

Rendu PBR

Sébastien Beugnon

30 novembre 2023

Sébastien Beugnon

R&D Researcher

mail : sebastien.beugnon@emersya.com

Github : @sbeugnon



Sommaire

Rappels

Théorie de la lumière

PBR

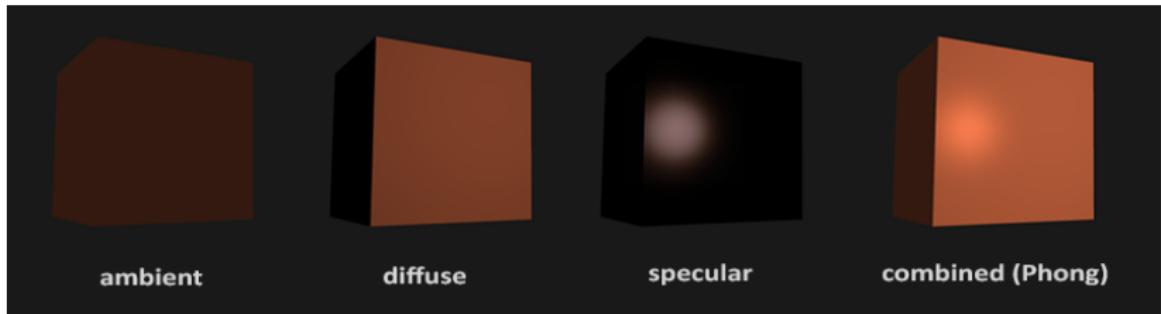
Cook-Torrance BRDF

TP

Rappels

Modèle Blinn-Phong

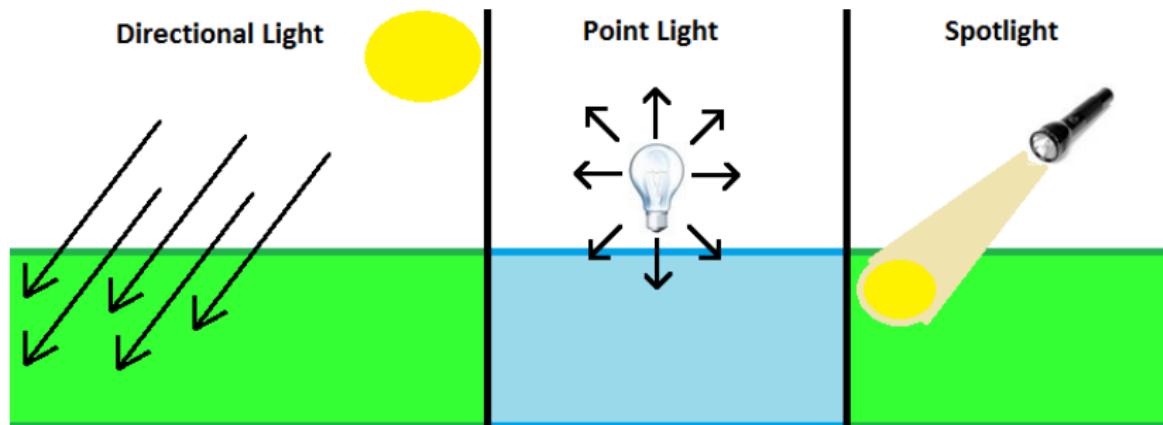
- ▶ Ambiant (*Ambient*)
- ▶ Diffuse (*Diffuse*)
- ▶ Spéculaire (*Specular + Shininess*)



Illuminateur directe

Trois approches

- Directionnelle (*Directional*)
- Ponctuelle (*Punctual*)
- Spot



Illumination directe

La radiance de la lumière

- ▶ Couleur C_{light}
- ▶ Pondération par la distance (ou l'angle) (*Punctual* ou *Spot*)

$$L_k = C_{\text{light}}^k * a(p, p_k) * \text{sat}(n.l)$$

où C_{light}^k est la couleur de la lumière et a la fonction d'atténuation et sat la fonction de saturation du produit scalaire.

Fonction d'atténuation a

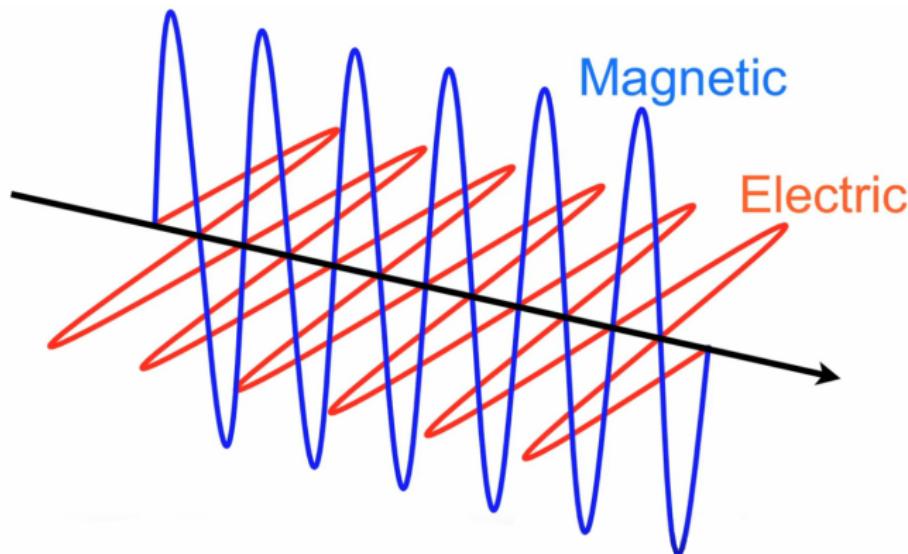
$$a(p, p_i) = \frac{1}{(||p - p_i||)^2}$$

Physique de la lumière

- ▶ C'est quoi la lumière ?

Physique de la lumière

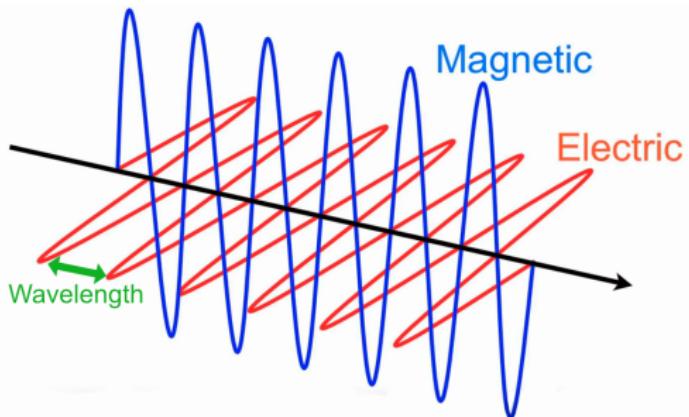
- ▶ C'est quoi la lumière ?
 - Une onde électro-magnétique



T. Akenine-Möller, E. Haines, N. Hoffman, A. Pesce, M. Iwanicki, S. Hillaire
Real-Time Rendering, Fourth Edition.
CRC Press, 2018

Physique de la lumière

- ▶ C'est quoi la lumière ?
 - Une onde électro-magnétique



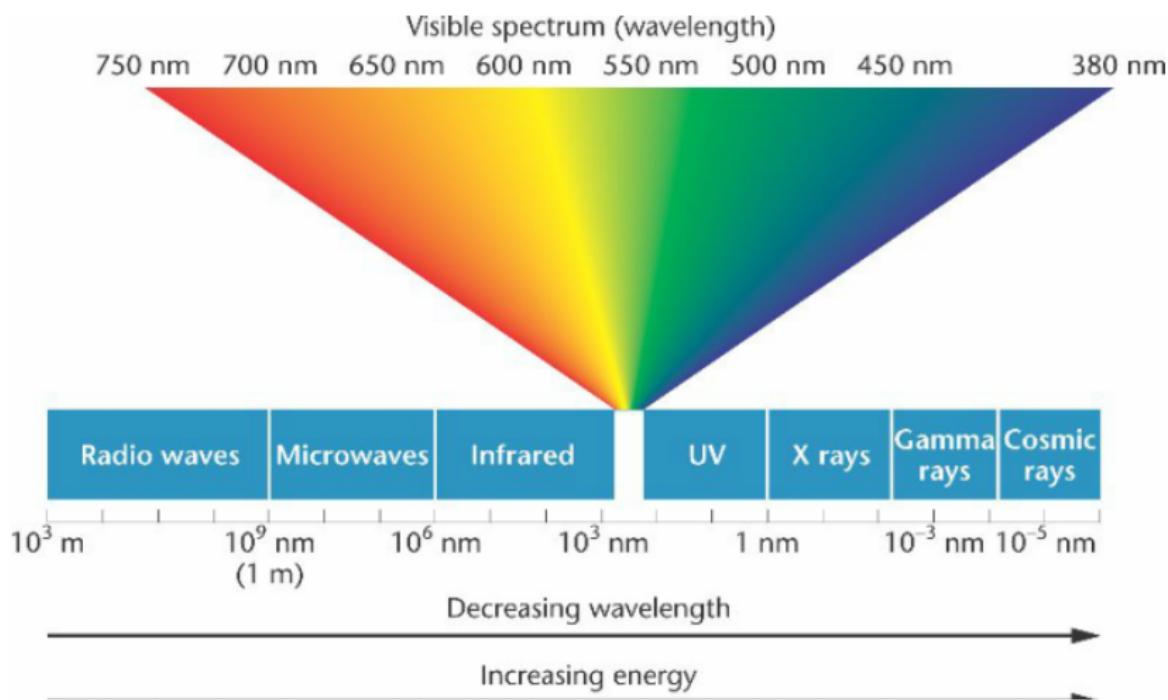
Définition

- Onde transversale
- Fréquence
- Longueur d'onde λ (nm)
- Radiance (Energie)



T. Akenine-Möller, E. Haines, N. Hoffman, A. Pesce, M. Iwanicki, S. Hillaire
Real-Time Rendering, Fourth Edition.
CRC Press, 2018

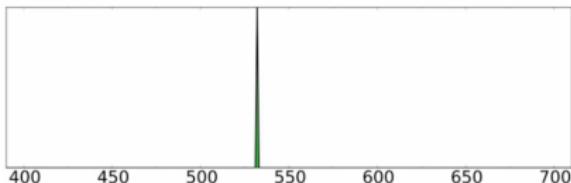
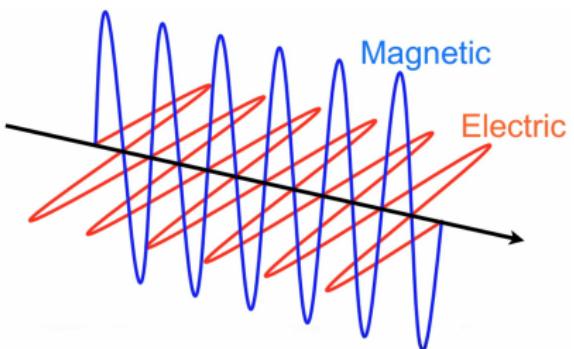
Physique de la lumière



Physique de la lumière

Laser

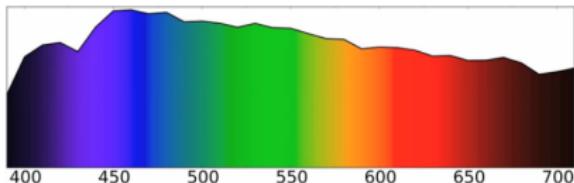
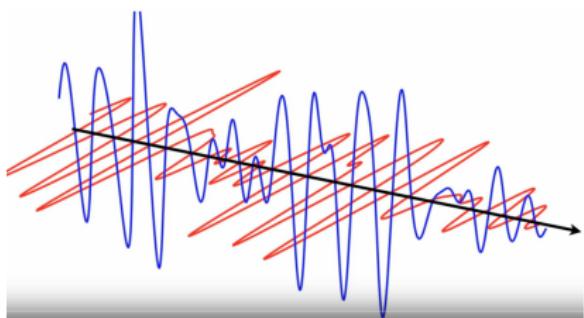
- ▶ Onde monochromatique = Belle sinusoïde
- ▶ Profile spectrale discret (Spectrum profile)



Physique de la lumière

Lumière blanche

- ▶ Onde bruitée
- ▶ Profile spectrale continu (Spectrum profile)



Physique de la lumière

► Comment la lumière est émise ?

Évènement physique

Une onde lumineuse (*lightwave*) est émise lorsque les charges électriques d'un objet oscillent.

► Comment les charges oscillent ?

Évènement physique : Émission

Conversion d'une énergie (chaleur, électrique, chimique)

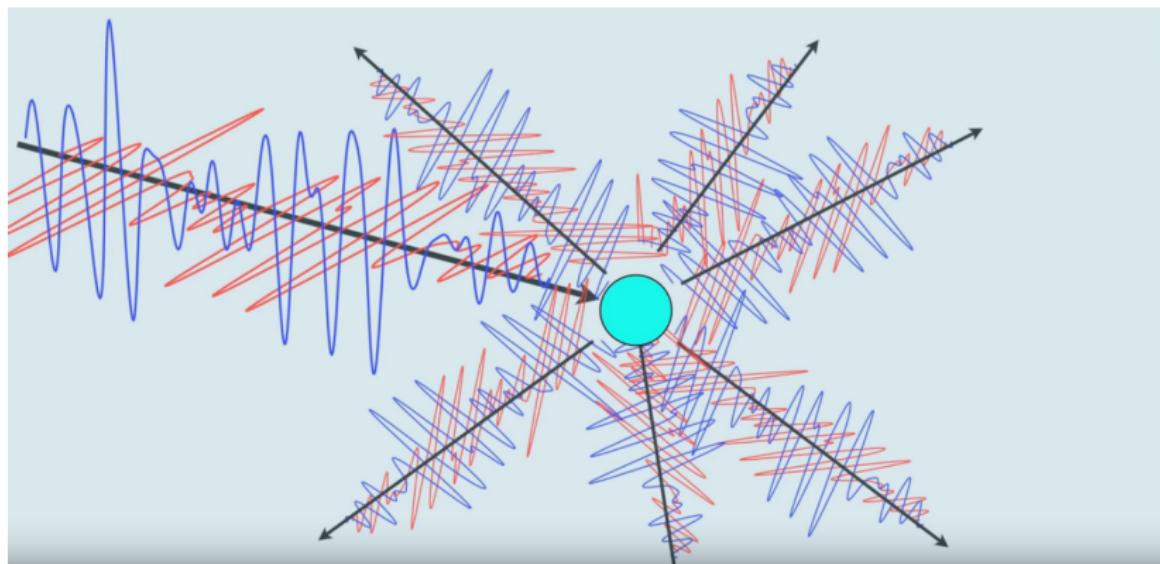
Une partie est convertie en énergie lumineuse et rayonne de l'objet

► Un objet émissif est considéré comme une source lumineuse (*light source*) dans le domaine du rendu.

Particule

Scattering (Diffusion, Dispersion)

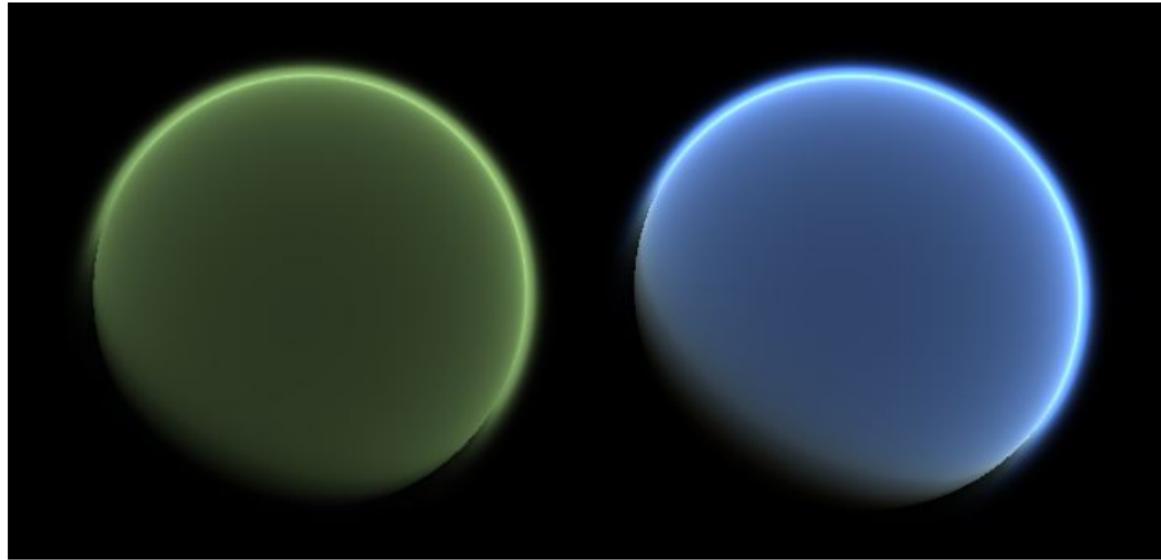
► Interaction matière-lumière



Particule

Diffusion de Rayleigh (*Rayleigh Scattering*)

- ▶ Ciel (*Atmospheric Scattering*)



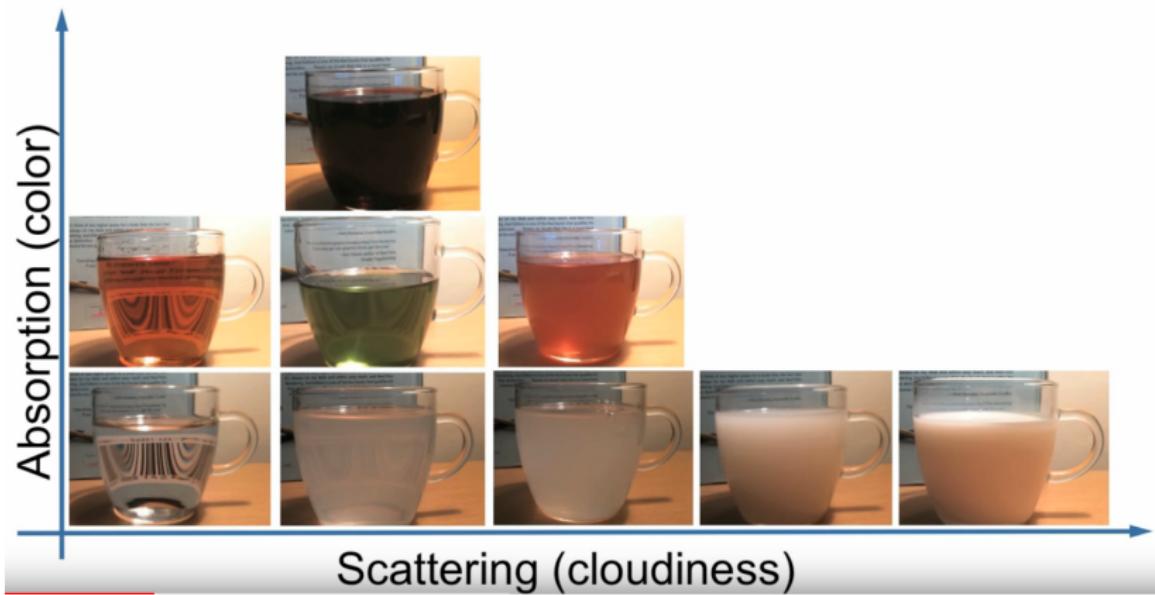
Particule

Diffusion de Mie (*Mie Scattering*)

► *Nuages*



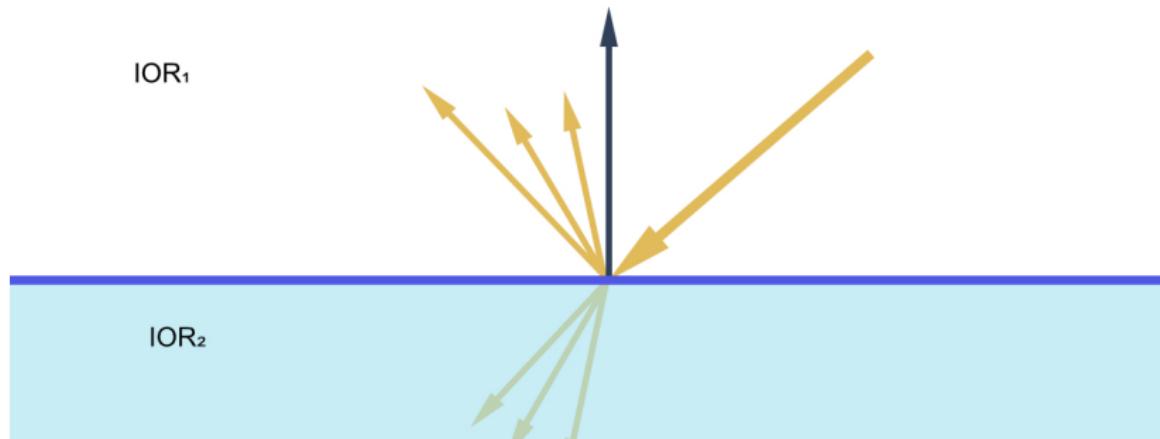
Support



Surface

2 composantes de lumière

- ▶ Réflexion (*Reflection*) : le changement de direction de la lumière retournant dans le milieu initial
- ▶ Réfraction (*Refraction*) : le changement de direction de la lumière se déplaçant au sein du nouveau milieu



Rugosité de la surface

Miroir, mon beau miroir.

3 niveaux

- ▶ Macro-géométrie (Visible à l'oeil nu)
- ▶ Micro-géométrie (Au niveau microscopique)
- ▶ Nano-géométrie (Au niveau de la longueur d'onde)

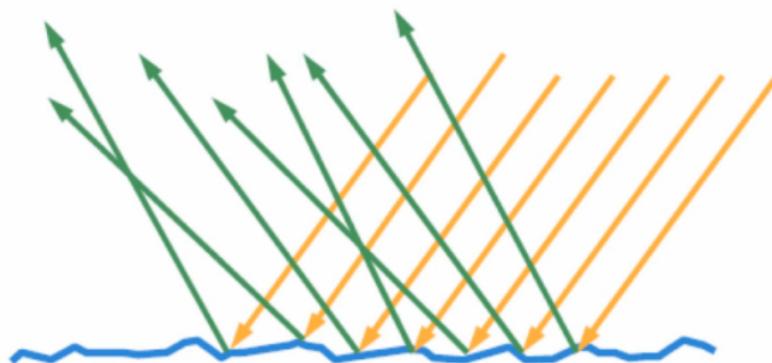


Rugosité de la surface

Miroir, mon beau miroir.

3 niveaux

- ▶ Macro-géométrie (Visible à l'oeil nu)
- ▶ Micro-géométrie (Au niveau microscopique)
- ▶ Nano-géométrie (Au niveau de la longueur d'onde)

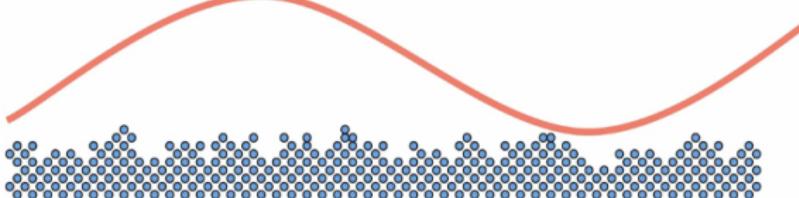


Rugosité de la surface

Miroir, mon beau miroir.

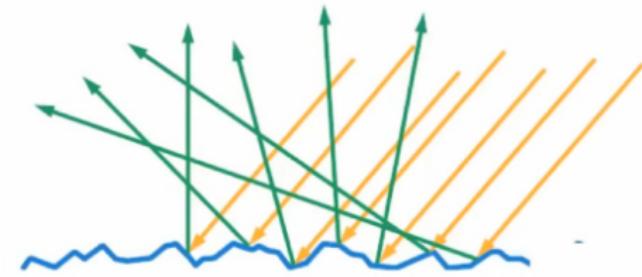
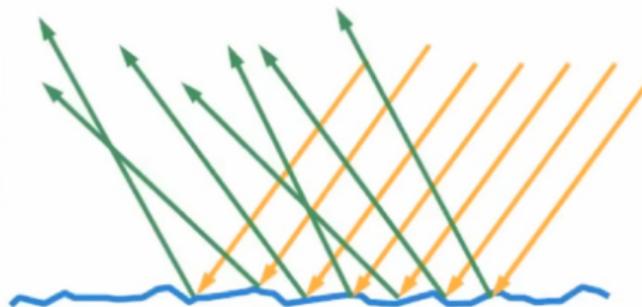
3 niveaux

- ▶ Macro-géométrie (Visible à l'oeil nu)
- ▶ Micro-géométrie (Au niveau microscopique)
- ▶ Nano-géométrie (Au niveau de la longueur d'onde)



Rugosité de la surface

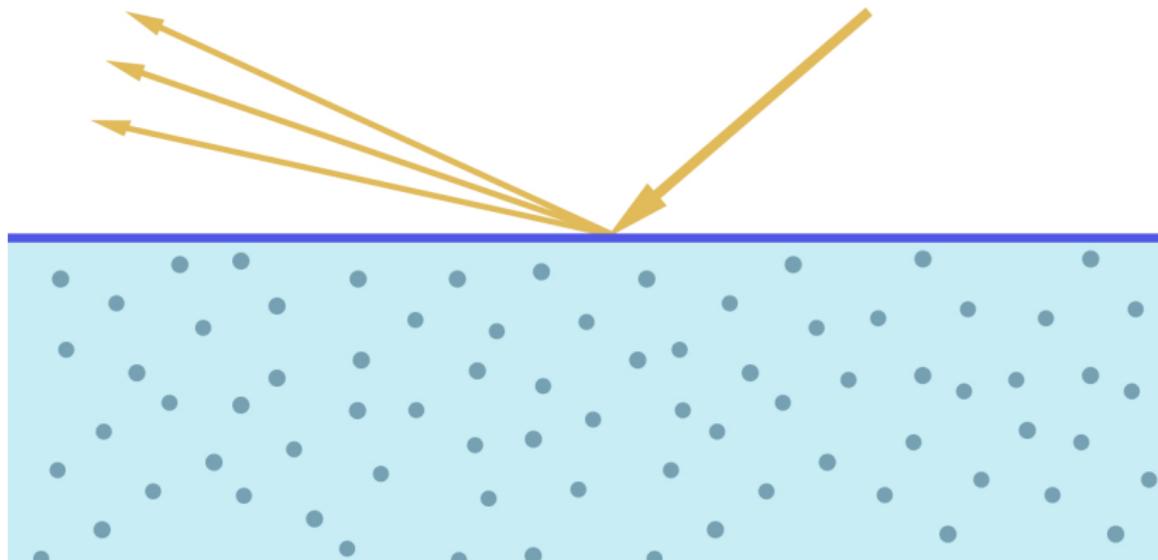
+ Rugueux = + Réflexions flous



Diffusion sous la surface

Subsurface Scattering

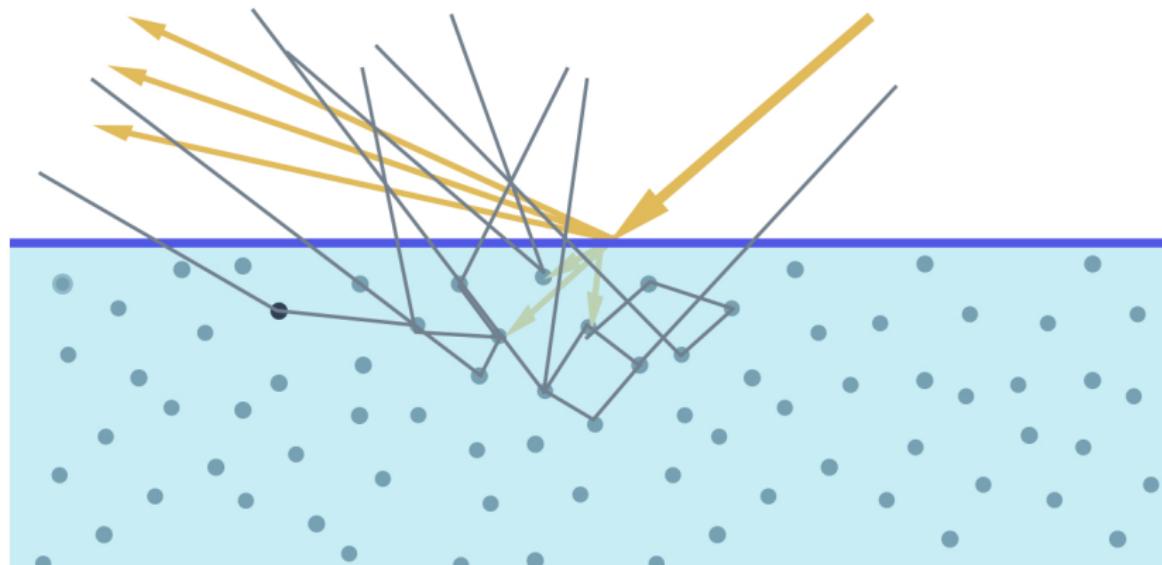
- ▶ Diffusion de particules puis changement (\neq Transmission)



Diffusion sous la surface

Subsurface Scattering

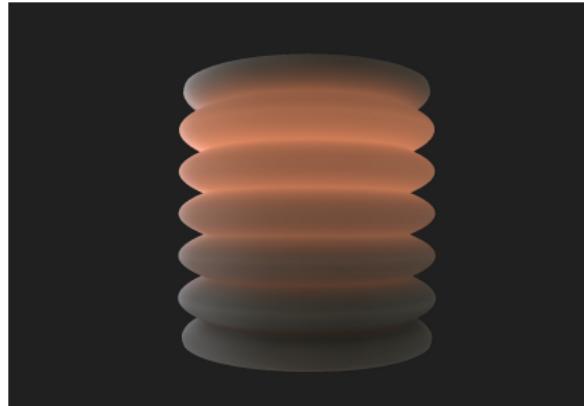
- ▶ Diffusion de particules puis changement (\neq Transmission)



Diffusion sous la surface

Subsurface Scattering

- ▶ Diffusion de particules puis changement (\neq Transmission)



Distinctions des matières



SIGGRAPH 2015 

Distinctions des matières

D'un point de vue optique :

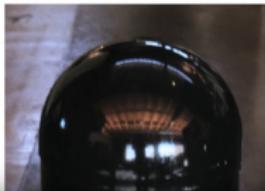
- ▶ Métaux (Conducteurs)
- ▶ Diélectriques (Isolateurs)
- ▶ Semi-conducteurs



Distinctions des matières

D'un point de vue de rendu :

- ▶ Métaux
- ▶ Non-métaux

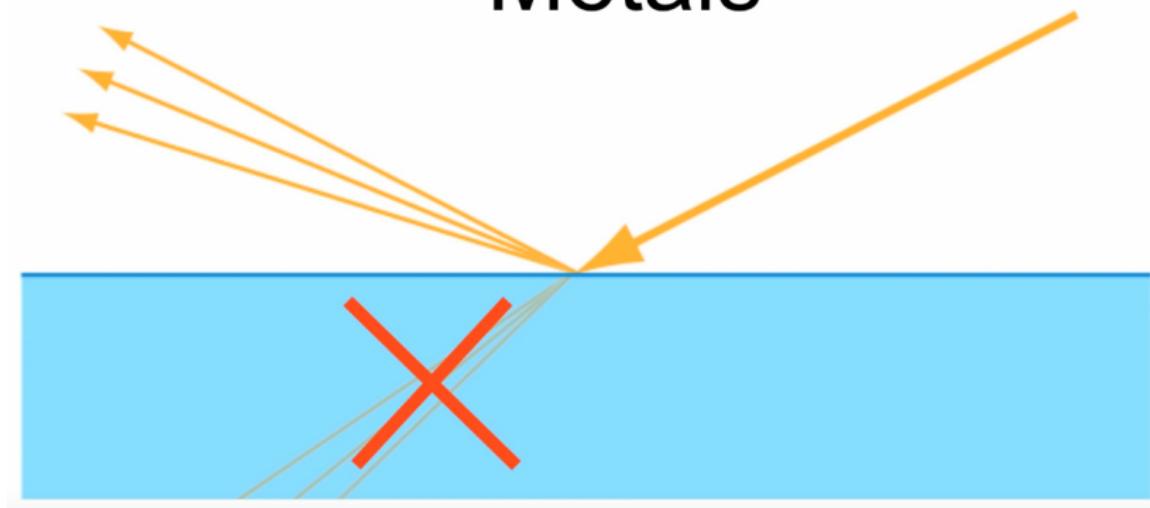


SIGGRAPH 2015

Métaux

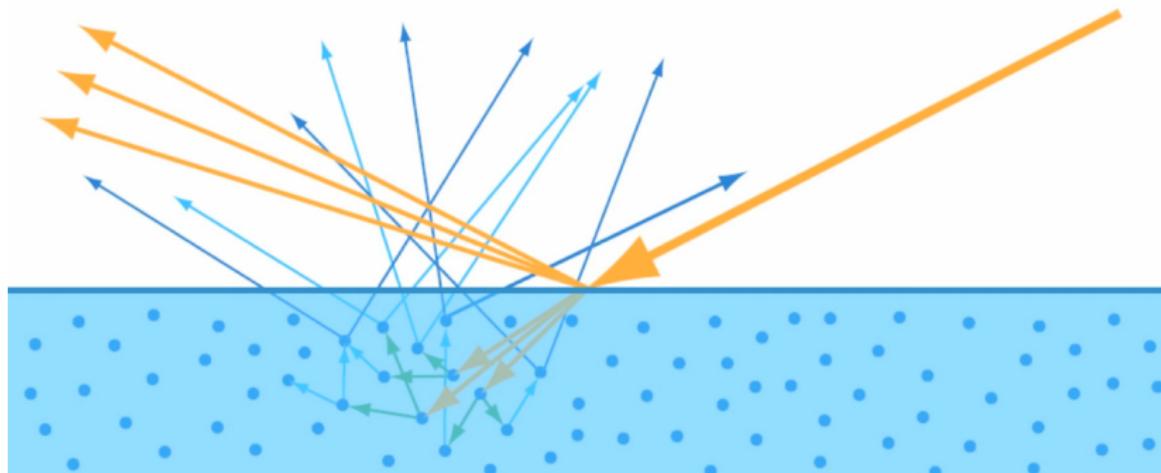
- ▶ Absorbe ou Réfléchit la lumière

Metals

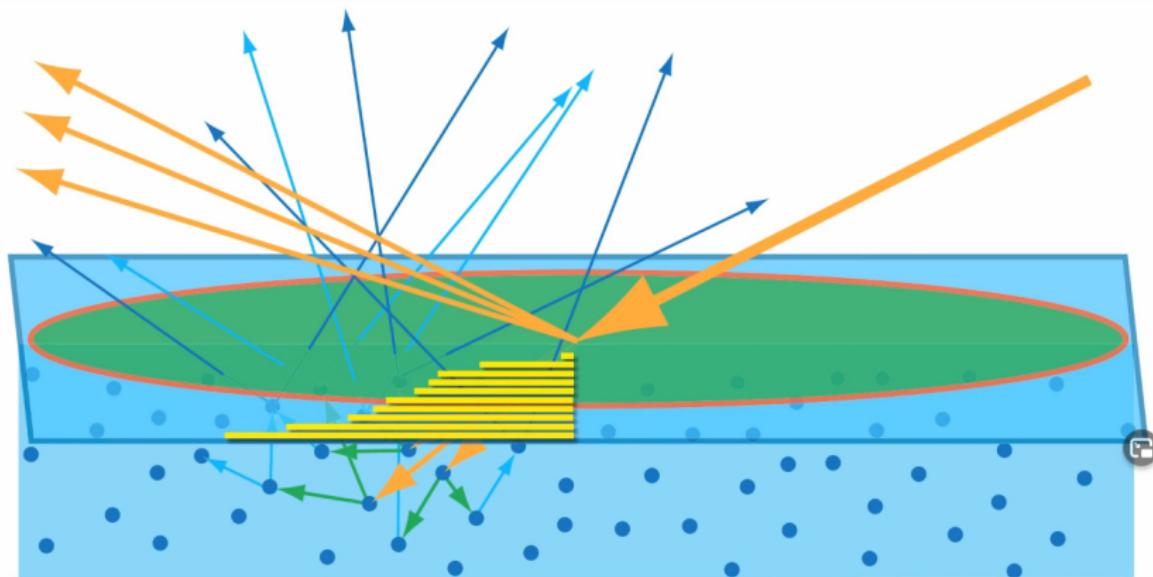


Non-métaux

Non-Metals



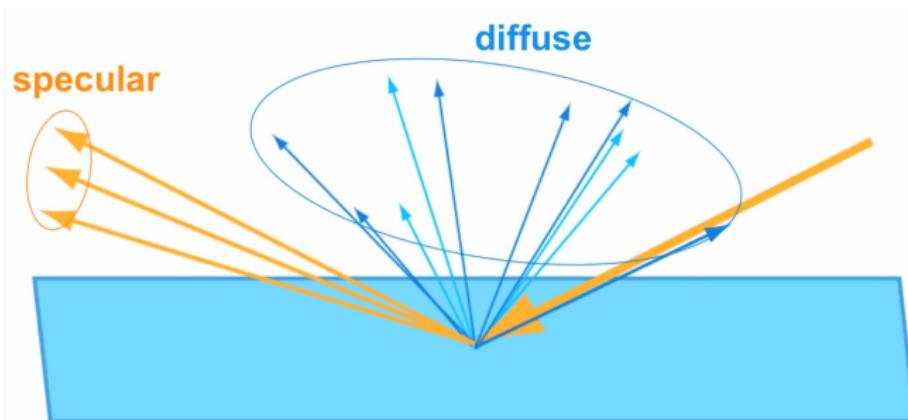
Difficulté de modélisation



Simplification du modèle

2 composantes

- ▶ Diffusion (Diffuse)
- ▶ Spéculaire (Specular)



Physically-based rendering

Usages

- ▶ Infographie (architecture, commerce)
- ▶ Films d'animation
- ▶ Jeux vidéo



Physically-based rendering

Définition

- ▶ Ensemble de techniques de rendu permettant de réaliser un rendu s'approchant des propriétés physiques de la lumière et de la matière.
- ▶ Une baseline (un modèle) pour développer le rendu d'une image selon des propriétés physiques

3 éléments principaux

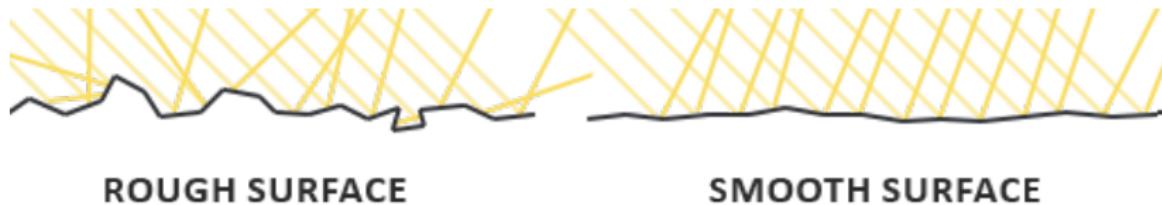
- ▶ Modèle de micro-facettes (*Microfacet model*)
- ▶ Conservation de l'énergie (*Energy conservation*)
- ▶ Lumière utilisant une fonction de réflectivité bidirectionnelle (BRDF)

Modèle de micro-facettes

Définition

Certaines surfaces ne sont pas lisses d'un point de vue optique.

- ▶ Rugosité (*Roughness*)



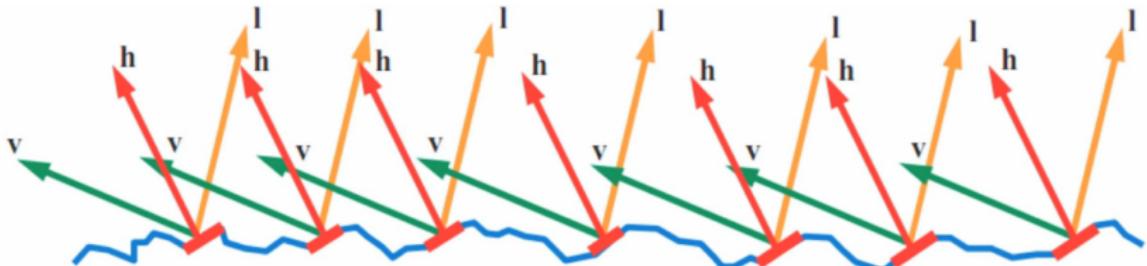
- ▶ Voir n'importe quelle surface comme de petits miroirs réfléctifs (*microfacets*)

Modèle de micro-facettes

Approximation de la rugosité

A partir de la direction de la lumière l et de la direction vers la vue v , on calcule la normale de la micro-facette h ou couramment appelée *half-vector*.

$$h = \frac{v + l}{\|v + l\|} \quad (1)$$



Rappel de l'équation de rendu

► Équation de rendu

$$\mathbb{L}_{\text{out}}(p, v) = L_{\text{emission}}(p, n, v) + \int_{\Omega} L_{\text{in}}(p, l) f_{\text{reflect}}(p, n, l, v) \text{sat}(n.l) d\omega$$

► Approximation temps réel

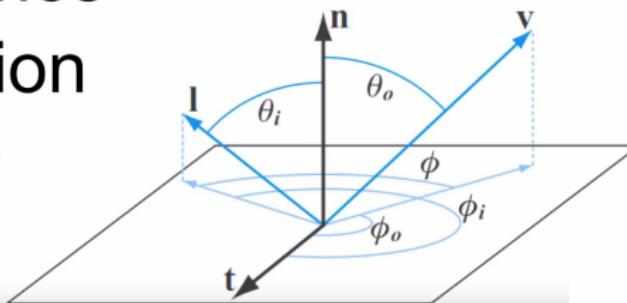
$$C_{\text{shaded}} = f_{\text{emissive}}(C_{\text{emissive}}, v) + \sum_{k=1}^n f_{\text{direct}}(C_{\text{light}}^k, n, l_k, v)$$

BRDF

► C'est quoi une BRDF?

Bidirectional
Reflectance
Distribution
Function

$$f(l, v)$$



$f(l, v)$ de l'équation de rendu

p , position du point l , direction de la lumière vers le point n ,
normal au sommet v , direction vers la vue

Exemple de BRDF : Diffusion de Lambert (Phong)

Illumination directe

$$f_{\text{direct}}(C_{\text{light}}^k, n, l_k, v) = C_{\text{light}}^k f_{\text{BRDF}}(n, l_k, v) \text{sat}(n.l_k)$$

Lambertian diffuse

En fonction de l'angle d'incidence de la lumière à la surface =>
 $\text{sat}(n.l)$

$$f_d^{\text{Lambert}}(n, l, v) = \frac{\rho}{\pi} C_{\text{diffuse}} \approx \frac{C_{\text{diffuse}}}{\pi}$$

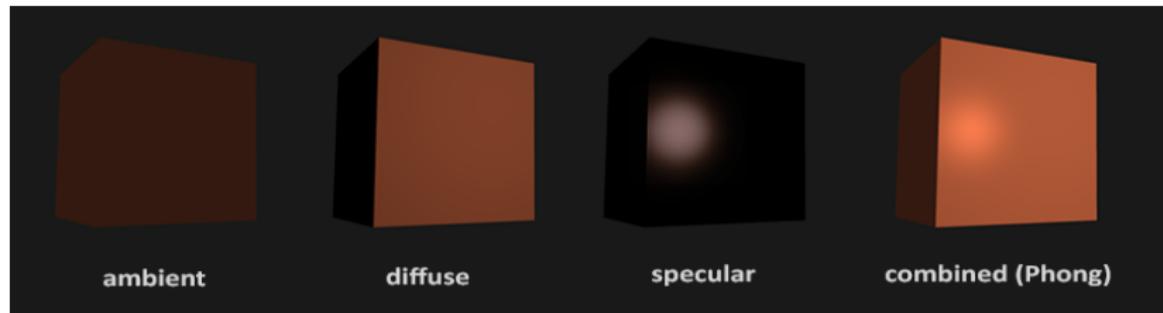
Exemple de BRDF : Spéculaire (Phong)

Specular Reflection

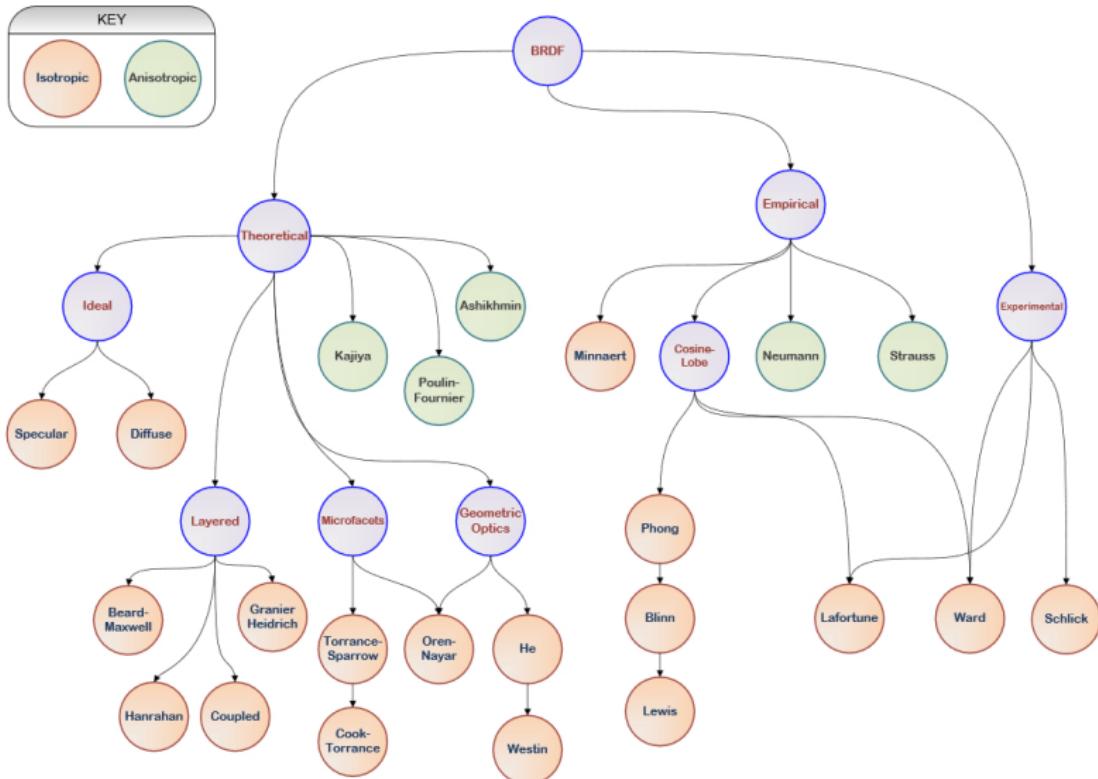
$$f_{\text{direct}}(C_{\text{light}}, n, l, v) = C_{\text{light}} \left\{ \frac{\rho}{\pi} C_{\text{diffuse}} \text{sat}(n.l) + C_{\text{specular}} [\text{sat}(n.h)]^{\alpha} \right\}$$

h : le vecteur *half-vector*

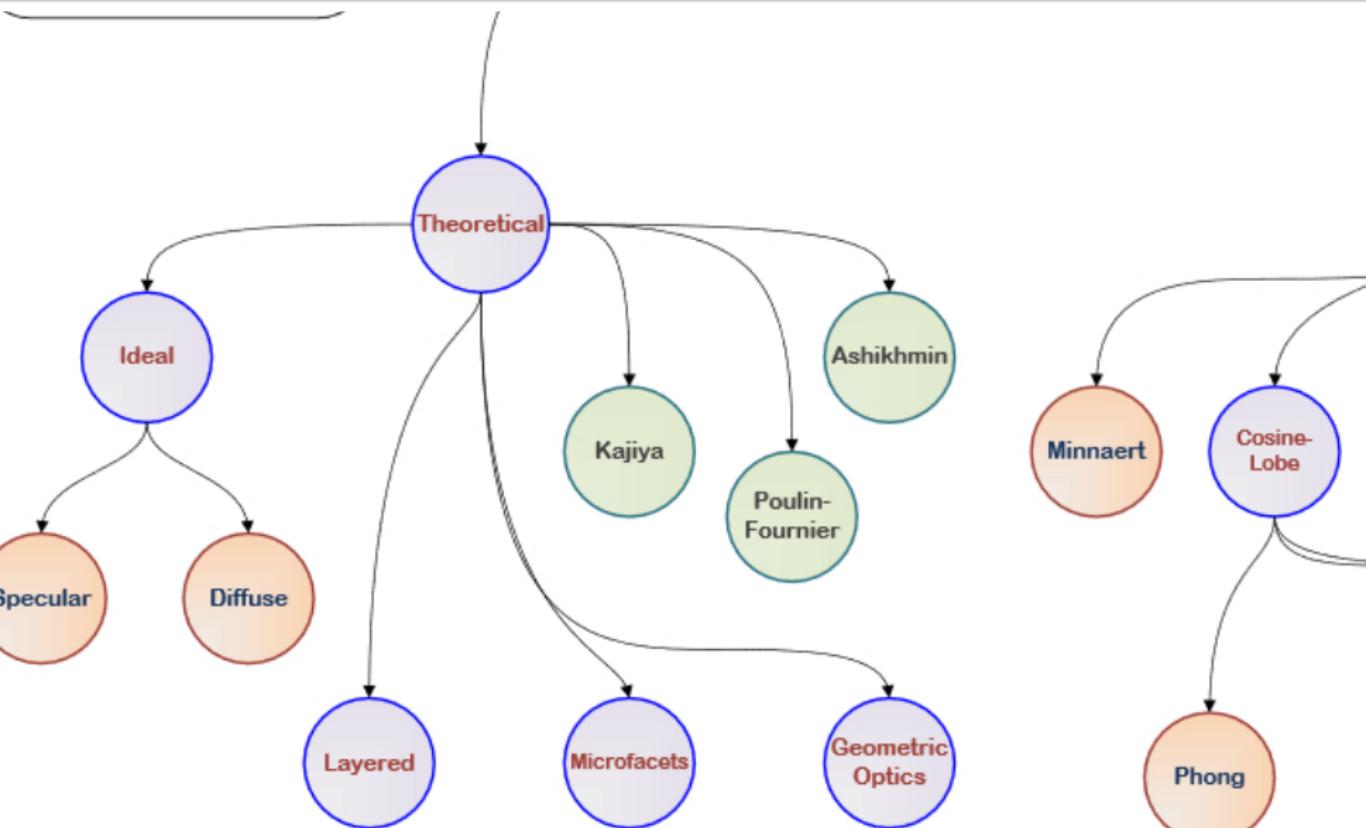
α : la puissance de l'effet spéculaire



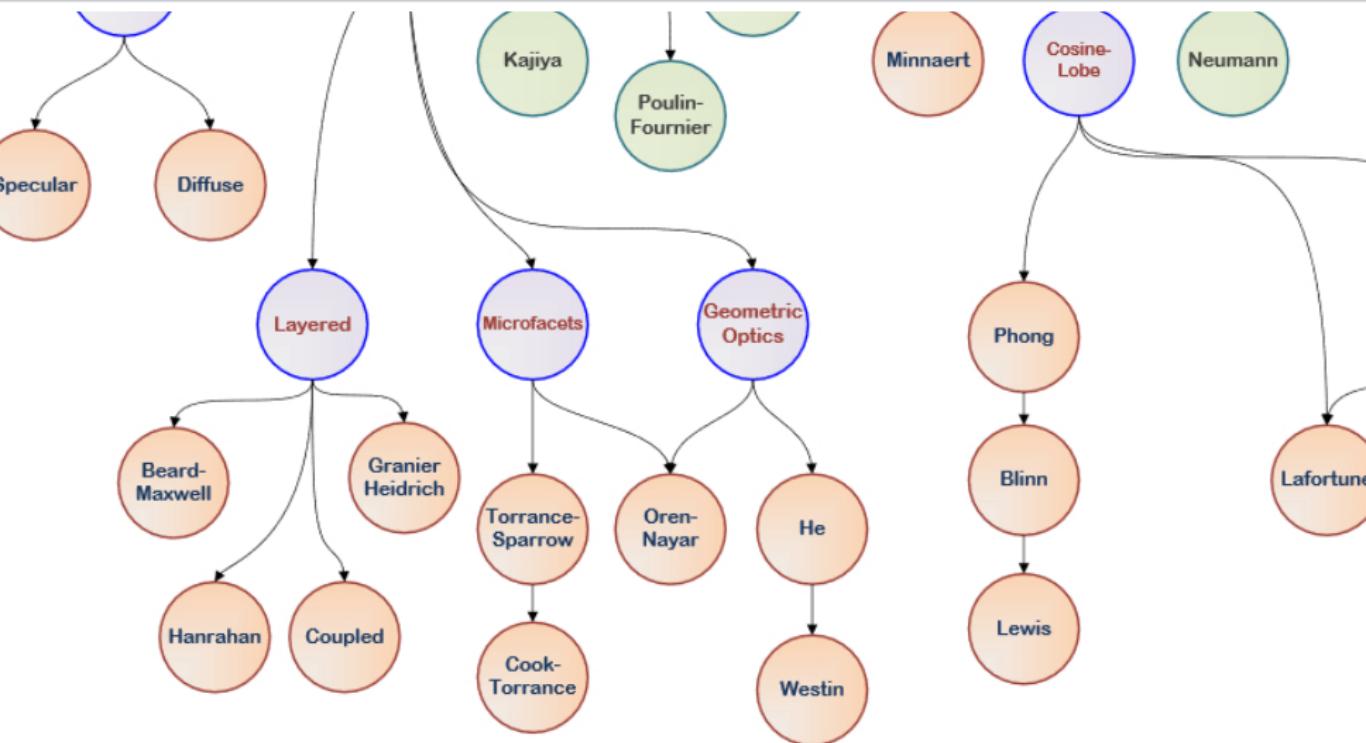
BRDF Big Family



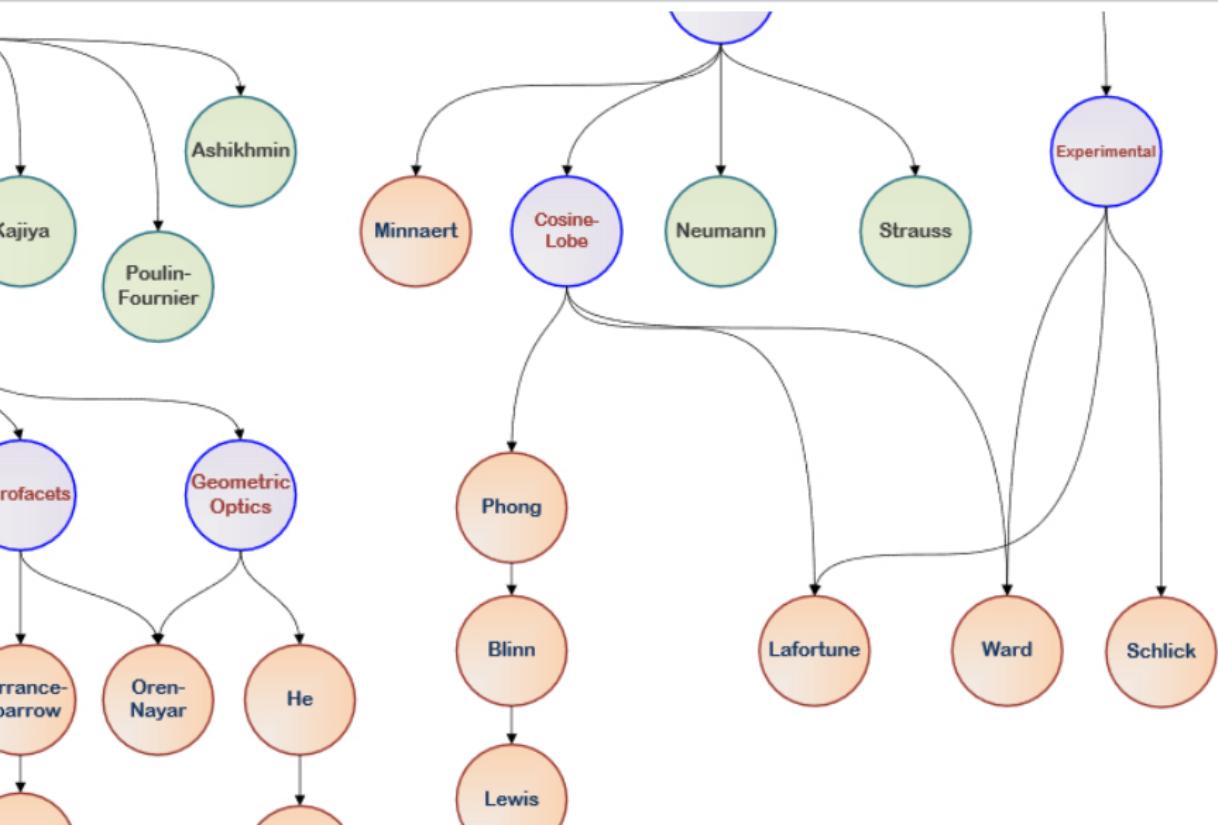
BRDF Big Family



BRDF Big Family



BRDF Big Family



Cook-Torrance BRDF

Equation

$$f_{CT} = k_d \cdot f_d^{\text{Lambert}} + k_s \cdot f_s^{\text{CookTorrance}}$$

Lambert Diffuse

Une constante de couleur

$$f_{\text{Lambert}} = \frac{c}{\pi}$$

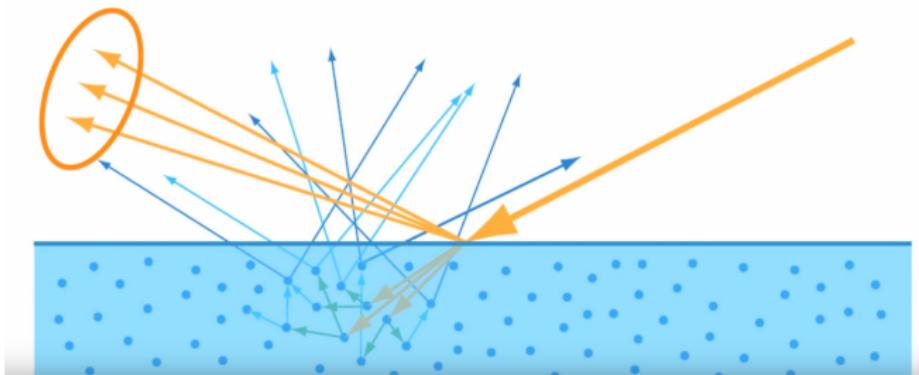
Où c est l'*albedo* (la couleur de base de la matière)

Comment calculer k_d et k_s

$k_s = F$, la valeur de *Fresnel* de la composante spéculaire

$k_d = 1.0 - k_s$, la partie d'énergie non reflétée par le spéculaire

Cook Torrance Specular BRDF



Microfacet Specular BRDF

$$f(h, l, v) = \frac{F(l, h)G(l, v, h)D(h)}{4(n.l)(n.v)} \quad (2)$$

où F est la fonction de Fresnel, G est la fonction de géométrie et D la fonction de distribution.

Fonction de Fresnel

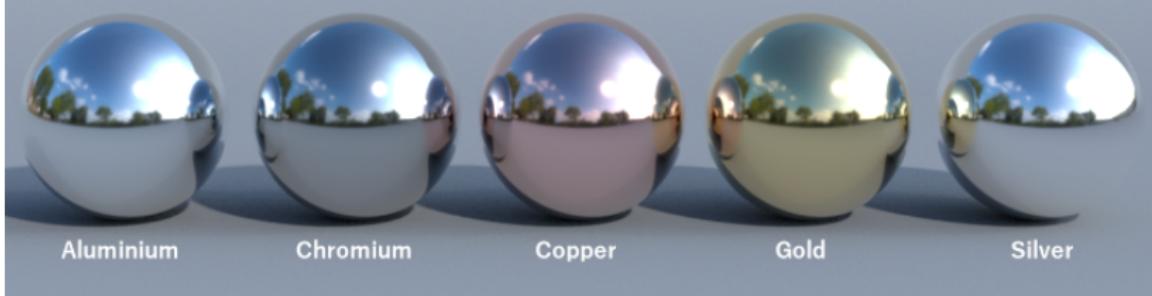
Définition

Le ratio physique de la réflexion de surface selon différents angles de la surface.

- ▶ Varie selon la matière
- ▶ Plus élevé sur les métaux

Fresnel Presets (%) :

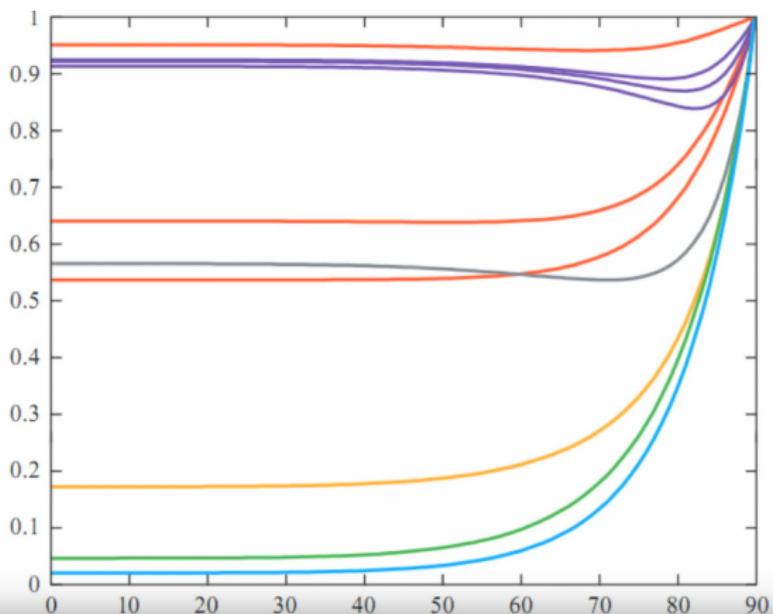
Roughness 10%



Fonctions de Fresnel

Fresnel Reflectance

- copper
- aluminum
- iron
- diamond
- glass
- water



$$F_0 = F(0)$$

La couleur spéculaire lorsque l'angle d'indice est de zéro.

Fonctions de Fresnel

Approximation de Schlick

- ▶ Paramétrisation par F_0

$$F_{Schlick}(F_0, l, n) = F_0 + (1 - F_0)(1 - (l \cdot n))^5$$

- ▶ Pour les micro-facettes : ($n = h$)

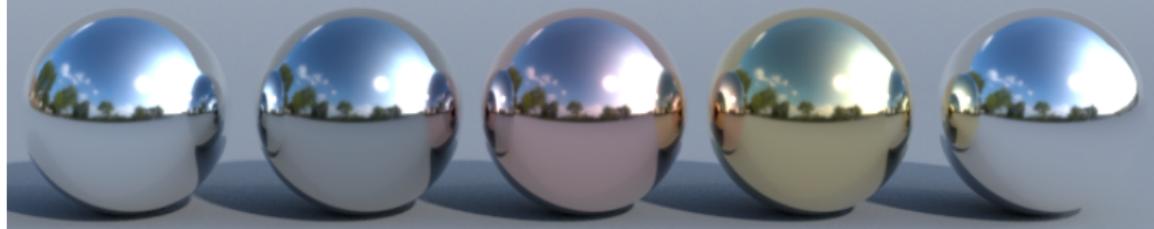
Dielectric	F_0 (Linear, Float)	F_0 (sRGB, U8)	Color
Water	0.020	39	
Plastic, Glass	0.040 – 0.045	56 – 60	
Crystalware, Gems	0.050 – 0.080	63 – 80	
Diamond-like	0.100 – 0.200	90 – 124	

Fonctions de Fresnel

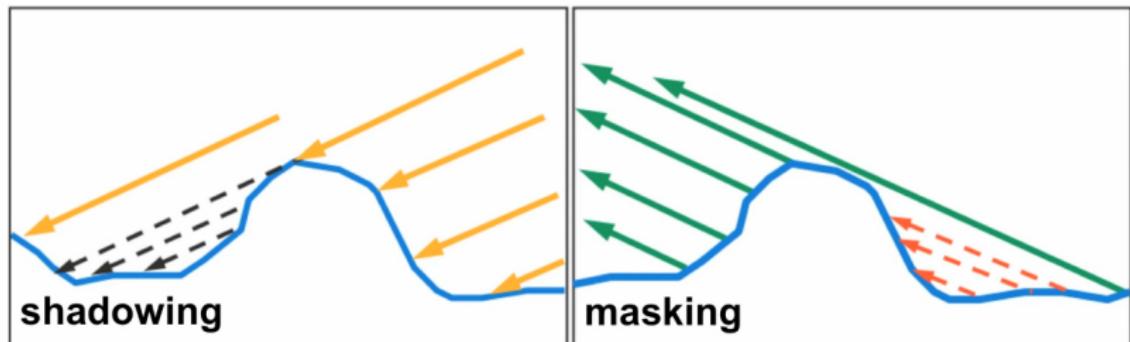
Metal	F_0 (Linear, Float)	F_0 (sRGB, U8)	Color
Titanium	0.542,0.497,0.449	194,187,179	
Chromium	0.549,0.556,0.554	196,197,196	
Iron	0.562,0.565,0.578	198,198,200	
Nickel	0.660,0.609,0.526	212,205,192	
Platinum	0.673,0.637,0.585	214,209,201	
Copper	0.955,0.638,0.538	250,209,194	
Palladium	0.733,0.697,0.652	222,217,211	
Zinc	<u>0.664,0.824,0.850</u>	213,234,237	

Fresnel Presets (%) :

Roughness 10%



Fonction de Géométrie G



Définition

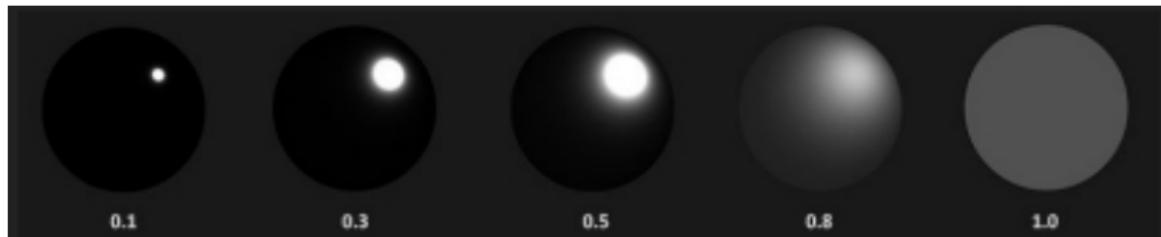
Aussi appelée *shadowing-masking function*. Elle définit la propriété auto-ombrage (*self-shadowing*) des microfacettes. Quand une surface est relative rugueuse, les microfacettes peuvent générer la lumière et réduire ainsi la lumière que la surface reflète.

Fonction de Géométrie G

Approximation de SchlickGGX

$$G_{Schlick-GGX}(n, v, r) = \frac{n.v}{(n.v)(1 - k) + k}$$

où $k = \frac{(1+r)^2}{8}$ et r est le facteur de rugosité.



Fonction de Géométrie G

Approximation de Smith

$$G_{Smiths}(n, v, l, r) = G_{Schlick-GGX}(n, v, r) * G_{Schlick-GGX}(n, l, r)$$

Il existe d'autres fonctions de *shadowing-masking* plus efficace comme celle de Smith.



Fonction de Distribution N

Définition (*Normal Distribution Function* : NDF)

Il s'agit de l'approximation de la quantité de micro-facettes alignées avec le vecteur h selon la rugosité de la surface.

$$D_p(\mathbf{m}) = \frac{\alpha_p + 2}{2\pi} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{m})^{\alpha_p}$$

$$D_{uabc}(\mathbf{m}) = \frac{1}{(1 + \alpha_{abc1} (1 - (\mathbf{n} \cdot \mathbf{m})))^{\alpha_{abc2}}}$$

$$D_{tr}(\mathbf{m}) = \frac{\alpha_{tr}^2}{\pi ((\mathbf{n} \cdot \mathbf{m})^2 (\alpha_{tr}^2 - 1) + 1)^2}$$

$$D_b(\mathbf{m}) = \frac{1}{\pi \alpha_b^2 (\mathbf{n} \cdot \mathbf{m})^4} e^{-\left(\frac{1 - (\mathbf{n} \cdot \mathbf{m})^2}{\alpha_b^2 (\mathbf{n} \cdot \mathbf{m})^2}\right)}$$

Fonction de distribution

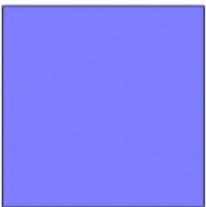
Distribution GGX

$$D(n, h, r) = \frac{r^2}{\pi * ((n.h^+)^2(r^2 - 1) + 1)^2}$$

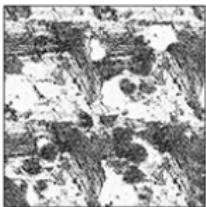
PBR Shader



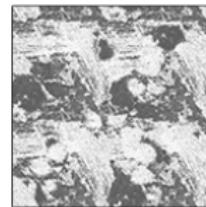
ALBEDO



NORMAL



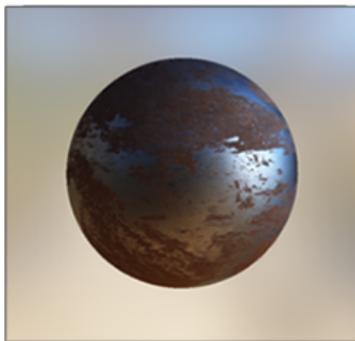
METALLIC



ROUGHNESS



AO



Mais où est la composante spéculaire ?

Il existe deux pipelines pour le PBR

- ▶ Roughness-Metallic
- ▶ Glossiness-Specular
 - ▶ $\text{Glossiness} = 1.0 - \text{Roughness}$
- ▶ Une matière métallique n'a pas de composante de diffusion.

```
float kS = calculateSpecularComponent(...); // reflection/specular fraction
float kD = 1.0 - kS;                      // refraction/diffuse    fraction
vec3 F0 = vec3(0.04);
F0 = mix(F0, albedo, metalness);
vec3 F  = fresnelSchlick(max(dot(H, V), 0.0), F0);
vec3 kS = F;
vec3 kD = vec3(1.0) - kS;
kD *= 1.0 - metallic;

Lo += (kD * diffuse + specular) * radiance * NdotL;
```

Différences entre les deux pipelines



Rappels
oooooooo

Théorie de la lumière
oooooooooooooooooooo

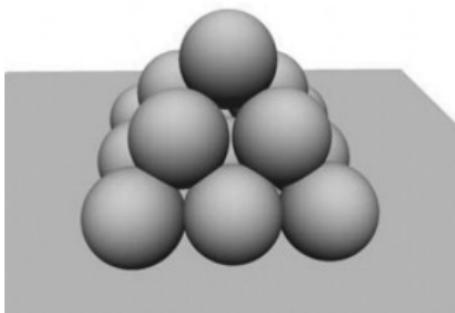
PBR
oooooooooooo

Cook-Torrance BRDF
oooooooooooo●oooo

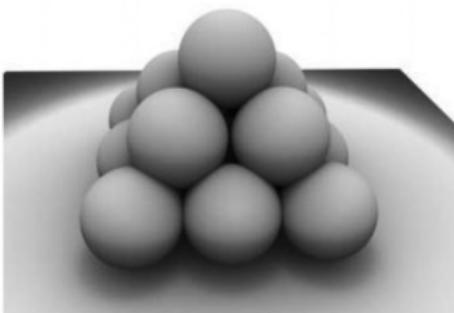
TP
○

Différences entre les deux pipelines

Ambient Occlusion



Without ambient occlusion



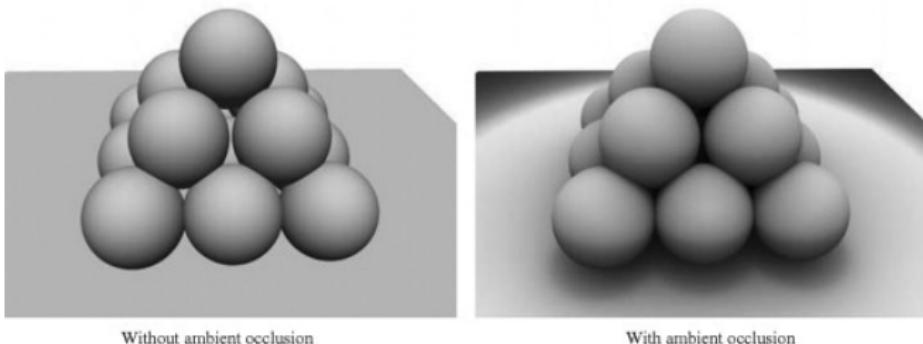
With ambient occlusion

Définition

L'occlusion ambiante, aussi appelée Ambient Occlusion en anglais, est un algorithme utilisé dans la modélisation tridimensionnelle, ayant pour but d'améliorer le réalisme d'un rendu. Elle permet d'assombrir les zones naturellement difficiles d'accès à la lumière.

```
vec3 ambient = vec3(0.03) * albedo * ao;  
vec3 color = ambient + Lo;
```

Ambient Occlusion



Définition

L'occlusion ambiante, aussi appelée Ambient Occlusion en anglais, est un algorithme utilisé dans la modélisation tridimensionnelle, ayant pour but d'améliorer le réalisme d'un rendu. Elle permet d'assombrir les zones naturellement difficiles d'accès à la lumière.

```
vec3 ambient = vec3(0.03) * albedo * ao;  
vec3 color = ambient + Lo;
```

► Wait what ambient? $\text{vec3}(0.03)$?

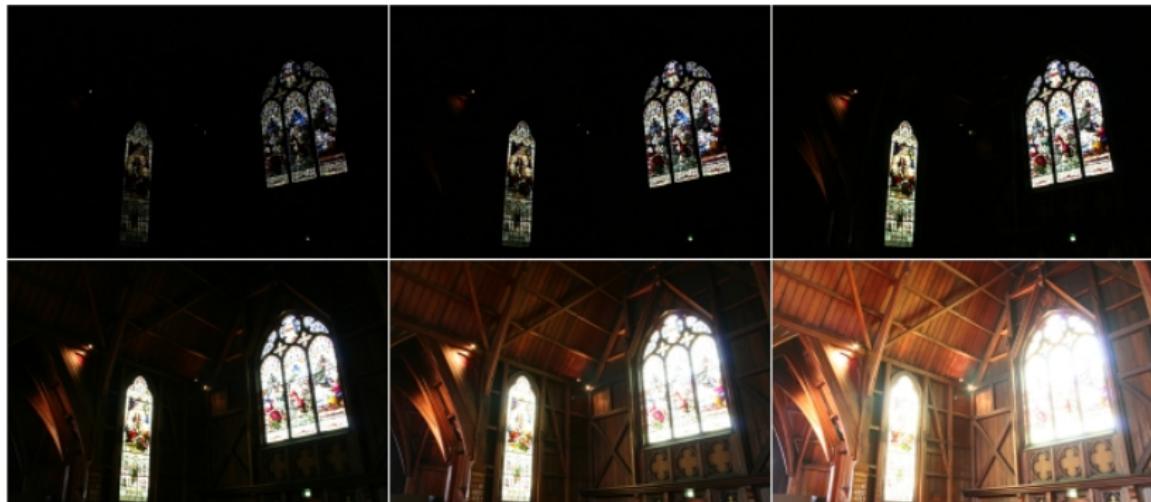
Image-Based Lighting



Tonemapping

Définition

est une technique utilisée dans le traitement de l'image et de l'infographie pour mettre en correspondance une palette de couleurs avec une autre, dans le but de convertir une image de grande gamme dynamique vers une image de dynamique plus restreinte.



Tonemapping

- ▶ Conversion Linear RGB en sRGB (pour éviter les couleurs ternes car le rendu est une image sRGB)
- ▶ A réaliser juste avant d'assigner la couleur au *shader*

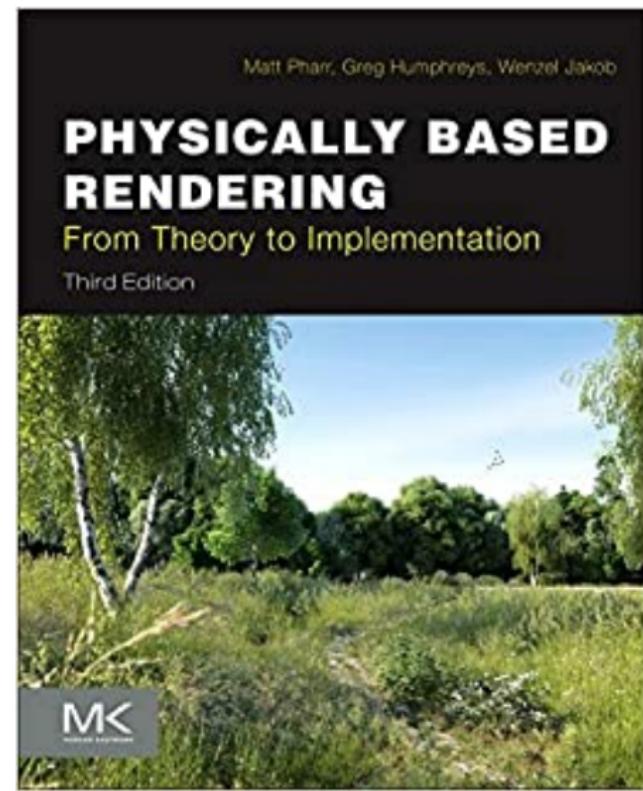
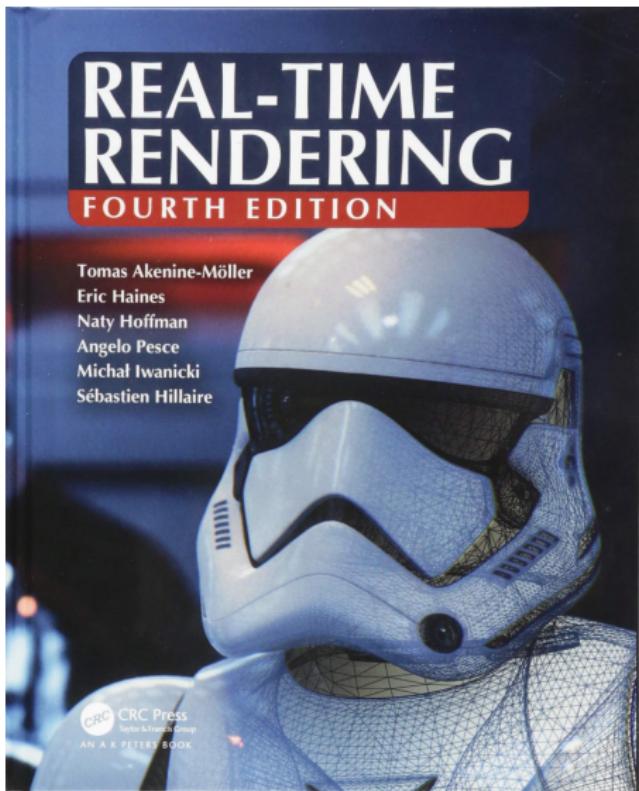
HDR tonemapping

```
FragColor = color/(color + vec3(1.0));
```

Gamma correction

```
FragColor = pow(FragColor, vec3(1.0/2.2));
```

Références



Références

-  T. Akenine-Möller, E. Haines, N. Hoffman, A. Pesce, M. Iwanicki, S. Hillaire
Real-Time Rendering, Fourth Edition.
CRC Press, 2018
-  Matt Pharr, Wenzel Jakob, and Greg Humphreys
Physically Based Rendering : From Theory to Implementation.
(Third Edition)
Morgan Kaufmann Publishers, 2016

Travaux pratiques

* Vous pouvez utiliser votre propre moteur si vous le souhaitez

Niveau 0

Développer votre propre modèle (*shader*) PBR avec les paramètres suivants :

- ▶ Albedo (Couleur + Texture)
- ▶ Metalness (Valeur + Texture)
- ▶ Roughness (Valeur + Texture)

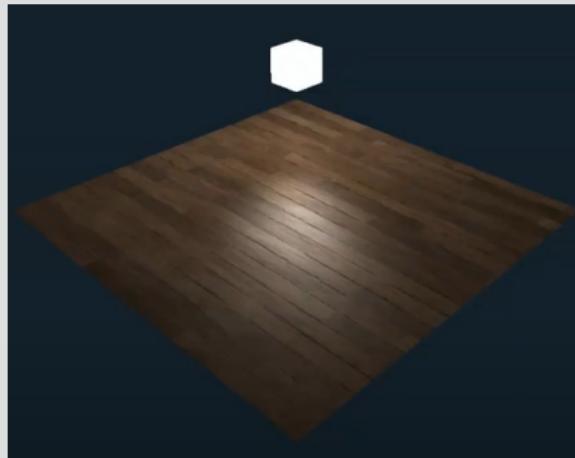
Créer votre classe de matière associant un shader program et des paramètres à injecter dedans

Travaux pratiques

* Vous pouvez utiliser votre propre moteur si vous le souhaitez

Niveau 1

Rajouter l'effet d'émission et d'ambiant occlusion :



Travaux pratiques

* Vous pouvez utiliser votre propre moteur si vous le souhaitez

Niveau 2

Niveau 2 : Choisir un modèle PBR connu parmi les suivants et essayer de développer certaines fonctionnalités de ces derniers :

- ▶ glTF PBR
- ▶ Filament
- ▶ Dassaut (2022)