

RayTracer 4.0 - Modèles d'illumination

La touche finale du RayTracer : la collecte des informations de lumière/couleur

Les modèles issus de l'optique géométrique

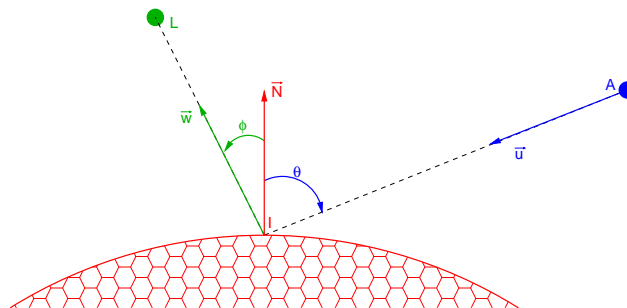
La physique de la lumière décrit de nombreux phénomènes d'interaction avec la matière. Nous nous contenterons ici de modéliser les situations les plus classiques basées sur quelques fondamentaux de l'optique géométrique et des modèles descriptifs (ou *phénoménologique*⁽¹⁾) simples : modèles de Lambert, Phong-Blinn, Whitted.

- les sources : elles sont ponctuelles, omnidirectionnelles et émettent de la lumière blanche uniforme d'intensité nominale 1.
- les objets : ils n'ont que des propriétés surfaciques simples : diffusion, réflexion, transmission.

On notera :

- $R_i = [A, \vec{u}]$ le rayon incident
- I, \vec{N} le point de contact et sa normale sur l'objet Ω
- θ l'angle d'incidence $(\vec{N}, -\vec{u})$
- L, \vec{w} la position de la source et la direction \vec{IL}
- ϕ l'angle (\vec{N}, \vec{w})

Tous les vecteurs présents $(\vec{u}, \vec{N}, \vec{w})$ sont supposés normés.



La modélisation peut se formaliser en 5 modèles complémentaires qui peuvent être traités indépendamment (ici pour une seule source lumineuse).

① la composante "ambiante"

Elle simule le fait que la source lumineuse produit, via des réflexions multiples que l'on ne modélise pas, une lumière ambiante qui baigne l'ensemble de la scène de manière uniforme. Ainsi tout point de la scène, même s'il n'est pas directement illuminé, reçoit une petite portion de lumière et en renvoie un peu, le reste étant "absorbé". On associe donc à l'objet un premier coefficient $\text{ambi} \in [0., 1.]$ (qui doit rester très faible $\text{ambi} \simeq 0.1$).

Le rayon "enregistre" simplement la couleur de l'objet Ω pondérée par le coefficient propre à l'objet :

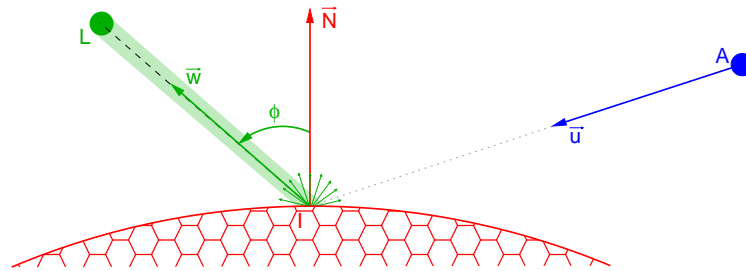
$$\text{Col}^{R_i} += \text{ambi} \times \text{Col}^{\Omega}.$$

⁽¹⁾ on donne une description d'un phénomène sans trop décrire les causes physiques qui le produisent. Ces modèles sont souvent un peu empiriques, ce qui peut les rendre difficile à utiliser.

② la composante "diffuse"

Comme la suivante, cette composante simule le fait que l'intensité lumineuse reçue par un point de la surface dépend de l'angle d'incidence ϕ de la lumière : pour $\phi = 0$ celle-ci est maximale, elle décroît jusqu'à $|\phi| = \pi/2$ puis est nulle (le point n'est pas éclairé). Cette quantité de lumière est donc dépendante de $\cos(\phi) = \vec{N} \cdot \vec{w}$.

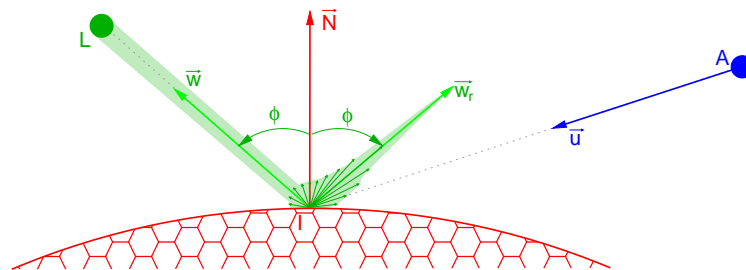
Si l'objet est mat, la lumière est en grande partie renvoyée par la surface dans toutes les directions et l'illumination ne dépend pas du point de vue (source du rayon A).



Le rayon "enregistre" simplement la couleur de l'objet Ω pondérée par l'angle d'incidence ϕ et le coefficient de diffusion diff propre à l'objet : $\text{Col}^{R_i} += \text{diff} \times (\vec{N} \cdot \vec{w}) \times \text{Col}^\Omega$.

③ la "tâche spéculaire"

Les objets peuvent être un peu mats et/ou brillants. Une surface "brillante" va renvoyer la lumière dans une direction privilégiée \vec{w}_r , symétrique à la direction d'incidence \vec{w} par rapport à la normale \vec{N} .

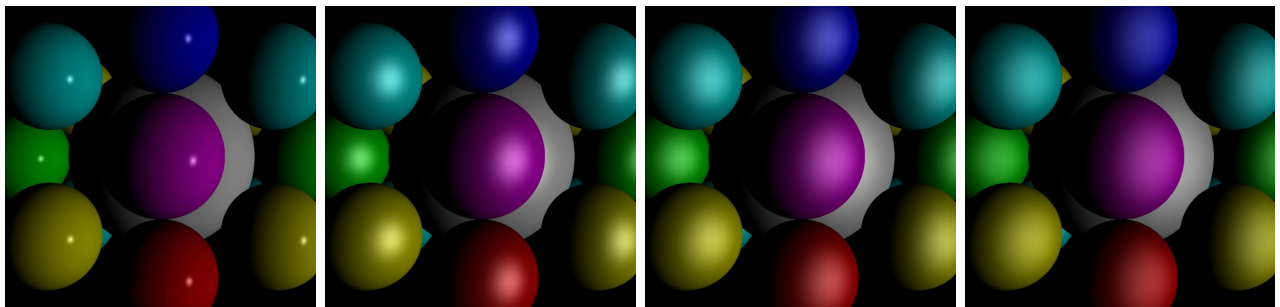


Il faut donc commencer par calculer la direction \vec{w}_r de la lumière réfléchi : par construction même, $\vec{w} + \vec{w}_r = 2 \times \cos(\phi) \times \vec{N}$, soit : $\vec{w}_r = 2 \times (\vec{N} \cdot \vec{w}) \times \vec{N} - \vec{w}$

La quantité de lumière "remontée" par le rayon $[A, \vec{u}]$ dépend alors de la position de A par rapport à la direction de réflexion \vec{w}_r : elle est maximale lorsque $\theta = \phi$ et décroît très rapidement dès que $|\theta - \phi|$ augmente. La couleur de la "tâche" de lumière est celle de la source (blanc, en général).

Pour simuler cette décroissance plus ou moins rapide, on introduit un "coefficient de brillance" propre à l'objet ($\text{shine} \in [0, 1]$) ainsi qu'un paramètre $\text{spec} \in [0, 1]$ qui caractérise la "brillance" de l'objet et on modélise la brillance par : $\text{Col}^{R_i} += \text{spec} \times \text{shine} \times (-\vec{u} \cdot \vec{w}_r)^{\frac{1}{1-\text{shine}}} \times \text{Col}^L$.

Pour une valeur $\text{diff} = \text{spec} = 0.5$ et des valeurs de shine de 0.99, 0.8, 0.5 et 0.2 on obtient



Attention : il s'agit là d'un modèle très empirique et de nombreuses variantes existent. En particulier, OpenGL n'utilise pas tout à fait le même (c'est un modèle surfacique). Rien ne vous empêche d'améliorer ce modèle....

④ réflexions spéculaires : l'effet miroir

Pour les objets brillants, en plus de l'effet de tâche spéculaire, on peut modéliser l'effet "miroir", c'est à dire les reflets des autres objets de la scène. C'est à partir de là que le RayTracer prend toute sa signification.

Il s'agit donc de modéliser, au niveau d'un point de surface I , la part de lumière provenant du reste de la scène et se propageant, après réflexion en I , dans la direction du rayon incident $R_i[A, \vec{u}]$. Selon un principe analogue au modèle précédent, découlant des lois de l'optique géométrique, cette lumière réfléchie provient d'une direction privilégiée \vec{u}_r , symétrique à la direction du rayon \vec{u} par rapport à la normale en I .

Le vecteur réfléchi se calcule comme précédemment (moyennant un **changement de signe**) :

$$\vec{u}_r = -2 \times (\vec{N} \bullet \vec{u}) \times \vec{N} + \vec{u}$$

☞ On va donc lancer un nouveau rayon R_r (rayon **réfléchi**) issu du point I , de direction \vec{u}_r .

☞ La fonction RayTracer devient donc **récursive** et il faut introduire un nouveau paramètre dans le système : un degré de récursivité maximal **rec**, qui permettra d'arrêter les réflexions au bout de quelques rebonds (4 ou 5 suffisent).

En sortie de la pile de récursivité, le rayon réfléchi R_r ramène, dans sa couleur, une composante qu'il convient d'ajouter à la couleur du rayon courant R_i . Là encore le paramètre **spec** $\in [0, 1]$, caractérise le degré de spécularité de l'objet Ω au point I .

La couleur du rayon incident intègre cette nouvelle composante : $Col^{R_i} += spec \times Col^{R_r}$.

⑤ réfraction : l'effet transparence

Le phénomène de transparence met en jeu un principe de l'optique géométrique, appelé *loi de Fresnel* qui indique que lorsqu'un rayon change de milieu de propagation, il est dévié de sa trajectoire selon un angle donné par le rapport des *indices optiques* de chaque milieu.

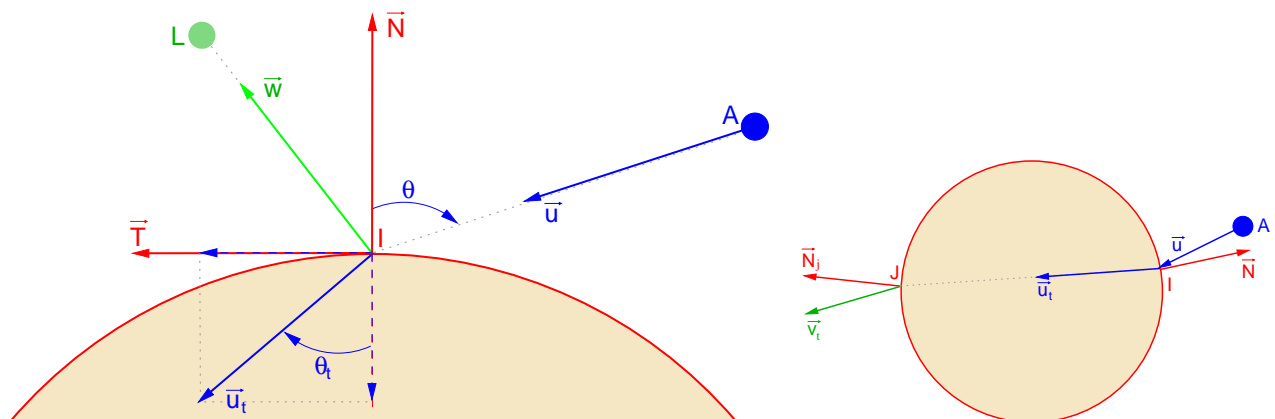
En prenant comme milieu de référence le vide, d'indice $n = 1$, la physique fournit quelques valeurs expérimentales :

<i>gaz</i>	air	1.00029	helium	1.00004	hydrogène	1.00013	CO ₂	1.00045
<i>liquides</i>	glace	1.31	eau	1.33333	ethanol	1.36	huile	1.47
<i>solides</i>	plexiglas	1.49	verres	1.52-1.66	diamant	2.417		

Concrètement, on considérera que le milieu ambiant est d'indice $n_1 = 1$, et que les divers matériaux transparents présentent des indices n_2 dans un intervalle $[1, 2.5]$.

Le calcul de la direction du rayon, issu de I , transmis à l'intérieur de l'objet (d'indice n_2) nécessite quelques intermédiaires.

Si θ est l'angle du rayon incident (avec la normale) et θ_t celui du rayon transmis, la loi de Fresnel dit que $n_1 \sin(\theta) = n_2 \sin(\theta_t)$



On introduit le vecteur \vec{T} , tangent en I et on décompose les directions (incidente et transmise) sur leurs composantes normales et tangentielles :

$$\vec{u} = \cos(\theta) \times \vec{N} + \sin(\theta) \times \vec{T} \text{ et } \vec{u}_t = \cos(\theta_t) \times \vec{N} + \sin(\theta_t) \times \vec{T}$$

$$\text{Soit } \vec{T} = \frac{1}{\sin(\theta)} \times (\vec{u} - \cos(\theta) \times \vec{N})$$

$$\text{Et finalement } \vec{u}_t = \cos(\theta_t) \times \vec{N} + \frac{\sin(\theta_t)}{\sin(\theta)} \times (\vec{u} - \cos(\theta) \times \vec{N}) = \left(\cos(\theta_t) - \frac{\sin(\theta_t)}{\sin(\theta)} \times \cos(\theta) \right) \times \vec{N} + \frac{\sin(\theta_t)}{\sin(\theta)} \times \vec{u}$$

Comme d'habitude on a $\cos(\theta) = \vec{N} \bullet \vec{u}$.

On reconnaît par ailleurs le rapport d'indices $\frac{\sin(\theta_t)}{\sin(\theta)} = \frac{n_1}{n_2}$ (la loi de Fresnel).

Il ne reste plus qu'à éliminer l'inconnue $\cos(\theta_t)$: $\cos(\theta_t) = \sqrt{1 - \sin^2(\theta_t)}$

$$\text{soit } \cos(\theta_t) = \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \times \sin^2(\theta)} = \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \times (1 - \cos^2(\theta))} = \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \times \left(1 - (\vec{N} \bullet \vec{u})^2\right)}$$

On a donc l'expression du vecteur transmis :

$$\vec{u}_t = \left(\sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \times \left(1 - (\vec{N} \bullet \vec{u})^2\right)} - \left(\frac{n_1}{n_2}\right) \times (\vec{N} \bullet \vec{u}) \right) \times \vec{N} + \left(\frac{n_1}{n_2}\right) \times \vec{u}$$

$$\text{En posant } \delta_n = \left(\frac{n_1}{n_2}\right) \text{ et } ps = \vec{N} \bullet \vec{u} : \vec{u}_t = \left(\sqrt{1 - \delta_n^2 \times (1 - ps^2)} - \delta_n \times ps \right) \times \vec{N} + \delta_n \times \vec{u}$$

✎ Ecrire une fonction `vecteur VctTransmis (vecteur \vec{u} , vecteur \vec{N} , reel δ_n)` qui effectue ce calcul.

Mais il ne s'agit que de la première étape : ce rayon transmis va se propager à l'intérieur de l'objet Ω , mais ne va rien rencontrer.

✎ En revanche il va ressortir de Ω en un point J qu'il faudra déterminer (avec une variante de la fonction d'intersection propre à l'objet canonique⁽²⁾).

Lorsque l'on a trouvé ce point de sortie J (et sa normale \vec{N}_j), il faut de nouveau déterminer une direction transmise \vec{v}_t par changement de milieu (on passe cette fois de l'indice n_2 à l'indice n_1).

Et on a enfin le nouveau rayon `Rt = [J, \vec{v}_t]` qui va se propager dans le milieu ambiant où :

$$\vec{v}_t = \text{VctTransmis} \left(\vec{u}_t, \vec{N}_j, \frac{n_2}{n_1} \right)$$

✎ Ce rayon R_t , renvoyé dans la scène par un nouvel appel récursif à la fonction `RayTracer`, va lui aussi apporter sa contribution à la couleur du rayon incident, moyennant une pondération par un dernier coefficient caractéristique du matériau : la transparence `alpha` $\in [0, 1]$

$$\text{Col}^{R_i} += \text{alpha} \times \text{Col}^{R_t} \text{ (bien sûr si } \text{alpha} = 0 \text{ on n'effectue pas tous ces calculs)}$$

Au final, le modèle d'illumination standard du lancer de rayon se modélise en 5 composantes et la nature du matériau d'un objet est caractérisé par 6 paramètres `ambi, diff, spec, shine, alpha, n` (tous dans $[0, 1]$ sauf l'indice de transparence $n \in [1, 2.5]$).

Dans le cas où l'objet possède toutes les propriétés, la couleur finalement remontée par le rayon R_i est :

$$\text{Col}^{R_i} = \text{ambi} \times \text{Col}^\Omega + \text{diff} \times (\vec{N} \bullet \vec{w}) \times \text{Col}^\Omega + \text{spec} \times \text{shine} \times (-\vec{u} \bullet \vec{w}_r)^{\frac{1}{1-\text{shine}}} \times \text{Col}^L + \text{spec} \times \text{Col}^{R_r} + \text{alpha} \times \text{Col}^{R_t}.$$

Encore une fois, il s'agit là d'une somme de modèles plus ou moins empiriques, dont on peut trouver plusieurs versions et qui restent largement adaptables.

Le dernier point qu'il resterait à traiter est celui des ombres. C'est assez simple tant qu'il n'y a pas d'objets transparents....

⁽²⁾ la source du rayon I est sur Ω et l'intersection J cherchée est le point de sortie