

Rendu physique réaliste (*Physically-Based Rendering*)

Sébastien Beugnon

4 novembre 2020

Sébastien Beugnon

R&D Researcher

mail : sebastien.beugnon@emersya.com

Github : @sbeugnon

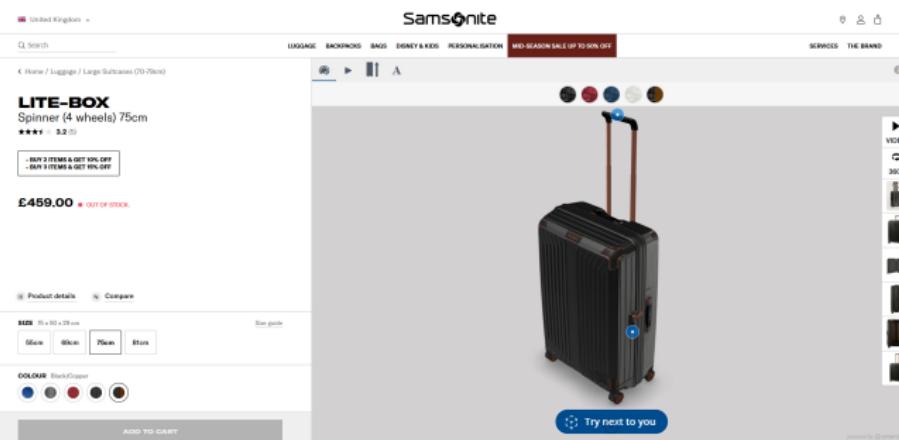
Cours/TP



Emersya

Produits

- ▶ Visionneuse 3D multi-plateforme (web + AR)
 - ▶ Configurateur de produits (matières, éléments)
 - ▶ Plateforme de gestion de modèles 3D



Physically-based rendering

Usages

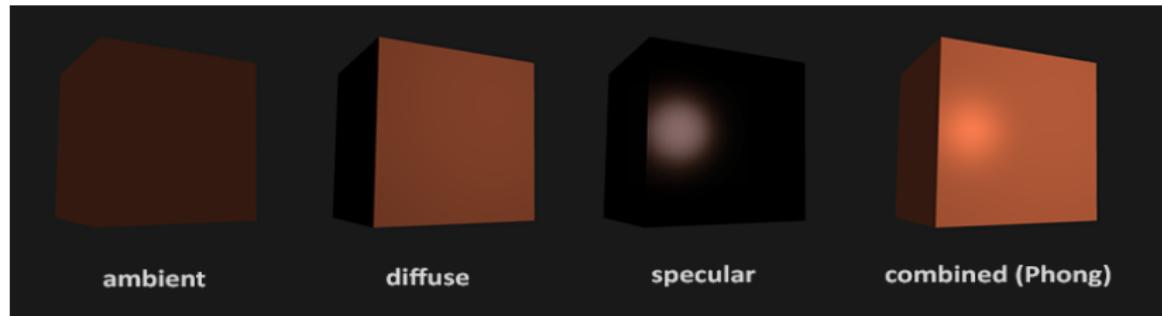
- ▶ Infographie (architecture, commerce)
 - ▶ Films d'animation
 - ▶ Jeux vidéo



Rappel

Modèle Blinn-Phong

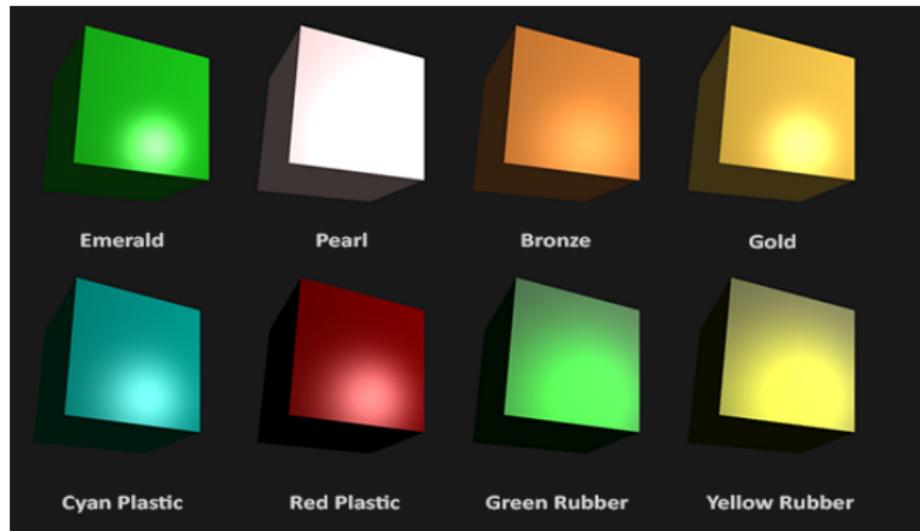
- ▶ Ambiant (*Ambient*)
 - ▶ Diffuse (*Diffuse*)
 - ▶ Spéculaire (*Specular + Shininess*)



Physically-based rendering

Intérêts

- ▶ Rendu plus réaliste que Phong ou Blinn-Phong
 - ▶ Paramétrisation plus physique (plus de paramètres)



2 types de rendu

Rendu pré-calculé (Baked)

- ▶ Images, animation, FX
- ▶ Requiert des minutes, des heures, de rendu pour une image



2 types de rendu

Rendu en temps réel (Realtime)

- ▶ Visionneuse, jeux vidéo, simulations
- ▶ Vitesse de rendu est cruciale (FPS)

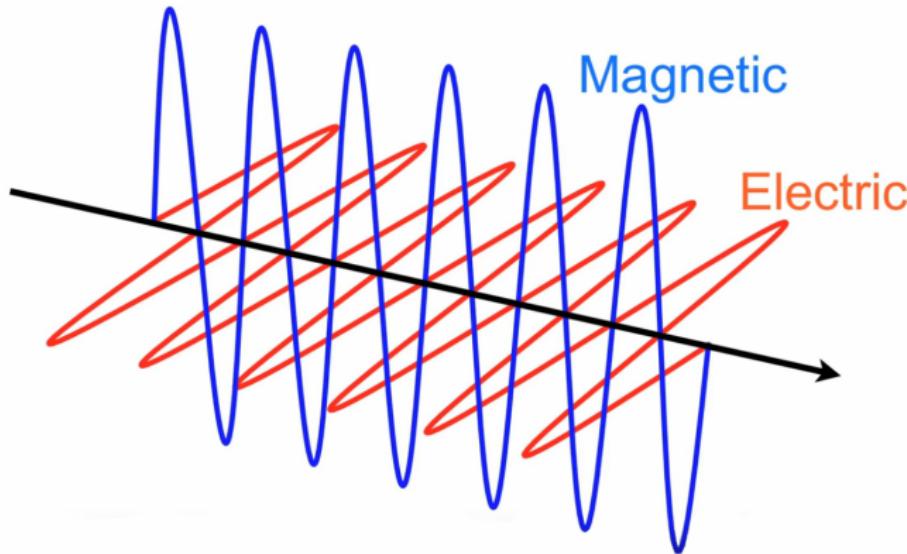


Physique de la lumière

- ▶ C'est quoi la lumière ?

Physique de la lumière

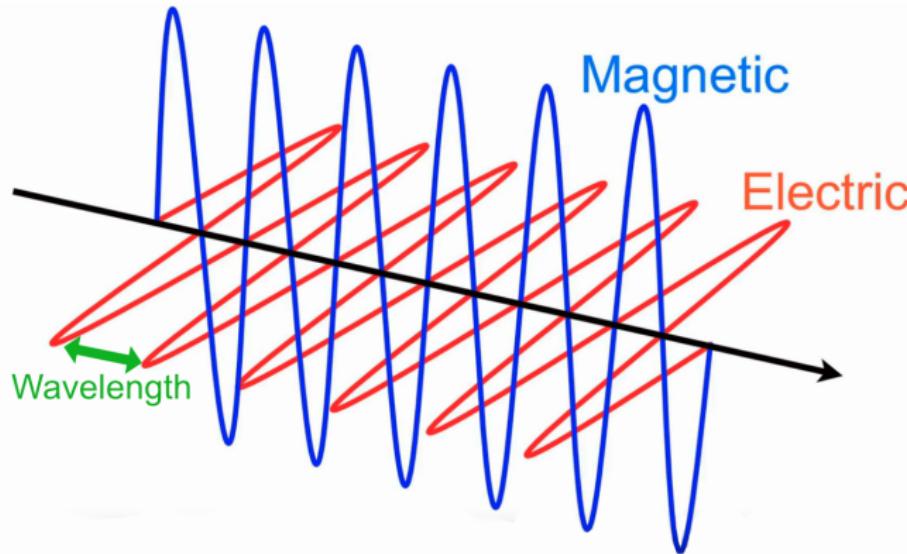
- ▶ C'est quoi la lumière ?
 - Une onde électro-magnétique



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

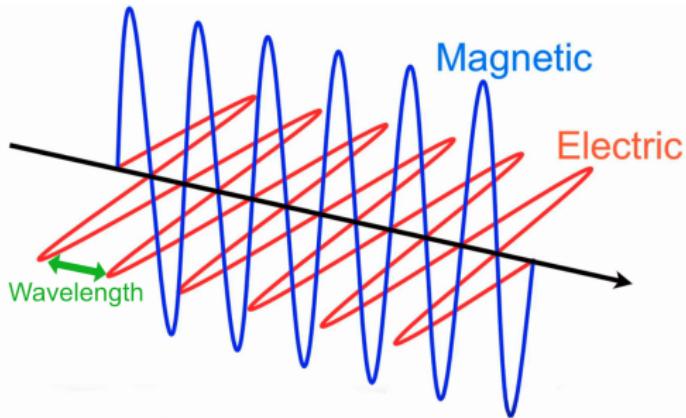
- ▶ C'est quoi la lumière ?
 - Une onde électro-magnétique



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



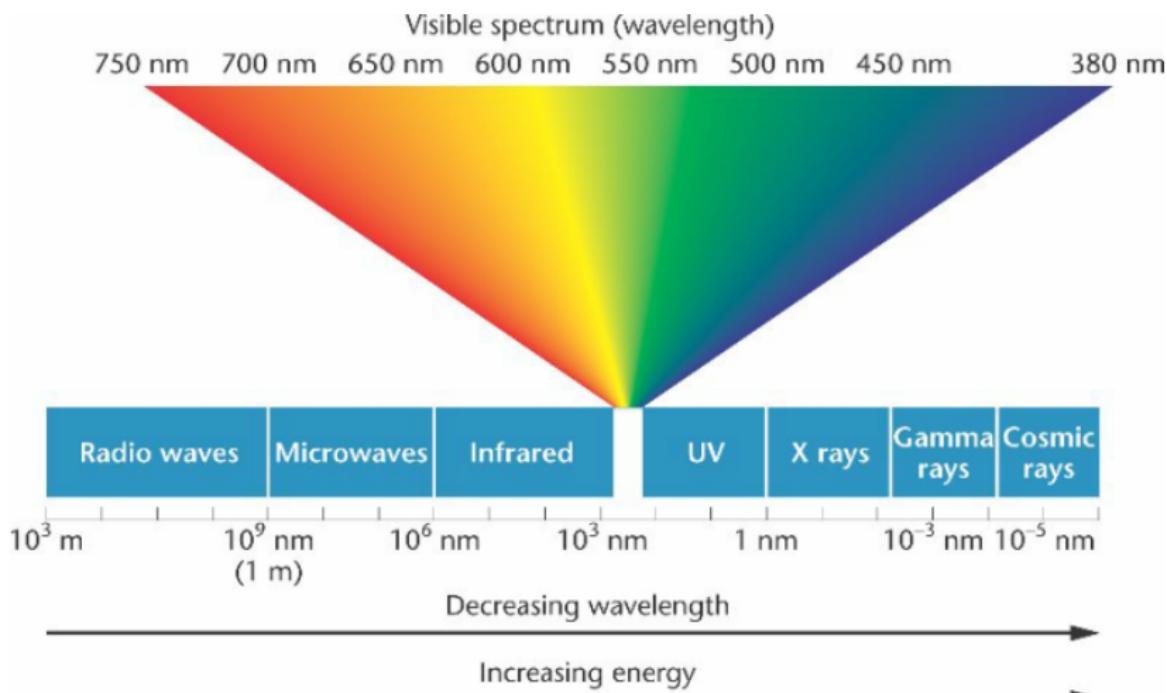
Définition

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



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

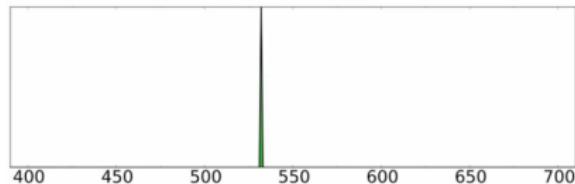
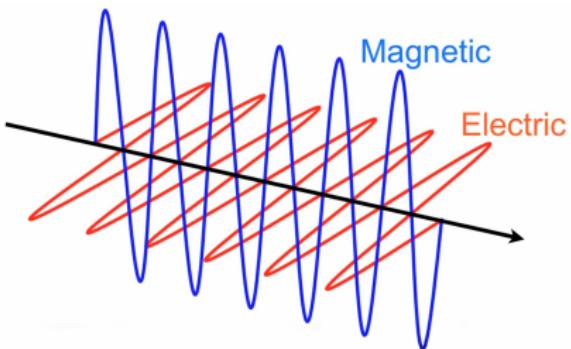
Physique de la lumière



Physique de la lumière

Laser

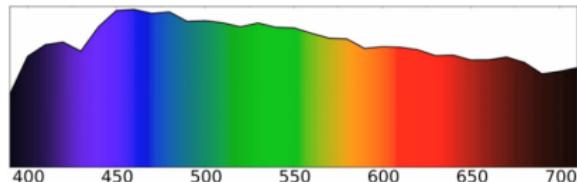
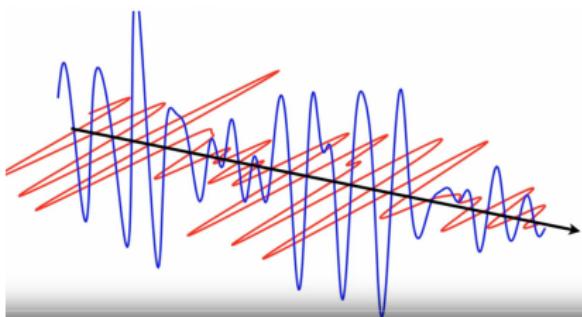
- ▶ Onde monochromatique = Belle sinusoïde
- ▶ Profile spectrale discret (Spectrum profile)



Physique de la lumière

Lumière blanche

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



Physique de la lumière

- ▶ Comment la lumière est émise ?

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 ?

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)

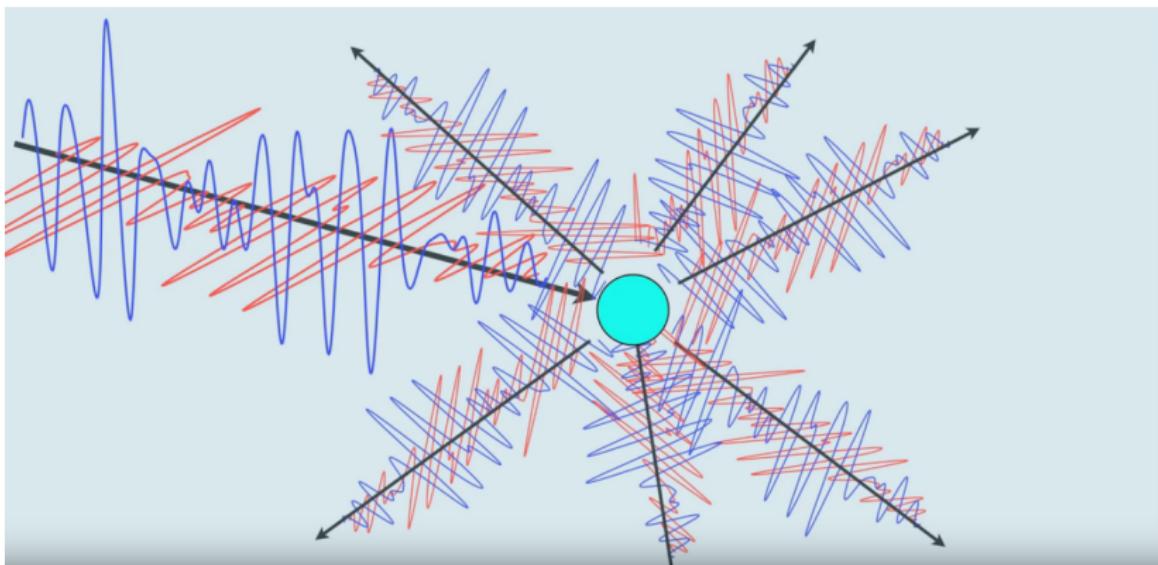
Une partie est convertie en énergie lumineuse et rayonne de l'objet

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

Particule

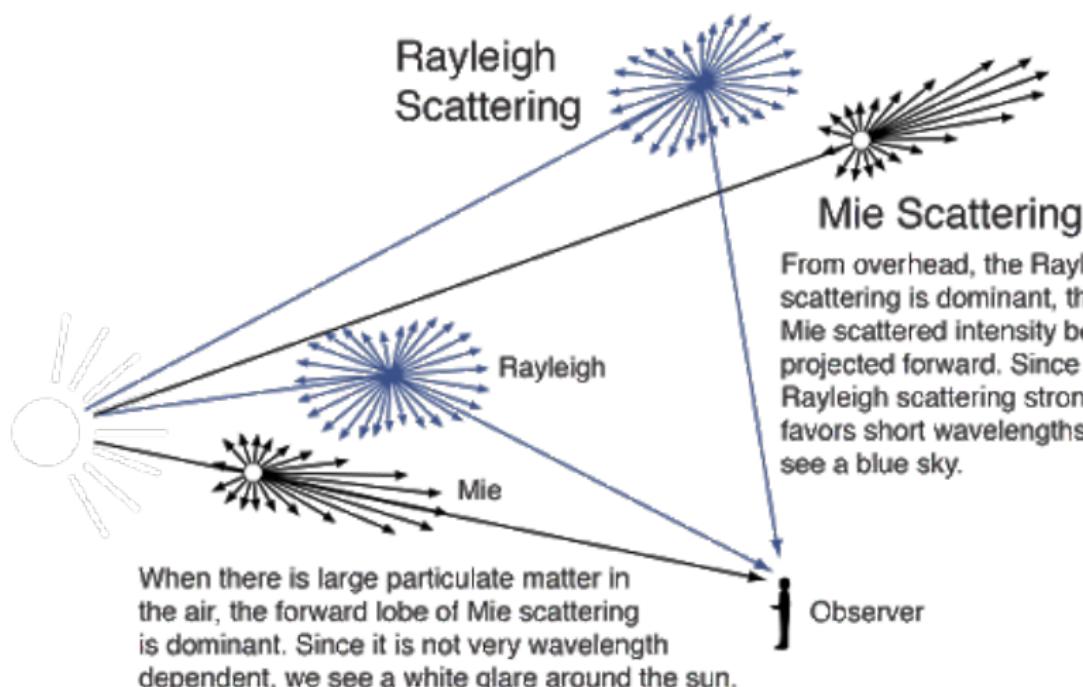
Scattering (Diffusion, Dispersion)

- ▶ Interaction matière-lumière



Particule

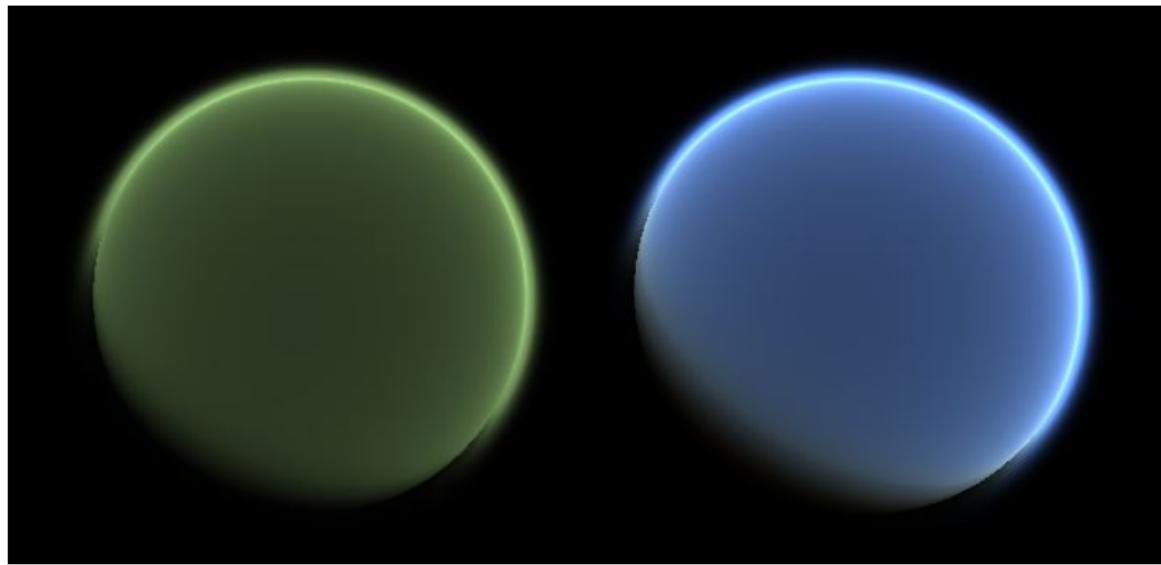
Scattering particle



Particule

Diffusion de Rayleigh (*Rayleigh Scattering*)

- ▶ Ciel (*Atmospheric Scattering*)



Particule

Diffuse de Mie (*Mie Scattering*)

▶ *Nuages*



Support

Medium homogène

Volume rempli de manière uniformément espacée de molécules identiques

- ▶ Liquide (eau)
- ▶ Solide (cristal)

Propriété optique : Indice de réfraction

- ▶ IOR ou (*refractive index n*)
- ▶ Abstraction du détails de la lumière au niveau moléculaire pour considérer le médium comme un volume continu et homogène.
- ▶ Certains médias sont **absorbants**

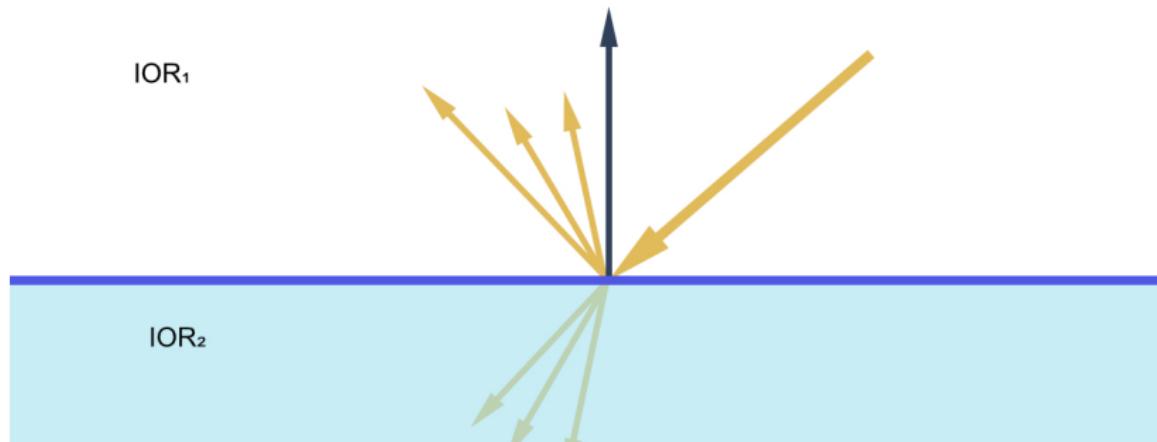
Support



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

La surface n'est pas forcément un miroir parfait.

Rugosité de la surface

3 niveaux

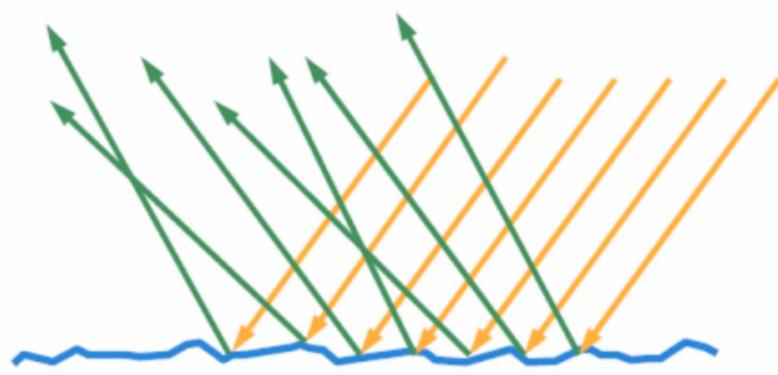
- ▶ Macro-géométrie (Visible à l'oeil nu)
- ▶ Micro-géométrie (Au niveau microscopique)
- ▶ Nano-géométrie (Au niveau de la longueur d'onde)



Rugosité de la surface

3 niveaux

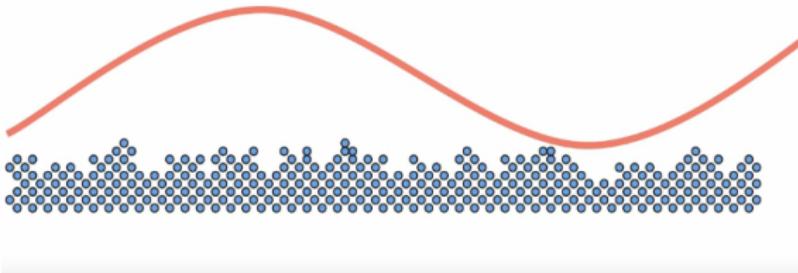
- ▶ Macro-géométrie (Visible à l'oeil nu)
- ▶ Micro-géométrie (Au niveau microscopique)
- ▶ Nano-géométrie (Au niveau de la longueur d'onde)



Rugosité de la surface

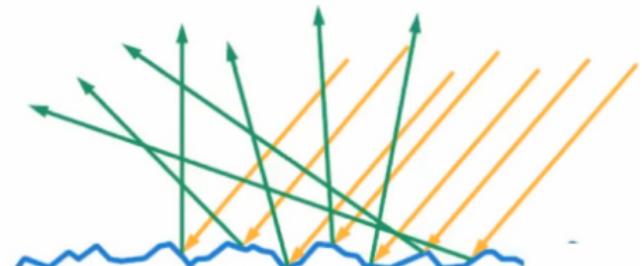
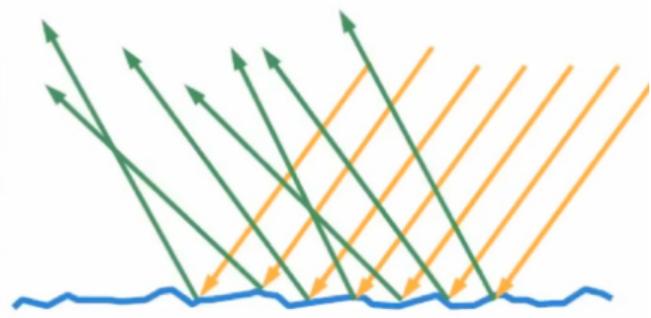
3 niveaux

- ▶ 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

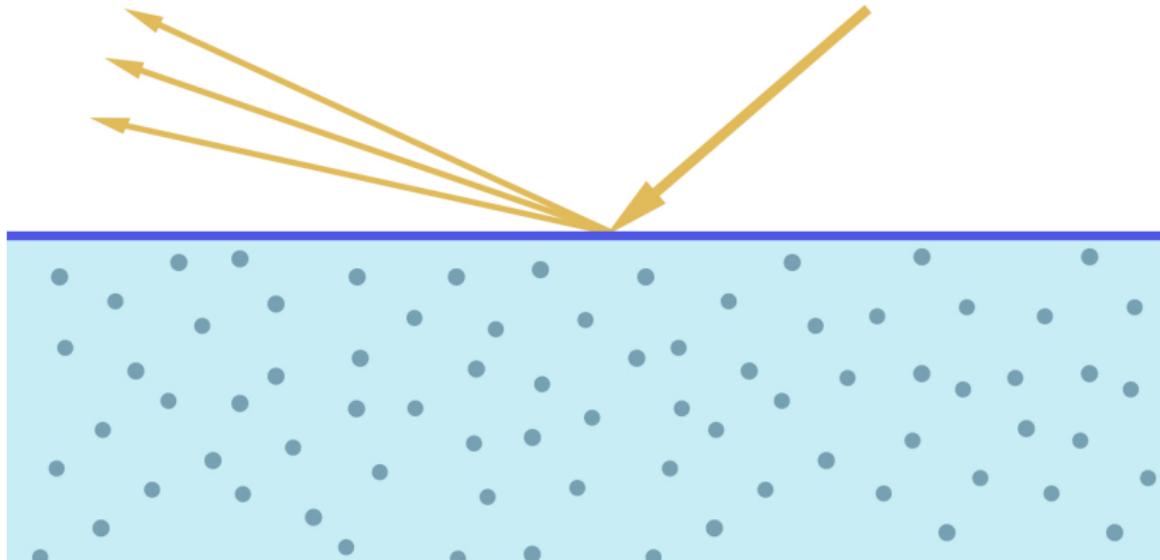
+ Rugueux = + Réflexions flous



Diffusion sous la surface

Subsurface Scattering

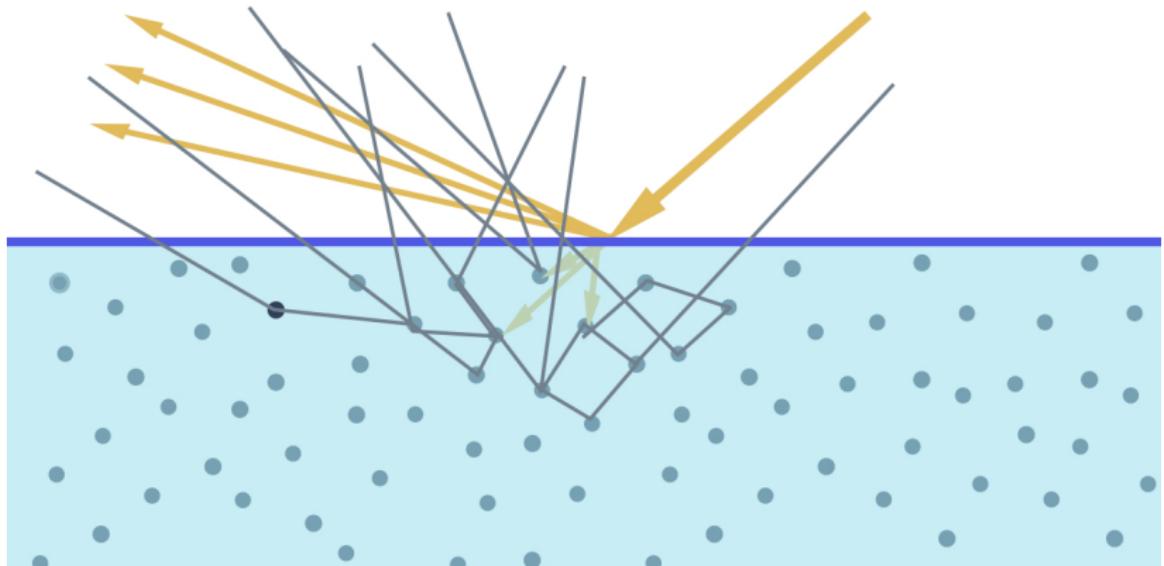
- ▶ Diffusion de particules puis changement (\neq Transmission)



Diffusion sous la surface

Subsurface Scattering

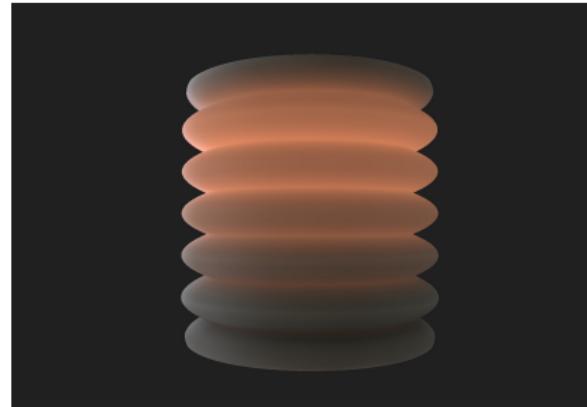
- ▶ Diffusion de particules puis changement (\neq Transmission)



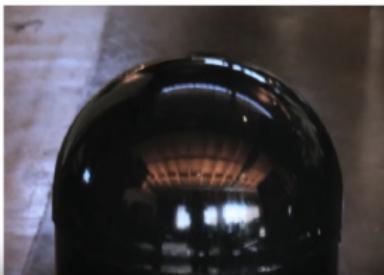
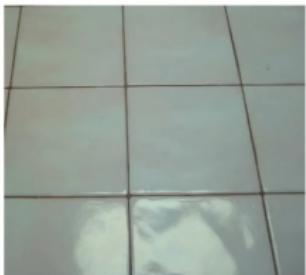
Diffusion sous la surface

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

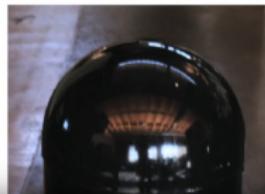


SIGGRAPH 2015

Distinctions des matières

D'un point de vue de rendu :

- ▶ Métaux
- ▶ Non-métaux

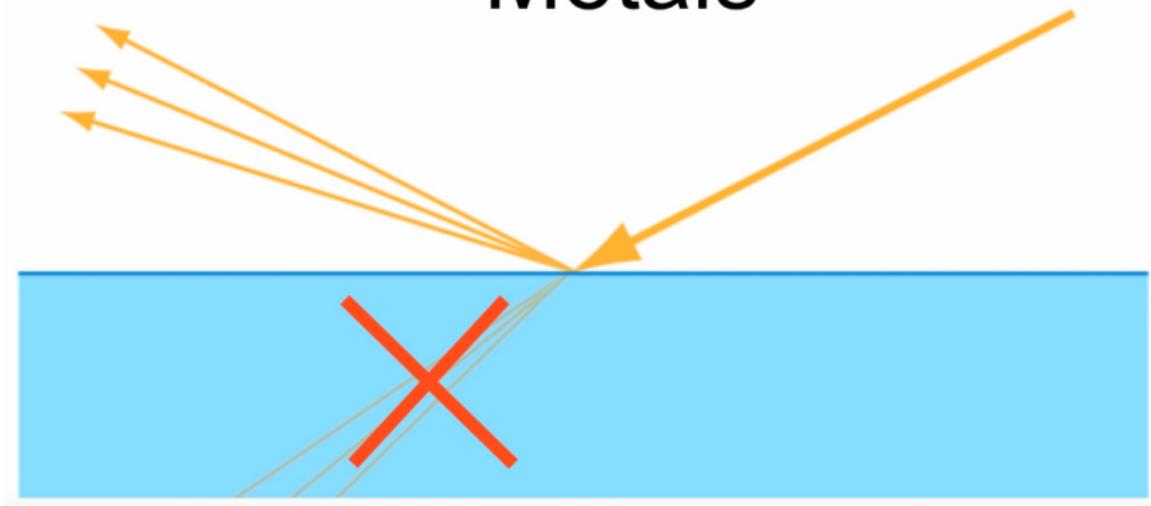


SIGGRAPH 2015

Métaux

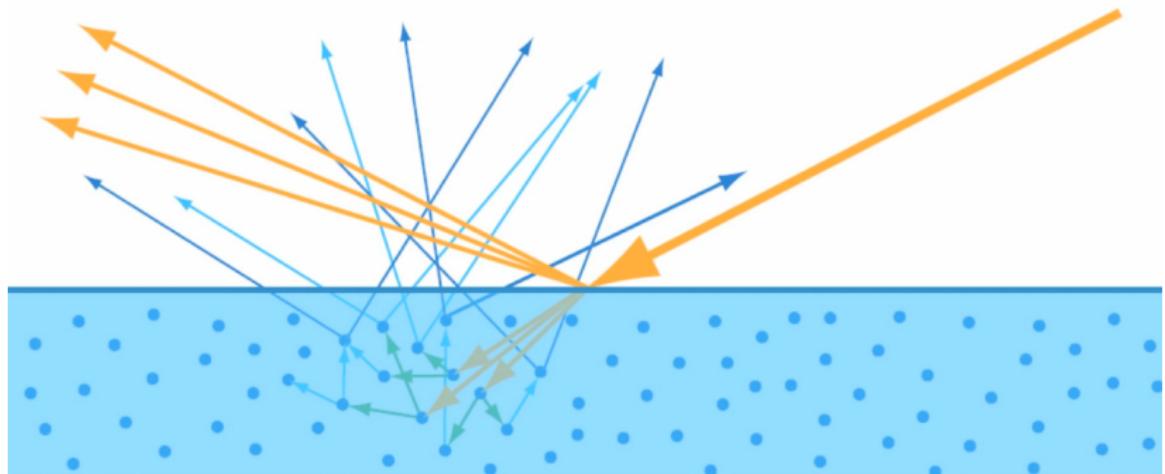
- ▶ Absorbe ou Réfléchit la lumière

Metals

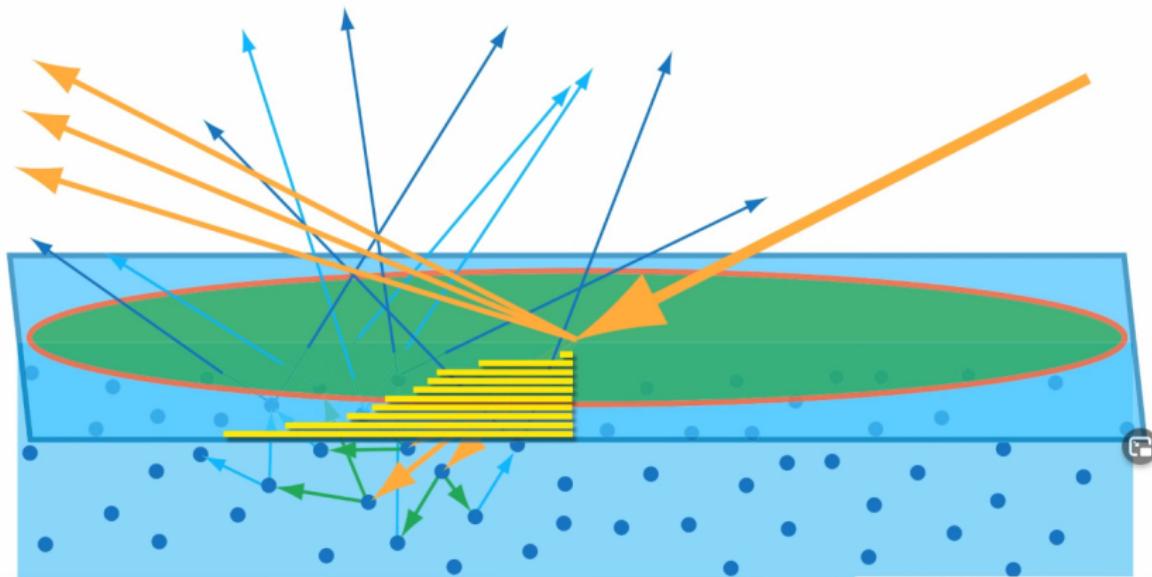


Non-métaux

Non-Metals



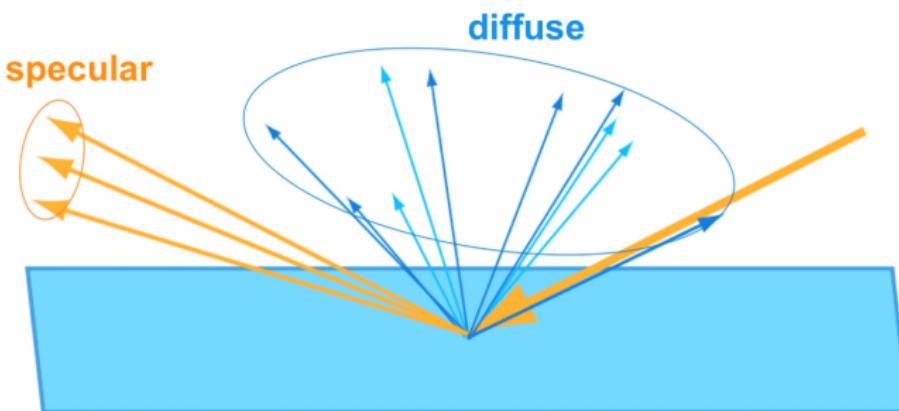
Difficulté de modélisation



Simplification du modèle

2 composantes

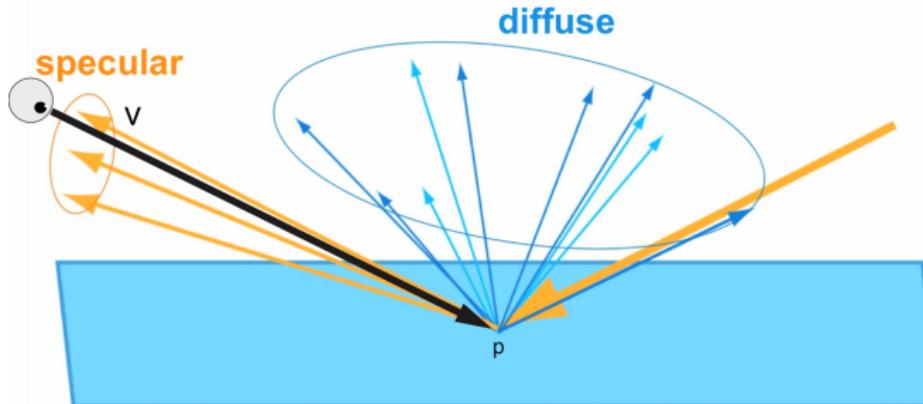
- ▶ Diffusion (Diffuse)
- ▶ Spéculaire (Specular)



Simplification du modèle

2 composantes

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



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

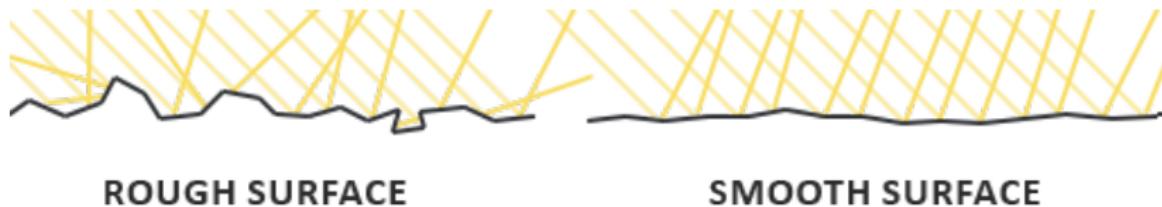
- ▶ Modèle de micro-facettes (*Microfacet model*)
- ▶ Conservation de l'énergie (*Energy conservation*)
- ▶ Lumière utilisant une fonction de réflectivité bidirectionnelle (BRDF)

Modèle de micro-facettes

Définition

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

- ▶ Rugosité (*Roughness*)



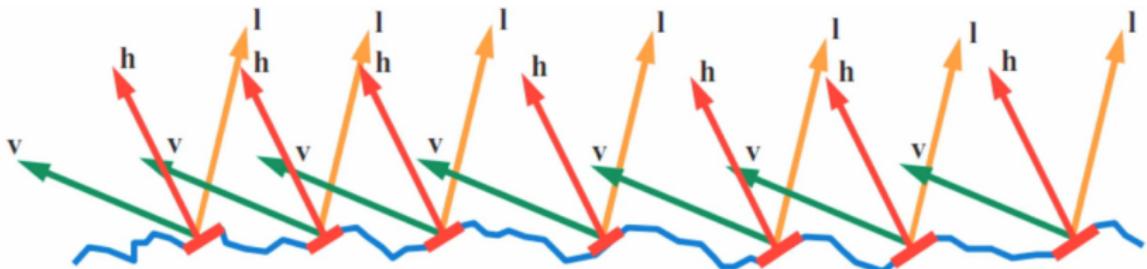
- ▶ Voir n'importe quelle surface comme de petits miroirs réfléctifs (*microfacets*)

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*.

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



BRDF

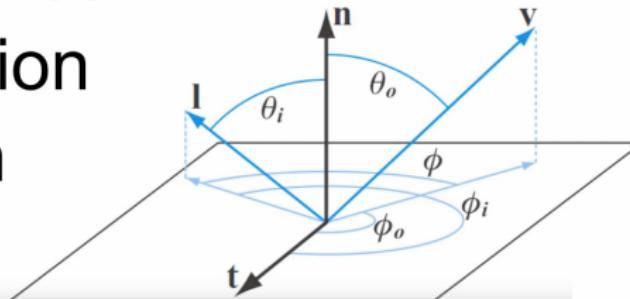
- ▶ C'est quoi une BRDF ?

BRDF

- C'est quoi une BRDF?

Bidirectional
Reflectance
Distribution
Function

$$f(l, v)$$



$$f(l, v)$$

l , direction de la lumière v , direction vers la vue

L'équation ultime du rendu

Équation de la réflectance

$$L_o(v) = \int_{\Omega} f(l, v) \times L_i(l)(n.l) d\omega_i \quad (2)$$

où $L_o(v)$ est la radiance perçue dans la direction v , $L_i(l)$ est la radiance perçue dans la direction l pour la i -ème lumière ;

En terme de code

Une intégrale se traduit comment ?

L'équation ultime du rendu

Équation de la réflectance

$$L_o(v) = \int_{\Omega} f(l, v) \times L_i(l)(n.l) d\omega_i \quad (2)$$

où $L_o(v)$ est la radiance perçue dans la direction v , $L_i(l)$ est la radiance perçue dans la direction l pour la i -ème lumière ;

En terme de code

Une intégrale se traduit comment ?

- ▶ On fait la moyenne de la radiance perçue par chaque lumière.

L'équation ultime du rendu

Équation de la réflectance

$$L_o(v) = \int_{\Omega} f(l, v) \times L_i(l)(n.l) d\omega_i \quad (2)$$

où $L_o(v)$ est la radiance perçue dans la direction v , $L_i(l)$ est la radiance perçue dans la direction l pour la i -ème lumière ;

En terme de code

Une intégrale se traduit comment ?

- ▶ On fait la moyenne de la radiance perçue par chaque lumière.

Radiance

- ▶ Radiance => RGB Color

L'équation ultime du rendu

Équation de la réflectance

$$L_o(v) = \int_{\Omega} f(l, v) \times L_i(l)(n.l) d\omega_i \quad (2)$$

où $L_o(v)$ est la radiance perçue dans la direction v , $L_i(l)$ est la radiance perçue dans la direction l pour la i -ème lumière ;

En terme de code

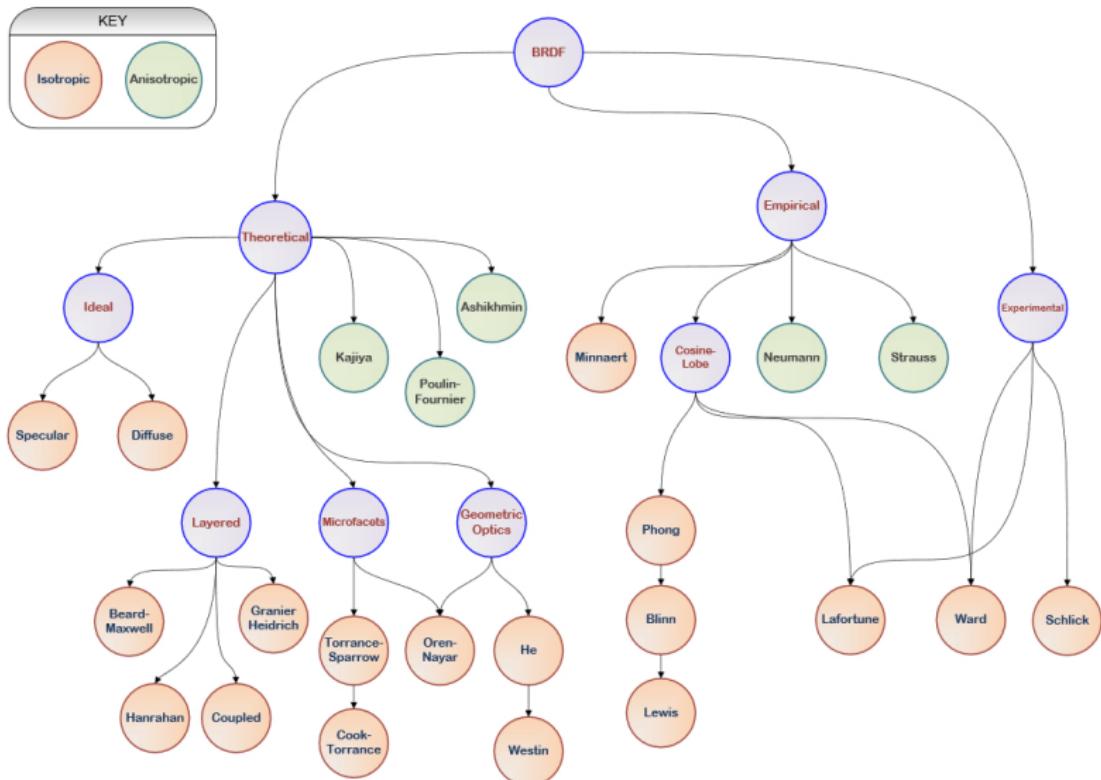
Une intégrale se traduit comment ?

- ▶ On fait la moyenne de la radiance perçue par chaque lumière.

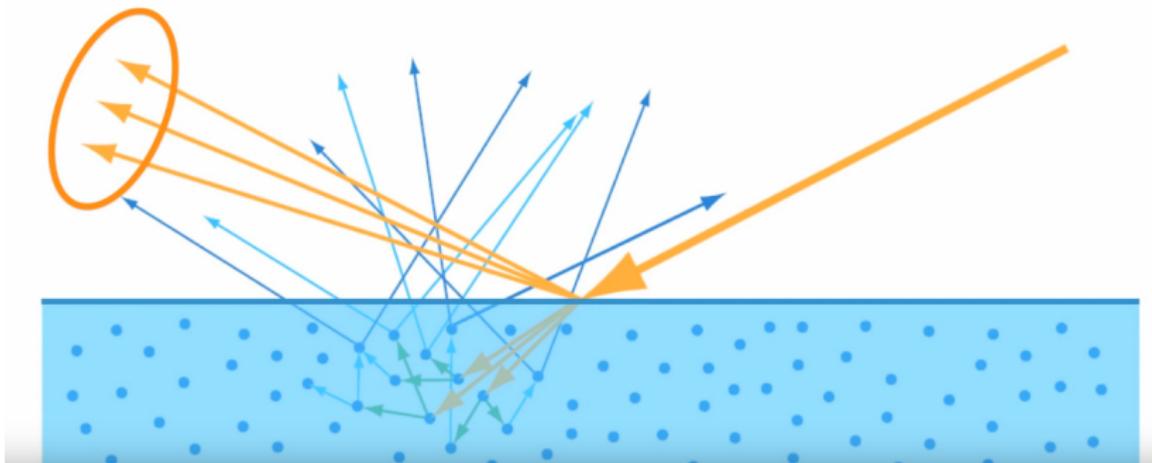
Radiance

- ▶ Radiance => RGB Color

BRDF Big Family



Specular BRDF



Microfacet Specular BRDF

$$f(l, v) = \frac{F(l, h)G(l, v, h)D(h)}{4(n.l)(n.v)} \quad (3)$$

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

Fonction de Fresnel

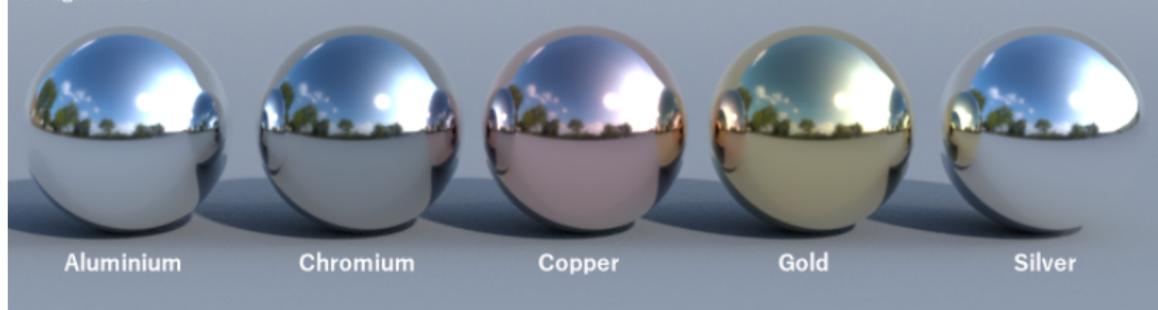
Définition

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 (%) :

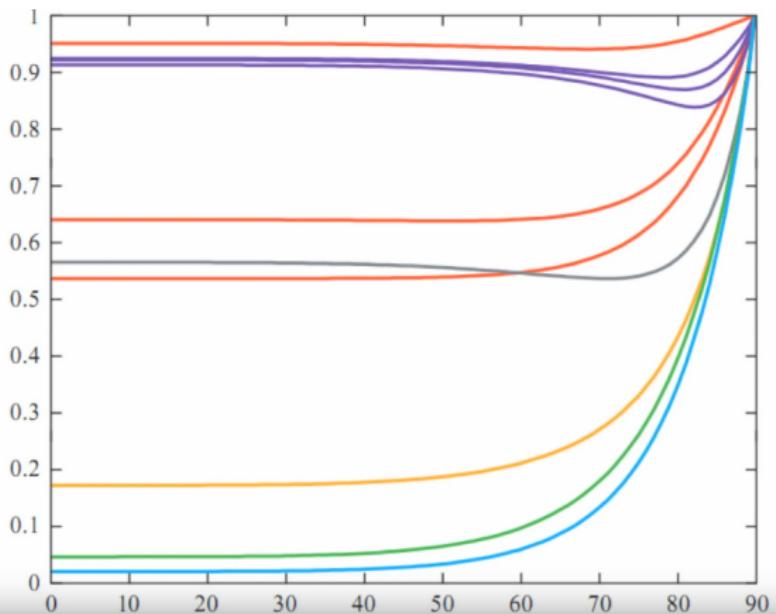
Roughness 10%



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

$$F_{Schlick}(F_0, l, n) = F_0 + (1 - F_0)(1 - (l \cdot n))^5 \quad (4)$$

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

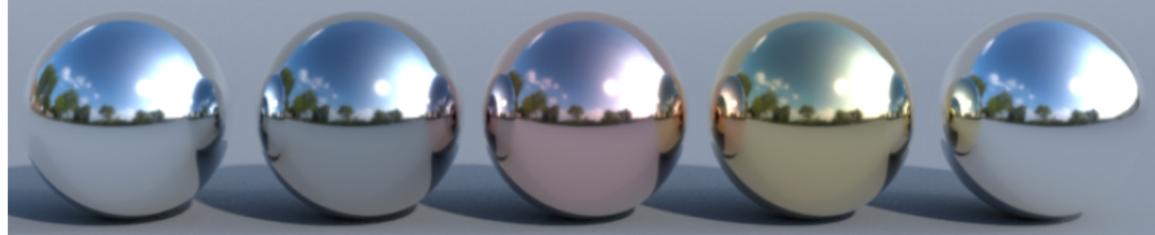
Dielectric	F_0 (Linear, Float)	F_0 (sRGB, U8)	Color
Water	0.020	39	
Plastic, Glass	0.040 – 0.045	56 – 60	
Crystalware, Gems	0.050 – 0.080	63 – 80	
Diamond-like	0.100 – 0.200	90 – 124	

Fonctions de Fresnel

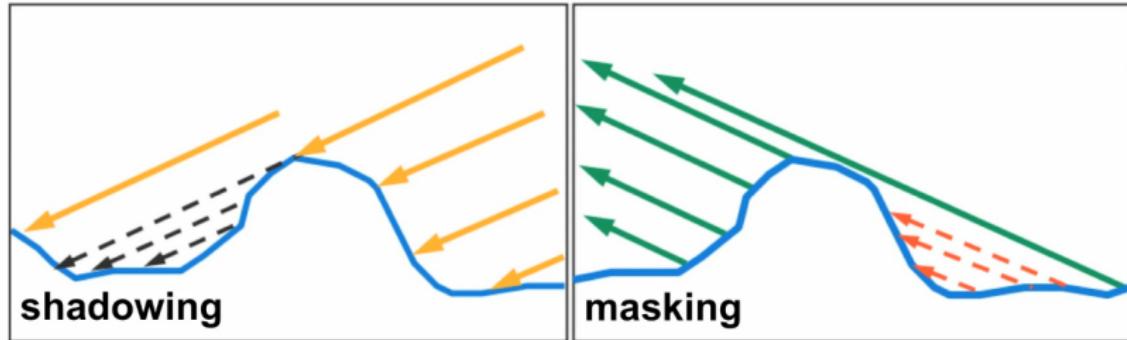
Metal	F_0 (Linear, Float)	F_0 (sRGB, U8)	Color
Titanium	0.542,0.497,0.449	194,187,179	
Chromium	0.549,0.556,0.554	196,197,196	
Iron	0.562,0.565,0.578	198,198,200	
Nickel	0.660,0.609,0.526	212,205,192	
Platinum	0.673,0.637,0.585	214,209,201	
Copper	0.955,0.638,0.538	250,209,194	
Palladium	0.733,0.697,0.652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

$$G_{Schlick-GGX}(n, v, k) = \frac{n.v}{(n.v)(1 - k) + k} \quad (5)$$

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

Approximation de Smith

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

$$D(n, h, \alpha) = \frac{\alpha^2}{\pi * ((n.h^+)^2(\alpha^2 - 1) + 1)^2} \quad (6)$$

Cook-Torrance BRDF

Equation

$$f_r = k_d \cdot f_{\text{Lambert}} + k_s \cdot f_{\text{CookTorrance}} \quad (7)$$

Lambert Diffuse

Une constante de couleur

$$f_{\text{Lambert}} = \frac{c}{\pi} \quad (8)$$

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

Lumières

La radiance de la lumière

- ▶ Pondérée par la distance entre la lumière

$$L_i = c_i \cdot a(p, p_o) \quad (9)$$

où c_i est la couleur de la lumière et a la fonction d'atténuation de la radiance selon la distance entre le point p sur la surface et l'origine de la lumière p_i .

Fonction d'atténuation a

$$a(p, p_i) = \frac{1}{(||p - p_i||)^2} \quad (10)$$

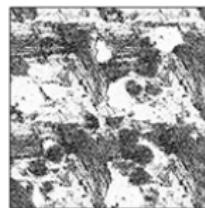
PBR Shader



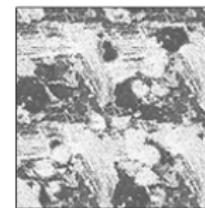
ALBEDO



NORMAL



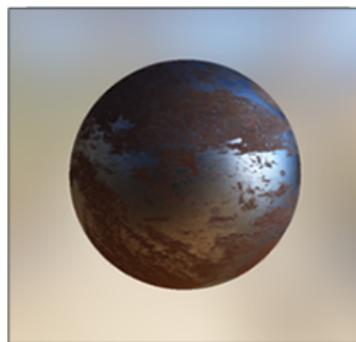
METALLIC



ROUGHNESS



AO



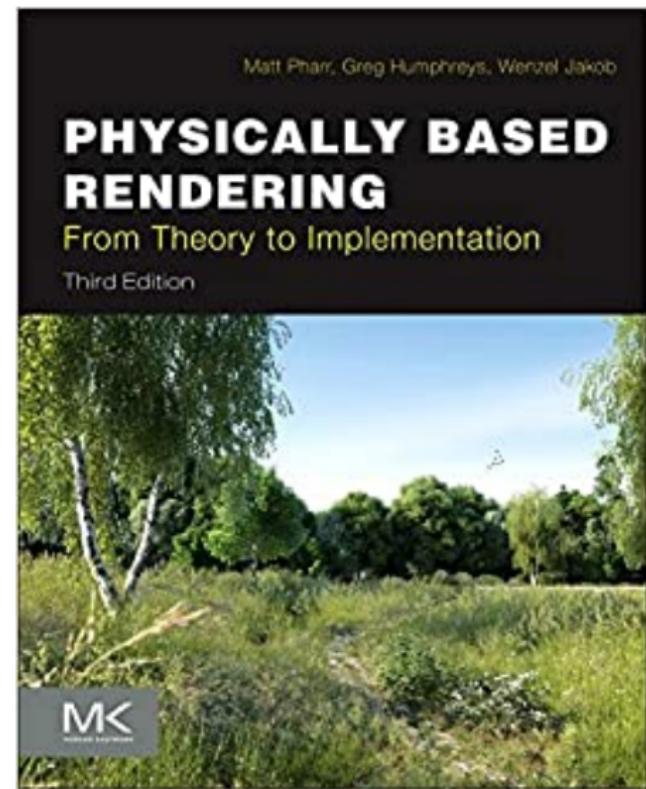
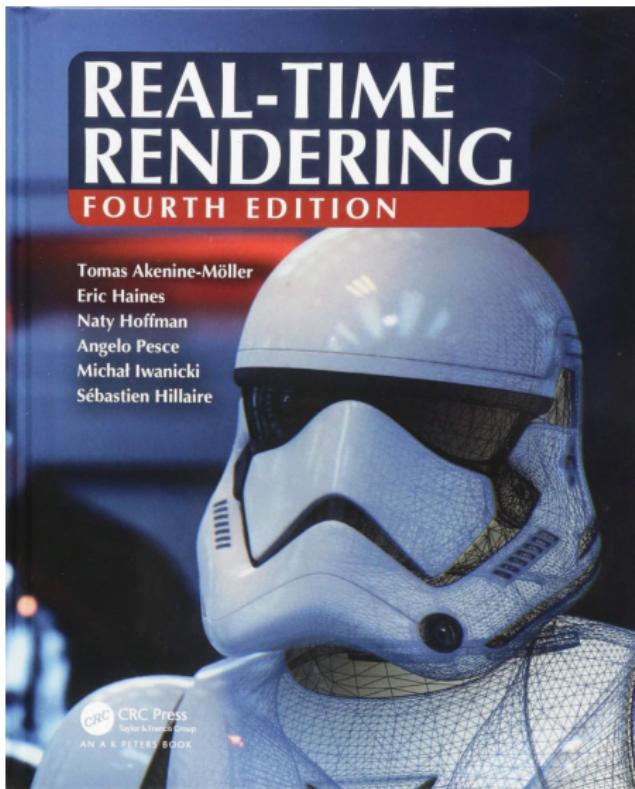
Astuces

HDR 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
color = color/(color + vec3(1.0))
// gamma correct
color = pow(color, 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

Objectifs

- ▶ Développer votre propre modèle (*shader*) PBR avec les paramètres suivants :
 - ▶ Albedo (Couleur + Texture)
 - ▶ Metalness (Valeur + Texture)
 - ▶ Roughness (Valeur + Texture)
 - ▶ NormalMap (Texture)
 - ▶ AmbientOcclusionMap (Texture)
- ▶ Choisir un modèle PBR connu parmi les suivants et essayer de développer certaines fonctionnalités de ces derniers :
 - ▶ glTF PBR
 - ▶ Filament
 - ▶ Dassaut