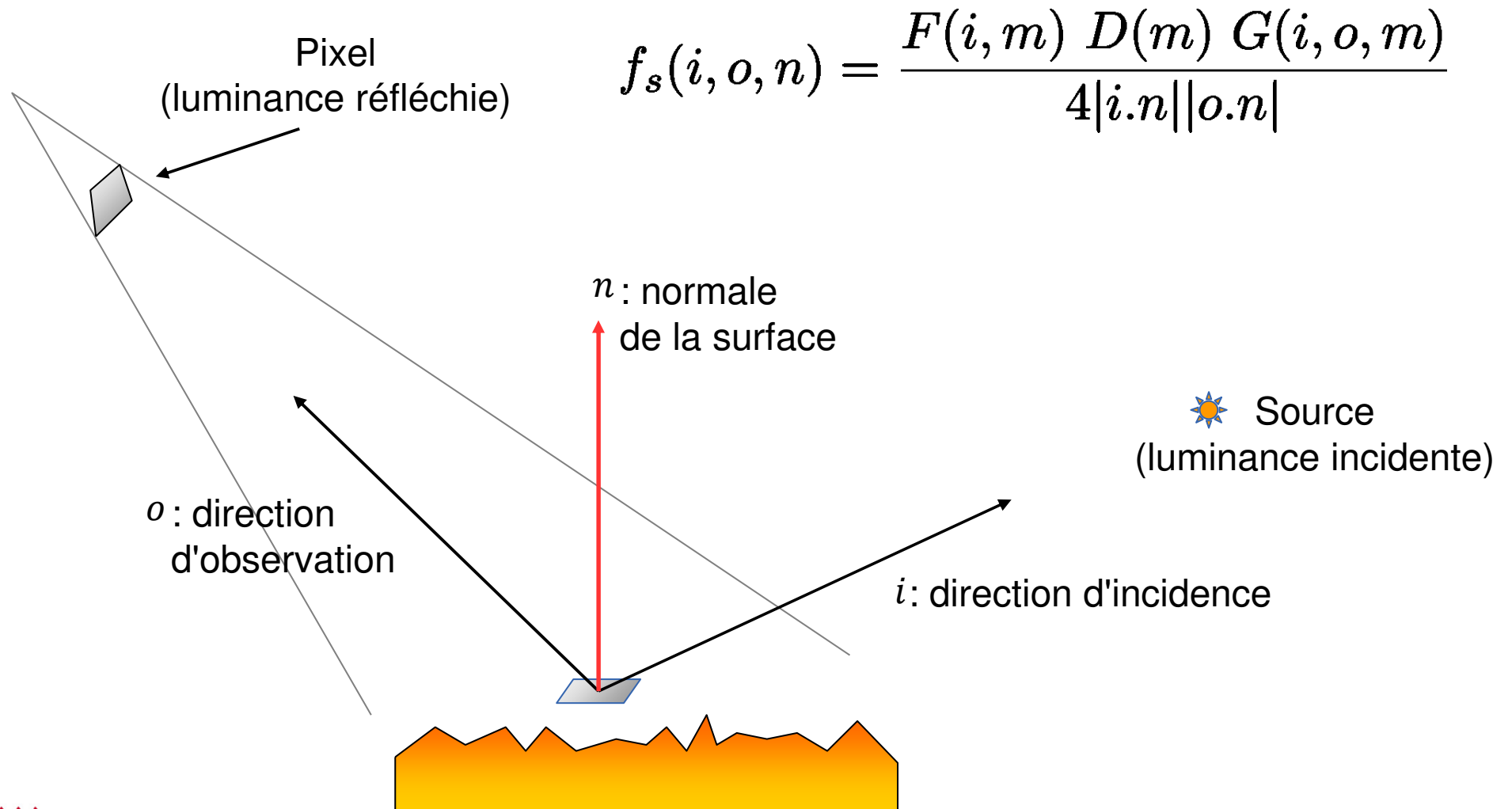
Glossy (brillant)



Modèles de BRDF

- Modèles physiques
 - Pour les matériaux simples
 - ✓ *Fresnel / Snell-Descartes pour les matériaux spéculaires et / ou transparents*
 - ✓ *Lambert pour les matériaux diffus*
- Modèles empiriques
 - Un grand nombre de modèles proposés
 - ✓ *Phong, Blinn-Phong, Lafortune, Ward...*
 - ✓ *Modèles à base de micro-facettes*
- Champ actif de recherche en informatique graphique
 - ✓ *(Computer Graphics)*

Surface et microfacettes



Modèles à base de microfacettes

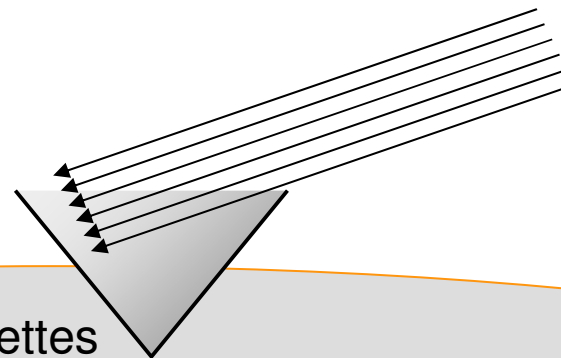
$$f_s(i, o, n) = \frac{F(i, m) D(m) G(i, o, m)}{4|i.n||o.n|}$$

- Représentation statistique de la géométrie
 - ✓ *Surface composée de petites aspérités (facettes)*
 - ✓ *Même réflectance pour un seul matériau (hypothèse)*
- Analogie pixel
 - ✓ *Du point de vue de l'observateur, détails non visibles*
 - ✓ *Luminance réfléchie globale = somme des contributions*
- Paramètres
 - ✓ *Distribution des facettes*
 - ✓ *Leur réflectance*

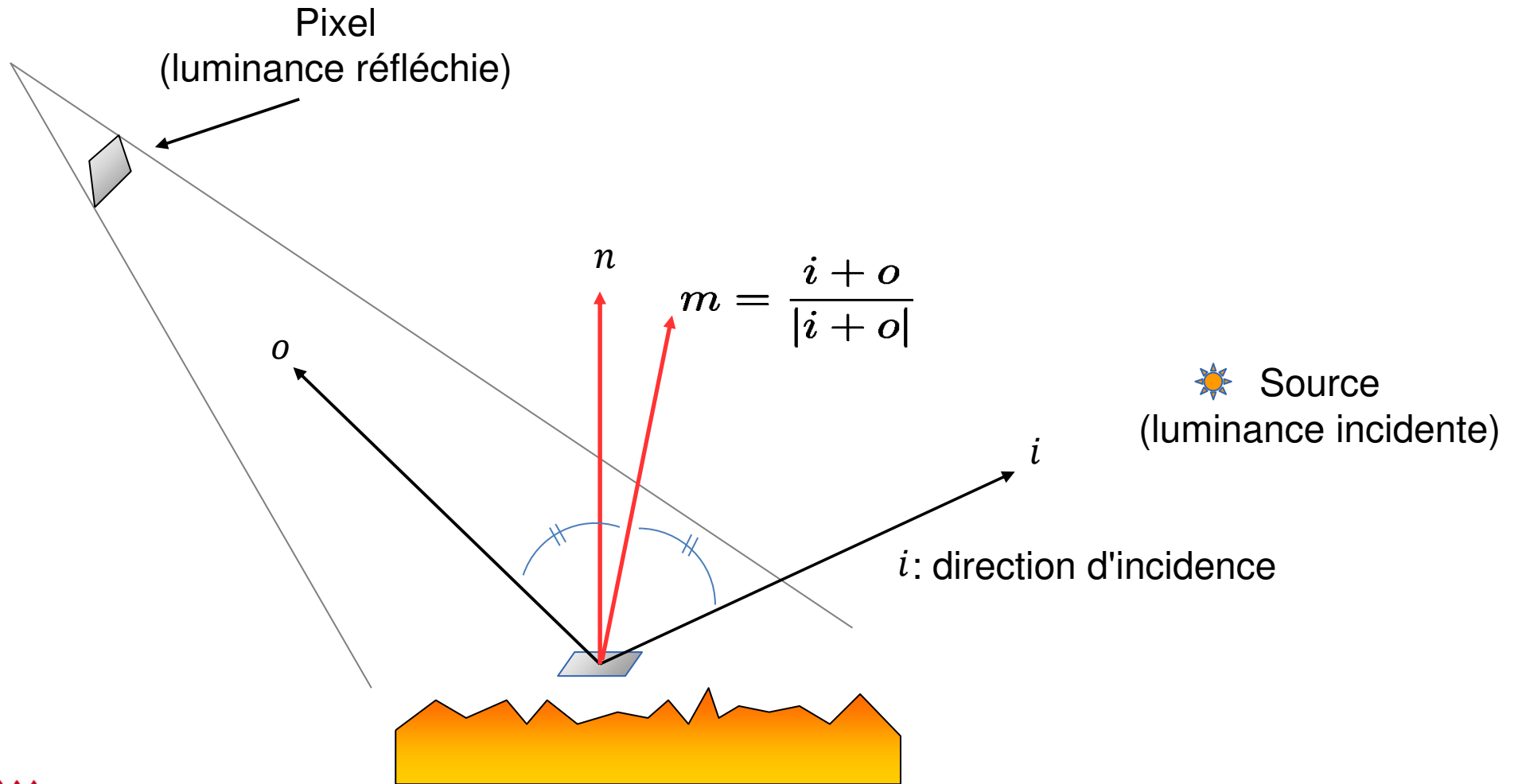
Paramètres de représentation

$$f_s(i, o, n) = \frac{F(i, m) D(m) G(i, o, m)}{4|i.n||o.n|}$$

- Somme des contributions de toutes les facettes
 - ✓ *De réflectance*
- Pour chaque facette
 - ✓ *Probabilité d'exister $D(m) \Rightarrow$ Distribution*
- Ombrage (source), masquage (observateur) :
 - ✓ *Facteur d'atténuation : $G(i, o, m)$*



Surface et microfacettes



Choix de F, D et G

- Représentation pour Fresnel

- ✓ *Représentation exacte possible mais (légèrement) coûteuse*
- ✓ *Approximations [CT82,Sch94]*

- Choix des distributions $D(m)$

- ✓ *Respect de la conservation d'énergie*
 - ✓ *Représentation cohérente pour les surfaces*
 - ✓ *Bonnes propriétés pour l'échantillonnage d'importance*
- $$\int D(m) \cos(\theta_m) d\omega_m = 1$$

- Choix du masquage $G(i,o,m)$

- ✓ *Cohérence avec la distribution possible ?*
- ✓ *Toujours la plausibilité physique ?*
- ✓ *Quelle géométrie sous-jacente ?*

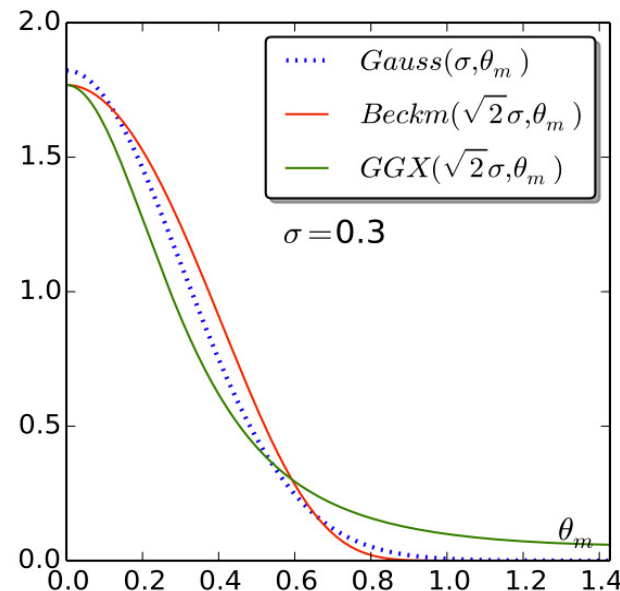
Distributions (D) utilisées habituellement

- Beckmann :
$$D(m) = \frac{1}{\pi\sigma^2 \cos^4\theta_m} e^{(-\tan^2\theta_m/2\sigma^2)}$$

- Walter GGX :
$$D(m) = \frac{\sigma_w^2}{\pi \cos^4\theta_m (\sigma_w^2 + \tan^2\theta_m)^2}$$

- Ou d'autres !

- Bagher SGD, Stogryn,
- Ward, Phong, Schlick, etc.



Ombrage et Masquage (G)

- Mathématiquement / Physiquement important
 - ✓ *Conservation de l'énergie*
 - ✓ *Masquage effectif des incidences / réflexions lumineuses*
- Nombreuses discussions
 - ✓ *[Beckm65,Smith67,TS67,CT82,APS00,DHI+13,H14]*
 - ✓ *Modèles physiques, hypothèses simplificatrices, etc.*
- Parfois [TS67] (pour donner un exemple simple)

$$G(n, m, i, o) = \min \left\{ 1, \frac{2(n.m)(n.o)}{o.m}, \frac{2(n.m)(n.i)}{(i.m)} \right\}$$

- Actuellement le plus « correct » [APS00,WMLT07,H13]

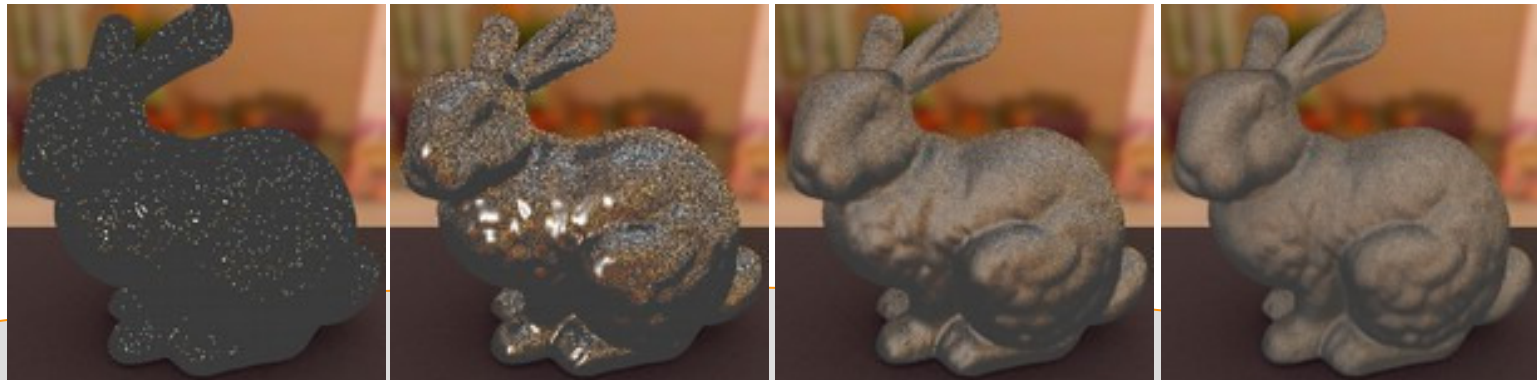
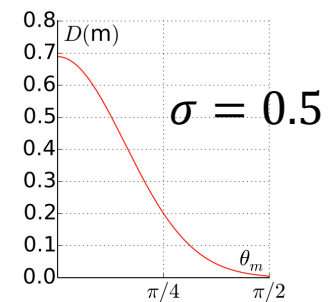
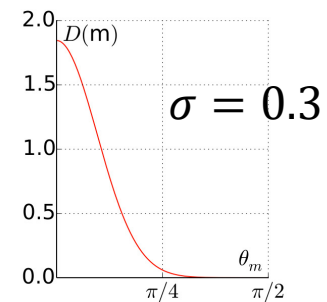
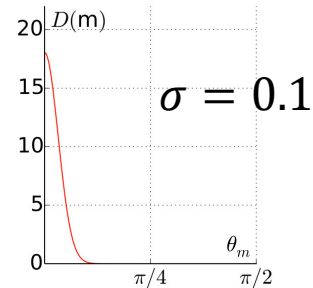
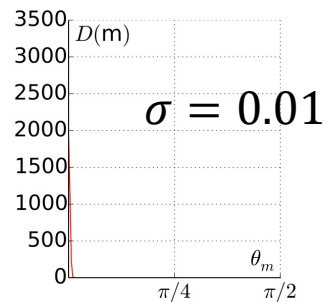
$$G(n, m, i, o) = G_1(n, m, i). G_1(n, m, o)$$

Intégration et microfacettes

- Calcul de l'éclairement :
 - ✓ *Environnement lumineux, surfaces brillantes*
- Besoin d'échantillonner les directions

$$L_o(x, o) = \int_{\Omega} L_i(x, i) f_r(x, i, o) \cos\theta d\omega$$

Uniforme ?



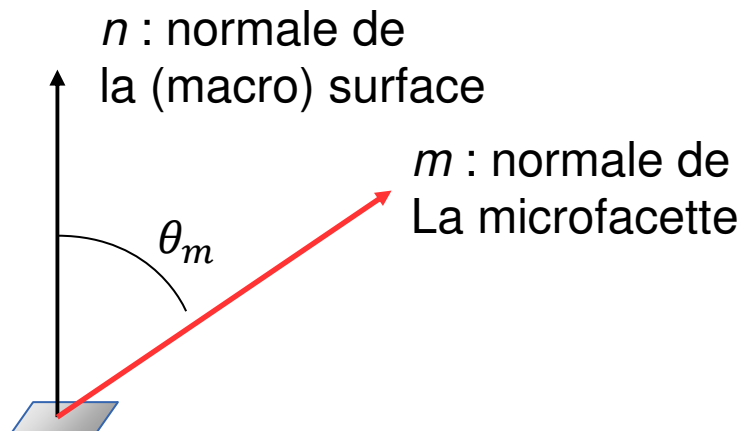
Echantillonnage d'importance

- Fonction $g(x)$ à intégrer
$$I = \int_{\Omega} g(x) dx = \int_{\Omega} \frac{g(x)}{p(x)} p(x) dx$$
- Avec $p(x)$ une densité de probabilité :
$$\int_{\Omega} p(x) dx = 1$$
- Nous avons donc une espérance :
$$I = E[w(x)] \approx \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N w[u_i]$$
 - ✓ avec $w(x) = g(x)/p(x)$
 - ✓ et u_i une suite de valeurs aléatoires suivant la loi $p(x)$
- Echantillonnage d'importance :
 - ✓ Idée : choisir plus d'échantillons dans les régions « importantes »
 - ✓ Principe : utiliser la distribution, avec $p(m) = D(m) \cos(\theta_m)$

Echantillonnage d'importance

$$L_o(x, o) = \int_{\Omega} L_i(x, i) f_r(x, i, o) \cos\theta d\omega$$

- Principe : $pdf(m) = D(m)\cos(\theta_m)$
 - ✓ Construire un échantillonnage « intéressant » des micro-facettes
 - ✓ Eviter de choisir des échantillons m tels que $D(m)\cos\theta_m \approx 0$
 - ✓ Car à ce moment-là, $f_r(x, i) = \frac{F D G}{4 \pi \cos\theta} \approx 0$
 - ✓ Et nous avons vu auparavant que $\int_{\Omega} D(m) \cos \theta_m = 1$
- Tirage par importance des orientations de microfacettes :



Example 1 – Modèle de Lambert

- Surface diffuse (mate) $L_o(x, o) = \int_{\Omega} L_i(x, i) \frac{K_d}{\pi} \cos \theta_i d\omega_i$ $d\omega_i = \sin \theta_i d\theta_i d\phi_i$

$$pdf(i) \approx \cos \theta_i, \quad \text{avec } \int_{\Omega} \cos \theta_i d\omega_i \stackrel{?}{=} 1$$

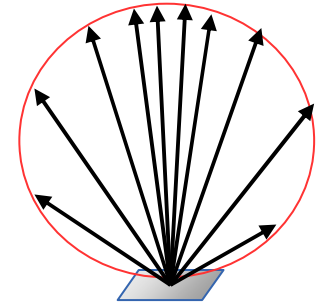
$$\int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \cos \theta_m \sin \theta_m d\theta_m d\phi_m = 2\pi \int_{\theta=0}^{\pi/2} \cos \theta_m \sin \theta_m d\theta_m$$

$$= 2\pi \left[-\frac{1}{2} \cos^2 \theta_m \right]_0^{\pi/2} = \pi$$

$$pdf(i) = \frac{1}{\pi} \cos \theta_i$$

$$\begin{aligned} cdf(x) &= \frac{1}{\pi} \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \cos \theta_m \sin \theta_m d\theta_m d\phi_m \\ &= \frac{1}{\pi} 2\pi \int_{\theta=0}^{\pi/2} \cos \theta_m \sin \theta_m d\theta_m \end{aligned}$$

$$cdf^{-1}(x) = \arccos(\sqrt{1-x}) \quad = [-\cos^2 \theta_m]_0^x = 1 - \cos^2 x$$



Tirage d'une direction :

$$\phi_i = \xi_1 2\pi$$

$$\theta_i = \arccos(\sqrt{1 - \xi_2})$$

Exemple 2 – distribution de Beckmann

- $pdf(m) = D(m)\cos\theta_m = \left(\frac{1}{\pi\sigma^2\cos^4\theta_m} e^{-\frac{\tan^2\theta_m}{\sigma^2}} \right) \cos\theta_m$
- $cdf(m) = \int_{\Omega} D(m)\cos\theta_m = 2\pi \int_{\theta=0}^{\pi/2} \left(\frac{1}{\pi\sigma^2\cos^4\theta_m} e^{-\frac{\tan^2\theta_m}{\sigma^2}} \right) \cos\theta_m \sin\theta_m d\theta_m$
 $= \left[-e^{-\frac{\tan^2\theta_m}{\sigma^2}} \right]_0^x = \left[1 - e^{-\frac{\tan^2 x}{\sigma^2}} \right]$
- Finalement, pour le choix d'une microfacette :

$$\phi_m^i = \xi_1 2\pi$$

$$\theta_m^i = a \tan \left(\sqrt{-\sigma^2 \log(1 - \xi_2)} \right)$$

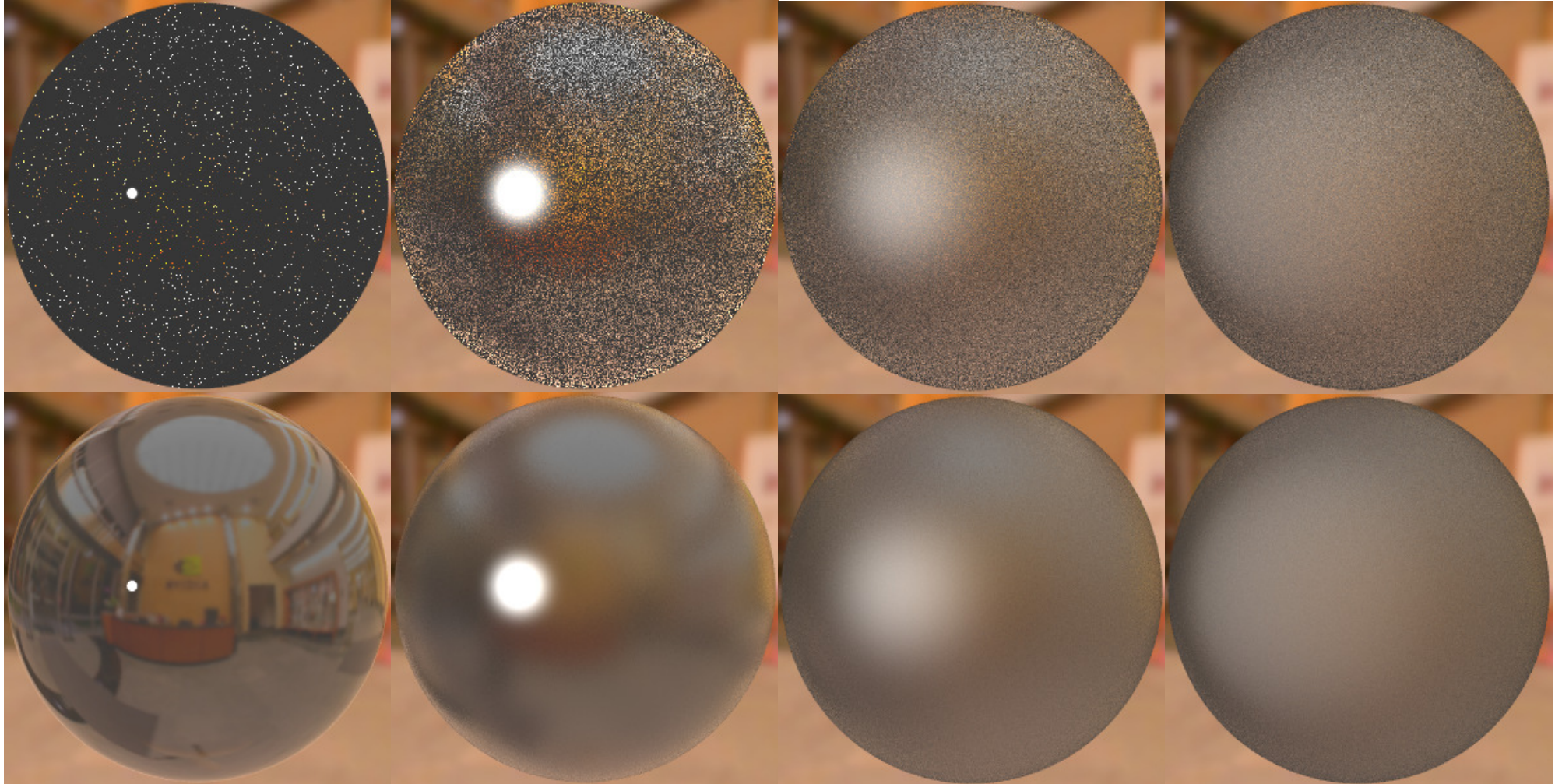
Quelques illustrations

$\sigma = 0.01$

$\sigma = 0.1$

$\sigma = 0.3$

$\sigma = 0.5$



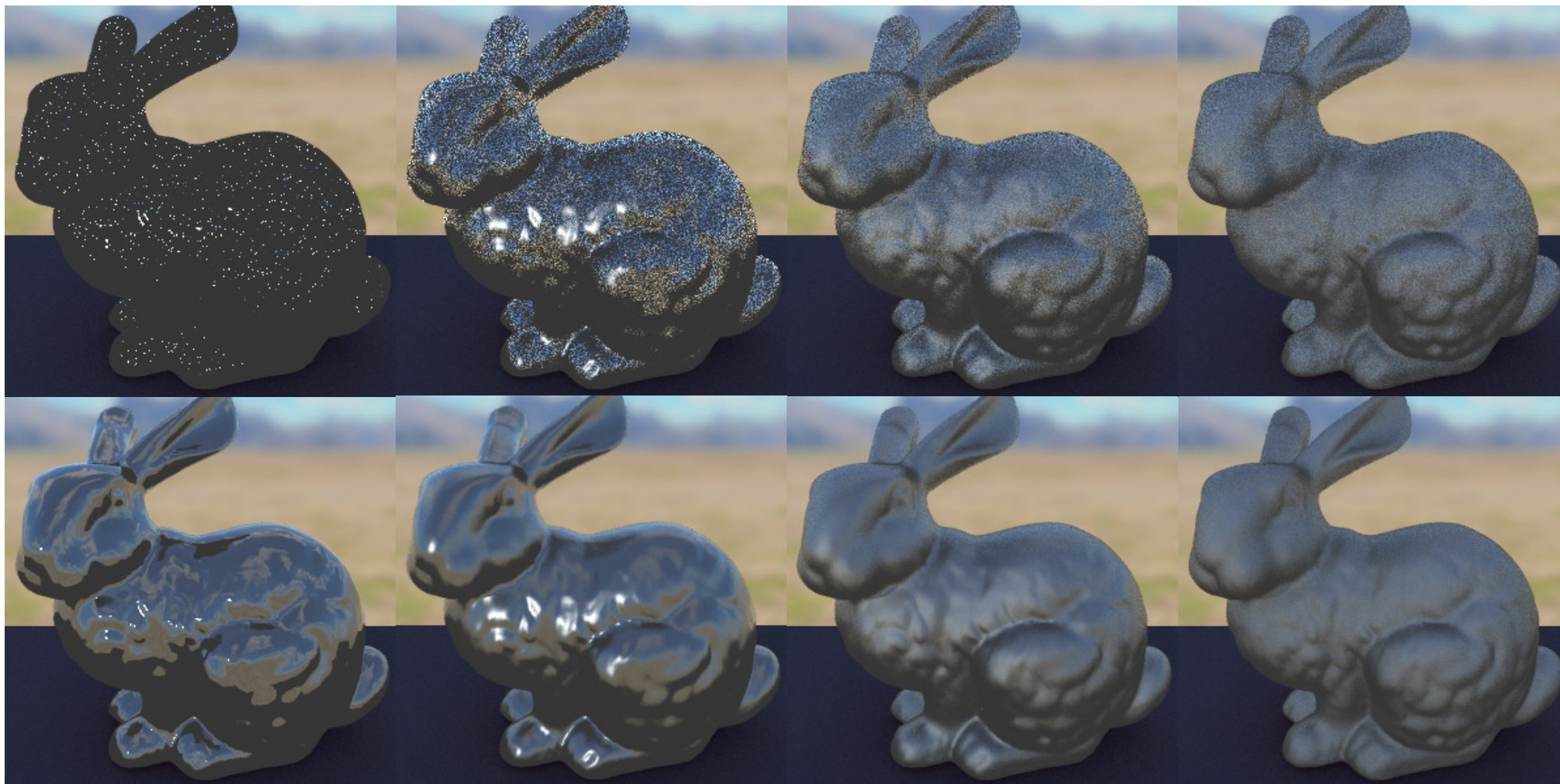
Quelques illustrations

$\sigma = 0.01$

$\sigma = 0.1$

$\sigma = 0.3$

$\sigma = 0.5$



Conclusions

- En réalité, de nombreux modèles de BRDF
 - ✓ *Plus ou moins empiriques (Phong, Ward, Blinn, etc.)*
 - ✓ *Justifications physiques (Schlick, Blinn, Lewis, etc.)*
 - ✓ *Modèles statistiques micro-facettes*
- Permettent de représenter de nombreux types de surfaces
 - ✓ *Transparence, miroirs*
 - ✓ *Surfaces mates/diffuses/Lambertiennes*
 - ✓ *Surfaces brillantes*
- Limites
 - ✓ *Mesures de modèles (incomplets, masse de données, données spectrales)*
 - ✓ *Distribution parfois inadaptées (cf. [Bagher12])*
 - ✓ *Représentativité de la rugosité réelle ?*
 - ✓ *Modélisation des facteurs d'atténuation ? Hypothèses ?*

Conclusion

- D'autres types d'échantillonnage existent dans le domaine
 - ✓ *Multiple importance sampling*
 - ✓ *Metropolis*
 - ✓ *Et autres familles de méthodes (tracé de photons, caches, radiativité, etc.)*
 - ✓ *Toujours des difficultés pour gagner du temps (calculs coûteux)*
- Beaucoup d'autres choses dans le domaine
 - ✓ *Animation*
 - ✓ *Textures*
 - ✓ *Modèles complexes*
 - ✓ *Mesures de la forme / apparence*
 - ✓ *Questions de perception*
 - ✓ *Etc., etc., etc.*

Perspectives

- Modèles approchés pour d'autres types de facettes
 - ✓ *Eviter la quadruple intégration numérique*
 - ✓ *Réduire les temps de calcul*
- Confronter les modèles aux mesures
 - ✓ *Importance de la distribution et atténuation associée*
 - ✓ *Méthodes d'identification des paramètres*
- Confronter le modèle à la perception
 - ✓ *Est-ce vraiment toujours nécessaire ?*
 - ✓ *Différences visuelles entre modèles ?*
 - ✓ *Variation des paramètres et perception ?*

Utilisation de l'échantillonnage d'importance pour la simulation d'éclairage

Merci pour votre attention !!!