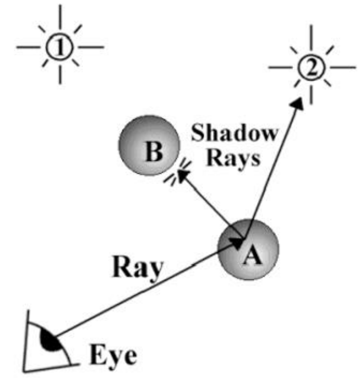
Chapitre 7.4b – L'illumination avancée dans un *ray tracer*

Le rayon d'ombre



http://web.cse.ohio-state.edu/~shen.94/681/Site/Slides_files/shadow.pdf

Le rayon d'ombre est un rayon lancé depuis un point d'intersection en direction d'un point de lumière (ou sens opposé à l'orientation de la source de lumière) dans le but d'identifier si le rayon est dans l'ombre d'une autre géométrie.

Si le rayon peut atteindre la source de lumière sans intersection, alors la source de lumière peut éclairer la géométrie. Autrement, il n'y a pas de contribution de la source de lumière à la couleur réfléchie par la géométrie.

S'il y a plusieurs sources de lumière, il faut répéter ce processus pour l'ensemble des lumières.

Pour construire un rayon, nous pouvons utiliser les équations suivantes :

$$\vec{r}_{\text{omb}} = \vec{r}_{\text{inter}} + \vec{v}_{\text{omb}}\, t \qquad \text{tel que} \qquad \vec{v}_{\text{omb}} = \frac{\vec{r}_{\text{lum}} - \vec{r}_{\text{inter}}}{\left\|\vec{r}_{\text{lum}} - \vec{r}_{\text{inter}}\right\|} \qquad \text{avec une portée maximale } t_{\max} = \left\|\vec{r}_{\text{lum}} - \vec{r}_{\text{inter}}\right\|$$

où $\vec{r}_{\text{omb}}$: Rayon d'ombre.

$\vec{r}_{\text{inter}}$: Position de l'intersection sur la géométrie ($\vec{r}_{\text{inter}} = \vec{r}_0 + \vec{v}\, t_{inter}$).

$\vec{v}_{\text{omb}}$: Orientation du rayon d'ombre (géométrie vers lumière) ($\left\|\vec{v}_{\text{omb}}\right\| = 1$, vecteur unitaire).

$\vec{r}_{\text{lum}}$: Position de la lumière ponctuelle.

t : Temps écoulé dans le déplacement du rayon d'ombre.

$t_{\max}$: Temps maximale afin que le rayon d'ombre atteigne la lumière.

Pour déterminer si le point d'intersection est dans l'ombre de la source de lumière, il faut exécuter l'algorithme suivant :

- Construire le rayon d'ombre.
- Tester les intersections entre le rayon d'ombre est les géométries de la scène.
- Exclure les intersections de temps supérieur à $t_{\max}$.
  - S'il y a au moins une intersection avec une géométrie opaque, alors il n'y a pas de luminosité et la source de lumière sera $\ddot{L} = 0$.
  - S'il n'y a aucune intersection, alors la luminosité de la source de lumière sera $\ddot{L} = \ddot{L}_{\text{lum}}$.
  - S'il n'y a que des intersections avec des géométries strictement transparentes, alors la luminosité de la source de lumière sera $\ddot{L} = L_{\text{lum}} \prod_{g=1}^{N} S_g$ correspondant à une couleur filtrée ($\prod_{g=1}^{N} S_g = S_1 * S_1 * \ldots * S_{N-1} * S_N$).

Définitions des paramètres :

$\ddot{L}$: Couleur transmise à la surface intersectée par le rayon initial (après filtrage ou ombrage).

$\ddot{L}_{\text{lum}}$: Couleur de la source de lumière initiale.

$\ddot{S}_g$: Couleur de la géométrie transparente d'indice *g*.

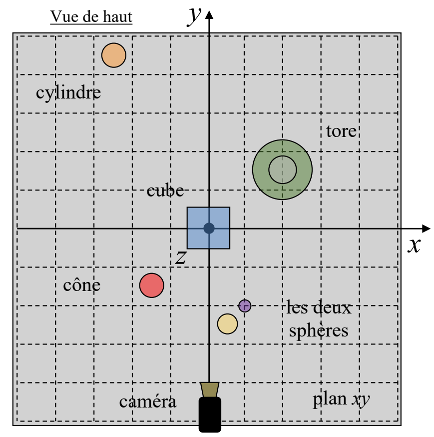
La scène de référence

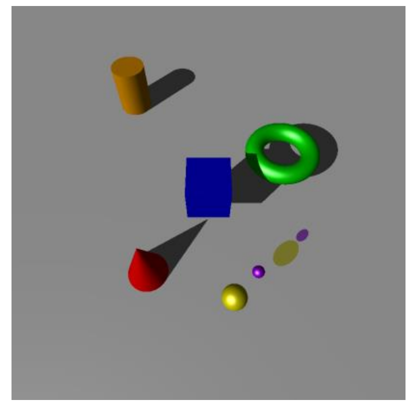
Afin d'illustrer l'effet des différentes sources d'éclairage dans une scène, nous aurons recours à la scène suivante :

- Une caméra située à la coordonnée (0, -8, 5) regardant à la coordonnée (0, 1, 0).

- Un plan gris pâle situé à l'origine.
- Un cube bleu situé à la coordonnée (0, 0, 3).
- Un cône rouge situé à la coordonnée (-3, -3, 0).
- Un cylindre orange situé à la coordonnée (-5, 9, 0).
- Un tore vert situé à la coordonnée (4, 3, 2).
- Une sphère jaune transparente située à la coordonnée (1, -5, 3).
- Une sphère mauve transparente située à la coordonnée (2, -4, 3).

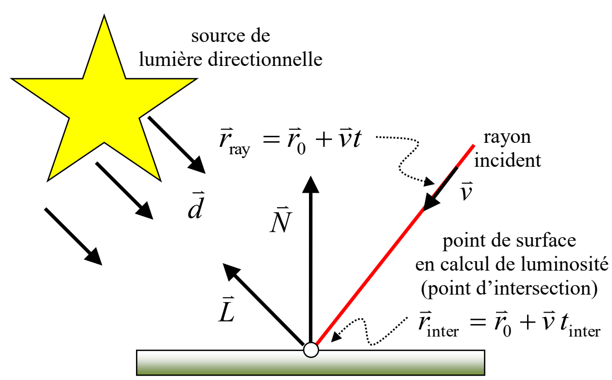
- L'algorithme d'illumination retenue sera composé de réflexion lambertienne et spéculaire de *blinn*.
- Il y aura usage de rayon d'ombre pour évaluer les zones ombragées.
- Il y aura deux sphères transparentes qui pourront produire des ombres de couleurs filtrées par la couleur de la sphère.





La source de lumière directionnelle

La source de lumière directionnelle représente une source de lumière ayant une orientation unique dans l'ensemble de la scène sans être localisable dans la scène. Ce type d'éclairage simule d'une certaine façon la lumière du Soleil.



Sans effet d'ombrage, la source de lumière directionnelle $\ddot{L}_{\text{directionnelle}}$ sera égale à l'expression suivante :

$$\ddot{L}_{\text{directionnelle}} = \begin{Bmatrix} \ddot{L} & \text{si} & \vec{N}\cdot\vec{L} > 0 \\ 0 & \text{si} & \vec{N}\cdot\vec{L} < 0 \end{Bmatrix}$$

tel que

$$\vec{L} = -\vec{d} \quad \text{et} \quad \vec{d} \text{ est constant}$$

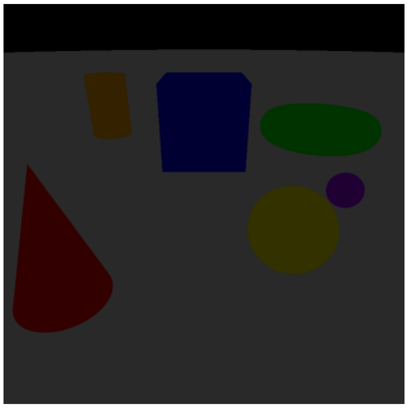
où $\vec{L}$: Vecteur lumière orienté du point de diffusion vers la source de lumière ($\left\|\vec{L}\right\| = 1$).

$\vec{N}$: Normale à la surface du point de diffusion ($\left\|\vec{N}\right\| = 1$).

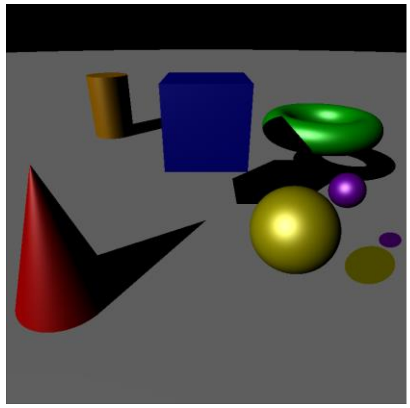
$\ddot{L}$: La couleur de la source de lumière.

P.S. Puisque la source provient de très loin, il n'y a pas de facteur d'atténuation en fonction de la distance.

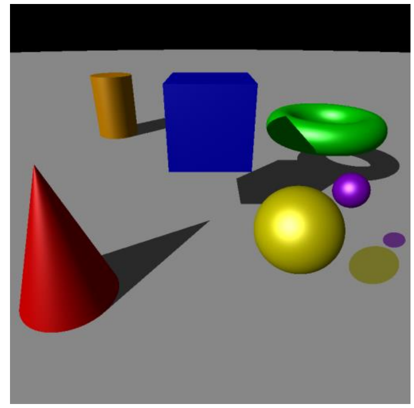
Voici le résultat de la scène avec lumière ambiante, lumière directionnelle et les deux sources de lumière simultanément :



Avec source de lumière ambiante

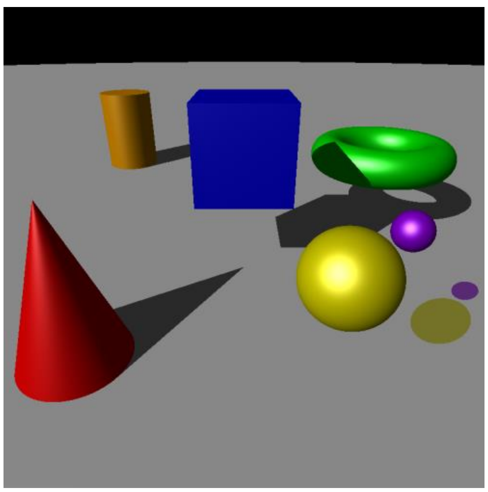


Avec source de lumière directionnelle

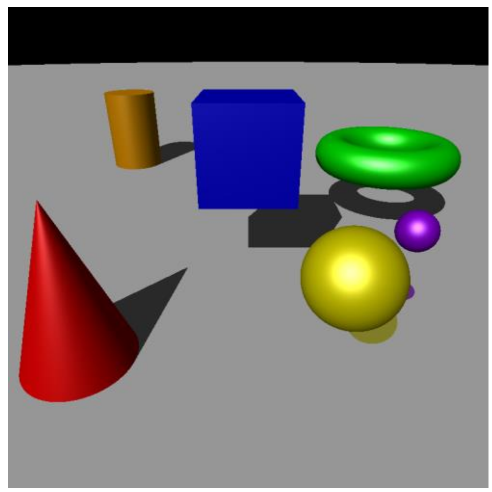


Avec source de lumière ambiante et directionnelle

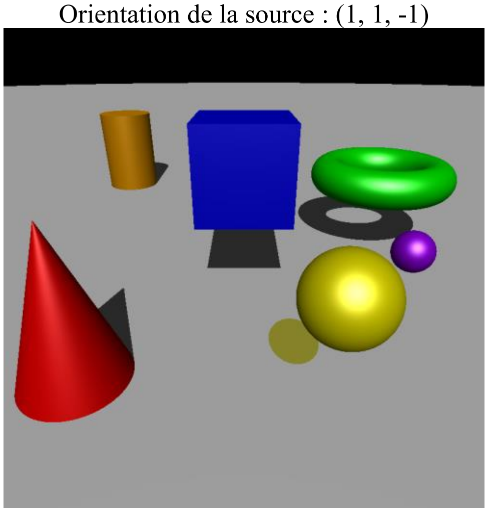
Voici le résultat de l'effet de l'orientation d'une source de lumière directionnelle sur une scène (avec lumière ambiante) :



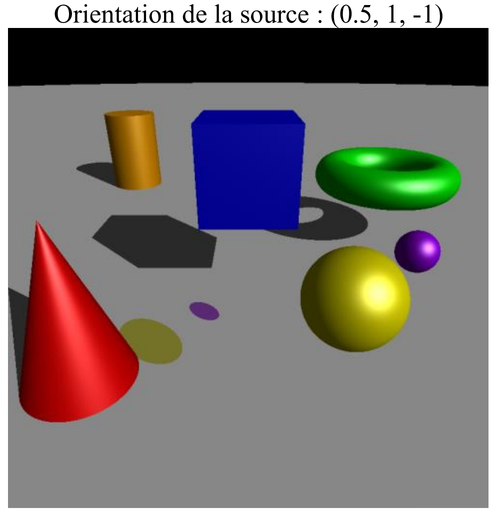
Orientation de la source : (1, 1, -1)



Orientation de la source : (0.5, 1, -1)



Orientation de la source : (0, 1, -1)

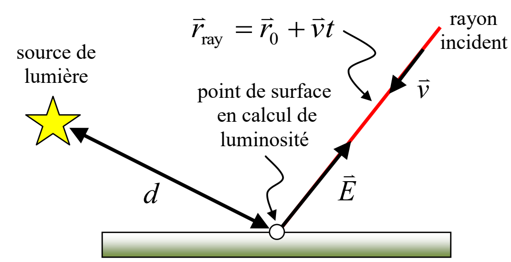


Orientation de la source : (-1, 1, -1)

<u>Remarque :</u> On constante que la réflexion spéculaire change de position en fonction de l'orientation de la source.

Atténuation de la lumière en fonction de la distance

Une source de lumière peut réduire sa contribution à la luminosité en fonction de sa distance d avec le point de diffusion. L'atténuation peut être **constante**, **linéaire** et même **quadratique** (pour simuler une source ponctuelle).



On peut évaluer l'effet de l'atténuation A de la lumière grâce à l'équation suivante :

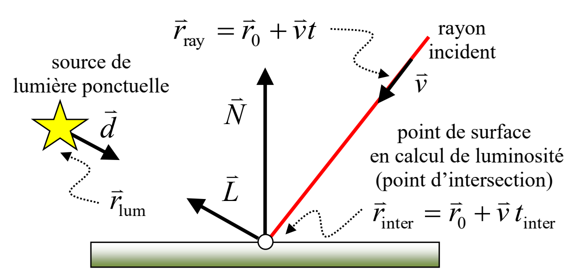
$$A = \frac{1}{C_{\text{const}} + C_{\text{liné}}d + C_{\text{quad}}d^2}$$

où A : Facteur d'atténuation de la lumière.
C_{const} : Constante d'atténuation à taux constant de la lumière ($C_{\text{const}} \geq 0$).
$C_{\text{liné}}$: Constante d'atténuation à taux linéaire de la lumière ($C_{\text{liné}} \geq 0$).
C_{quad} : Constante d'atténuation à taux quadratique de la lumière ($C_{\text{quad}} \geq 0$).
d : Distance entre la source de lumière et le point de surface.

N.B. Idéalement, le facteur d'atténuation doit toujours respecter $A \leq 1$ afin que la luminosité maximale ne dépasse pas celle de la source elle-même étant $\ddot{L}$. Cependant, cette condition peut être difficile à respecter lorsque $d < 1$.

La source de lumière ponctuelle

La source de lumière ponctuelle représente une source de lumière ayant une orientation pointant vers le point d'éclairage. Ce type d'éclairage simule d'une certaine façon une ampoule ponctuelle (de taille négligeable).

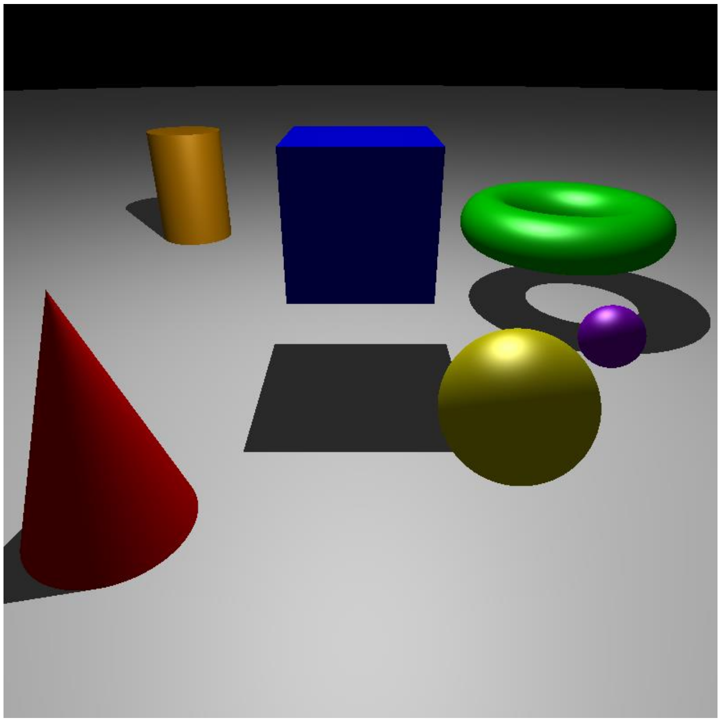


Sans effet d'ombrage, la source de lumière ponctuelle $\ddot{L}_{\text{ponctuelle}}$ sera égale à l'expression suivante :

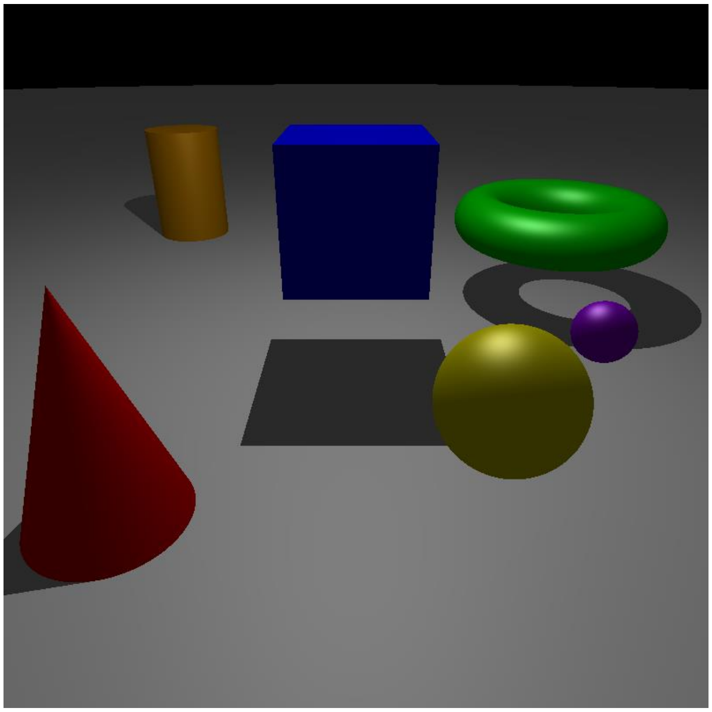
$$\ddot{L}_{\text{ponctuelle}} = \begin{Bmatrix} A\ddot{L} & \text{si } \vec{N}\cdot\vec{L} > 0 \\ 0 & \text{si } \vec{N}\cdot\vec{L} < 0 \end{Bmatrix} \qquad \text{tel que} \quad \vec{L} = -\vec{d} \qquad \text{avec} \quad \vec{d} = \frac{\vec{r}_{\text{inter}} - \vec{r}_{\text{lum}}}{\left\|\vec{r}_{\text{inter}} - \vec{r}_{\text{lum}}\right\|}$$

où $\vec{r}_{\text{lum}}$: Position de la lumière ponctuelle.
$\vec{r}_{\text{inter}}$: Position de l'intersection sur la géométrie ($\vec{r}_{\text{inter}} = \vec{r}_0 + \vec{v}t_{inter}$).
$\vec{N}$: Normale à la surface du point de diffusion ($\|\vec{N}\| = 1$).
$\ddot{L}$: La couleur de la source de lumière.
A : Facteur d'atténuation de la lumière ($A = \dfrac{1}{C_{\text{const}} + C_{\text{liné}}d + C_{\text{quad}}d^2}$)

Voici le résultat d'une source de lumière ponctuelle située à la coordonnée (0, 0, 10) avec lumière ambiante à notre scène :



Sans facteur d'atténuation



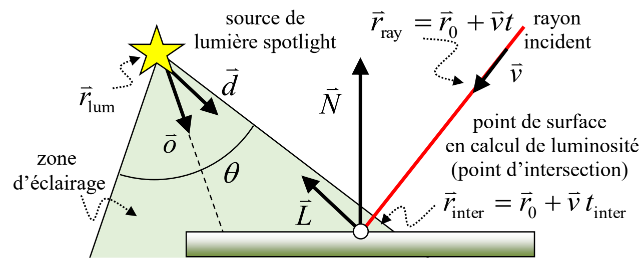
Avec facteur d'atténuation $C_{\text{quad}} = 0.01$

Remarque :

Avec une distance approximative $d \approx 10$ entre la source et les géométries de la scène, le facteur $C_{\text{quad}} = 0.01$ engendre un facteur d'atténuation approximativement de $A \approx 0.1$ pour l'éclairage de la scène.

La source de lumière ponctuelle orientée

La source de lumière ponctuelle orientée représente une source de lumière ayant une localisation et une orientation de préférence. Ce type d'éclairage simule d'une certaine façon un « spotlight » ponctuel.



Sans effet d'ombrage, la source de lumière « spotlight » $\ddot{L}_{\text{spotlight}}$ sera égale à l'expression suivante :

$$\ddot{L}_{\text{spotlight}} = \begin{cases} A\,C_\theta\,\ddot{L} & \text{si } \vec{N}\cdot\vec{L} > 0 \text{ et } \vec{o}\cdot\vec{d} > \cos(\theta/2) \\ 0 & \text{si } \vec{N}\cdot\vec{L} < 0 \text{ ou } \vec{o}\cdot\vec{d} < \cos(\theta/2) \end{cases}$$

tel que

$$\vec{d} = -\vec{L} \qquad \text{et} \qquad \vec{d} = \frac{\vec{r}_{\text{inter}} - \vec{r}_{\text{lum}}}{\left\|\vec{r}_{\text{inter}} - \vec{r}_{\text{lum}}\right\|}$$

où $\vec{r}_{\text{lum}}$: Position de la lumière ponctuelle.

$\vec{r}_{\text{inter}}$: Position de l'intersection sur la géométrie ($\vec{r}_{\text{inter}} = \vec{r}_0 + \vec{v}t_{inter}$).

$\vec{N}$: Normale à la surface du point de diffusion ($\left\|\vec{N}\right\| = 1$).

$\vec{o}$: Orientation centrale de la source de lumière ($\left\|\vec{o}\right\| = 1$.

θ : Angle d'ouverture de la source de lumière ($\theta \in [0°, 180°]$)

$\ddot{L}$: La couleur de la source de lumière.

C_θ : Constante d'atténuation d'angle d'ouverture ($C_\theta \in [0, 1]$)

A : Facteur d'atténuation de la lumière ($A = \dfrac{1}{C_{\text{const}} + C_{\text{liné}}d + C_{\text{quad}}d^2}$)

Le facteur C_θ représente un facteur d'atténuation permettant de moduler l'éclairage en fonction du positionnement dans la zone d'éclairage. Voici l'interprétation de la constante :

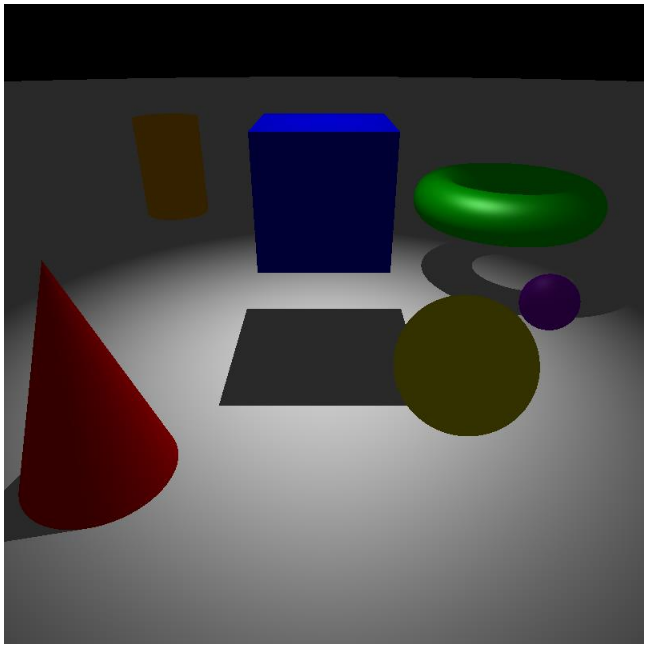
$$C_\theta = 0 \text{ : Atténuation complète} \qquad C_\theta = 1 \text{ : Atténuation absente.}$$

Il existe plusieurs modèles mathématiques pour représenter ce facteur d'atténuation. Par exemple, en utilisant une interpolation linéaire, nous pouvons formuler l'expression suivante :

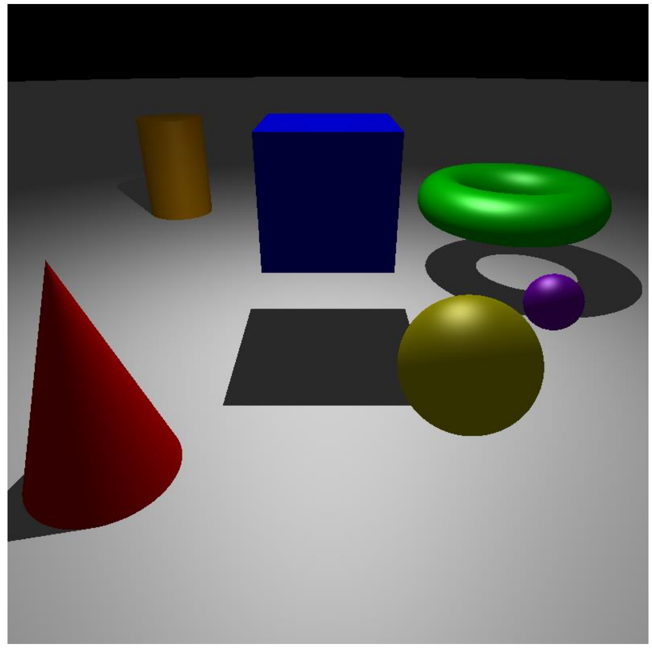
$$C_\theta = (1-t)C_{\max} + t\,C_{\min} \qquad \text{où} \qquad t = \frac{\vec{o}\cdot\vec{d} - 1}{\cos(\theta/2) - 1}$$

où $C_{\max} = 1$ représente le facteur de lumière lorsque le point de lumière est parfaitement dans l'axe $\vec{o}$ de la source et $C_{\min} \in [0,1]$ représente le facteur de la lumière lorsque le point est en périphérie du cône de lumière.

Voici le résultat d'une source située à la coordonnée (0, 0, 10) dont l'orientation est selon (0, 0, -1) et utilisant $C_{\max} = 1$ ainsi que $C_{\min} = 0$:



Avec un angle d'ouverture $\theta = 70^{\circ}$

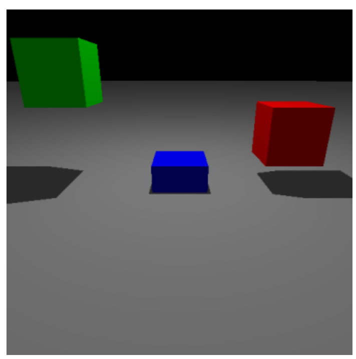


Avec un angle d'ouverture $\theta = 120^{\circ}$

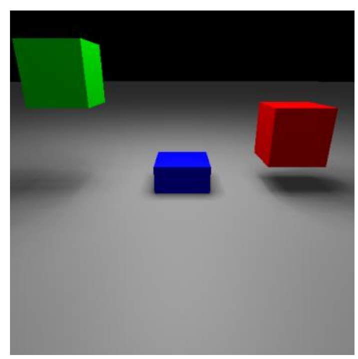
Les ombres dures et molles

Lorsqu'une source de lumière est bloquée directement par une géométrie, alors il y aura formation d'ombre. Cependant, nous pouvons apporter une subtilité dans la formation de l'ombre si l'on considère une taille et une forme à la source de lumière.

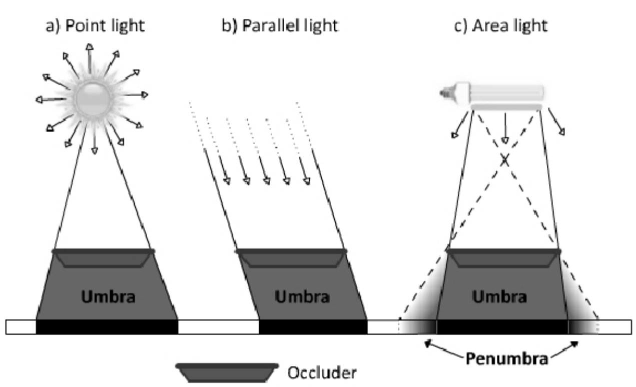
Si une source de lumière est complètement bloquée, il y aura formation d'ombre dure. Par contre, si seulement une fraction de la lumière est bloquée, alors il y aura formation d'une ombre molle correspondant ainsi une **pénombre**.



Scène avec source de lumière ponctuelle produisant des ombres dures



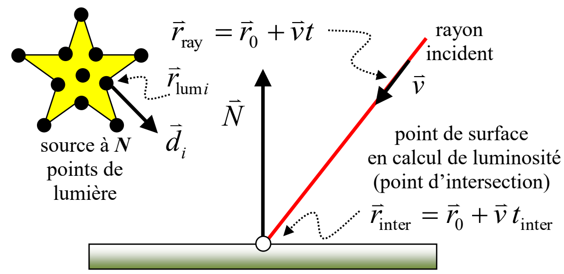
Scène avec source de lumière sphérique produisant des ombres molles.



https://www.researchgate.net/figure/a-Hard-shadow-caused-by-point-and-spot-light-sources-b-hard-shadow-caused-by-parallel_fig3_261295750

La source de lumière à multiple points ponctuelles

La technique de la source à multiple points ponctuelles (*multiple shadow rays*) consiste à distribuer sur la forme géométrique d'une source de lumière N sources ponctuelles dont la distribution dépend de la forme de la source. La contribution à l'illumination de cette source sera

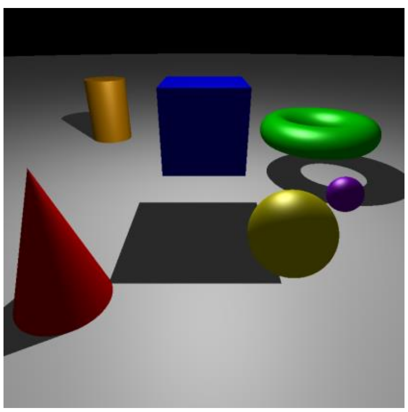


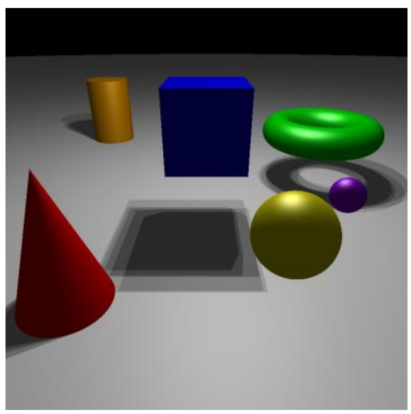
$$\dddot{L}_{\text{multi}} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \dddot{L}_{\text{ponctuelle}\,i}$$

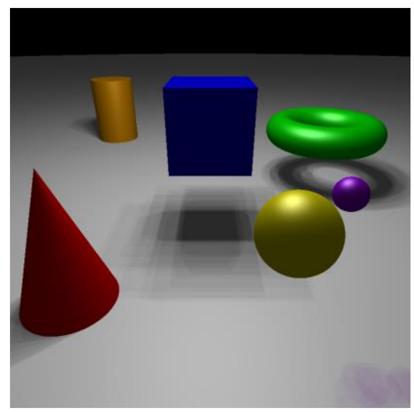
On retrouve dans la littérature les exemples suivants de géométries :

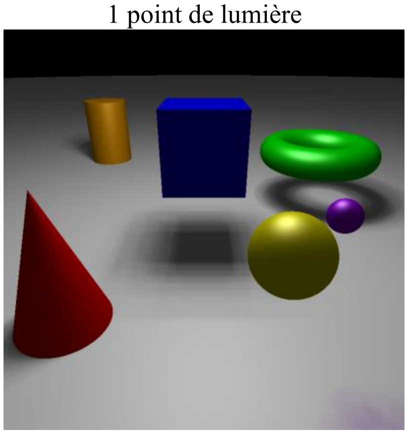
- le tube (distribution sur une ligne)
- l'ouverture de fenêtre (distribution sur un rectangle)
- la source sphérique (distribution sur une sphère)

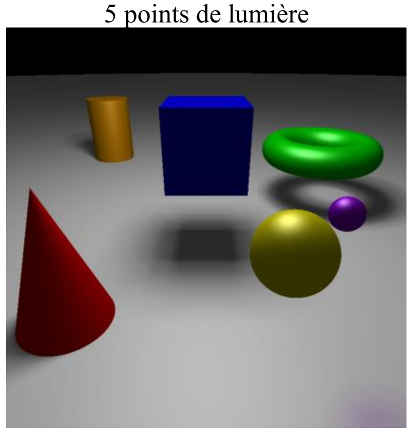
Voici le résultat pour une source de lumière sphérique où les points de lumières sont distribués aléatoirement sur une sphère centrée en (0, 0, 10) avec un rayon R = 2 et un facteur d'atténuation quadratique $C_{\text{quad}} = 0.005$:

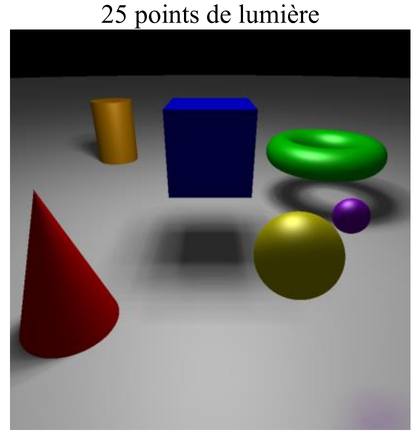

1 point de lumière


5 points de lumière


25 points de lumière


100 points de lumière


200 points de lumière


1000 points de lumière

Pour déterminer aléatoire la position d'un point de lumière sur la sphère située à la position $\vec{r}_{\text{sphère}}$ et de rayon R, nous pouvons utiliser les équations suivantes faisant référence au coordonnée sphérique :

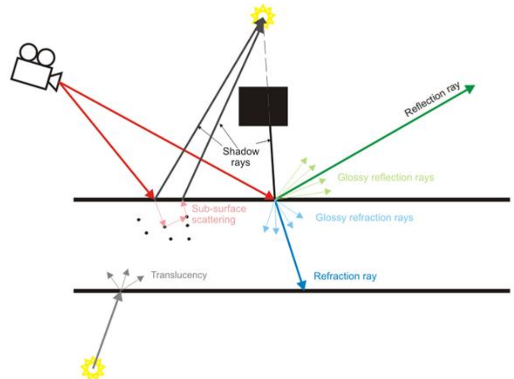
- Déterminer un angle $\theta \in [0, 180°]$ parallèle à l'axe z aléatoirement.
- Déterminer un angle $\varphi \in [0, 360°]$ dans le plan xy aligné avec x aléatoirement.
- Évaluer $x = R\cos(\varphi)\sin(\theta)$.
- Évaluer $y = R\sin(\varphi)\sin(\theta)$.
- Évaluer $z = R\cos(\theta)$.
- La position du point de lumière sera $\vec{r}_{\text{lum}} = \vec{r}_{\text{sphère}} + (x, y, z)$

Illumination indirecte

Afin de représenter les multiples scénarios admissibles que peut prendre la lumière pour voyager de la source, interagir avec l'environnement et terminer sa trajectoire dans la caméra, nous pouvons exploiter le principe d'illumination indirecte.

La stratégie consiste à <u>lancer des nouveaux rayons</u> depuis un point d'intersection avec une géométrie dans des nouvelles directions pour représenter un phénomène d'interaction lumière-matière. Par exemple, nous retrouvons les phénomènes suivants :

(1) la réflexion et **(2)** la réfraction

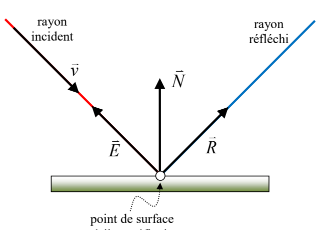
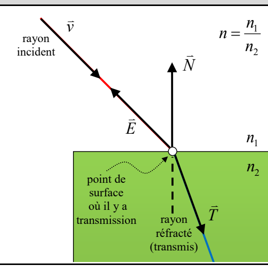


https://docs.chaosgroup.com/display/VRAY3SOFTIMAGE/Basic+Ray+Tracing

Afin d'évaluer l'orientation d'un rayon réfléchi ou réfracté, nous pouvons exploiter les équations suivantes :

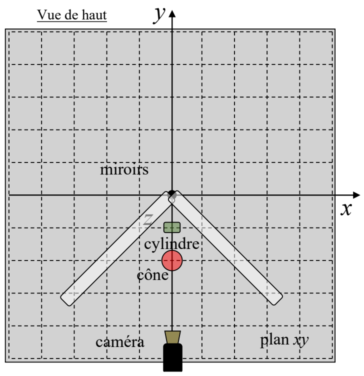
La loi de la réflexion[1]	La loi de la réfraction[2]	Critère de la réflexion totale interne[3]
$\vec{R} = \vec{v} + 2(\vec{E}\cdot\vec{N})\vec{N}$	$\vec{T} = n\vec{v} + \left(n(\vec{E}\cdot\vec{N}) - \sqrt{1 - n^2\left(1 - (\vec{E}\cdot\vec{N})^2\right)}\right)\vec{N}$	$(\vec{v}\cdot\vec{N})^2 + \left(\dfrac{n_2}{n_1}\right)^2 \le 1$

avec $\vec{E} = -\vec{v}$ et $n = n_1 / n_2$ où $\vec{v}$ est l'orientation du rayon et $\vec{N}$ est l'orientation de la normale à la surface.

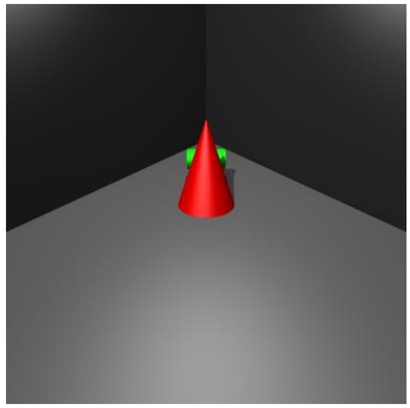
La réflexion	La réfraction
	

[1] Cette équation est démontrée dans la section suivante : https://physique.cmaisonneuve.qc.ca/svezina/nyc/note_nyc/NYC_XXI_Chap%202.2.pdf
[2] Cette équation est démontrée dans la section suivante : https://physique.cmaisonneuve.qc.ca/svezina/nyc/note_nyc/NYC_XXI_Chap%202.4.pdf
[3] Cette équation est démontrée dans la section suivante : https://physique.cmaisonneuve.qc.ca/svezina/nyc/note_nyc/NYC_XXI_Chap%202.4.pdf

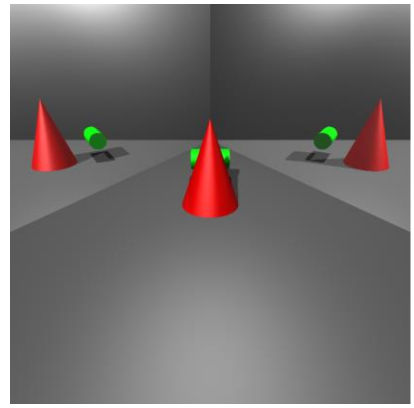
Voici le résultat pour deux miroirs plans dont **l'angle d'ouverture est de 60°** : (lumière ambiante, directionnelle et ponctuelle au-dessus du cône)



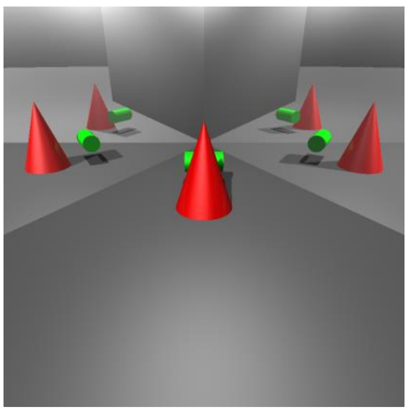
Exemple de schéma pour un à angle de 90°



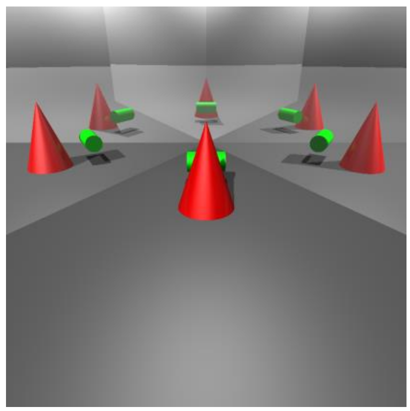
Niveau de récursivité : 1



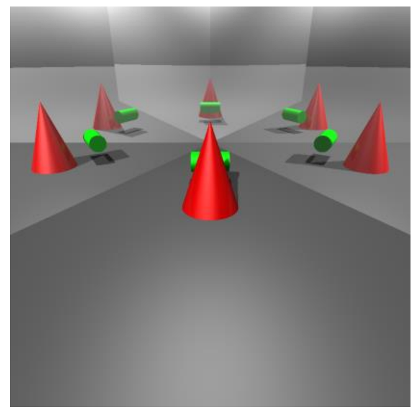
Niveau de récursivité : 2



Niveau de récursivité : 3

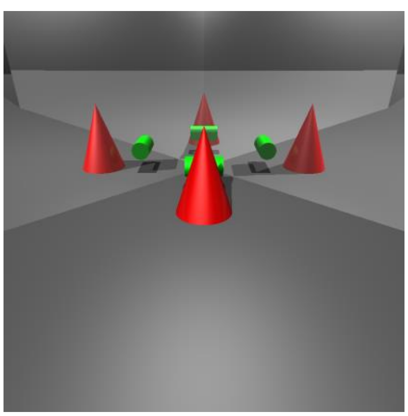


Niveau de récursivité : 4

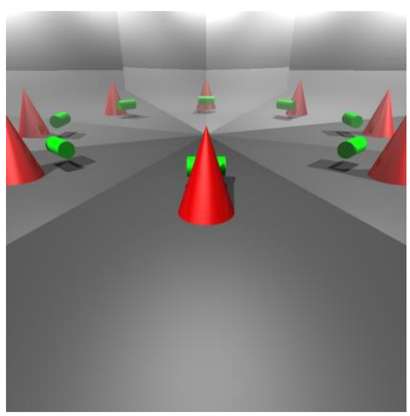


Niveau de récursivité : 5

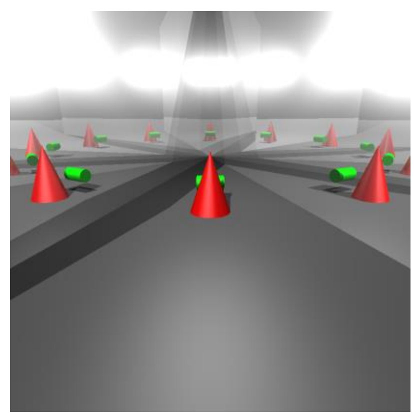
Voici le résultat pour deux miroirs pour différentes valeurs d'angle d'ouverture :



Angle d'ouverture : 90°
Récursivité : 4



Angle d'ouverture : 45°
Récursivité : 8



(caméra reculée pour voir les 11 images)
Angle d'ouverture : 30°
Récursivité : 10

Remarque :

Le nombre d'images concorde avec la théorie de l'optique géométrique ($N_{\text{image}} = \lfloor 360/\theta_{\text{ouverture}} - 1 \rfloor$) ainsi que l'équation de la position de l'image d'un miroir plan $q = -p$.

Voici le résultat de la réfraction et de la réflexion totale interne à l'intérieur d'un prisme rectangulaire transparent (n = 1.66) situé devant une sphère et un tore (il y a un disque sous le prime pour mieux situer le plan *xy*) :

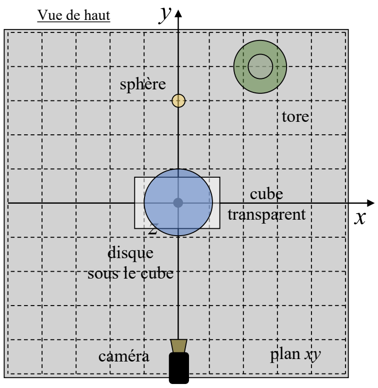
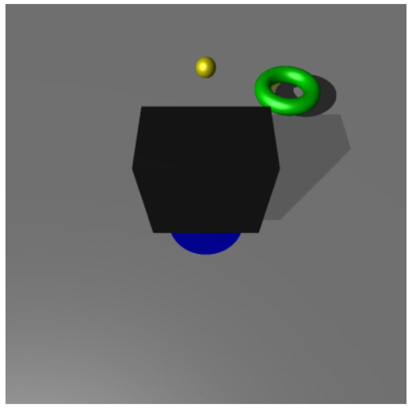
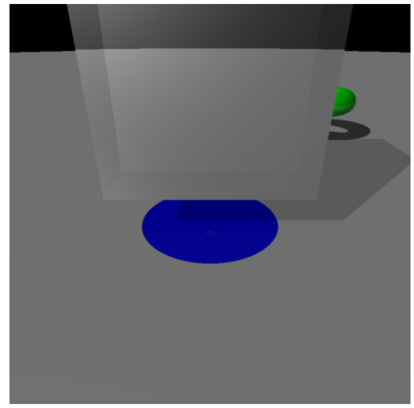


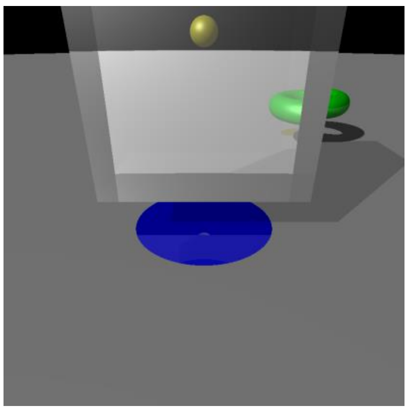
Schéma de la scène



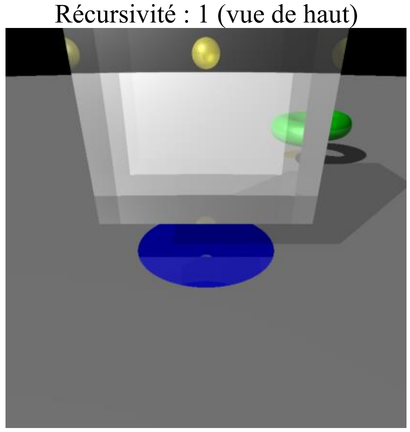
Récursivité : 1 (vue de haut)



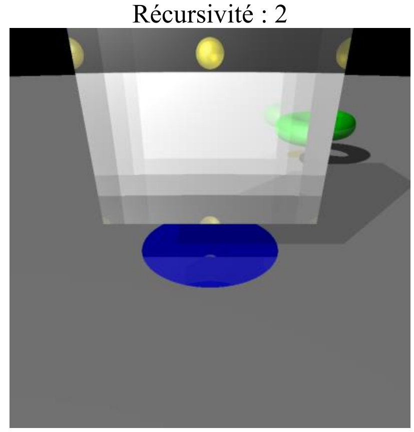
Récursivité : 2



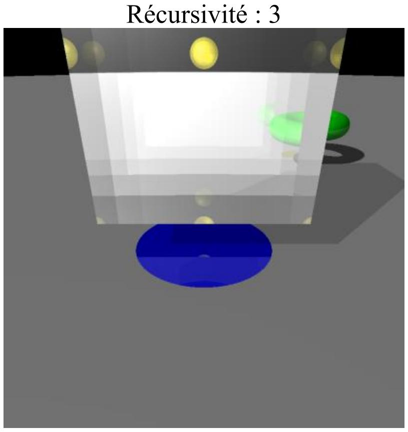
Récursivité : 3



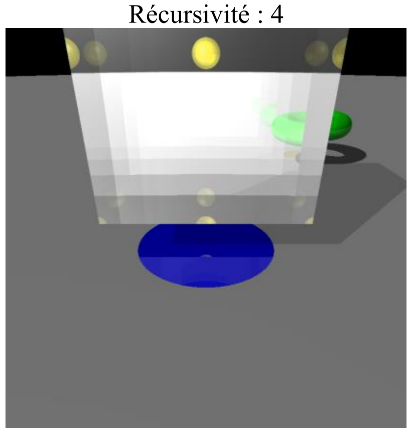
Récursivité : 4



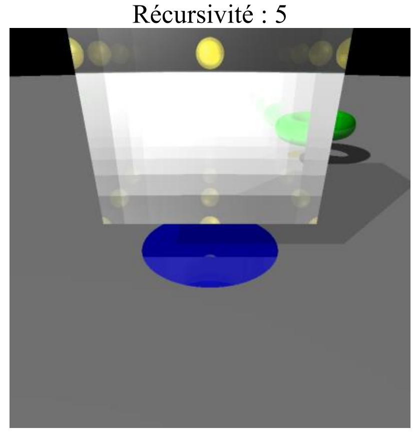
Récursivité : 5



Récursivité : 6



Récursivité : 7

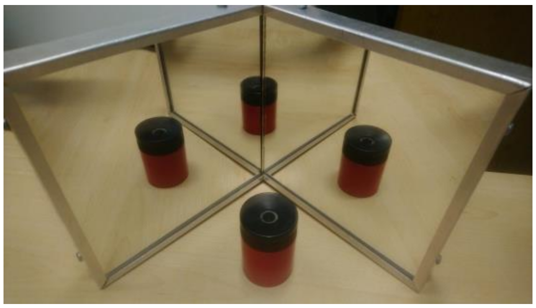
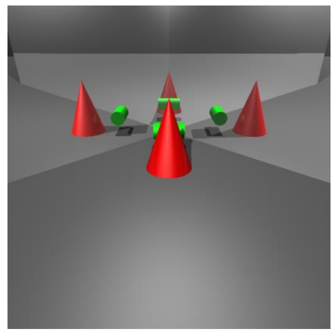
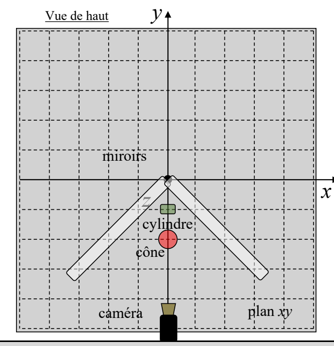
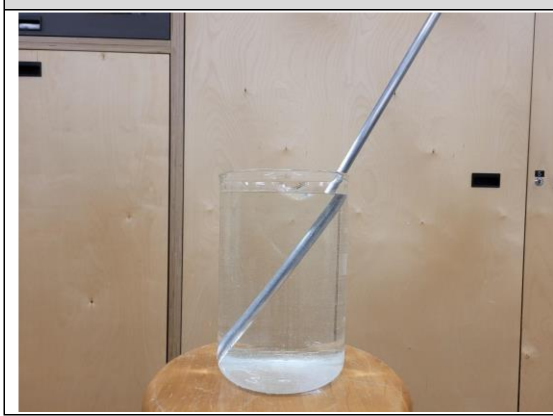
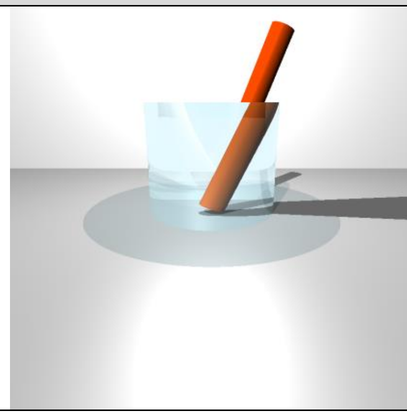
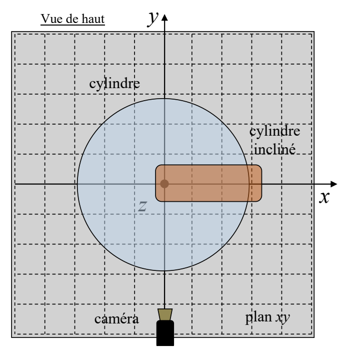


Récursivité : 20

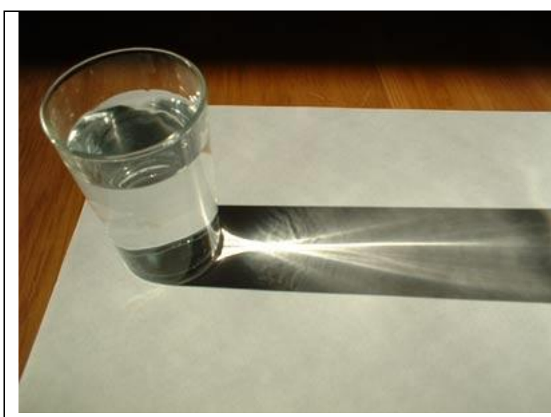
Essayer de reproduire la réalité

Tenter de reproduire une image réelle n'est pas une mince affaire. Malgré un bon algorithme de réflexion et réfraction, le choix des paramètres pour décrire les matériaux applicables sur les géométries d'une scène est primordial d'où l'importance d'une bonne équipe d'artiste. De plus, il existe plusieurs autres manifestations d'interaction lumière-matière qui se doivent d'être ajoutées à un *ray tracer* pour obtenir toutes les subtilités de la réalisé.

Voici d'autres résultats où l'algorithme du *raytracing* tente d'imiter la réalité (générée avec SIMRenderer) :

<table>
<tr><th colspan="3">La réflexion</th></tr>
<tr>
<td></td>
<td></td>
<td>
</td>
</tr>
<tr><th colspan="3">La réfraction</th></tr>
<tr>
<td></td>
<td></td>
<td>
</td>
</tr>
</table>

Effet non supporté avec SIMRenderer : (Effet de caustique, avec *photon-mapping*)

<table>
<tr>
<td>
https://robert-space.fr/physique/caustique.htm</td>
<td>
https://www.cs.umd.edu/users/mount/Indep/Alisa_Chen/caustics.html</td>
</tr>
</table>