Le rendu réaliste, modèles visuels

Michel Buffa, UNSA, UFR Sciences, 1996

1 Introduction

Dans cette partie du cours, les principaux algorithmes de calcul de l'éclairement des objets constitutifs d'une scène sont présentés. Ils permettent de calculer la couleur des points d'une scène en prenant en considération à la fois un ensemble de sources de lumières mais aussi les caractéristiques des surfaces éclairées.

2 Les modèles d'éclairement

Le modèle d'éclairement le plus général est dû à Phong. Il suppose que l'intensité lumineuse d'un point P est fonction de l'énergie réémise par ce point après qu'il ait été touché par la lumière.

$$I_p = I_a + I_d + I_s \qquad \text{(EQ 1)}$$

La première composante I_a représente l'énergie due à la lumière ambiante. On peut imaginer la lumière ambiante comme une source de lumière diffuse, non directionnelle, résultant de la réflexion multiple de la lumière sur l'ensemble des surfaces présentes dans un environnement. Cette énergie moyenne est perçue de la même manière par tous les points de toutes les facettes.
Les deux autres composantes sont dues à l'existence de sources de lumières (lampes, spots, etc...) qui éclairent la scène. I_d représente l'énergie due à la réflexion diffuse, I_s représente l'énergie due à la réflexion spéculaire.
On peut écrire l'équation (EQ 1) sous une forme plus détaillée :

$$I_p = k_a \cdot C_a + k_d \cdot \sum_{i=1}^{n} C_{d_j} + k_s \cdot \sum_{i=1}^{n} C_{s_j} \qquad \text{(EQ 2)}$$

Dans cette équation, n représente le nombre de sources de lumières autres que la lumière ambiante, k_a, K_d, k_s, compris entre 0 et 1, les cœfficients d'atténuation de la lumière par les surfaces, et C_a, C_d, C_s les cœfficients dûs à la lumière ambiante, diffuse et spéculaire. Le détails est donné dans ce qui suit.

2.1. Cœfficient dû à la lumière ambiante

$$C_a = coul_d(p) \cdot I_A \qquad \text{(EQ 3)}$$

Dans cette équation, $coul_d(p)$ représente la couleur de la surface au point p. La couleur $coul_d(p)$ est comprise entre 0 et 1 dans toutes les équations et représente une valeur correspondant à une couleur RGB. Nous verrons qu'un modèle de surface peut comporter deux couleurs, une couleur "normale" qui intervient lors du calcul de l'intensité du point en fonction de la lumière diffuse (la lumière ambiante est une forme particulière de lumière diffuse, indépendante de la position de la source), et une couleur "spéculaire" qui caractérise la couleur des reflets.
I_A est l'intensité de la lumière ambiante, comprise entre 0 et 1.

2.2. Cœfficient dû à la lumière diffusée

$$C_{d_j} = coul_d(p) \cdot I_j \cdot (\vec{n} \cdot \vec{l_j}) \qquad \text{(EQ 4)}$$

Dans cette équation, I_j représente l'intensité de la source de lumière j. Le produit scalaire $\vec{n} \cdot \vec{l_j}$ entre la normale à la surface $\vec{n}$, de norme 1 et la direction de la source de lumière $\vec{l_j}$ (également normée) représente le cosinus de l'angle α formé par ces deux vecteurs (Figure 1).

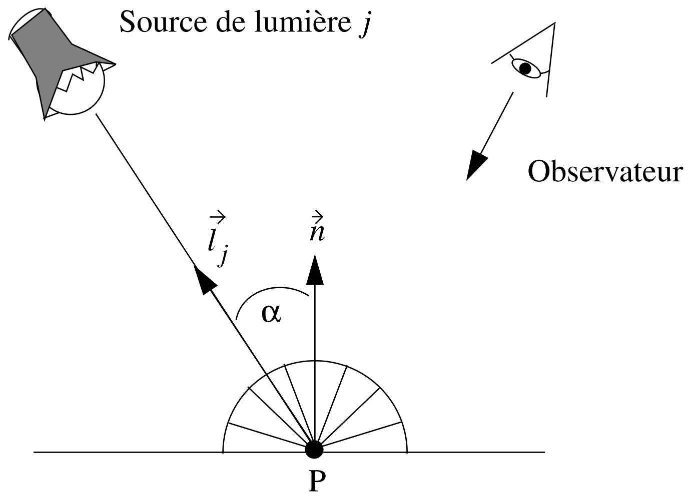


Figure 1 Réflexion diffuse par un diffuseur parfait

On appelle ce modèle un diffuseur parfait, ou diffuseur Lambertien, car l'énergie reçue est réémise dans toutes les directions. L'impression d'éclairement due à un diffuseur parfait est la même dans toutes les directions situées d'un même côté de la normale à la facette. Elle est *indépendante de la position de l'observateur* qui reçoit toujours l'énergie I_j. Cette dernière ne dépend que de la position de la source et de la surface.

La réflexion diffuse donne *un aspect mat* à la surface. Physiquement, la lumière pénètre sous la surface puis est réémise, ce qui explique la prise en compte de la couleur $coul_d(p)$ du point sur la surface, pour calculer C_{d_j}.

L'équation (EQ 3) est un cas particulier de l'équation (EQ 4). En effet, la lumière ambiante est modélisée comme une réflexion diffuse indépendante de la position de la source. Le terme en $\vec{n} \cdot \vec{l}$ n'apparaît donc pas.

2.3. Cœfficient dû à la lumière spéculaire

$$C_{s_j} = coul_s(p) \cdot I_j \cdot (\vec{r} \cdot \vec{s})^m \qquad \text{(EQ 5)}$$

Dans cette équation, I_j est le même que celui de l'équation (EQ 4). La surface est observée depuis une position de l'espace qui se trouve le long de la direction $\vec{s}$ partant de la surface (voir Figure 2).

La réflexion spéculaire se produit lorsque la lumière est réfléchie sans pénétrer la surface. Un réflecteur *parfait* donne *un aspect brillant* aux surfaces et produit des reflets qui sont de la couleur de la source de lumière. Par exemple, dans le cas d'une pomme rouge éclairée par une lumière blanche, l'intensité lumineuse maximale observée est de couleur blanche -celle de la source lumineuse et non celle de l'objet- et

son emplacement sur l'objet dépend de la position de l'observateur.
Dans le cas d'un miroir parfait, la lumière reçue par une surface, provenant de la source de lumière j se trouvant dans la direction $\vec{l}_j$, est réfléchie seulement dans la direction $\vec{r}$ symétrique de $\vec{l}_j$ par rapport à la normale à la surface $\vec{n}$. Un observateur ne perçoit parfaitement cette lumière que s'il se place dans la direction $\vec{r}$, cependant, s'il s'éloigne de $\vec{r}$ en se décalant d'un angle β, il percevra encore une lumière réfléchie, mais dont l'intensité va décroître rapidement quand β augmente.

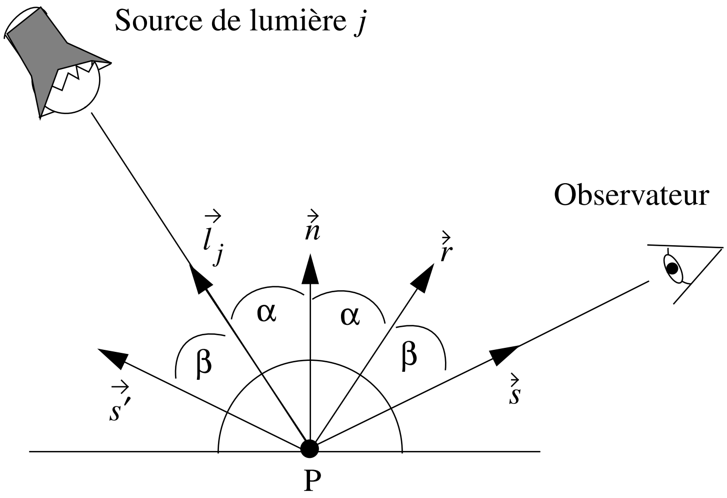


Figure 2 : Réflexion spéculaire par un réflecteur imparfait

On utilise le modèle de Phong pour calculer cette lumière réfléchie. Il possède un terme en $\cos^m\beta$ (le produit scalaire $(\vec{r}\cdot\vec{s})^m$ dans l'équation (EQ 5)) qui décroît lorsque β croît et qui décroît d'autant plus vite que m est grand.
Des valeurs de m inférieures à 10 produisent des reflets très étalés, alors que des valeurs de l'ordre de 100 produisent des éclats très localisés.
Un réflecteur est toujours imparfait par conséquent il faut tenir compte d'une légère absorption de la surface avec réémission comme pour la réflexion diffuse. Dans ce cas, la couleur du reflet est influencée par *la couleur spéculaire* de la surface, le terme $coul_s(p)$ dans l'équation (EQ 5).
REMARQUE : On peut calculer le produit scalaire $\vec{r}\cdot\vec{s}$ directement à partir de $\vec{n}$, $\vec{s}$ et $\vec{l}_j$:

$$\vec{r}\cdot\vec{s} = (2\vec{n}(\vec{n}\cdot\vec{l}_j) - \vec{l}_j)\cdot\vec{s} \qquad \text{(EQ 6)}$$

2.4. Modèles de sources de lumière

On donne ci-dessous les modèles de sources de lumière les plus courants.
En général on définit deux types de sources de lumières :

1. La lumière directionnelle (DIRECTIONAL LIGHT) qui représente une source de lumière située à l'infini, dont les rayons sont parallèles (le soleil par exemple).
2. La lumière positionnelle (POSITIONAL LIGHT) située en un point précis (x, y, z) de l'espace, dont les rayons sont issus. Ils ne sont donc pas parallèles. En général on définit plusieurs sous-classes de sources de lumières positionnelles : SPOT_LIGHT, CONE_LIGHT ou ATTENUATED_LIGHT.

SPOT_LIGHT correspond à une lumière directionnelle dont le maximum d'énergie se trouve concentré dans la direction du faisceau, et va en s'atténuant lorsque on s'éloigne de cette direction (voir Figure 3). Par exemple, une ampoule de forme non sphèrique.

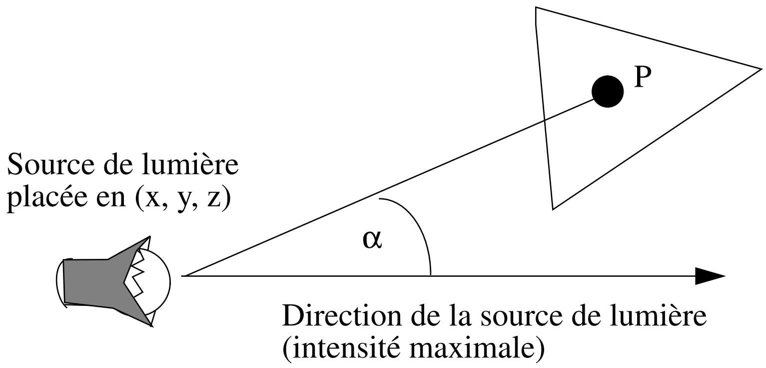


Figure 3 : Source de lumière de type SPOT_LIGHT

On modélise son intensité de la manière suivante :

$$I_j(c) = (\cos\alpha)^{spot} \cdot I(c) \qquad \text{(EQ 7)}$$

Le paramètre $spot$ joue le même rôle que le paramètre m dans l'équation de calcul de la réflexion spéculaire (EQ 5). Le paramètre c correspond à la couleur de la source de lumière, et I représente son intensité.

CONE_LIGHT définit une source de lumière directionnelle limitée par un abat-jour conique. L'intensité est maximale dans la zone de l'espace qui se trouve dans le cône illuminé, nulle ailleurs (Figure 4).

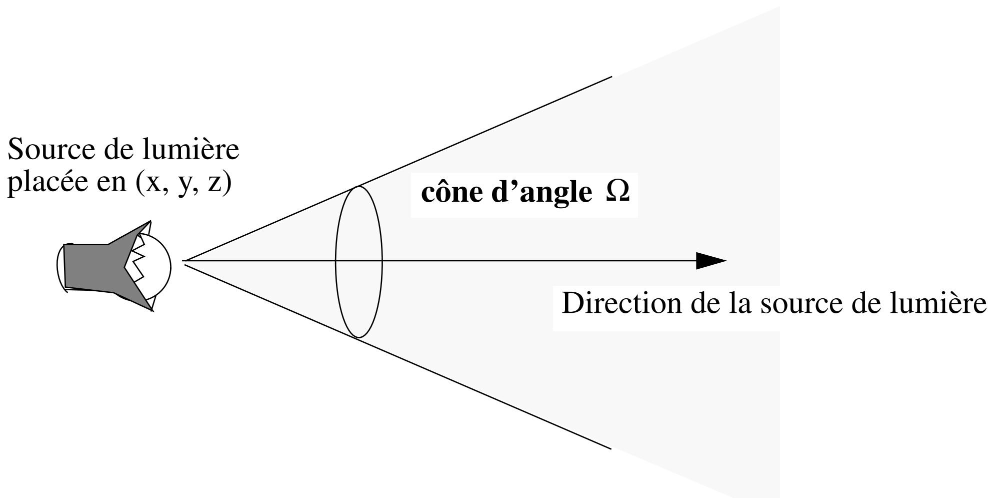


Figure 4 : Source de lumière de type CONE_LIGHT (limitée par un abat-jour conique)

On modélise son intensité de la manière suivante :

$$I_j(c) = I(c) \ \text{ dans l'angle solide } \Omega \qquad \text{(EQ 8)}$$

$$I_j(c) = 0 \ \text{ ailleurs} \qquad \text{(EQ 9)}$$

ATTENUATED_LIGHT est un modèle de source de lumière qui possède la propriété suivante : l'intensité

du faisceau lumineux sur une facette décroît avec la distance D entre la position de la source et la facette qui est éclairée. Un tel modèle permet de prendre en compte des effets de brouillard, ou encore de différencier deux facettes de couleur et de forme identiques, mais situées à des distance différentes de la source de lumière.
On modélise l'intensité de la manière suivante:

$$I_j(c) = \frac{atten}{D} I(c) \tag{EQ 10}$$

On maintiendra $0 \leq f(D) = \frac{atten}{D} \leq 1$. Ce cœfficient d'atténuation est le plus communément utilisé.

Remarque : l'atténuation $f(D)$ du faisceau suivant l'équation (EQ 10) n'est pas en accord avec les lois de la physique, ou plus précisément avec celles de la photométrie. En effet, lorsqu'une source d'intensité $I_j(c)$ rayonne dans l'espace, l'éclairement d'une surface située à la distance D de cette source est inversement proportionnel à D^2 d'après la loi de Lambert. Pour introduire une atténuation proportionnelle à D^2, on utilisera un cœfficient quadratique plus réaliste que $atten/D$, de la forme :

$$0 \leq f(D) = \frac{1}{C_1 + C_2 + C_3 \cdot D^2} \leq 1 \tag{EQ 11}$$

2.5. Modèles de surface

On conservera donc pour chaque surface les informations suivantes si l'on désire prendre en compte des sources de lumière :

- Une couleur $coul_d$ qui pourra-être la même pour tous les pixels de la surface, ou bien individuelle à chaque pixel.
- Une couleur $coul_s$ qui est la couleur des reflets dûs à la lumière spéculaire.
- Un cœfficient m. 8 peut être considéré comme une valeur moyenne.
- Trois cœfficients d'atténuation $0 \leq k_a, K_d, k_s \leq 1$ de la lumière ambiante, diffuse et spéculaire. Des valeurs communes sont $k_a = 0,4$, $k_d = 0,6$ et $k_s = 0,4$

2.5.1. Exemples de surfaces

A titre d'exemple, on donne ci-dessous dans la Figure 5 les valeurs des paramètres d'une surface, pour simuler un aspect de cuivre, de plastique et de poterie. Le cuivre est de couleur jaunâtre fixée par $coul_d$, avec des reflets jaunâtres également, fixés par $coul_s$, et ces reflets sont moyennement directifs ($m = 8$). Le plastique a des reflets très directifs $m = 40$ et de couleur blanche (valeurs RGB de $coul_s$ égales à 1). La poterie présente des reflets très peu directifs ($m = 1$).

Table 1:

Matière	$coul_d(R)$	$coul_d(G)$	$coul_d(B)$	m	$coul_s(R)$	$coul_s(G)$	$coul_s(B)$
Cuivre	0,2	0,05	0,03	8	0,6	0,5	0,1
Plastique	0,6	0,05	0,05	40	1	1	1
Poterie	0,5	0,15	0,05	1	0,3	0,1	0,1

Figure 5 : valeurs normalisées des paramètres de quelques surfaces typiques

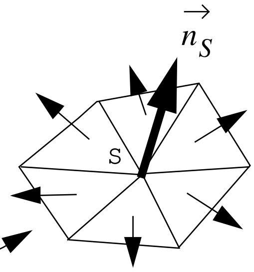
3 Modèles d'ombrage

Lorsqu'on prend en compte des sources de lumière, la couleur de chaque point de chaque facette est calculé au moyen de l'équation (EQ 2). L'aspect des facettes varie en fonction de la position de l'observateur et des sources de lumière (position, nature, couleur, etc...), cependant tous les points d'une même facette renvoient la même intensité puisque la normale à la facette $\vec{n}$ ne varie pas Ceci donne aux objets *un aspect faceté*. Le raffinement du maillage (augmentation du nombre de facettes) ne permet pas d'améliorer de façon satisfaisante la représentation de la surface approchée à cause de l'effet de Mach qui accentue la différence entre deux facettes adjacentes présentant une discontinuité d'intensité lumineuse.
Nous allons présenter deux algorithmes d'ombrage permettant de supprimer ce problème et *donner un aspect lisse* aux objets. Ils consistent à lisser la surface en calculant pour chaque sommet la moyenne des normales aux facettes qui partagent le sommet, puis à effectuer une interpolation linéaire à l'intérieur de la facette soit sur les intensités calculées aux sommets (algorithme de Gouraud), soit sur les normales calculées aux sommets (algorithme de Phong).

3.1. Algorithme de Gouraud (Figure 6)

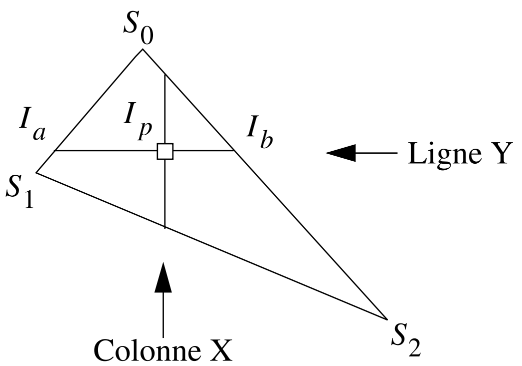
On suppose la normale connue en chaque sommet du polygone. Ces normales sont calculées, soit à partir de la description analytique de la surface, soit en prenant la moyenne des normales aux polygones qui partagent ce sommet. On calcule alors l'intensité en chaque nœud du maillage, puis, par interpolation les intensités le long de deux côtés de chaque face triangulaire. On balaye alors les lignes pour calculer l'intensité lumineuse de chaque pixel de chaque ligne (balayage par ligne, voir Figure 7).

Cet algorithme est le plus utilisé car il ne nécessite pas de gros calculs. On le trouve maintenant implanté dans des circuits spécialisés de faible coût, comme par exemple dans un des co-processeurs graphiques équipant les consoles de jeux vidéo Atari Jaguar, dont le prix est dérisoire.



- **Pour** chaque facette
  - **Pour** chaque sommet T commun à plusieurs facettes
    - Calculer la moyenne des normales : $\vec{n}_S = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\vec{n}_i$
    - Calculer l'intensité I_S émise par le sommet au moyen du modèle d'éclairement définit par l'équation (EQ 2) : $I_T = I_a + I_d + I_s$, avec I_d et I_s fonctions de $\vec{n}_S$.
  - **FinPour**
  - **Pour** chaque pixel p situé à l'intérieur de la facette
    - Réaliser une interpolation linéaire (Figure 7) des intensités aux trois sommets 0, 1, et 2 pour en déduire l'intensité I_p au pixel p de coordonnées (X, Y)
  - **FinPour**
- **FinPour**

Figure 6 : Algorithme de Gouraud



$$I_a = \frac{I_0(y_a - y_1) + I_1(y_0 - y_a)}{y_0 - y_1}$$

$$I_b = \frac{I_0(y_b - y_2) + I_2(y_0 - y_b)}{y_0 - y_2}$$

$$I_p = \frac{I_a(x_b - x_p) + I_b(x_p - x_a)}{x_b - x_a}$$

Figure 7 : Interpolation linéaire suivant les lignes de balayage pour l'algorithme de Gouraud

3.2. Algorithme de Phong

- **Pour** chaque facette
  - **Pour** chaque sommet T commun à plusieurs facettes
    - Calculer la moyenne des normales : $\vec{n_S} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\vec{n_i}$
  - **FinPour**
  - **Pour** chaque pixel p situé à l'intérieur de la facette
    - Réaliser une interpolation linéaire (Figure 9) des normales aux trois sommets 0, 1, et 2 pour en déduire la normale $\vec{n_p}$ au pixel p de coordonnées (X, Y)
    - Calculer l'intensité I_P émise par le sommet P au moyen du modèle d'éclairement définit par l'équation (EQ 2) : $I_T = I_a + I_d + I_s$, avec I_d et I_s fonctions de $\vec{n_P}$.
  - **FinPour**
- **FinPour**

Figure 8 : ALgorithme de Phong

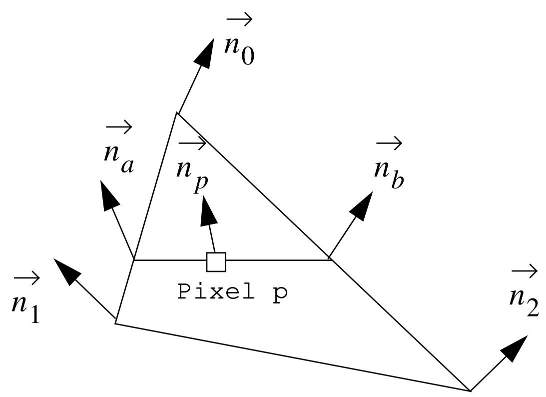


Figure 9 : Interpolation linéaire suivant les lignes de balayage pour l'algorithme de Phong

3.3. Remarques au sujet de ces algorithmes

Le modèle de Phong est plus gourmand en calculs que le modèle de Gouraud. En effet, le calcul des moyennes sur les normales, qui sont des vecteurs à trois composantes, est plus long que le calcul de la moyenne sur trois intensités.

Les deux modèles utilisent les lignes de balayage pour interpoler. Lorsque on a affaire à des objets animés, les lignes de balayage ne coupent pas les facettes aux mêmes endroits et peuvent provoquer des scintillements.

Appliqués sur des objets concaves, ces deux algorithmes peuvent donner des résultats médiocres dans certains cas, en particulier lorsque les normales aux sommets de facettes adjacentes sont parallèles. Par exemple, dans la Figure 10, les normales $\vec{n}_a$, $\vec{n}_b$ et $\vec{n}_c$ sont parallèles, et produiront par conséquent l'illusion d'une surface plane si on applique les algorithmes de Gouraud ou de Phong pour le lissage.

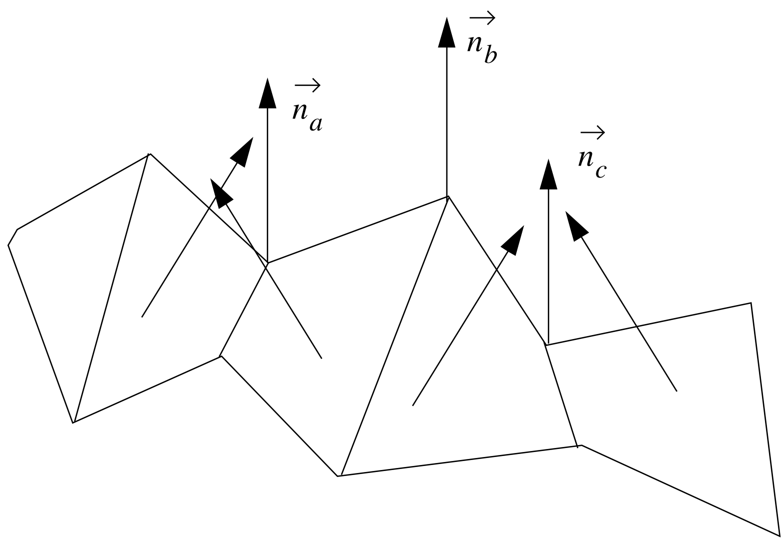


Figure 10 : Problèmes non résolus par les algorithmes de Phong et de Gouraud