TELECOM ParisTech

Synthèse d'Images

Visibilité, Apparence, Texture

Tamy Boubekeur

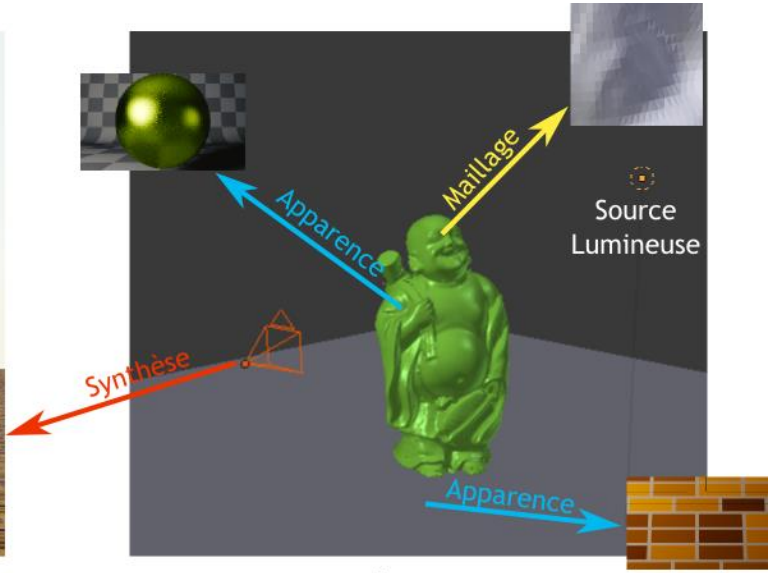
ÉCOLE POLYTECHNIQUE
UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY

université PARIS-SACLAY

RAPPEL : SCÈNE ET GÉOMÉTRIE

Modèles de Scène 3D

Image Numérique

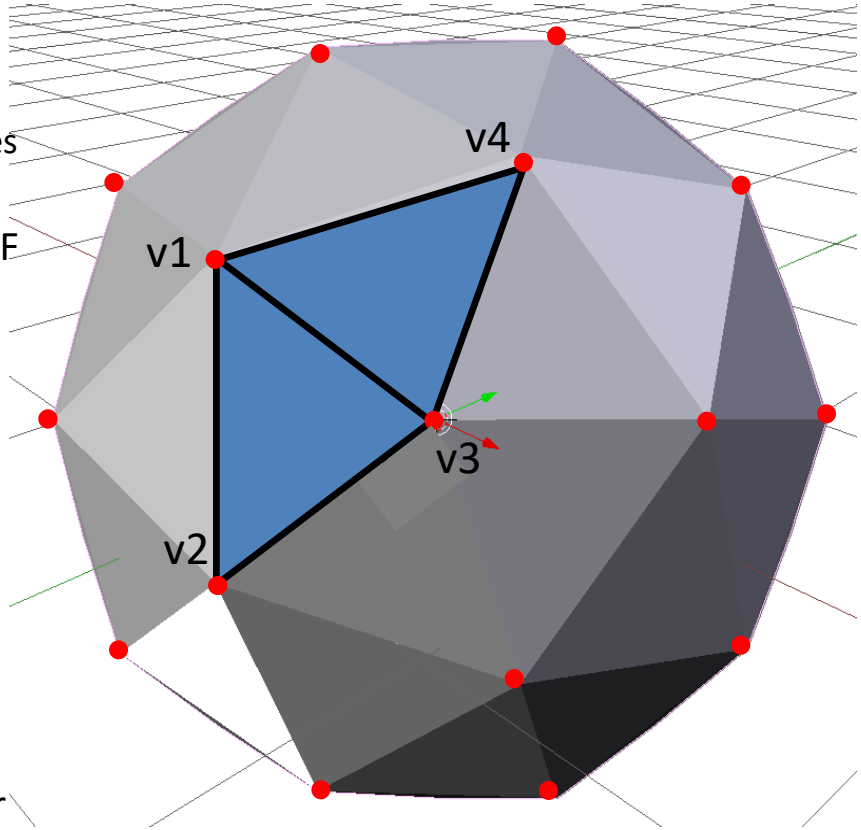


Scène 3D

- Une collection de modèles :
  - Capteur (caméra)
  - Géométries
    - Maillages, particules, iso-surfaces, etc
  - Apparence
    - Matériaux, textures
  - Lumières
  - Animation
    - Évolution temporelles des paramètres des autres modèles
    - Physique solide, fluides, corps déformables
    - Interactivité et actuators
- Une structure entre ces modèles
  - Appartenance et hiérarchie
  - Données et instances

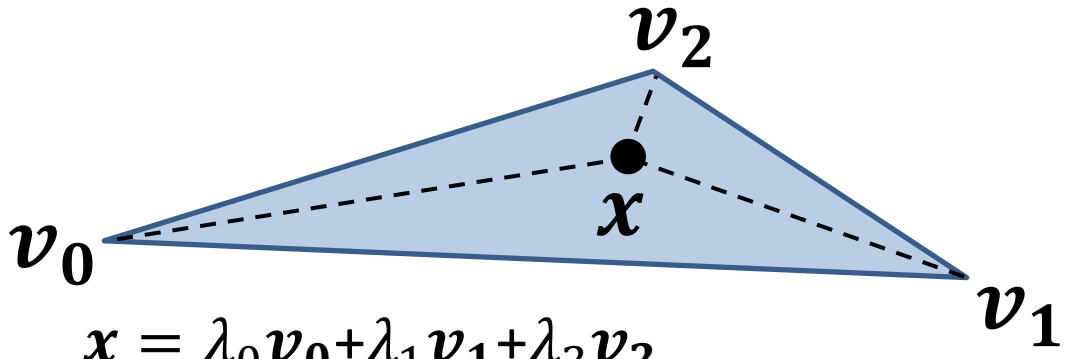
Surface Maillée

- Maillage:
  - modèle géométrique dominant en rendu
  - Génération possible à partir des autres modèles
    - Cf cours de Modèlisation Géométrique
- Définition: un ensemble de faces polygonales F indexant un ensemble de sommets V.
- V: Ensemble de sommets (géométrie)
  - v1 (x, y, z)
  - v2 (x, y, z)
  - v3 (x, y, z)
  - v4 (x, y, z)
- F: Ensemble de faces (topologie)
  - (v1, v2, v3)
  - (v1, v3, v4)
- Outre la position, chaque sommet peut porter d'autres attributs:
  - vecteur *normales,* critiques en rendu.
  - *Couleur par sommet*
  - *Coordonnées de textures (UV)*



Coordonnées barycentrique

- Coordonnée d'un point dans l'espace d'un polygone
- Simple pour un triangle
- Permet d'interpoler linéairement tout attribut de sommet



$$x = \lambda_0 v_0 + \lambda_1 v_1 + \lambda_2 v_2$$

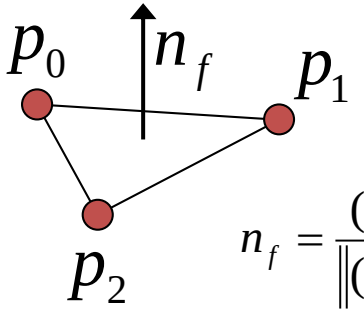
Coordonnée barycentriques de x dans le triangle

$$\lambda_0 = [(v_2 - v_1) \otimes (x - v_1)] \cdot a$$
$$\lambda_1 = [(v_0 - v_2) \otimes (x - v_2)] \cdot a$$
$$\lambda_2 = [(v_1 - v_0) \otimes (x - v_0)] \cdot a$$

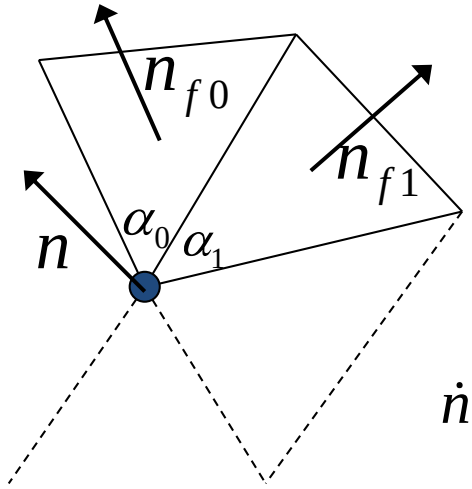
$$a = \frac{(v_1 - v_0) \otimes (v_2 - v_0)}{\|(v_1 - v_0) \otimes (v_2 - v_0)\|^2}$$

Normales

- **Essentielles pour le rendu**
  - Alignement de la BRDF
- Stockage aux sommets ou par cartes (normal maps)
- Calculs possibles:
  - Moyennes des normales des faces incidentes
  - Moyennes pondérée par les angles des arêtes incidentes
    - Plus robustes pour les distributions de triangles non uniformes
  - Moyenne pondérée par l'aire de l'intersection du triangle et de la cellule de voronoI du sommet.



$$n_f = \frac{(p_1 - p_0) \wedge (p_2 - p_0)}{\left\| (p_1 - p_0) \wedge (p_2 - p_0) \right\|}$$



$$\dot{n} = \frac{\sum_i \alpha_i n_i}{\sum_i \alpha_i}$$

$$n = \frac{\dot{n}}{\left\| \dot{n} \right\|}$$

Interpolation de Normales

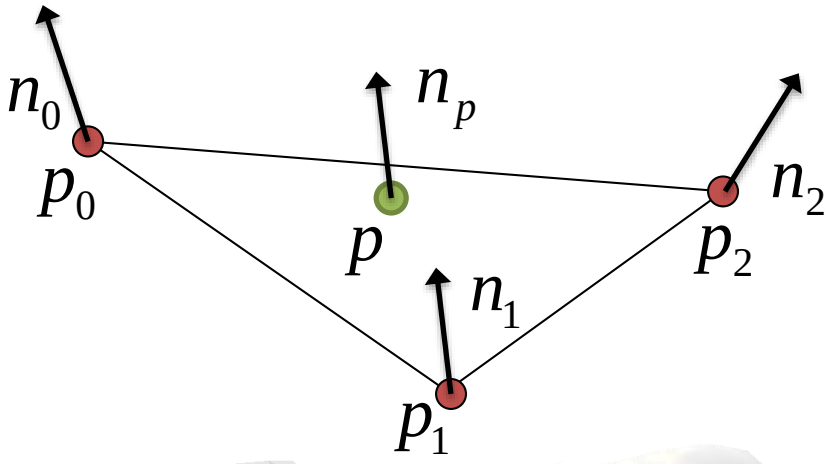
- Une normale en chaque point d'un maillage à partir des normales de ses sommets [Phong 75].
- Soit un point p sur un triangle t tel que :

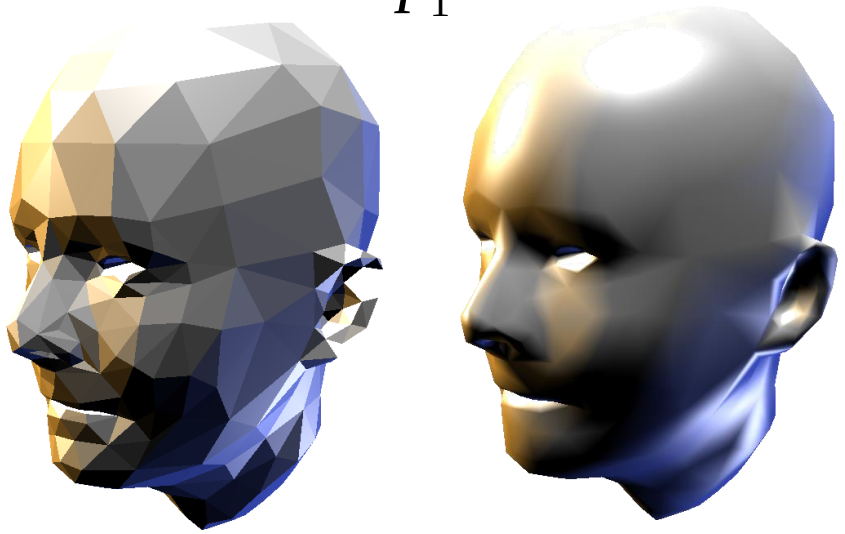
$$p = \lambda_0 p_0 + \lambda_1 p_1 + \lambda_2 p_2$$

Avec $(\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2)$ les **coordonnées barycentrique** de p dans t.

Alors on définit la normale interpolée de Phong en p comme :

$$n_p = \frac{\lambda_0 n_0 + \lambda_1 n_1 + \lambda_2 n_2}{\|\lambda_0 n_0 + \lambda_1 n_1 + \lambda_2 n_2\|}$$



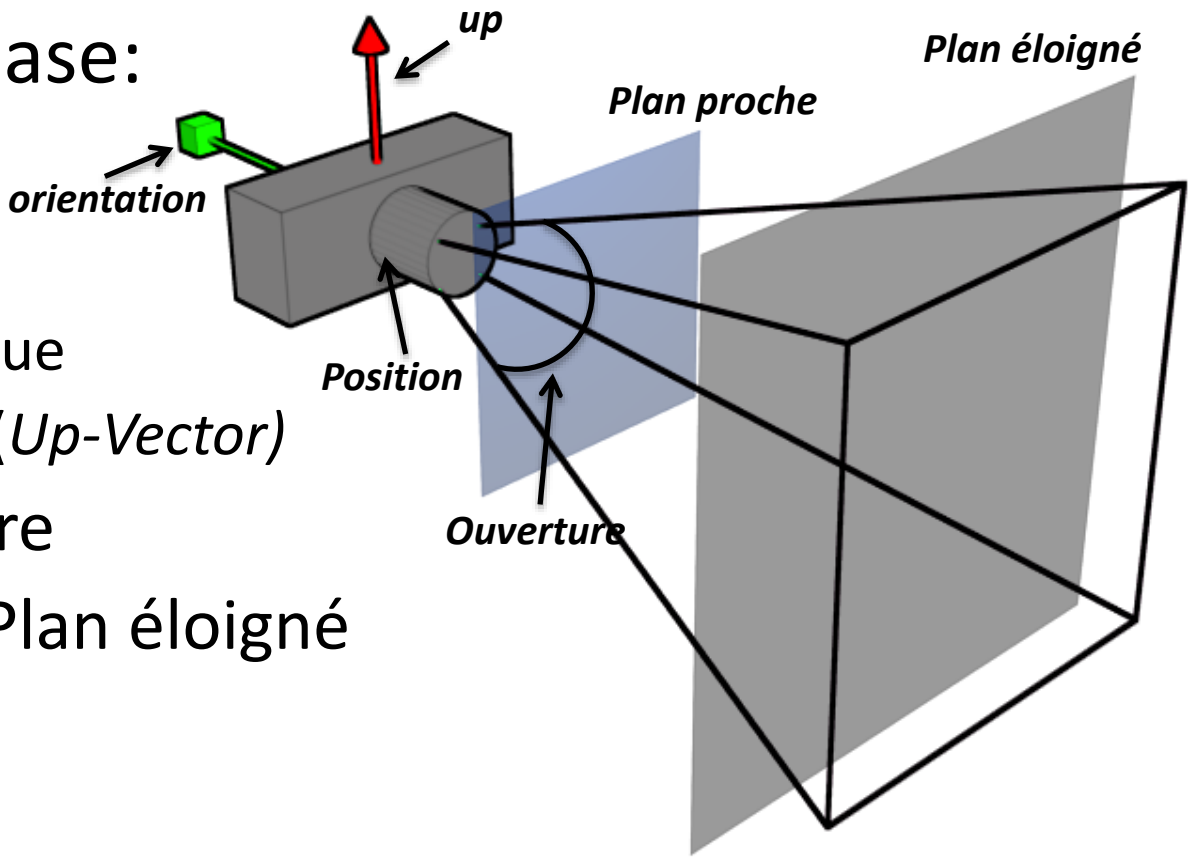


Normale par face Normale de Phong

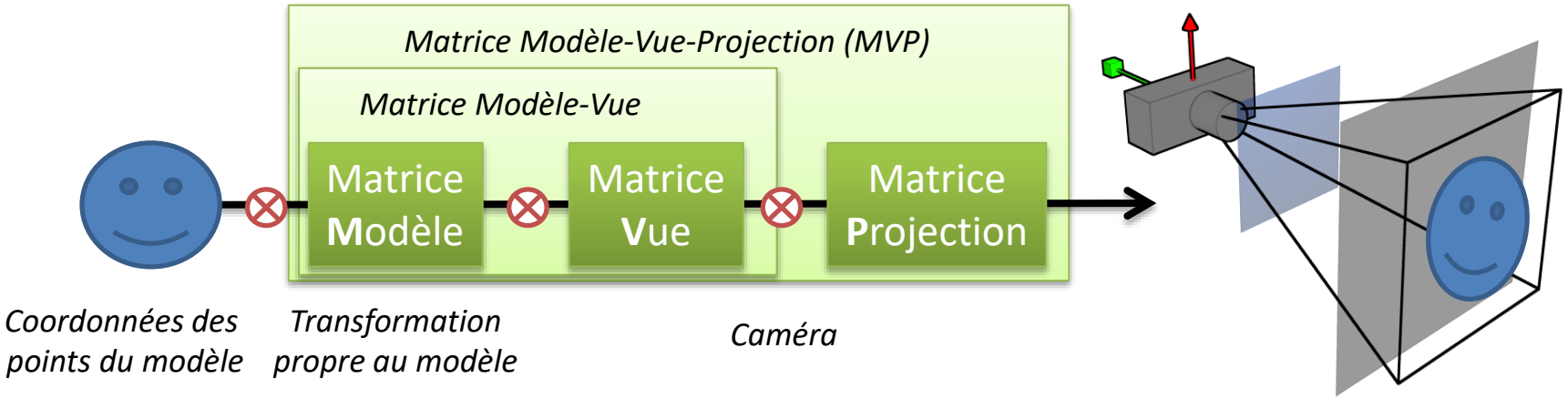
RAPPEL : CAMÉRA ET TRANSFORMATIONS

Modèle de Caméra

- En général: *pinhole* camera
- Projection perspectivique
- Paramètre de base:
  - Position
  - Orientation
    - Direction de vue
    - Vecteur haut (*Up-Vector)*
  - Angle Ouverture
  - Plane proche/Plan éloigné



Transformation et Projections

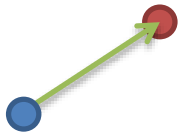


- Représentation par une matrice 4x4
- Transformation rigide
  - Translation
  - Rotation
  - Echelle
- Utilisation: changement de repère pour le placement des géométries dans le repère de la caméra et leur projection

Transformation Affine

Translation

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}$$



Rotation

$$R_X(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \quad R_Y(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix} \quad R_Z(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Scaling

$$\begin{pmatrix} s_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Transformations appliquées pour :

- *Déplacer les sommets des polygones en 3D*
- *Les placer dans le repère de la caméra*

Projection

- Projeter les sommets des polygones (transformés) dans le plan de l'image.
- 2 types de projections:

- Encore une fois exprimable à l'aide d'une matrice 4x4 : la **matrice de projection**

Matrice de projection en perspective

- Définie par les paramètres intrinsèque de la camera:
  - fov = ouverture
  - h = hauteur de l'image
  - w = largeur de l'image
  - n = distance au plan proche
  - f = distance au plan éloigné
- Forme de la matrice :
  - Pour un volume de vue symétrique
  - Avec
    - a = w/h
    - t = tan (fov/2)

1/at	0	0	0
0	1/t	0	0
0	0	-(f+n)/(f-n)	0
0	0	-1	-2fn/(f-n)

Géométrie Projective

- Raisonner dans l'espace des droites
- Projection en perspective

Point xyz > xyz**w : coordonnées homogènes**

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ w=1 \end{pmatrix} \rightarrow \ldots transformations \ldots \rightarrow \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ w' \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} x'/w' \\ y'/w' \\ z'/w' \end{pmatrix}$$

Projection Homogène

Rasterization & Lancer de Rayon

ALGORITHMES DE VISIBILITÉ

Visibilité

- **Objectif:** déterminer quels primitives sont visibles/cachées depuis un point donné, comme par exemple depuis :
  - une caméra > formation d'une image
  - une source de lumière > éclairage
- Détermine les 2 grandes classes d'algorithmes de rendu:

Projection

Rasterization

- Alg. du peintre
- Z-Buffer
- Ombrage Différé

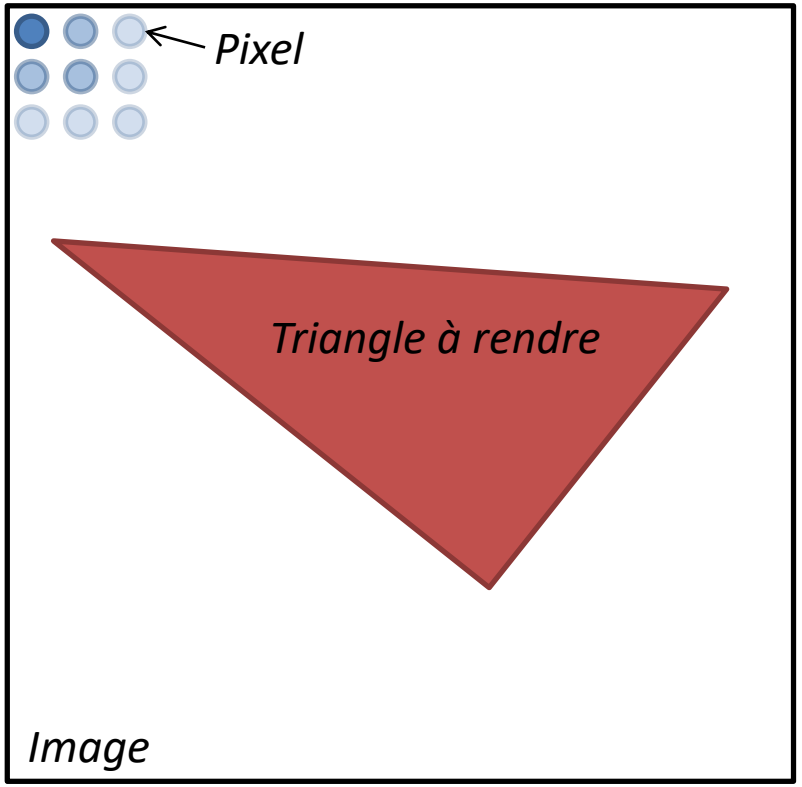
Lancer de rayon

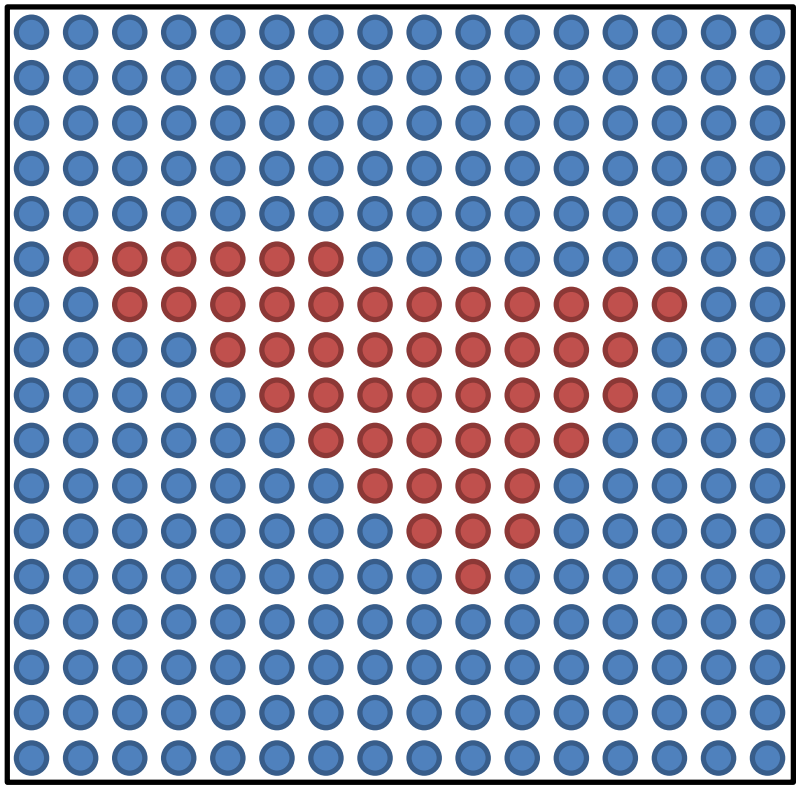
Ray casting/tracing

- Intersection rayon/triangle
- Récursion

Rasterisation

- Discrétisation d'un polygone dans une grille (image)
- Plusieurs algorithmes alternatifs
  - 1 triangle > n **fragments**
  - **Fragment = {x,y}**
  - **Pixel** = fragment visible
    - Plusieurs triangles peuvent couvrir les même pixel
    - Visibilité déterminé plus tard





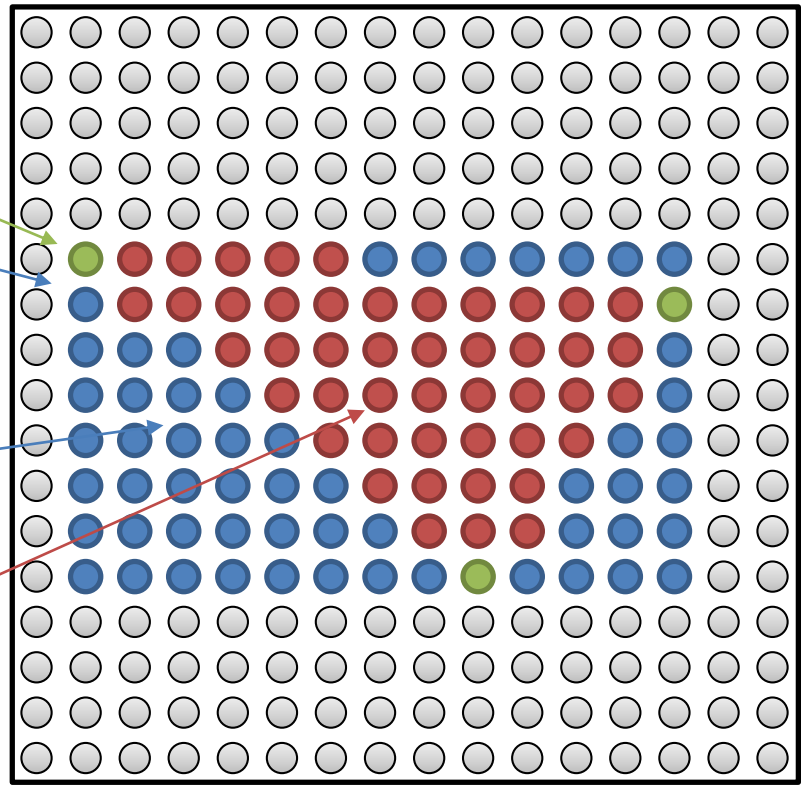
Rasterisation

- Discrétisation d'un polygone dans une grille (image)
- Plusieurs algorithmes alternatifs
  - Pixel = fragment visible

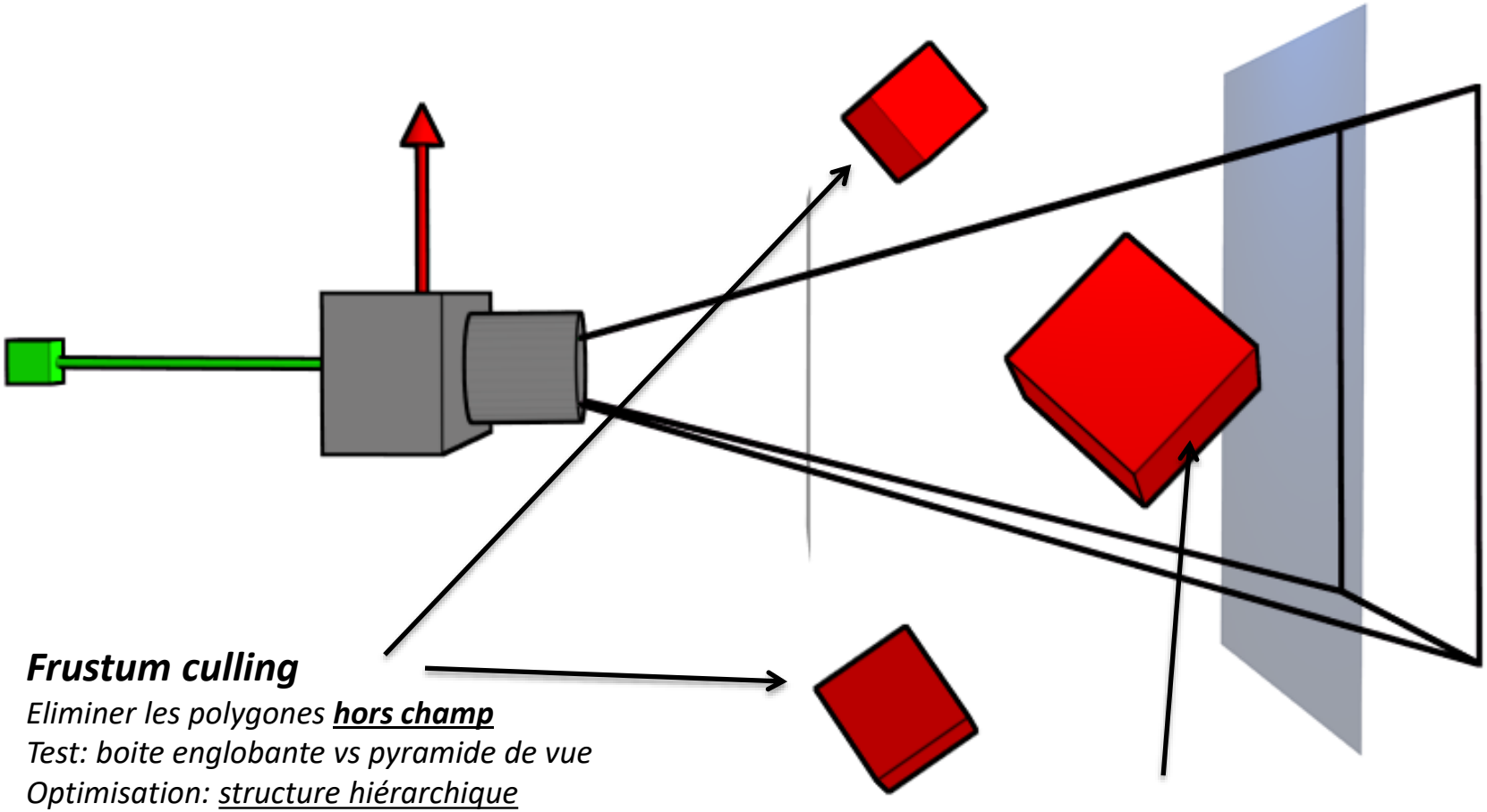
- Sans précaution, tous les polygones de la scène sont *traités*

  > Elimination de primitives

1. Projection des **sommets 3D** du triangle dans le plan de l'image.
2. Calcul de la boîte englobante {{minX, minY},{maxX, maxY}} des pixels candidats
3. Calcul des coordonnées barycentriques {b0, b1, b2} de ceux-ci en fonction du triangle
4. Classification des pixels effectivement couverts
   - b0,b1,b2 >=0 et b0+b1+b2 = 1
5. Emission des fragments correspondant



Elimination de primitives (Culling)



Frustum culling

*Eliminer les polygones **hors champ***

Test: boite englobante vs pyramide de vue

Optimisation: structure hiérarchique

Backface culling

Elimination des faces arrières

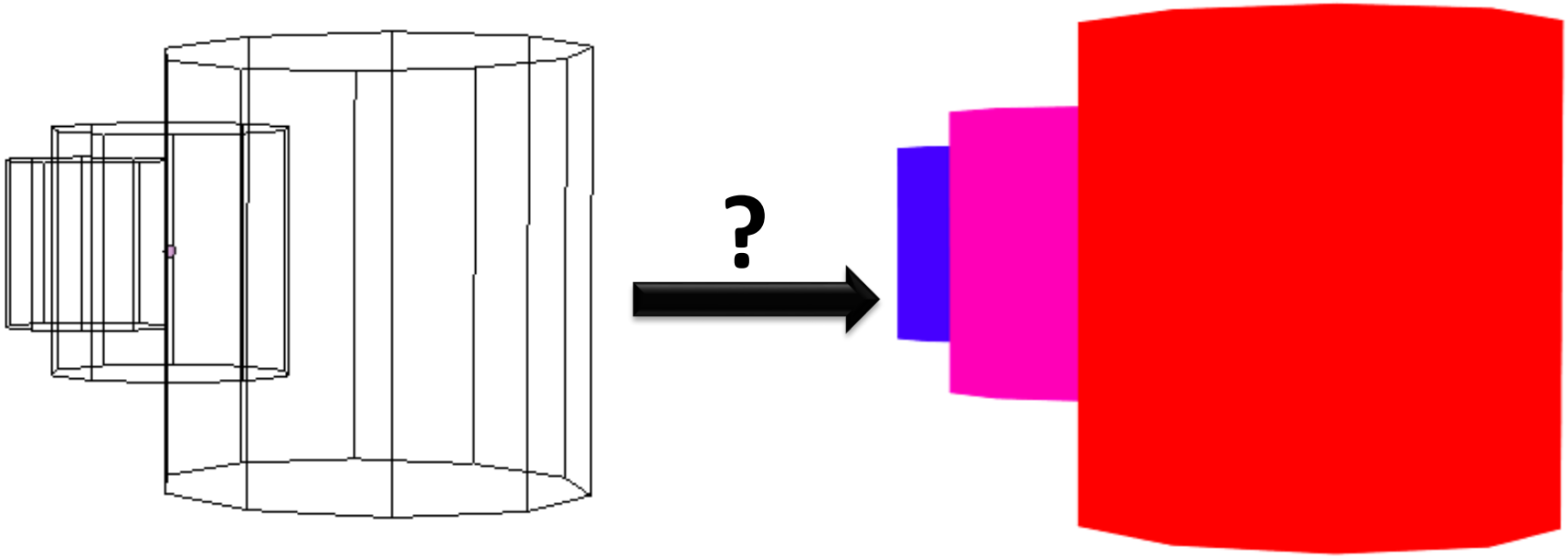
Test: normal vs caméra orientation

Occlusion culling:

- *éliminer les objets occultés dans la pyramide de vue*
- *Compliqué > peu utilisé*

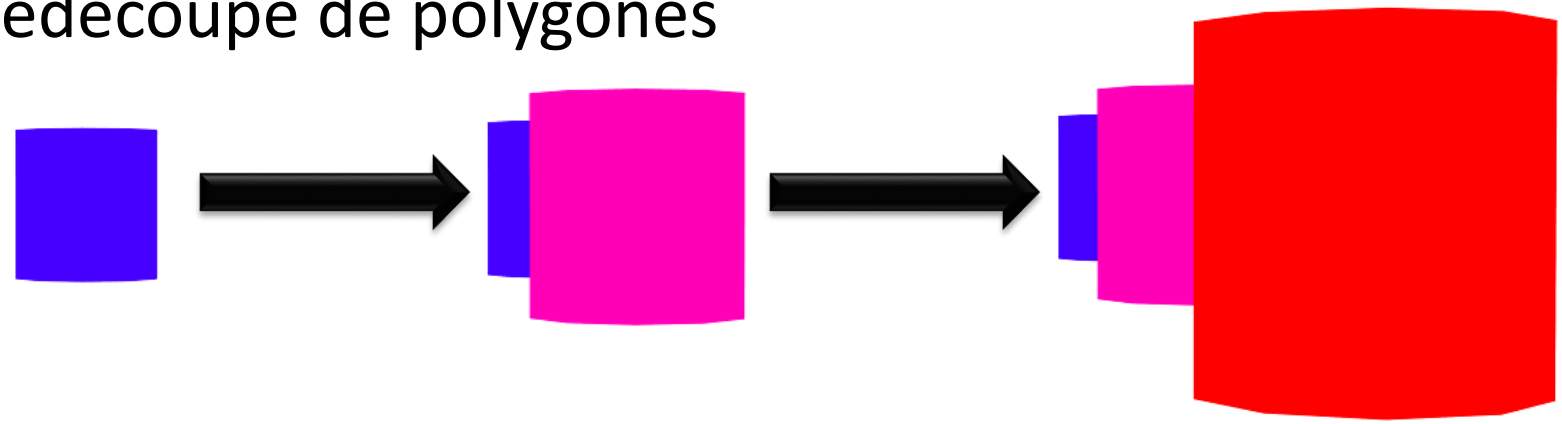
Visibilité dans le champ de vue

- Comment déterminer les parties visibles et les parties cachées de la géométrie des objets depuis un point donné (e.g. position de la caméra) ?



Algorithme du peintre

- Ordonnancement général des polygones le long de l'axe de vue
- Dessin de *loin en proche* de la liste ordonnée
- Lent > Optimisé via un **BSP-Tree**, mais *statique*
- Cas ambigus : intersection de polygones
  - Redécoupe de polygones



Rasterization avec Z-Buffer

Idée: maintenir un tampon (buffer) ZB de la même taille que le tampon couleur FB de l'écran, mais stockant pour chaque pixel la **profondeur** de la géométrie le recouvrant

Algorithme

```
Pour chaque polygone t :
    Si t hors-champ ou t non face caméra
        Ignorer t
    Rasterizer t
    Pour chaque fragment (x,y) de t :
        c := couleur de de t en (x,y)
        z := distance fragment-caméra
        Si ZB(x,y) > z alors :
                FB(x,y) := c
                ZB(x,y) := z
        Sinon
                Ignorer (x,y)
```

Frame-buffer (FB)

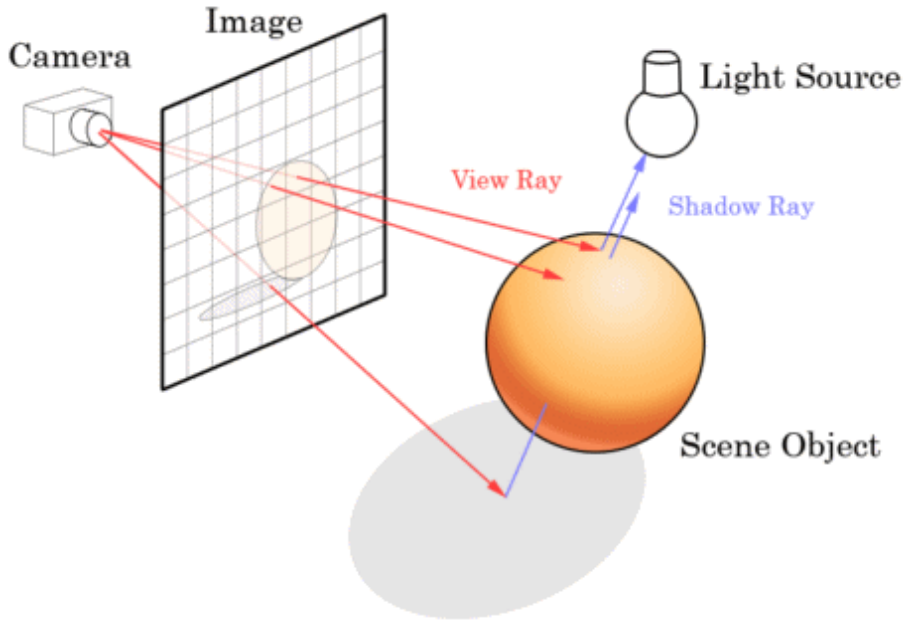
Z-Buffer (ZB)

☺ Rapide, support GPU, linéaire en temps

☹ Plusieurs polygones par pixel / aliasing

Lancer de Rayon (Ray Tracing)

Idée: partir du point de vue et chercher pour chaque pixel le premier objet intersectant la ligne de vue au travers du pixel



Algorithme

```
Pour chaque pixel (x,y)
        r := rayon caméra-pixel
        e = +∞
        FB (x,y) = (0,0,0)
        Pour chaque polygone t
                x := intersection (r, t)
                Si x != null
                        d = distance camera-x
                        Si d < e
                                e = d
                                FB (x,y) = couleur de X
```

☺ Simple, facilement généralisable

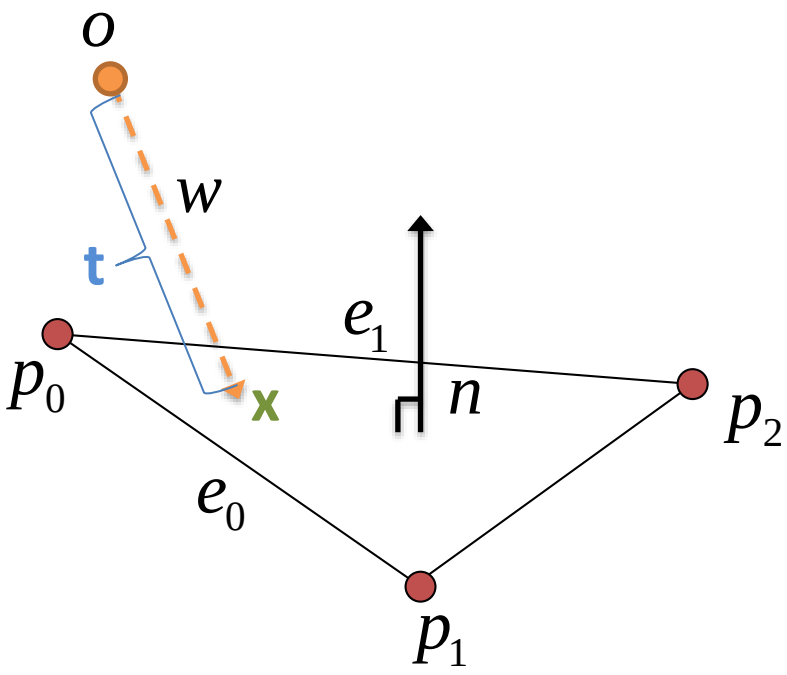
☹ Couteux

Accélération:

- Ranger les polygone dans un kd-tree
  - Pré-calcul en O(n log n)
- Utiliser pour le kd-tree pour la recherche d'intersection
  - Coût par pixel: O(log n)

Intersection Rayon-Triangle

```
IntersectionRayonTriangle (o, w, p0, p1, p2) :
        e0 = p1 – p0
        e1 = p2 – p0
        n = e0^e1 / |e0^e1|
        q = w^e1
        a = e0.q
        si n.w >= 0 ou |a| < epsilon
                retourner null
        s = (o – p0)/a
        r = s^e0
        b0 = s.q
        b1 = r.w
        b2 = 1 – b0 – b1
        si b0 < 0 ou b1 < 0 ou b2 < 0
                retourner null
        t = e1.r
        si t >= 0
                retourner [b0, b1, b2, t]
        retourner null
```



Intersection exprimée :

- selon le triangle, en coordonnées *barycentriques* x=b0*p0+b1*p1+b2*p2
- Selon la forme paramétrique du rayon : x = o + t*w

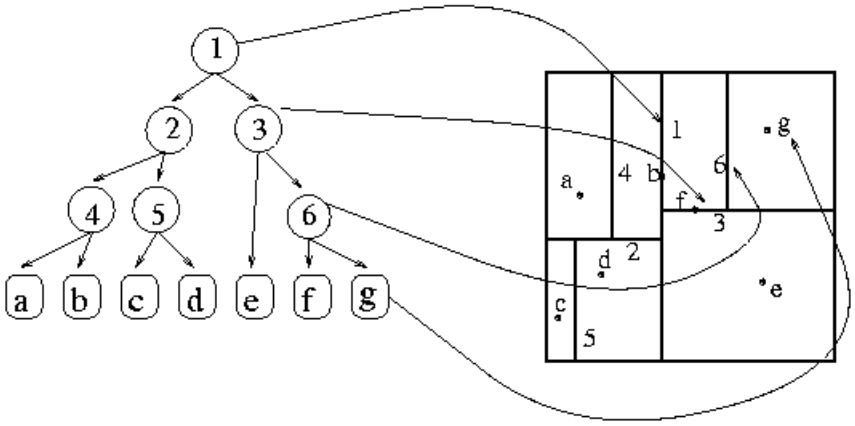
Accélération du lancer de rayon

- Pour chaque rayon > éviter d'inspecter les polygones de la scène un à un
- Ranger les polygones au préalable dans une structure de données
  - Hiérarchique
  - Ajustée à la scène
  - Permettant de rapidement éliminer des pans entier de la scène lorsqu'on qu'on cherche l'intersection d'un rayon (ou d'un ensemble de rayon) avec celle-ci
- Solutions classiques
  - kD-Tree
  - BVH

kD-Tree

- Structure de partitionnement ***orthogonale*** d'échantillons
- Arbre binaire. A chaque niveau:
  - Calculer la boite englobante de **P**
  - Diviser **P** le long du plus grand axe (X, Y ou Z)
- Algorithme de construction:

```
KDNode buildKDTree (PointList P) {
        BBox B = computeBoundingBox (P);
        Point q = findMedianSample (B,P);
        Node n;
        Plane H = plane (q, maxAxis (B)
        n.data = <q,H>;
        PointList Pu = upperPartition (P, H);
        PointList Pl = lowerPartition (P, H);
        n.leftChild = buildKDTree (Pu);
        n.rightChild = buildKDTree (Pl);
        return n;
}
```



Propriétés du kD-Tree

Générique

- Ordonnancement spatial en dimension arbitraire
- Robuste et constructible sur n'importe quel ensemble de points

Accélération de la recherche des plus proches voisins (NN)

- Recherche par distance: tous les points à située dans une boule de rayon r centrée sur l'origine de la recherche
  - Basées sur le test d'intersection sphère/boite
- Recherche par cardinal: trouver les k plus proches voisins (kNN)
  - via une file à priorité de taille maximum pour ordonner les points (O(k log N) pour une arbre équilibré

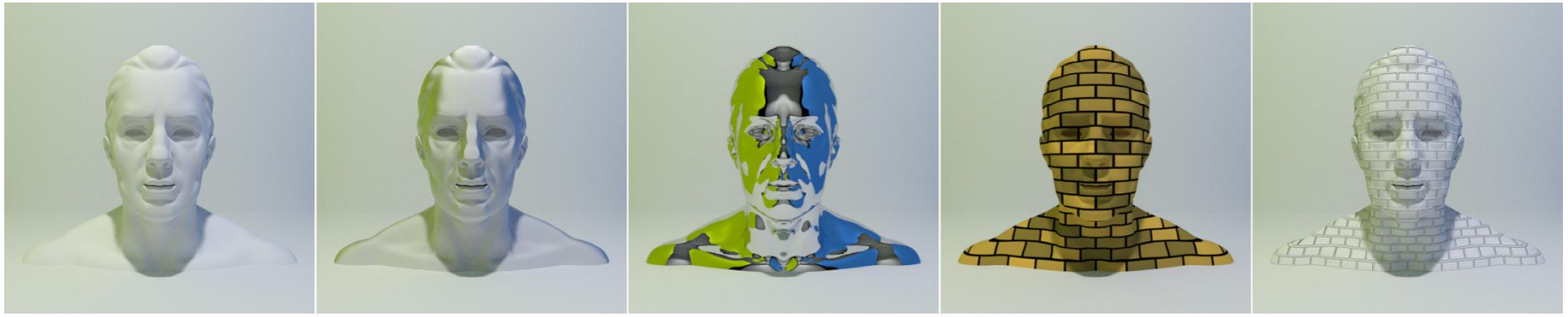
Accélération des tests d'intersection

- Test récursif
- Traitement de « paquets de rayons »
- Possibilité d'ajouter un biais géométrique
  - e.g. *Surface Area Heuristic* ou SAH

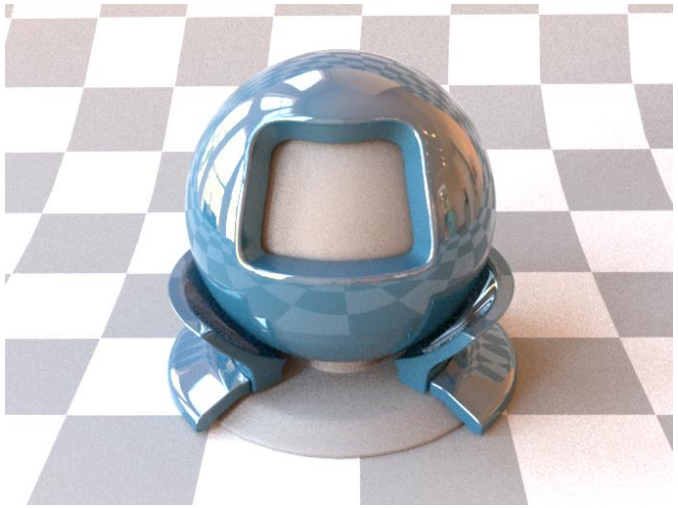
Lumière, réflectance, couleur.

APPARENCE

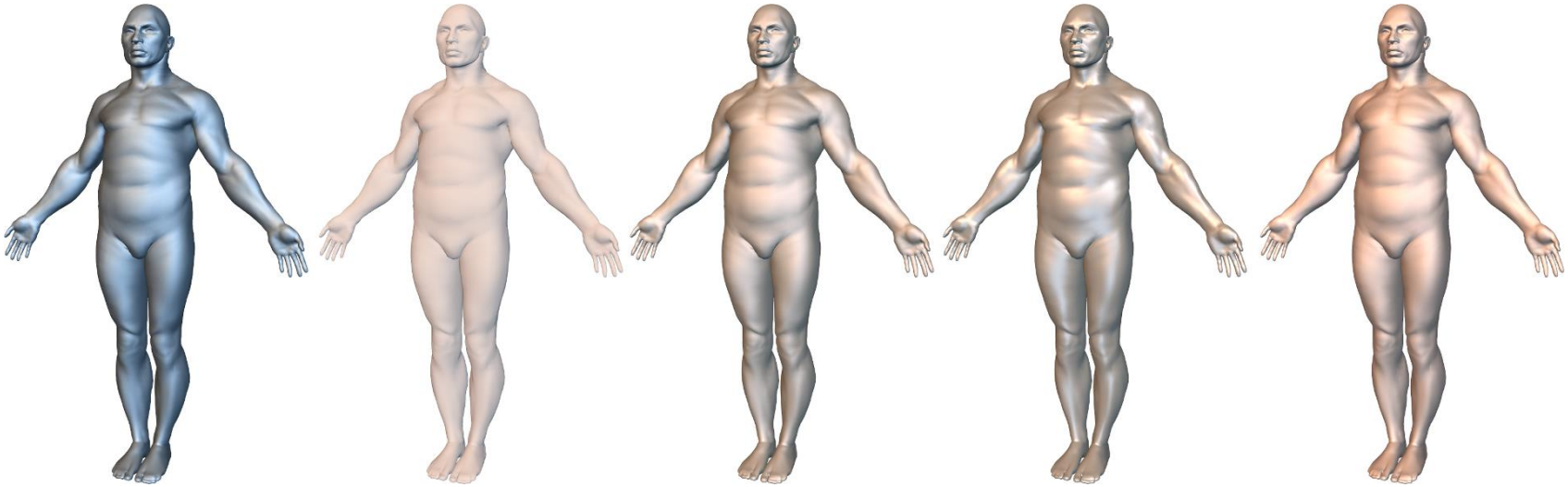
Apparence



- Matériaux
- Textures
  - Variation des paramètres des matériaux sur la surface
- *Meso-* et *micro-structure* de la surface



Apparence

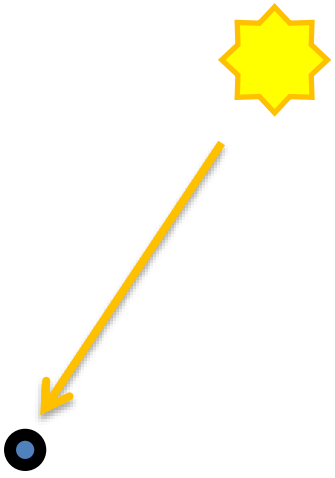


- Couleur en un point p :
  - depuis un point de vue donné
  - pour une scène donnée
- Fonction de:
  - L'**éclairage** (illumination) en p
  - La **réflectance** du matériau en p

Luminance énergétique (radiance)

En un point:

- Mesure radiométrique directionnelle décrivant la quantité d'énergie émis/réfléchie/transmis/reçue en un point.
- Exprimée en Watt par Stéradian par Mètre-carré ($W.m^{-2}.sr^{-1}$)

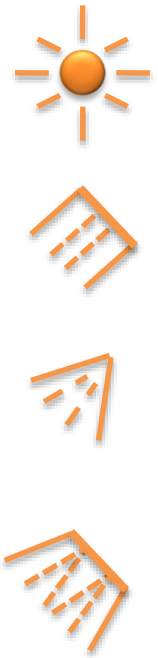


Champ de Lumière

- Ou *Light Field*
- $L(\boldsymbol{p}, \boldsymbol{\omega}), \boldsymbol{p} \in \mathbb{R}^3, \boldsymbol{\omega} \in S^2$
- ***Radiance*** au point $\mathbf{p}$, dans la direction $\boldsymbol{\omega}$
- Résulte
  - des sources primaires (surfaces émissives, source virtuelles),
  - De l'illumination globale dans la scène
    - éclairage indirect

Sources Virtuelles de Lumière

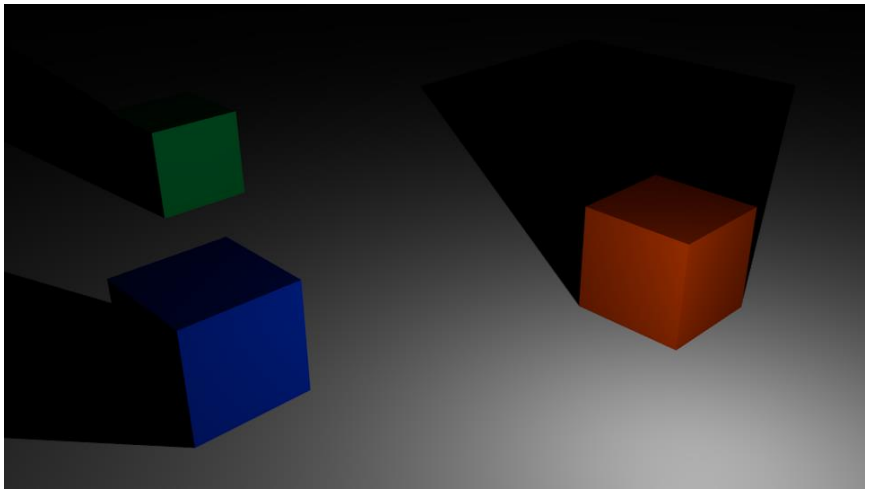
- Intensité
- Couleur:
  - En général: un triplet RVB attaché à la source
  - Modélisation physique: **spectre complet**
- Type :
  - Sources **ponctuelle** : définit par une position
    - Emet de l'énergie dans toutes les directions
  - Source **directionnelle** : une position + une direction
    - Rayons parallèles
    - Souvent utilisée pour modéliser la lumière du soleil
  - **Spot**: portion angulaire d'une source ponctuelle
  - **Source Etendue** (*Area Light*) : un morceau de surface émettant de la lumière
    - Ombres douces
    - Peut-être défini à partir de n'importe quelle géométrie de la scène



Atténuation Lumineuse Modulée

- Modélisation paramétrique de l'énergie reçue en un point à une distance d de la source
- Typiquement caractérisé par un triplet de valeurs:
  - a_c le coefficient d'atténuation constante
  - a_l le coefficient d'atténuation linéaire
  - a_q le coefficient d'atténuation quadratique

$$L(d) = \frac{L}{a_c + a_l \cdot d + a_q \cdot d^2}$$



Note : à l'air libre, l'atténuation d'une source ponctuelle se modélise avec

$$a_c = 0, a_l = 0, a_q = 1$$

Environnement Lumineux

Analytique

- Ensemble de sources lumineuses

Echantillonné

- Exemple: fonction (hémi)-sphérique décrivant l'éclairage (supposé) infiniment distant
  - Capturée via un *lightprobe* ou un panorama de photos
  - En général en haute dynamique (imagerie HDR)
  - Analyse fréquentielle

Carte d'Environnement HDR

- Image sphérique à haute dynamique (HDR), approximant l'éclairage distant.
- Evaluation explicite
  - Séquences quasi-aléatoire d'échantillons,
  - Eventuellement modulée par une fonction d'importante (énergie, réflectance au point éclairé),
  - Chaque échantillon agit comme une source directionnelle.
- Projection dans une base de fonction sphérique
  - Peu de coefficients, grands composantes capturées rapidement
  - E.g., harmoniques sphériques

Equation du rendu

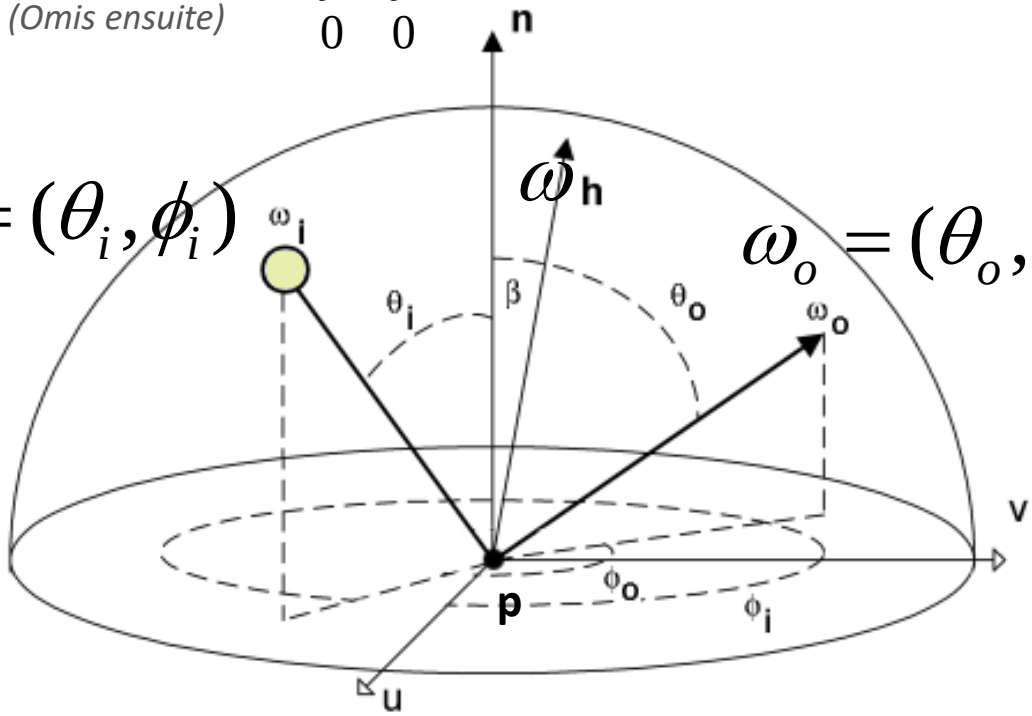
Intensité renvoyée ***Emission intrinsèque*** ***Lumière Reçu*** ***Réflectance***

$$L_o(\omega_o) = L_e(\omega_o) + \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L_i(\omega_i) f(\omega_i, \omega_o) \cos\theta_i d\theta_i d\phi_i$$

(Omis ensuite)

Direction incidente de la lumière $\omega_i = (\theta_i, \phi_i)$

$\omega_o = (\theta_o, \phi_o)$ ***Direction d'émission***



$$\omega_h = \frac{\omega_i + \omega_o}{\left\| \omega_i + \omega_o \right\|}$$

Equation du rendu

Simplification pour une **Source ponctuelle** unique

$$L_o(\omega_o) = L_i(\omega_i) f(\omega_i, \omega_o)(n \cdot \omega_i)$$

Plusieurs sources ponctuelles

$$L_o(\omega_o) = \sum_i L_i(\omega_i) f(\omega_i, \omega_o)(n \cdot \omega_i)$$

Evaluation dans le cas non ponctuel (e.g. sources étendues) par la méthode de *Monte-Carlo*

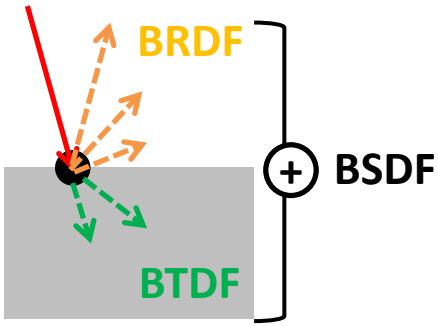
Eclairage direct

Considérer un point de surface indépendamment

- Avec ou sans ombre porté
- Pas d'échange lumineux avec les autres points de la scène
- Modélisation du matériau par une BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*)
  - Plusieurs modèles analytiques existent
  - Paramètres
    - uniforme sur une surface
    - Ou variant et spécifié par une carte sur la surface
      - carte couleur/albedo diffus
      - Carte de brillance
      - etc

Réflectance

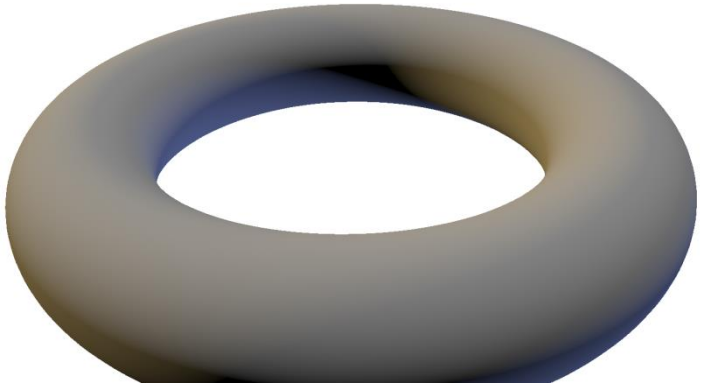
- Définit en un point par la fonction de distribution de réflectance bidirectionnelle ou **BRDF**
  - **BRDF :** composante **réflective** de la **BSDF (dispersion)**
    - Pour l'instant, on oublie la composante transmissive (**BTDF**)



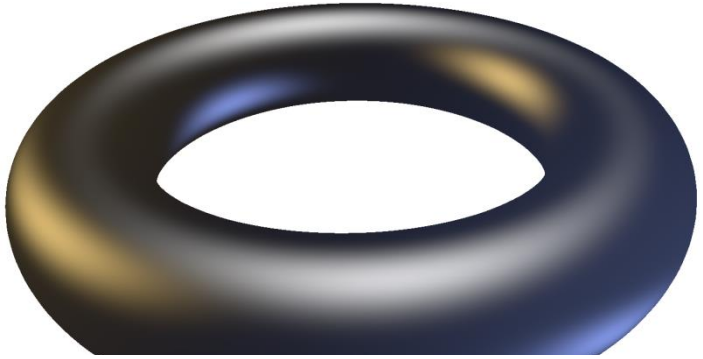
- Défini la réflexion de l'énergie reçu (radiance)
- Composantes classiques :
  - **Diffuse** : distribution de l'énergie dans toutes les directions
  - **Spéculaire/Fresnel** : réflexion directionnelle
    - Miroir : réflexion spéculaire parfaite

Compositions

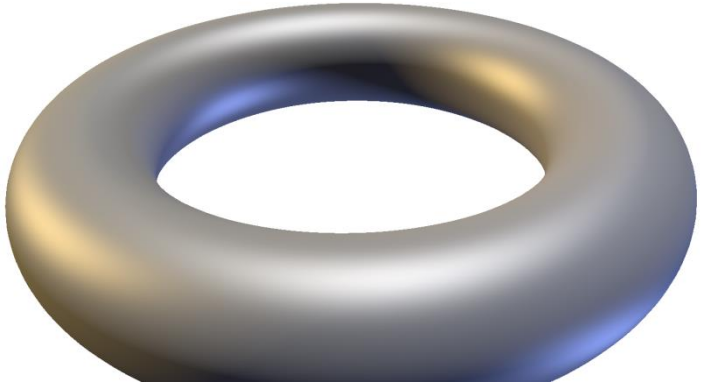
Terme diffus



Terme spéculaire



Diffus + Spéculaire



BRDF

- Définit la **micro-structure** d'un matériau dans le cadre de l'optique géométrique.
- Cas classique : une fonction à 4 dimensions

$$f : S^2 \times S^2 \rightarrow [0,1]$$
$$\omega_i \times \omega_o \rightarrow r$$

$$\omega_i = (\theta_i, \phi_i) \quad \omega_o = (\theta_o, \phi_o) \quad \omega_h = \frac{\omega_i + \omega_o}{\|\omega_i + \omega_o\|}$$

Lumière incidente ***Direction d'émission*** ***HalfVector***

- Valeur en inférieur ou égale à 1

$$L_o(\omega_o) = L_i(\omega_i) f(\omega_i, \omega_o)(n \cdot \omega_i)$$

BRDF Physiquement Plausibles

- Respecte la **réciprocité d'Helmotz**

$$f(\omega_i, \omega_o) = f(\omega_o, \omega_i)$$

- **Conservative**

$$\int_\Omega f(\omega_i, \omega_o) \cos\theta_o d\omega_o \leq 1$$

- **Positivité**

$$f(\omega_i, \omega_o) \geq 0, \forall \omega_i, \omega_o$$

Propriétés

- Isotropie/Anisotropie
- Nombre réduit de paramètres
- Séparabilité « diffus/spéculaire »

$$f(\omega_i, \omega_o) = f^d(\omega_i, \omega_o) + f^s(\omega_i, \omega_o)$$

- Evaluable par la méthode de Monte-Carlo

Note sur la couleur

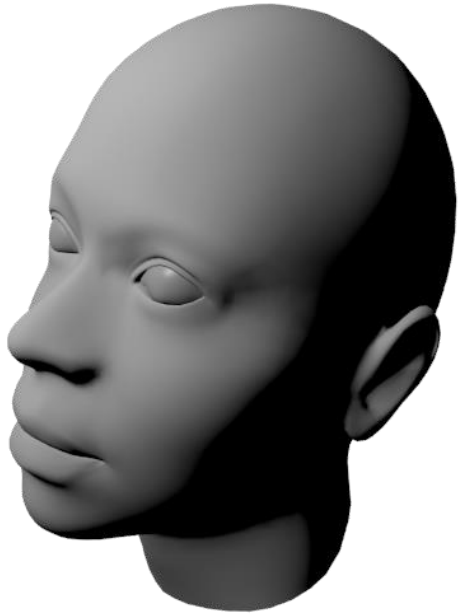
- Pour l'instant, on considère le cas où la BRDF s'applique aux trois canaux couleur de la même manière
- Albedo diffuse : couleur de base du matériau
- Couleur spéculaire :
  - Modèles physiques : dépend du coefficient de Fresnel et de la conductivité du matériau
  - Modèles empirique : spécifiée indépendamment

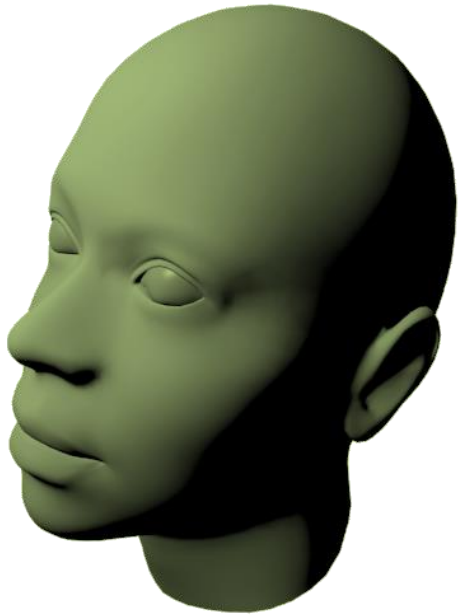
BRDF diffuse

- Modèles de Lambert

$$f^d(\omega_i, \omega_o) = \frac{k_d}{\pi}$$ ***Coefficient Diffus***

- Standard
- Indépendant du point de vue
- Réutilisé dans la plupart des autres modèles, qui se concentrent sur les réflexions spéculaires dépendante du point de vue.





BRDF de Phong

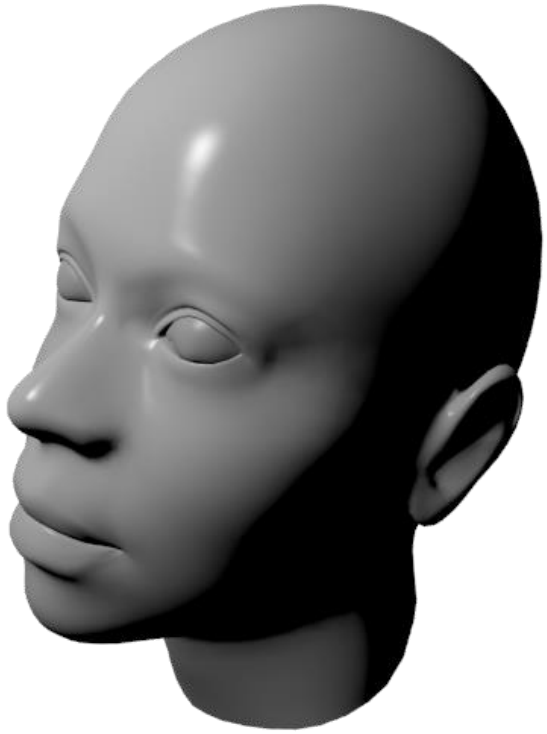
- Terme spéculaire

$$f^s(\omega_i, \omega_o) = k_s (r \cdot \omega_o)^s$$

$$r = 2n(\omega_i \cdot n) - \omega_i$$

Brillance

Coefficient de spécularité

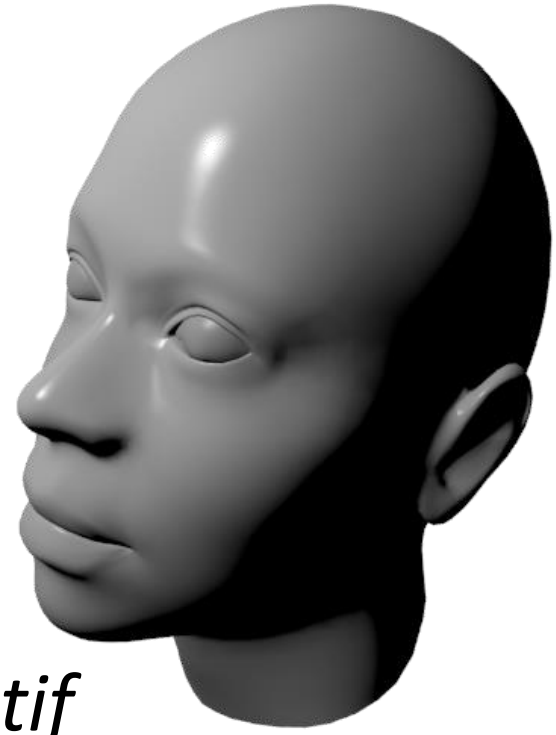


- Indice de **brillance** (*shininess*)
- Terme diffus : Lambert
- *Modèle empirique non conservatif*

BRDF de Blinn-Phong

- Modèle de Phong modifié

$$f^s(\omega_i, \omega_o) = k_s(n \cdot \omega_h)^s$$



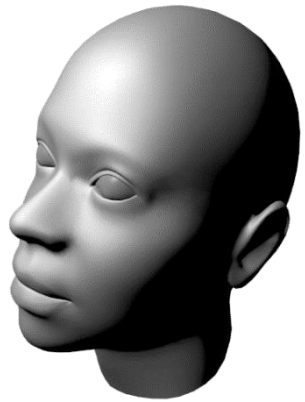
- Simple, efficace
- *Modèle empirique non conservatif*
- Normalisé en 2008

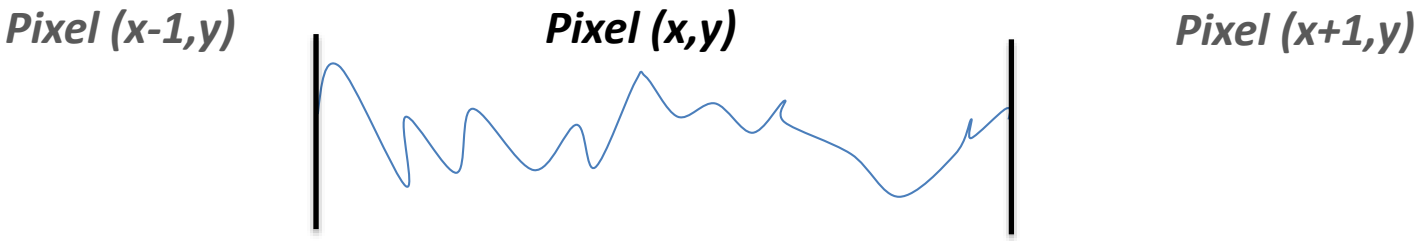
Modèles à Micro-Facettes

Distribution de microfacettes ↘ *Terme de Fresnel* ↙ *Terme Géométrique* ↙

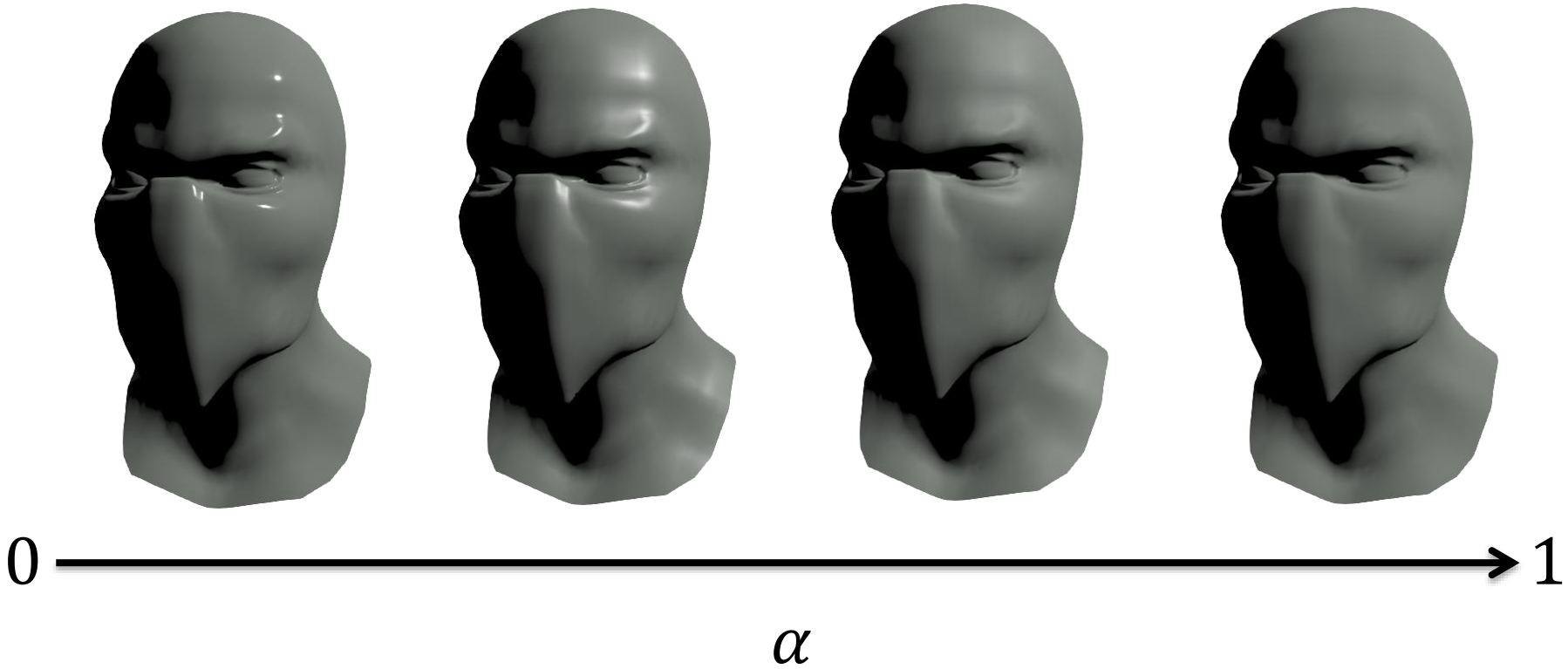
$$f^s(\omega_i, \omega_o) = \frac{D(\omega_h)F(\omega_i, \omega_h)G(\omega_i, \omega_o, \omega_h)}{4(n \cdot \omega_i)(n \cdot \omega_o)}$$

- Modèle statistique de la micro-géométrie
- $\alpha \in [0,1]$ la rugosité du matériau
  - En pratique souvent élevée au carrée
- Caractérisation géométrique





Rugosité



Distribution de micro-facettes

- D : Modèles la **distribution de normales** de la surface à l'échelle microscopique
- Exemple :
  - Distribution de Beckmann (BRDF Cook-Torrance, 1981-1982)
  - Distribution GGX/Trowbridge-Reitz
    - Et variantes
- Idéalement : F et G doivent être dérivés de D

Distribution de Beckmann

$$D(\omega_h) = \frac{1}{\pi\alpha^2(n\cdot\omega_h)^4} e^{\frac{(n\cdot\omega_h)^2-1}{\alpha^2(n\cdot\omega_h)^2}}$$

- Employée par la **BRDF de Cook-Torrance**
- Distribution des ondes électromagnétiques
- Déterministe
- Supposition :
  - toutes les facettes ont la même aire
  - Toute facette a une facette symétrique par rapport à la normale

Distribution GGX

Introduit par Trowbridge et Reitz (1975), généralisé par Burley (2012)

$$D(\omega_i, \omega_o) = \frac{{\alpha_p}^2}{\pi\left(1 + \left({\alpha_p}^2 - 1\right) \cdot (n \cdot \omega_h)^2\right)^2}$$

Standard industriel (Disney, Unreal Engine, etc)

Terme de Fresnel

Fraction réfléchi de la lumière incidente pour une surface plate.

Distingue les matériaux conducteurs et diélectriques

- Métaux (conducteurs) : absorbe immédiatement la lumière réfractée
- Non-métaux (diélectriques) : renvoie une partie de l'énergie réfractée à l'extérieur de l'objet > coloration du reflet

Approximation de Schlick [1993]

$$F(\omega_i, \omega_h) = F_0 + (1 - F_0)(1 - max(0, \omega_i \cdot \omega_h))^5$$

Avec $F_0 \in \mathbb{R}$ l'indice de réfraction de Fresnel, dépendant du matériau (. Exemples :

- Plastique (diélectrique) : 0.02 à 0.05
- Aluminium (conducteur) : [0.91, 0.92, 0.92], « reflet coloré », variance significative selon la longueur d'onde

Terme Géométrique

- Modélise les effets d ‘ombrage et de masquage des micro-facettes entre elles
- Dépend de la rugosité et de la distribution D

Terme Géométrique Cook-Torrance

Distingue les effets de masquage et de l'ombrage inter-facettes

$$G = \min[1, \frac{2(n \cdot \omega_h)(n \cdot \omega_i)}{(\omega_o \cdot \omega_h)}, \frac{2(n \cdot \omega_h)(n \cdot \omega_o)}{(\omega_o \cdot \omega_h)}]$$

Ombrage ***Masquage***

Terme Géométrique GGX

Terme géométrique associé à la distribution de micro-facettes GGX

$$G^{Smith}(\omega_i, \omega_o) = G_1^{Smith}(\omega_i) G_1^{Smith}(\omega_o)$$

$$G_1^{Smith}(\omega) = \frac{2(n \cdot \omega)}{n \cdot \omega + \sqrt{\alpha^2 + (1 - \alpha^2)(n \cdot \omega)^2}}$$

Approximation de Schlick :

$G_1^{Schlick}(\omega) = \frac{(n \cdot \omega)}{(n \cdot \omega)(1-k)+k}$ avec k = $\alpha \sqrt{\frac{2}{\pi}}$

Remarque

- Dans le cas purement physique : F et G doivent être dérivés de D
- Formellement, dans le cas des modèles à microfacettes,
  - $f(\omega_i, \omega_o) := f^d(\omega_i, \omega_o) + f^s(\omega_i, \omega_o)$
  - Mais : on garde en pratique le terme diffus car
    - il permet de compenser empiriquement beaucoup de phénomènes non pris en compte dans par les microfacettes
    - Par convention, de nombreuses technologies de rendu le maintiennent

« Un » modèle pour le rendu basé - physique

- Matériau « PBR » (*Physically Based Rendering*)
  - Albedo (couleur diffuse « moyenne »)
  - Rugosité (entre 0 et 1)
  - « Metallique »
    - valeur binaire (conducteur ou pas)
- Voir le modèle plus complet proposé
  - *Physically-based Shading, SIGGRAPH*

Couches de BRDF

- Nécessaire en pratique pour modéliser de nombreux matériaux
- Reproduit l'empillement de matériaux semi-transparents.

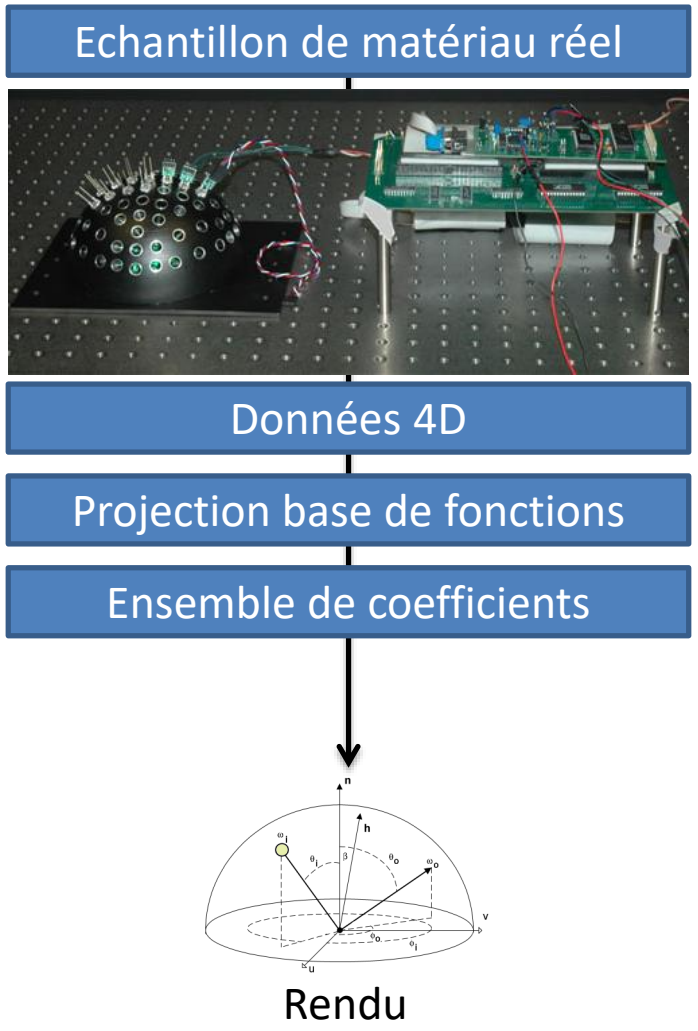
Couche à dominante diffuse

Couche à dominante spéculaire

Empillement

BRDF Basée-Donnée

- Echantillonnée à partir d'un véritable matériel
- Pas de forme analytique simple
- Représentée par un nombre réduit de coefficients une fois projetée une base de fonctions spécifique :
  - harmoniques sphériques
  - ondelettes



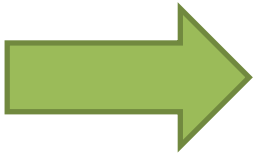
TEXTURES

Définition

- Une carte de valeurs (*map*)
  - *Albedo*, définit une distribution de points colorés sur les surfaces (*color map*) ; autre paramètre de la BRDF aussi modulables via une carte (rugosité, brillance)
  - *Normal*, définit une distribution de vecteur normaux sur une surfaces (*normal map*)
  - *Déplacement*, définit une distribution de vecteurs de déplacements sur une surface (*displacement map*)
- Textures 2D (carte scalaire ou vectorielle) plaquée sur une surface 3D via sa *paramétrisation UV*

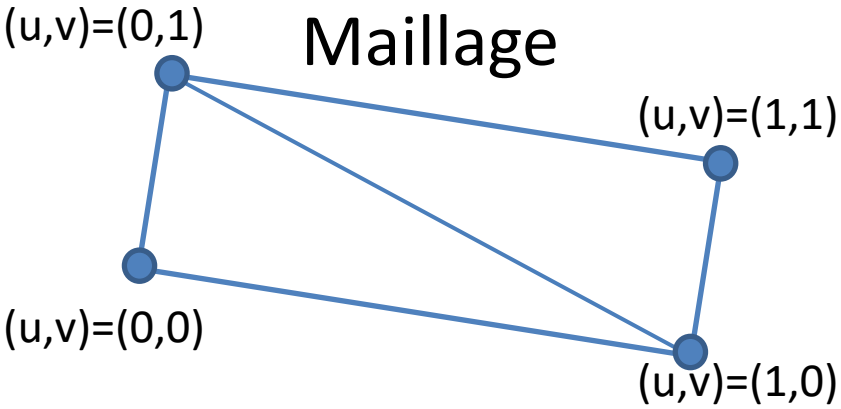
Plaquage de texture

Texture couleur (image 2D RGB)



Maillage texturé

Maillage



Coordonnées paramétriques

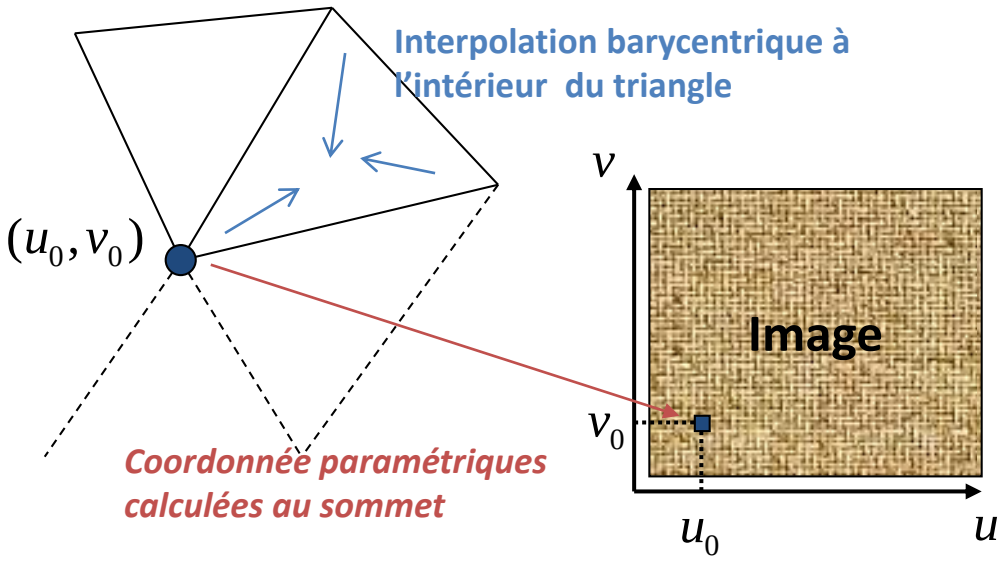
a.k.a « Coordonnées de texture »,
a.k.a « Coordonnnées uv »

$(u,v) \in \Re^2$ par convention: $(u,v) \in [0,1]^2$

Définition d'une propriété de surface à partir d'un fonction bivariée:

$$f :$$
$$\Re^2 \rightarrow \Re^n$$
$$u, v \rightarrow c$$

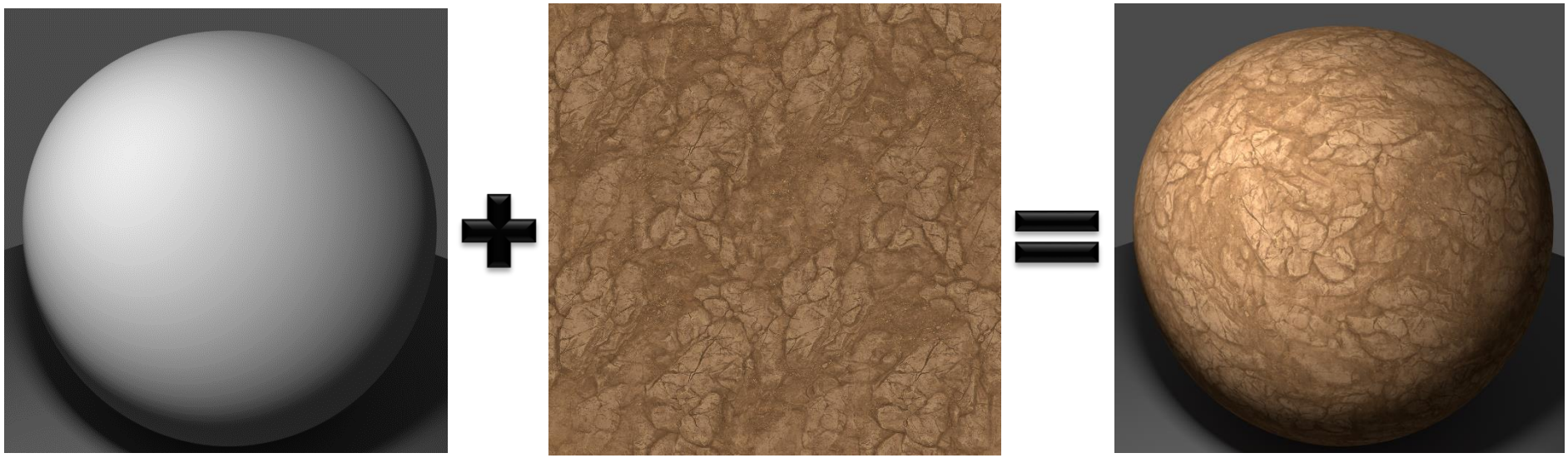
Exemple : valeur d'un pixel dans une images (« texture mapping »)

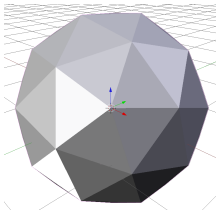


Définition de coordonnées paramétriques continues sur l'ensemble des sommets d'un maillage : ***Paramétrisation***

Exemples d'algorithme de paramétrisation: LSCM, Floater

Carte de texture couleur

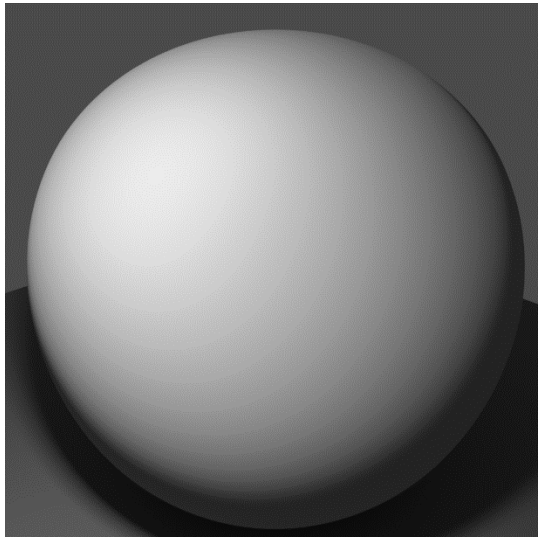


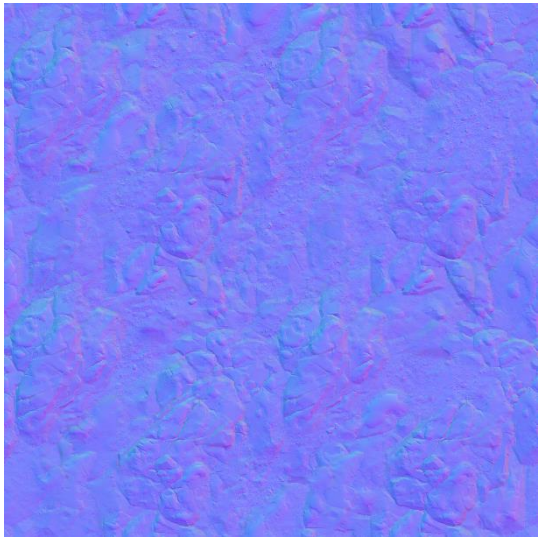


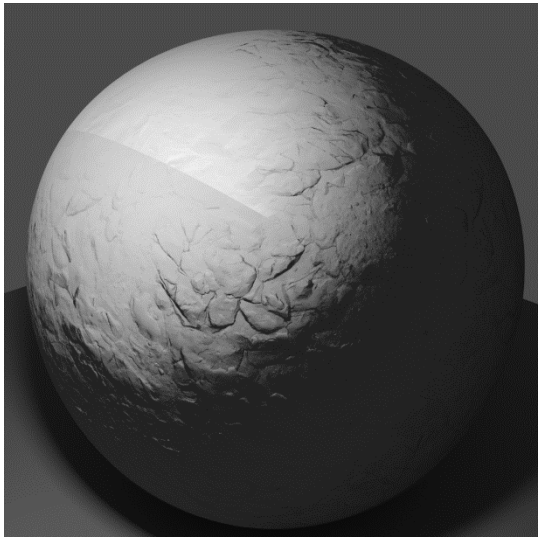
Valeurs RGB utilisée pour l'albedo de la BRDF

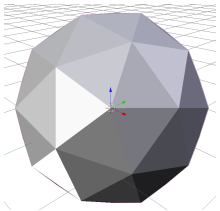
Rendu

Carte de texture normal





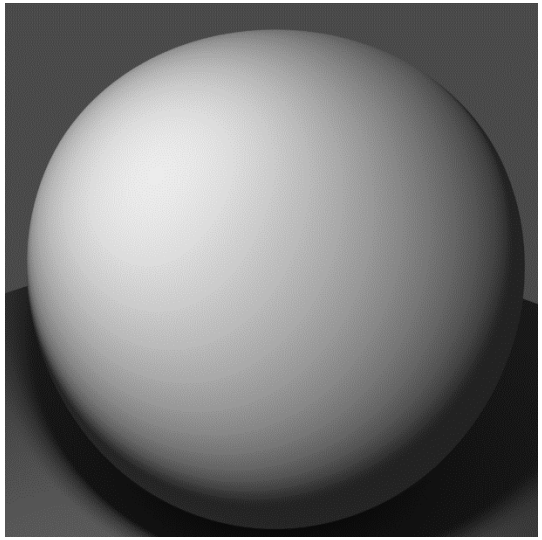




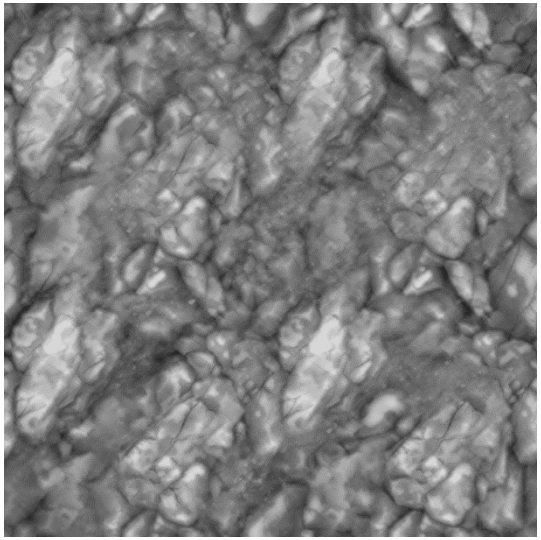
Valeurs RGB utilisée en chapque pixel utilisée comme coordonnées XYZ du vecteur normal

Rendu

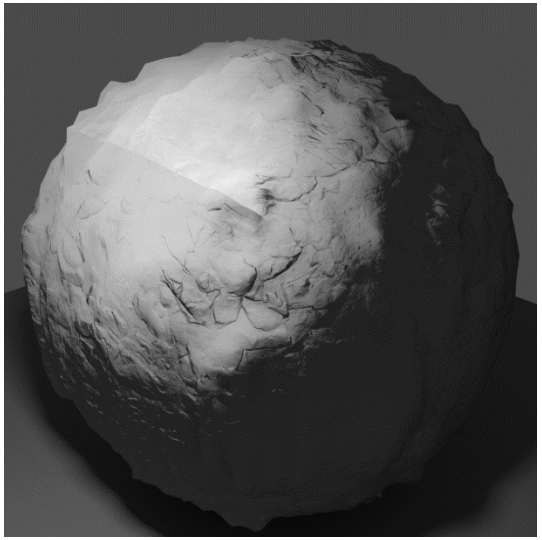
Carte de texture de déplacement

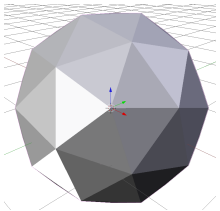


+



=





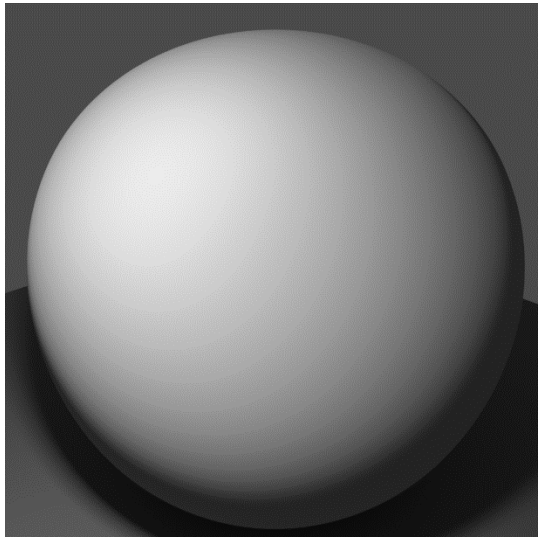
+ subdivision

Valeurs de luminance en chaque pixel utilisée *coefficient de déplacement* de la géométrie le long de la normale locale.

Rendu

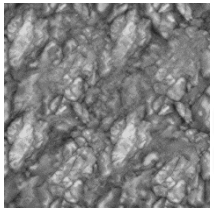
SVBRDF

Spatially Varying BRDF

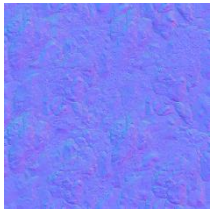


Albedo

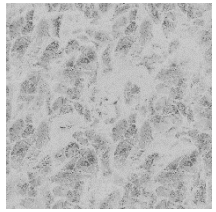
Déplacement



Normal



Rugosité



Coef. Métallique

Rendu

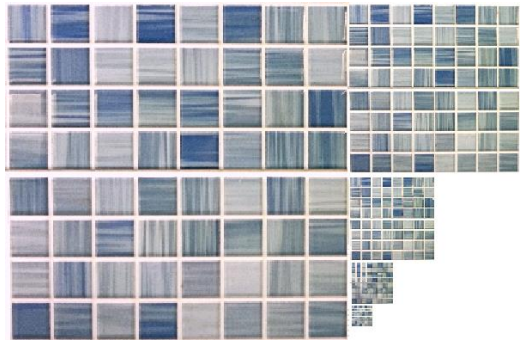
Type de textures

Texture 512x512 RGB

- 1D, 2D, 3D, etc
  - scalaire, vectorielle,
  - couleur, alpha, paramètre de BRDF
- 2 types principaux
  - Carte
  - Procédural

Carte de Texture

- « Image » prédéfinie, artificielle ou capturée (photo)
- Coût mémoire parfois élevé
  - Compression/décompression à la volée
- Nécessite un filtrage pour éviter les effets d'aliasing, de moiré, etc
- Evaluation efficace :
  - Accès mémoire + filtrages
- Pré-calculs possibles
  - Traitement d'image (rehaussement, débruitage, etc)
  - Calcul d'une pyramide (mip-map)
  - Quantification et compression



Note : opérateur d'accès spécifiques en OpenGL/GLSL

Texture Procédurale

- Une fonction évaluable en tout point d'un domaine
- Léger en mémoire : code la fonction + paramètres
- Parfois couteux à l'évaluation
- A priori, une infinité de fonctions possible, mais quelques propriétés sont souhaitables
  - Déterministe
  - Variation naturelle (pseudo-aléatoire)
  - Faible nombre de paramètres intuitifs
  - Evaluations dé-corrélées les unes des autres
    - Calcul parallèle / GPU
- Exemples : **bruit de Perlin**, bruit en ondelette, bruit de Gabor

Bruit de Perlin

- Introduit par Ken Perlin en 1985
- Bruit de gradient
- Donne une apparence pseudo-aléatoire aux surfaces
- Multi-échelle : sommes de bruit de Perlin à plusieurs échelles
- Détail: http://mrl.nyu.edu/~perlin/noise/