

# Modèles d'illumination locale

**Cours de master Images et Vie Artificielle. M1**

**Université Mohamed Khider Biskra**

**2019 – 2020**

**Dr: Zerari Abd El Mouméne**

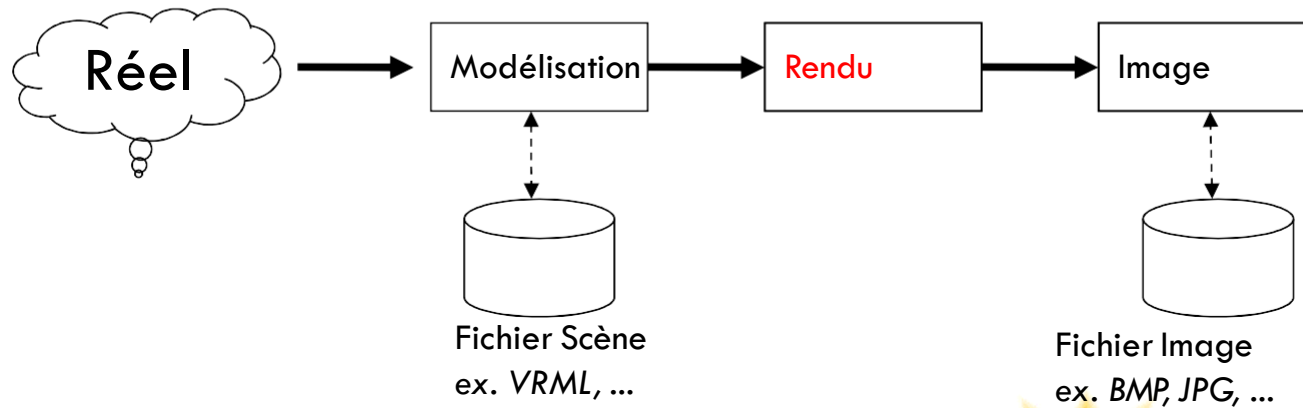
# Introduction

- Jusqu'à présent, nous nous sommes principalement intéressés aux aspects « géométriques » de la formation d'images.
- La production d'images réalistes oblige à donner une impression de volume et de relief aux objets affichés.
- Il faut donc répartir l'intensité de couleur sur la surface d'une façon que chaque point peut avoir une intensité différente
- Mais une fois que les points 3D visibles sont connus, on doit répondre à la question suivante:
  - « **De quelle couleur doit-on afficher ces points si la scène contient des sources de lumière?** »
- Cette couleur est le résultat de **l'interaction de la lumière** avec la scène.

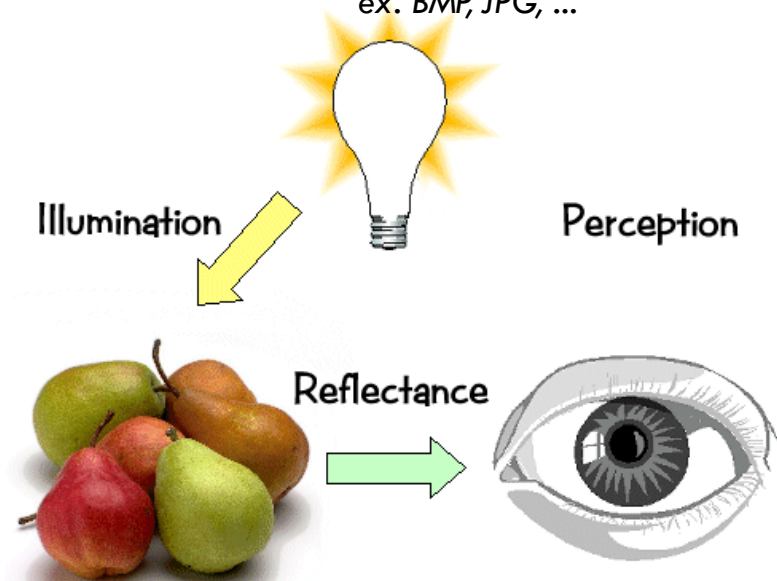
# Introduction

- Définition du modèle d'illumination et d'ombrage: une première étape du rendu réaliste.
- Description de quelques modèles régissant les interactions entre une source de lumière (ou plusieurs) et les objets de la scène.
- L'objectif est de déterminer la couleur ou l'intensité d'un pixel donné selon:
  - La répartition et les propriétés des sources lumineuses
  - Les propriétés intrinsèques des objets :
    - point dans l'espace
    - orientation du point (surface)
    - caractéristiques de la matière

# Introduction



- Elimination des parties cachées
- Illumination des objets



# Définitions

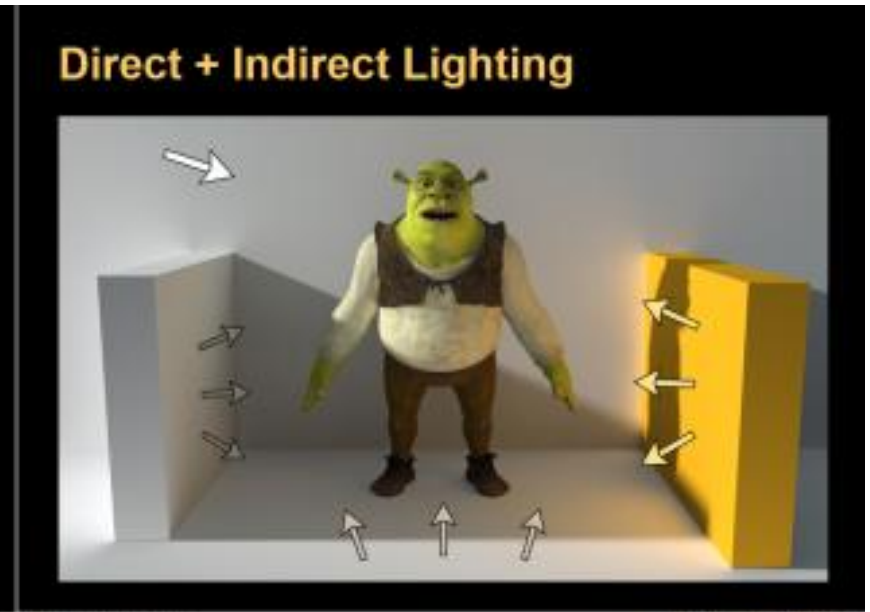
- **Éclairage (illumination)**
  - transport de la lumière dans la scène
- **Ombrage (Shading)**
  - ▣ Considère les valeurs de l'illumination en des points d'une surface et interpole ces valeurs d'après le modèle d'ombrage:  
**Flat, Gouraud, Phong**
- **Illumination Locale**
  - ▣ Ne considère que les interactions sources-objets. Seuls les éclairages directs sont pris en considération
  - ▣ Permet d'expliquer les effets simples (ombre, pénombre, pleine lumière)
  - ▣ Les effets des éclairages indirects sont **simulés** (souvent de manière assez **approximative**).
- **Illumination Globale**
  - ▣ considère les interactions sources-objets ainsi que les interactions objets-objets (lumière réfléchie entre les surfaces)

# Illumination locale & illumination globale



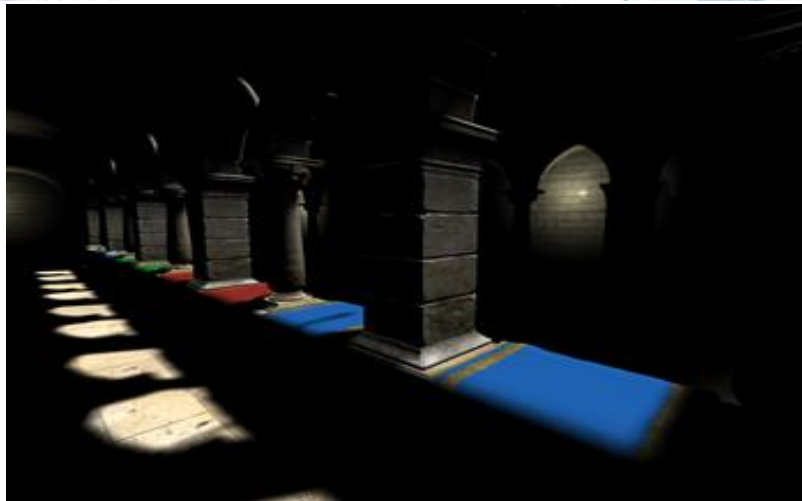
SIGGRAPH 2010

DREAMWORKS



SIGGRAPH 2010

DREAMWORKS



□ illumination locale



□ illumination globale

# Sources de lumière

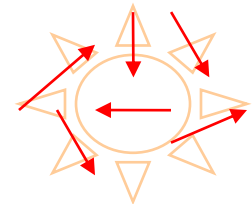
La variation d'intensité dépend directement de la nature des sources de lumière:

Les différents types de sources de lumière sont:

- l'éclairage ambiant
  - ▣ Éclairage uniforme
- Lumière directionnelle
  - ▣ source supposée à l'infini
  - ▣ intensité indépendante de la distance
- Lumière ponctuelle
  - ▣ placée en un point précis
  - ▣ intensité dépendante de la distance
  - ▣ direction dépend du point considéré

# Lumière ambiante

- C'est une lumière qui éclaire toute la scène de manière uniforme; caractérisée uniquement par son intensité.
- Sans interréflexion de la lumière, tout ce qui est dans l'ombre est **noir** (e.g. lune)
- La contribution de l'**interréflexion** entre les surfaces est un phénomène extrêmement complexe
- On **simplifie l'illumination globale** en parlant d'une lumière ambiante qui est partout la même, pour n'importe quelle direction
- Toute surface éclairée seulement par une lumière ambiante a un **éclairage uniforme**. Cette surface apparaît donc **sans profondeur**.

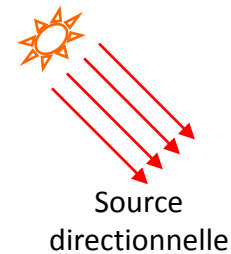
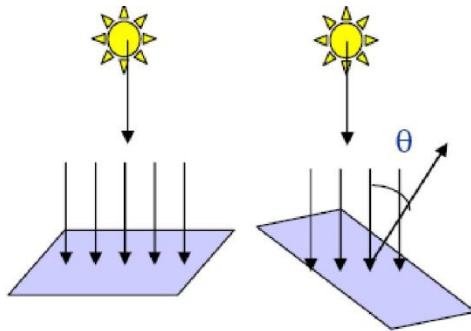


Lumière  
ambiante



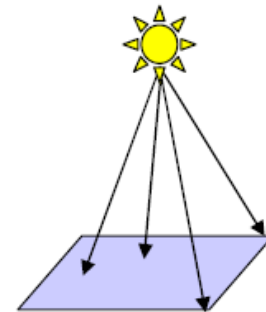
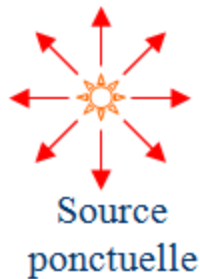
# Lumière Directionnelle

- La source de la lumière supposée à l'infinie, elle éclaire la scène avec des rayons parallèles à une direction donnée; elle est donc caractérisée par leur intensité et leur direction



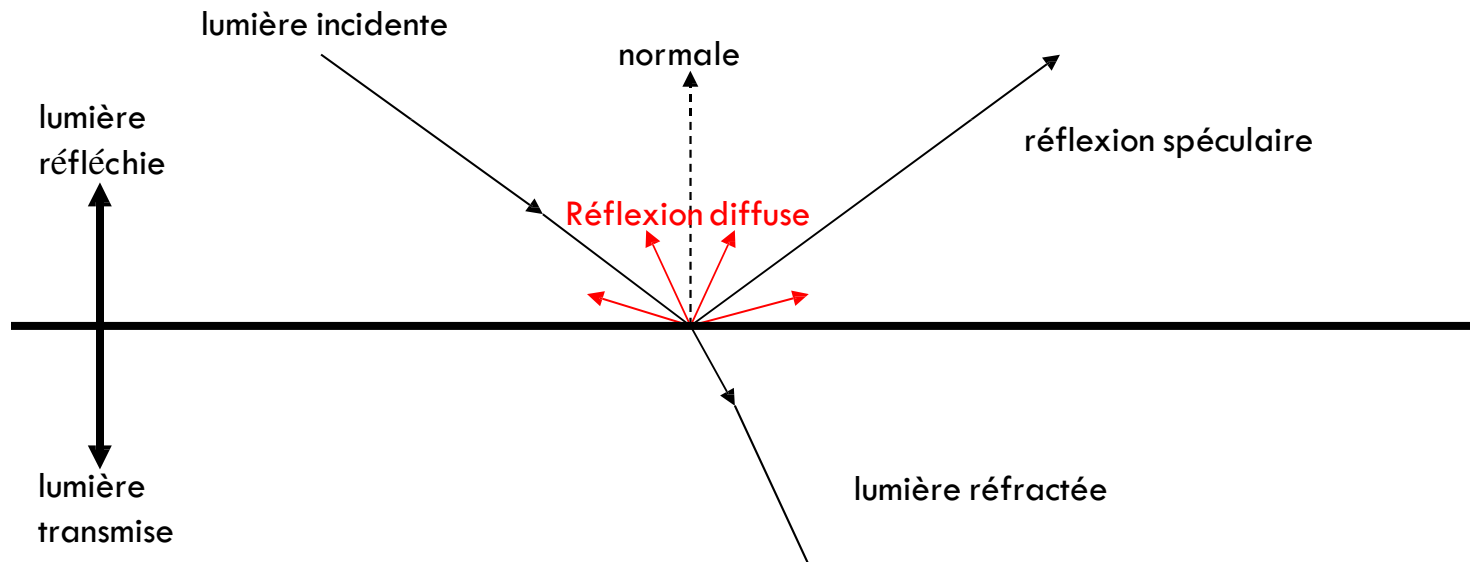
# Lumière Ponctuelle et spots

- Ponctuelle: c'est une source de lumière, supposée placée en un point précis et qui rayonne la lumière radialement; elle est donc caractérisée par son intensité et sa position.
- Les projecteurs ou spots: ce sont des sources de lumière caractérisées par leur position, leur direction et un facteur de concentration.



# Modèle de réflexion

- Un modèle de réflexion décrit l'interaction entre la lumière et une surface en fonction des propriétés du matériau constitutif de la surface ainsi que de la nature de la lumière et de son incidence.

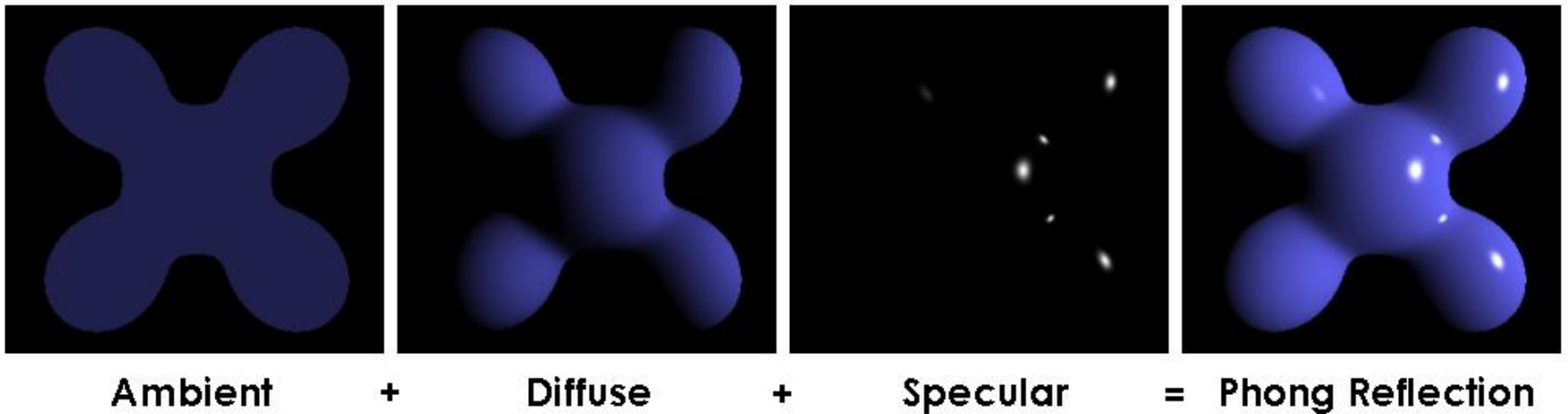


Une partie du flux lumineux est absorbée par le matériau.

# Modèle de réflexion

## Modèle de réflexion locale

- ambiante
- diffuse
- spéculaire



Ambient

+

Diffuse

+

Specular

=

Phong Reflection

# Paramètres Lumière & Matière

- Source lumineuse
  - couleur de la lumière
  - ambiante, ponctuelle, directionnelle, spot
  - intensité, facteur d'atténuation
- Matériaux des objets
  - couleur propre (ambiante, diffuse et spéculaire), couleur émissive.
  - surface lambertienne, spéculaire, mixte



lambertienne



spéculaire



diffuse directionnelle

- transparence
- textures

# Réflexion ambiante

□ On appelle modèle d'éclairage (éclairage ou illumination) toute méthode permettant de simuler les effets de la lumière sur les objets de la scène. Ce modèle s'exprime à l'aide d'équations dont les variables sont associées au point de l'objet.

□ Cas de la lumière ambiante :

Soit une source ambiante déterminée par son intensité  **$I_a$  : Intensité de la lumière ambiante en un point donné (propriété de scène)**

Soit  **$k_a$**  la constante de réflexion ambiante de la lumière ambiante (**dépendante de l'objet**) ,  $0 \leq k_a \leq 1$ .

L'intensité  **$I$**  du pixel est égale à :  **$I = I_a \cdot k_a$**

(remarque : aucune indication sur le volume de l'objet)

# Réflexion ambiante



en augmentant  $k_a$

- On ne voit pas la « 3D »
- Modélisation simple de **l'inter-réflexion entre toutes les surfaces** d'une scène  
⇒ évite qu'un objet dans l'ombre soit complètement noir.
- Pas de sens physique possible
- La forme des objets est invisible
- Mais néanmoins très utile pour masquer les défauts des autres modèles

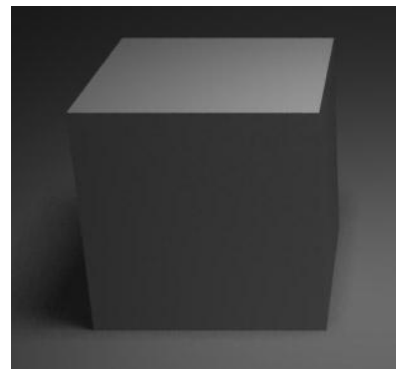
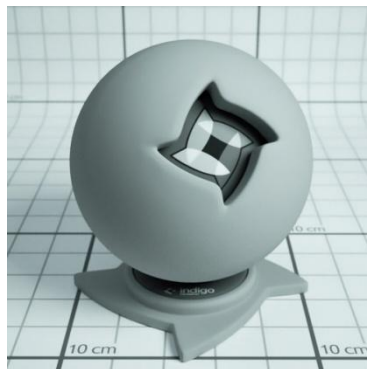
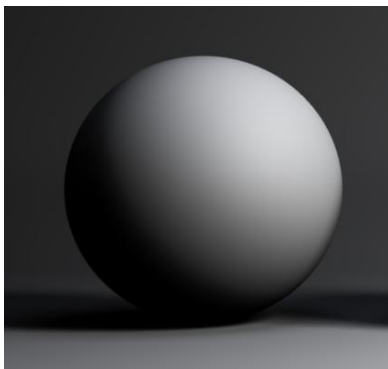
# Réflexion ambiante





# Réflexion diffuse

- Normalement, l'intensité de chaque point sur une surface varie en fonction de sa distance et de son **orientation relative à la lumière**
- Réflexion diffuse est égale en intensité **dans toutes les directions**
- Correspond intuitivement à ce que l'on perçoit comme la forme 3D
- Ex: peinture matte, papier, bois sablé



# Réflexion diffuse

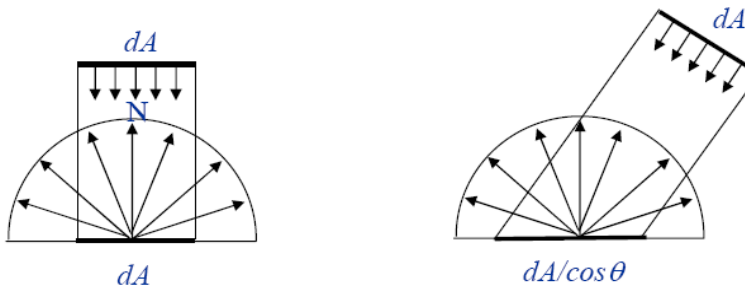
## Réflexion diffuse :

Indépendante du point de vue

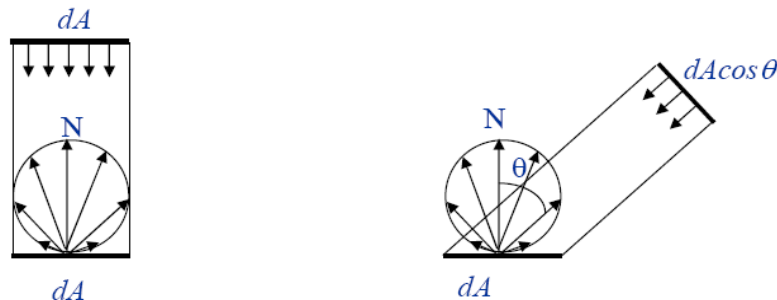
### 1. Réflexion Lambertienne (**BRDF uniforme**).

- Soit une source de lumière d'intensité  $I_p$  et Soit  $k_d$  la constante de réflexion diffuse du matériau de l'objet  $0 \leq k_d \leq 1$ .
- Le modèle de réflexion diffus est régi par la loi de Lambert: l'intensité de la lumière réfléchie augmente au fur et à mesure que la direction de la source devient colinéaire avec la normale à la surface au point considéré. L'intensité est donc proportionnelle au cosinus de l'angle que fait la normale avec la direction de la source de lumière incidente.

La surface illuminée  
s'accroît comme  
 $dA/\cos\theta$



La surface illuminée  
dépend de l'orientation

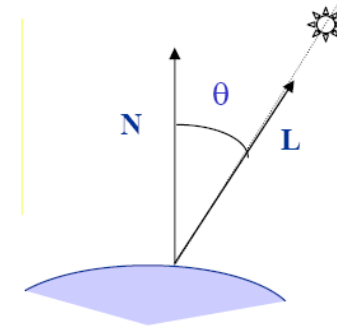


# Réflexion diffuse

$$I = I_p \cdot k_d \max(\cos \theta, 0) \quad -\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$$

formulation simplifiée

$$I = I_p \cdot k_d (\vec{N} \cdot \vec{L}) \quad \vec{N} \text{ et } \vec{L} \text{ normalisés}$$



- La constante  $k_d$  varie d'un matériau à l'autre
- Les intensités s'additionnent
- Lumière ambiante et une source ponctuelle

$$I = I_a \cdot k_a + I_p \cdot k_d (\vec{N} \cdot \vec{L})$$

- Lumière ambiante et plusieurs sources ponctuelles

$$I = I_a \cdot k_a + \sum_j I_{pj} \cdot k_d (\vec{N} \cdot \vec{L}_j)$$

## 2. Facteur d'atténuation

L'équation donnant l'intensité ne prend pas en compte l'éloignement de l'objet par rapport à la source ponctuelle : on peut donc introduire un facteur d'atténuation

$$I = I_a \cdot k_a + f_{att} I_p \cdot k_d (\vec{N} \cdot \vec{L})$$

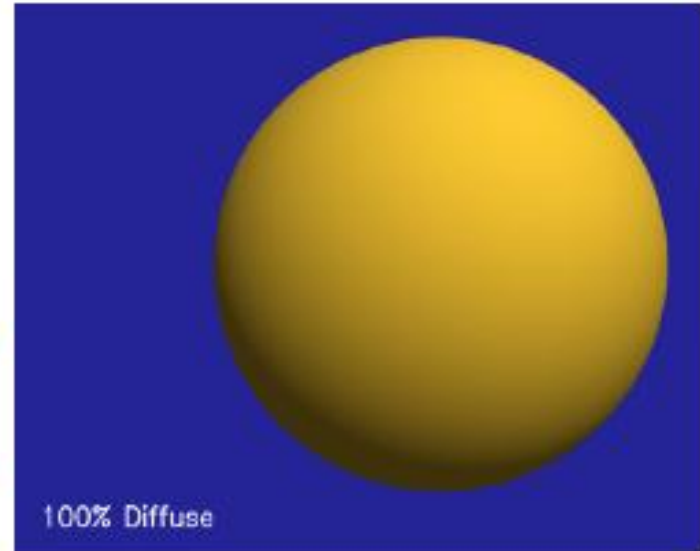
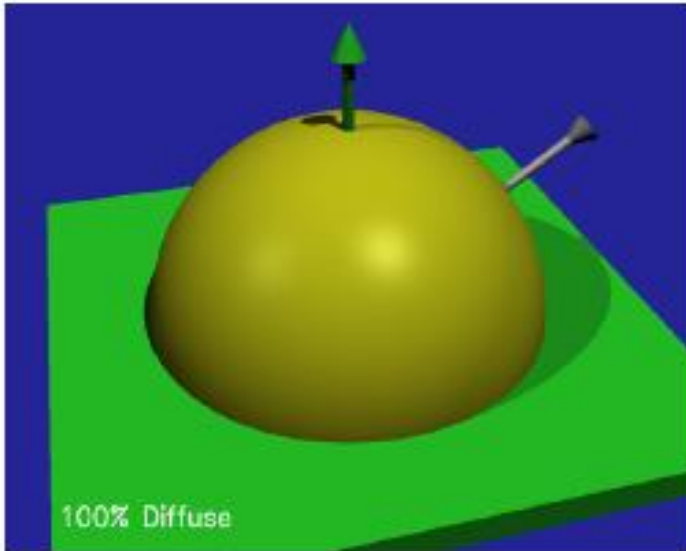
$$I = I_a \cdot k_a + \sum_j f_{att_j} I_{pj} \cdot k_d (\vec{N} \cdot \vec{L}_j)$$

$(\vec{N} \cdot \vec{L}) = \cos \theta$  où  $\vec{N}$  et  $\vec{L}$  sont des vecteurs **normalisés**.

# Réflexion diffuse



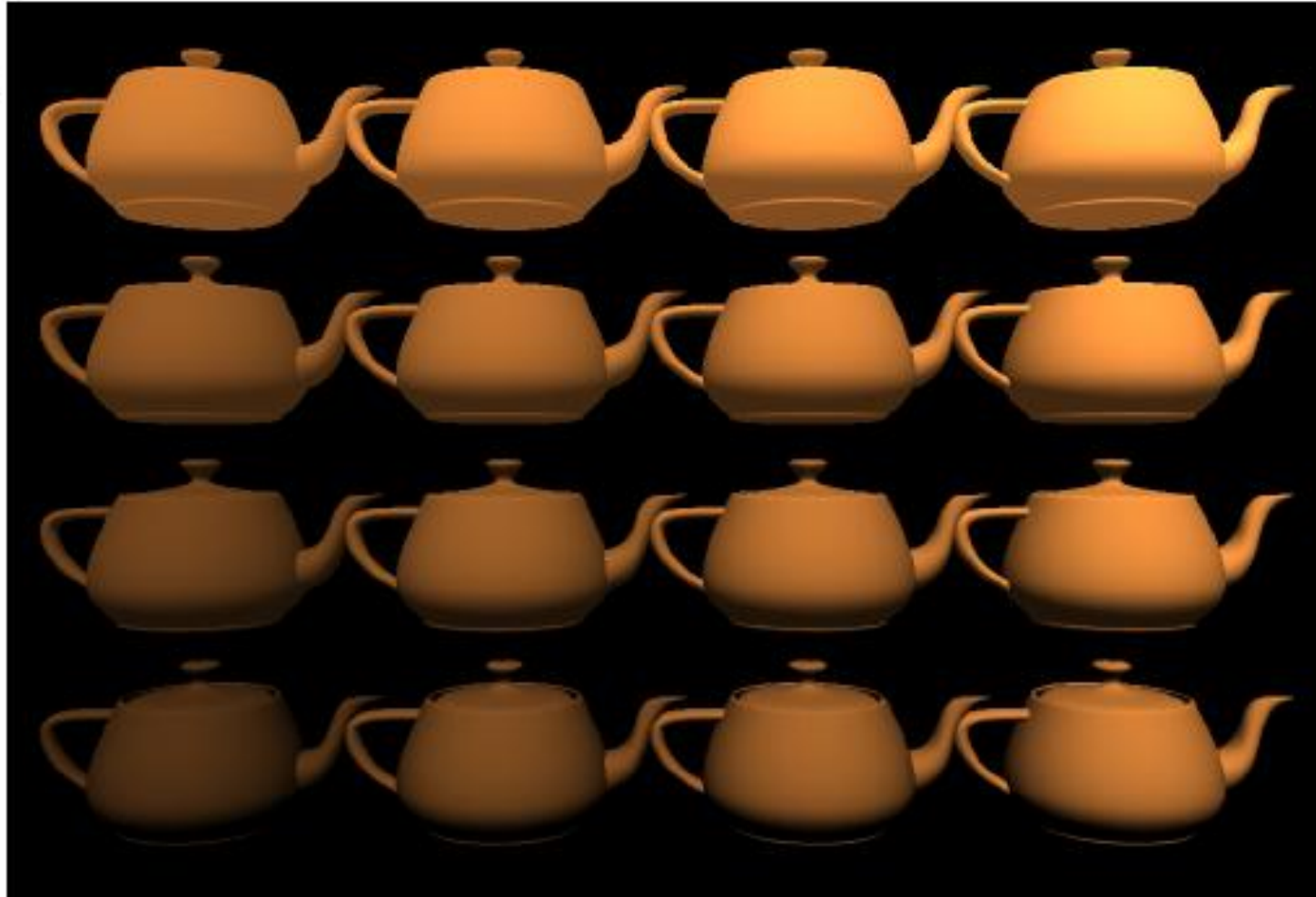
en augmentant  $k_d$



# Réflexion diffuse

Diffuse + ambiante

$k_a$



# Réflexion diffuse

Exemple (ambient + diffus)



# Réflexion spéculaire

- La composante spéculaire permet de prendre en compte la position de l'observateur. Elle intervient de façon importante dans le cas de surfaces réfléchissantes.
- La réflexion spéculaire apparaît sous la forme d'une région de haute intensité (*highlight*)
- Les surfaces métalliques, brillantes sont généralement imparfaitement réfléchissantes: dans ce cas, la quantité de lumière dépend de la distribution dans l'espace de la lumière réfléchie.

# Réflexion spéculaire

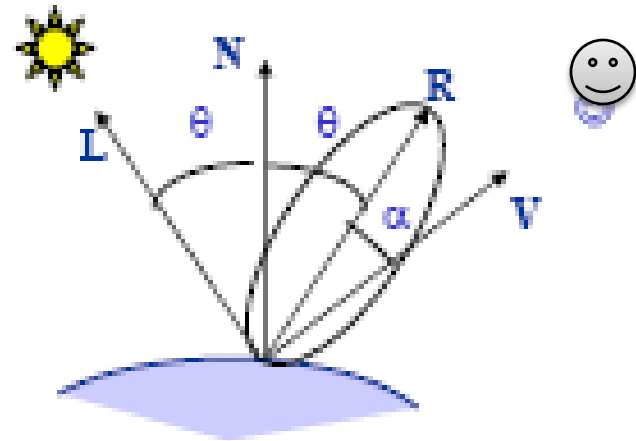
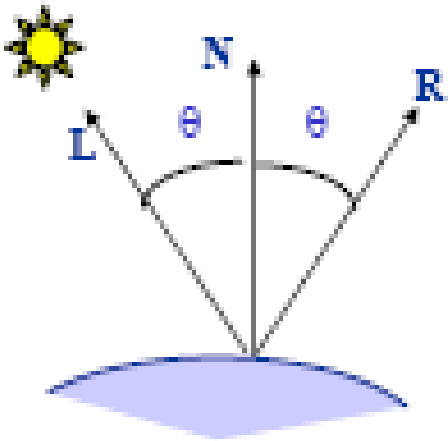
- Vecteur normal à la surface:  $N$
- Intensité de la source lumineuse :  $L$
- Direction de réflexion spéculaire maximale :  $R$

$$\cos \alpha = \langle V \cdot R \rangle$$

$$R = 2\cos\theta N - L = 2(N \cdot L) N - L$$

- Direction dans laquelle se trouve l'observateur :  $V$

➤ Modèle de Phong





# Réflexion spéculaire

- Le modèle d'illumination de *Phong* permet de calculer la quantité de lumière réfléchie spéculaire allant vers l'observateur en fonction du matériau.

$$I_s = k_s I_p (\cos \alpha)^n = k_s I_p (\vec{R} \cdot \vec{V})^n$$

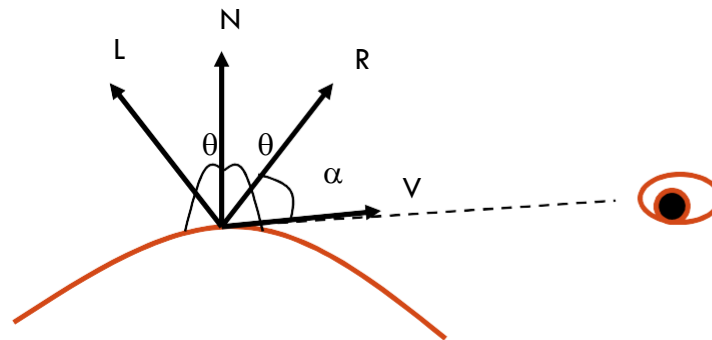
$\cos^n \alpha$  : Angle entre le rayon de lumière réfléchi  $R$  et l'observateur  $V$

$k_s$  : coefficient de réflexion spéculaire de l'objet

$n$  : Brillance de l'objet

- La réflexion spéculaire

dépend de l'orientation  
de la surface ainsi que de la  
position de l'observateur  
et de la lumière



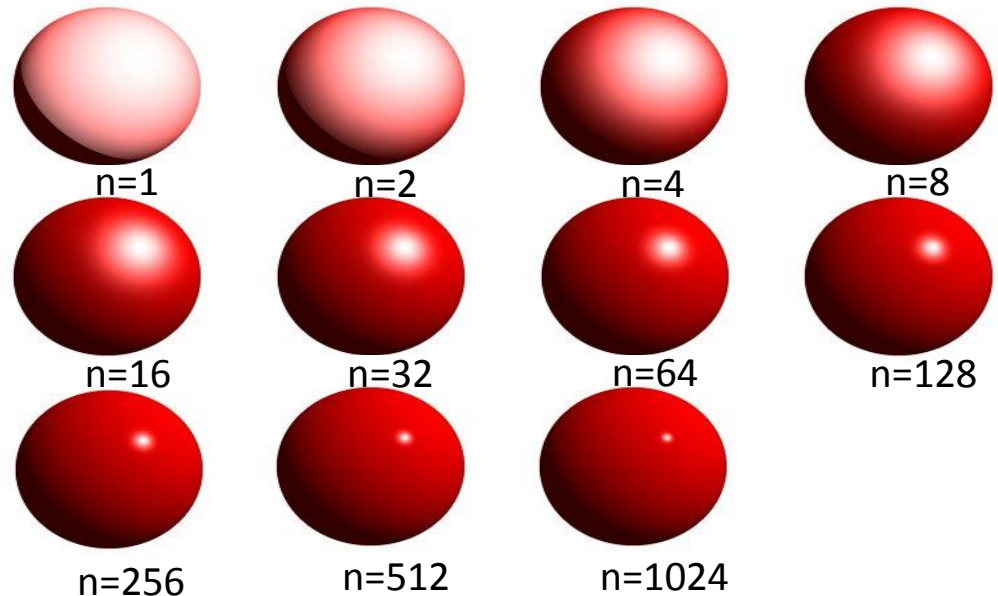
# Réflexion spéculaire

- Le miroir est un exemple de surface parfaitement réfléchissante: dans ce cas pour voir le rayon réfléchi R, il faut  $\alpha = 0$
- Le modèle spéculaire de Phong fait décroître l'intensité de cette réflexion selon  $\cos^n \alpha$  entre les vecteurs R et V
- $n$  contrôle la brillance de la surface (plus  $n$  est petit, moins la surface n'a d'éclat)

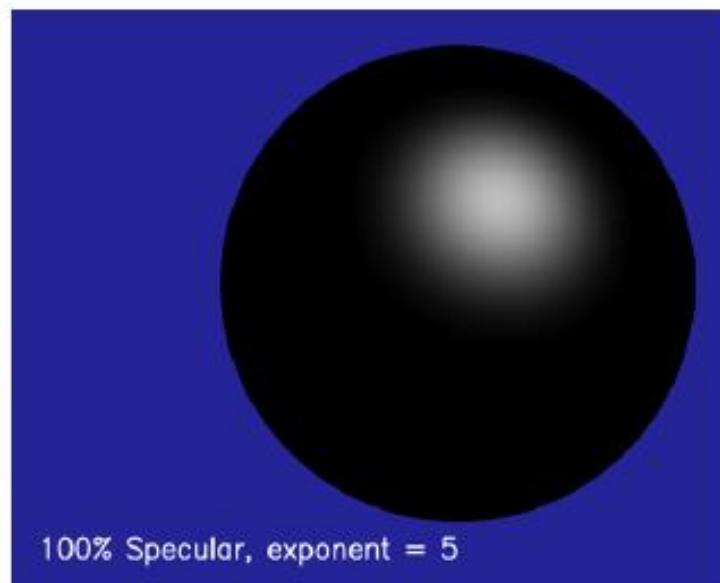
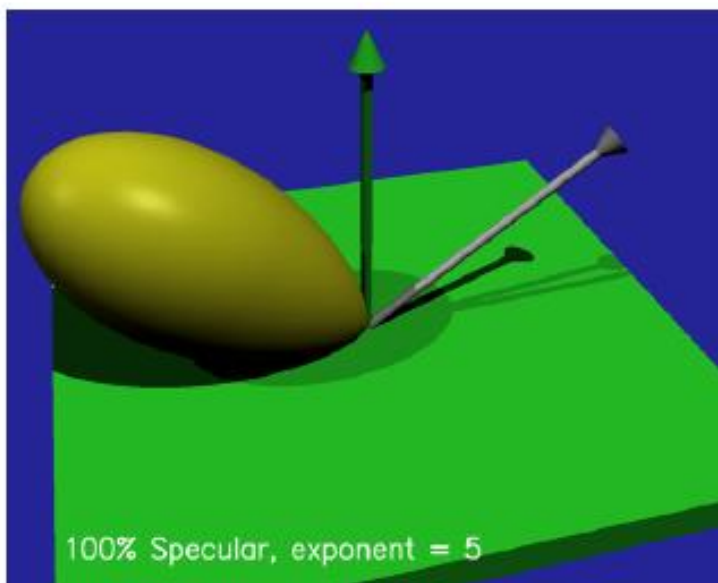
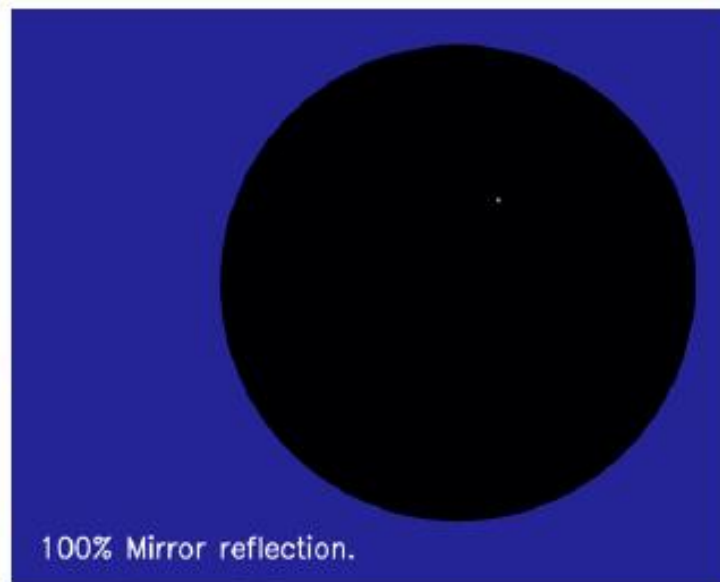
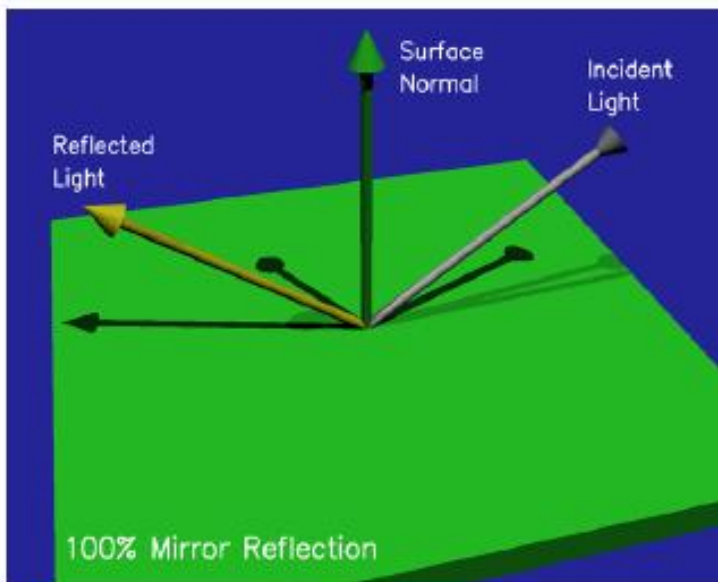
Choix de  $n$ :

$n$  est grand pour des surfaces métalliques et brillantes

$n$  est petit dans les cas de surfaces non métalliques (papier, plastique...)



# Réflexion spéculaire

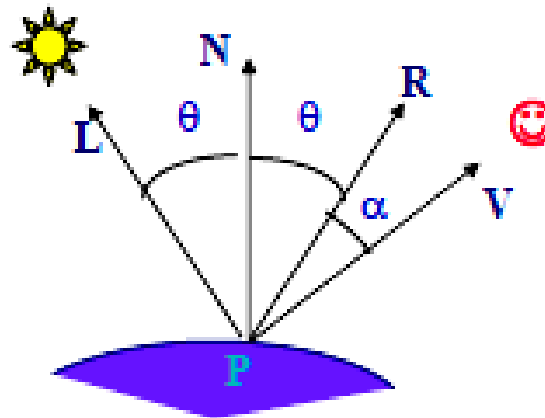


# Réflexion spéculaire

## Modèle de Phong

$$I = I_a k_a + f_{sp} I_P \left[ k_d (\vec{N} \cdot \vec{L}) + k_r (\vec{R} \cdot \vec{V})^\alpha \right]$$

- Matière
- Géométrie
- Observateur
- Source



# Modèle d'éclairage de Phong

$$I = I_a \cdot k_a + f_{att} I_p \left[ k_d \cos \theta + k_s \cos^n \alpha \right] \quad n \geq 1$$
$$I = I_a \cdot k_a + f_{att} \left[ I_p k_d (\vec{N} \cdot \vec{L}) + I_p k_s (\vec{R} \cdot \vec{V})^n \right] \quad \vec{N}, \vec{L}, \vec{R} \text{ et } \vec{V} \text{ normalisés}$$

↓  
ambiant

↓  
diffus

↓  
spéculaire

# Modèle d'éclairage de Phong

Facteur d'atténuation: *f<sub>att</sub>*

soit *d* la distance objet-source ponctuelle

$f_{att} = \frac{1}{d^2}$  mauvais rendu avec ce modèle d'éclairage

$f_{att} = \min \left( \frac{1}{C_1 + C_2 d + C_3 d^2}, 1 \right)$  meilleure simulation de l'atténuation  
*C<sub>i</sub>* associés à la source

$f_{att} = \frac{1}{d_0 + d}$  prise en compte de la position de l'observateur  
*d<sub>0</sub>* distance de l'objet à l'observateur

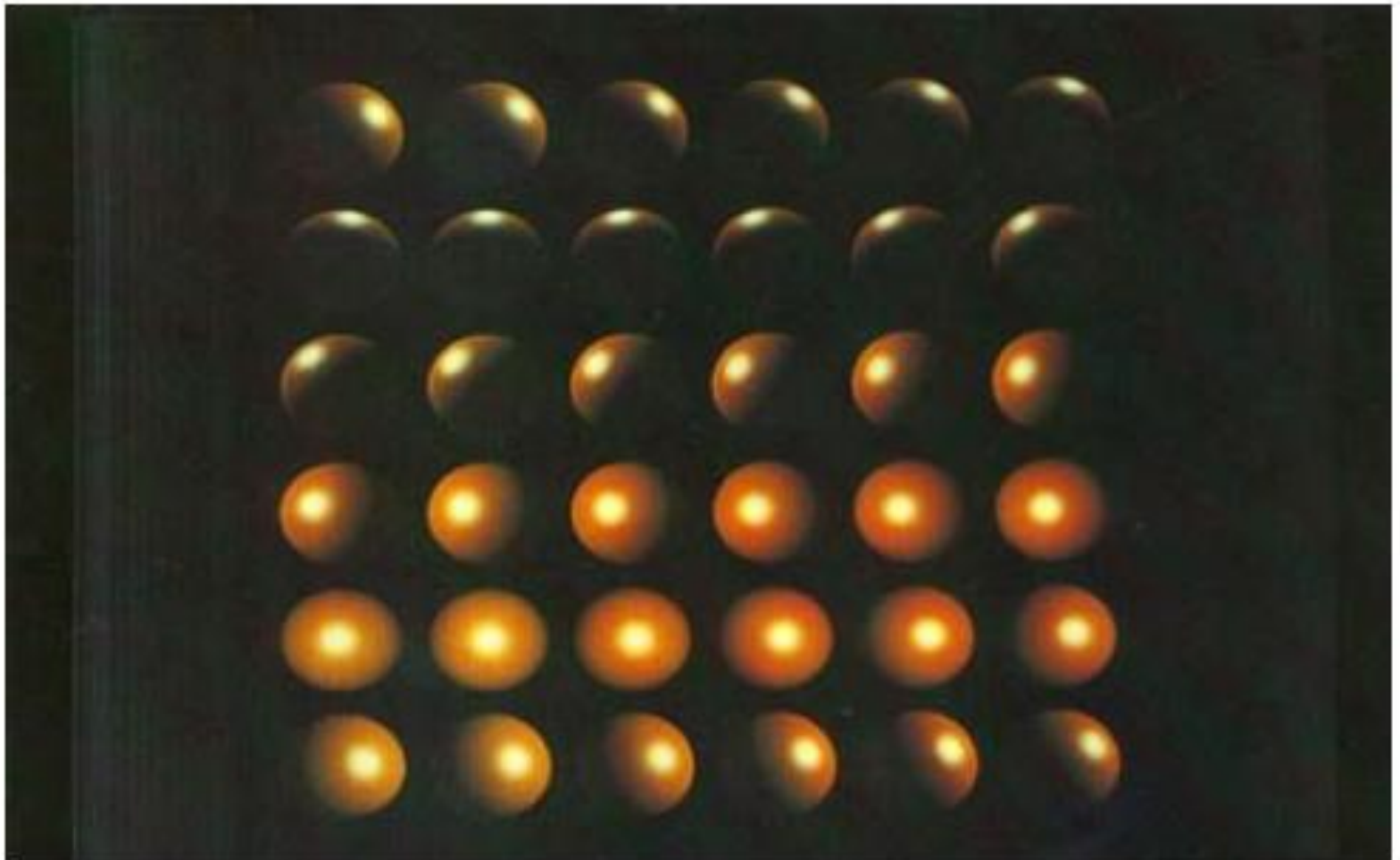
# Modèle d'éclairage de Phong

Exemple (ambient + diffus + spéculaire)



# Modèle d'éclairage de Phong

Sans terme ambient



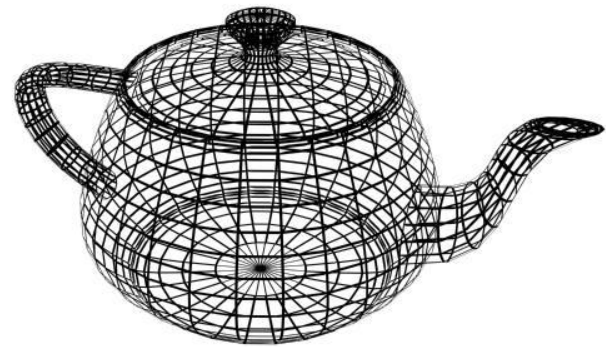


# Ombrages (Shading)

- On peut calculer l'illumination en chaque point d'une scène, mais cette opération peut s'avérer être très coûteuse en temps de calcul
- Il est possible d'en **réduire le coût** en approximant l'illumination sur chaque polygone de la scène
- Ces approximations **interpolent** l'illumination lors de la projection sur la fenêtre
- Quelques types de shadings:
  - Flat
  - Gouraud
  - Phong

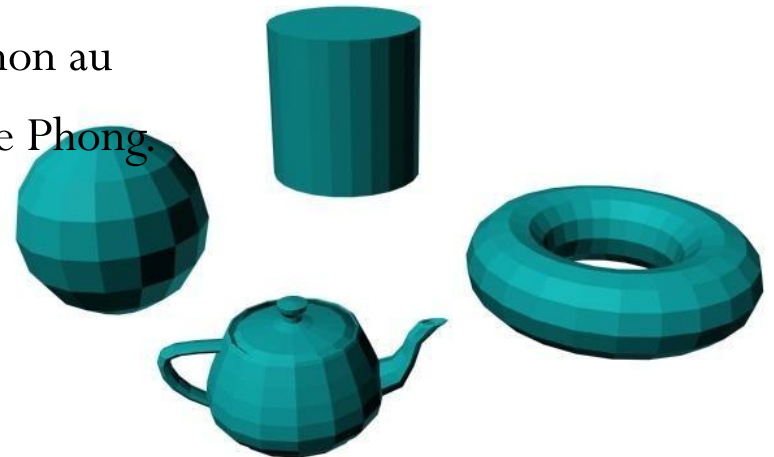
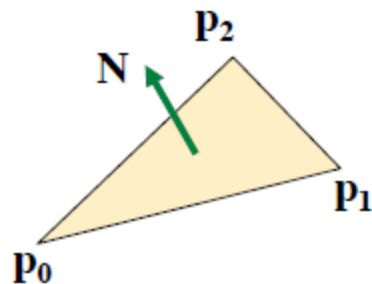
# Méthodes d'ombrages pour surfaces polygonales

- Etant donné un modèle d'illumination local, comment «rendre» en globalité les polygones de la scène ?
- Les algorithmes de rendu travaillent presque toujours avec des maillages de polygones... c'est beaucoup plus simple et rapide !



# Rendu facette (flat shading): ombrage constant

- C'est l'algorithme le plus simple dans la mesure où il n'y a pas d'interpolation entre les faces. Tous les points d'une face ont la même normale.
- Les points sont rendus en utilisant le modèle d'illumination Lambertien, par exemple.
- Les arêtes entre faces sont partout visibles (discontinuité des normales).
- polygones ou maillage polygonal :
- Calculer une seule valeur d'illumination pour la face. Couleur uniforme sur toute la face.
- Ici la normale utilisée sera la normale à la face et non au sommet comme dans le Gouraud ou le lissage de type Phong.



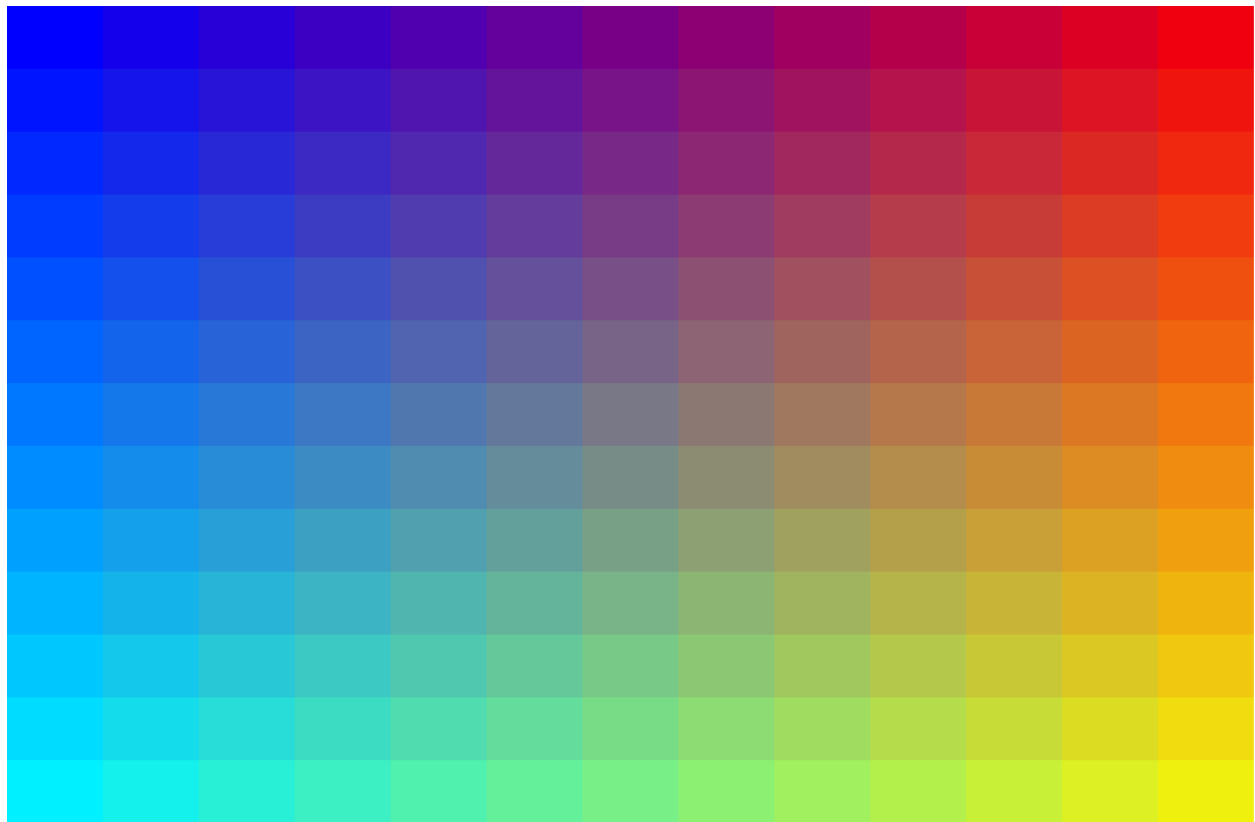
# Rendu facette (flat shading): ombrage constant

**Problème : discontinuités entre les faces**

L'oeil les perçoit très bien

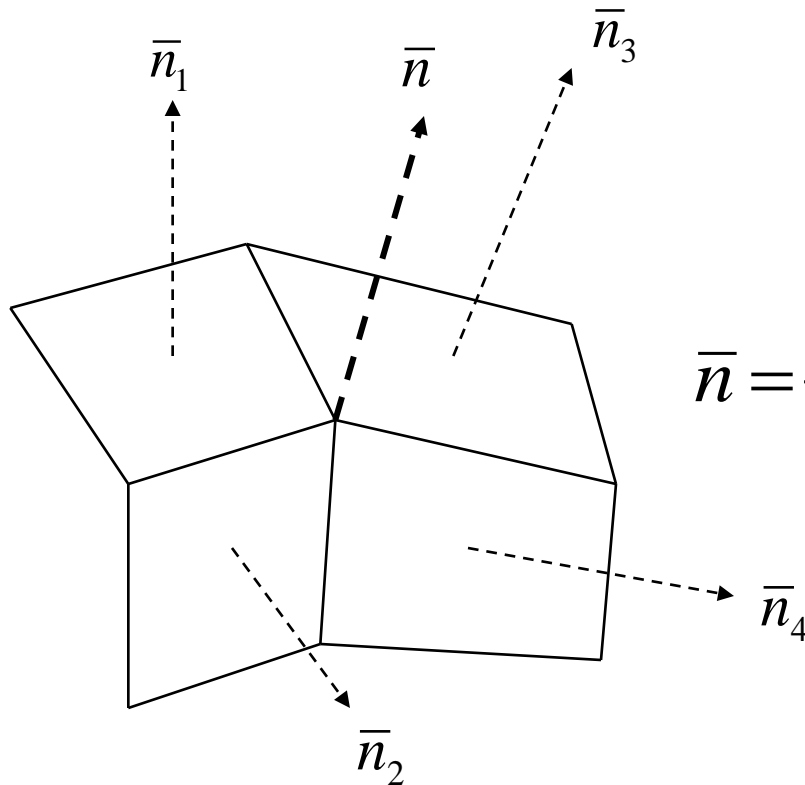
⇒ effet de « **Mach Banding** »

**Mach Banding**



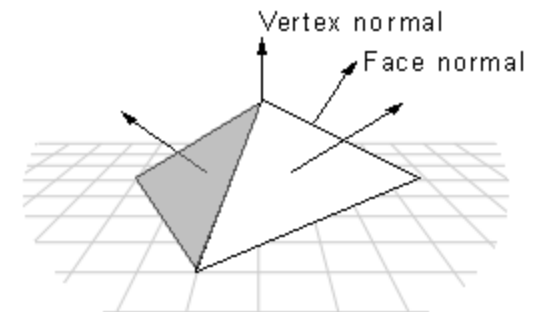
# Méthode de Gouraud:

- Cet algorithme améliore le rendu en faisant une interpolation entre les faces appartenant à un même groupe (smoothing group).
- On attribue à chaque sommet une “normale” qui est la moyenne des normales des faces aboutissant au sommet.



$$N = \frac{\sum N_i}{\left\| \sum N_i \right\|}$$

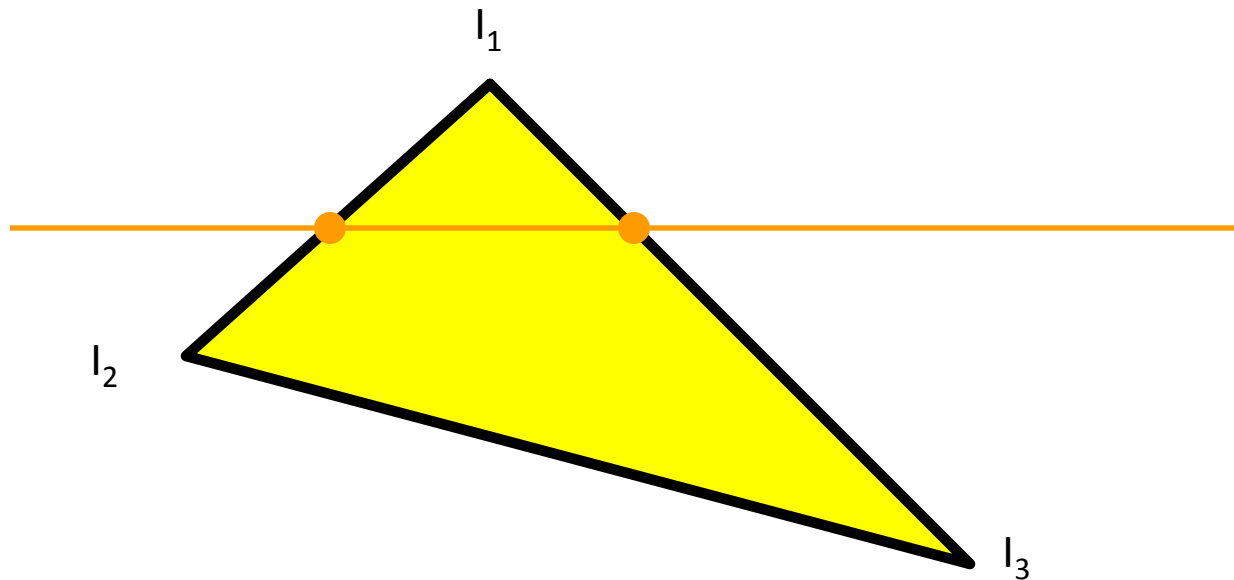
$$\bar{n} = \frac{1}{4} (\bar{n}_1 + \bar{n}_2 + \bar{n}_3 + \bar{n}_4)$$



# Méthode de Gouraud:

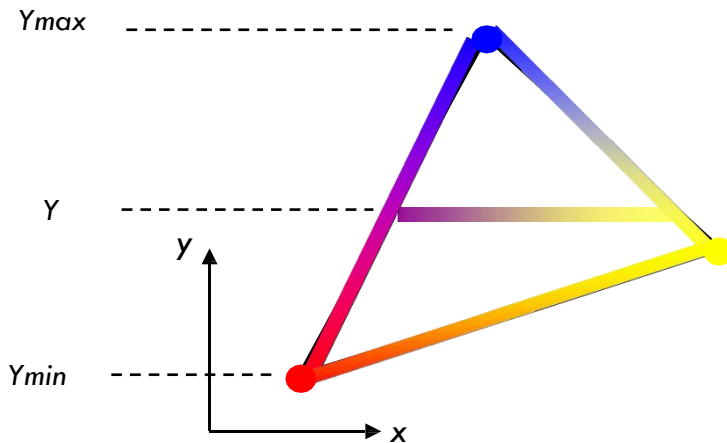
Quand on a une normale pour chaque sommet d'un polygone :

- Calculer une couleur pour chaque sommet (avec un modèle d'illumination)
- Sur une arête, interpoler les couleurs entre 2 sommets
- Sur une ligne de remplissage («*scanline*») du polygone, interpoler les couleurs entre 2 arêtes.



# Méthode de Gouraud:

- Polygones ou maillage polygonal : définition par les sommets basé sur l'interpolation des intensités entre les sommets
- Calcul d'une intensité pour chaque sommet (lissage : moyenne des normales)
- Intensité entre 2 sommets = interpolation linéaire des intensités



$C_{Ymin}, C_{Ymax}$  = shading at  $Ymin, Ymax$

$$C_y = \frac{(Y - Ymin)C_{Ymax} + (Ymax - Y)C_{Ymin}}{Ymax - Ymin}$$

- Plus rapide que de calculer l'illumination pour chaque pixel.
- Le rendu spéculaire n'est pas de très bonne qualité; en effet, une réflexion spéculaire doit apparaître à un sommet pour être rendue.

# Méthode de Gouraud:

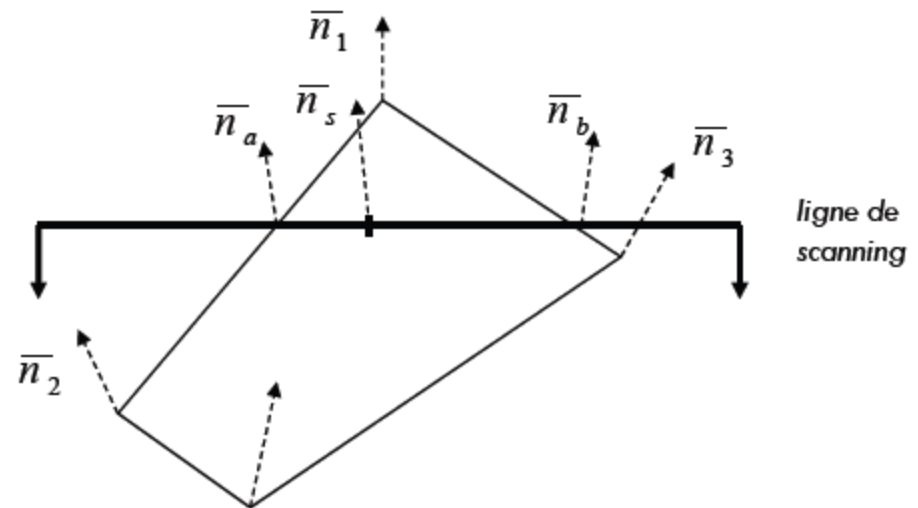
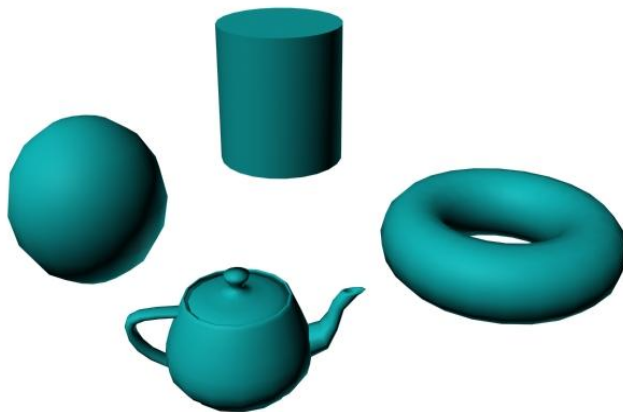
## Résumé

- **Interpolation** des valeurs d'intensité calculées **aux sommets** de la face:
  1. Calcul des normales aux sommets
  2. Calcul des intensités aux sommets
  3. Interpolation des intensité lors de la rasterisation



# Méthode de Phong:

- polygones ou maillage polygonal : définition par les sommets basé sur l'interpolation des normales entre les sommets
- calcul d'une normale moyenne pour chaque sommet (lissage)
- intensité entre 2 sommets = interpolation linéaire des normales puis calcul de l'intensité
- Interpolation des normales plutôt que des couleurs
- Méthode d'interpolation identique
- L'intensité réfléchi n'est calculée qu'après interpolation des normales.
- Le rendu spéculaire est de bien meilleure qualité que dans le cas de l'algorithme de Gouraud.



# Méthode de Phong:

- **Interpolation des normales** calculées **aux sommets** de la face:
  1. Calcul des normales aux sommets
  2. Interpolation des normales lors de la rasterisation
  3. Normalisation des normales
  4. Calcul des intensités par fragment

# Comparaison des méthodes

## ▣ Rendu facette (pas d'interpolation)

- Couleur constante pour chaque polygone
- Peu coûteux

## ▣ Gouraud (interpolation des couleurs)

- Rendu pour chaque sommet
- Interpolation linéaire des couleurs sur le polygone
- Coût : 3 entiers additionnés pour chaque pixel
- Problème pour les objets spéculaires

## ▣ Phong (interpolation des normales)

- Calcul des normales des sommets
- Interpolation linéaires des normales sur le polygone
- Utilisation des normales interpolées pour rendre chaque pixel (cher !)  
Coût : de 10 à 100 opérations sur des réels pour chaque pixel
- Résout le problème des objets spéculaires.

# Comparaison des méthodes



Rendu facette

Gouraud

Phong