

# 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 :

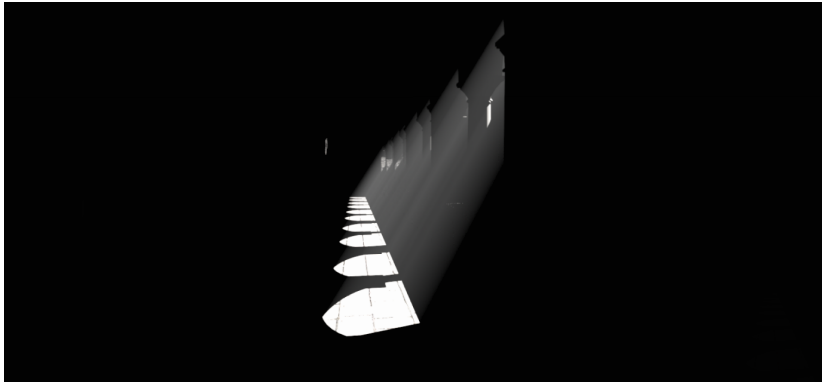
les objets réfléchissent la lumière qu'ils reçoivent.

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



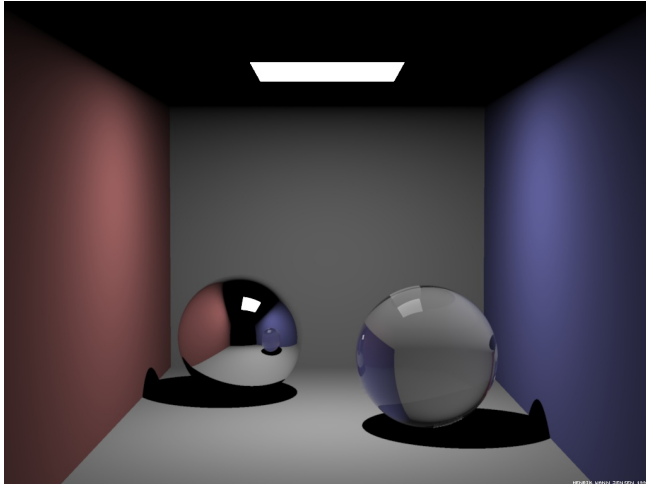
exemple : éclairage direct + indirect



exemple : éclairage direct + indirect + détails

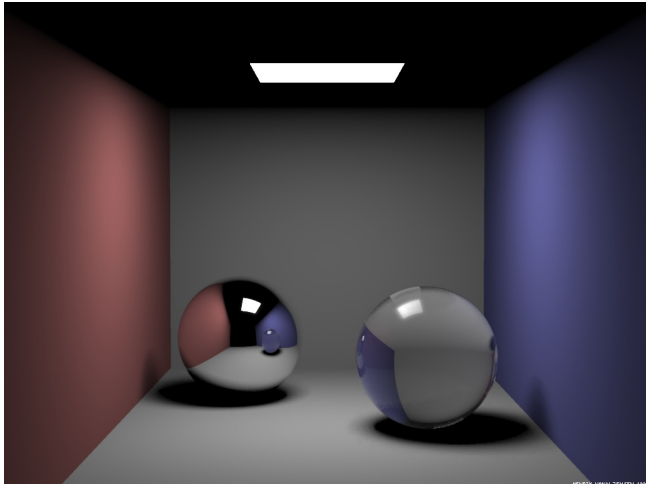


## exemple : influence de la source de lumière

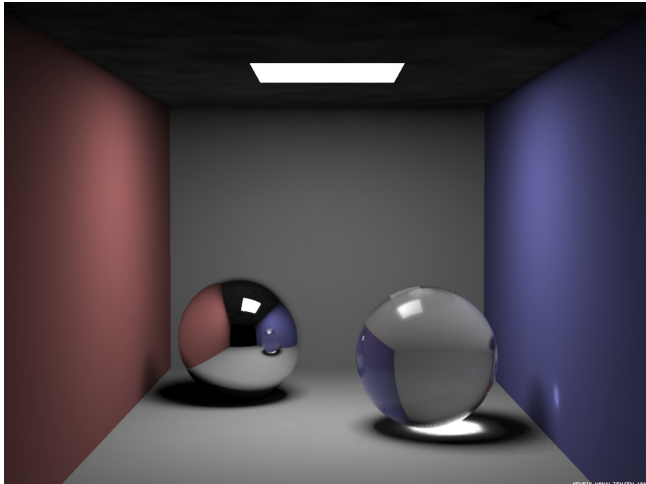




## exemple : influence de la source de lumière



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*" :

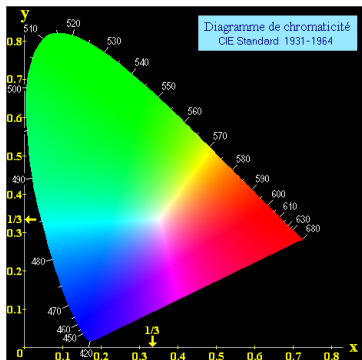


- ▶ *énergie* ? associée à une onde électromagnétique,
- ▶ *énergie visible* ? associée à l'ensemble d'ondes perçues par le système visuel,
- ▶ *domaine visible* ? ensemble d'ondes perçues.

## Domaine visible et couleurs

onde électromagnétique :

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

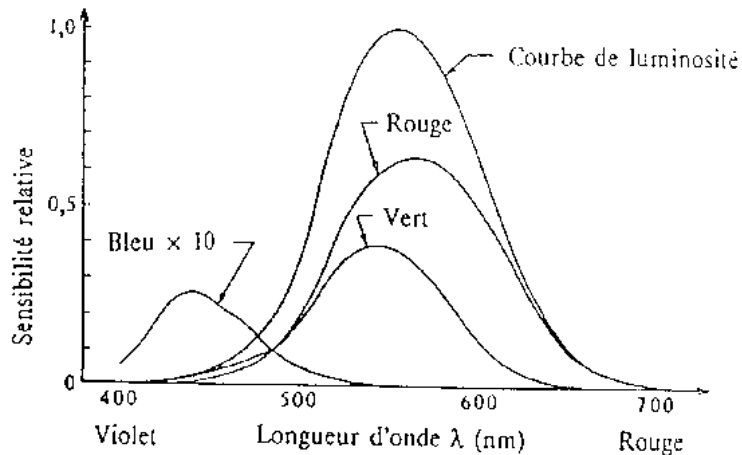


# Energie réfléchié et couleur

la couleur d'un objet :

- ▶ est la perception des énergies réfléchies par l'objet vers l'observateur,
- ▶ déterminer la quantité d'énergie réfléchié 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  $\Phi$ , 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 :

$\Phi$ , quantité d'énergie traversant une surface / région par unité de temps.

unité :

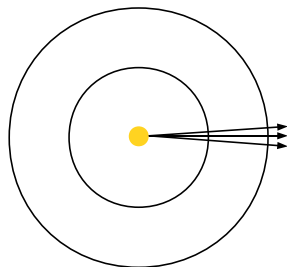
W, Watt.

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 : Eclairément

définition :

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

unité :

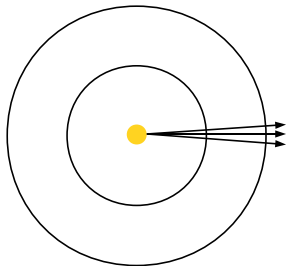
$W/m^2$ , Watt par mètre carré.

## Radiométrie : Eclairage

exemple :

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

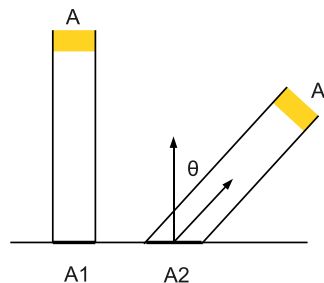
$$E = \frac{\Phi}{4\pi r^2}$$



## Radiométrie : Eclaircement

exemple :

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



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

# 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  $4\pi$  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  $2\pi$  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 :

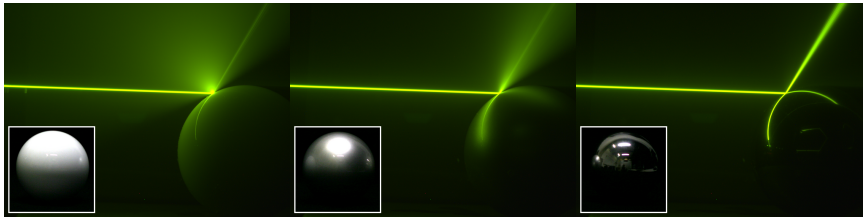
$$L_{\text{incidente}}(p) = L_{\text{emise}}(\vec{q}\vec{p}) \cos \theta$$

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

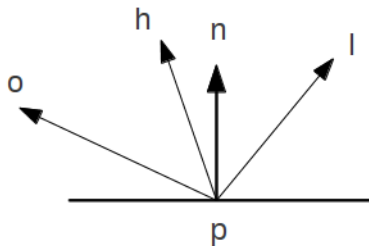
## Objectif: un peu de lumière

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  $\theta_h$  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 :  $\int k \cos \theta dl = k\pi \neq 1$

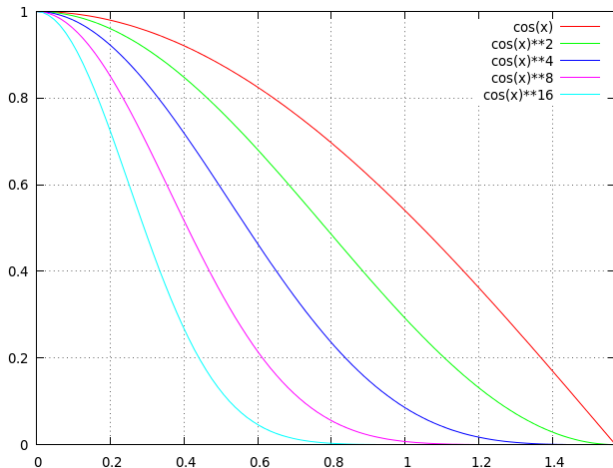
## exemple

cas réfléchissant :

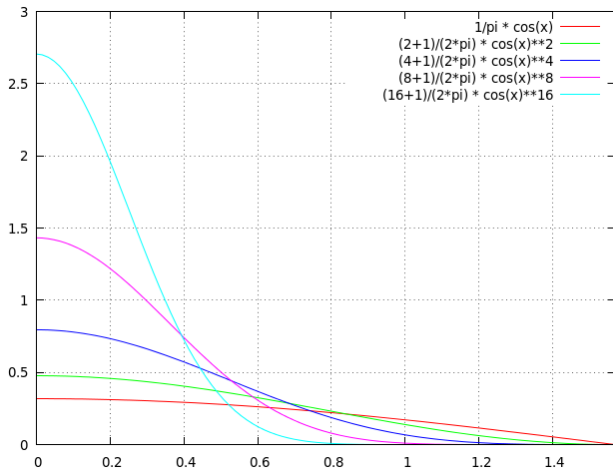
- ▶  $f_r(\vec{l}, \rho, \vec{o}) = \frac{m+1}{2\pi} \cos^m \theta_h$
- ▶ pourquoi  $\frac{m+1}{2\pi}$  ?
- ▶ vérification 1 :  $\int \cos^m \theta_h dh = \frac{2\pi}{m+1} \neq 1$
- ▶ mais la conservation d'énergie s'écrit :  
 $\int f_r(\vec{l}, \rho, \vec{o}) \cos \theta dl \leq 1$
- ▶ vérification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

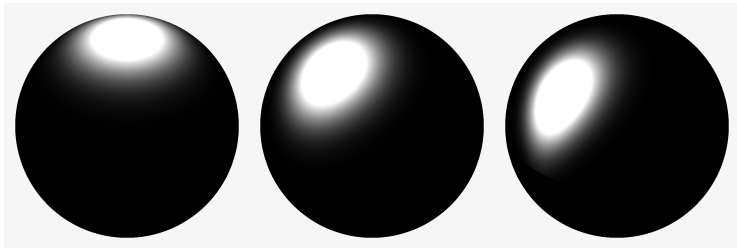
# exemple



# exemple



## coeffs magiques ?



incidence  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$

## coeffs magiques ?

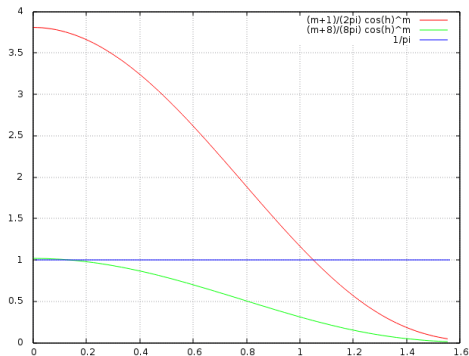


incidence  $60^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $89^\circ$

## coeffs magiques ?

vérification :

- ▶ pour chaque incidence, total de l'énergie réfléchie,
- ▶ 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 :

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

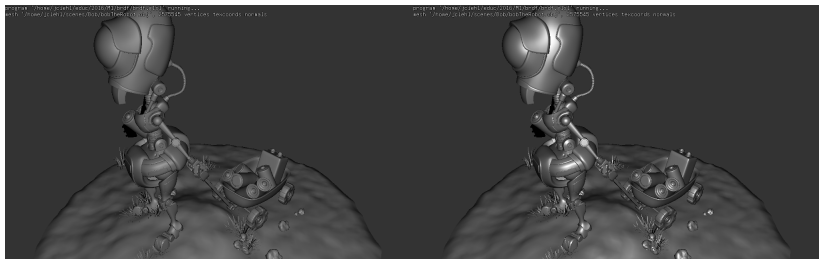


## exemple



à gauche : sans normalisation, à droite : avec

## exemple



à gauche : sans normalisation, à droite : avec

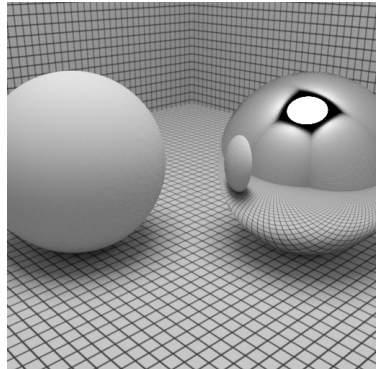
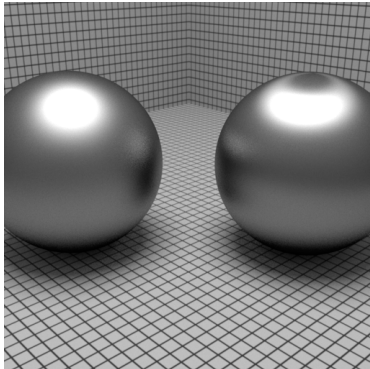
difficile de mélanger plusieurs comportements s'ils ne sont pas normalisés

## Objectif : un peu de lumière

énergie réfléchie 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 :

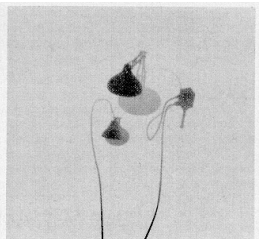
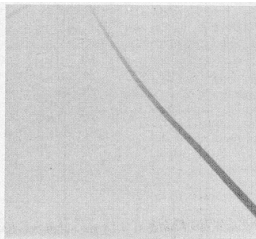
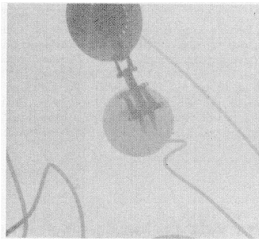
- ▶ "Rendering antialiased shadows with depth maps"  
B. Reeves, D. Salesin, R.L. Cook, 1987
- ▶ "Casting curved shadows on curved surfaces"  
L. Williams, 1978

## 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 ?