

# M2-Images

## Matières

J.C. Iehl

November 8, 2010

## Résumé des épisodes précédents

introduction aux éléments de base du lancer de rayons :

- ▶ modèles d'objets,
- ▶ transformations,
- ▶ intersections rayon / objet,
- ▶ accélération des calculs d'intersections,
- ▶ notions de sources de lumières,
- ▶ notions d'énergie, de couleur, et de matières,
- ▶ intégration numérique et méthode de Monte Carlo.

et alors ?

# Lancer de rayon

ne pas confondre :

- ▶ l'algorithme de calcul d'intersections : déterminer la visibilité de 2 points,
- ▶ l'algorithme de calcul d'images (qui utilise le calcul de visibilité).

## La suite ...

précisions :

- ▶ matière,
- ▶ interaction énergie / matière,
- ▶ transport d'énergie (entre 2 points).

# Description de matières

forme générale BSSRDF :

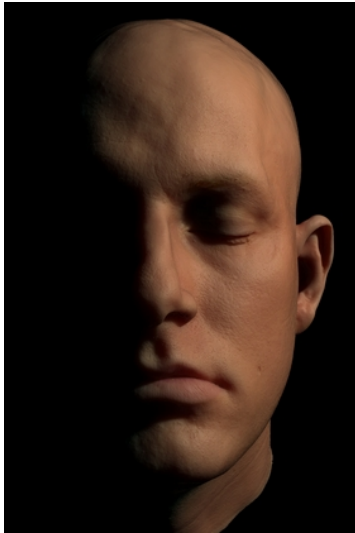
$$f_r(\vec{\omega}, \rho, \lambda \rightarrow \vec{\omega}_r, \rho_r, \lambda_r)$$

mais, en général, on utilise la forme simplifiée, la BRDF :

$$f_{r(R,G,B)}(\rho, \vec{\omega} \rightarrow \vec{\omega}_r)$$

pas de polarisation, d'interférences, de fluorescence, l'énergie est réfléchi au point d'incidence.

# Description de matières :



## Description de matières :



pas de matières semi-transparentes, composées de plusieurs couches ...

# Description de matières

plusieurs types de descriptions :

- ▶ basées sur la physique,
- ▶ basées sur l'optique géométrique,
- ▶ basées sur des mesures de matières réelles,
- ▶ empiriques, basées sur les phénomènes observés (cf. notions de matières).

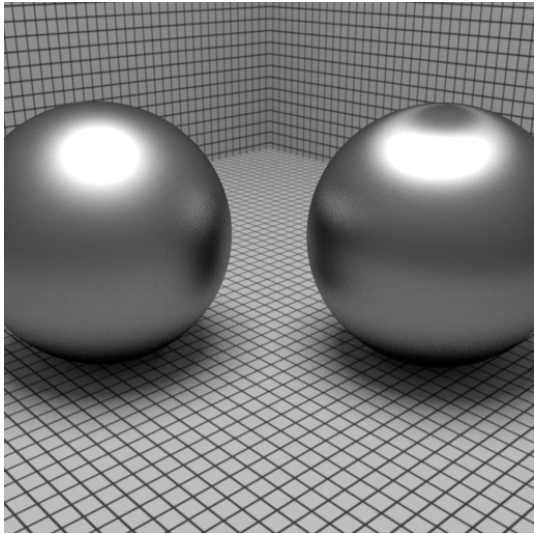


# Modèles empiriques

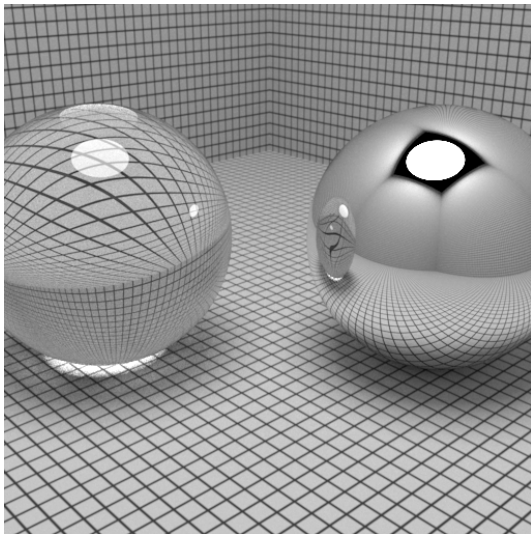
basés sur des phénomènes observés :

- ▶ présence / absence d'un reflet,
- ▶ forme (symétrique ou non) du reflet,
- ▶ position et aspect du reflet ("net" ou "flou"),
- ▶ couleur du reflet,
- ▶ matière opaque ou transparente,
- ▶ ...

# Exemples



# Exemples



# Modèles empiriques

matière = surface optique + volume intérieur :

- ▶ la surface disperse la lumière mais ne l'absorbe pas,
- ▶ elle est réfléchiée et / ou transmise vers l'intérieur,
- ▶ l'intérieur absorbe, transmet et réfléchit la lumière.

en général :

la surface à un comportement spéculaire et l'intérieur est considéré diffus.

# Comportement mat / diffus

$$f_{r(R,G,B)}(p, \vec{\omega} \rightarrow \vec{\omega}_r) = \left(0 < \frac{1}{\pi} \text{constante}_{(R,G,B)} < 1\right)$$

# Comportement spéculaire

équations de Fresnel :

- ▶ une partie de l'énergie est réfléchi par la surface optique,
- ▶ le reste est réfracté (transmis de l'autre coté) vers l'intérieur,
- ▶ la quantité d'énergie réfléchi dépend de l'angle d'incidence  $\theta_I$ .

les coefficients de Fresnel sont connus pour beaucoup de matériaux à incidence normale ( $\theta = 0^\circ$ ).

interpolation pour les autres angles, la quantité d'énergie réfléchi tend vers 1 à incidence rasante ( $\theta = 90^\circ$ )

# Comportement spéculaire

$$f_r(R,G,B)(p, \vec{\omega} \rightarrow \vec{\omega}_r) = R_{Fresnel}(\theta)$$

et

$$R_{Fresnel}(\theta) = R_{Fresnel}(0^\circ) + (1 - R_{Fresnel}(0^\circ))(1 - \cos \theta)^5$$

avec  $R_{Fresnel}(0^\circ) =$  valeur mesurée.

remarque :

pour les matières transparentes, on connaît souvent l'indice de réfraction  $n$  :

$$R_{Fresnel}(0^\circ) = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2$$

# Matières opaques

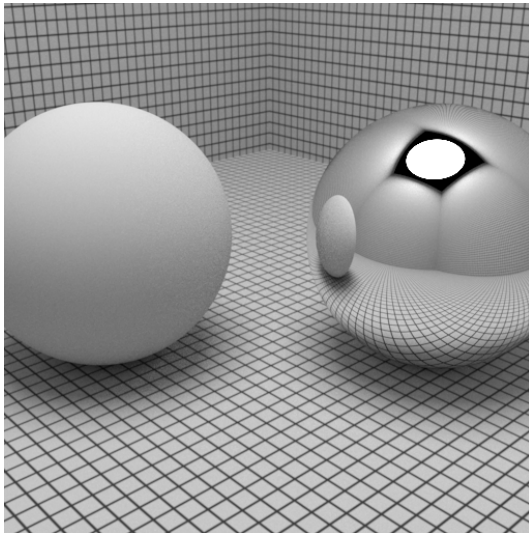
en utilisant ces 2 comportements :

- ▶ aspect purement diffus / mat,
- ▶ aspect purement spéculaire (miroir, reflet "net"),
- ▶ aspect "verni", plastique, ...

comment représenter un aspect réfléchissant (reflet "flou") ?



# Exemples :



# Comportement réfléchissant (reflet "flou")

pourquoi ?

- ▶ les matières présentant un reflet "flou" ne sont pas polies / lisses : leurs surfaces sont rugueuses,
- ▶ comment représenter ce type de surfaces ?

2 modèles :

- ▶ un, complètement empirique,
- ▶ l'autre, basé sur un ensemble de micro-facettes orientées et spéculaires.

micro-géométrie / micro-facettes : perturbations de la surface non observables.

# Comportement réfléchissant : modèle de Blinn-Phong

$$f_{r(R,G,B)}(p, \vec{\omega} \rightarrow \vec{\omega}_r) = \frac{m+2}{2\pi} \cos^m \theta_h$$

avec  $\theta_h$  l'angle entre  $\vec{n}_p$  et  $\vec{h} = \frac{1}{2}(\vec{\omega} + \vec{\omega}_r)$ .

pourquoi  $\vec{h}$  ?

si  $\theta_h = 0$ ,  $\vec{n}$  et  $\vec{h}$  sont confondus et  $\vec{\omega}_r$  est la direction miroir de  $\vec{\omega}$ , l'observateur est dans le reflet.

ou :  $\vec{h}$  est la direction que devrait avoir la normale pour que l'observateur soit dans le reflet.

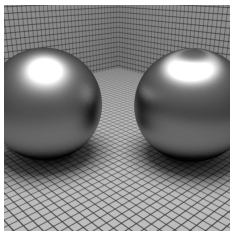
# Comportement réfléchissant : modèle de Blinn-Phong

autre interprétation :

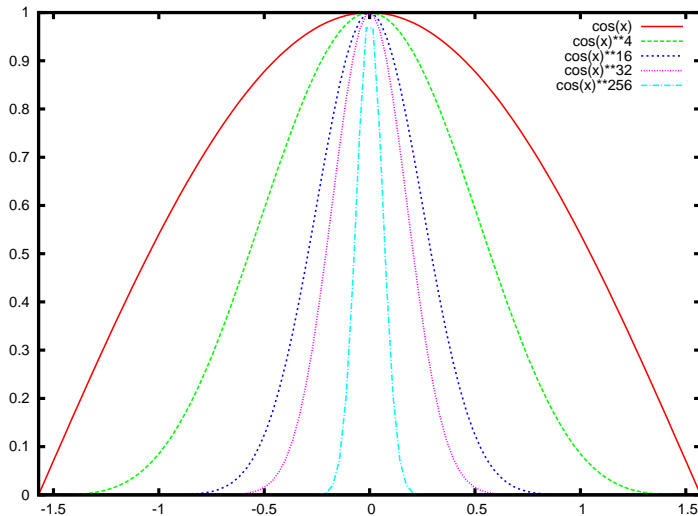
- ▶  $\cos^m \theta_h$  représente la quantité de micro-facettes correctement orientées, pour créer un reflet dans la direction  $\vec{\omega}_r$ .
- ▶  $m$  décrit la "taille" du reflet.

mais :

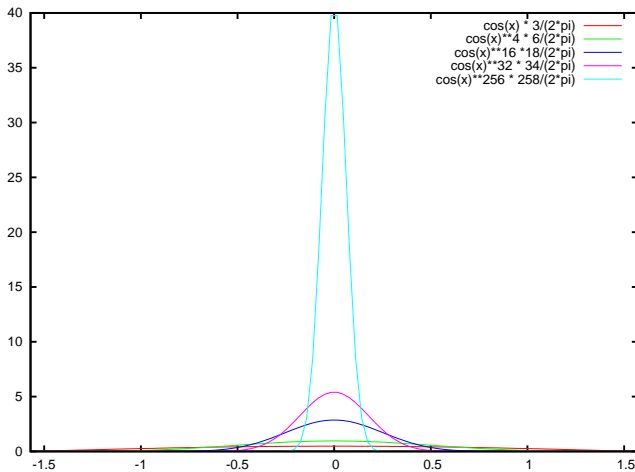
le reflet est toujours symétrique (isotrope).



# Exemple : $\cos^m(\theta)$



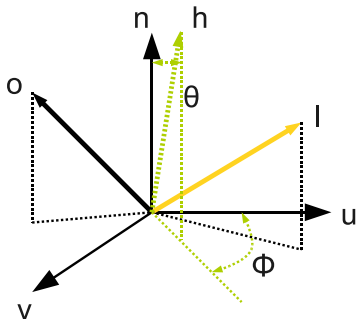
Exemple :  $\frac{m+2}{2\pi} \cos^m(\theta)$



# Comportement réfléchissant : modèle anisotrope

comment "déformer" le reflet ?

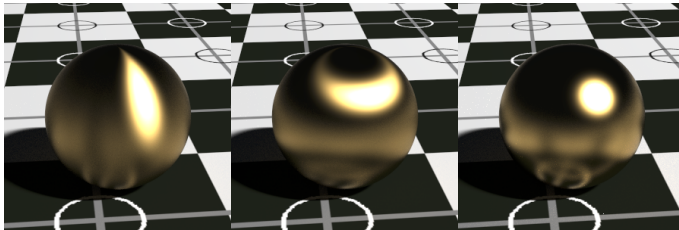
placer un repère local sur le point et utiliser  $\theta_h$  et  $\phi$  pour paramétrer la forme du reflet.



# Comportement réfléchissant : modèle anisotrope

exemple :

- ▶ paramétrer une ellipse :  $\cos(n_u \cos^2 \phi + n_v \sin^2 \phi) \theta_h$
- ▶ au lieu d'un cercle :  $\cos^m \theta_h$ , équivalent à  $n_u = n_v$





# Comportement réfléchissant : modèle anisotrope

$$f_{r(R,G,B)}(\mathbf{p}, \vec{\omega} \rightarrow \vec{\omega}_r) = \sqrt{(n_u + 1)(n_v + 1)} \cos^{(n_u \cos^2 \phi + n_v \sin^2 \phi)} \theta_h$$

paramètres :

- ▶  $n_u$  et  $n_v$  représentent les rayons de l'ellipse,
- ▶  $\vec{u}$  et  $\vec{v}$  directions sur le plan tangent au point  $p$ .

# Comportement réfléchissant : modèle de Cook-Torrance

surface rugueuse :

- ▶ décrire la micro-géométrie de la surface,
- ▶ déterminer la quantité d'énergie réfléchie dans la direction  $\vec{\omega}_r$ .

c'est déjà ce que fait le modèle empirique (Blinn-Phong) ...

faire mieux :

- ▶ toutes les facettes ne reçoivent pas de l'énergie (ombres ...),
- ▶ toutes les facettes ne réfléchissent pas de l'énergie dans la direction  $\vec{\omega}_r$  (masquage ...)

# Comportement réfléchissant : modèle de Cook-Torrance

modèles probabilistes de surfaces :

$$D(\cos \theta) = \frac{1}{m^2 \cos^4 \theta} \exp \left( \frac{\cos^2 \theta - 1}{m^2 \cos^2 \theta} \right) \quad (\text{Cook-Torrance})$$

$$D(\cos \theta) = \frac{m + 2}{2} \cos^m \theta \quad (\text{Blinn-Phong})$$

$$D(\vec{h}) = \exp \left( -\tan^2 \theta \left( \cos^2 \phi / \sigma_u^2 + \sin^2 \phi / \sigma_v^2 \right) \right) \quad (\text{Ward})$$

$$D(\vec{h}) = \dots$$

# Comportement réfléchissant : modèle de Cook-Torrance

$$f_r(R,G,B)(p, \vec{\omega} \rightarrow \vec{\omega}_r) = \frac{D(\cos \theta_h) G(\vec{\omega}, \vec{\omega}_r) R_{Fresnel}(\theta)}{4 \cos \theta_r \cos \theta}$$

mais, toutes les facettes ne contribuent pas au reflet :

$$G(\vec{\omega}, \vec{\omega}_r) = \min \left( 1, \frac{2 \cos \theta_h \cos \theta_r}{\cos \theta_{rh}}, \frac{2 \cos \theta_h \cos \theta}{\cos \theta_{rh}} \right)$$

## Exemples :



# Comportement réfléchissant : détails

Cook-Torrance :

[A Reflectance Model for Computer Graphics](#)

Approximations efficaces (et pratiques) :

[An Inexpensive BDRF Model for Physically based Rendering](#)

Autre solution simple et moderne :

[A Microfacet-based BRDF Generator](#)

Empiler plusieurs couches de matières :

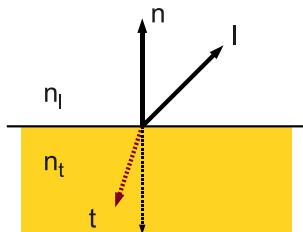
[Arbitrarily Layered Micro-Facet Surfaces](#)

# Matières transparentes

équations (de réfraction) de Fresnel :

$$T_{Fresnel}(\theta) = 1 - R_{Fresnel}(\theta)$$

l'énergie est réfractée avec un angle de  $\theta_t$  puis absorbée dans l'épaisseur de l'objet.



# Matières transparentes

loi de Descarte / Snell :

$$n_t \sin \theta_t = n \sin \theta$$

$$\sin \theta_t = \frac{n}{n_t} \sin \theta$$

mais :

$\sin \theta_t$  n'est pas toujours défini :  $\frac{n}{n_t} \sin \theta > 1$ ,

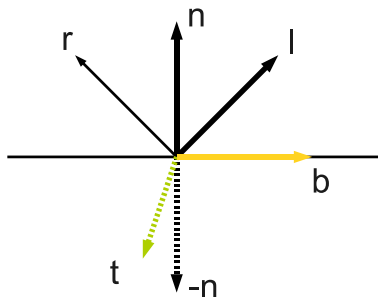
il n'y a pas de réfraction dans ce cas : réflexion totale interne.



# Matières transparentes

déterminer la direction réfractée  $\vec{t}$

- ▶  $\vec{\omega}_r = \cos \theta \cdot \vec{n} + \sin \theta \cdot \vec{b}$
- ▶  $\vec{t} = -\cos \theta_t \cdot \vec{n} - \sin \theta_t \cdot \vec{b}$



# Matières transparentes

$$\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$$

$$\vec{b} = \frac{\vec{\omega} - \cos \theta}{\sin \theta} \cdot \vec{n} = \frac{\vec{\omega} - \cos \theta}{\sqrt{1 - \cos^2 \theta}} \cdot \vec{n}$$

$$\vec{t} = -\sin \theta_t \left( \frac{\vec{\omega} - \cos \theta}{\sqrt{1 - \cos^2 \theta}} \right) \cdot \vec{n} - \sqrt{1 - \sin^2 \theta_t} \cdot \vec{n}$$

# Matières transparentes

absorption dans l'objet :

$$L_{(R,G,B)}(d) = T_{Fresnel}(\theta) \exp^{-\log(a_{(R,G,B)})d}$$

avec  $a$  : facteur d'atténuation après un parcours d'une unité de distance, et  $d$  : distance parcourue dans l'objet.

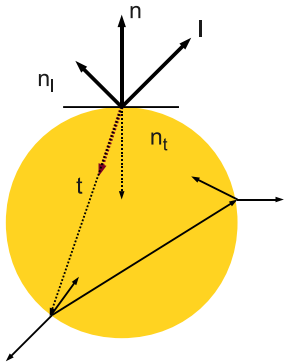
# Matières transparentes : résumé

plusieurs paramètres :

- ▶ indice de réfraction  $n$ , ou  $n_{(R,G,B)}$
- ▶ facteur d'absorption  $a$ , ou  $a_{(R,G,B)}$ .

## Matières transparentes : lancer de rayons

- ▶ 1ère réfraction : entrée dans l'objet,
- ▶ 2ième réfraction : sortie de l'objet + absorption sur le trajet.



attention : pour sortir de l'objet, penser à inverser  $n$  et  $n_t$  et la normale (orientée vers l'origine du rayon) !!

# Matières transparentes : lancer de rayons

## résumé :

- ▶ au lieu de suivre le trajet direct de la lumière, on "remonte" le long du trajet, en partant de l'observateur vers la source de lumière,
- ▶ quels coefficients appliquer à chaque cas ? (première réflexion, réfraction, deuxième, etc.)
- ▶ ne pas oublier l'absorption à l'intérieur de l'objet,
- ▶ on n'utilise que les indices de réfractifs  $n$  et  $n_t$ , pour déterminer  $R_{Fresnel}()$  et  $T_{Fresnel}()$ .

# Matières transparentes : lancer de rayons

problème :

suivre tous les rayons est récursif !

quel critère d'arrêt ?

solutions classiques :

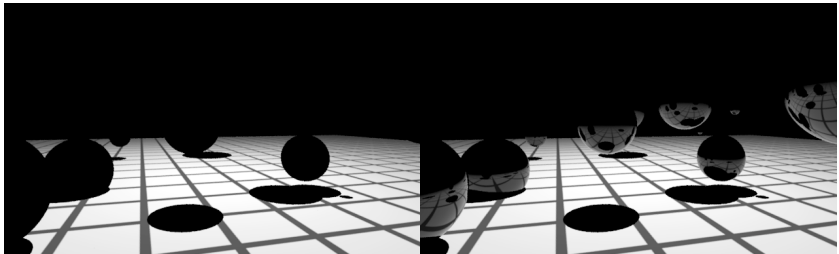
- ▶ arreter apres quelques rebonds,
- ▶ estimer la contribution de chaque rayon et arreter lorsqu'elle est trop faible.
- ▶ mais ce n'est pas parfait ...

# Exemples :





# Exemples :



# Exemples :

