RENDU

Processus consistant à créer des scènes graphiques réalistes à partir de données géométriques et intégrant les phénomènes

- **de lumière réfléchie *diffuse* (objets mats) et *spéculaire* (miroirs)**
- **de lumière réfractée *diffuse* (vitres brouillées) et *spéculaire* (vitres courantes)**
- **de couleurs (absorption des longueurs d'onde de la lumière blanche)**
- **d'ombres et de pénombres**

MODÈLE D'ILLUMINATION

Les acteurs

- **une ou plusieurs sources lumineuses qui émettent de la lumière (de l'énergie)**
  - **sources *ponctuelles***
  - **sources *uniformément distribuées* (à l'infini)**
  - **sources plus générales (modèle de Warn)**
- **des *objets* dans une scène qui transmettent à leur façon l'énergie reçue des sources et modélisés par une méthode étudiée dans les cours précédents**
- **un *observateur* qui reçoit la lumière transmise par les objets (donc qui les voit)**

MODÈLE PHYSIQUE

L'énergie lumineuse d'une source incidente à une surface d'un solide se décompose en

- **énergie absorbée: si l'énergie est entièrement absorbée, l'objet est invisible.**
- **énergie réfléchie**
  - **énergie réfléchie diffuse (surfaces mattes)**
  - **énergie réfléchie spéculaire (surfaces lumineuses)**
- **énergie réfractée c'est-à-dire transmise par le solide (*transparence*)**
  - **énergie réfractée diffuse**
  - **énergie réfractée spéculaire**

La décomposition dépend en général de la longueur d'onde λ

$$\boxed{\begin{aligned} I_{\textbf{incidente}} &= I_{\textbf{absorbée}} + I_{\textbf{renvoyée}} \\ I_{\textbf{renvoyée}} &= I_{\textbf{réfléchie}} + I_{\textbf{réfractée}} \\ I_{\textbf{réfléchie}} &= I_{\textbf{réfléchie diffuse}} + I_{\textbf{réfléchie spéculaire}} \\ I_{\textbf{réfractée}} &= I_{\textbf{réfractée spéculaire}} + I_{\textbf{réfractée diffuse}} \end{aligned}}$$

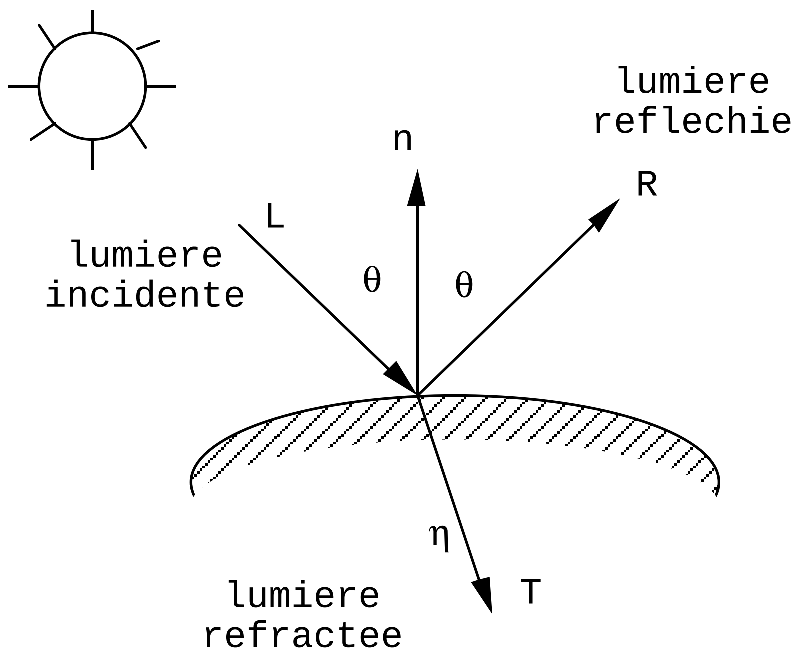

Figure 1: **Le modèle physique**

MODÈLE INFOGRAPHIQUE

En infographie, on utilise des modèles empiriques lorsque le modèle physique est trop coûteux en calculs

- **Un objet reçoit une énergie des sources lumineuses mais aussi des autres objets: c'est la *lumière ambiante* dont on fixe une valeur I_{ambiante} a priori**

- **L'énergie reçue par un observateur émanant d'un objet est inversement proportionnelle au carré de sa distance de l'observateur à l'objet. En fait on préfère la loi**

$$I = k_a I_a + \frac{I_{\text{renvoyée}}}{d + K}$$

où $I = I_{\text{reçu par l'observateur}}$, $I_a = I_{\text{ambiante}}$, et où k_a dépend de l'objet

LUMIÈRE RÉFLÉCHIE

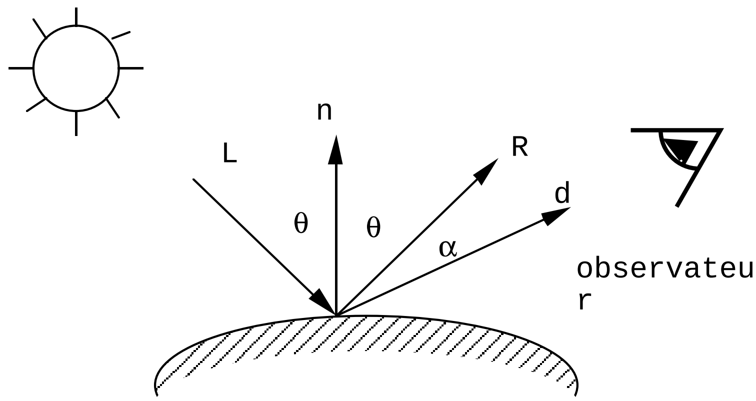

Figure 2: **Réflexion**

- $\vec{L}$ **la direction du faisceau incident**
- $\vec{n}$ **le vecteur normal à la surface au point d'incidence**
- $\vec{R}$ **le vecteur *réfléchi*, tel que** $\vec{n}$ **désigne la bissectrice entre** $\vec{R}$ **et** $\vec{L}$

  $$\vec{R} = 2(\vec{L}\vec{n})\vec{n} - \vec{L}$$

  $\vec{L}$, $\vec{n}$ **et** $\vec{R}$ **sont dans un même plan**
- $\vec{d}$ **la direction de l'observateur**
- θ **l'angle entre les vecteurs** $\vec{L}$ **et** $\vec{n}$
- α **l'angle entre les vecteurs** $\vec{R}$ **et** $\vec{d}$
- I_l **l'énergie incidente, c'est-à-dire émise par la source**

LUMIÈRE RÉFLÉCHIE DIFFUSE ET SPÉCULAIRE

- **L'énergie diffuse est uniformément renvoyée dans toutes les directions et est proportionnelle à** $\cos\theta$

$$I_d = I_l k_d \cos\theta \qquad 0 \leq \theta \leq \pi/2$$

- **L'énergie spéculaire, idéalement, est renvoyée dans la seule direction** $\vec{R}$**. Dans la réalité, elle est préférentiellement distribuée autour de la direction de réflexion suivant une loi empirique**

$$I_s = I_l w(\theta, \lambda) \cos^n \alpha$$

où λ **est la longueur d'onde,** n **un exposant qui approche la distribution spatiale de la lunmière réfléchie et est la fonction de *réflectance*** $w(\theta, \lambda)$

LUMIÈRE RÉFRACTÉE

Hypothèses (très) simplificatrices

- **On ignore le problème de déformation (déviation des rayons lumineux).**

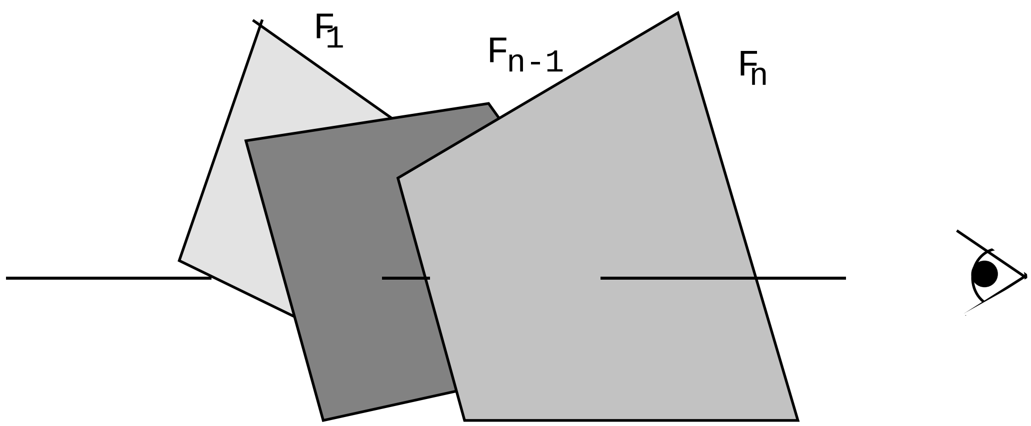

Figure 3: **Transparence**

- **On considère le long d'un rayon lumineux, la liste des faces qu'il intersecte, avec leur coefficient de transparence t ($t = 1$ si la face est opaque et $t = 0$ si elle est complètement transparente).**
- **IntensitePropre(F) est la fonction qui renvoie l'intensité lumineuse dûe à F seule**
- **Intensite(L) est l'intensité lumineuse dûe à la superposition des intensités des faces constituant la liste**
- **définition récursive**

fonction Intensite(L)**;**
si la première face F de la liste est opaque
ou la liste est réduite à F alors
Intensite(L) $:=$ **IntensitePropre(F)**
sinon
{ t ***est le coefficient de transparence de*** **F}**
Intensite(L) $:= t*$ **IntensitePropre(F)**
$+ \ (1-t)*$ **Intensite(**L**-F);**

BILAN

Une source d'intensité I_l

$$I = I_a k_a + \frac{I_l}{d+K}(k_d \cos\theta + k_s \cos^n \alpha)$$

Plusieurs sources d'intensité I_{l_i}

$$I = I_a k_a + \sum_{1 \leq i \leq m} \frac{I_{l_i}}{d+K}(k_d \cos\theta_i + k_s \cos^n \alpha_i)$$

CALCUL DE L'INTENSITÉ

On suppose que le solide a une modélisation polyhèdrale. Différentes méthodes de calcul de l'intensité de la lumière reçue d'un point quelconque du solide

1. **Intensité constante sur chaque face polygonale (effet de bande de Mach)**
2. **Méthode d'interpolation sur chaque face. Tenir compte de**
   - **la source n'est pas nécessairement à l'infini (l'angle d'incidence dépend du sommet)**
   - **l'observateur n'est pas à l'infini (la direction $\vec{d}$ n'est pas constante)**

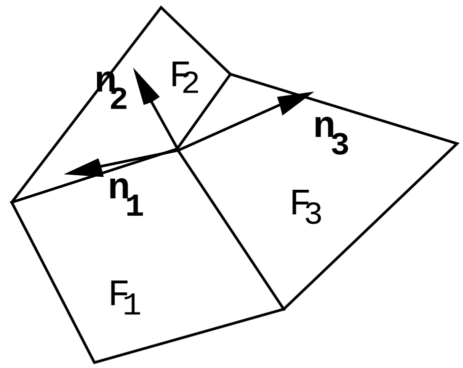

Figure 4: **La normale**

3. **interpolation sur un maillage:on calcule la normale aux sommets en faisant la moyenne des normales aux polygones adjacents aux sommets**

$$\vec{n} = k \sum_{1 \le i \le n} \vec{n}_i$$

où k est un coefficient de normalisation

- **interpolation des intensités: méthode de Gouraud**
- **interpolation des normales: méthode de Phong**

INTERPOLATION DE GOURAUD ET PHONG

But: atténuer les effets de discontinuité dûes à l'approximation polyhèdrale de l'objet

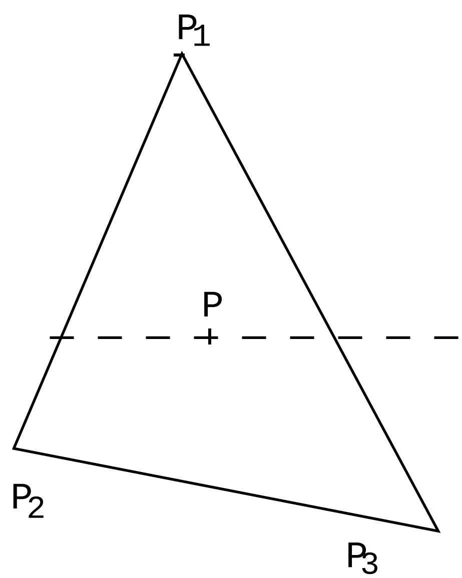

Figure 5: **Interpolation**

- **P un point quelconque d'une face triangulaire $\mathbf{P}_1\mathbf{P}_2\mathbf{P}_3$**

- **L'équation du plan de la face**

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_1 + \lambda(\mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_1) + \mu(\mathbf{P}_3 - \mathbf{P}_1)$$

permet de calculer les paramètres λ et μ en fonction de $\mathbf{P} = (x, y)$

$$\lambda = \frac{(x - x_1)(y_3 - y_1) - (y - y_1)(x_3 - x_1)}{(y_3 - y_1)(x_2 - x_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)}$$

$$\mu = \frac{(y - y_1)(x_2 - x_1) - (x - x_1)(y_2 - y_1)}{(y_3 - y_1)(x_2 - x_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)}$$

Le long d'une ligne de balayage ($y = y_{balayage}$) il suffit de connaître l'accroissement de λ et de μ pour Δx donné

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta x(y_3 - y_1)}{(y_3 - y_1)(x_2 - x_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)}$$

$$\Delta\mu = \frac{-\Delta x(y_2 - y_1)}{(y_3 - y_1)(x_2 - x_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)}$$

- **Gouraud: I_i l'intensité en $\mathbf{P}_i$, I l'intensité en P:**

$$I = I_1 + \lambda(I_2 - I_1) + \mu(I_3 - I_1)$$

$$\Delta I = \Delta\lambda(I_2 - I_1) + \Delta\mu(I_3 - I_1)$$

- **Phong: $\vec{n}_i$ la normale en $\mathbf{P}_i$, $\vec{n}$ la normale en P:**

$$n = \vec{n}_1 + \lambda\vec{n}_2 + \mu\vec{n}_3$$

$$\Delta\vec{n} = \Delta\lambda(\vec{n}_2 - \vec{n}_1) + \Delta\mu(\vec{n}_3 - \vec{n}_1)$$

Phong est plus coûteux mais approche mieux la courbure de la surface

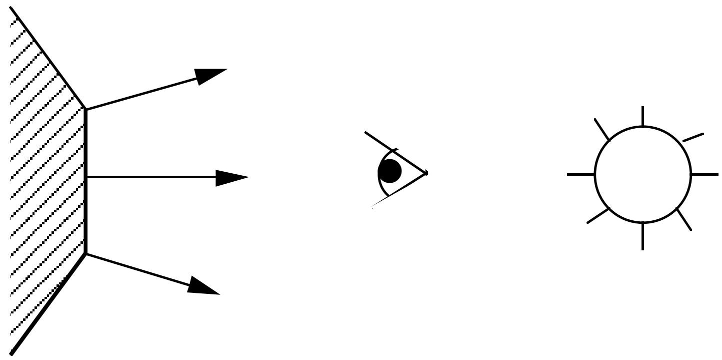

Figure 6: **Phong**

REMARQUES

1. **La face n'est pas toujours un triangle: la ligne de balayage passant par P intersecte les côtés** $\S_1\S_2$ **et** $\S_3\S_4$ **en** $\mathbf{P}_1$ **et** $\mathbf{P}_2$**. On a**

$$\mathbf{P}_1 = \lambda_1\S_1 + \lambda_2\S_2,\ \textbf{avec}\ \lambda_1 + \lambda_2 = 1$$

$$\mathbf{P}_2 = \lambda_3\S_3 + \lambda_4\S_4,\ \textbf{avec}\ \lambda_3 + \lambda_4 = 1$$

$$\mathbf{P} = \mu_1\mathbf{P}_1 + \mu_2\mathbf{P}_2,\ \textbf{avec}\ \mu_1 + \mu_2 = 1$$

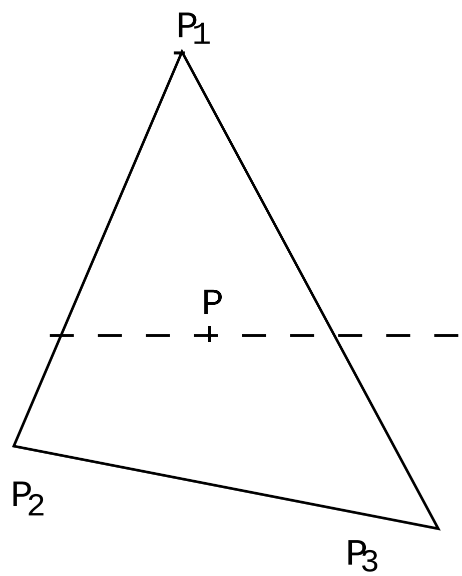

Figure 7: **Interpoler un polygone**

- **Gouraud:** I_i **l'intensité en** $\S_i$, I **l'intensité en P:**

$$I = \mu_1(\lambda_1 I_1 + \lambda_2 I_2) + \mu_2(\lambda_3 I_3 + \lambda_4 I_4)$$

- **Phong:** $\vec{n}_i$ **la normale en** $\S_i$**,** $\vec{n}$ **la normale en P:**

$$\vec{n} = \mu_1(\lambda_1\vec{n}_1 + \lambda_2\vec{n}_2) + \mu_2(\lambda_3\vec{n}_3 + \lambda_4\vec{n}_4)$$

Dans les 2 cas, les résultats dépendent en général de l'orientation

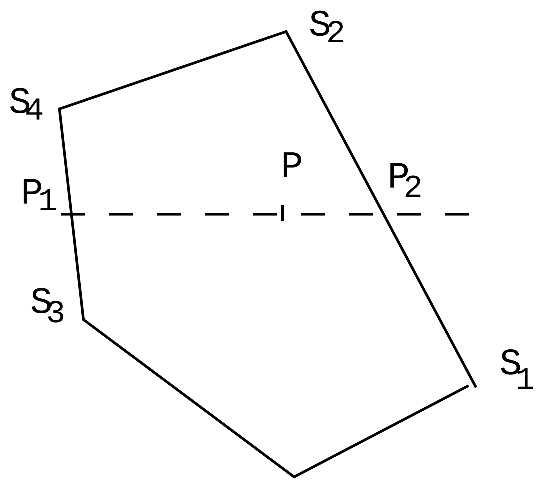

Figure 8: **Rotation de la figure**

2. **L'interpolation se fait dans l'espace image, alors qu'elle devrait se faire dans l'espace objet. Dans le cas des faces triangulaires, $\mathbf{P}_1\mathbf{P}_2\mathbf{P}_3$ sont les projetés de $\mathbf{P}'_1\mathbf{P}'_2\mathbf{P}'_3$ et P le projeté de P'.**

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_1 + \lambda(\mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_1) + \mu(\mathbf{P}_3 - \mathbf{P}_1)$$

$$\mathbf{P}' = \mathbf{P}'_1 + \lambda'(\mathbf{P}'_2 - \mathbf{P}'_1) + \mu'(\mathbf{P}'_3 - \mathbf{P}'_1)$$

$$\lambda = \lambda' \frac{z_2}{z_1 + \lambda'(z_2 - z_1) + \mu'(z_3 - z_1))}$$

$$\mu = \mu' \frac{z_3}{z_1 + \lambda'(z_2 - z_1) + \mu'(z_3 - z_1))}$$

inversement

$$\lambda' = \frac{\lambda z_1(z_3 - \mu(z_3 - z_1)) + \mu\lambda z_1(z_3 - z_1)}{(z_2 - \lambda(z_2 - z_1))(z_3 - \mu(z_3 - z_1)) - \lambda(z_2 - z_1)(z_3 - z_1)}$$

$$\mu' = \frac{\lambda z_1(z_2 - z_1) + \mu z_1(z_2 - \lambda(z_2 - z_1))}{(z_2 - \lambda(z_2 - z_1))(z_3 - \mu(z_3 - z_1)) - \lambda(z_2 - z_1)(z_3 - z_1)}$$

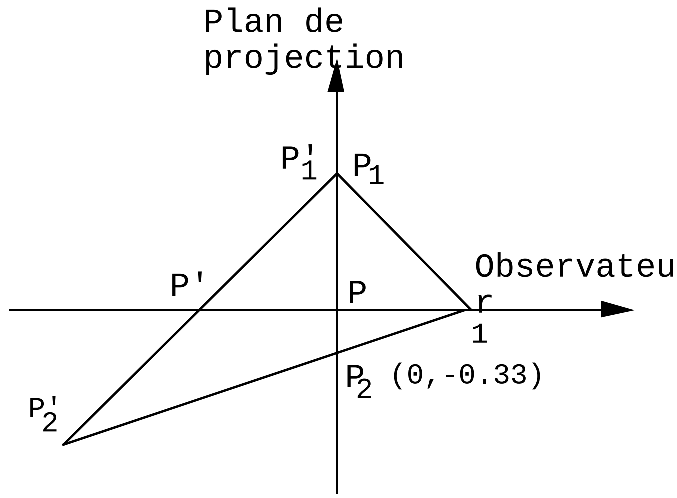

Figure 9: **P n'est pas au milieu de $\mathbf{P_1P_2}$**

3. L'interpolation peut être aveugle à des variations de surfaces

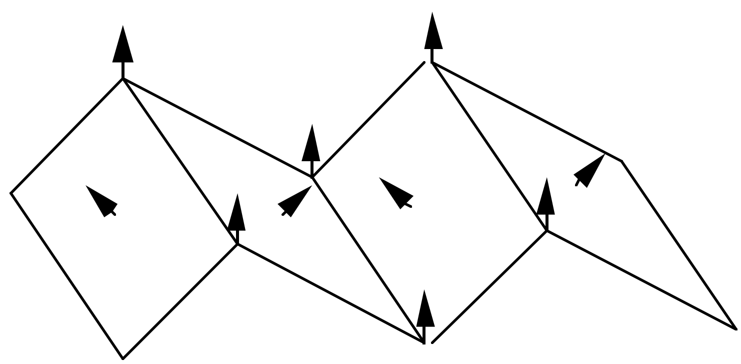

Figure 10: **Toutes les normales sont parallèles**

OMBRES

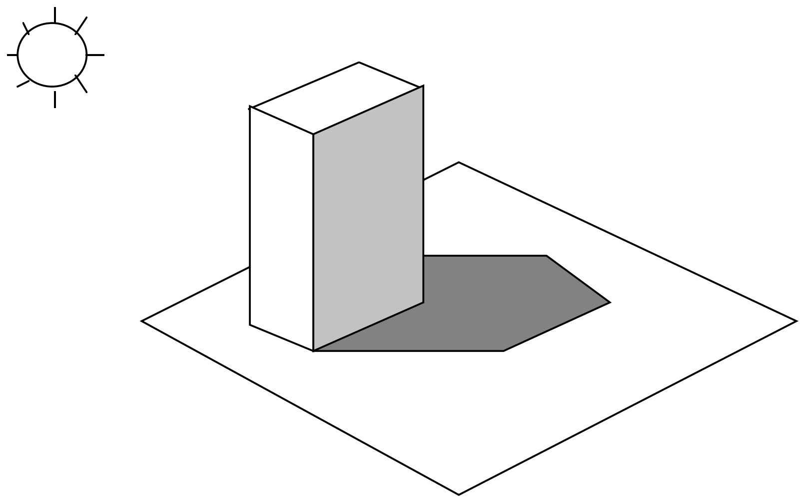

Figure 11: **Ombre portée**

On reprend la formule qui donne l'illumination en un point P

$$I = I_a k_a + \sum_{1 \leq i \leq m} \delta_i \frac{I_{l_i}}{d + K}(k_d \cos\theta_i + k_s \cos^n \alpha_i)$$

où

$$\delta_i = \begin{cases} \textbf{0} & \textbf{si la source n'est pas visible du point P} \\ \textbf{1} & \textbf{si la source est visible du point P} \end{cases}$$

Le problème de la détermination des ombres nécessite la résolution de deux problèmes de faces cachées:

- du point de la source
- du point de l'observateur

Plusieurs solutions possibles: Williams (1978) propose d'utiliser deux tampons de profondeur

Pour chaque pixel vu par l'observateur, on transforme ses coordonnées en coordonnées locales à la source et l'on vérifie si son z est maximal dans ces coordonnées