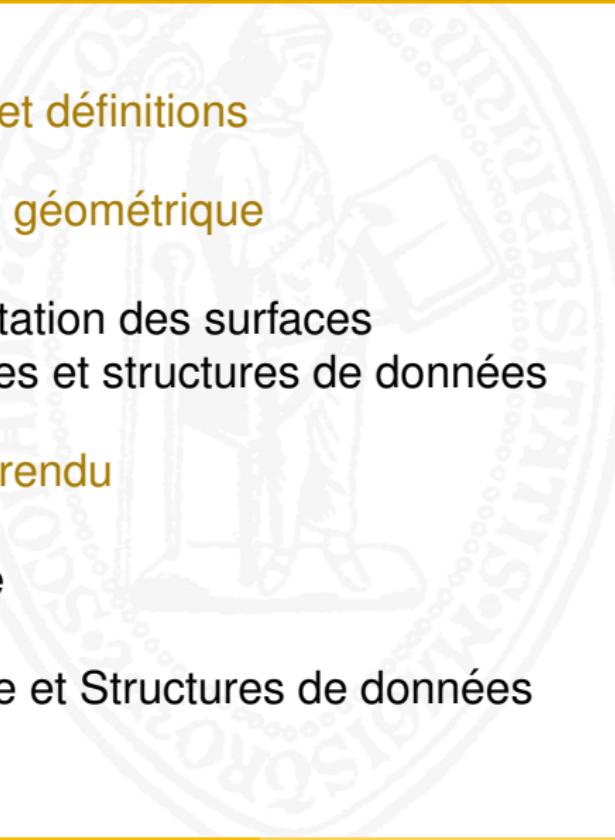


Outils Informatiques pour le Multimédia

Master 1 informatique
Tronc commun

Département d'informatique
Université Paul Sabatier

Problématique de la synthèse d'images

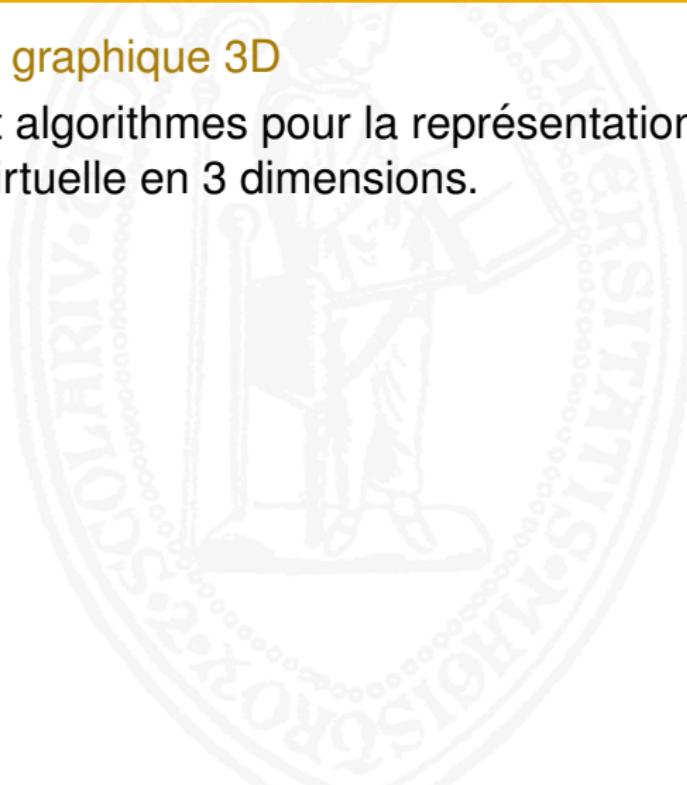
- 
- 1 Introduction et définitions
 - 2 Modélisation géométrique
 - Objectifs
 - Représentation des surfaces
 - Algorithmes et structures de données
 - 3 Eclairage et rendu
 - Objectifs
 - Historique
 - Principe
 - Algorithme et Structures de données

Synthèse d'images

Introduction

Informatique graphique 3D

- Outils et algorithmes pour la représentation d'une scène virtuelle en 3 dimensions.



Synthèse d'images

Introduction

Informatique graphique 3D

- Outils et algorithmes pour la représentation d'une scène virtuelle en 3 dimensions.

Ne pas confondre avec la stéréoscopie ou la 3D relief

Synthèse d'images

Introduction

Informatique graphique 3D

- Outils et algorithmes pour la représentation d'une scène virtuelle en 3 dimensions.

Ne pas confondre avec la stéréoscopie ou la 3D relief

- Initialement, outils informatique pour la Conception Assistée par Ordinateur (CAO)

Synthèse d'images

Introduction

Informatique graphique 3D

- Outils et algorithmes pour la représentation d'une scène virtuelle en 3 dimensions.

Ne pas confondre avec la stéréoscopie ou la 3D relief

- Initialement, outils informatique pour la Conception Assistée par Ordinateur (CAO)
- Applications maintenant très vastes
 - Divertissement (Cinéma, jeu vidéo, ...)
 - Communication (Publicité, marketing, ...)
 - Médecine (Visualisation, aide à la chirurgie, ...)
 - Simulation ...

Synthèse d'images

Historique

- Synthèse d'images : un vieil outil Humain
 - Les hommes préhistoriques en faisaient
 - Les peintres classiques en faisaient



Peinture en perspective de la Renaissance

Synthèse d'images

Historique

- Synthèse d'images : un vieil outil Humain
 - Les hommes préhistoriques en faisaient
 - Les peintres classiques en faisaient



Peinture en perspective de la Renaissance

- Outils
 - Marteau, burin, pinceau ...
 - Perspectographe

Synthèse d'images

Historique

- Synthèse d'images : un vieil outil Humain
 - Les hommes préhistoriques en faisaient
 - Les peintres classiques en faisaient



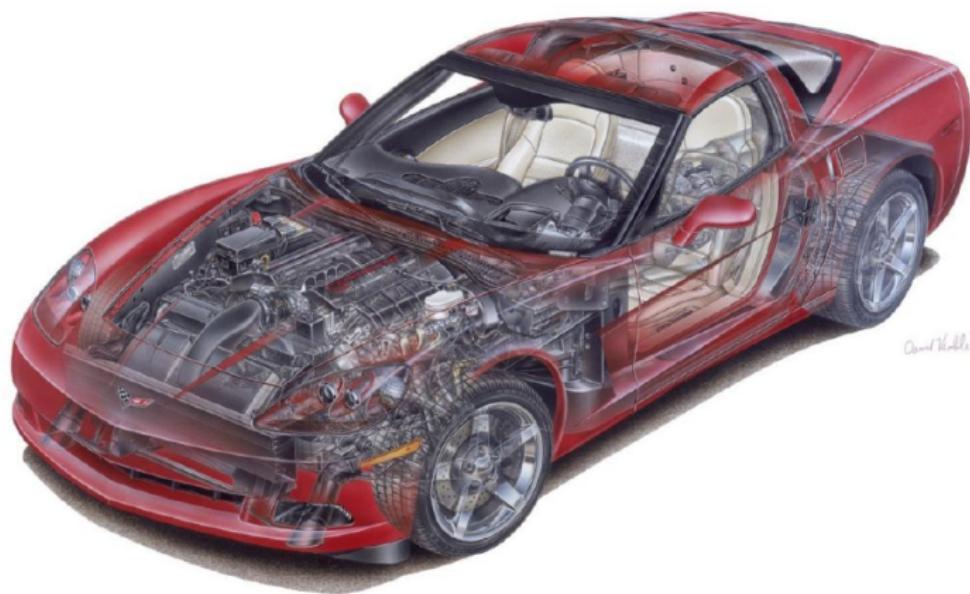
Peinture en perspective de la Renaissance

- Outils
 - Marteau, burin, pinceau ...
 - Perspectographe
 - Ordinateur

Synthèse d'images



Synthèse d'images



Synthèse d'images

Historique

- Quelques dates clés :

- XV^e siècle : Perspectographe
- 1950 : Yvan Sutherland (MIT) - système à tube cathodique et crayon optique pour le contrôle aérien
- 1961 : Dessin 2D par ordinateur : une croix pour indiquer l'emplacement du crayon
- 1968 : création de la société Evans & Sutherland
- 1970 : Création par Xerox de smalltalk et des interfaces graphiques

Technologie trop lente et coûteuse pour un réel essor de la 3D

Synthèse d'images

Historique

- Quelques dates clés :
 - 1981-1984 : IBM PC et Macintosh, la 3D se développe

Synthèse d'images

Historique

- Quelques dates clés :
 - 1981-1984 : IBM PC et Macintosh, la 3D se développe
 - 1986 : Création de Pixar : Luxo Junior



Synthèse d'images

Historique

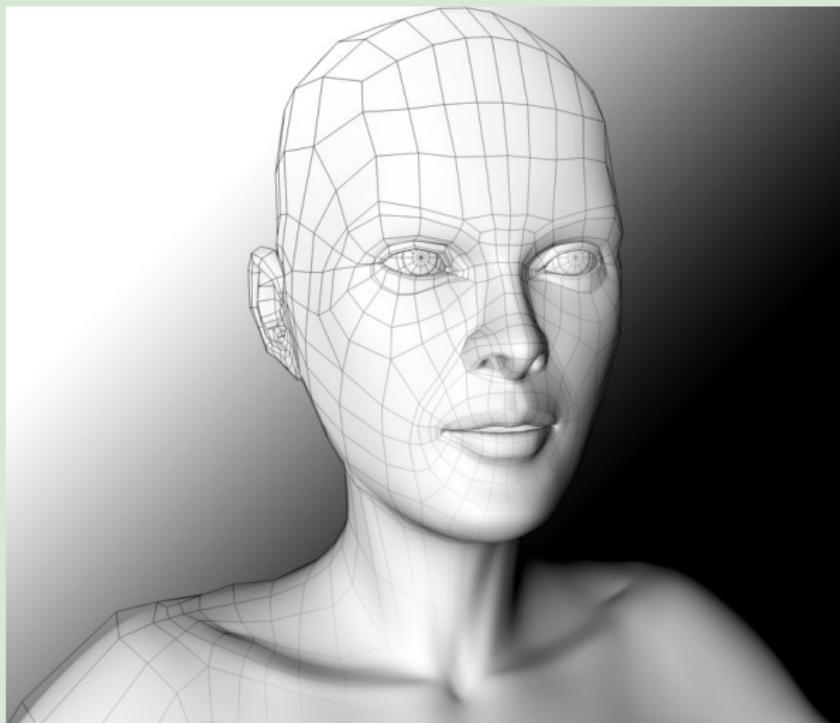
- Quelques dates clés :
 - 1981-1984 : IBM PC et Macintosh, la 3D se développe
 - 1986 : Création de Pixar : Luxo Junior



- à partir des années 1990 : démocratisation de la 3D

Synthèse d'images

Anatomie d'une image de synthèse



Synthèse d'images

La génération d'une image de synthèse correspond à la chaîne de traitement :

(1) Géométrie

- Modélisation des objets
- Placement des objets

Synthèse d'images

La génération d'une image de synthèse correspond à la chaîne de traitement :

(1) Géométrie

- Modélisation des objets
- Placement des objets

(2) Apparence

- Définition des matériaux
- Définition des sources

Synthèse d'images

La génération d'une image de synthèse correspond à la chaîne de traitement :

(1) Géométrie

- Modélisation des objets
- Placement des objets

(2) Apparence

- Définition des matériaux
- Définition des sources

(3) Éclairage

- Calcul de la luminance
- Calcul de la visibilité

Synthèse d'images

La génération d'une image de synthèse correspond à la chaîne de traitement :

(1) Géométrie

- Modélisation des objets
- Placement des objets

(2) Apparence

- Définition des matériaux
- Définition des sources

(4) Image

- Calcul des couleurs
- Correction des tons

(3) Éclairage

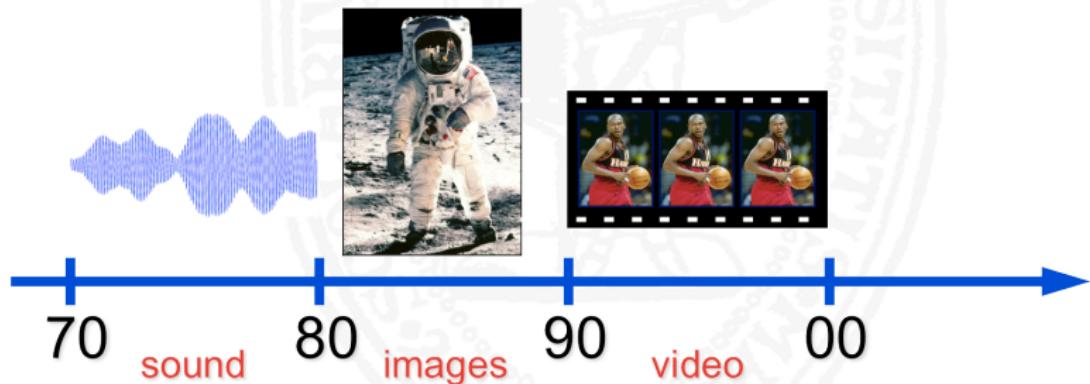
- Calcul de la luminance
- Calcul de la visibilité

Modélisation et traitement de la géométrie

Marteau, burin, plâtre et truelle ...
Un ordinateur pour tous les réunir !

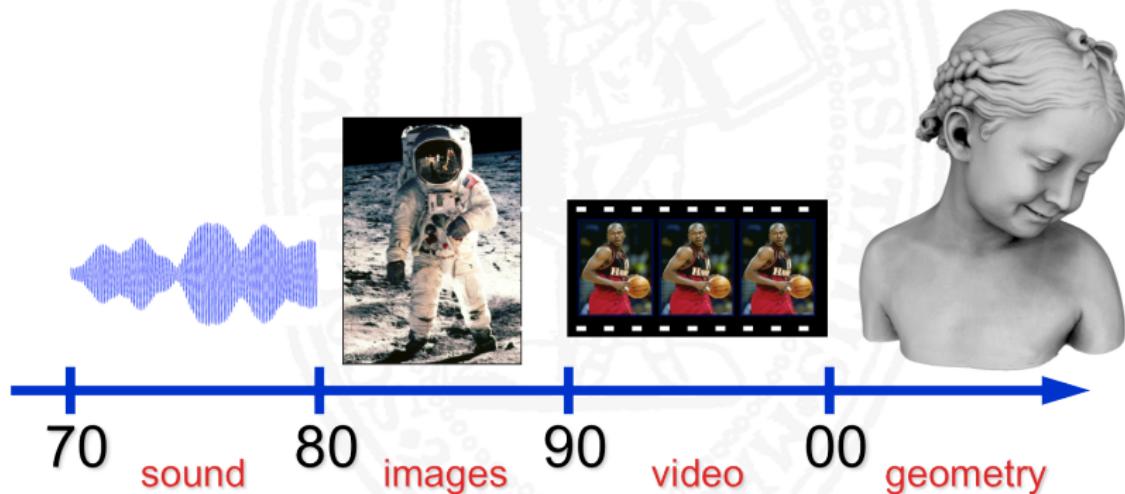
Modélisation et traitement de la géométrie

Traitement de données multimédia : augmentation de la complexité



Modélisation et traitement de la géométrie

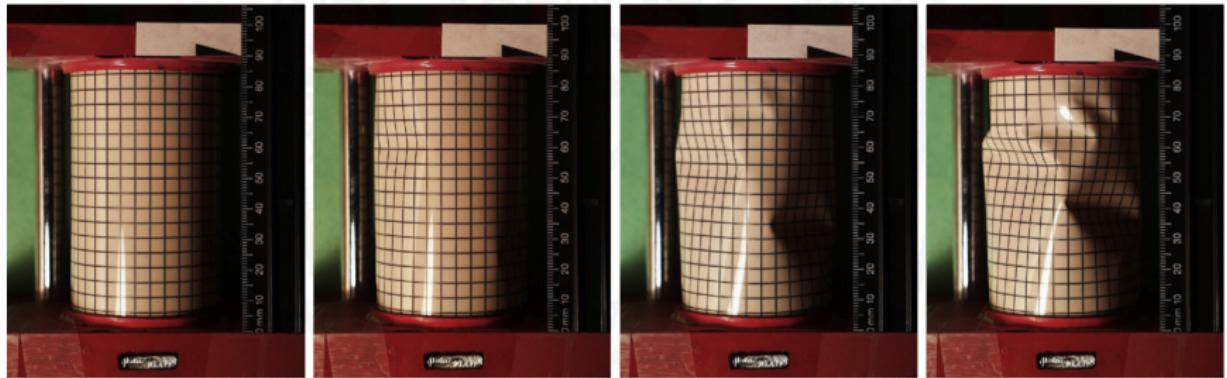
Traitement de données multimédia : augmentation de la complexité



Modélisation et traitement de la géométrie

Ingénierie

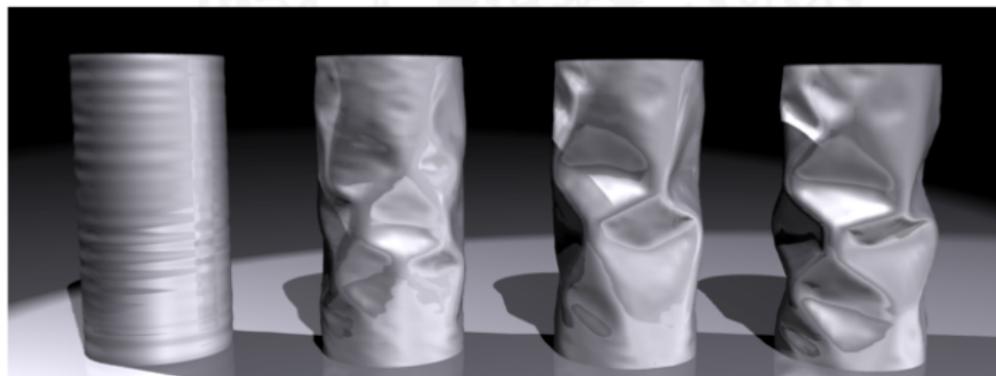
- Modélisation et expériences physiques



Modélisation et traitement de la géométrie

Ingénierie numérique

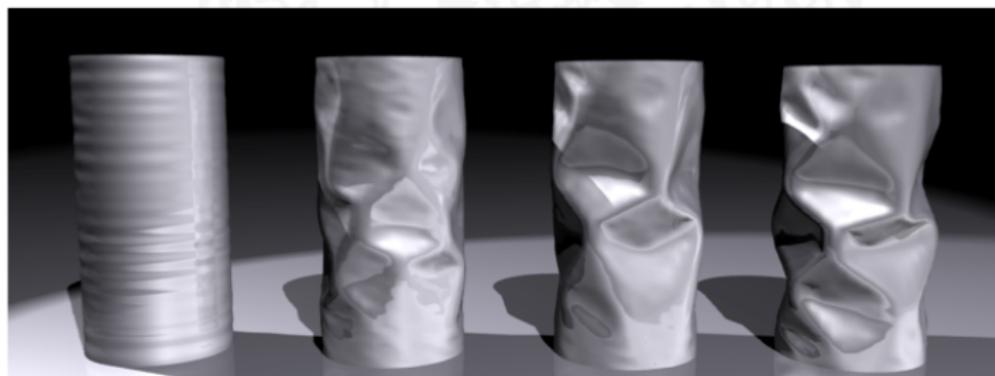
- Modélisation et expériences *physiques* numériques



Modélisation et traitement de la géométrie

Ingénierie numérique

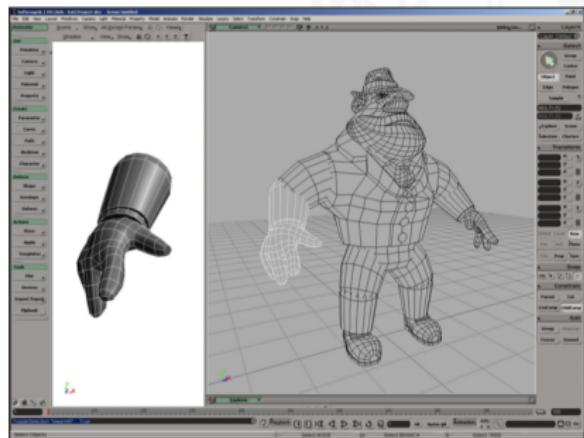
- Modélisation et expériences *physiques* numériques



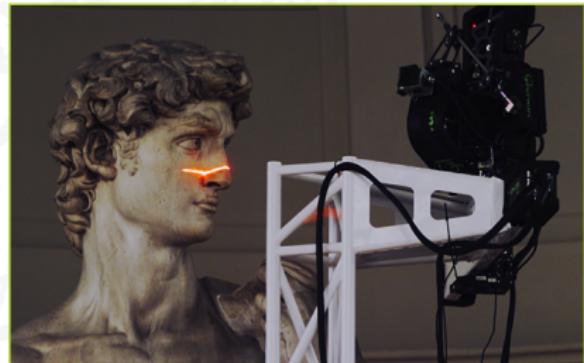
Modélisation et traitement de maillages

Modélisation et traitement de la géométrie

● Création



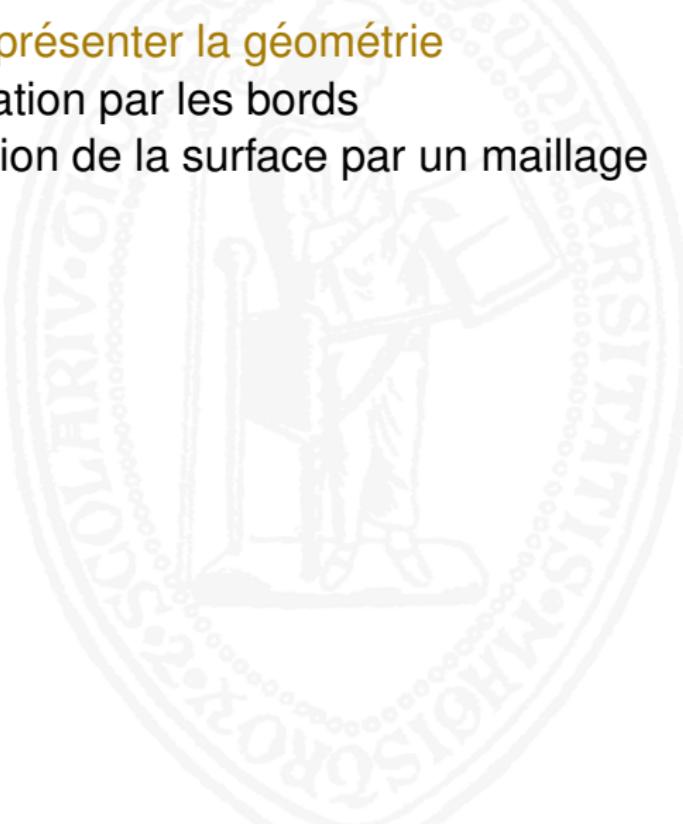
● Acquisition



Modélisation et traitement de la géométrie

Comment représenter la géométrie

- Modélisation par les bords
- Description de la surface par un maillage



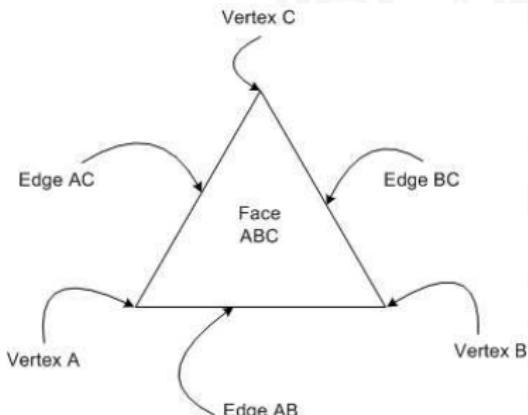
Modélisation et traitement de la géométrie

Comment représenter la géométrie

- Modélisation par les bords
- Description de la surface par un maillage

Qu'est-ce qu'un maillage ?

- Des informations géométriques : **sommets**
- Des informations topologiques : **arêtes** et **faces**



Maillage = graphe

Modélisation et traitement de la géométrie

Propriété des maillages

- Caractéristique d'Euler (1752)
 - Invariant numérique caractérisant une forme d'un espace topologique

$$S - A + F = 2(1 - g) = C^{te}$$

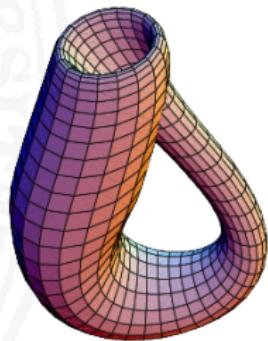
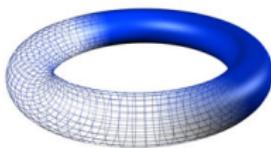
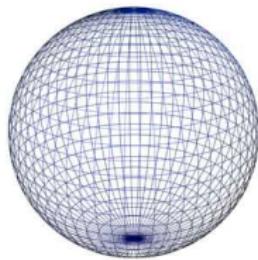
- S : nombre de sommets
- A : nombre d'arêtes
- F : nombre de faces
- g : genre de la forme

Modélisation et traitement de la géométrie

Propriété des maillages

- Caractéristique d'Euler (1752)

Forme



C^{te}

2

0

-1

Modélisation et traitement de la géométrie

Propriété des maillages

- Caractéristique d'Euler (1752)
 - Utile pour valider et dimensionner les maillages

Modélisation et traitement de la géométrie

Propriété des maillages

- Caractéristique d'Euler (1752)
 - Utile pour valider et dimensionner les maillages
- Maillages triangulaires
 - Introduction de la notion de demie-arête (*Da*)
 - Une arête possède 2 demies-arêtes
 - Une face possède 3 demies-arêtes
 - Maillage triangulaire fermé :
 $F = 5S + 10$ et $Da = 6S - 12$

Modélisation et traitement de la géométrie

Opérations courantes sur les maillages

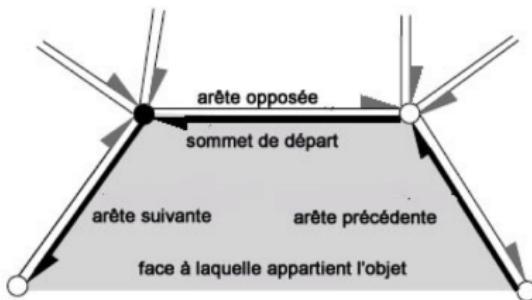
- L'édition ou le traitement de maillage repose sur les opérations atomiques suivantes :
 - Insertion/suppression de sommets
 - Insertion/suppression d'arêtes
 - Insertion/suppression de faces
 - Contraction/dilatation d'arêtes
 - Bascule d'arêtes
 - Ajout/suppression de faces sur les bords
- Ces opérations doivent maintenir la validité géométrique et topologique du maillage

Modélisation et traitement de la géométrie

Structure de données en demi-edges

- Objectifs

- Accès rapide aux informations géométriques
 - Accès direct aux sommets
- Accès rapide aux informations topologiques
 - Recherche d'un voisin
 - Extraction d'un voisinage
 - Parcours du maillage
- Compacité mémoire de la représentation



Modélisation et traitement de la géométrie

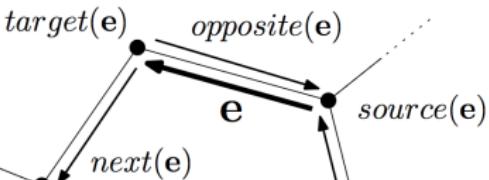
Structure de données en demi-arêtes

- Topologie

```
Class HalfEdge {
    HalfEdge *prev, *next, *opposite;
    Vertex *target;
    Face *f;
}
```

```
Class Face {
    HalfEdge *e;
}
```

```
Class Vertex {
    HalfEdge *e;
    Point p;
}
```

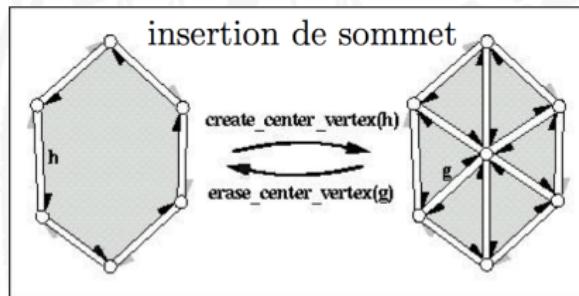


- Géométrie

```
Class Point {
    float x, y, z;
}
```

Modélisation et traitement de la géométrie

Insertion/suppression de sommets

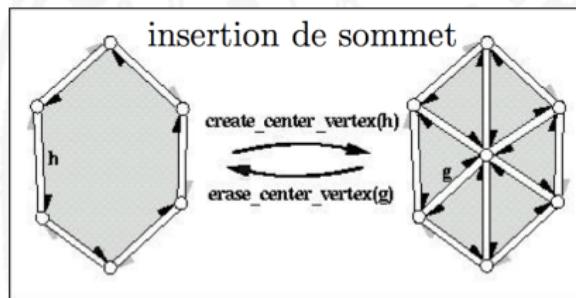


● Insertion

- En entrée : une face ou une demi-arête
- Construction bordure de la face (demi-arêtes)
- Construction des nouvelles demi-arêtes et faces

Modélisation et traitement de la géométrie

Insertion/suppression de sommets

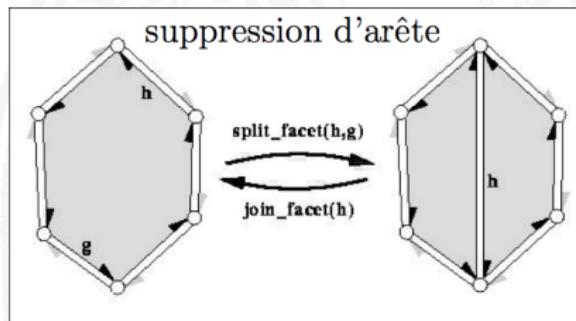


● Suppression

- En entrée : un sommet ou une demie-arête
- Construction voisinage du sommet (faces)
- Suppression du voisinage

Modélisation et traitement de la géométrie

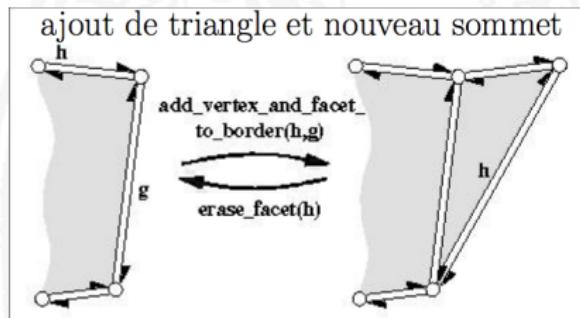
Insertion/suppression d'arêtes



- Insertion
 - En entrée : deux demies-arêtes
 - Construction nouvelle faces et MAJ demies-arêtes
- Suppression
 - En entrée : une demie-arête
 - MAJ demies-arêtes et suppression face

Modélisation et traitement de la géométrie

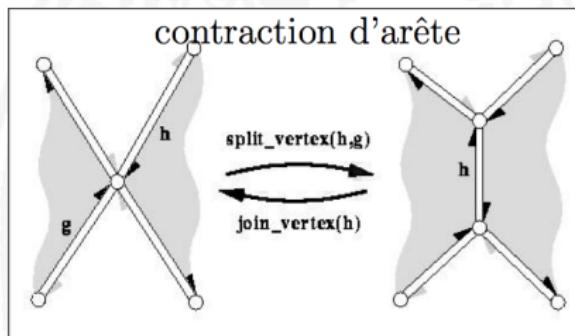
Insertion/suppression de faces



- Insertion
 - En entrée : deux demi-arêtes et un sommet
 - Construction nouvelle face et MAJ demi-arêtes
- Suppression
 - En entrée : une demi-arête
 - MAJ demi-arêtes et suppression face

Modélisation et traitement de la géométrie

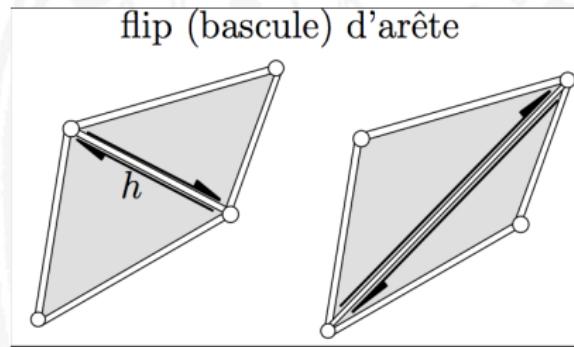
Contraction/dilatation d'arêtes



- Contraction
 - En entrée : une demie-arête
 - suppression demie-arête et MAJ faces
- Suppression
 - En entrée : deux demies-arêtes
 - Insertion demie-arête et MAJ faces

Modélisation et traitement de la géométrie

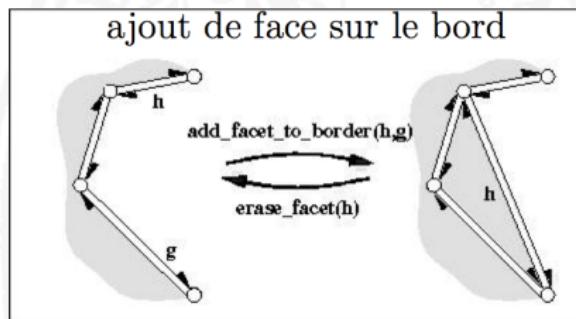
Bascule d'arêtes



- Flip
 - En entrée : une demie-arête
 - MAJ faces et demies-arêtes

Modélisation et traitement de la géométrie

Ajout/suppression de faces sur les bords



- contraction
 - En entrée : deux demi-arêtes
 - Création face et MAJ demi-arêtes
- Suppression
 - En entrée : une demi-arête
 - Suppression face et MAJ demi-arêtes

Synthèse d'une image : le rendu

Caméra, lumière, ...
la synthèse d'une image

Synthèse d'une image : le rendu



Lancer de rayons : objectifs

Objectifs initiaux :

- Élimination des parties cachées.
- Calcul de l'ombrage.
- Réaliser les deux opérations en même temps

Lancer de rayons : objectifs

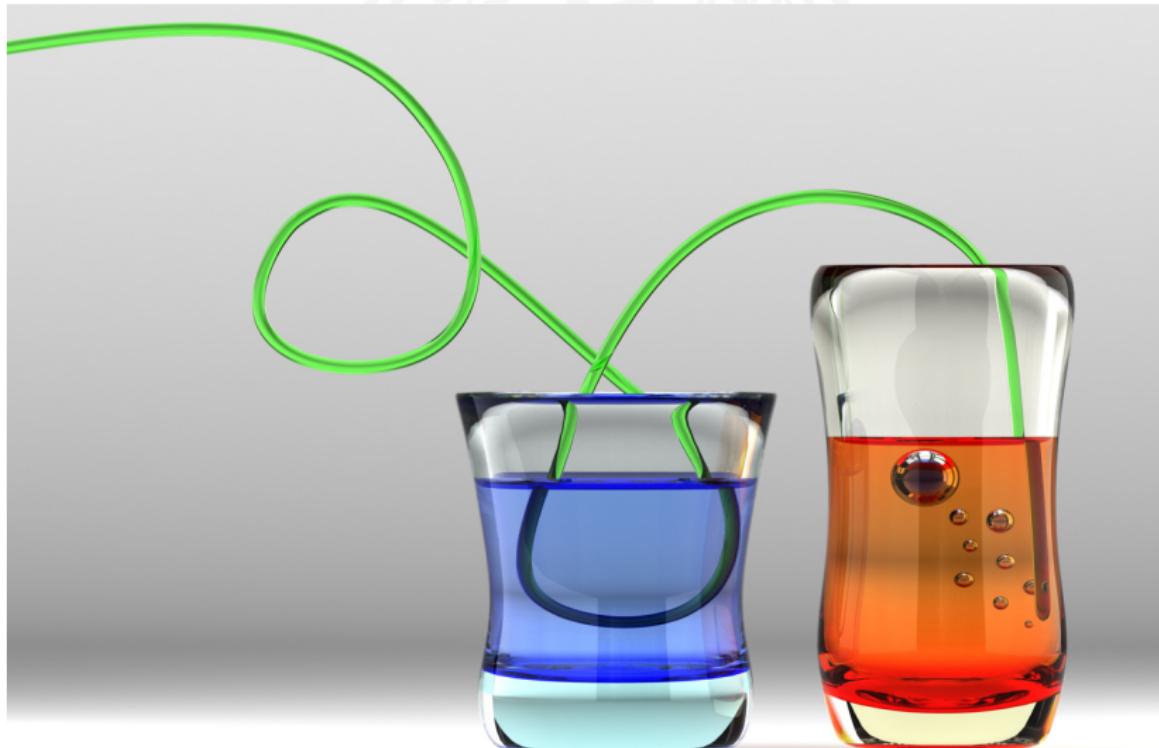
Objectifs initiaux :

- Élimination des parties cachées.
- Calcul de l'ombrage.
- Réaliser les deux opérations en même temps

Calcul d'images photo réalistes :

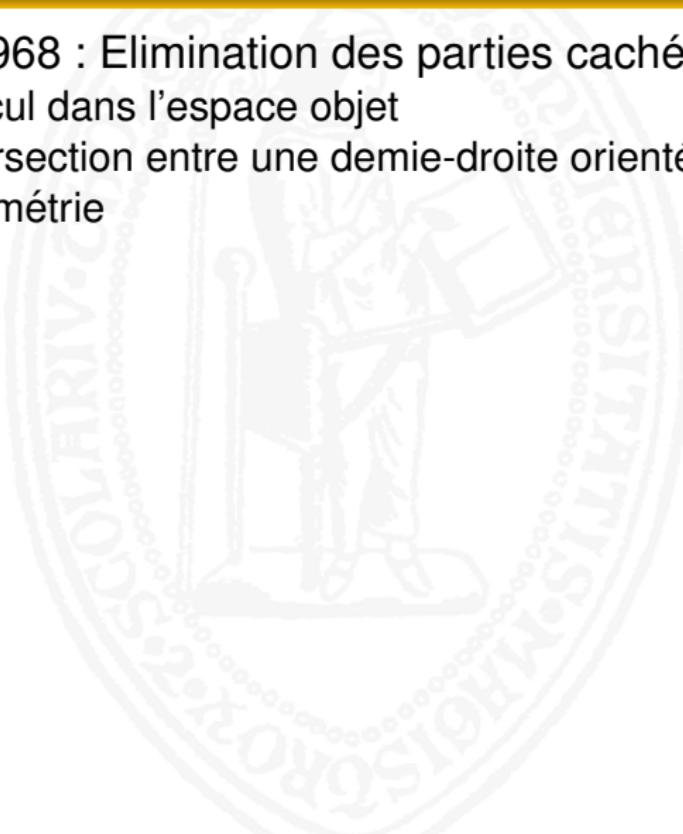
- Modèle d'éclairage physiquement plausible.
- Prise en compte d'effets avancés.
 - Réflexion
 - Réfraction
 - Ombre portées
- Outil de simulation de l'éclairage

Lancer de rayons : objectifs



Lancer de rayons : historique

- Appel 1968 : Elimination des parties cachées
 - Calcul dans l'espace objet
 - Intersection entre une demi-droite orientée et la géométrie



Lancer de rayons : historique

- Appel 1968 : Elimination des parties cachées
 - Calcul dans l'espace objet
 - Intersection entre une demi-droite orientée et la géométrie
- Whitted 1980 : Calcul d'ombrage et lancer de rayons
 - Modèle d'éclairage
 - Algorithme récursif

Lancer de rayons : historique

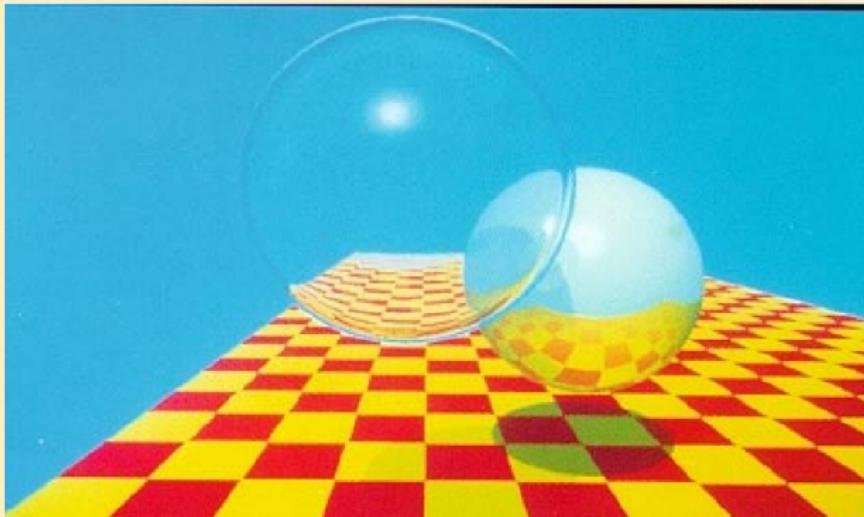
- Appel 1968 : Elimination des parties cachées
 - Calcul dans l'espace objet
 - Intersection entre une demi-droite orientée et la géométrie
- Whitted 1980 : Calcul d'ombrage et lancer de rayons
 - Modèle d'éclairage
 - Algorithme récursif
- Cook 1984 : Lancer de rayons distribués
 - Eclairage global
 - Intégration numérique

Lancer de rayons : historique

- Appel 1968 : Elimination des parties cachées
 - Calcul dans l'espace objet
 - Intersection entre une demi-droite orientée et la géométrie
- Whitted 1980 : Calcul d'ombrage et lancer de rayons
 - Modèle d'éclairage
 - Algorithme récursif
- Cook 1984 : Lancer de rayons distribués
 - Eclairage global
 - Intégration numérique
- Wald 2003 : Lancer de rayons distribués temps réel
 - Programmation vectorielle
 - Programmation parallèle

Première image

1980 : première image de synthèse en lancer de rayons



Turner Whitted, *An Improved Illumination Model for Shaded Display*, 1980

Lancer de rayons et design

2003 : design architectural et lancer de rayons



Lancer de rayons temps réel

2003 : Scènes complexes en temps réel



Ingo Wald, *Interactive Distributed Ray Tracing on Commodity PC Clusters*, 2003

Principe du Lancer de Rayons

Formation d'une image dans la réalité

- Des *rayons* lumineux sont émis depuis une ou plusieurs sources.
- Ces rayons *rebondissent dans la scène*.
- Certains rayons *arrivent sur la cornée*.
- Le cerveau reconstruit l'image.

Principe du Lancer de Rayons

Formation d'une image dans la réalité

- Des *rayons* lumineux sont émis depuis une ou plusieurs sources.
- Ces rayons *rebondissent dans la scène*.
- Certains rayons *arrivent sur la cornée*.
- Le cerveau reconstruit l'image.

Problèmes

- Combien de rayons lancer ?
- Combien arrivent à l'oeil ?
- L'image est-elle couverte ?

Principe du Lancer de Rayons

Formation d'une image dans la réalité

- Des *rayons* lumineux sont émis depuis une ou plusieurs sources.
- Ces rayons *rebondissent dans la scène*.
- Certains rayons *arrivent sur la cornée*.
- Le cerveau reconstruit l'image.

Problèmes

- Combien de rayons lancer ?
- Combien arrivent à l'oeil ?
- L'image est-elle couverte ?

Idées

- Rayons importants ?
- Un rayon par pixel ?
- Chemin inverse !

Principe du Lancer de Rayons

Formation d'une image en lancer de rayons

- Des rayons sont émis depuis l'oeil à travers le plan image.
- Ces rayons définissent un chemin lumineux.
- L'éclairage est calculé sur chaque chemin.

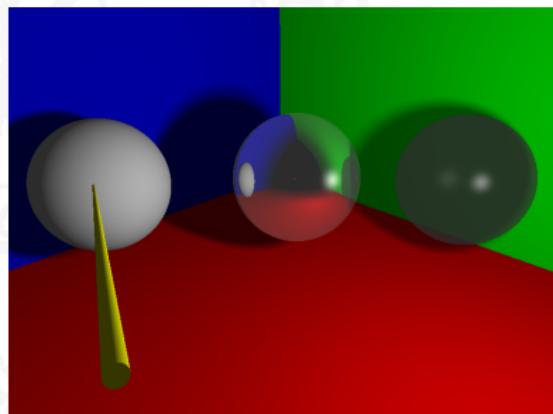
Principe du Lancer de Rayons

Formation d'une image en lancer de rayons

- Des rayons sont émis depuis l'oeil à travers le plan image.
- Ces rayons définissent un chemin lumineux.
- L'éclairage est calculé sur chaque chemin.

Etapes

- Un rayon par pixel.



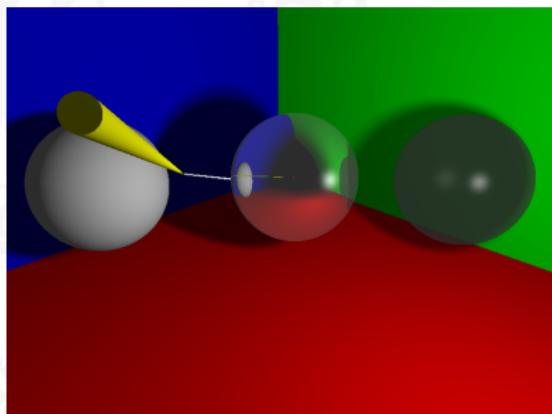
Principe du Lancer de Rayons

Formation d'une image en lancer de rayons

- Des rayons sont émis depuis l'oeil à travers le plan image.
- Ces rayons définissent un chemin lumineux.
- L'éclairage est calculé sur chaque chemin.

Etapes

- Un rayon par pixel.
- Ombres portées.



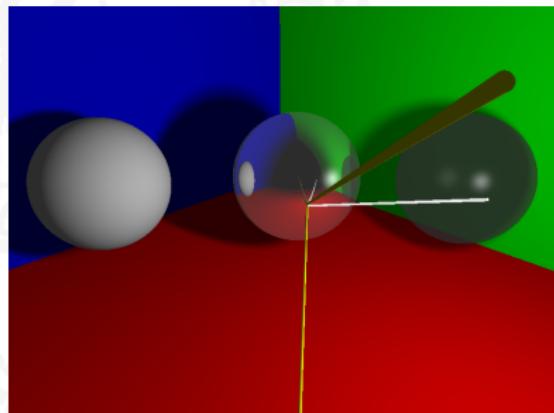
Principe du Lancer de Rayons

Formation d'une image en lancer de rayons

- Des rayons sont émis depuis l'oeil à travers le plan image.
- Ces rayons définissent un chemin lumineux.
- L'éclairage est calculé sur chaque chemin.

Etapes

- Un rayon par pixel.
- Ombres portées.
- Reflets.



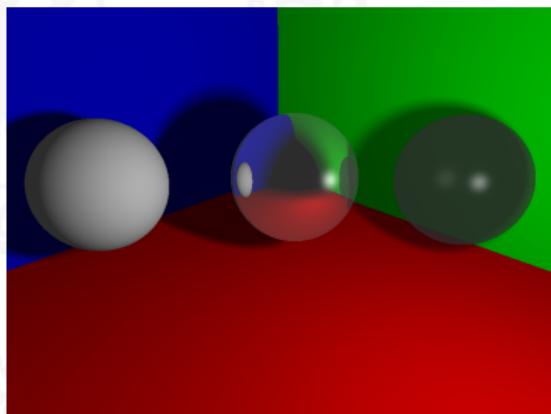
Principe du Lancer de Rayons

Formation d'une image en lancer de rayons

- Des rayons sont émis depuis l'oeil à travers le plan image.
- Ces rayons définissent un chemin lumineux.
- L'éclairage est calculé sur chaque chemin.

Etapes

- Un rayon par pixel.
- Ombres portées.
- Reflets.
- Transparence.



Principe du Lancer de Rayons

Principe général du Lancer de rayons

- Cheminement inverse de la lumière.
 - Seuls les chemins lumineux utiles sont calculés

Principe du Lancer de Rayons

Principe général du Lancer de rayons

- Cheminement inverse de la lumière.
 - Seuls les chemins lumineux utiles sont calculés
- Echantillonnage du plan image.
 - Tous les pixels auront une couleur

Principe du Lancer de Rayons

Principe général du Lancer de rayons

- Cheminement inverse de la lumière.
 - Seuls les chemins lumineux utiles sont calculés
- Echantillonnage du plan image.
 - Tous les pixels auront une couleur
- Calcul des intersection rayons/géométrie.
 - Détermination des parties visibles

Principe du Lancer de Rayons

Principe général du Lancer de rayons

- Cheminement inverse de la lumière.
 - Seuls les chemins lumineux utiles sont calculés
- Echantillonnage du plan image.
 - Tous les pixels auront une couleur
- Calcul des intersections rayons/géométrie.
 - Détermination des parties visibles
- Calcul de l'éclairage
 - Ombres portées et ombrage

Principe du Lancer de Rayons

Principe général du Lancer de rayons

- Cheminement inverse de la lumière.
 - Seuls les chemins lumineux utiles sont calculés
- Echantillonnage du plan image.
 - Tous les pixels auront une couleur
- Calcul des intersection rayons/géométrie.
 - Détermination des parties visibles
- Calcul de l'éclairage
 - Ombres portées et ombrage
- Utilisation des lois d'optique géométrique.
 - Reflets et transparence

Lancer de rayons

Représentation du rayon

Représentation paramétrique :

- Origine : O : point de \mathbb{R}^3
- Direction : \vec{D} vecteur de \mathbb{R}^3
- Point sur le rayon : $P = O + t\vec{D}$

Lancer de rayons

Représentation du rayon

Représentation paramétrique :

- Origine : O : point de \mathbb{R}^3
- Direction : \vec{D} vecteur de \mathbb{R}^3
- Point sur le rayon : $P = O + t\vec{D}$

Représentation de la géométrie

Toute représentation possible

- Quadriques : $x^2 + y^2 + z^2 = r^2$
- Bézier : $P(u, v) = \sum_{i=0}^n B_{i,n}(u) \sum_{j=0}^m B_{j,m}(v) P_{i,j}$
- Triangles : $P(u, v) = uV_0 + vV_1 + (1 - u - v)V_2$

Lancer de rayons

Calcul des intersections

- On recherche le point le plus proche de l'origine du rayon :
 - $t = \min(t_0, \dots, t_n)$ avec t_i la coordonnée du point d'intersection avec la i ème primitive.

Lancer de rayons

Calcul des intersections

- On recherche le point le plus proche de l'origine du rayon :
 - $t = \min(t_0, \dots, t_n)$ avec t_i la coordonnée du point d'intersection avec la i ème primitive.
- Complexité du calcul d'intersection :
 - Linéaire en nombre de primitive.
 - 99% du temps de calcul d'une image

⇒ minimiser le temps de calcul des intersections

Lancer de rayons

Calcul des intersections

- On recherche le point le plus proche de l'origine du rayon :
 - $t = \min(t_0, \dots, t_n)$ avec t_i la coordonnée du point d'intersection avec la i ème primitive.
- Complexité du calcul d'intersection :
 - Linéaire en nombre de primitive.
 - 99% du temps de calcul d'une image
⇒ minimiser le temps de calcul des intersections
- Attributs supplémentaires calculés
 - Normale au point d'intersection
 - Coordonnées de texture

Lancer de rayons

Définition d'un triangle

- Définition à partir de sommets
 - V_0, V_1, V_2

Lancer de rayons

Définition d'un triangle

- Définition à partir de sommets
 - V_0, V_1, V_2
 - Attributs aux sommets
 - Normale : \vec{N}
 - Couleur : R, V, B
- ...

Lancer de rayons

Définition d'un triangle

- Définition à partir de sommets
 - V_0, V_1, V_2
- Attributs aux sommets
 - Normale : \vec{N}
 - Couleur : R, V, B
 - ...
- Paramétrisation par coordonnées barycentriques
$$P(u, v) = (1 - u - v)V_0 + uV_1 + vV_2$$
avec $0 \leq u \leq 1$ et $0 \leq v \leq 1$

Lancer de rayons

Intersection rayon-triangle

- Point sur rayon : $P(t) = O + t\vec{D}$
- Point sur le triangle : $P(u, v) = (1 - u - v)V_0 + uV_1 + vV_2$

Lancer de rayons

Intersection rayon-triangle

- Point sur rayon : $P(t) = O + t\vec{D}$
- Point sur le triangle : $P(u, v) = (1 - u - v)V_0 + uV_1 + vV_2$
- Point d'intersection : $O + t\vec{D} = (1 - u - v)V_0 + uV_1 + vV_2$

Équation à résoudre

$$\left[-\vec{D}(V_1 - V_0)(V_2 - V_0) \right] \begin{bmatrix} t \\ u \\ v \end{bmatrix} = [O - V_0]$$

- Système de 3 équations à 3 inconnues : $[t \ u \ v]$

Lancer de rayons

Intersection rayon-triangle

- Système de Kramer

$$\begin{bmatrix} t \\ u \\ v \end{bmatrix} = \frac{1}{| -\vec{D}(V_1 - V_0)(V_2 - V_0) |} \begin{bmatrix} |(P - V_0)(V_1 - V_0)(V_2 - V_0)| \\ |-\vec{D}(P - V_0)(V_2 - V_0)| \\ |-\vec{D}(V_1 - V_0)(P - V_0)| \end{bmatrix}$$

- Simplification et factorisation du système par

$$\begin{aligned} |\vec{u} \ \vec{v} \ \vec{w}| &= (\vec{u} \times \vec{v}) \cdot \vec{w} \\ &= -(\vec{u} \times \vec{w}) \cdot \vec{v} \\ &= -(\vec{w} \times \vec{v}) \cdot \vec{u} \end{aligned}$$

Synthèse d'une image : le rendu

C'est quoi lancer un rayon ?

Rayons primaires

Définition

- Rayon primaire : rayon partant de la position de l'observateur et passant à travers les pixels de l'image.

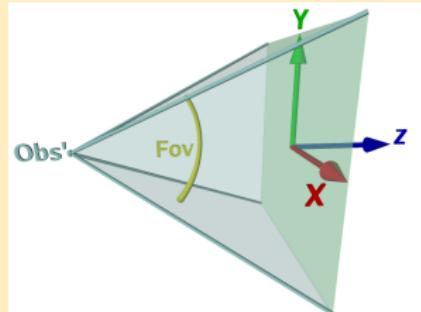
Rayons primaires

Définition

- Rayon primaire : rayon partant de la position de l'observateur et passant à travers les pixels de l'image.

Données

- Équation d'un rayon primaire
 - Observateur *Obs* :
 - Position : *Pos*
 - Direction de visée : $\vec{Z_c}$
 - Orientation de visée : \vec{Up}
 - Angle d'ouverture : θ
 - Résolution plan image
 R_x, R_y



Rayons primaires

Génération des rayons

- Paramétrisation du plan image

- $\vec{Z} = \vec{Z}_c, \vec{X} = \vec{Z} \times \vec{Up}, \vec{Y} = \vec{X} \times \vec{Z}$
- $Obs' = Pos - \frac{1}{\tan(\frac{\theta}{2})} \vec{Z}$

- Parcours du plan image

```
for (float x=-1;x<=1;x+=2.0/Rx)
    for (float y=-1;y<=1;y+=2.0/Ry) {
        R.O = Obs';
        R.D = Pos + x*X + y*Y -Obs';
        normalize(R.D);
        c = traceRay(R);
        setColor(x,y,c);
    }
```

Rayons secondaires

Définition

- Un rayon secondaire est un rayon réfléchi ou réfracté.

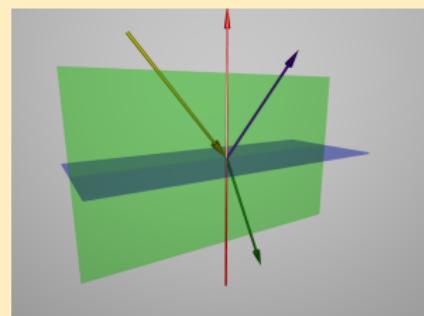
Rayons secondaires

Définition

- Un rayon secondaire est un rayon réfléchi ou réfracté.

Lois d'optique géométrique

- Caractéristique de la surface
 - Indice de réfraction n^λ .
 - Coefficient de réflexion
 - Ces coefficients sont les termes de Fresnel
 - Coefficient de transmission
 - Implicites à partir des coefficients de réflexion



Lois d'optique géométrique

Approximation des coefficients de Fresnel

$$R(0, \lambda) = \frac{(n_i^\lambda - n_t^\lambda)^2}{(n_i^\lambda + n_t^\lambda)^2} \quad T(\theta, \lambda) = 1 - R(\theta, \lambda)$$

$$R(\theta, \lambda) \approx R(0, \lambda) + (1 - R(0, \lambda)) (1 - \cos(\theta))^5$$



Lois d'optique géométrique

Approximation des coefficients de Fresnel

$$R(0, \lambda) = \frac{(n_i^\lambda - n_t^\lambda)^2}{(n_i^\lambda + n_t^\lambda)^2} \quad T(\theta, \lambda) = 1 - R(\theta, \lambda)$$

$$R(\theta, \lambda) \approx R(0, \lambda) + (1 - R(0, \lambda)) (1 - \cos(\theta))^5$$

Réflexion

- Toujours possible
- $\theta_r = \theta_i$

$$\vec{D}_r = \vec{D} + 2\cos(\theta)\vec{N}$$

Lois d'optique géométrique

Approximation des coefficients de Fresnel

$$R(0, \lambda) = \frac{(n_i^\lambda - n_t^\lambda)^2}{(n_i^\lambda + n_t^\lambda)^2} \quad T(\theta, \lambda) = 1 - R(\theta, \lambda)$$

$$R(\theta, \lambda) \approx R(0, \lambda) + (1 - R(0, \lambda)) (1 - \cos(\theta))^5$$

Réflexion

- Toujours possible
- $\theta_r = \theta_i$

$$\vec{D}_r = \vec{D} + 2\cos(\theta)\vec{N}$$

Transmission

- $n_i \sin(\theta_i) = n_t \sin(\theta_t)$
- Si $n_i > n_t$,
 $\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$ est
 l'angle limite.

$$c = 1 - \left(\frac{n_i}{n_t}\right)^2 \sin^2(\theta)$$

Si $c > 0$

$$\begin{aligned} \vec{D}_t &= \\ \vec{N} \left(\frac{n_i}{n_t} \cos(\theta) - \sqrt{c} \right) &+ \vec{D} \frac{n_i}{n_t} \end{aligned}$$

Algorithme récursif

Algorithme général

```
color traceRay(Ray R) {
    if ( l = intersectRayScene(R) ) {
        color rfl = r(l,R,reflect(R)) * traceRay(reflect(R));
        color rfr = t(l,R,refract(R)) * traceRay(refract(R));
        color lighting = traceShadowRays(l,R);
        return rfl + rfr + lighting;
    } else {
        return (black);
    }
}
```

Algorithme récursif

Calcul éclairage direct

```
color traceShadowRays(l,R) {  
    color incident = Color::ZERO;  
    for (i=lights.begin(); i!=light.end(); ++i) {  
        S = makeSegment(l,i);  
        if (!intersectSegmentScene(S))  
            incident += r(S,l,R) * i.color();  
    }  
    return incident;  
}
```

Terminaison

Critères d'arrêt de la récursion

- Nombre de *rebonds* dans la scène
 - Critère simple
 - Peut avoir des impacts perceptuels importants

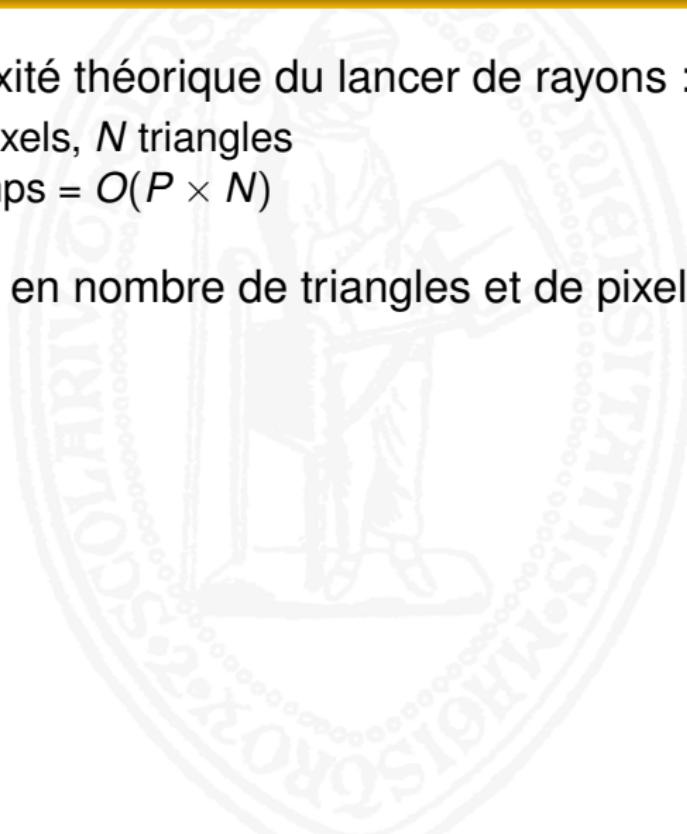
Terminaison

Critères d'arrêt de la récursion

- Nombre de *rebonds* dans la scène
 - Critère simple
 - Peut avoir des impacts perceptuels importants
- Importance du rayon faible
 - Importance : produit des coefficients de transmission/réflexion sur le rayon
 - Bonne qualité d'image
 - Peut être long à arrêter un rayon

Complexité du lancer de rayons

- Complexité théorique du lancer de rayons :
 - P pixels, N triangles
 - Temps = $O(P \times N)$
- Linéaire en nombre de triangles et de pixels

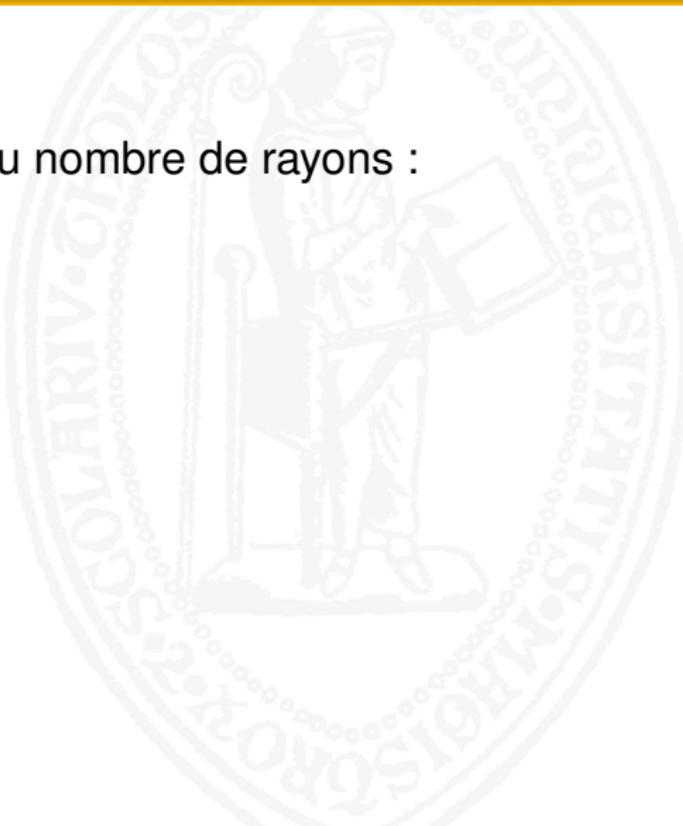


Complexité du lancer de rayons

- Complexité théorique du lancer de rayons :
 - P pixels, N triangles
 - Temps = $O(P \times N)$
- Linéaire en nombre de triangles et de pixels
- Étant donné :
 - Une scène de 10 000 000 triangles (assez complexe)
 - Éclairée par 4 sources lumineuses ponctuelles
 - Une résolution désirée de 2000x1000 pixels
 - Une construction complète de l'arbre des rayons à la profondeur 4
- Quel est le coût de calcul d'une image par lancer de rayons ?

Complexité du lancer de rayons

- Calcul du nombre de rayons :



Complexité du lancer de rayons

- Calcul du nombre de rayons :
 - $1 + \sum_{i=0}^p 2^i$ rayons primaire et secondaires par pixel

Complexité du lancer de rayons

- Calcul du nombre de rayons :

- $1 + \sum_{i=0}^p 2^i$ rayons primaire et secondaires par pixel
- $4 \times (1 + \sum_{i=0}^p 2^i)$ rayons d'ombrage par pixel

Complexité du lancer de rayons

- Calcul du nombre de rayons :

- $1 + \sum_{i=0}^p 2^i$ rayons primaire et secondaires par pixel
- $4 \times (1 + \sum_{i=0}^p 2^i)$ rayons d'ombrage par pixel
- $5 \times (1 + \sum_{i=0}^p 2^i)$ rayons

Complexité du lancer de rayons

- Calcul du nombre de rayons :

- $1 + \sum_{i=0}^p 2^i$ rayons primaire et secondaires par pixel
- $4 \times (1 + \sum_{i=0}^p 2^i)$ rayons d'ombrage par pixel
- $5 \times (1 + \sum_{i=0}^p 2^i)$ rayons
- 150 rayons par pixel

Complexité du lancer de rayons

- Calcul du nombre de rayons :

- $1 + \sum_{i=0}^p 2^i$ rayons primaire et secondaires par pixel
- $4 \times (1 + \sum_{i=0}^p 2^i)$ rayons d'ombrage par pixel
- $5 \times (1 + \sum_{i=0}^p 2^i)$ rayons
- **150 rayons par pixel**
- **$N = 3 \times 10^8$ rayons**

Complexité du lancer de rayons

- Calcul du nombre de rayons :
 - $1 + \sum_{i=0}^p 2^i$ rayons primaire et secondaires par pixel
 - $4 \times (1 + \sum_{i=0}^p 2^i)$ rayons d'ombrage par pixel
 - $5 \times (1 + \sum_{i=0}^p 2^i)$ rayons
 - 150 rayons par pixel
 - $N = 3 \times 10^8$ rayons
- Nombre d'intersection à calculer : $N_i \simeq 3 \times 10^{15}$.

Complexité du lancer de rayons

- Calcul du nombre de rayons :

- $1 + \sum_{i=0}^p 2^i$ rayons primaire et secondaires par pixel
- $4 \times (1 + \sum_{i=0}^p 2^i)$ rayons d'ombrage par pixel
- $5 \times (1 + \sum_{i=0}^p 2^i)$ rayons
- **150 rayons par pixel**
- **$N = 3 \times 10^8$ rayons**

- Nombre d'intersection à calculer : $N_i \simeq 3 \times 10^{15}$.

- Sur CPU actuel : $\simeq 3 \times 10^7$ intersections par secondes

Complexité du lancer de rayons

- Calcul du nombre de rayons :

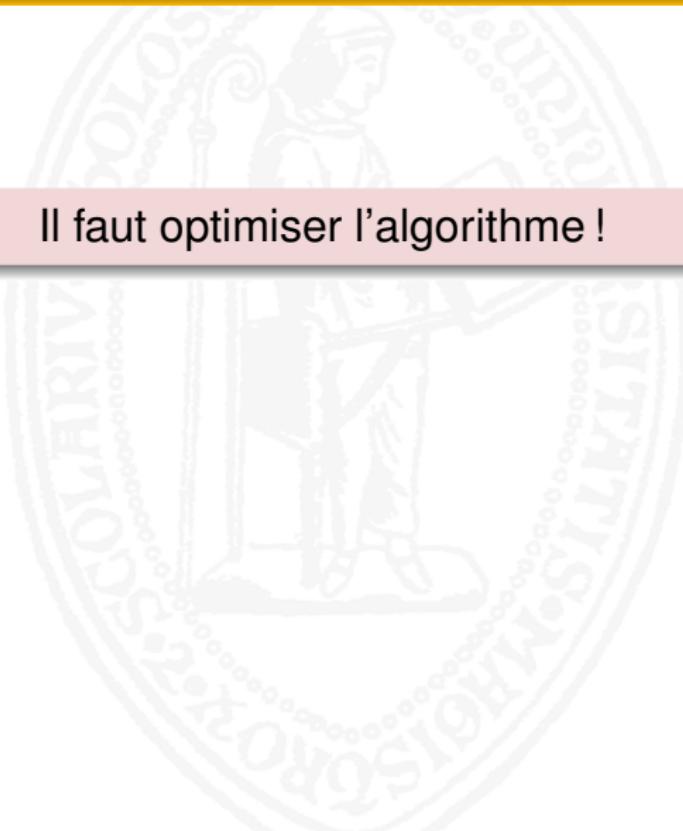
- $1 + \sum_{i=0}^p 2^i$ rayons primaire et secondaires par pixel
- $4 \times (1 + \sum_{i=0}^p 2^i)$ rayons d'ombrage par pixel
- $5 \times (1 + \sum_{i=0}^p 2^i)$ rayons
- **150 rayons par pixel**
- **$N = 3 \times 10^8$ rayons**

- Nombre d'intersection à calculer : $N_i \simeq 3 \times 10^{15}$.

- Sur CPU actuel : $\simeq 3 \times 10^7$ intersections par secondes
- 10^8 secondes (3 ans !) de calcul par images

Complexité du lancer de rayons

Il faut optimiser l'algorithme !



Complexité du lancer de rayons

Il faut optimiser l'algorithme !

- Parallélisation
 - SIMD, MIMD, STMD, ...
- Structure de données
 - Arbres de recherche

Le mot de la fin

Audio, video, images : une vraie problématique informatique pour le traitement et la synthèse multimédia.