

Rendu réaliste

Contenu

1	Modèles d'illumination	3
1.1	Lumière ambiante	3
1.2	Réflexion diffuse	3
1.3	Réflexion spéculaire	8
2	Modèles d'ombrage	11
2.1	Ombrage plat	11
2.2	Ombrage de Gouraud	12
2.3	Ombrage de Phong	14
3	Méthodes globales	16
3.1	Lancer de rayons	17
3.2	Radiosité	22

Dans cette partie, nous abordons le problème de l'ombrage des surfaces de la scène traitée en fonction de leurs positions, orientations et caractéristiques ainsi que de celles des sources lumineuses présentes dans la scène. Nous distinguerons par la suite :

- le modèle d'illumination qui permet de déterminer la couleur d'un point de la surface,
- le modèle d'ombrage qui détermine la manière d'appliquer le modèle d'illumination sur les surfaces :
 - par pixel,
 - par interpolation des valeurs en certains pixels.
 - ...

Les méthodes existantes pour effectuer un rendu différent sur le modèle d'illumination choisi : modèles sans interaction entre les objets (modèles simples) ou avec interaction (méthodes globales) et sur le modèle d'ombrage (Gouraud, Phong).

1 Modèles d'illumination

Les modèles d'illumination utilisés dans le domaine du graphisme sont inspirés de modèles physiques simplifiés et adaptés à l'usage informatique. La validation de ces modèles découlent autant de l'usage pratique que d'un raisonnement mathématique. Dans cette partie, nous allons voir des modèles d'illumination simples ne prenant pas en compte les interactions entre objets mais seulement les interactions entre une surface et les sources lumineuses. Ces modèles sont largement utilisés car ils produisent des résultats au réalisme satisfaisant dans de nombreux cas.

1.1 Lumière ambiante

Le modèle le plus simple consiste à prendre en compte une source lumineuse non ponctuelle qui émet de manière constante dans toutes les directions et sur toutes les surfaces une lumière d'intensité I_a . Alors pour un point P de la surface, l'intensité lumineuse sera :

$$I_P = \rho_a I_a,$$

qui est constante en tous points de la surface, et où ρ_a est un facteur qui détermine la quantité de lumière ambiante réfléchiée par la surface et est fonction des propriétés matérielles de la surface ($0 \leq \rho_a \leq 1$).

Ce modèle d'illumination n'est pas utilisé tout seul. Il présente en effet peu d'intérêts par lui-même. Il est utilisé en conjonction avec d'autres modèles pour permettre d'illuminer certaines parties d'une surface qui ne le sont pas autrement.

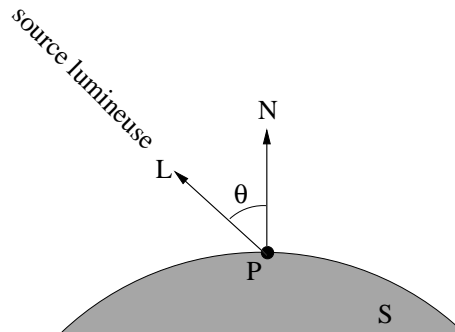
1.2 Réflexion diffuse

Nous considérons une source lumineuse ponctuelle qui émet de manière constante dans toutes les directions. L'intensité lumineuse en un point de la surface varie alors en fonction de la position de la source lumineuse et de sa distance au point de la surface.

Les surfaces Lambertiennes

Les surfaces mates (neige, papier) présentent une réflexion diffuse (on parle aussi de réflexion Lambertienne). Ces surfaces apparaissent comme également brillante quelle que soit la direction d'observation. Ceci est dû au fait que l'intensité en un point de la surface dépend uniquement de l'angle entre la normale à la surface et

la direction du point à la source lumineuse.



L'équation d'illumination est donc :

$$I_P = \rho_d I_l \cos \theta,$$

soit :

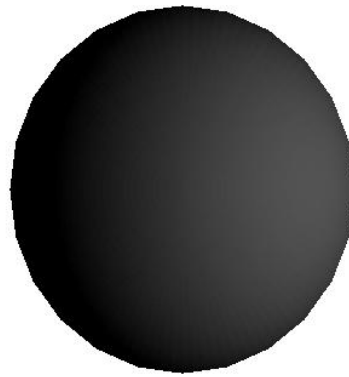
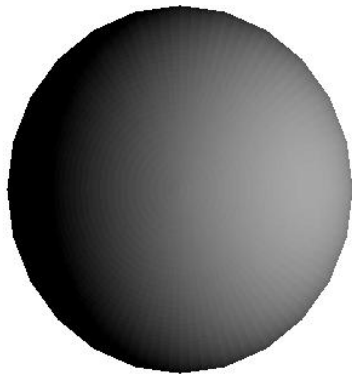
$$I_P = \rho_d I_l (N_P \cdot L_P),$$

où I_l est l'intensité de la source lumineuse ponctuelle; ρ_d le coefficient de réflexion diffuse de la surface (propriété matérielle : $0 \leq \rho_d \leq 1$); N_P la normale à la surface au point P ; L_P la direction du point P à la source lumineuse.

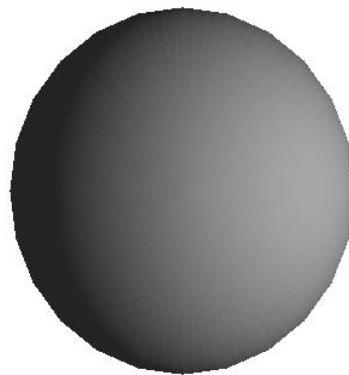
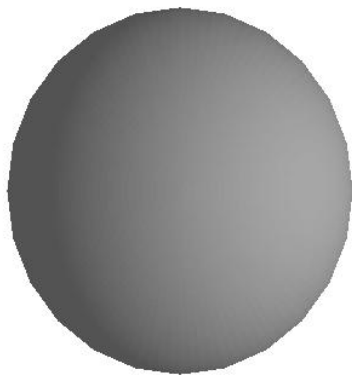
- ☞ L'angle θ doit être compris entre 0 et $\pi/2$.
- ☞ Les normales à la surface doivent être connues.
- ☞ Si la source lumineuse est très éloignée alors la direction L_P est constante et on parle de source lumineuse directionnelle.
- ☞ Certaines parties de la surface peuvent ne pas être éclairées.

En réponse au dernier point, on rajoute un terme prenant en compte la lumière ambiante :

$$I_P = \rho_a I_a + \rho_d I_l (N_P \cdot L_P),$$



Réflexion diffuse : $I_l = 1$, $\rho_d = 1$ et $\rho_d = 0.5$



*Lumière ambiante et réflexion diffuse : $I_a = I_l = 1$, $\rho_a = 0.5$, $\rho_d = 0.5$ et
 $\rho_a = 0.2$, $\rho_d = 0.8$*

Atténuation de la source lumineuse

Pour distinguer les projections de surfaces ayant même caractéristiques matérielles et même orientation, on introduit un coefficient d'atténuation f_d :

$$I_P = \rho_a I_a + f_d \rho_d I_l(N_P \cdot L_P),$$

Le coefficient d'atténuation doit prendre en compte la distance à la source lumineuse. Soit $dist$ la distance du point de la surface considéré à la source lumineuse, un modèle général d'atténuation est alors :

$$f_d = \min\left(\frac{1}{c_1 + c_2 dist + c_3 dist^2}, 1\right),$$

où c_1 , c_2 et c_3 sont des coefficient associés à la source lumineuse.

☞ f_d est limité à 1 pour assurer une atténuation de l'intensité.

☞ c_1 et $c_2 dist$ servent à modérer les variations de f_d lorsque la source lumineuse est proche de la surface.

Lumières et surface colorées

Nous avons tenu compte jusqu'à présent de lumières et de surfaces monochromatiques. Supposons que la surface et la lumière aient des composantes (R,G,B) : (S_R, S_G, S_B) et (I_R, I_G, I_B) . Alors l'illumination en un point de la surface se fait suivant la composante R selon :

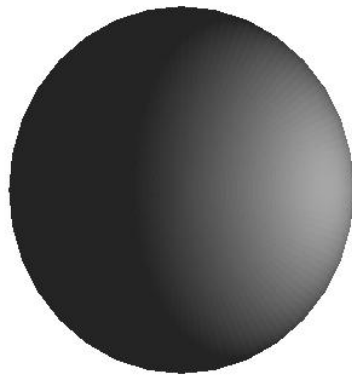
$$I_P^R = \rho_a S^R I_a^R + f_d \rho_d S^R I_l^R(N_P \cdot L_P).$$

Les autres composantes se calculent de la même manière. Ce modèle peut-être améliorer en prenant non pas trois valeurs du spectre de couleurs mais plus.

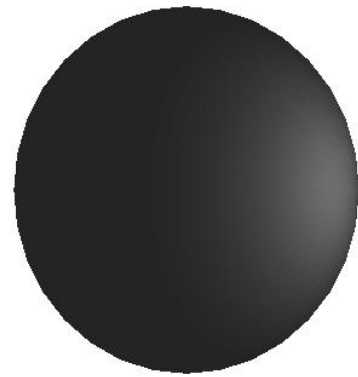
Plusieurs sources de lumière

Si plusieurs sources de lumière sont présentes dans la scène, leurs contributions au point P s'ajoutent, à savoir pour la composante rouge :

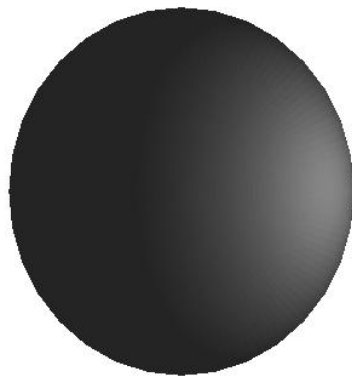
$$I_P^R = \rho_a S^R I_a^R + \sum_i f_{di} \rho_d S^R I_{li}^R(N_P \cdot L_{iP}).$$



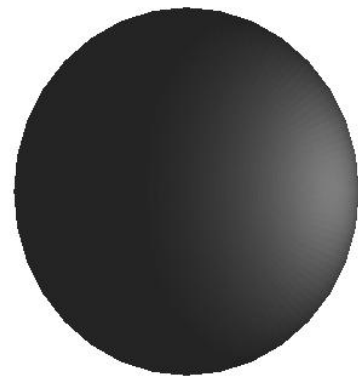
(a)



(b)



(c)

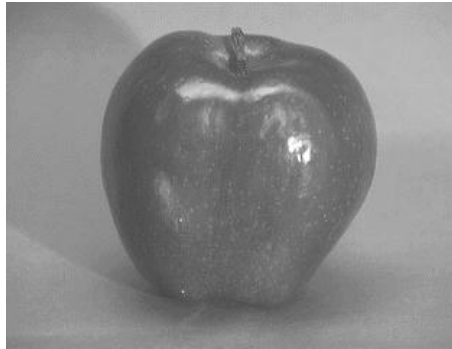


(d)

Figure 1: *Atténuation* : $\rho_a = 0.2$, $\rho_d = 0.8$, $dist = 3$, (a) $c_1 = c_2 = c_3 = 0$, (b) $c_1 = c_2 = 0, c_3 = 1$, (c) $c_1 = c_3 = 0, c_2 = 1$, (d) $c_1 = c_2 = 0.25, c_3 = 0.5$

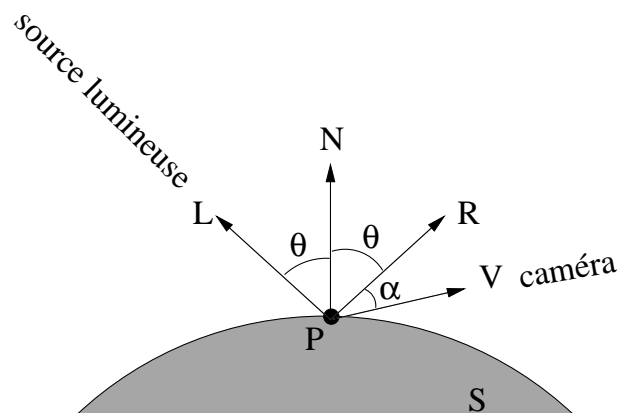
1.3 Réflexion spéculaire

La réflexion spéculaire peut s'observer sur les surfaces brillantes (pomme,) et est caractérisée par la présence de parties claires sur la surface (highlights). Ces parties claires se déplacent sur la surface en fonction du point d'observation et reflètent plus la lumière de la source lumineuse que celle de la surface.



Phong [1975] a proposé un modèle de réflexion spéculaire très populaire. L'idée est que la réflexion est importante lorsque l'angle α entre la direction d'observation du point de la surface V et la direction de réflexion R (symétrique de la direction L_P par rapport à N_P) est faible. Cette réflexion diminue de façon importante lorsque l'angle augmente. L'équation d'illumination pour la composante rouge s'écrit :

$$I_P^R = \rho_a S^R I_a^R + f_d I_l^R [\rho_d S^R (N_P \cdot L_P) + \rho_s \cos^n \alpha].$$



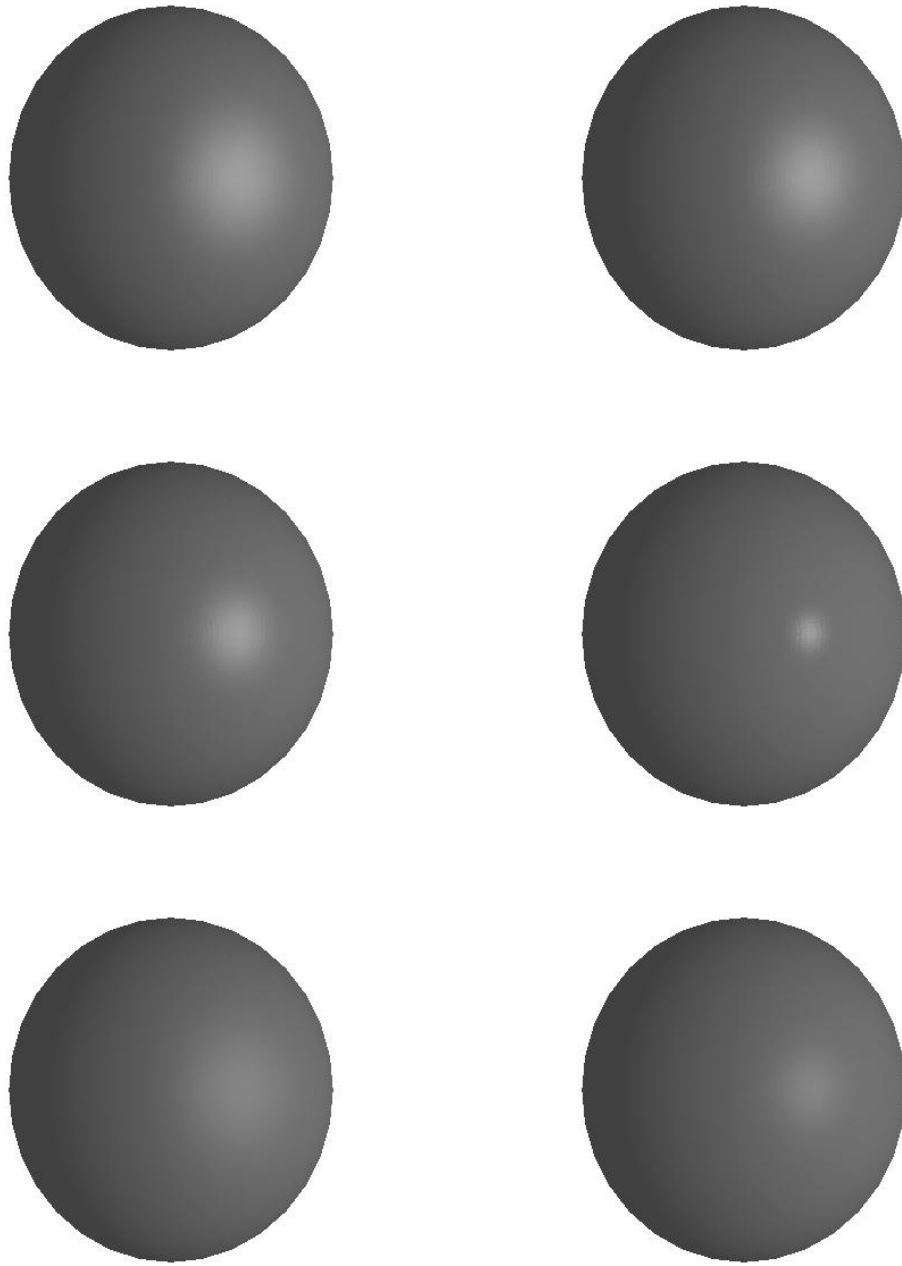


Figure 2: *Réflexion spéculaire* : $\rho_a = 0.4$, $\rho_d = 0.3$, (a) $\rho_s = 0.3, n = 4$, (b) $\rho_s = 0.3, n = 6$, (c) $\rho_s = 0.3, n = 10$, (d) $\rho_s = 0.3, n = 50$, (e) $\rho_s = 0.15, n = 4$, (f) $\rho_s = 0.15, n = 10$

Le modèle proposé par Phong peut cependant être amélioré en prenant en compte une *couleur spéculaire* de la surface (S_s^R, S_s^G, S_s^B) . La réflexion dans le modèle de Phong est en effet fonction des propriétés de la source lumineuse mais non de la surface. Soit :

$$I_P^R = \rho_a S^R I_a^R + f_d I_l^R [\rho_d S^R (N_P \cdot L_P) + \rho_s S_s^R \cos^n \alpha].$$

Exercices

1. Comment calculer la direction de réflexion R symétrique de la direction du point de la surface à la source lumineuse L_P par rapport à la normale à la surface N_P ?
2. Pour une facette polygonale (plane) éclairée suivant l'équation de Phong et pour une source lumineuse à l'infini, est-ce que l'intensité lumineuse varie sur la facette polygonale ? de quelle manière ?
3. Même question lorsque la projection est orthographique.

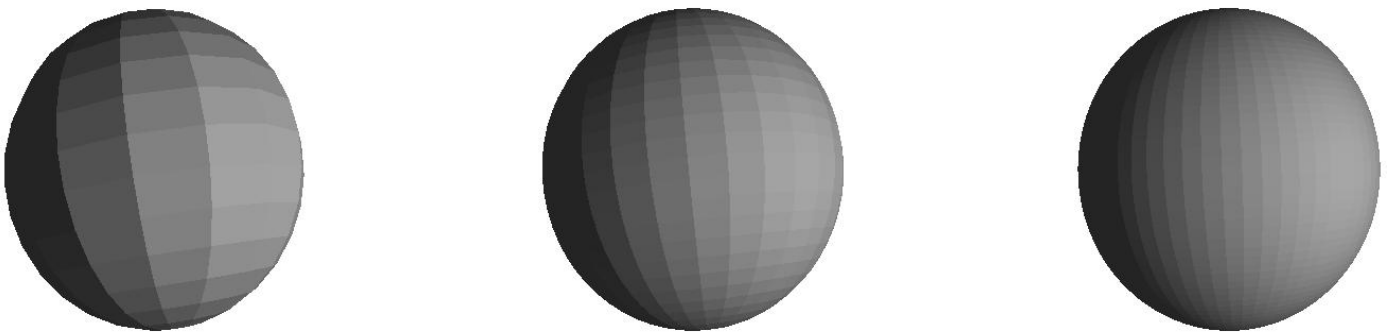
2 Modèles d'ombrage

La solution la plus simple pour effectuer le rendu d'une surface consiste à calculer l'illumination en chaque point visible de la surface. Cette méthode naïve est extrêmement coûteuse en temps. Dans cette partie, nous allons voir différentes méthodes permettant de diminuer le coût en temps en n'effectuant le calcul d'illumination qu'en un nombre limité de points.

2.1 Ombrage plat

La méthode d'ombrage la plus simple pour les facettes polygonales est l'ombrage plat (ou constant). L'idée est de calculer une seule valeur d'illumination pour l'ensemble de la facette. Par exemple au point milieu de la facette en prenant pour normale à la surface celle du plan contenant la facette. Cette approche est valide par rapport au modèles d'illumination vus précédemment lorsque :

- la source lumineuse est à l'infini,
- la projection est orthographique,
- la surface est composée de facettes polygonales uniquement.

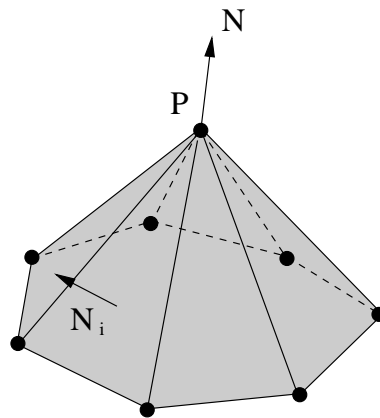


Ombrage plat de la sphère pour : 16×16 facettes, 32×32 et 64×64

2.2 Ombrage de Gouraud

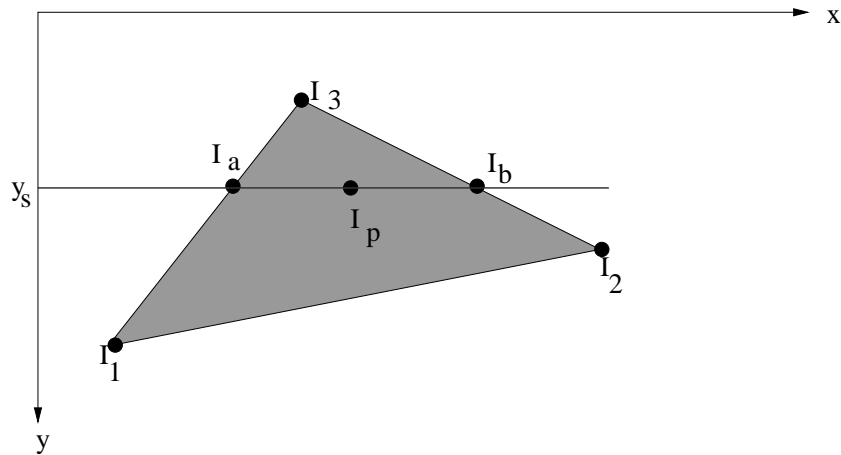
La méthode développée par Gouraud [1971] élimine les discontinuités d'intensité sur une facette polygonale par interpolation des valeurs d'intensité aux sommets de la facette. Cette méthode est largement utilisée et se retrouve dans la majorité des matériels graphiques existants (bibliothèques, cartes graphiques).

Cette méthode requiert la connaissance de la normale à la surface aux sommets des facettes polygonales. Ces normales peuvent être soit données soit déterminées par moyennage des normales des facettes partageant un sommet P :



$$N_P = \sum N_i / |\sum N_i|.$$

Lorsque les normales sont connues, les intensités aux sommets des facettes polygonales sont calculées. L'interpolation peut ensuite être effectuée à l'aide de l'algorithme de balayage de ligne utilisée pour le remplissage de polygone et le z-buffer.



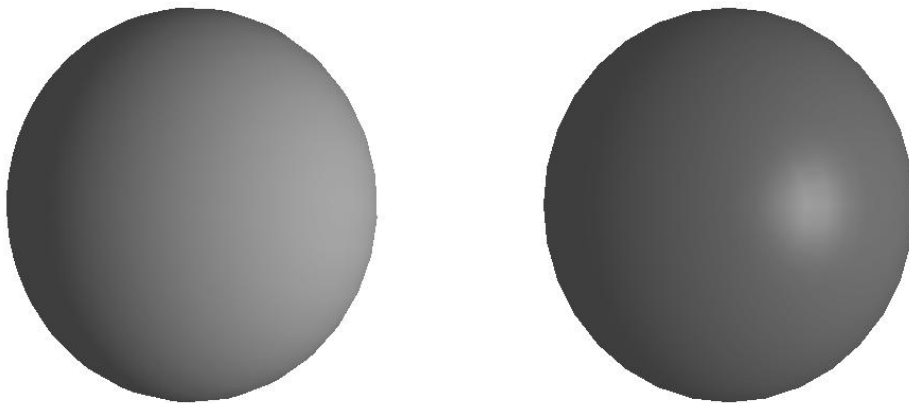
$$I_a = I_3 - (I_3 - I_1)(y_3 - y_s)/(y_3 - y_1),$$

$$I_b = I_3 - (I_3 - I_2)(y_3 - y_s)/(y_3 - y_2),$$

$$I_p = I_b - (I_b - I_a)(x_b - x_p)/(x_b - x_a).$$

Exercice

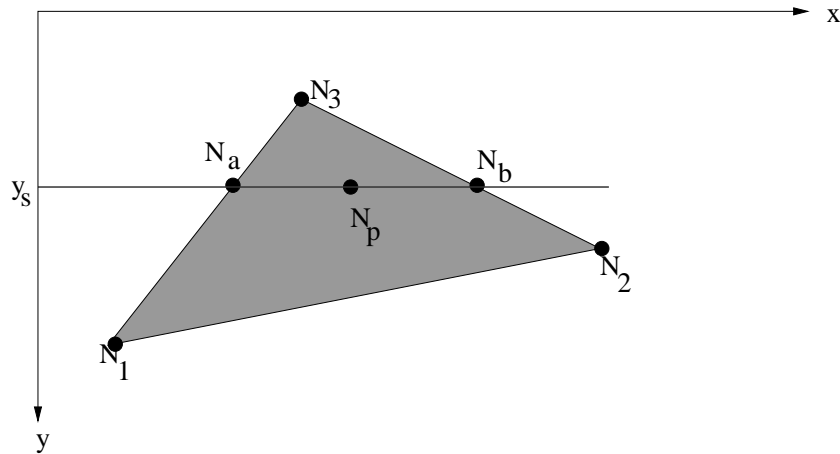
Modifiez l'algorithme de balayage de ligne de manière à prendre en compte l'ombrage de Gouraud et le z-buffer.



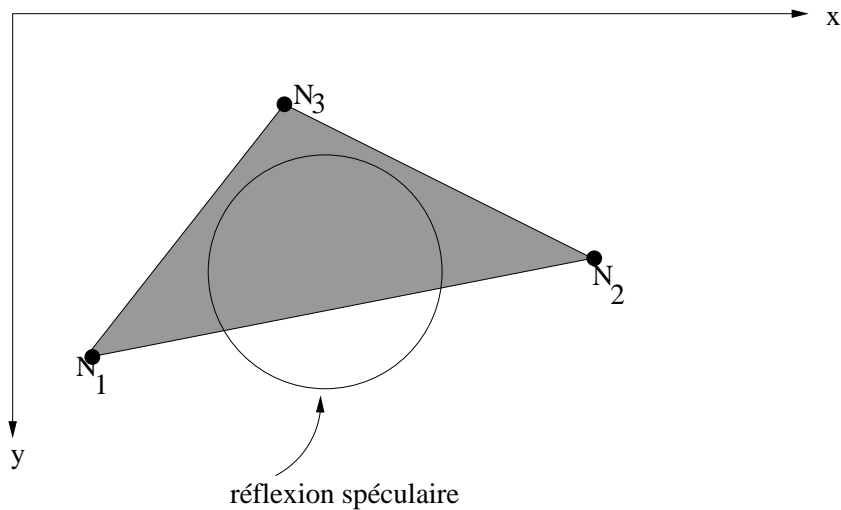
Ombrage de Gouraud sur la sphère 32×32 : (a) réflexion diffuse, (b) réflexion spéculaire.

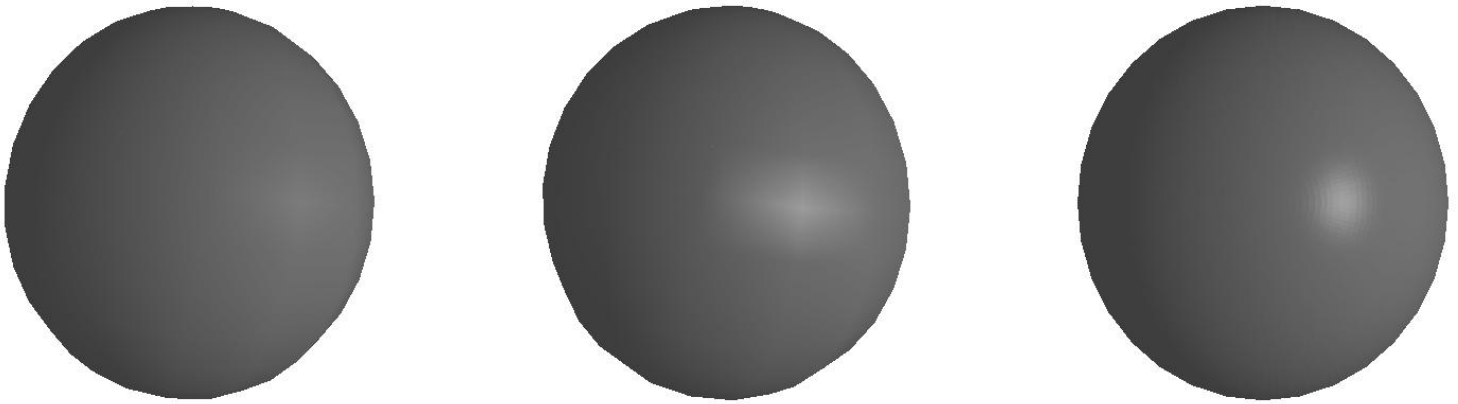
2.3 Ombrage de Phong

L'ombrage de Phong [1975] consiste à déterminer la normale en un point d'une facette polygonale par interpolation des normales aux sommets de cette facette.



L'intérêt de cette approche par rapport à l'ombrage de Gouraud réside principalement dans sa capacité à traiter les réflexions spéculaires. Gouraud ne permet pas, en effet, de prendre en compte les réflexions spéculaires lorsque celles-ci sont localisées au centre d'une facette.





(a),(b) modèle d'illumination de Phong et ombrage de Gouraud : deux vues différentes ; (c) modèle d'illumination de Phong et ombrage de Phong.

- ☞ L'ombrage de Phong est d'une manière générale meilleur que celui de Gouraud car l'interpolation est effectuée sur les normales et non les intensités. Cela même pour un modèle d'illumination sans réflexion spéculaire.
- ☞ Augmente le coût du rendu.
- ☞ Disponible dans beaucoup de matériels graphiques.

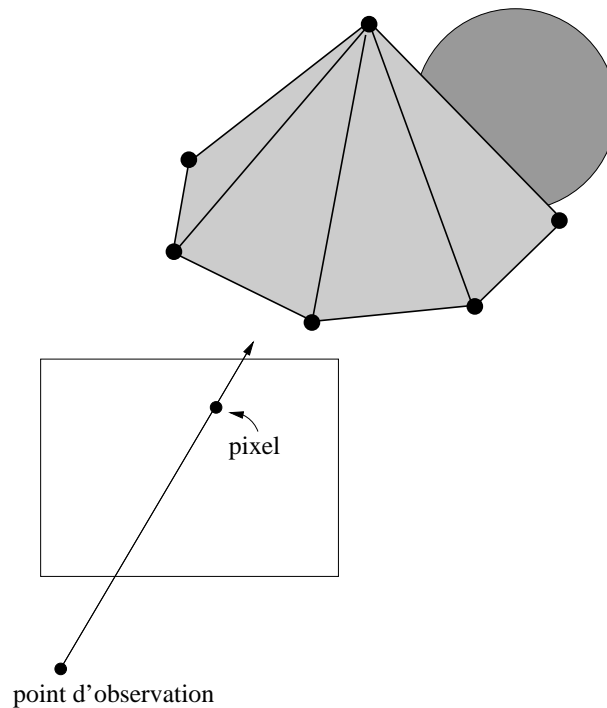
3 Méthodes globales

Les méthodes précédentes permettent d'effectuer un rendu sur des surfaces directement éclairées par une source lumineuse. Elles ne permettent pas de prendre en compte les interactions entre objets : réflexions d'une surface sur une autre, occultation de la lumière par une surface (ombres). Ces interactions nécessitent un modèle d'illumination global. Deux classe de méthodes existent qui sont basées sur des modèles d'illumination globaux :

1. La première classe concerne les algorithmes de lancer de rayons qui remplacent les illuminations locales ambiantes, diffuse et spéculaire par un modèle à base de réflexion spéculaire et transmission globale.
2. La deuxième classe concerne les méthodes de radiosité qui modélisent toutes les interactions entre objets par des sources lumineuses dans une étape préliminaire. Une image est ensuite déterminée pour un point de vue donné par des algorithmes classiques d'élimination de parties cachées et d'interpolation d'ombrages.

3.1 Lancer de rayons

Les algorithmes de lancer de rayons (ray casting, ray tracing) permettent de déterminer l'illumination ainsi que la visibilité des surfaces en traçant des rayons imaginaires du point d'observation vers la scène. Dans sa version la plus simple, un rayon est lancé pour chaque pixel de l'image, et la couleur du pixel est déterminé à partir de l'illumination du point de la surface intersectée par le rayon qui est la plus proche de l'image. On peut pour cela utiliser les modèles d'illuminations locaux présentés précédemment.



Une approche plus globale [1980] étend le lancer de rayons de manière à inclure les réflexions spéculaires globales ainsi que les réfractions. Pour chaque pixel de l'image, un premier rayon émis du point d'observation est généré. Ensuite, au point P de la surface touchée par ce rayon, trois nouveaux rayons sont générés (voir la figure 3) :

1. un rayon réfléchi R symétriquement à la normale à la surface en P ;
2. un rayon d'ombre du point de la surface vers la source lumineuse pour vérifier si une autre surface n'occulte pas la source lumineuse;
3. éventuellement un rayon transmis T , suivant les lois de la réfraction, si la surface est transparente.

Chaque nouveau rayon réfléchi ou transmis poursuit sa course dans la scène et est à l'origine de trois nouveaux rayons lorsqu'il touche une surface. Ce processus récursif s'arrête lorsque : le rayon généré touche la source lumineuse ou le rayon sort de la scène ou bien une profondeur limite dans le processus récursif est atteinte.

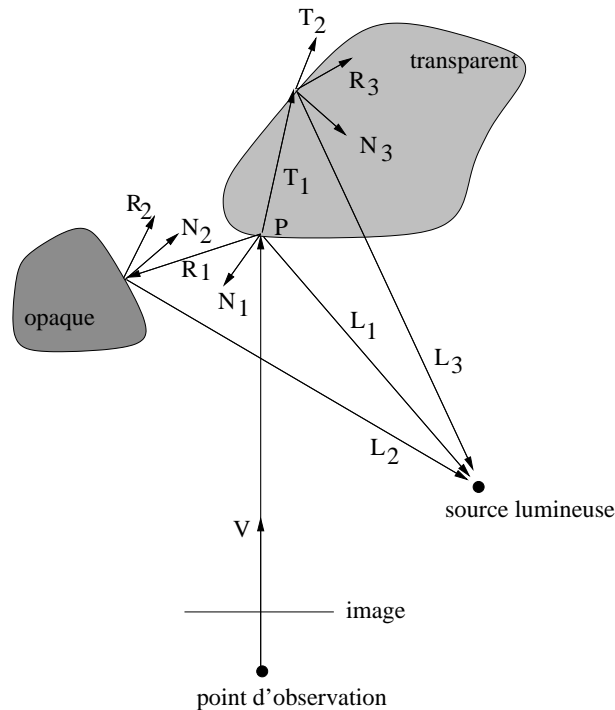


Figure 3: Lancer de rayons.

L'équation d'illumination au point P de la surface fait intervenir le modèle de Phong vu en cours et s'écrit, pour une composante rouge, verte ou bleu (le signe somme concerne les différentes sources lumineuses) :

$$I_P = \rho_a S I_a + \rho_r I_r + \rho_t I_t + \sum X(P) f_d I_l [\rho_d S (N_P \cdot L_P) + \rho_s \cos^n(R_P \cdot L_P)].$$

où :

- S est l'intensité de la surface pour la composante concernée ;
- I_a est l'intensité de la source lumineuse ambiante ;
- I_l est l'intensité de la source ponctuelle/directionnelle ;
- I_r est l'intensité du rayon réfléchi, la direction du rayon réfléchi R étant :

$$R = V - 2(N \cdot V)N,$$

où V est la direction du rayon source (voir figure 4) ;

- I_t est l'intensité du rayon transmis, la direction du rayon transmis T étant (voir figure 4):

$$T = \frac{n_1}{n_2}V - (\cos \theta_t + \frac{n_1}{n_2}(V \cdot N))N,$$

avec :

$$\frac{\sin \theta_t}{\sin \theta_i} = \frac{n_1}{n_2},$$

où n_1 et n_2 sont les indices de réfraction des matériaux considérés (air $\simeq 1$).

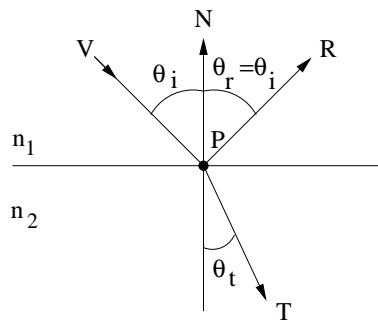


Figure 4: La réfraction.

- ρ_r, ρ_t sont des coefficients compris entre 0 et 1 et tel que $\rho_r + \rho_t = 1$;
- $X(P)$ est tel que :

$$\begin{cases} X(P) = 1 & \text{si le rayon d'ombre de P vers la source lumineuse } (L_1 \\ & \text{dans la figure 3) n'est pas bloqué;} \\ X(P) = 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

Quelques remarques :

- ☞ Pour éviter les problèmes locaux de précision (aliasing), plusieurs rayons sont générés pour un seul pixel. Ces rayons peuvent être uniformément répartis dans l'image ou distribués de manière stochastique (lancer de rayons distribué).
- ☞ Il est possible de prendre en compte une atténuation de l'intensité lumineuse en fonction de la distance à la source lumineuse (voir le cours sur le rendu).
- ☞ La méthode présentée suppose implicitement un éclairage direct des objets. Or dans le cas de surfaces purement spéculaires (un miroir), le reflet d'une source lumineuse constitue une deuxième source lumineuse non prise en compte. Une solution consiste alors à effectuer un lancer de rayons *arrière* : de la source lumineuse vers le point d'observation, pour déterminer les sources lumineuses indirectes.

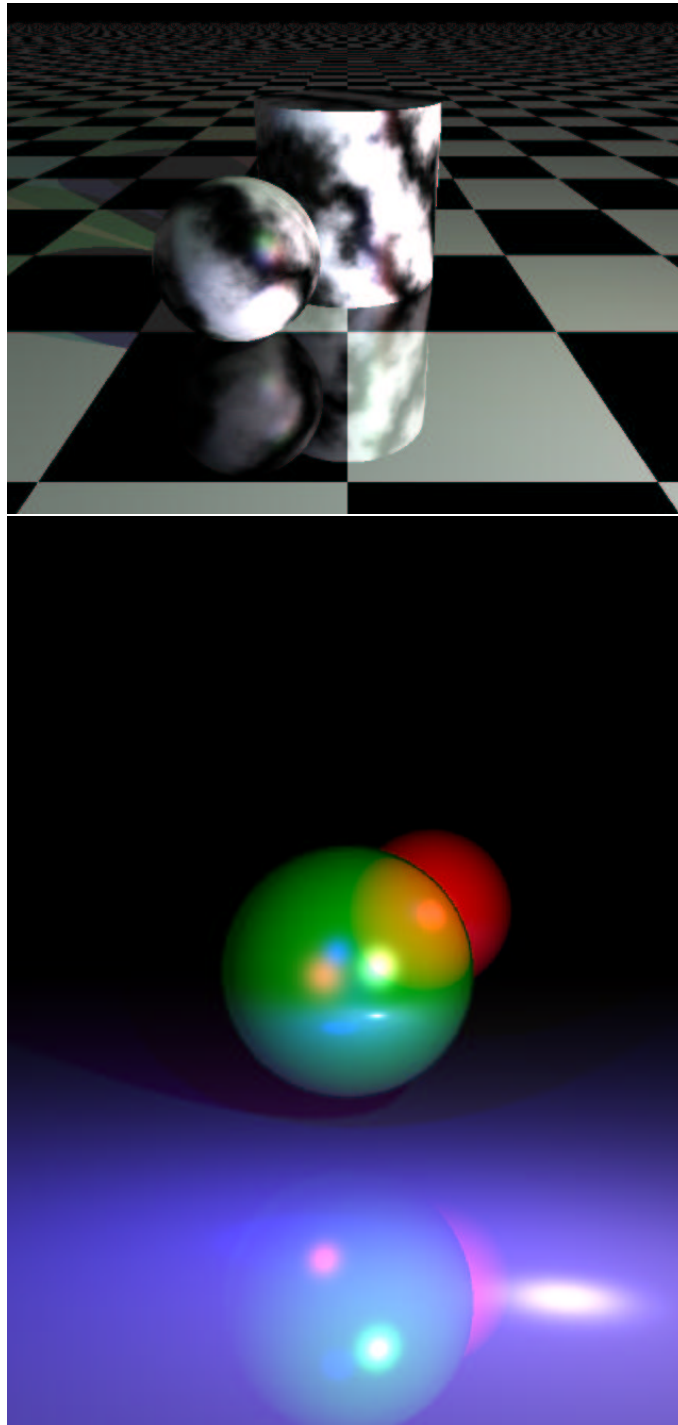


Figure 5: Projets de Maîtrise UJF 2001

3.2 Radiosité

Les méthodes de radiosité [1984] apportent une modélisation plus précise des inter-réflexions entre objets. Toutes les énergies lumineuses émises ou réfléchies par chaque surface sont prises en compte. La radiosité caractérise le taux d'énergie quittant une surface et correspond à la somme des taux d'émission de la surface, de réflexion et de transmission par d'autres surfaces. Une différence majeure avec les méthodes de lancer de rayons est que ces méthodes pré-calculent les interactions lumineuses pour un environnement donné indépendamment du point de vue. Les images pour différents points de vues sont générées ensuite.

L'équation de radiosité :

L'environnement étant échantillonné sous la forme de patchs discrets, de taille finie, émettant et réfléchissant la lumière uniformément sur leurs surface. En considérant chaque patch comme étant une surface Lambertienne, alors :

$$B_i = E_i + \rho_i \sum_j B_j F_{ji} A_j / A_i,$$

où :

- B_i, B_j sont les radiosités des patchs i et j (exprimée en W/m^2).
- E_i est le taux d'émission du patch i .
- F_{ji} est le facteur de forme qui caractérise la proportion d'énergie quittant le patch j qui arrive sur le patch i .
- A_i et A_j sont les surfaces des patchs i et j .

Cette équation caractérise le fait que l'énergie quittant un élément de surface est la somme des lumières émises et réfléchies.

En écrivant cette équation pour l'ensemble des patchs constituant la scène traitée, on débouche sur un système d'équations linéaires ayant les B_i pour inconnues. Ce système d'équations est résolu pour chaque longueur d'onde traitée.

☞ Le calcul des facteurs de forme est une opération complexe (occultations, ...).

