

M2-Images

lumière et matières

J.C. lehl

September 20, 2022

lumière et matières

exemple de matières :

- ▶ quelles catégories de matières ?
- ▶ comment représenter chaque catégorie ?
- ▶ comment calculer l'apparence de chaque catégorie ?

Introduction

modèles empiriques
modèles physiques
shaders
et alors ?

réflexion de Fresnel
réflexion de Lambert
modèle de Brdf
brdf diffuse

exemples...

catégories

matières élémentaires :

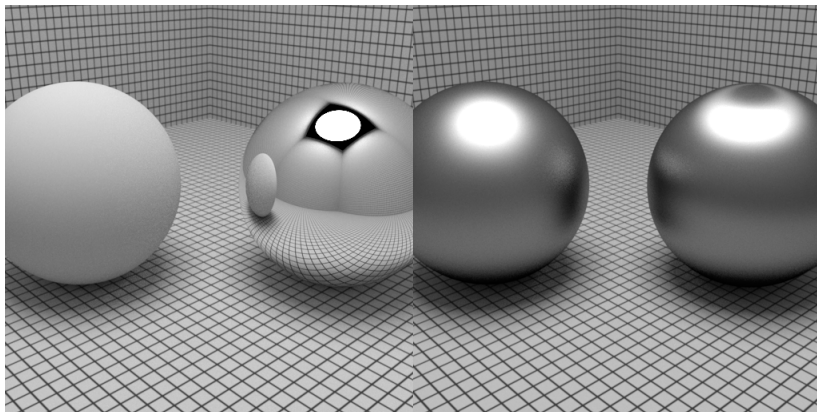
- ▶ uniforme,
- ▶ diffuse,
- ▶ réfléchissante,
- ▶ texturée / colorée,
- ▶ miroir / transparent,
- ▶ lisse / rugueux ?

Introduction

modèles empiriques
modèles physiques
shaders
et alors ?

réflexion de Fresnel
réflexion de Lambert
modèle de Brdf
brdf diffuse

uniforme diffus / miroir / rugueux



réfléchissant / miroir / transparent

- ▶ quelle est la couleur d'un miroir ?
- ▶ quelle est la couleur d'un objet transparent ?

séparation :

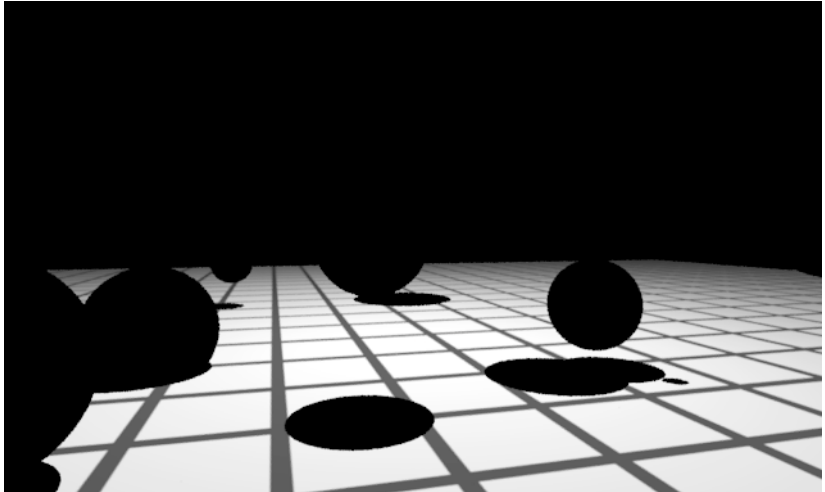
- ▶ modèle *local* : dépend uniquement de la matière et des sources de lumières,
- ▶ modèle *global* : dépend aussi des objets environnants.

Introduction

modèles empiriques
modèles physiques
shaders
et alors ?

réflexion de Fresnel
réflexion de Lambert
modèle de Brdf
brdf diffuse

modèle *global*

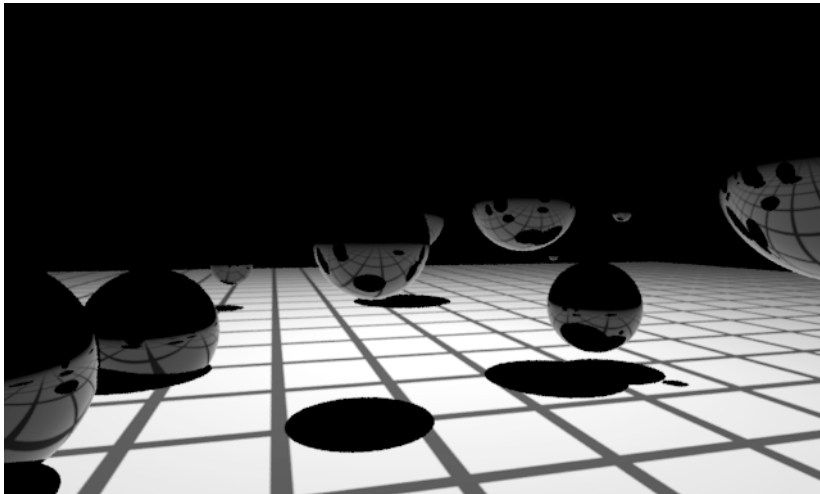


Introduction

modèles empiriques
modèles physiques
shaders
et alors ?

réflexion de Fresnel
réflexion de Lambert
modèle de Brdf
brdf diffuse

modèle *global*

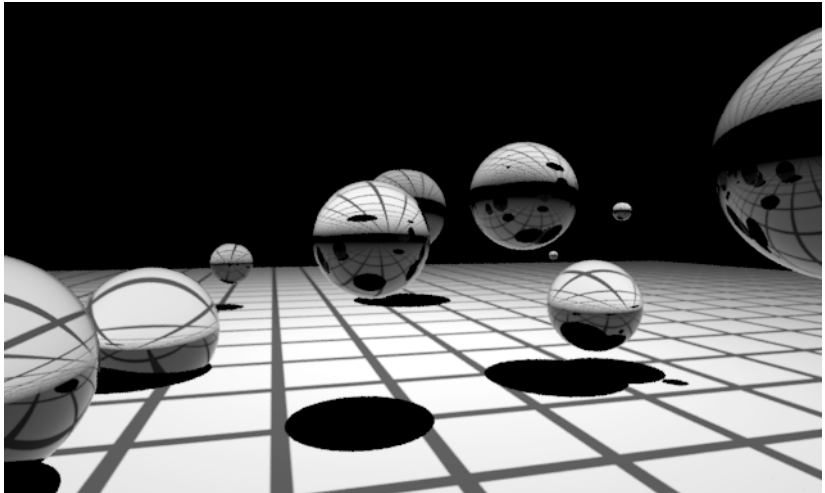


Introduction

modèles empiriques
modèles physiques
shaders
et alors ?

réflexion de Fresnel
réflexion de Lambert
modèle de Brdf
brdf diffuse

modèle *global*

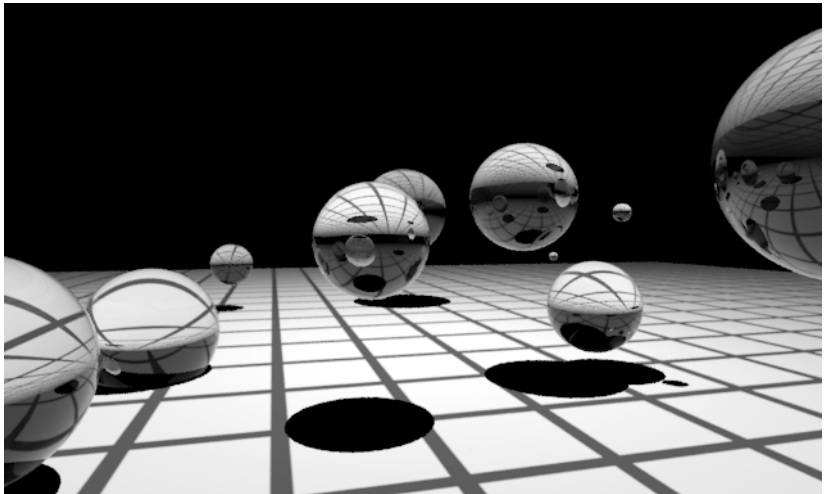


Introduction

modèles empiriques
modèles physiques
shaders
et alors ?

réflexion de Fresnel
réflexion de Lambert
modèle de Brdf
brdf diffuse

modèle *global*



catégories *locales*

matières élémentaires *locales* :

- ▶ uniforme,
- ▶ diffuse,
- ▶ rugueuse,
- ▶ texturée / colorée,

les autres types de matières demandent des calculs plus importants pour obtenir une apparence correcte...

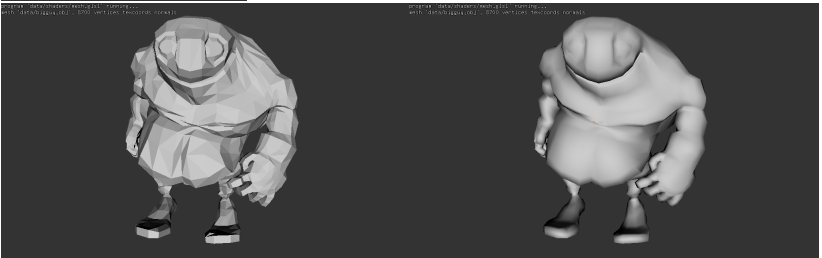
(pour trouver les objets qui se réfléchissent dans celui que l'on observe)

Introduction

modèles empiriques
modèles physiques
shaders
et alors ?

réflexion de Fresnel
réflexion de Lambert
modèle de Brdf
brdf diffuse

exemples :

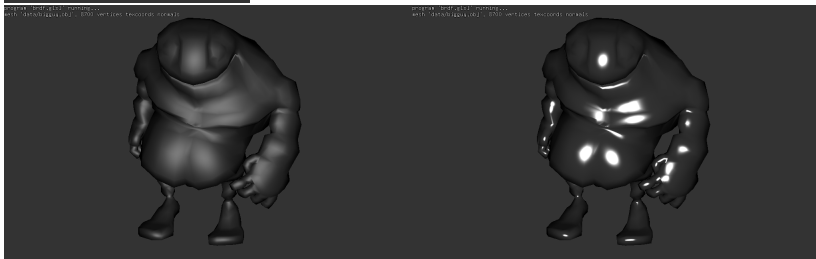


Introduction

modèles empiriques
modèles physiques
shaders
et alors ?

réflexion de Fresnel
réflexion de Lambert
modèle de Brdf
brdf diffuse

exemples (comportement réfléchissant):

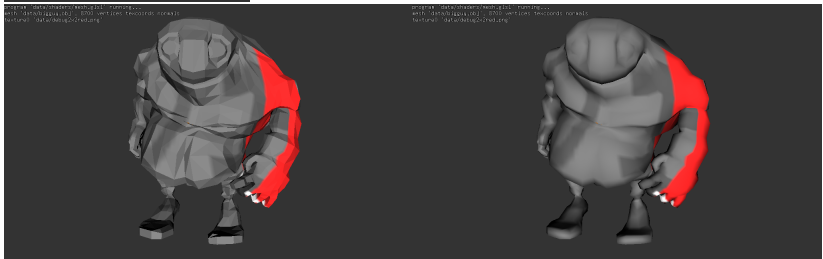


Introduction

modèles empiriques
modèles physiques
shaders
et alors ?

réflexion de Fresnel
réflexion de Lambert
modèle de Brdf
brdf diffuse

exemples :



et alors ?

comment décrire une matière ?

- ▶ comment se réfléchit la lumière sur un objet composé de cette matière ?
- ▶ dépend de la position et de la distance de la lumière,
- ▶ dépend de la position de l'observateur,
- ▶ et de la matière...

et alors ?

plus la source est loin :

- ▶ moins de lumière arrive en chaque point de l'objet
- ▶ la source émet un *flux*, et plus l'objet est loin,
- ▶ moins chaque point reçoit de flux,
- ▶ en fonction du **carré** de la distance ??

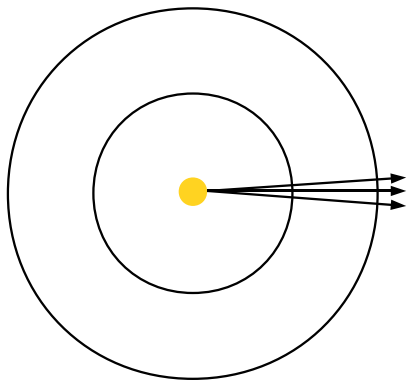
aire d'une sphère de rayon d ...

Introduction

modèles empiriques
modèles physiques
shaders
et alors ?

réflexion de Fresnel
réflexion de Lambert
modèle de Brdf
brdf diffuse

carré de la distance ?



et alors ?

plus la surface est inclinée :

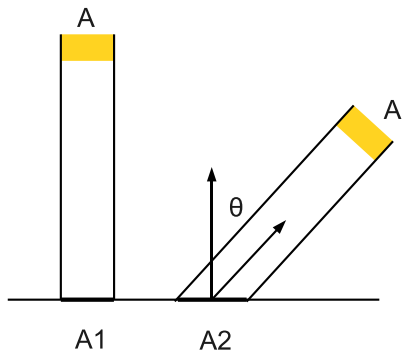
- ▶ moins de lumière arrive en chaque point de l'objet,
- ▶ en fonction du $\cos \theta$ de l'angle entre la normale et la direction de la lumière.

Introduction

modèles empiriques
modèles physiques
shaders
et alors ?

réflexion de Fresnel
réflexion de Lambert
modèle de Brdf
brdf diffuse

cosinus de l'angle ?



lumière incidente...

tout ça pour dire :

- ▶ que la quantité de lumière qui éclaire un point sur un objet,
- ▶ dépend de la distance à la source,
- ▶ et de l'orientation de la surface,
- ▶ une surface orientée vers la source reçoit plus de lumière...

mais on ne sait toujours pas comment la matière réfléchit la lumière reçue...

mais travaux de Lambert (1760) et Fresnel (1820)...

Fresnel

propagation de la lumière :

- ▶ à l'interface entre 2 matières / milieux,
- ▶ réflexion,
- ▶ transmission,

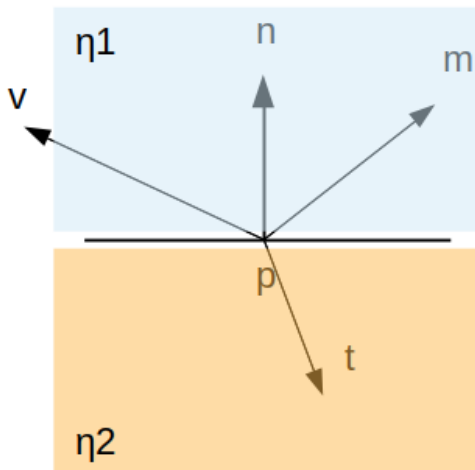
une partie de la lumière est réfléchiée et une autre est transmise de l'autre coté de l'interface...

Introduction

modèles empiriques
modèles physiques
shaders
et alors ?

réflexion de Fresnel
réflexion de Lambert
modèle de Brdf
brdf diffuse

Fresnel



Fresnel

propagation de la lumière :

- ▶ chaque matière / milieu est caractérisé par un coefficient : η_1 et η_2 , (entre l'air et l'intérieur de l'objet),
- ▶ $\eta_{\text{air}} \approx 1$,
- ▶ $\eta_{\text{matière}}$ est mesuré,
- ▶ on peut évaluer $F(\vec{n}, \vec{v})$ avec $\eta = \frac{\eta_1}{\eta_2}$
- ▶ et la transmission $T(\vec{n}, \vec{v}) = 1 - F(\vec{n}, \vec{v})$
- ▶ il faut aussi calculer les directions \vec{m} et \vec{t}

les détails sont dans la [doc gkit](#)

Fresnel

et alors ?

- ▶ les métaux ne se comportent pas de la même manière que les autres, les diélectriques,
- ▶ il n'y a pas vraiment de transmission pour les métaux, (uniquement une réflexion de surface, et le reflet change de couleur)
- ▶ pour les autres, il y a transmission dans la matière, et la lumière ressort diffusée dans toutes les directions...

réflexion de surface / spéculaire,
réflexion diffuse / par la matière...

Fresnel

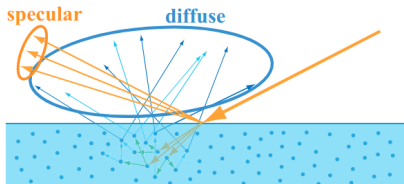


Figure 21: BRDF specular terms are typically used for surface reflection, and BRDF diffuse terms for subsurface scattering. (Image from “Real-Time Rendering, 3rd edition” used with permission from A K Peters.)

réflexion spéculaire : Fresnel

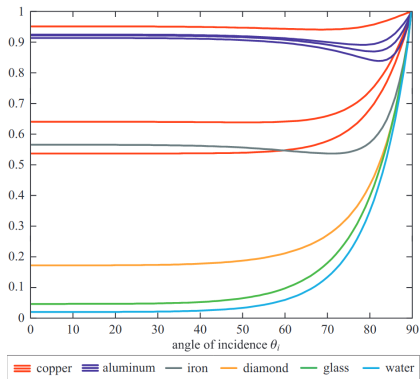


Figure 24: Fresnel reflectance for external reflection from a variety of substances. Since copper and aluminum have significant variation in their reflectance over the visible spectrum, their reflectance is shown as three separate curves for R, G, and B. Copper's R curve is highest, followed by G, and finally B (thus its reddish color). Aluminum's B curve is highest, followed by G, and finally R. (Image from "Real-Time Rendering, 3rd edition" used with permission from A K Peters.)

réflexion spéculaire : Fresnel

reflexion miroir :

- ▶ on peut utiliser la formulation "complète" de $F(\vec{n}, \vec{v})$,
- ▶ ou une approximation plus simple à calculer...

$$F(\vec{n}, \vec{v}) = \frac{1}{2} \left(\frac{g - c}{g + c} \right)^2 \left(1 + \left(\frac{c(g + c) - 1}{c(g - c) + 1} \right)^2 \right)$$

$$\approx F_0 + (1 - F_0)(1 - c)^5$$

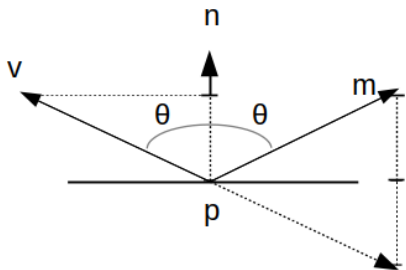
$$\text{avec } c = \cos \theta = \vec{n} \cdot \vec{v}$$

$$g = \eta^2 + c^2 - 1$$

$$F_0 = \left(\frac{\eta - 1}{\eta + 1} \right)^2$$

réflexion spéculaire : et la direction ?

$$\vec{m} = 2(\vec{n} \cdot \vec{v})\vec{n} - \vec{v}$$



réflexion diffuse : Lambert

Lambert :

- ▶ une matière diffuse la même quantité de lumière dans toutes les directions...

brdf ?

et alors ?

- ▶ on peut décrire la matière par une fonction :

$$f_r(p, \vec{n}, \vec{o}, \vec{l})$$

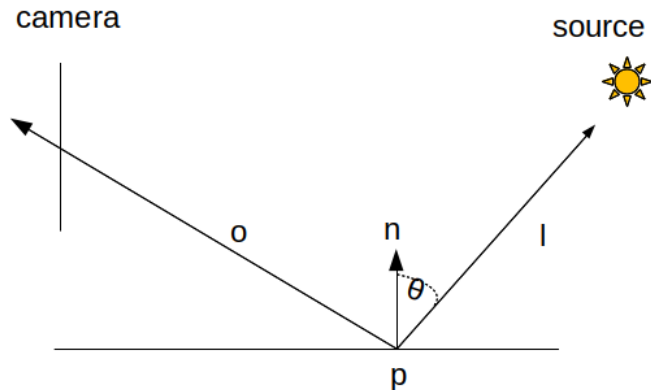
- ▶ *brdf* : fonction de réflexion *bidirectionnelle*... dépend de \vec{o} et \vec{l} ,
- ▶ lumière réfléchi L_r :

$$L_r(p, \vec{o}) = f_r(p, \vec{n}, \vec{o}, \vec{l}) L_i(p, \vec{l}) \cos \theta$$

- ▶ avec L_i la lumière incidente (qui éclaire le point p)

et selon les matières, f_r change... cf Lambert, Fresnel, etc...

notation



$$L_r(p, \vec{o}) = f_r(p, \vec{n}, \vec{o}, \vec{l}) L_i(p, \vec{l}) \cos \theta$$

brdf diffuse

$$f_r(p, \vec{n}, \vec{o}, \vec{l}) = \frac{k}{\pi}$$

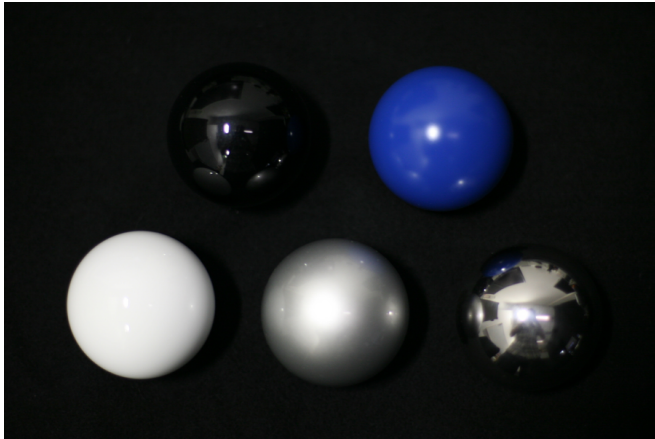
- ▶ avec $0 < k < 1$, une constante (ou une couleur),
- ▶ la matière réfléchit la même quantité de lumière dans toutes les directions...
- ▶ $1/\pi$? la matière ne doit pas renvoyer plus de lumière qu'elle n'en reçoit... cf [doc gkit](#)

modèles empiriques

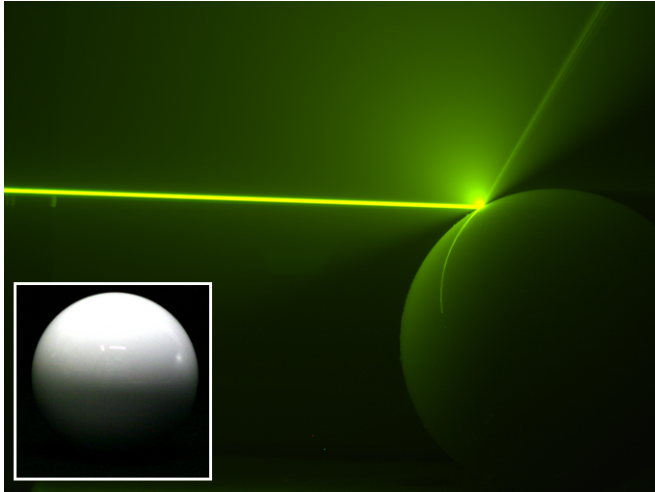
on peut observer :

- ▶ et mesurer la quantité de lumière réfléchie,
- ▶ et proposer un modèle qui reproduit (à peu près) les mesures,
- ▶ modèle de Phong (1975) pour les reflets rugueux,
- ▶ et modèle de Blinn - Phong (1976).

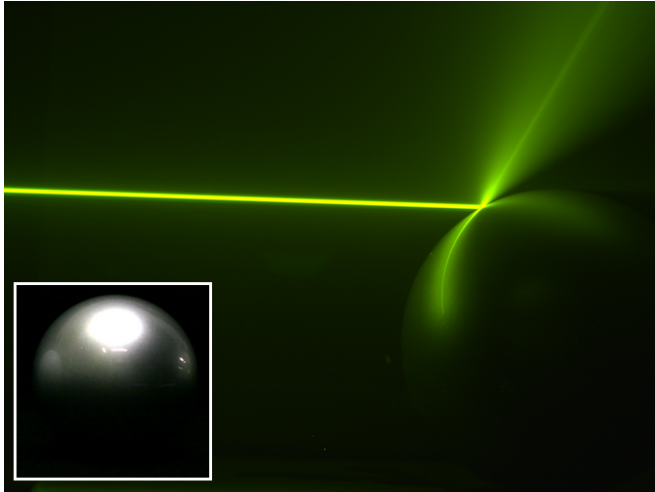
observations



exemple : reflet 1



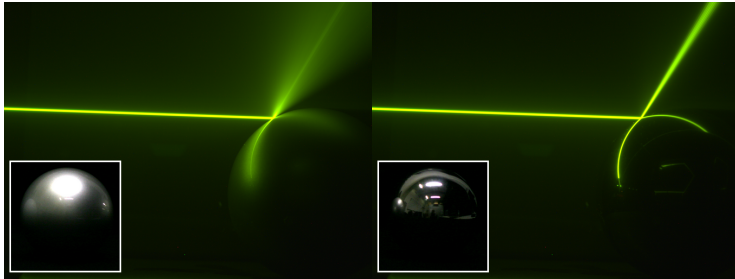
exemple : reflet 2



exemple : reflet 3



reflets sur une surface (plus ou moins) rugueuse



reflets sur une surface (plus ou moins) rugueuse

plusieurs essais :

- ▶ Phong en 1975,
- ▶ Blinn (en 1976) modifie le modèle proposé par Phong,
- ▶ comment concentrer plus ou moins les reflets autour de la direction miroir ?

et avec une fonction facile et rapide à calculer...

reflets sur une surface (plus ou moins) rugueuse

$$f_r(p, \vec{n}, \vec{o}, \vec{l}) = \frac{k + 8}{8\pi} (\cos \theta_h)^k$$

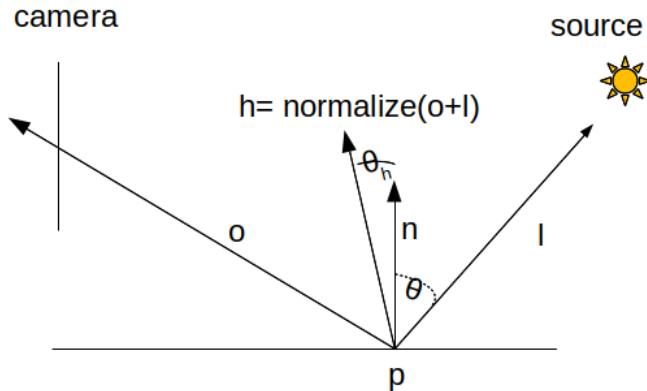
- ▶ avec $0 < k < 4000$, pour contrôler les reflets,
- ▶ $\vec{h} = (\vec{o} + \vec{l}) / \|\vec{o} + \vec{l}\|$
- ▶ et θ_h : angle entre \vec{n} et \vec{h} ,
- ▶ $(k + 8)/(8\pi)$? cf [doc gkit](#)

\vec{h} ?

pourquoi pas la normale ?

- ▶ \vec{h} est le bissecteur de \vec{o} et \vec{l} , pourquoi ?
- ▶ \vec{h} représente la direction pour produire un reflet entre \vec{o} et \vec{l} ...

notation



et sinon ?

on peut aussi regarder les résultats prédits par la physique :

- ▶ par exemple, les équations de Fresnel en 1820...
- ▶ mais ces résultats ne sont pas suffisants, ils ne sont utilisables que sur des interfaces lisses...
- ▶ pour créer des reflets moins concentrés, il va falloir perturber l'interface...
- ▶ cf les micro facettes de **Cook-Torrance** présenté en 1982,
- ▶ (et surtout la version moderne : **Walter** 2007)
- ▶ et le grand nettoyage fait par Disney en 2012 et 2015,
- ▶ "Principled BRDF" / Disney BRDF

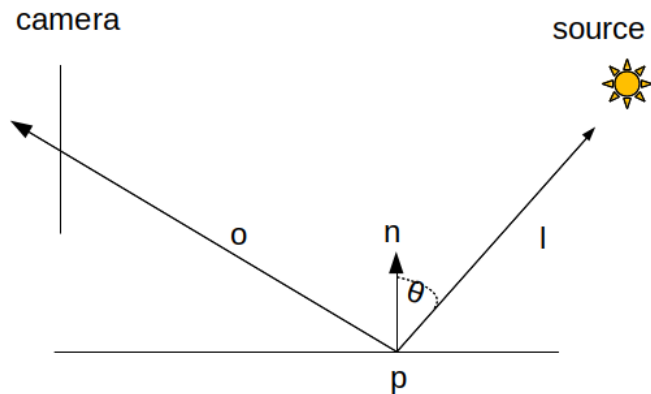
la suite dans la **doc gkit**

et les shaders ?

modèles simples / empiriques et *locaux* :

- ▶ qu'est ce qu'on calcule ?
- ▶ quels paramètres ?
- ▶ les vecteurs, les angles entre les vecteurs ?

rappel



shader : matière diffuse

on doit calculer :

- ▶ $\frac{k}{\pi} L_i(p, \vec{l}) \cos \theta$
- ▶ quels paramètres ?
- ▶ d'ou viennent-ils ?

une relation utile :

$$\cos \theta = \frac{\vec{n} \cdot \vec{l}}{|\vec{n}| |\vec{l}|}$$

ce qui s'écrit directement :

$$\cos \theta = \text{dot}(\text{normalize}(\vec{n}), \text{normalize}(\vec{l}))$$

shader : matière diffuse

donc :

- ▶ connaissant p , \vec{n} , \vec{l} , \vec{o} , et k :
- ▶ $color = \frac{k}{\pi} \times L_i \times dot(\vec{n}, \vec{l})$

mais :

- ▶ k et L_i sont des couleurs...

shader : matière diffuse

et les vecteurs ?

- ▶ direction vers la camera, direction vers la source ?
- ▶ en général on connait : la position de la camera, la position de la source et la position du point...
- ▶ $\vec{o} = \text{normalize}(\text{camera} - p)$
- ▶ $\vec{l} = \text{normalize}(\text{source} - p)$

dans quel repère peut-on faire les calculs ?

dans quel shader connait on les positions et les directions ?

shader : matière diffuse

```
// vertex shader

layout(location= 0) in vec3 position;           // attribut
layout(location= 2) in vec3 normal;           // attribut

uniform mat4 mvpMatrix;
uniform mat4 mvMatrix;

out vec3 vertex_position;                      // sortie
out vec3 vertex_normal;                       // sortie

void main( void )
{
    gl_Position= mvpMatrix * vec4(position, 1.0);

    vertex_position= vec3( mvMatrix * vec4(position, 1.0) );

    vertex_normal= vec3( mvMatrix * vec4(normal, 0) );
    // ou vertex_normal= mat3( mvMatrix ) * normal;
}
```

shader : matière diffuse

```
// fragment shader

const float PI= 3.141592654;

uniform vec3 k;
uniform vec3 emission;

uniform vec3 source;
in vec3 vertex_position;           // entree interpolee
in vec3 vertex_normal;           // entree interpolee
// dans quel repere ?

out vec4 fragment_color;
void main( void )
{
    vec3 l= normalize( source - vertex_position );
    vec3 n= normalize( vertex_normal );
    // pourquoi normaliser n ??

    float cos_theta= dot(n, l);
    vec3 color= k / PI * emission * cos_theta;

    fragment_color= vec4( color, 1.0 );
}
```

shader : matière réfléchissante

au boulot !

- ▶ reprenez la même démarche...
- ▶ relisez calmement la **doc...**

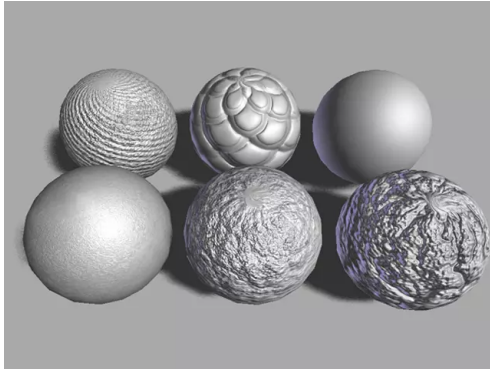
et alors ?

comment décrire une matière ?

- ▶ cf cas simples / idéaux,
- ▶ mais les matières naturelles sont plus complexes :
- ▶ plusieurs couches ?
- ▶ normales détaillées ?
- ▶ transparence ?

exemple : parquet = bois + vernis, cf "coating",
mélange de 2 comportements / couches, pondération par Fresnel...

normales détaillées



cf "Surface Gradient-Based Bump Mapping Framework",
Unity / Mikkelsen 2020

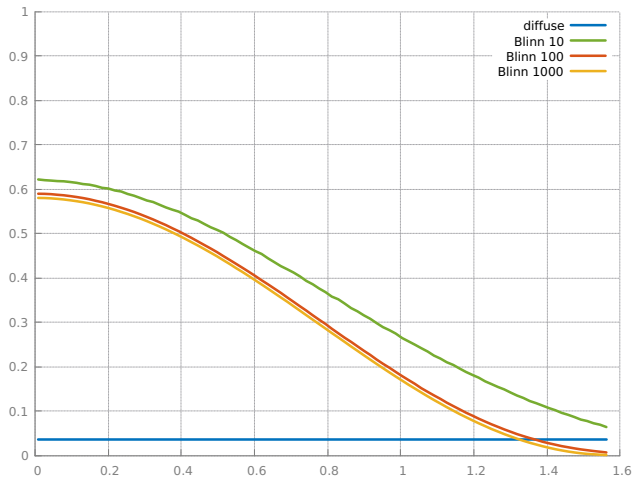
et alors ?

mais dans tous les cas, la fonction $f_r(\vec{\sigma}, \vec{l})$ doit respecter quelques propriétés :

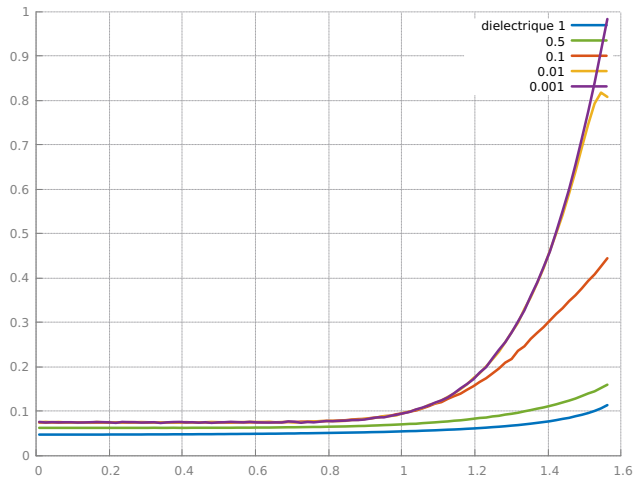
- ▶ positive : $f_r(\vec{\sigma}, \vec{l}) > 0$,
- ▶ réciproque : $f_r(\vec{\sigma}, \vec{l}) = f_r(\vec{l}, \vec{\sigma})$,
- ▶ normalisée : $\int_{\Omega} f_r(\vec{\sigma}, \vec{l}) \cos \theta_l dl \leq 1$

normalisée : cf coeffs magiques dans les comportements de base...

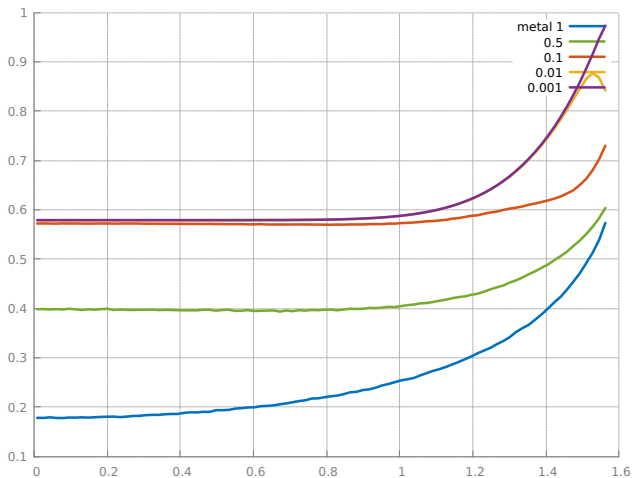
normalisé ? (ou pas ?)



normalisé ? (ou pas ?)



normalisé ? (ou pas ?)



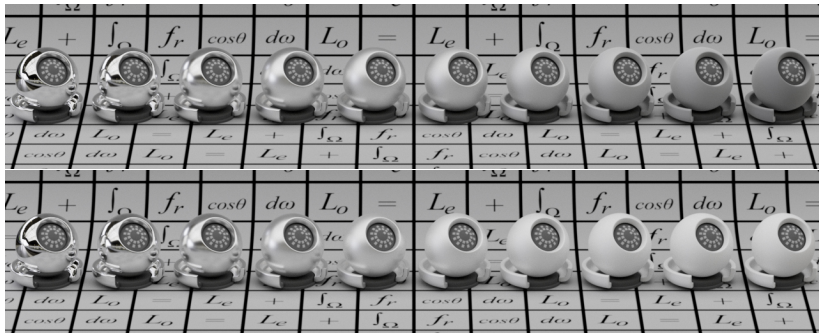
normalisé ? (ou pas ?)

ben ça dépend...

- ▶ les modèles empiriques réfléchissent moins de lumière à incidente rasante...
- ▶ les modèles à micro-facettes réfléchissent moins de lumière lorsqu'ils deviennent rugueux...
- ▶ ce qui ne correspond pas vraiment aux matières réelles,
- ▶ mais ca se corrige...
- ▶ en complétant le modèle, cf [Heitz 2016](#), et [Bitterli 2022](#),
- ▶ ou à la main... cf [Disney 2015](#), [Sony 2017](#)

c'est pas grave...

ben, ça dépend...

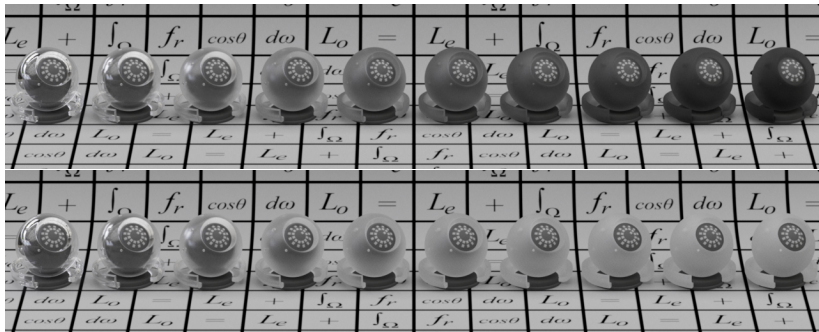


avec, sans correction...

cf [Sony 2017](#)

c'est pas grave...

ben, ça dépend...



avec, sans correction...

cf [Sony 2017](#)

correct ou pas ?

et Fresnel ?

- ▶ les équations de Fresnel utilisées en RGB produisent des résultats... surprenants...
- ▶ quel est le problème ? que peut on faire ?
- ▶ cf [Hoffman 2020](#)
- ▶ et [Belcour 2020](#)

rappel : on devrait faire les calculs par longueur d'onde et intégrer pour déterminer la couleur RGB, mais tout n'est pas toujours linéaire...

correct ou pas ?

oui, mais bon :

- ▶ pour du temps réel, on peut tolérer ces erreurs / grosses approximations ?
- ▶ ben, ça dépend, cf **ILM Stagecraft**, utilisé pour filmer directement Rogue One, **ILM 2017**