

# Modèles de matériaux

Nicolas Holzschuch  
iMAGIS-GRAVIR/IMAG

iMAGIS is a joint project of CNRS - INPG - INRIA - UJF

# Illumination et ombrage

- Représenter l'apparence d'un objet sous l'influence de la lumière
  - Réflexion
  - Réfraction
  - Transparence
- Modèles de matériaux
  - Heuristiques (hacks) : Phong
  - Basés sur la physique : Torrance-Sparrow, Ward

# Plan

- Modèles de matériaux :
  - Réflexion ambiante
  - Réflexion diffuse
  - Réflexion spéculaire
  - Modèle de Phong
- Interpolation :
  - Ombrage de Gouraud, ombrage de Phong
  - Problèmes avec l'interpolation

# Illumination

- Les objets sont éclairés
  - On suppose une source ponctuelle
- On exclut toute interaction entre les objets
  - Pas d'ombres, pas de reflets, pas de transfert de couleurs
- Calculer la couleur des objets en tout point

# Réflexion ambiante

- La couleur ne dépend pas de la position, uniquement de l'objet :

$$I = I_a k_a$$

- $I_a$  : lumière ambiante
- $k_a$ : coefficient de réflexion ambiante
- Modèle très primitif
  - Pas de sens physique possible
  - La forme des objets est invisible
  - Mais néanmoins très utile pour masquer les défauts des autres modèles

# Réflexion ambiante



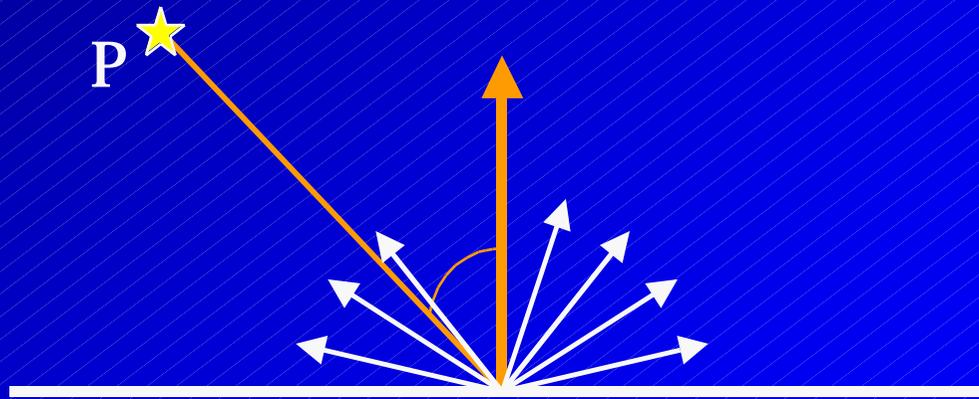
ka augmente

# Réflexion diffuse

- Matériaux mats
- La lumière de la source est réfléchiée dans toutes les directions
- L'aspect de l'objet est indépendant de la position de l'observateur
  - Pour ce qui est de la couleur
- Ne dépend que de la position de la source :  
$$I = I_p k_d \cos$$

# Réflexion diffuse

- $I = I_p k_d \cos$
- $I_p$  : source ponctuelle
- $k_d$ : coefficient de réflexion diffuse
- : angle entre la source et la normale



# Réflexion diffuse seule

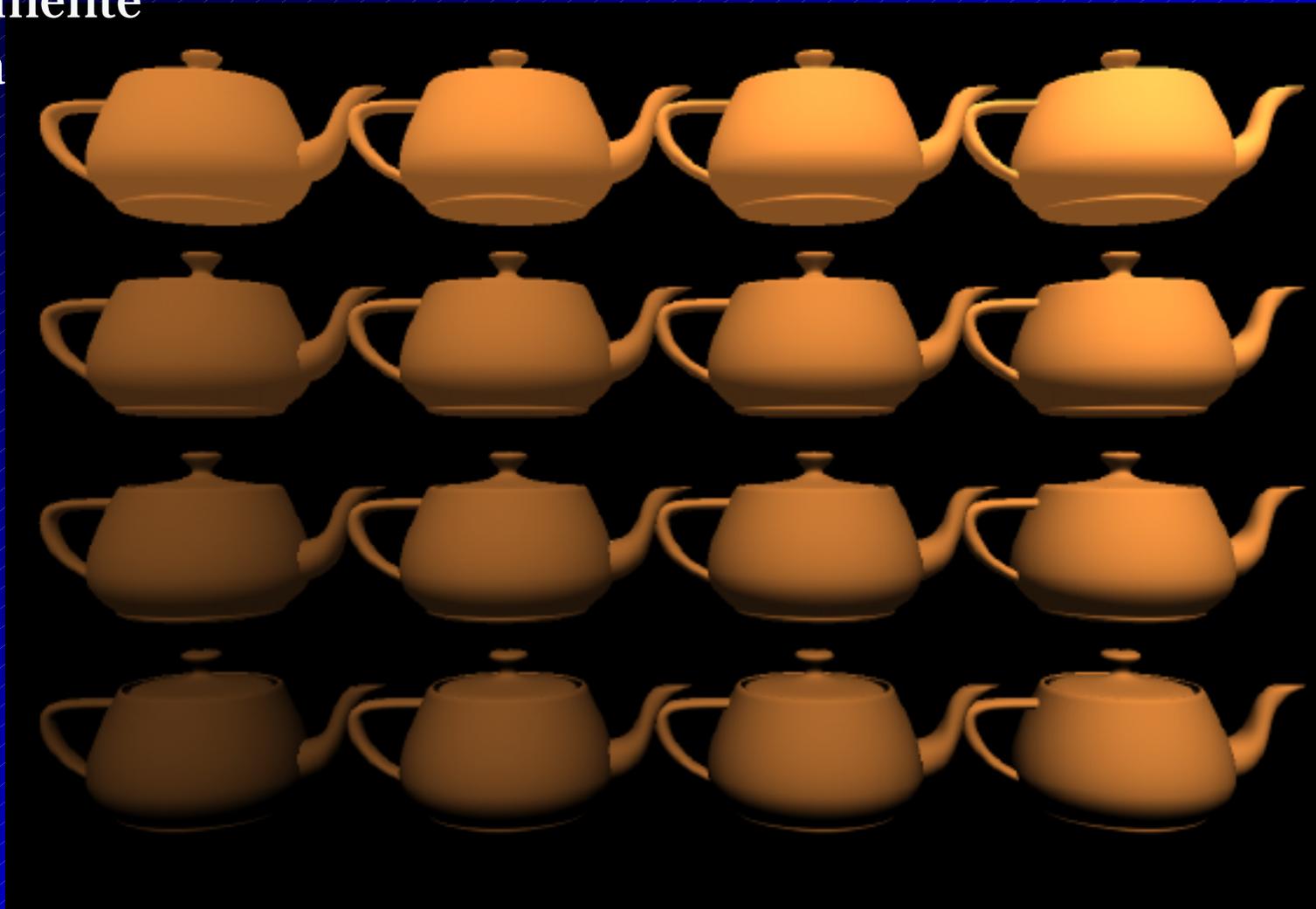


On augmente  $k_d$  ( $k_a=0$ )

# Diffuse + ambient

On augmente

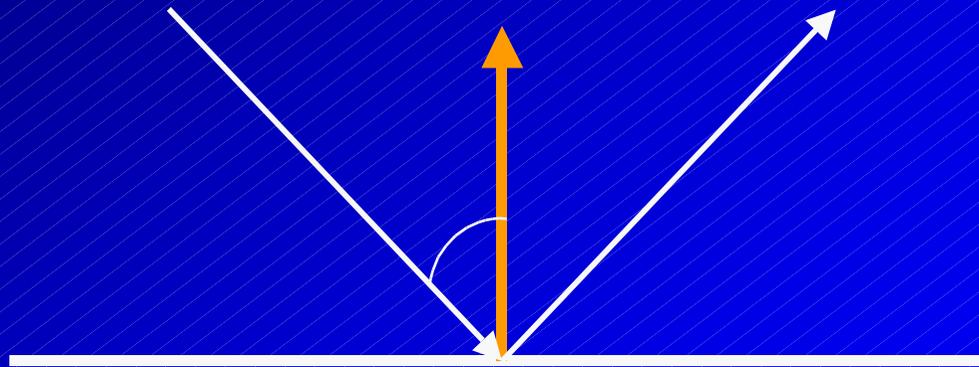
$k_a$



On augmente  $k_d$

# Réflexion spéculaire

- Miroirs parfaits
- Loi de Descartes :
  - La lumière qui atteint un objet est réfléchiée dans la direction faisant le même angle avec la normale
  - Loi de Snell pour les anglo-saxons

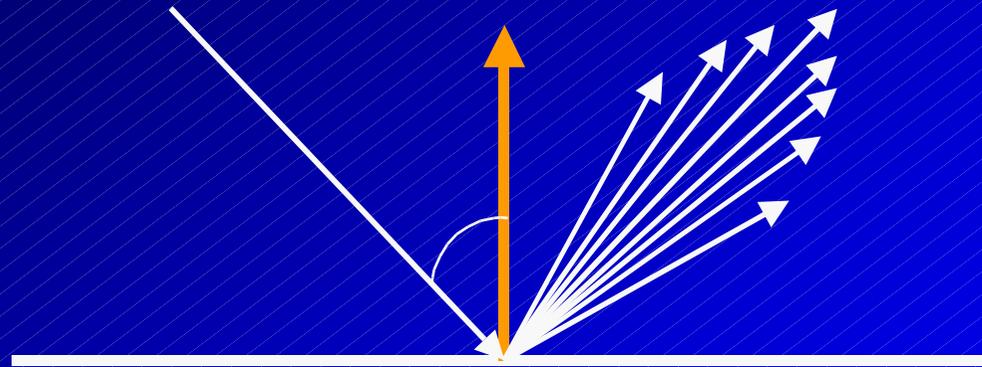


# Réflexion spéculaire : problème

- Avec une source ponctuelle et pas de reflets, l'effet n'est visible qu'en un seul point de la surface
- Modèle très pratique pour l'éclairage indirect
  - Reflets, ombres...

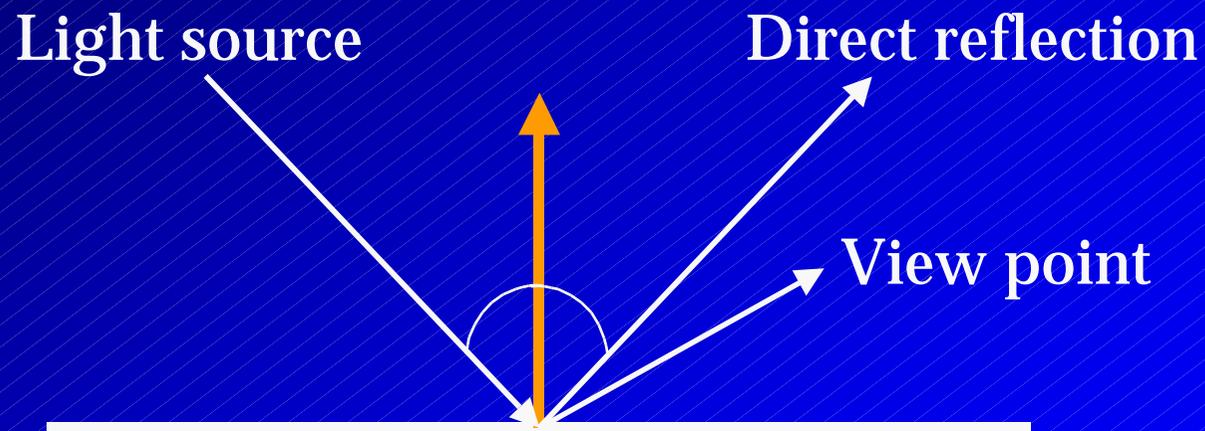
# Modèle de Phong

- Réflecteur spéculaire imparfait :



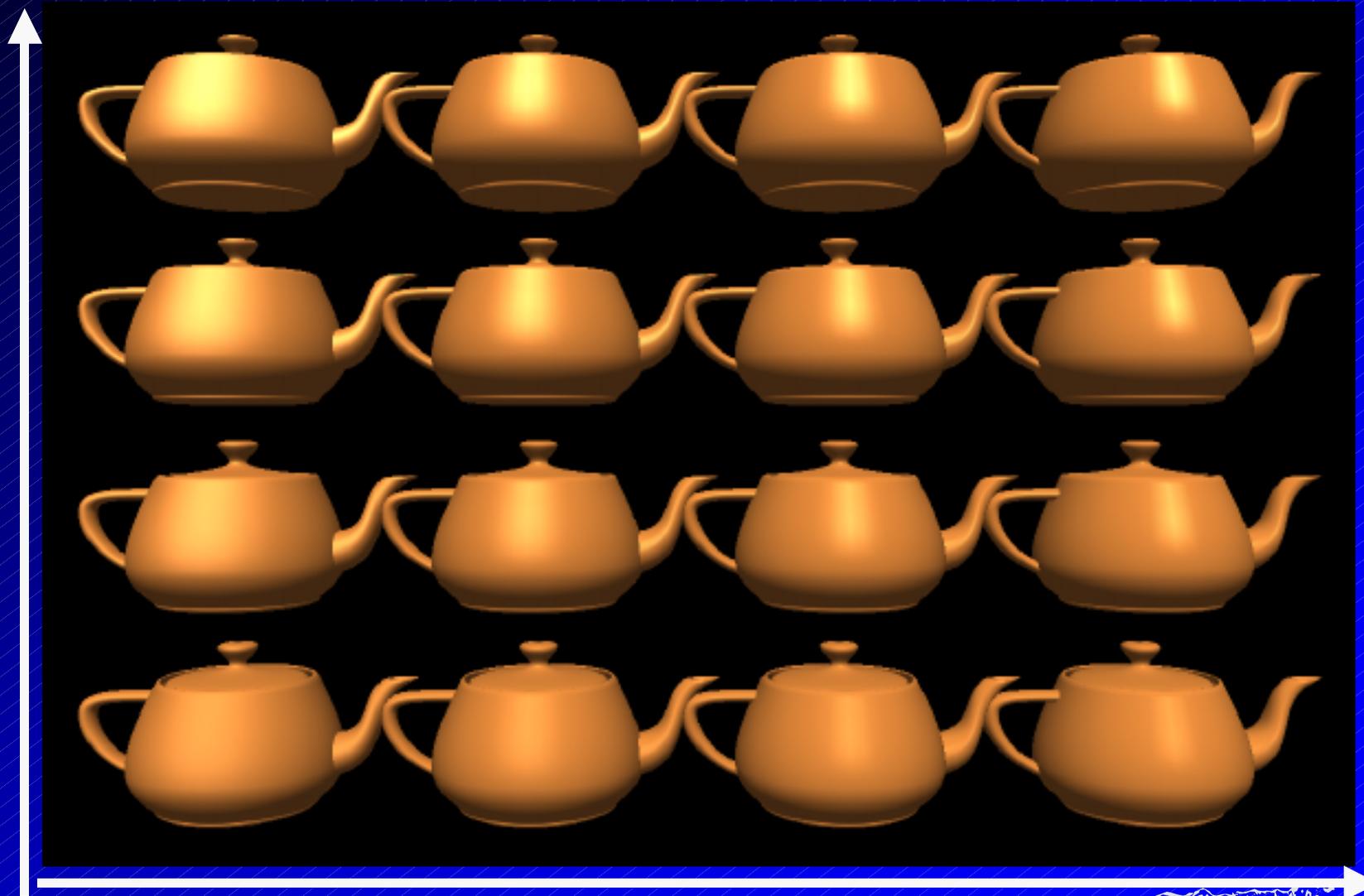
# Modèle de Phong

- $I = I_p k_s (\cos \theta)^n$



# Modèle de Phong

$k_s$



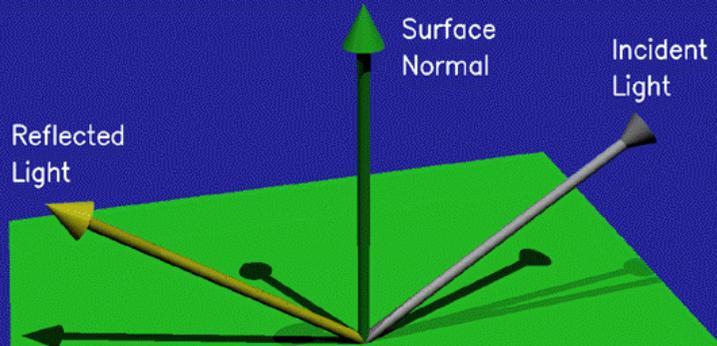
On augmente  $n$

# En pratique

- On les mets tous ensemble :

$$I = I_a k_a + I_p k_d \cos^2 \theta + I_p k_s (\cos \theta)^n$$

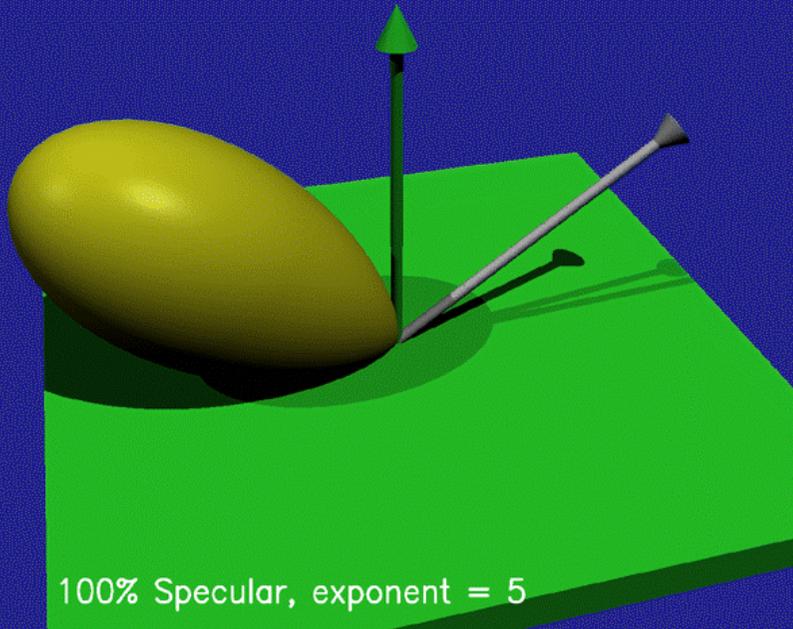
- Plusieurs sources lumineuses : somme des intensités
- Modèle de matériaux des bibliothèques graphiques



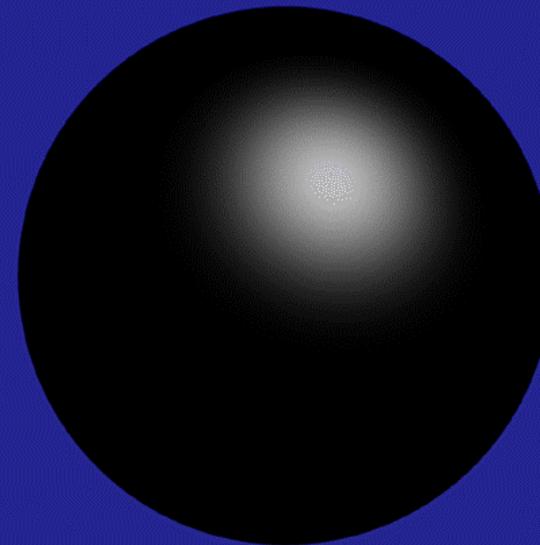
100% Mirror Reflection



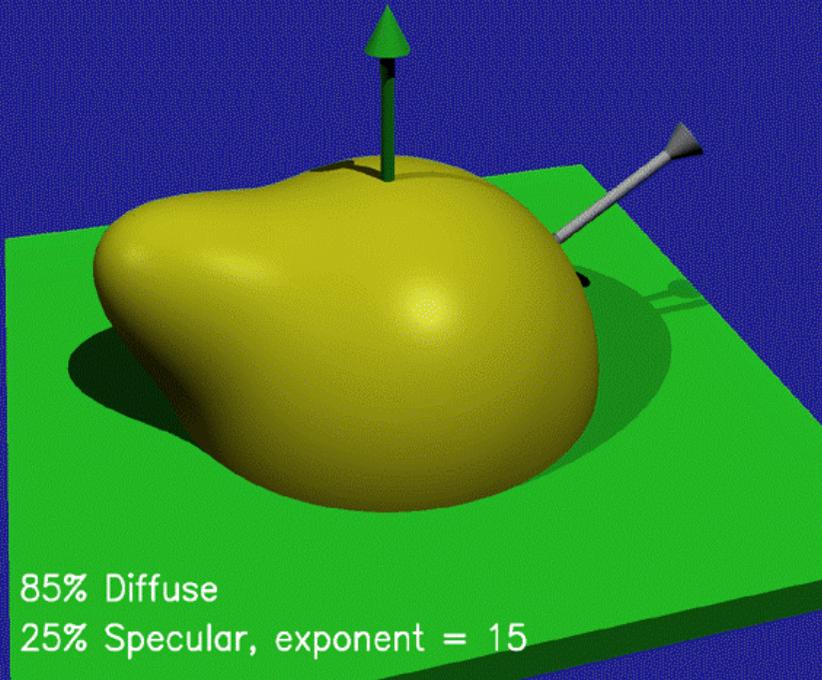
100% Mirror reflection.



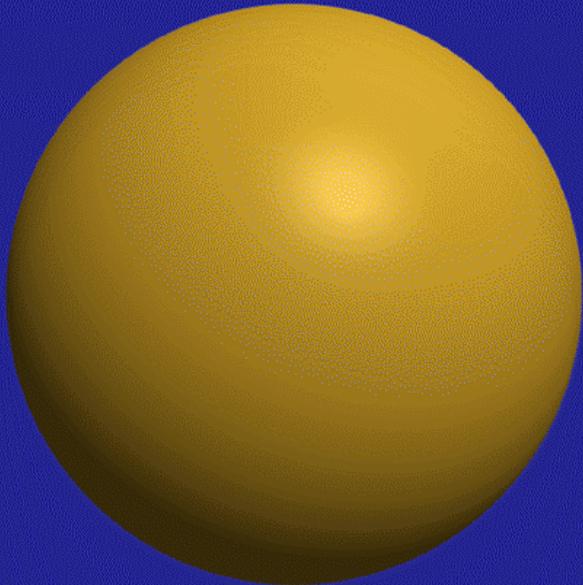
100% Specular, exponent = 5



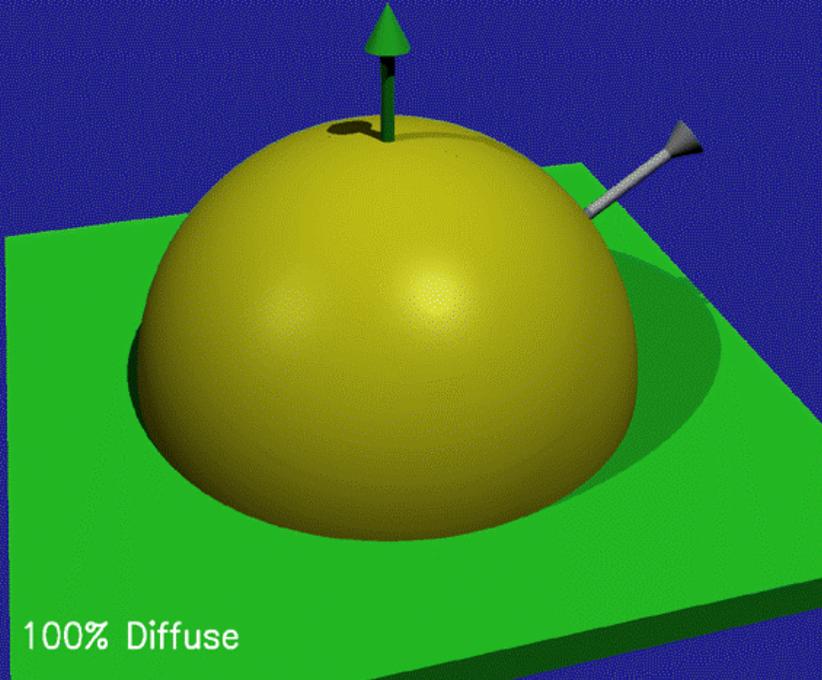
100% Specular, exponent = 5



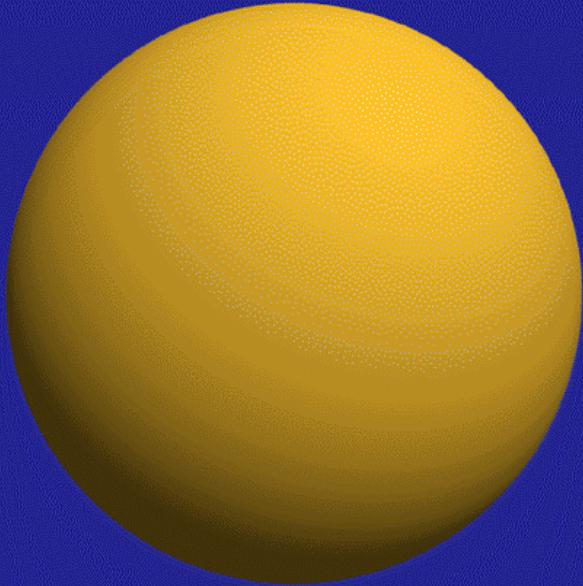
85% Diffuse  
25% Specular, exponent = 15



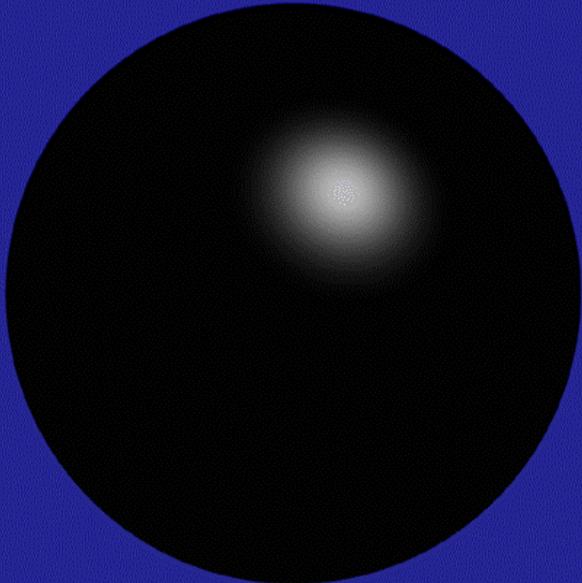
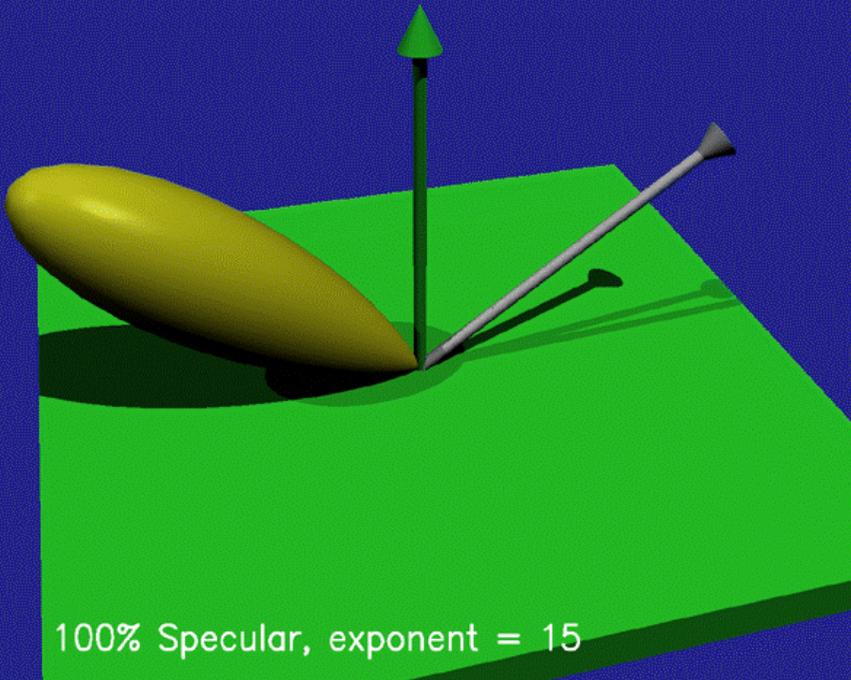
85% Diffuse  
25% Specular, exponent = 15



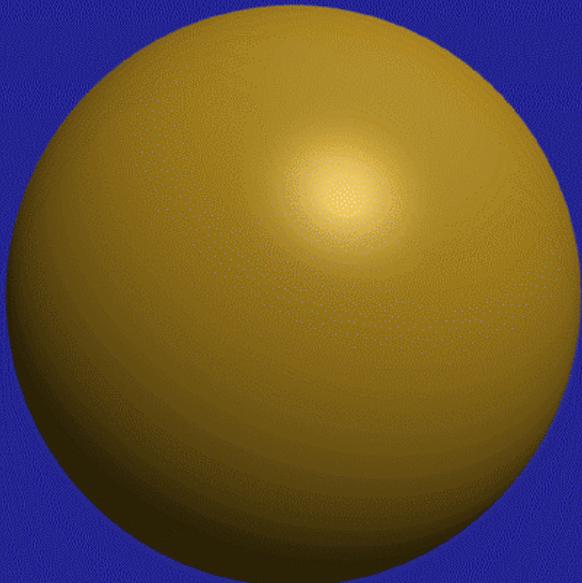
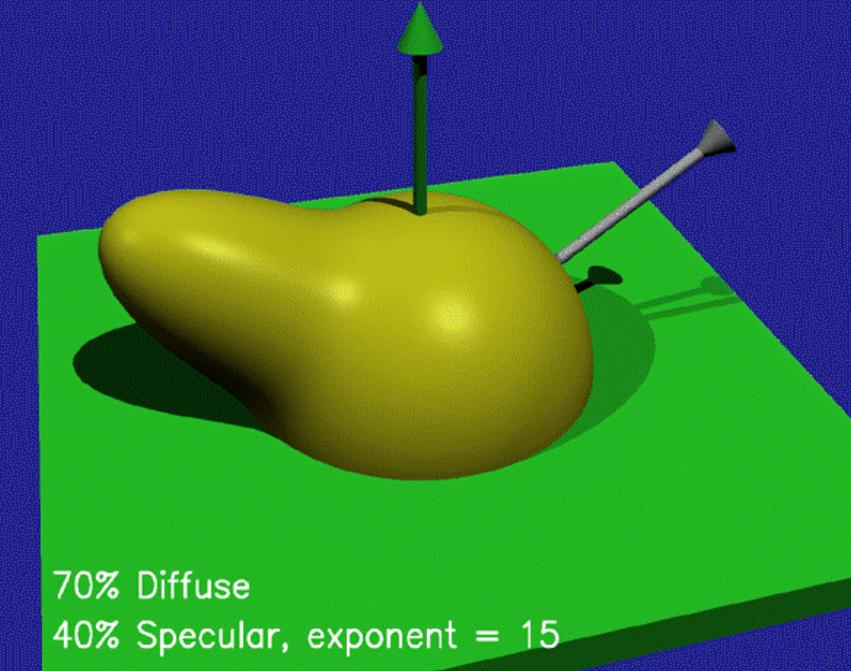
100% Diffuse



100% Diffuse



100% Specular, exponent = 15



70% Diffuse  
40% Specular, exponent = 15

# Modèle de Torrance

- Cook-Torrance, Torrance-Sparrow...
- Le modèle de Phong n'a pas de sens physique
  - Très pratique
  - Rapide à calculer
  - Mais pas de lien avec les propriétés du matériau
    - Rugosité
- Modèle physique
  - Lié aux propriétés des objets
  - Mais... plus complexe

# Modèle de Cook-Torrance

- Fondements physiques
- La surface est représentée par une distribution de micro-facettes
- Produit de trois termes :
  - coefficient de Fresnel
  - distribution angulaire
  - auto-ombrage

$$R_s = F D G$$

# Fresnel

$$F = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_t)}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)} + \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_t)}{\tan^2(\theta_i + \theta_t)} \right]$$

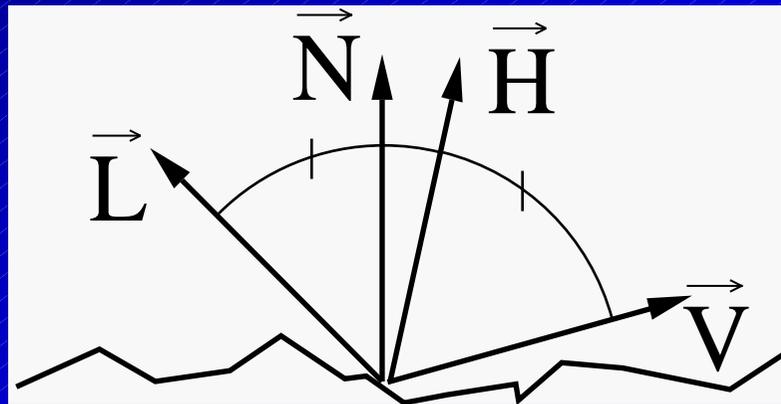
$\theta_i$  = angle d'incidence

$\theta_t$  = arcsin( $n_2/n_1$ )

- [ $n$  = indice de réfraction]

# Distribution des micro-facettes

Probabilité qu'une micro-facette soit orientée dans la direction médiane entre la source et l'observateur.



# Distribution des micro-facettes

- Gaussienne
- Beckmann (1963)

$$D = \frac{1}{4m^2 \cos^4} e^{-[\tan \theta / m]^2}$$

# Auto-ombrage

Auto-ombrage



Masquage de la surface par elle-même



# Modèle de Ward

- Mesures physiques sur les objets
  - Gonio-réfectomètre
  - Série de données
- Lissées par des gaussiennes
- Modèle anisotrope

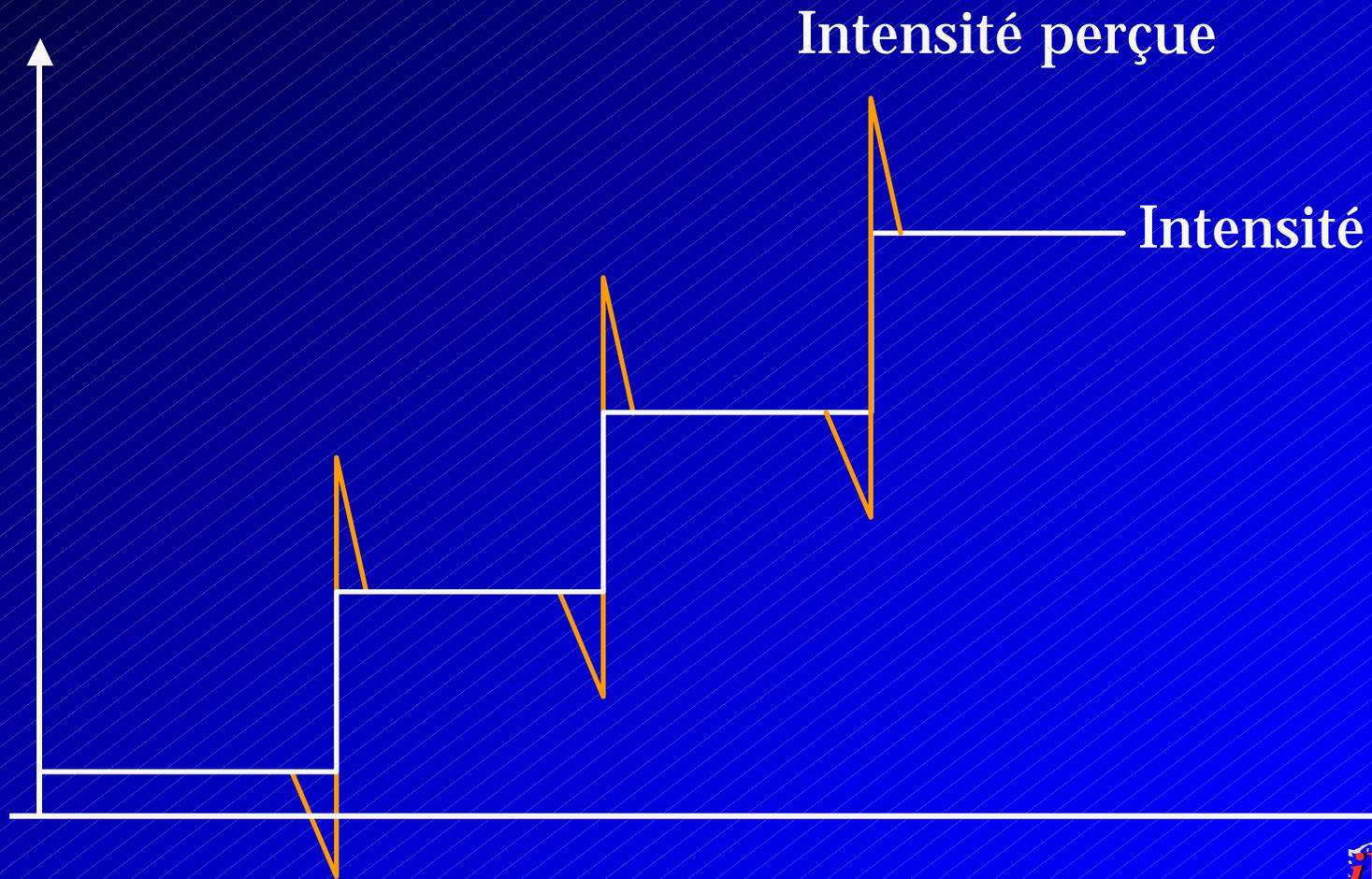
# Ombrage d'un objet entier

- Pour l'instant, calculs d'éclairage ponctuels
- Éviter de calculer l'éclairage pour tous les pixels de l'écran
- Illumination constante pour chaque polygone
  - Éventuellement en augmentant le nombre de polygones
  - Problème : *Mach banding*

# Mach Banding

- L'œil est un réflecteur logarithmique
  - cf. plus haut
- L'œil exagère les changements d'intensité et les changements de pente de l'intensité
  - Appelé *Mach banding*
- Ça va poser des problèmes

# Mach banding

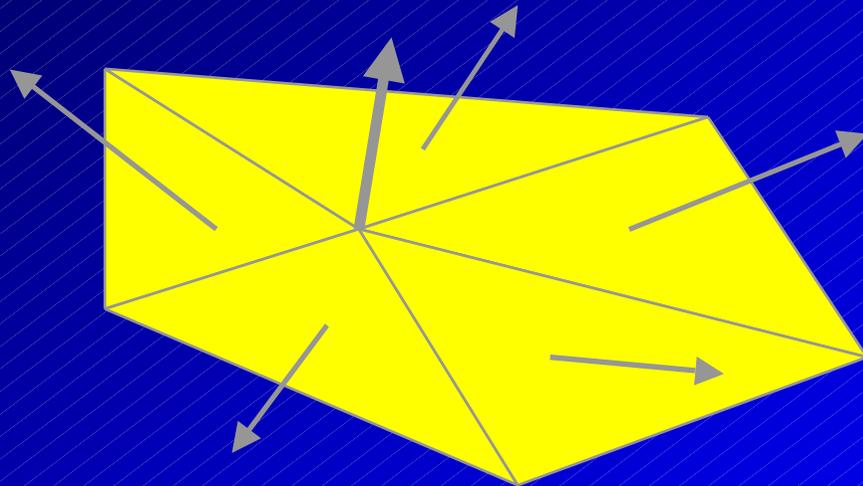


# Interpolation de l'illumination

- Interpolation de Gouraud
  - Calculer la couleur pour chaque sommet, puis on interpole
- Quelle est la normale d'un sommet ?
  - Si la surface de départ est analytiquement connue, on extrait les normales
  - Si la donnée de départ est un maillage polygonal ?

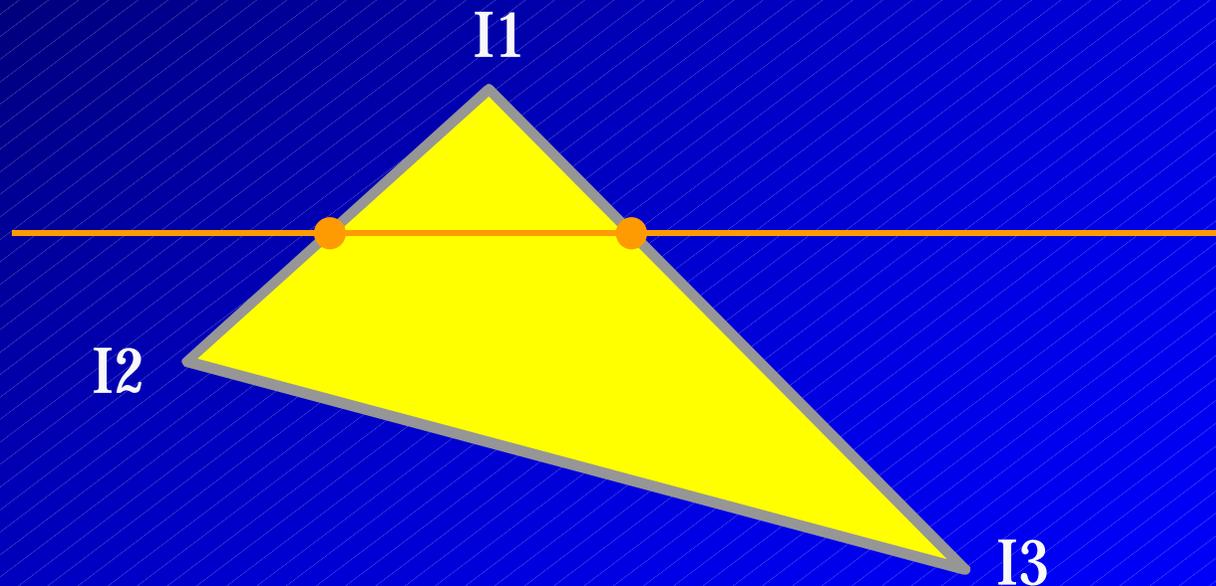
# Interpolation de Gouraud

- Normale d'un sommet :
  - Moyenne des normales aux polygones voisins du sommet



# Interpolation de Gouraud

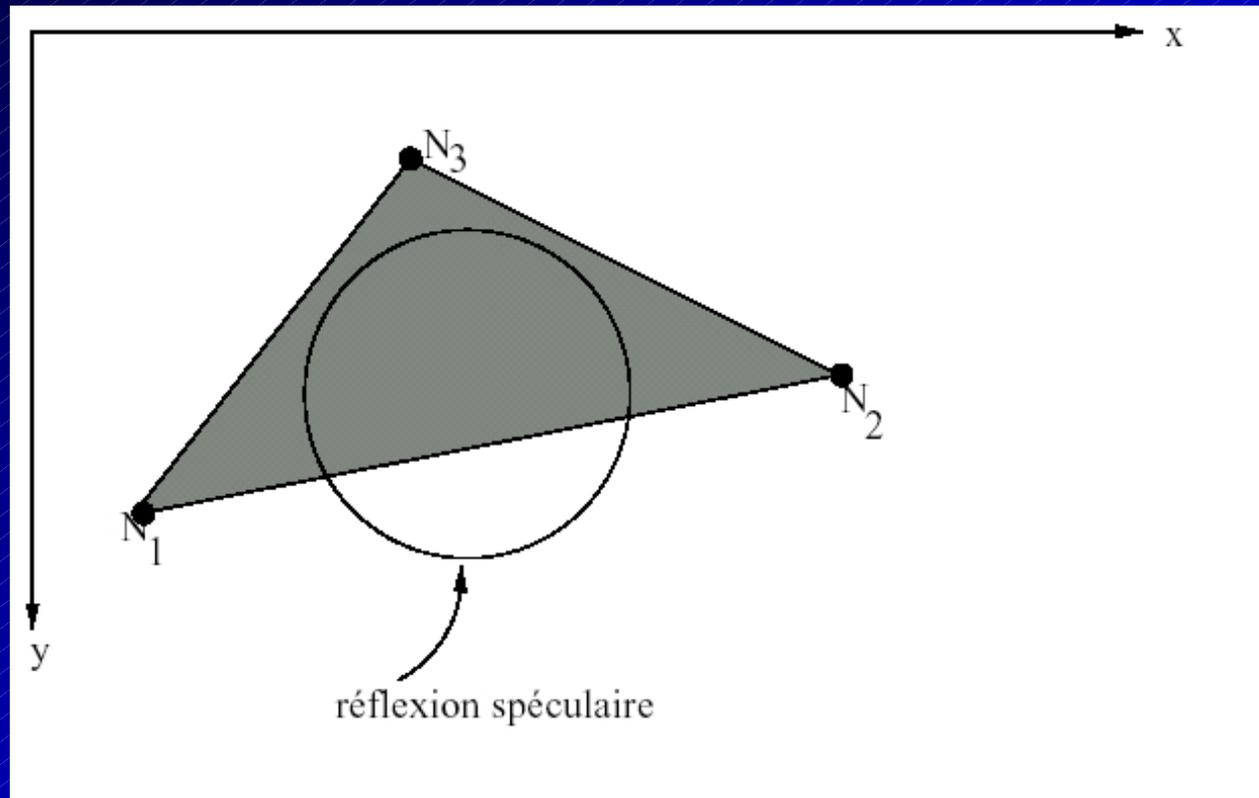
- Quand on a la normale à un sommet :
  - On calcule la couleur pour ce sommet
- Puis on interpole suivant chaque scanline :



# Interpolation de Phong

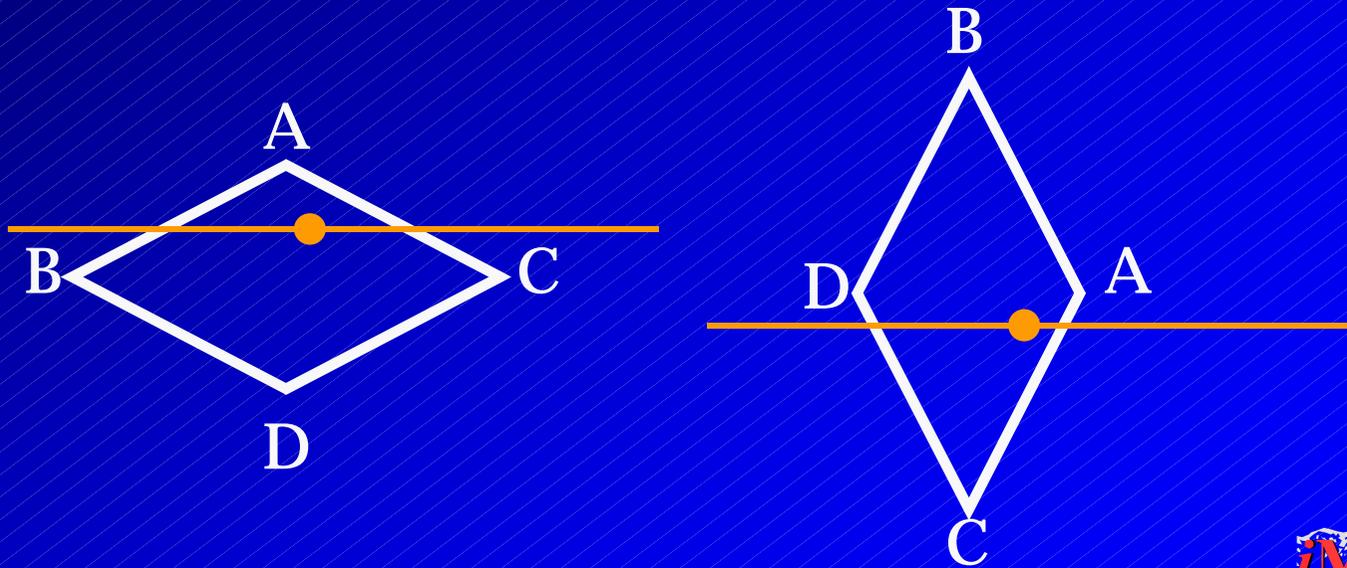
- Au lieu d'interpoler les couleurs, on interpole les normales
  - Sur chaque arrête
  - Sur chaque scanline
- Plus lent que Gouraud, mais nettement plus beau
- Permet de calculer les effets spéculaires contenus dans une facette

# Effets spéculaires dans une facette



# Problèmes avec l'interpolation

- La silhouette reste polygonale
  - Il suffit d'ajouter plus de polygones
- Dépend de l'orientation :



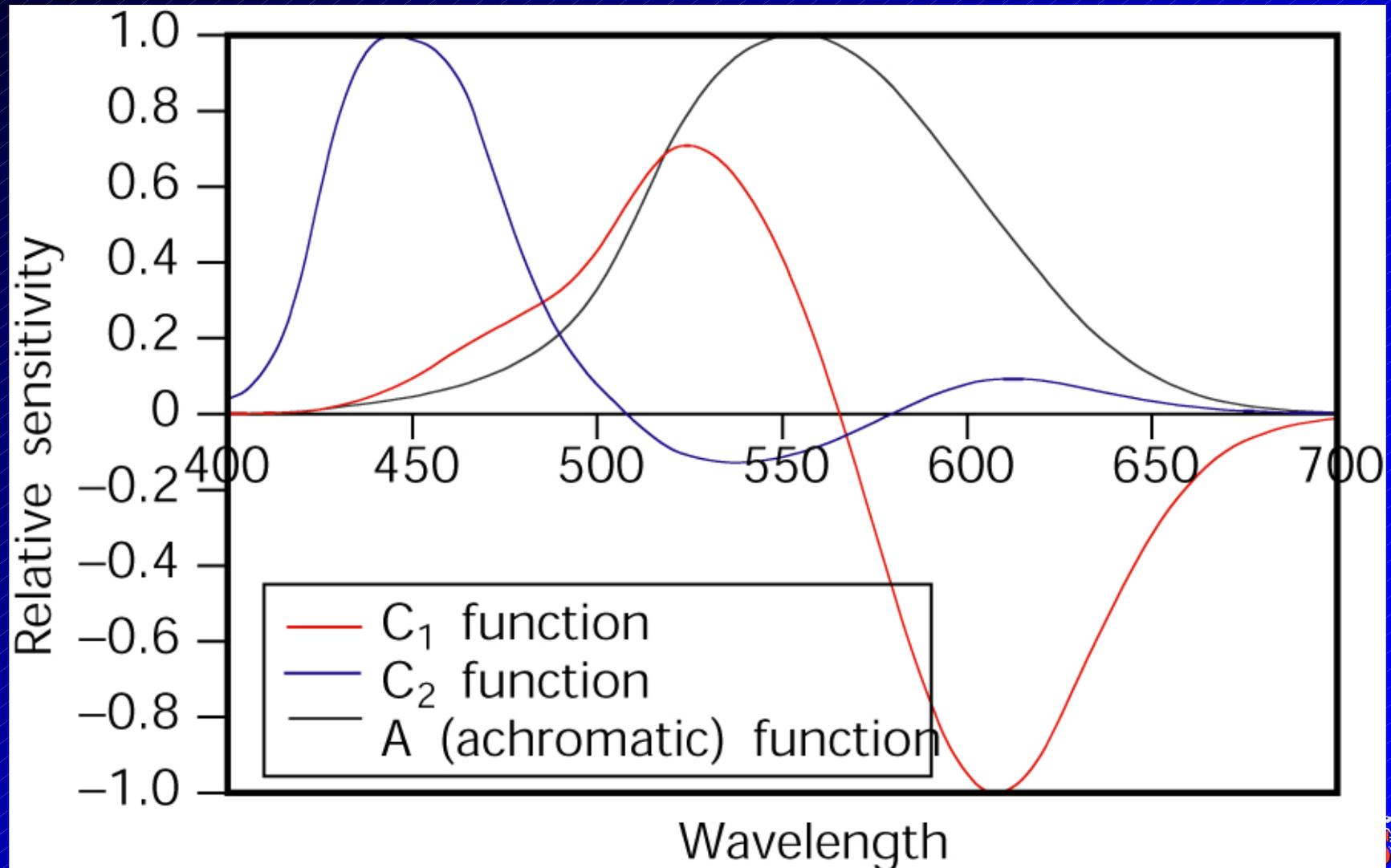
# Ombrage et interpolation

- Le réalisme se paie
- Échange entre qualité et temps
- La plupart du temps, des hacks qui sont jolis
- La simplicité de l'algorithme est cruciale :
  - Ombrage de Gouraud fait en hardware sur la plupart des cartes
  - Ombrage de Phong faisable sur GeForce 3

# Et le lien avec la couleur ?

- Coefficients de réflexion, sources lumineuses
  - Tous en couleur
  - Quelle représentation ?
- La plupart du temps, RVB
  - Imparfait, mais tellement pratique...
- Quand on est sérieux :
  - Représentation spectrale complète
    - Chère, mais exacte
  - Représentation de Meyer ( $AC_1C_2$ )

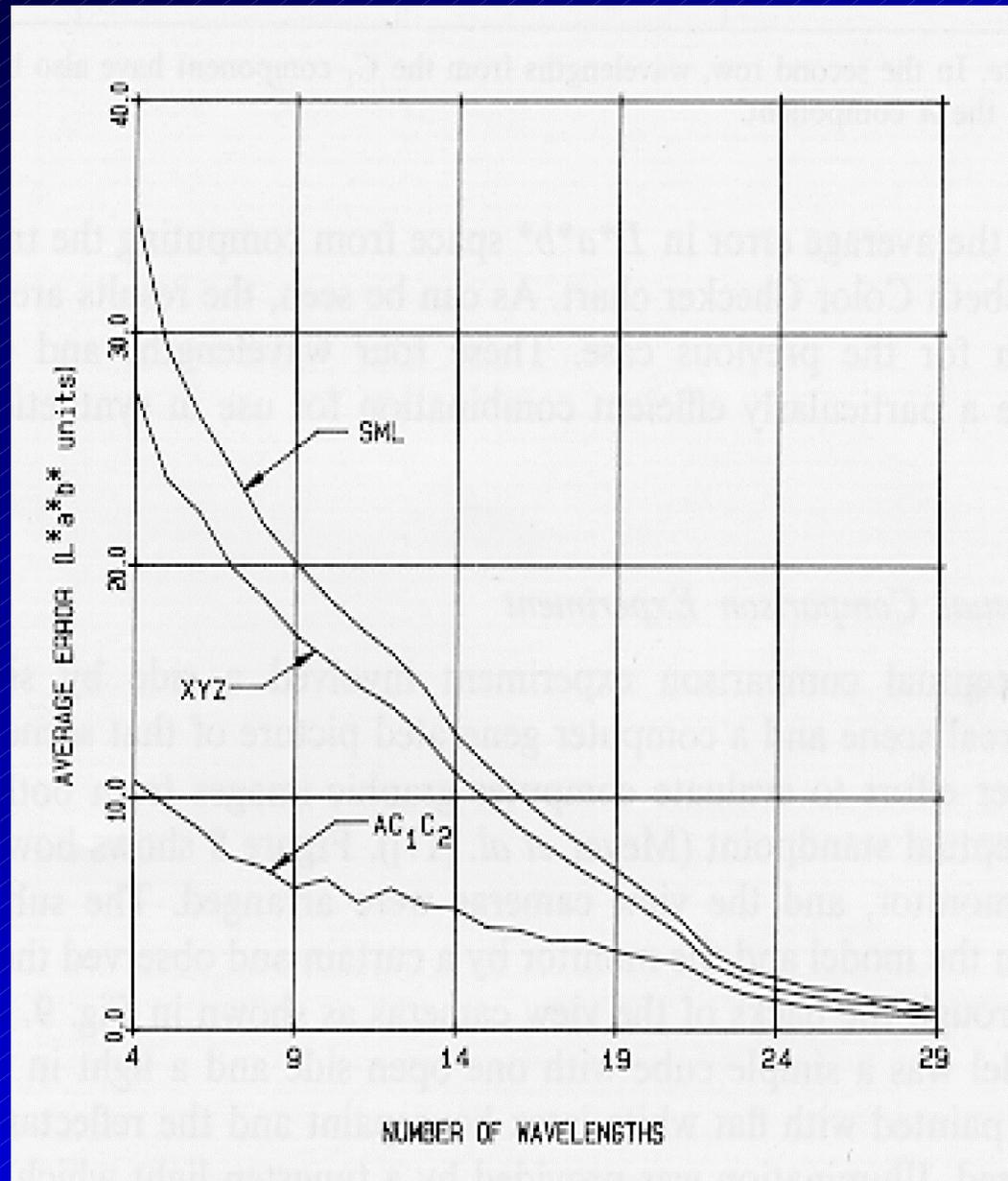
# Fonctions de base de Meyer



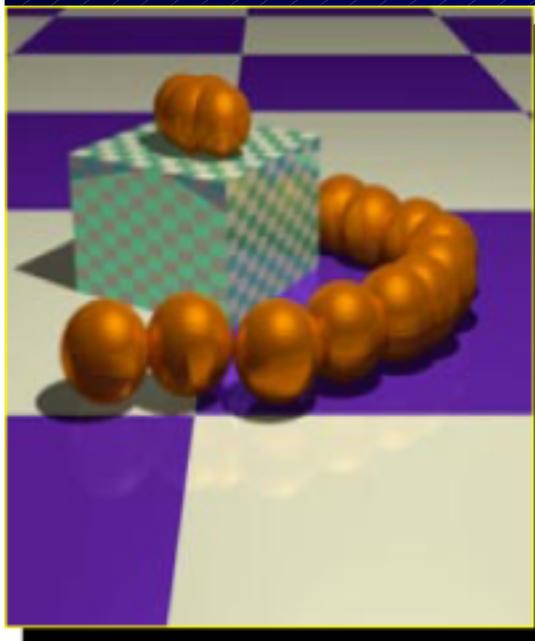
# Fonctions de base de Meyer

- Basées sur les fonctions de réception des cônes
- Peu d'échantillons spectraux suffisent
  - 4 échantillons (*bien* choisis)
- Représentation compacte
  - En général suffisante
- Parfois, besoin de précision dans la représentation de la fonction de réflexion
  - Représentation spectrale

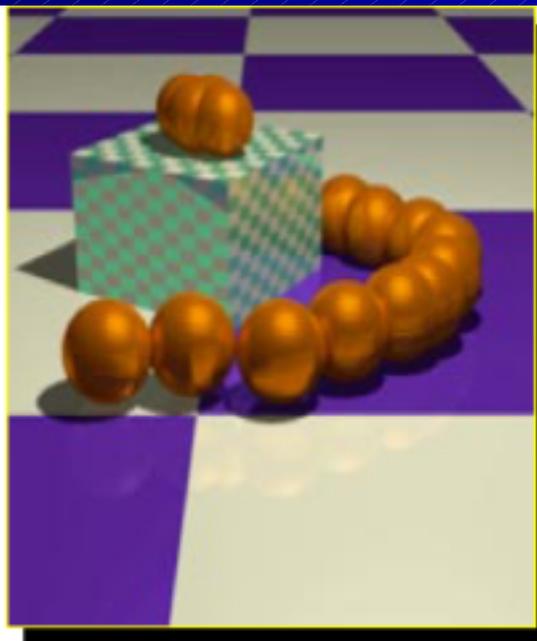
# Échantillons nécessaires



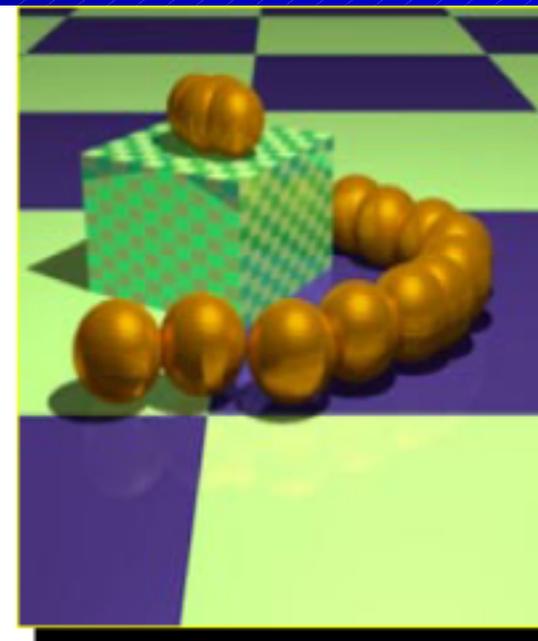
# Efficacité de la représentation



full spectral



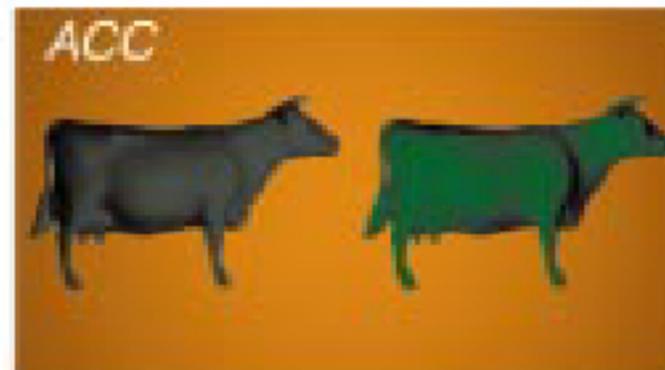
3 basis functions



0 spectral samples

# ...mais pas toujours

D65  
(jour)



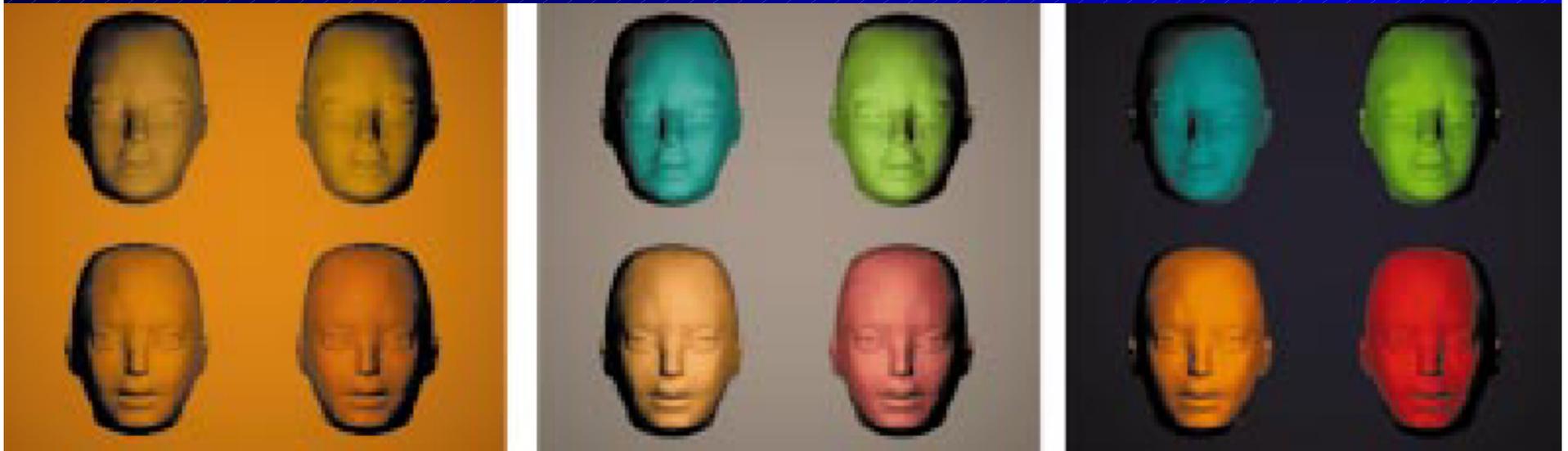
A  
(tungstène)



# Encore un peu plus loin

- Fluorescence :
  - La lumière reçue sous une longueur d'onde est réfléchiée sous une autre longueur d'onde
  - Nouvelle longueur d'onde plus élevée (conservation de l'énergie)
  - Phénomène fréquent dans la nature (murs, feuilles d'arbre)
  - Faisable uniquement avec un modèle spectral

# Fluorescence



A  
(tungstène)

D65  
(lumière du jour)

Lumière noire