

Illumination

Romain Raffin

romain.raffin@u-bourgogne.fr

UB - UFR Sciences et techniques, Dijon

2023

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

1 Introduction

2 Optique

3 Lancer de rayons

4 Lumières

5 Critiques

6 Photométrie

7 Autres méthodes

Plan intermédiaire

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

1 Introduction

2 Optique

3 Lancer de rayons

4 Lumières

5 Critiques

6 Photométrie

7 Autres méthodes

Introduction

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

Les rendus d'objets 3D effectués dans les TP sont pour l'instant basés sur les couleurs associées à chaque face ou à chaque sommet.

On peut y associer des textures, des cartes (*bump, reflexion, environment, shadow maps*).

Ces méthodes atteignent leurs limites si on veut calculer les inter-réflexions, gérer des objets semi-transparents ou des prismes qui décomposent la lumière blanche.

Un autre rendu possible consiste à simuler l'éclairement réel de la surface, grâce à des propriétés du matériau, en s'appuyant sur des modèles physiques : l'illumination.

C'est un modèle beaucoup plus coûteux en calcul, que l'on retrouve en rendu « Ray Tracing » différé (lancé sur une ou plusieurs machines) avec Blender¹ ou en temps-réel (technologie RTX Nvidia).

¹Cycles

Illumination globale

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

Essayer de suivre « fidèlement » le processus physique :

- émission de lumière depuis les sources lumineuses
- suivi de la lumière dans la scène
- prise en compte des réflexions et absorptions
- suivi de la lumière jusqu'à la caméra
- enregistrement de la couleur du (des) pixel(s) quand la lumière parvient sur la surface de projection

Ombres

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes



Dispersion des couleurs

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

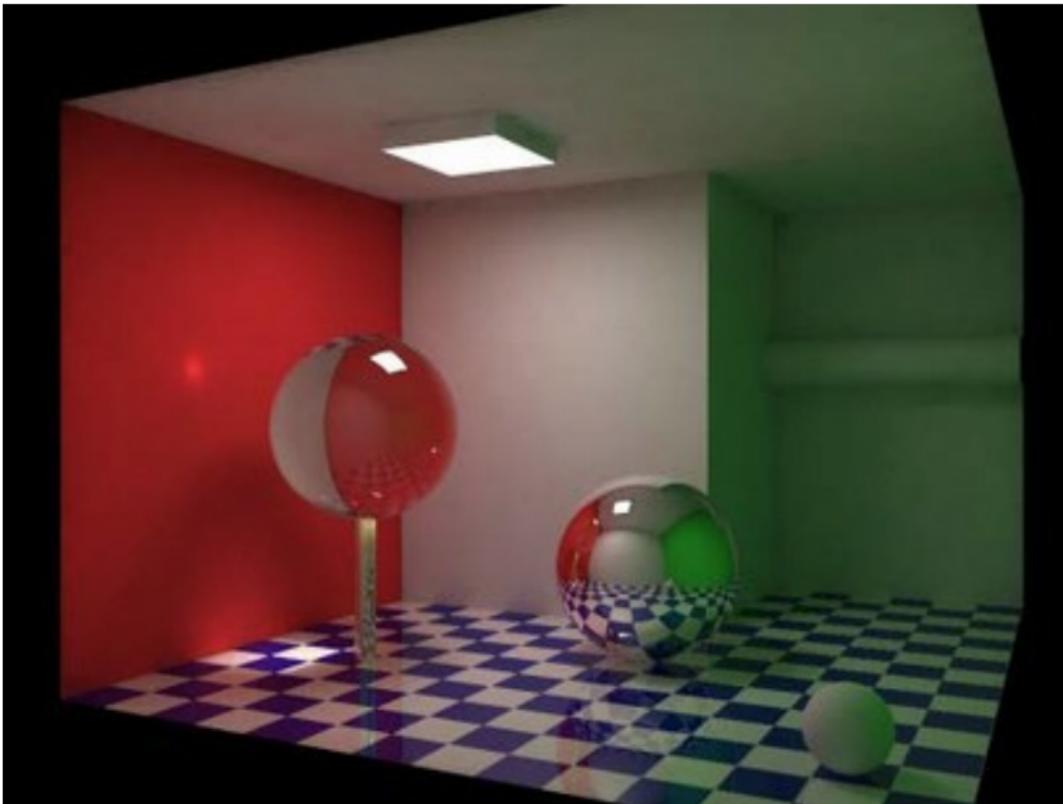
Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes



Réalisme des scènes

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes



Plan intermédiaire

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

1 Introduction

2 Optique

3 Lancer de rayons

4 Lumières

5 Critiques

6 Photométrie

7 Autres méthodes

Observons un rayon lumineux

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

Quand la lumière rencontre un objet (défini par son matériau), 3 types d'interactions peuvent se produire :

- Réflexion
- Absorption
- Transmission

L'énergie de la lumière est conservée :

$$\text{Lumière incidente} = \text{lumière absorbée} + \text{lumière réfléchie} + \text{lumière transmise}$$

Si l'objet est opaque, la majorité de la lumière incidente est soit réfléchie soit absorbée (lumière transmise nulle). Si l'objet est translucide, la transmission est importante.

Quelques réflexions

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

Une fois une surface touchée par un rayon, s'il y a réflexion,

- réflexion totale, le rayon est renvoyé dans une seule direction, respectant la loi de Snell-Descartes (angle d'incidence = angle de réflexion)
- réflexion spéculaire, dans le plan d'incidence et réfraction possible
- réflexion diffuse, dans plusieurs directions, sans rester dans le plan d'incidence

Dans tous les cas de réflexion, l'angle d'incidence se mesure par rapport à la normale.
Son calcul est donc indispensable.

Plan intermédiaire

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

1 Introduction

2 Optique

3 Lancer de rayons

4 Lumières

5 Critiques

6 Photométrie

7 Autres méthodes

Il faut donc pouvoir suivre un rayon lumineux, de son émission jusqu'à sa réception par un capteur (œil, caméra).

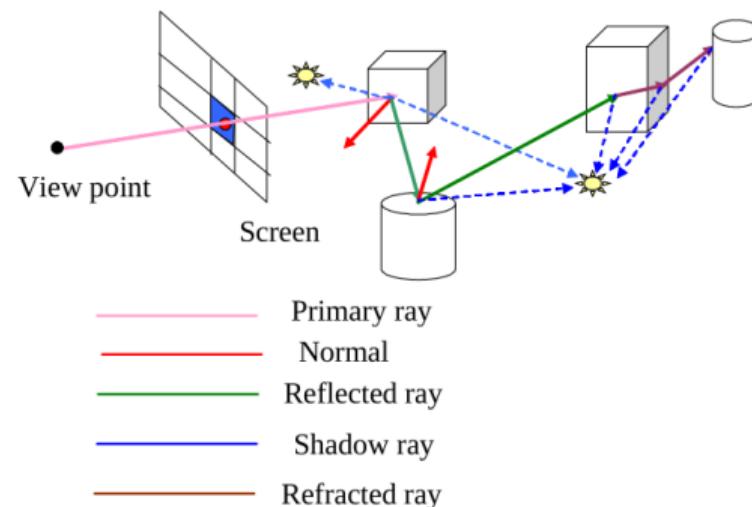


Fig. : Schéma Global

Chemin inverse

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

Lancer une infinité de rayon et tester l'ensemble des intersections/transmissions est très coûteux : on utilise le chemin inverse de la lumière.

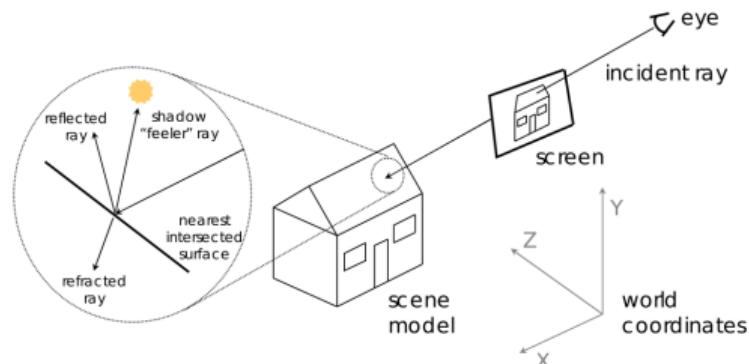


Fig. : Chemin inverse

On définit un capteur discret, la position de l'observateur (pour créer la perspective éventuellement) et on lance des rayons {œil, grille} vers la scène.

Chemin d'un rayon

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

On identifie les intersections, on relance des rayons réfléchis, réfractés jusqu'à atteindre un seuil minimal d'énergie ou maximal de rebonds.

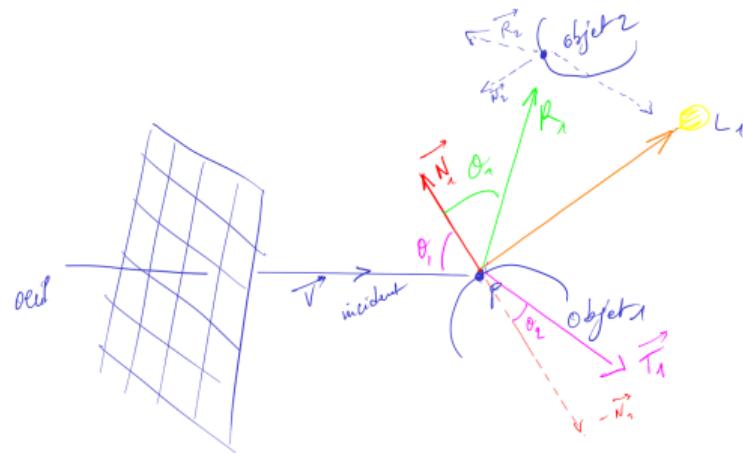


Fig. : Schéma d'un chemin de rayon

Modèle d'éclairrement

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

$$I = I_a + K_d \sum_{j=1}^l (\vec{N} \cdot \vec{L}_j) + K_s S + K_t T$$

(Whitted 1980)

- I intensité finale
- I_a intensité due à la lumière ambiante
- K_d coefficient de lumière diffuse
- \vec{N} normale à la surface
- \vec{V} vecteur incident
- \vec{L}_j vecteur dirigé vers la source lumineuse j
- K_s coefficient de réflexion spéculaire
- K_t coefficient de réfraction
- S est l'intensité lumineuse dans la direction \vec{R} (réflexion)
- T est l'intensité lumineuse de la direction \vec{P} (réfraction)

Attention, tous les vecteurs doivent être unitaires.

Schéma

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

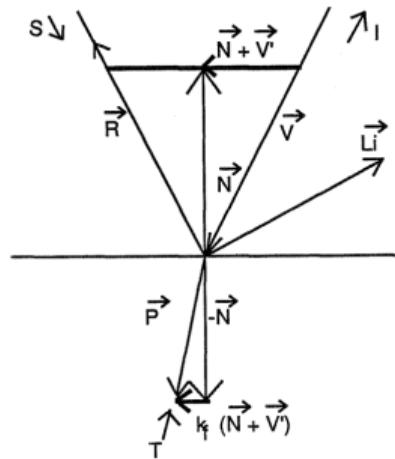
Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes



Si on note :

$$\vec{V}' = \frac{\vec{V}}{\|\vec{V} \cdot \vec{N}\|}$$

Alors :

$$\vec{R} = \vec{V}' + 2\vec{N}$$

et

$$\vec{P} = k_f(\vec{N} + \vec{V}') - \vec{N}$$

avec

$$k_f = \frac{1}{\sqrt{K_n \|\vec{V}'\|^2 - \|\vec{V}' + \vec{N}\|^2}}$$

K_n l'indice de réfraction du nouveau milieu (si l'ancien était l'air, indice de réfraction = 1).

Réfraction

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

Loi de Snell-Descartes :

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$$

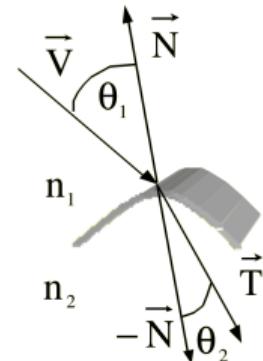


FIG. : Réfraction

Indices de réfraction (attention, dépend de la longueur d'onde) :

https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_d'indices_de_réfraction

Plan intermédiaire

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

1 Introduction

2 Optique

3 Lancer de rayons

4 Lumières

5 Critiques

6 Photométrie

7 Autres méthodes

Lumières

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

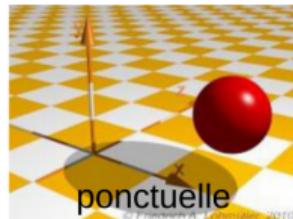
Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

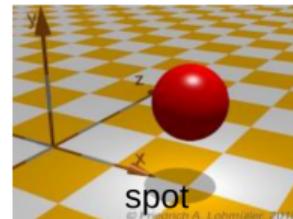
Elles sont de plusieurs types (cf. GL également, même si ce n'est pas du lancer de rayon)



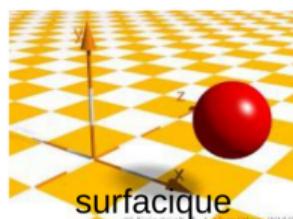
ponctuelle



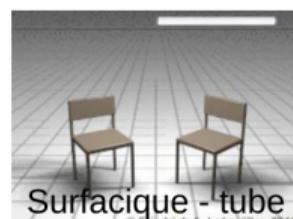
directionnelle



spot



surfacique



Surfacique - tube



volumique

FIG. : Types de Lumières

Source lumineuse surfacique

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

Cela revient à considérer la source comme un paquet de sources ponctuelles. Plusieurs choix sont alors possibles :

- distribution gaussienne (axe prépondérant),
- distribution randomisée,
- découpage de micro-surfaces émettrices

On lance ensuite des rayons depuis l'intersection vers toutes les sources ponctuelles et on en fait la moyenne. Cela permet la création d'ombres douces.

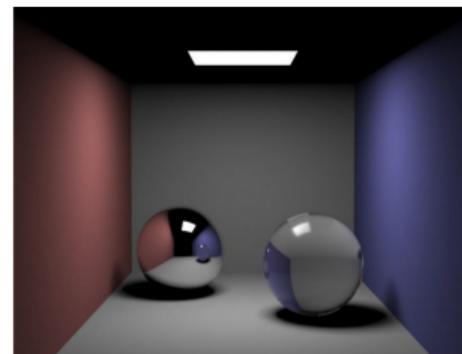


Fig. : Exemple de lumière surfacique

Rayon Ombre

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

On détecte les ombres en lançant des rayons vers les sources lumineuses (1/2 droite paramétrique)

S'il y a un autre objet situé entre le rayon et une source de lumière, une ombre doit être portée (occlusion).

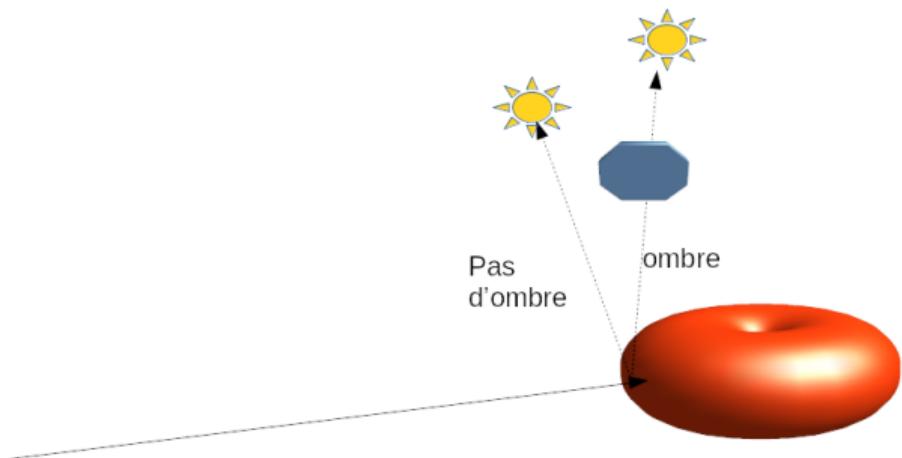


Fig. : Ombre

Exemples de rayon d'ombre

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

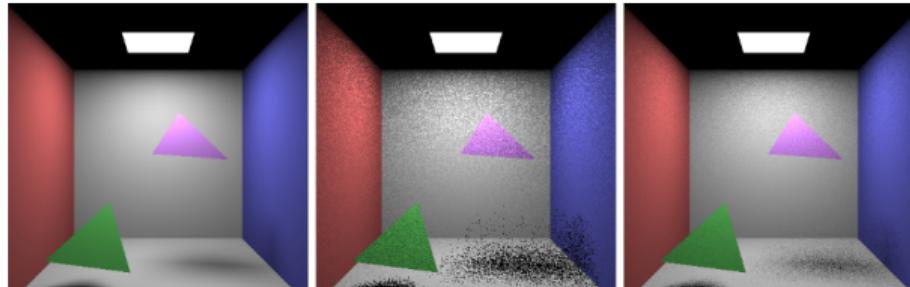
Lancer de rayons

Lumières

Critiques

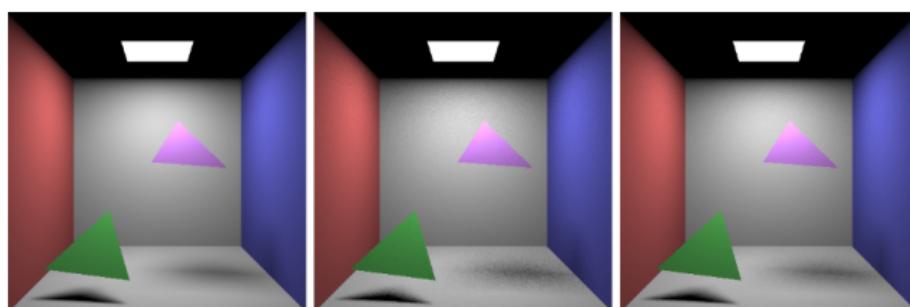
Photométrie

Autres méthodes



1 rayon d'ombre

9 rayons d'ombre



36 rayons d'ombre

100 rayons d'ombre

Intersection

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

Le rayon est une demi-droite paramétrique $\mathcal{C}(t) = M + t \vec{V}$

L'objet est sous forme implicite (le plus simple), paramétrique, linéaire par morceaux (polygone), CSG...

Le lancer de rayon a besoin de tester l'intersection du rayon avec l'objet.

Pour avoir une écriture générale, si l'objet est transformé, on replace le rayon dans l'espace objet avec la transformation inverse (comme en TD).

Arbre de rayons

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

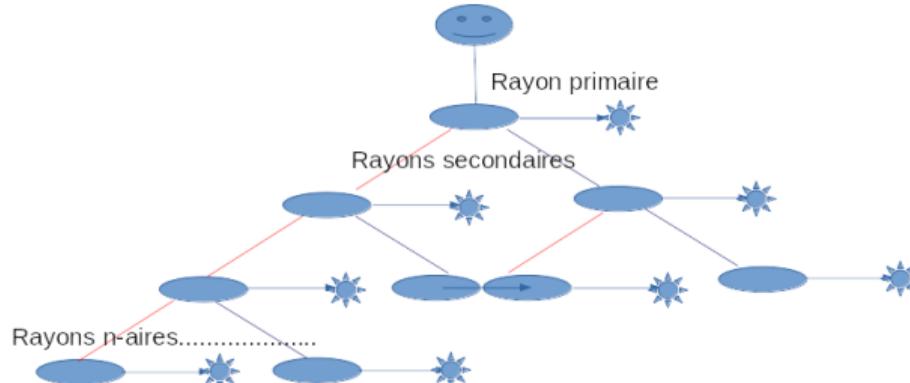
Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

Au final le lancer de rayon est récursif (arbre de rayons).



intersection



"Rayon ombre"



Rayons réfléchis et
réfractés

FIG. : Arbre de rayons

Exemples de résultats

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

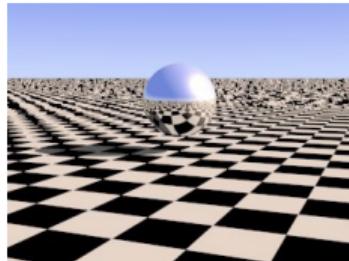


FIG. : Réflexion et ombres



FIG. : Réflexion totale (interne)



FIG. : Transmission

Plan intermédiaire

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

1 Introduction

2 Optique

3 Lancer de rayons

4 Lumières

5 Critiques

6 Photométrie

7 Autres méthodes

Critiques

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

À cause de la grille discrète, les objets sont aliasés, les petits objets risquent de ne pas être rendus (non intersection) ou mal (1 seul pixel pour plusieurs objets).

Le temps de calcul est important et augmente fortement selon la taille de la grille, le nombre de rayons, d'objets ou de sources lumineuses.

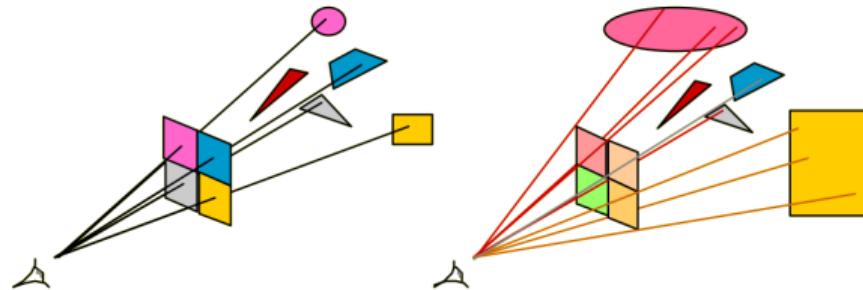


Fig. : Problèmes du Ray Tracing

Une solution ?

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

En fait plusieurs :

- lancer plusieurs rayons par pixel du capteur, cela abouti à une intégration sur la surface du capteur. Le choix peut-être randomisé (Monte-Carlo),
- lancer un faisceau de rayons, créant une forme polygonale.

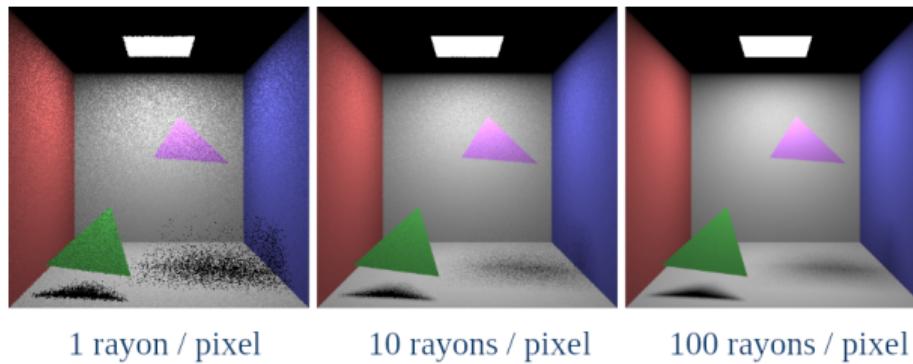


Fig. : Plusieurs rayons/pixel

Faisceaux

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

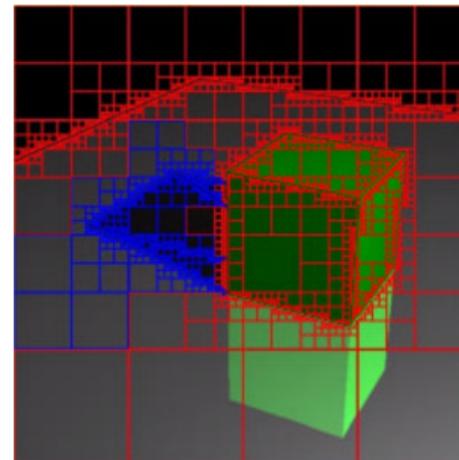
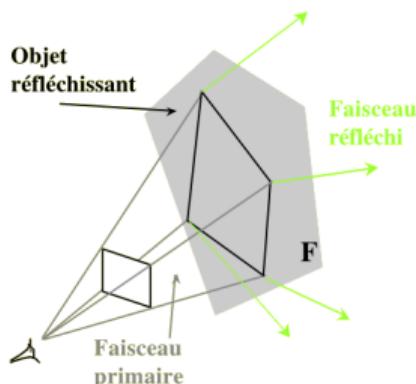


Fig. : Lancer de faisceaux

Lancer de faisceaux vs RT

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

Les ombres sont mieux gérées que sur un lancer stochastique puisque l'on manipule directement des polygones.

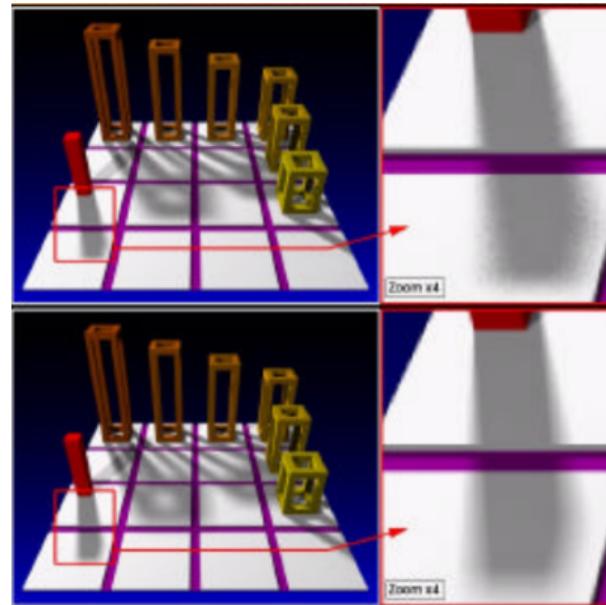


Fig. : Comparaison Faisceaux/RT

Plan intermédiaire

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

1 Introduction

2 Optique

3 Lancer de rayons

4 Lumières

5 Critiques

6 Photométrie

7 Autres méthodes

Matériau physiquement réaliste

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

- la **BRDF** (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*) modélise combien de lumière est réfléchie quand elle entre en contact avec un matériau donné
- la **BTDF** (*Bidirectional Transmittance Distribution Function*) modélise combien est transmise
- la **BSSRDF** (*Bidirectional Surface Scattering Reflectance Distribution Function*) combine les 2

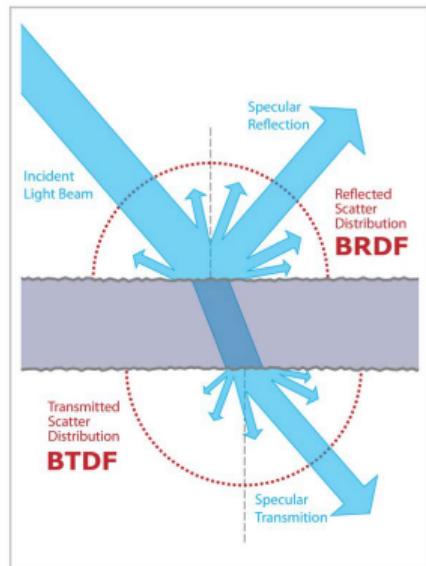


FIG. : RBFs

Opaque (BRDF) vs. Translucide (BSSRDF)

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

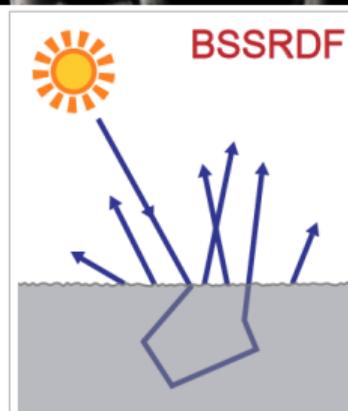
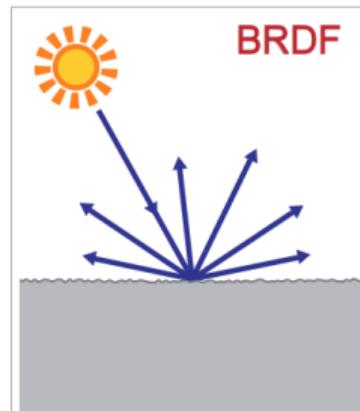
Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes



Paramètres de la BRDF

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

$$BRDF(\lambda, \omega_i, \omega_o, u, v)$$

La quantité de lumière réfléchie dépend de :

- la longueur d'onde de la lumière λ
- la direction 2D de la lumière incidente $\omega_i = (\theta_i, \phi_i)$
- la direction 2D de la lumière ré-émise $\omega_o = (\theta_0, \phi_0)$
- La position spatiale sur la surface (u, v)

Beaucoup de matériaux (ex : le bois) sont constitués de sous-matériaux de densité spatiale variable avec des caractéristiques stochastiques

Invariance spatiale

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

La modulation du résultat de la BRDF par une texture est une « bonne » approximation de la variabilité spatiale.

Trois composantes de la couleur : R, G, B

La variation de la BRDF selon tout le spectre visible est approchée par 3 BRDFs -> 3 BRDFs indépendantes (R, G, B), de la forme : $BRDF(\omega_i, \omega_o)$

Modèles simplifiés de BRDF

- Blinn-Phong : le + simple et d'usage général (plastique)
- Cook-Torrance : meilleur pour le spéculaire (métal)
- Ward : anisotropique (metal brossé, cheveux)
- Oren-Nayar : non-Lambertien (béton, plâtre, Lune)

Lumière incidente

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

Elle ne provient pas uniquement des sources lumineuses, mais aussi de tous les autres objets visibles de l'environnement



Fig. : Arbre

On voit la réflexion de l'arbre sur la voiture parce que la lumière provenant de l'arbre (couleur et intensité) est réfléchie par la voiture vers la caméra



Fig. : Réflexion

Plusieurs directions, dispersion des couleurs

Lumière incidente

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

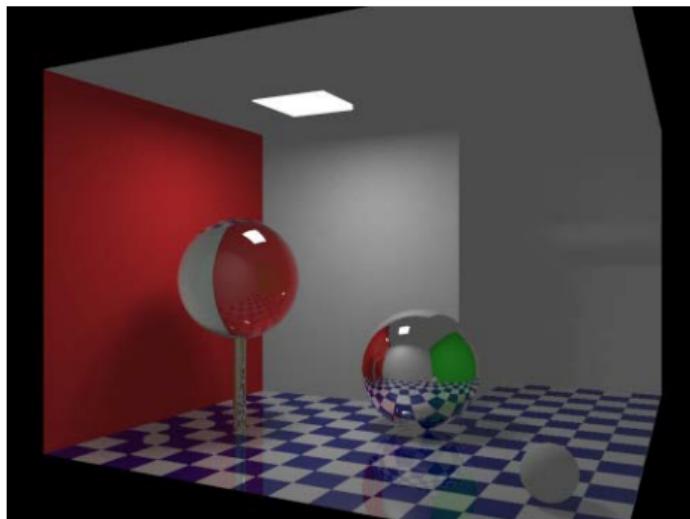


Fig. : Avec la seule source lumineuse

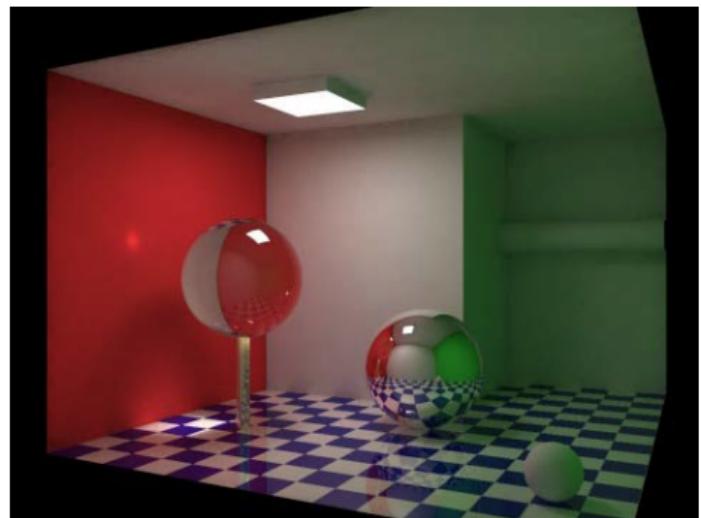


Fig. : Avec la lumière provenant de toutes les directions

Équation d'illumination

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

La quantité de lumière réfléchie dans une seule direction est la somme des quantités de lumière réfléchie dans cette direction par toutes les directions incidentes

$$L_o = \sum_{i \in \text{in}} L_o \text{ venant de } i(\omega_i, \omega_o)$$

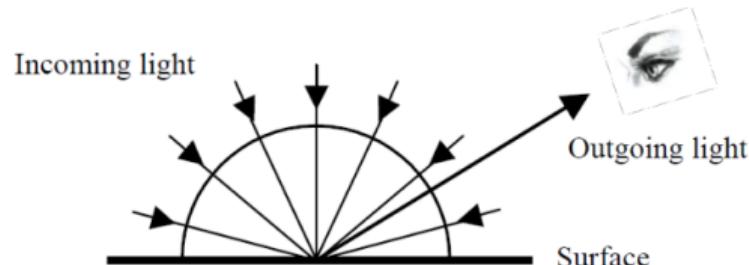


FIG. : Lumière incidente

Intégration

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

Pour chaque pixel, intégrer la BRDF sur toutes les directions incidentes pour chaque point de la surface projetée

$$L_o = \int_{i \in "in"} BRDF(\omega_i, \omega_o) dE_i(\omega_i)$$

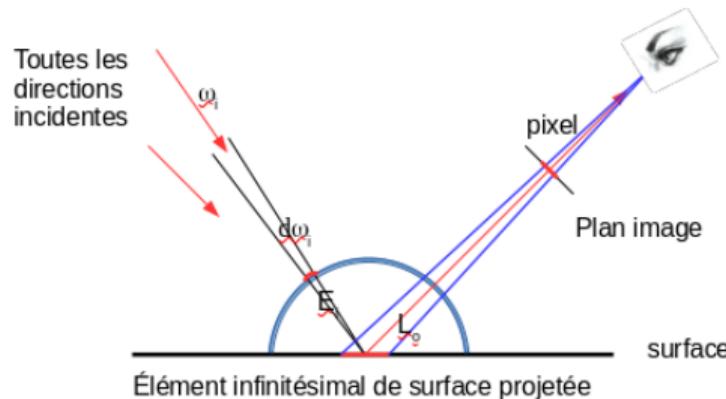


Fig. : Illumination

Rappel : angle solide

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

Un angle solide est un angle en 3D défini par un point et un élément de surface, mesuré par une unité sans dimension : le stéradian (*sr*).

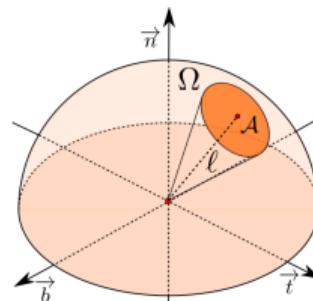


FIG. : Angle solide Ω

Ω est l'angle solide que l'on cherche à calculer. A est l'aire d'une portion d'une sphère de rayon l qu'intersecte le cône sur la figure.

$$\Omega = \frac{A}{l^2}$$

Intensité (radiante) d'une lumière

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

Flux par unité d'angle solide :

$$I(\omega) = \frac{d\Phi}{d\omega}$$

Où Φ est le flux total de la lumière NB : I est une fonction de ω pour l'émission anisotropique

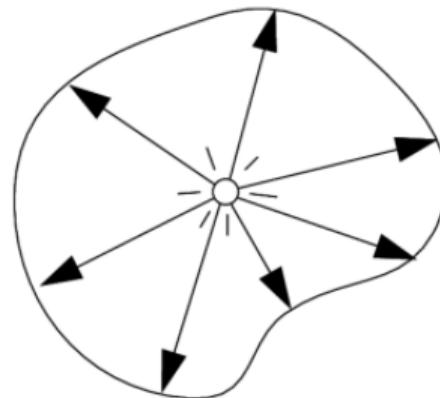


FIG. : Intensité radiante

Relation entre flux et intensité pour une lumière ponctuelle isotrope :

$$\Phi = \int_{\text{sphère}} I d\omega = 4\pi$$

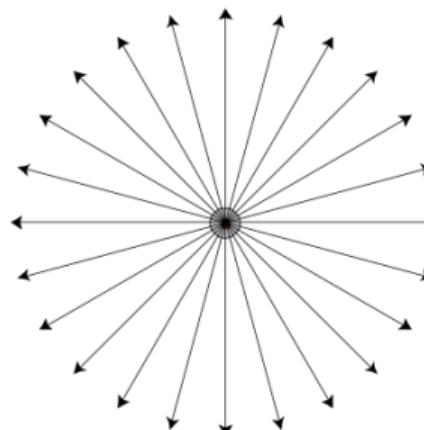


FIG. : Isotropie

Éclairement d'une surface

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

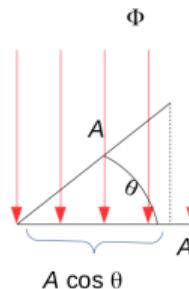
Critiques

Photométrie

Autres méthodes

Flux arrivant par unité d'aire de surface :

$$E = \frac{d\Phi}{dA}$$



$$\begin{aligned} E_{\text{inclinée}} &= \frac{(\frac{A \cos \theta}{A}) \Phi}{A} \\ &= \frac{\Phi \cos \theta}{A} \\ &= E \cos \theta \end{aligned}$$

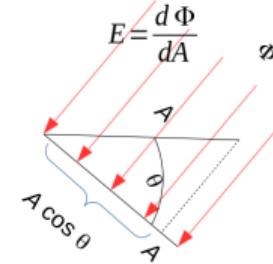


Fig. : Éclairement d'une surface

L'éclairement décroît quand on incline la surface, car moins de lumière l'atteint.

Résumé

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

- Pas de flux d'énergie « par » un point : soit par angle solide, soit par aire (interchangeable)
- Puissance totale de la lumière par unité d'angle solide-> Intensité (radiante) -> notion « intuitive » d'intensité
- Puissance totale de la lumière par unité d'aire -> Éclairement -> notion d'illumination de la surface
- Variation dépendant de la distance à la lumière et de l'angle de la surface -> plus la lumière est loin et plus la surface est inclinée, plus l'angle solide formé par la lumière atteignant le morceau de surface est petit

Plan intermédiaire

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

1 Introduction

2 Optique

3 Lancer de rayons

4 Lumières

5 Critiques

6 Photométrie

7 Autres méthodes

Autres méthodes

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

- suivi de Lumière (*Light Tracing*)
- suivi inverse de chemin (*Path Tracing*)
- suivi inverse avec BRDF (*BRDF Path Tracing*)
- lancer de rayon bidirectionnel (*Bidirectional Ray Tracing*)
- Photon Maps

Suivi de Lumière

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

Émission et suivi de photons

Pour chaque source, choisir un nombre de directions pour échantillonner l'hémisphère (sphère) et émettre un photon dans chaque direction.

Suivre ce photon (par lancer de rayon), jusqu'à intersection avec un objet (ou le film de la caméra)

- si intersection : absorption, réflexion ou transmission ?
- si absorption, fin du processus pour ce photon
- si réflexion ou transmission ou dispersion par la BRDF, créer un nouveau rayon et envoyer le photon dans cette direction.

Continuer le rebond des photons dans la scène, (avec fin si absorption). Les photons qui passent par l'ouverture de la caméra et arrivent au film contribuent à l'illumination de la scène (il y en a très peu).

Suivi inverse de chemin

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

C'est comme le lancer de rayon : on suit le chemin inverse du rayon depuis la caméra par le pixel. On termine le processus quand le rayon touche la source lumineuse (éventuellement après plusieurs réflexions et transmissions) : on a seulement la direction d'arrivée à la source.

On émet alors un photon dans cette direction et on suit les rebonds sur les objets pour voir s'il est absorbé avant d'arriver au film. En fait on émet beaucoup de photons dans cette direction puisqu'une proportion est absorbée résultant en une couleur et intensité de lumière touchant le pixel.

Suivi inverse avec BRDF

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

La plupart des rayons depuis la caméra n'arrivent jamais à une source lumineuse parce que les rayons réfléchis et transmis ne représentent pas correctement le chemin inverse des photons

En fait, en un point donné de la surface d'un objet, les photons bombardent ce point depuis toutes les directions de l'hémisphère. Donc on ne doit pas relancer un rayon (réfléchi ou transmis) mais des rayons dans toutes les directions de l'hémisphère pour récupérer les photons qui arrivent. C'est coûteux et infaisable (coût exponentiel).

Lancer de rayon bidirectionnel

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

Combiner *Light Tracing* et *Path Tracing* :

- 1 éclairer les objets (avec des photons issus de la source) et enregistrer leur information d'illumination dans une carte de lumière (comme une carte de texture). Cela permet les rebonds des photons pour les ombres, dispersions, etc.
- 2 en faisant un lancer de rayon, utiliser la carte des lumières en chaque point pour estimer la contribution indirecte de lumière depuis toutes les directions de l'hémisphère

NB : on échantillonne les plus importantes directions de l'hémisphère, on envoie toujours des rayons directement vers les sources (pour l'illumination directe) ainsi que dans les directions réfléchies et transmises.

Photon Maps

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

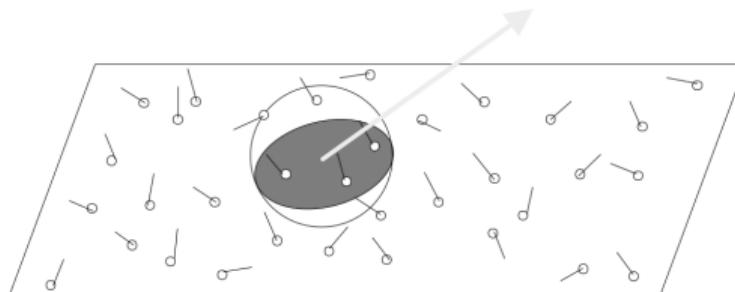
Photométrie

Autres méthodes

(H. Wann Jensen 1996)

L'algorithme se déroule en 2 passes :

- 1 on tire des photons des sources lumineuses (vers les objets). Quand une surface est intersectée l'intersection et la direction incidente sont stockés. Un tirage aléatoire décide ensuite de continuer (réflexion classique, avec BRDF), d'absorber ce photon ou de transmettre.
- 2 lancer de rayon depuis la caméra. Lorsqu'une surface est touchés, on effectue une recherche des k-photons les plus proches. Les caustiques sont prises en compte dans l'équation de rendu.



Exemple

M1 MGSI -
Illumination

R. Raffin

Introduction

Optique

Lancer de rayons

Lumières

Critiques

Photométrie

Autres méthodes

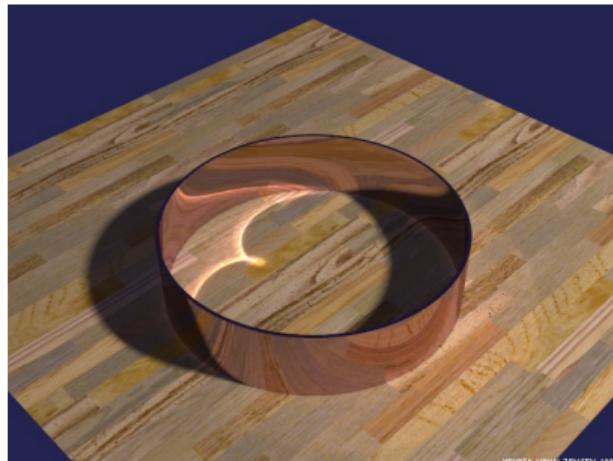
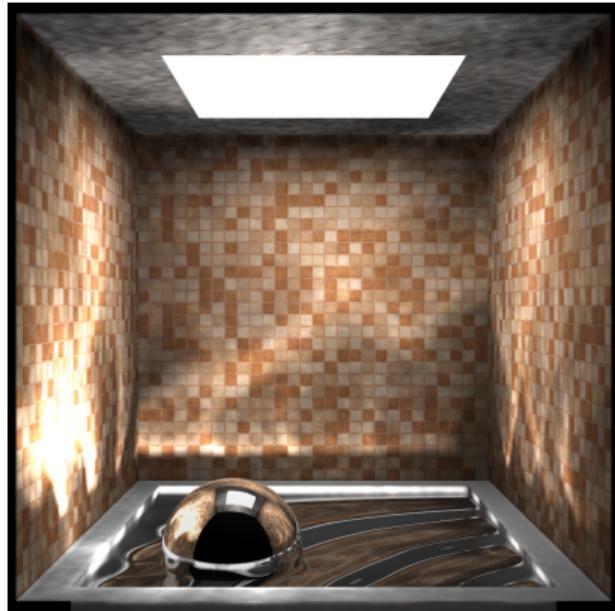


FIG. : Photon Maps

Préambule

Les intersections sont un problème crucial des lancers de rayon et moteurs d'illumination globale.

Il faut pouvoir accélérer les calculs en diminuant le nombre.

Les intersections amène également leurs lots d'imprécision numérique : un point d'intersection entre 2 droites peut n'appartenir à aucune, de la même façon l'intersection d'une droite et d'un plan peut ne pas appartenir au plan.

Cela peut poser également des problèmes lorsque l'intersection se situe « sous » le plan, pour le rayon réfléchi...

B-Rep

Ces objets sont représentés par le bords (facettes) Le plus simple étant la facette plane triangulaire.

Les intersections se font avec des plans (d'où le problème des facettes non-triangulaires). Des configurations sont à prendre en compte (arêtes, sommets) pour le calcul des normales. Les ensemble de faces doivent être filtrés (faces très petites ou étirées, faces recouvrantes, éléments pendants...).

Ces objets sont complexes car nécessitent le chargement de chaque primitive pour l'intersection.

Surfaces continues

Si le degré des équations est faible (<5, Cardan, Lagrange) les solutions peuvent être trouvées « facilement ».

Les surfaces B-spline ou NURBS sont donc intéressantes car de degré peu élevé pour des courbures complexes.

Les surfaces algébriques se limitent souvent au degré 2 (sphères, cônes, tores).

Exemple : surface de carreaux de Bézier cubiques, résolution d'une équation de degré 3.

Plusieurs solutions sont possibles, en résolvant le système d'équations, par dichotomie en (u, v) sur les paramètres.

CSG

Comme vu en TD, chaque objet est responsable de sa méthode d'appartenance, donc d'union, intersection...

C'est donc pratique pour le lancer de rayon, chaque objet peut être pris dans son repère d'origine, et on peut gérer des constructions compliquées grâce aux opérateurs et aux transformations.

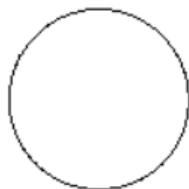
Structures accélératrices

Pour accélérer les calculs, 2 pistes ici : faire le calcul d'intersections avec des primitives simples et maîtrisées (les volumes englobants), utiliser un espace discret plutôt que continu (partition de l'espace).

Ces approches nécessitent une préparation de la scène et donc un temps de calcul initial plus élevé mais le calcul d'intersection sera moindre.

Volumes englobants

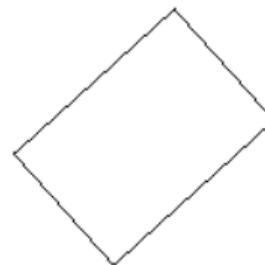
Ces calculs sont également utilisés dans les calculs de collision (simulation physique).



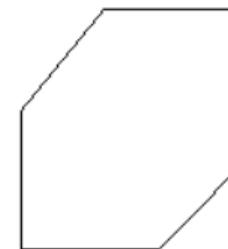
Sphère



AABB
(Axis Aligned Bounding Box)



OBB
(Oriented Bounding Box)



K-dop ($k=3$ ici)
(discrete oriented polytope)

Intersection un peu plus lourde mais meilleure approximation
des objets englobés

Fig. : Volumes englobants (F. Aubert)

Volumes englobants

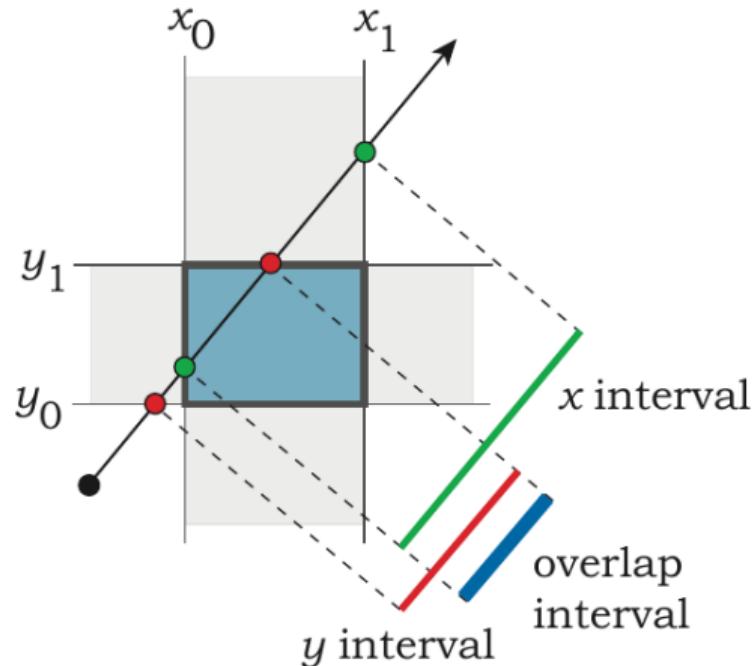
Une première façon de faire : les AABB (axis-aligned bounding box) ou volumes alignés sur les axes. Facile à construire ! On définit un AABB à l'aide de deux de ses sommets : celui ayant les plus petites composantes x , y et z ($pMin$) et celui ayant les plus grandes composantes ($pMax$).



Fig. : AABB

Intersections AABB

On effectue l'intersection avec les 6 plans du pavé droit AABB, on détermine ensuite si ces intersections sont utiles.



Oriented AABB

D'autres découpage autour de l'objet sont possibles, pour essayer de diminuer le ratio *espace utile/espace occupé*.

Les OABB sont une solutions utilisant les axes principaux de l'objet pour orienter un pavé droit (ACP et trois 1ères composantes).

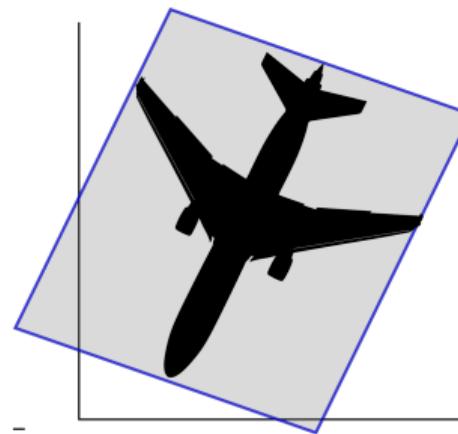


Fig. : Oriented AABB

Spherical BB

Ou une sphère (dont l'avantage et le calcul d'intersection rapide, algébriquement ou par dichotomie).



Fig. : Spherical BB

Adapted BB

On peut également essayer d'avoir un nombre de faces planes minimales, qui augmente le calcul d'intersection mais reste une meilleure approximation. De nombreuses algorithmes sont alors possibles...

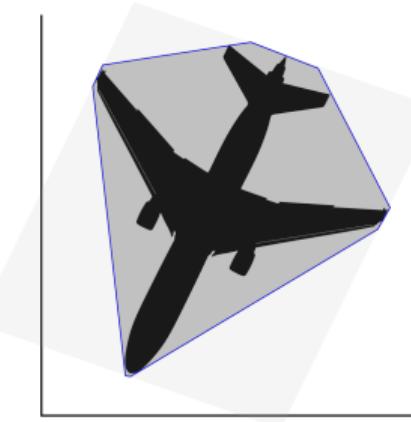


Fig. : Adapted BB

Et ce n'est pas tout !

Une fois l'intersection avec le volume englobant vérifiée, il faut descendre d'un cran vers l'objet.

Plusieurs méthodes :

- calculer avec l'objet (encore coûteux),
- trouver un polytope plus proche,
- découper l'objet en volumes englobants.

BVH - *Bounding Volume Hierarchy*

Le découpage en volumes englobants hiérarchiques semble être une bonne solution : autant appliquer cette méthode pour toute la scène !

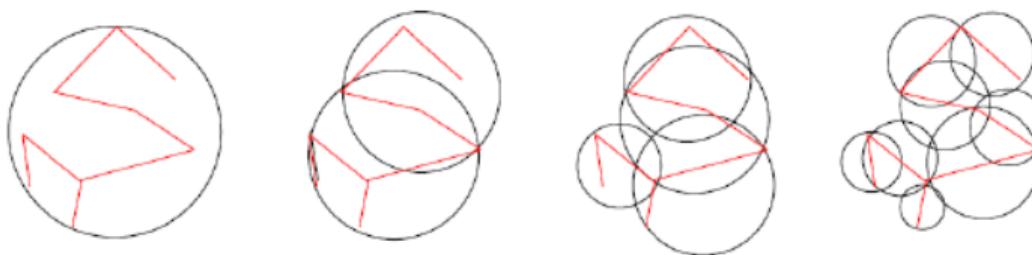


FIG. : BVH de sphères - F. Aubert

BVH

Le BVH est une technique d'accélération pour le calcul d'intersection reposant sur le partitionnement des formes géométriques en une hiérarchie d'ensembles disjoints.

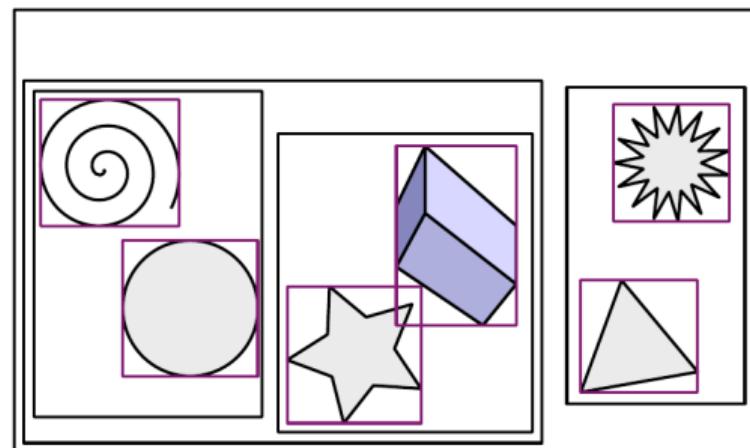


Fig. : BVH - O. Godin

BVH - construction

Un BVH est un arbre binaire, chaque feuille est une forme géométrique, chaque nœud est le volume englobant du sous-arbre de ce nœud.

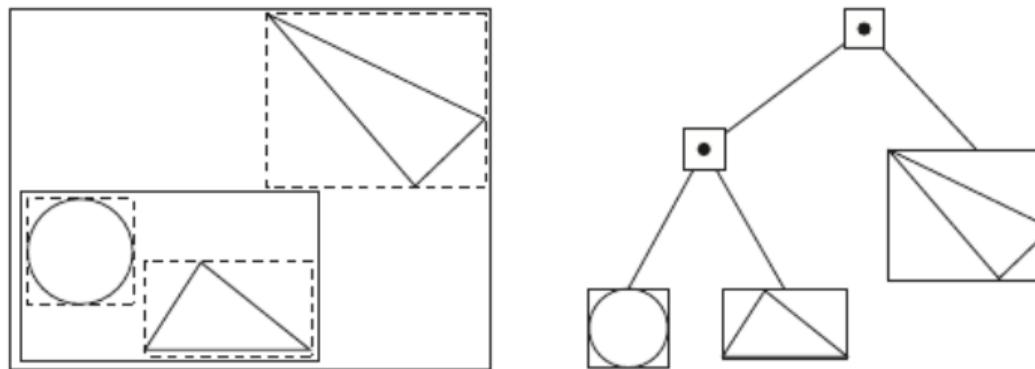


Fig. : Construction - O. Godin

Calcul

Le calcul d'intersection d'un rayon avec l'arbre se fait ensuite récursivement sur les nœuds.

Si il n'y a pas d'intersection avec un nœud, le sous-arbre est éliminé (puisque le nœud est le volume englobant de ce sous-arbre).

Comme une forme n'apparaît qu'une fois dans l'arbre, cela élimine des objets entiers d'un coup.

Cette structure est compacte : si n objets occupent la scène, il y aura n feuilles et $n - 1$ nœuds.

Comment découper un objet ?

le BVH peut poser cette question pour découper un objet en sous-parties. La découpe peut se faire sur la taille de l'espace englobant, par une segmentation, par plus grandes dimensions...

Une autre méthode est l'utilisation d'un découpage régulier : *octree* ou *kd-tree* .

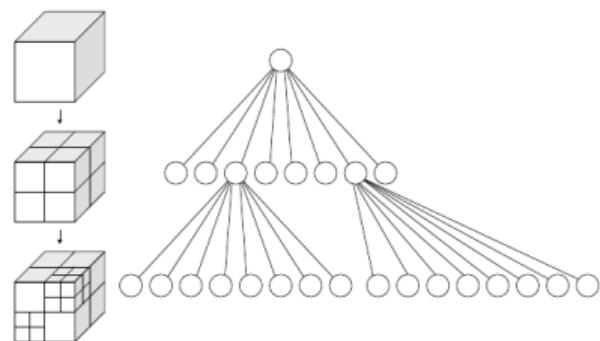


FIG. : Octree

kd-tree

Classiquement dans les *octree* l'espace est divisé selon les 3 axes, de manière régulière et homogène.

Avec les *kd-trees*, les plans de séparation sont perpendiculaires à un des axes du repère, à la fois (on passe de x à y puis z , puis retour à x , y ...). Cette particularité rend leur construction plus facile et leur parcours plus efficace.

Afin d'avoir un arbre équilibré, le plan inséré dans l'arbre à chaque étape est celui du point qui a la coordonnée médiane dans la direction considérée.

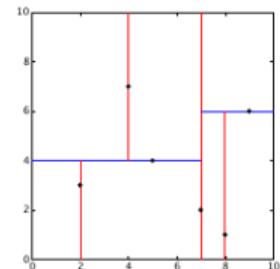


FIG. : *kd-tree*

Partition de l'espace

Une autre solution : évoluer dans un espace discret. Cela réduit fortement les calculs (voisinage, pas à pas)... et la précision

Le rayon « avance » de cube en cube (lancer de rayon incrémental). Si un objet se trouve dans un cube on effectue l'intersection avec l'objet ou on augmente en résolution (éventuellement hiérarchiquement).

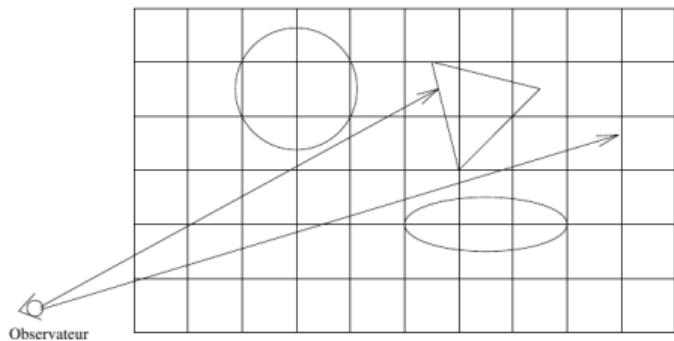


FIG. : Partition de l'espace

Principal problème : l'énumération des objets dans les cubes homogènes d'un espace uniforme. Des objets peuvent appartenir à plusieurs cubes et c'est moins efficace que le BVH.