

M2-Images

Lumière, matières et couleurs

J.C. Iehl

September 26, 2018

Résumé des épisodes précédents

dessiner ...

- ▶ transformations, projection,
- ▶ dessiner une primitive plane,
- ▶ visibilité : dessiner plusieurs primitives, plusieurs objets,
- ▶ + déterminer la couleur de chaque pixel.

de quoi on parle ?

de la propagation de la lumière :

- ▶ propagation directe : les objets reçoivent de la lumière directement depuis les sources de lumières : ombres + pénombres,
- ▶ propagation indirecte : tous les objets réfléchissent la lumière qu'ils reçoivent ... donc tous les objets reçoivent de la lumière des autres objets.

de l'aspect des objets :

- ▶ mat, diffus, lambert,
- ▶ réfléchissant, phong, glossy,
- ▶ spéculaire : miroir, transparent.

et alors ?

propagation indirecte :

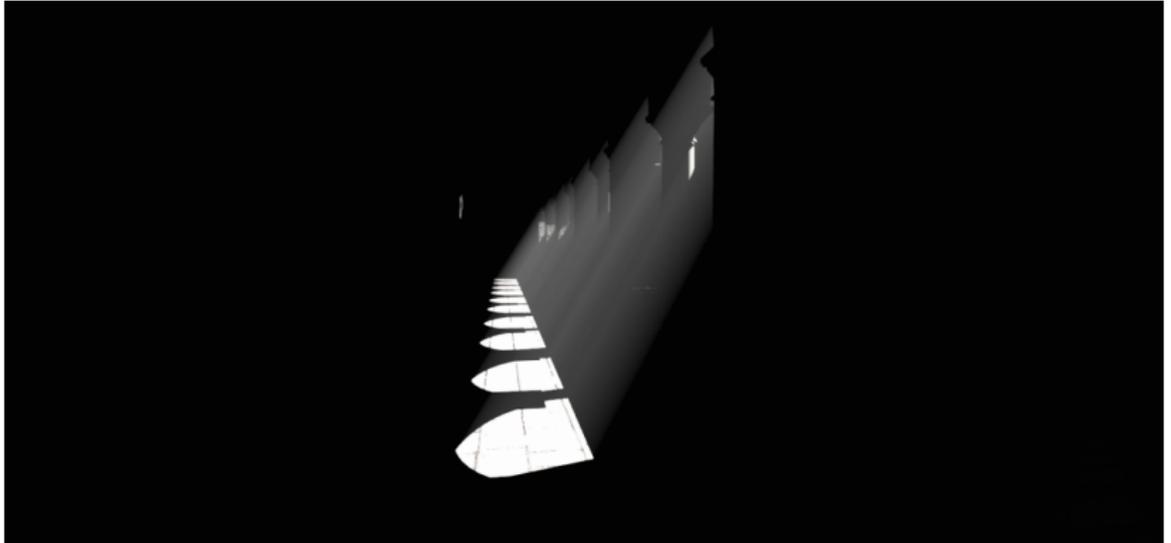
les objets réfléchissent la lumière qu'ils reçoivent.

l'aspect des objets modifie la propagation de la lumière :

on parle plutôt de la matière des objets.

et d'interaction lumière / matière.

exemple : éclairage direct



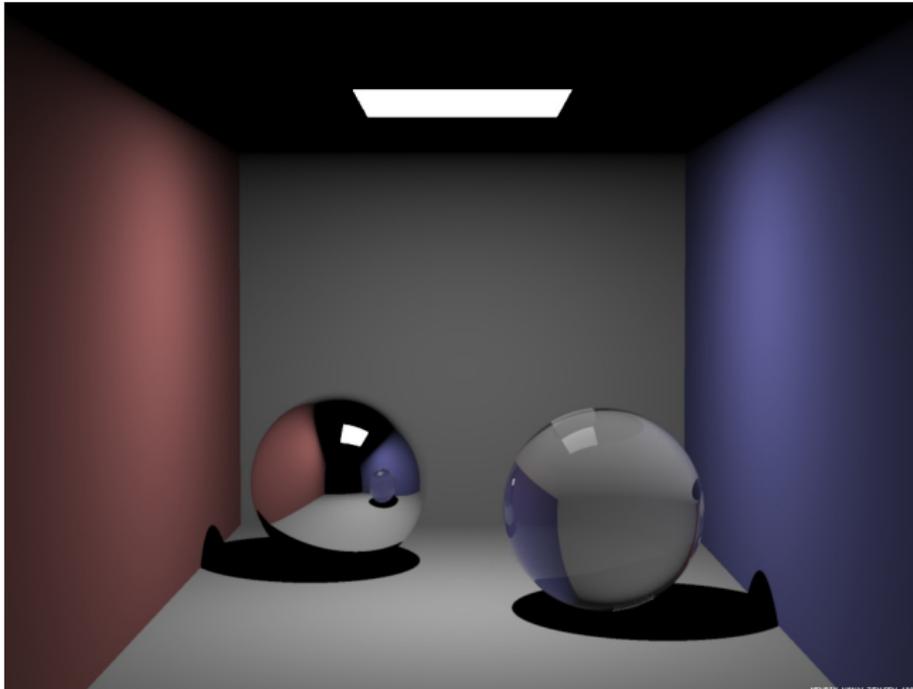
exemple : éclairage direct + indirect



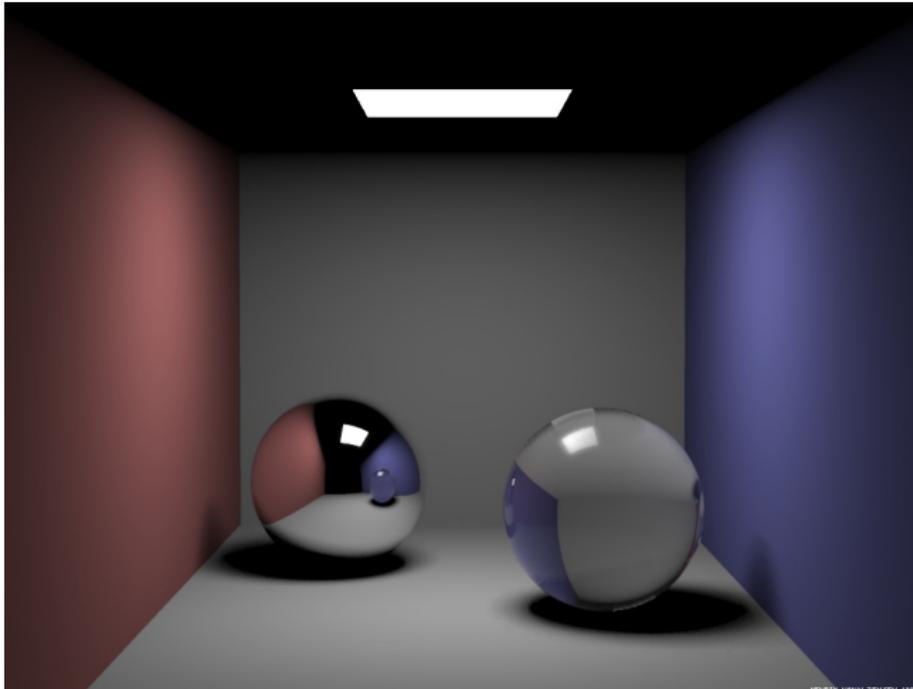
exemple : éclairage direct + indirect + détails



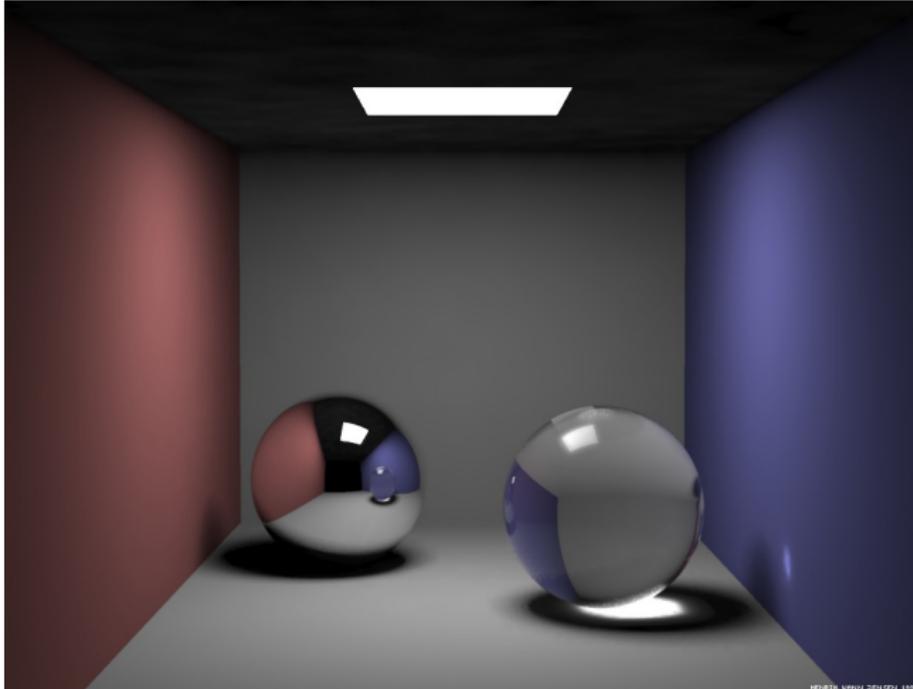
exemple : influence de la source de lumière



exemple : influence de la source de lumière



exemple : éclairage indirect + caustique



Objectif : couleur, lumière et matières

déterminer la couleur de chaque pixel de l'image :

- ▶ la couleur d'un pixel doit représenter l'aspect de l'objet visible à travers le pixel ?
- ▶ quelques notions pour décrire l'interaction de la lumière et d'une matière,
- ▶ et déterminer une couleur.

Domaine visible et couleurs

la couleur est la perception de l' "*énergie visible*" :

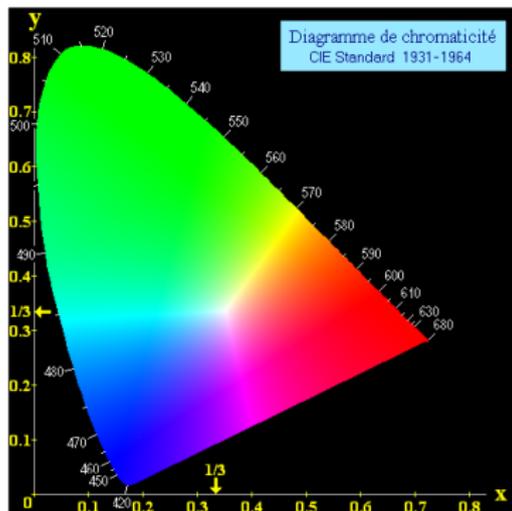


- ▶ *énergie* ? associée à une onde électromagnétique,
- ▶ *énergie visible* ? associée à l'ensemble d'ondes perçues par le système visuel,
- ▶ *domaine visible* ? ensemble d'ondes perçues.

Domaine visible et couleurs

onde électromagnétique :

- ▶ identifiée par une *longueur d'onde*, ou une *fréquence*,
- ▶ correspond à une *teinte* ou une "couleur pure".

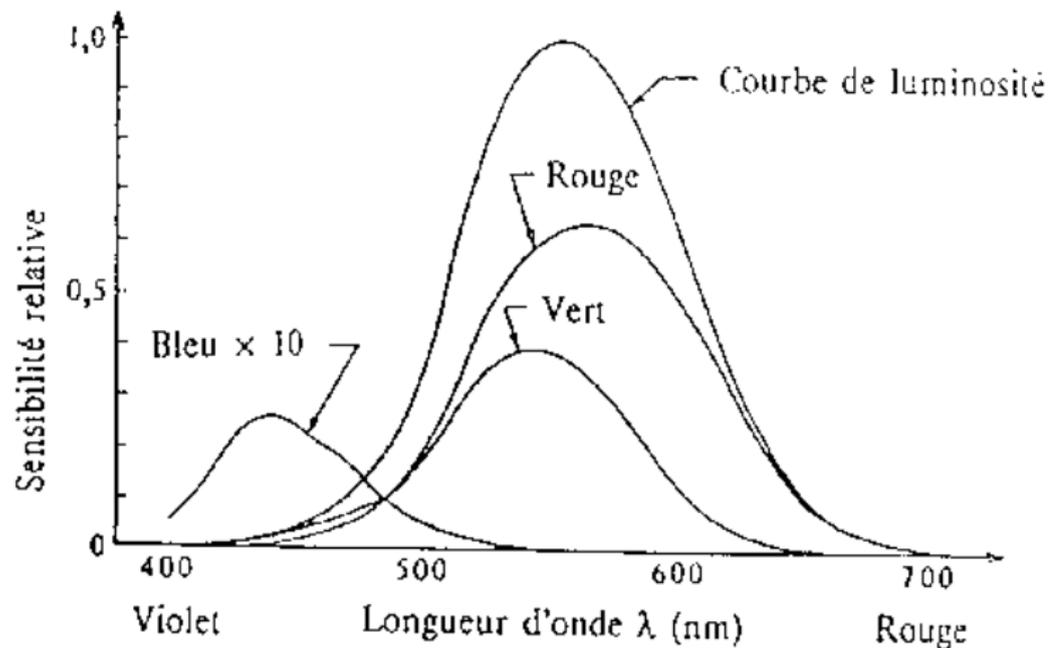


Energie réfléchie et couleur

la couleur d'un objet :

- ▶ est la perception des énergies réfléchies par l'objet vers l'observateur,
- ▶ déterminer la quantité d'énergie réfléchie par l'objet, pour chaque longueur d'onde,
- ▶ déterminer la couleur associée à ce mélange :
- ▶ déterminer la couleur "pure" (la *teinte*) associée à chaque longueur d'onde,
- ▶ déterminer la couleur du mélange.

Sensibilité spectrale



Energie réfléchié et couleur

en pratique :

- ▶ on représente la distribution d'énergie sur le domaine visible par 3 valeurs moyennes,
- ▶ correspondant à notre perception : rouge, vert, bleu.

mais c'est une approximation assez grossière . . .

Radiométrie

plusieurs grandeurs physiques pour mesurer une quantité d'énergie :

- ▶ le flux, noté Φ , unité J/s ou W ,
- ▶ l'éclairement, noté E , unité W/m^2 ,
- ▶ l'intensité, noté I , unité W/sr ,
- ▶ la luminance, noté L , unité $W/m^2/sr$

Radiométrie : Flux

définition :

Φ , quantité d'énergie traversant une surface / région par unité de temps.

unité :

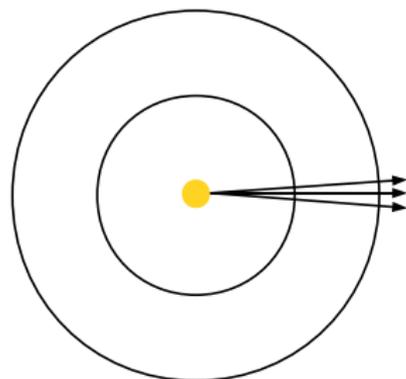
W, Watt.

utilisé pour décrire la puissance d'une source de lumière (en Watt).

Radiométrie : Flux

remarque :

le flux mesure la quantité d'énergie émise, plus on s'éloigne d'une source de lumière, plus le flux "local" diminue, (le flux émis est constant).



Radiométrie : Eclaircement

définition :

$E = \frac{d\Phi}{dA}$, densité de flux par unité d'aire.

unité :

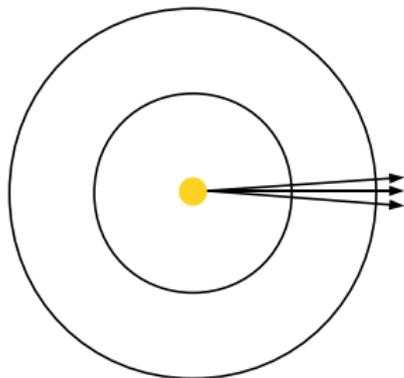
W/m^2 , Watt par mètre carré.

Radiométrie : Eclairage

exemple :

aire d'une sphère de rayon $r = 4\pi r^2$,

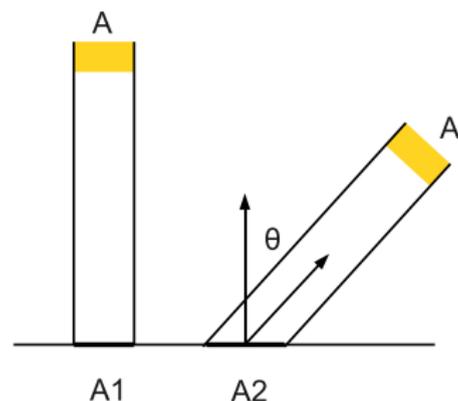
$$E = \frac{\Phi}{4\pi r^2}$$



Radiométrie : Eclaircement

exemple :

2 surfaces orientées différemment n'ont pas le même éclaircement.



$$E_1 = \frac{\Phi}{A_1} \text{ avec } A_1 = A, \text{ donc } E_1 = \frac{\Phi}{A}$$
$$E_2 = \frac{\Phi}{A_2} \text{ avec } A_2 = A / \cos \theta, \text{ donc } E_2 = \frac{\Phi \cos \theta}{A} = E_1 \cos \theta$$

Radiométrie : Intensité

définition :

$I = \frac{d\Phi}{d\omega}$, densité de flux par unité d'angle solide.

unité :

W/sr , Watt par stéradian.

Angle solide

angle solide :

- ▶ équivalent 3d d'un angle 2d, projection d'un objet sur une sphère unitaire,
- ▶ ensemble de directions sur la sphère (noté $d\omega$),
- ▶ unité : le stéradian, $\Omega = \frac{A}{r^2}$, soit 4π stéradians sur la sphère.

rappel : angle

- ▶ projection d'un objet sur un cercle unitaire,
- ▶ ensemble de points sur le cercle,
- ▶ unité : le radian, $\theta = \frac{l}{r}$, soit 2π radians sur le cercle.

Radiométrie : Luminance

définition :

$L = \frac{dI}{dA} = \frac{dE}{d\omega} = \frac{d^2\Phi}{d\omega dA \cos\theta}$, densité de flux par unité d'aire, par unité d'angle solide.

unité :

$W/m^2/sr$, Watt par mètre carré, par stéradian.

Radiométrie : Luminance

remarques :

- ▶ la luminance est constante le long d'un rayon (dans le vide),
- ▶ les autres quantités peuvent être calculées en intégrant la luminance, par direction et/ou par aire.

exemple :

$$E(p) = \int_{\vec{\omega} \in \Omega} L_i(p, \vec{\omega}) \cos \theta d\omega$$

Radiométrie : Remarques

source ponctuelle :

on ne peut pas déterminer la luminance au point p émise par une source ponctuelle.

- ▶ pas d'angle solide associé.

source "simple" :

une "petite" sphère (cf. ampoule).

Objectif : un peu de lumière

selon son orientation, une surface reçoit plus ou moins de lumière :

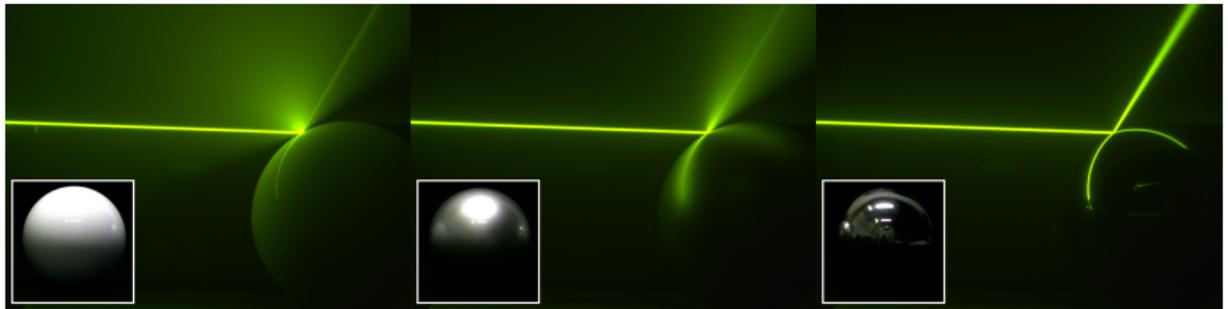
$$L_{\text{incidente}}(p) = L_{\text{emise}}(\vec{q}\vec{p}) \cos \theta$$

- ▶ $L_{\text{emise}}(\vec{q}\vec{p})$: énergie émise par q à la surface de la source de lumière vers p ,
- ▶ \vec{n}_p : normale de la surface au point p ,
- ▶ $\cos \theta = \max(0, \vec{p}\vec{q} \cdot \vec{n}_p)$, θ est angle entre $\vec{p}\vec{q}$ et \vec{n}_p .

selon sa matière et son orientation, une surface réfléchit plus ou moins de lumière vers l'observateur : notation $f_r(\vec{p}\vec{q}, p, \vec{o})$.

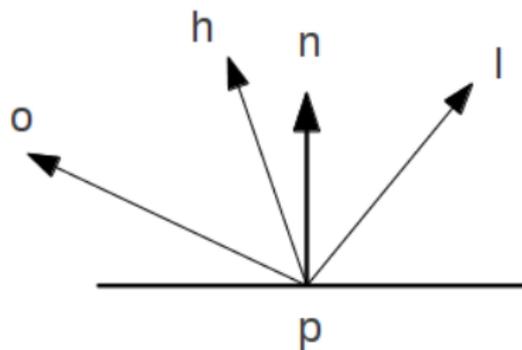
Objectif: un peu de lumière

selon sa matière, une surface réfléchit la lumière reçue différemment :



Direct Visualization of Real-World Light Transport

Objectif: un peu de lumière



vecteurs unitaires (de longueur 1)...

Objectif : un peu de lumière réfléchi

description de la matière, BRDF :
rapport de l'énergie incidente sur l'énergie réfléchi

- ▶ aspect mat / diffus : $f_r(\vec{l}, \rho, \vec{o}) = \frac{0 < \text{constante} < 1}{\pi}$,

l'énergie est réfléchi dans toutes les directions,

- ▶ aspect réfléchissant: $f_r(\vec{l}, \rho, \vec{o}) = \frac{m+8}{8\pi} \cos^m \theta_h$,

l'énergie est réfléchi autour d'une direction particulière,

avec $\vec{h} = \frac{1}{2}(\vec{l} + \vec{o})$ et θ_h l'angle entre \vec{n}_p et \vec{h} ,

$\cos \theta_h = \max(0, \vec{h} \cdot \vec{n}_p)$

à lire: "[Background: Physics and Math of Shading](#)"

N. Hoffman, siggraph 2015 course notes.

notions de BRDF

coeffs magiques ?

- ▶ une brdf doit respecter quelques propriétés pour décrire une matière :
- ▶ par exemple, conserver l'énergie,
- ▶ plus le reflet est concentré, plus il doit être intense, la même quantité de lumière est réfléchi sur moins de directions...
- ▶ sommer l'énergie réfléchi dans toutes les directions :

$$\int f_r(\vec{l}, \rho, \vec{o}) \cos \theta dl \leq 1$$

exemple

cas diffus :

- ▶ $f_r(\vec{l}, \rho, \vec{o}) = \frac{0 < k < 1}{\pi}$
- ▶ pourquoi $\frac{1}{\pi}$?
- ▶ vérification : $\int k \cos \theta dl = k\pi \neq 1$

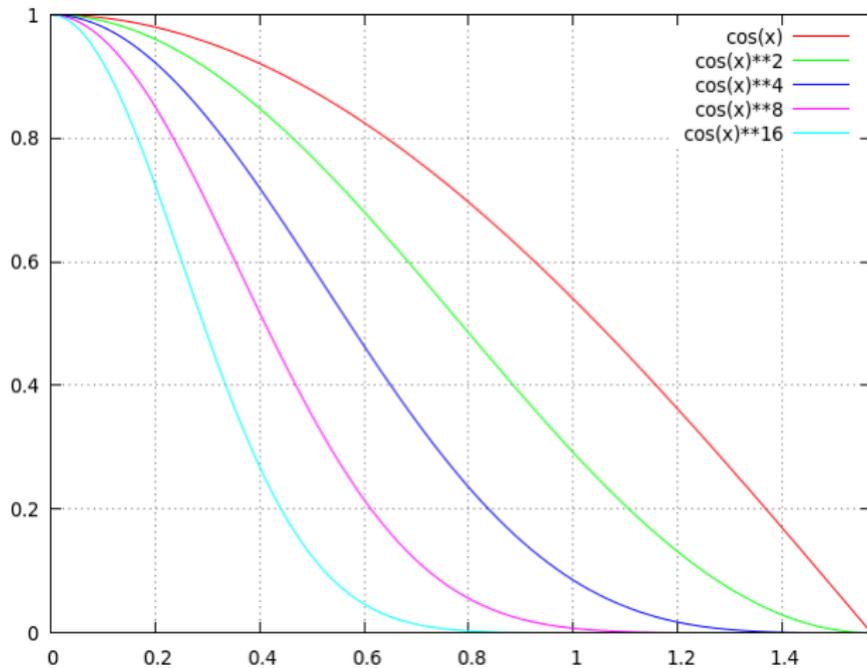
exemple

cas réfléchissant :

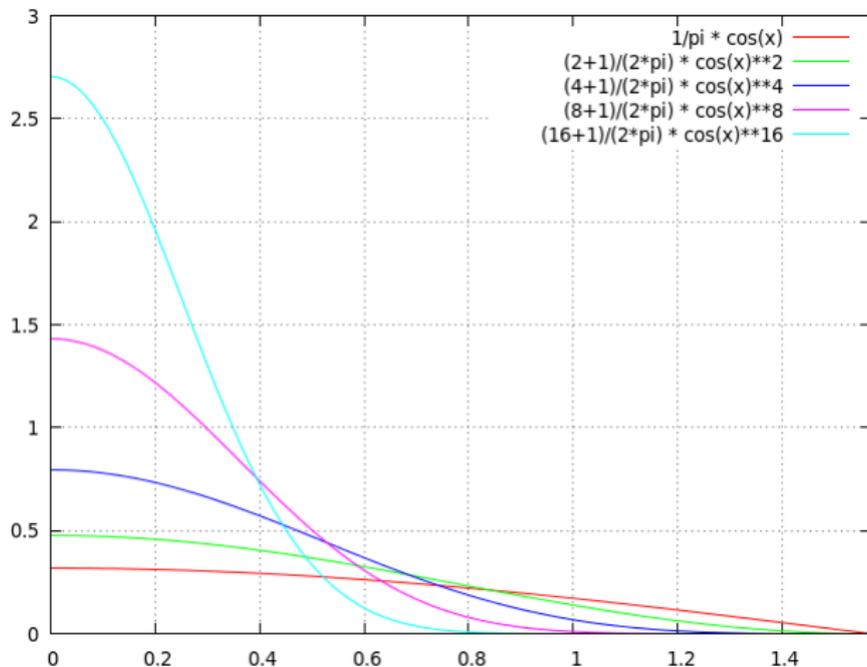
- ▶ $f_r(\vec{l}, \rho, \vec{o}) = \frac{m+1}{2\pi} \cos^m \theta_h$
- ▶ pourquoi $\frac{m+1}{2\pi}$?
- ▶ vérification 1 : $\int \cos^m \theta_h dh = \frac{2\pi}{m+1} \neq 1$
- ▶ mais la conservation d'énergie s'écrit :
 $\int f_r(\vec{l}, \rho, \vec{o}) \cos \theta dl \leq 1$
- ▶ vérification 2 : $\int \cos^m \theta_h \cos \theta dl < \frac{8\pi}{m+8} \neq 1 =?$
cf **dérivation par F. Giesen**

plus l'exposant augmente plus le reflet est concentré...

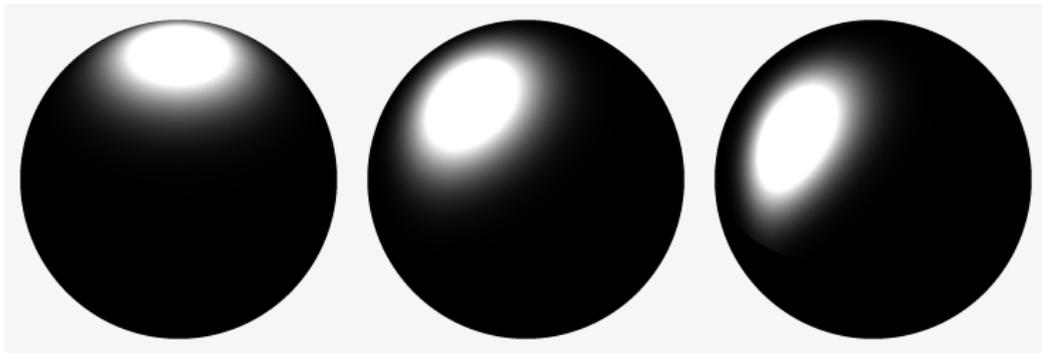
exemple



exemple

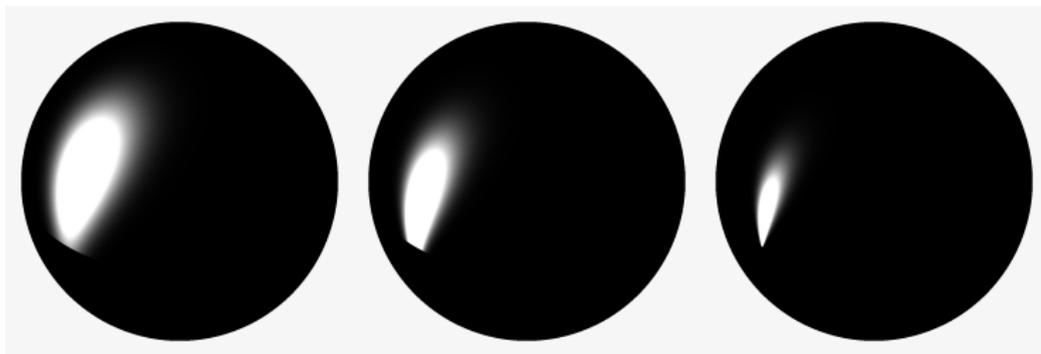


coeffs magiques ?



incidence 0° , 30° , 45°

coeffs magiques ?

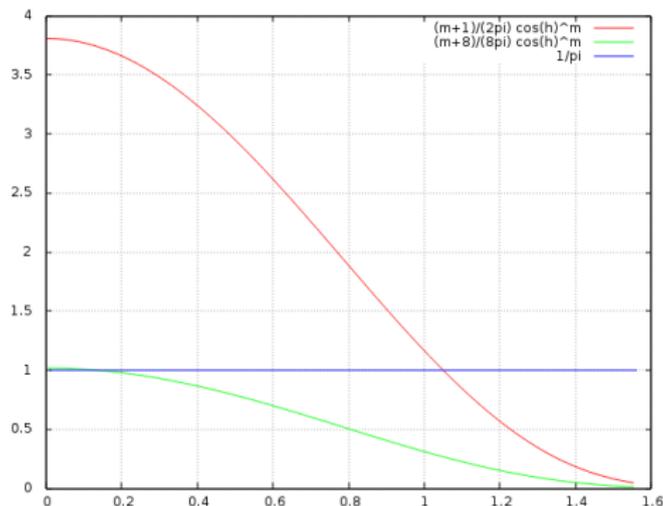


incidence 60° , 75° , 89°

coeffs magiques ?

vérification :

- ▶ pour chaque incidence, total de l'énergie réfléchié,
- ▶ si > 1 , le modèle n'est pas correct...



bilan

cas diffus :

$$\blacktriangleright f_r(\vec{l}, \rho, \vec{o}) = \frac{1}{\pi}$$

cas réfléchissant :

$$\blacktriangleright f_r(\vec{l}, \rho, \vec{o}) = \frac{m+8}{8\pi} \cos^m \theta_h$$

cas mixte :

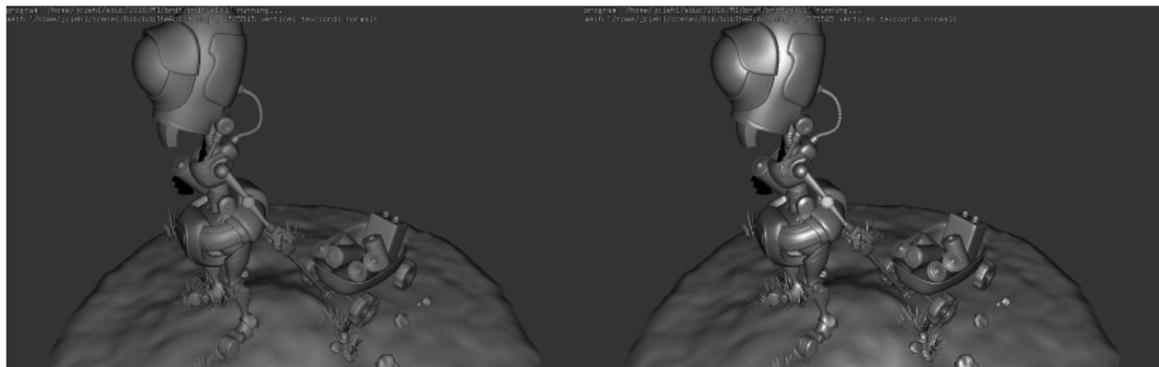
$$\blacktriangleright f_r(\vec{l}, \rho, \vec{o}) = \frac{k}{\pi} + (1 - k) \frac{m+8}{8\pi} \cos^m \theta_h \text{ avec } 0 < k < 1.$$

exemple



à gauche : sans normalisation, à droite : avec

exemple



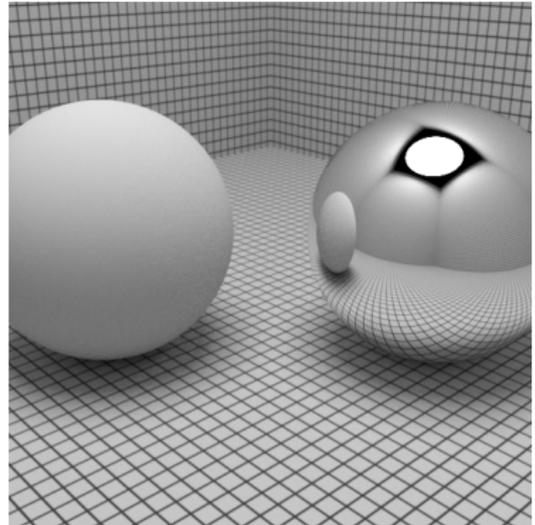
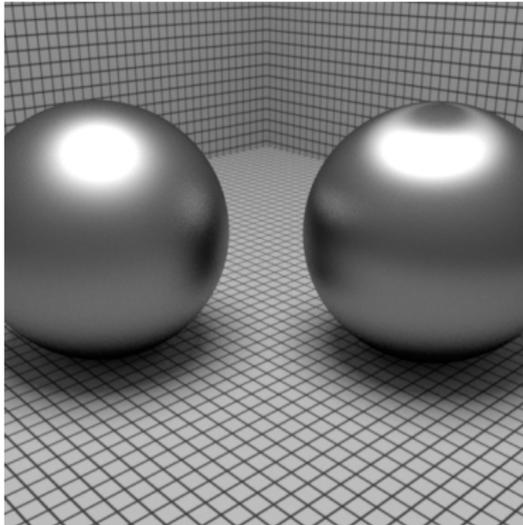
à gauche : sans normalisation, à droite : avec
difficile de mélanger plusieurs comportements s'ils ne sont pas normalisés

Objectif : un peu de lumière

énergie réfléchiée vers l'observateur :

- ▶ $L_{reflechie}(p, \vec{o}) = L_{incidente}(p, \vec{l}) f_r(\vec{l}, p, \vec{o}) \cos \theta$
- ▶ $L_{incidente}(p, \vec{l}) = L_{emise}(q, -\vec{l})$
avec q appartenant à une source de lumière.

Exemples :



Objectif : un peu de lumière

quelle couleur pour une matière $f_r(\vec{l}, \rho, \vec{o})$ et une source de lumière $L_e(\vec{v})$?

En pratique :

- ▶ une source ponctuelle : q ,
- ▶ sa quantité d'énergie émise L_e , un triplet (r, g, b) ,
- ▶ un point p , sa normale \vec{n}_p ,
- ▶ et sa matière : $f_r(\vec{l}, p, \vec{o})$.

calculer la couleur du pixel sur lequel se projette p .

En pratique :

comment décrire la "couleur" d'une matière ?

encore une approximation :

on utilise la couleur de l'énergie réfléchiée par la matière lorsqu'elle est éclairée par une source "blanche" !

la matière est décrite par un triplet : $(r, g, b) \cdot f_r(\vec{l}, p, \vec{o})$

Objectif : un peu d'ombre

comment déterminer qu'un point est éclairé par une source de lumière ?

idée :

"tester" la visibilité du point et (d'un point à la surface) de la source.

- ▶ si un autre objet masque la source, le point est à l'ombre,
- ▶ sinon, le point est éclairé, il reçoit la lumière émise par la source.

s'il y a un autre objet sur la droite entre le point et la source, le point ne reçoit pas de lumière.

Objectif : ombres

$$L_{reflechie}(p, \vec{o}) = L_{emise}(q, -\vec{l})V(p, q)f_r(\vec{l}, p, \vec{o}) \cos \theta$$

avec $V(p, q)$:

= 1 si p et q sont visibles,

= 0 sinon.

shadow maps, pipeline gpu / renderman :

- ▶ trouver un test équivalent basé sur la distance...

lancer de rayons :

- ▶ générer un nouveau rayon pour tester la visibilité entre p et q .

Objectif : ombres

sachant que :

- ▶ un point est éclairé si la source de lumière est visible,
- ▶ == un point est éclairé s'il est le plus proche de la source dans la direction \vec{l} ,

comment trouver la distance des autres objets pour la direction \vec{l} ?

shadow maps, détails :

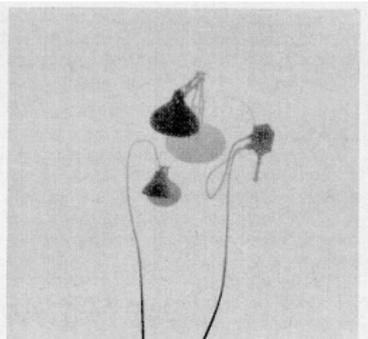
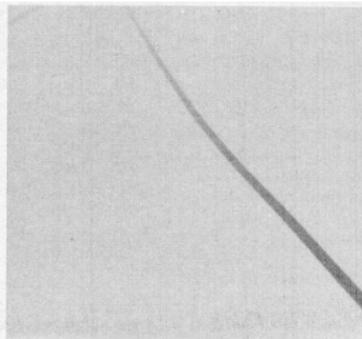
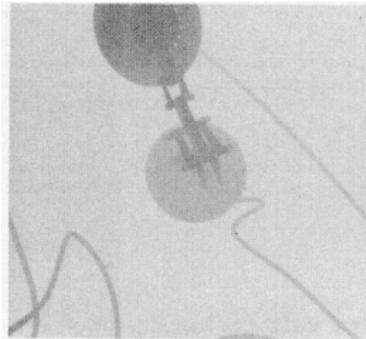
- ▶ "Rendering antialiased shadows with depth maps"
B. Reeves, D. Salesin, R.L. Cook, 1987
- ▶ "Casting curved shadows on curved surfaces"
L. Williams, 1978

Objectif : ombres

dessiner les objets :

- ▶ du point de vue de la source ...
- ▶ puis, comparer la profondeur de chaque pixel sur la direction \vec{l} , pendant le dessin depuis l'observateur.

Exemple : dessiner depuis la source



Objectif : ombres

en 2 étapes :

- ▶ 1. dessiner depuis la source, conserver le z-buffer,
- ▶ 2. dessiner depuis l'observateur, transformer chaque point dans le repère *Fenêtre* attaché à la source,
- ▶ comparer la profondeur du point avec le z-buffer de la source,
- ▶ si la profondeur est plus petite que la valeur dans le z-buffer de la source :
- ▶ le point est visible de la source, il reçoit la lumière émise par la source,
- ▶ sinon, il est à l'ombre de la source.

Objectif : ombres

quelques détails à régler :

- ▶ identifier l'ensemble d'objets projetant une ombre visible,
- ▶ déterminer les paramètres pour dessiner du point de vue de source,
- ▶ choisir une résolution pour le z-buffer ?
- ▶ filtrer les résultats des tests sur la profondeur ?