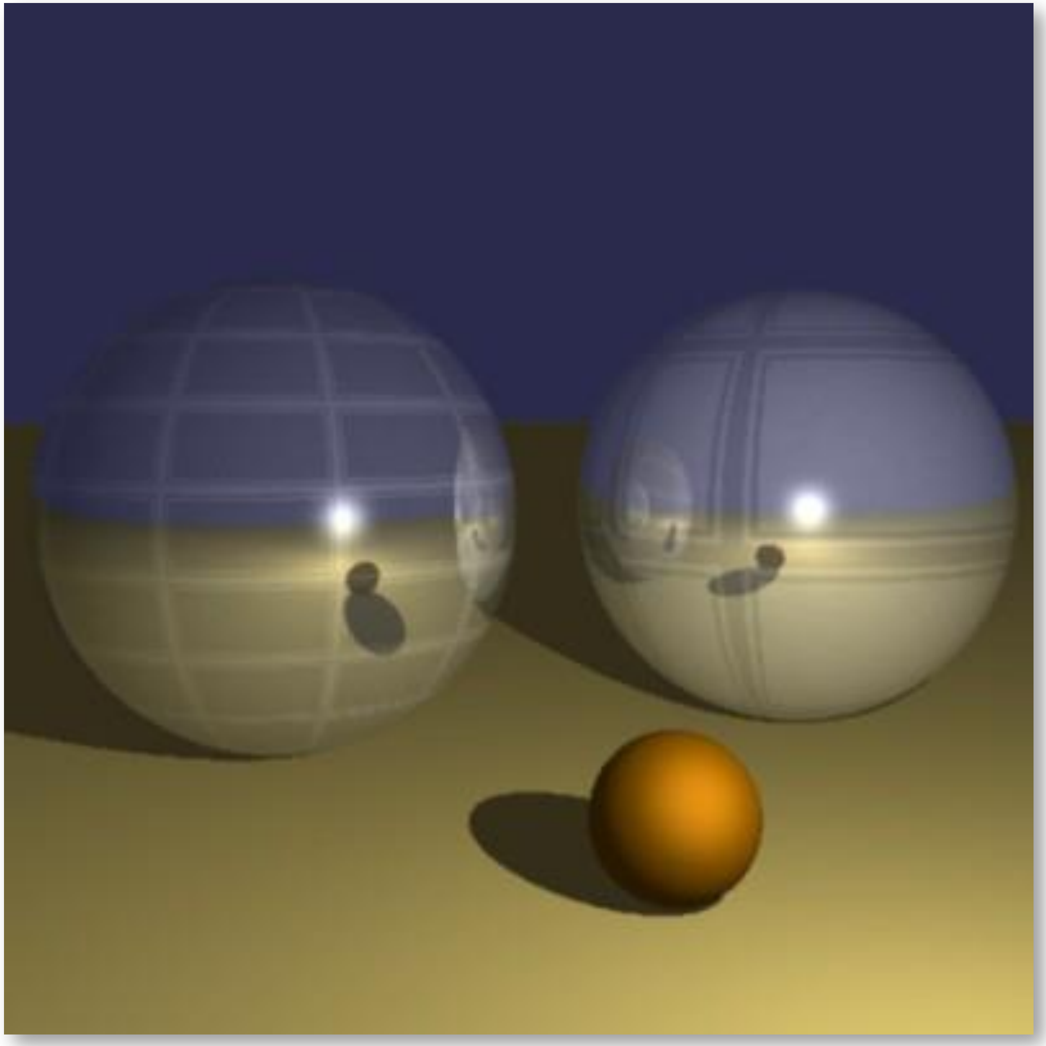
# Projet : Lancer de rayons



# Projet

**Requis**

- Path-tracing basique
- Ombrage basique
- Lumière étendues/Ombres douces
- Réflexions
- Maillages
- Réfraction ~10/20
- Kd-tree pour l'intersection rayon triangle

**Au choix, effets supplémentaires :**

- Profondeur de champs
- Textures
- Cartes de normales
- Photon mapping etc…

# Rendus

## 2 rendu intermédiaires

- 9 novembre
- 7 décembre

## Rendu final en janvier

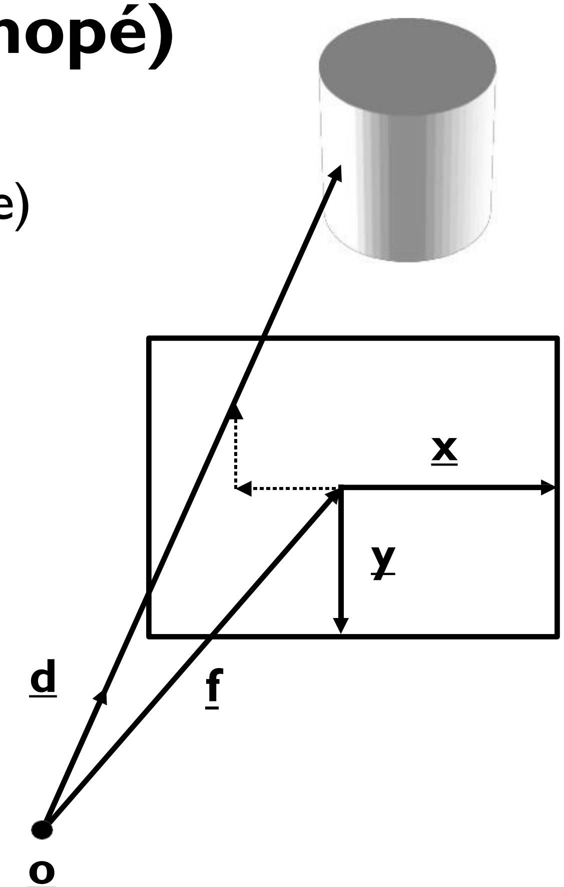
# Génération des rayons primaires

## Un rayon : $\underline{r}(t) = \underline{o} + t\ \underline{d}$

- origine $\underline{o}=(o\underline{x}, o\underline{y}, o\underline{z})$, direction $\underline{d}=(d\underline{x}, d\underline{y}, d\underline{z})$ avec $||\underline{d}||=1$

## Hypothèse : "Pinhole camera" (sténopé)

- $\underline{o}$ : origine (point de vue)
- $\underline{f}$ : axe optique (vecteur vers le centre de l'image)
- $\underline{x}$, $\underline{y}$ : axes sur l'image
- width, height : résolution de l'image




```
for(i=0; i<width; i++)
  for(j=0; j<height; j++)
  {
    d = f + 2(i/width  - 0.5)x
          + 2(j/height - 0.5)y;
    d = d/|d|; // normalisation
    color = ray_tracing(o, d);
    write_pixel(i,j,color);
  }
```

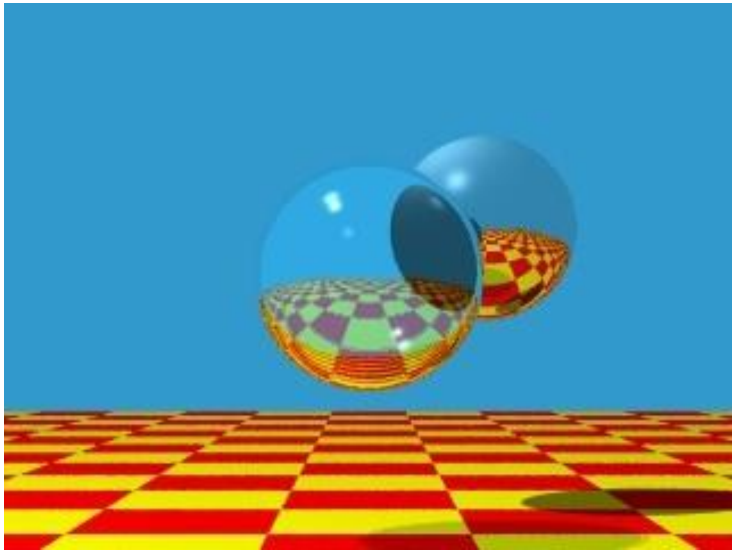
# Extension du modèle

[Turner Whitted 1980]

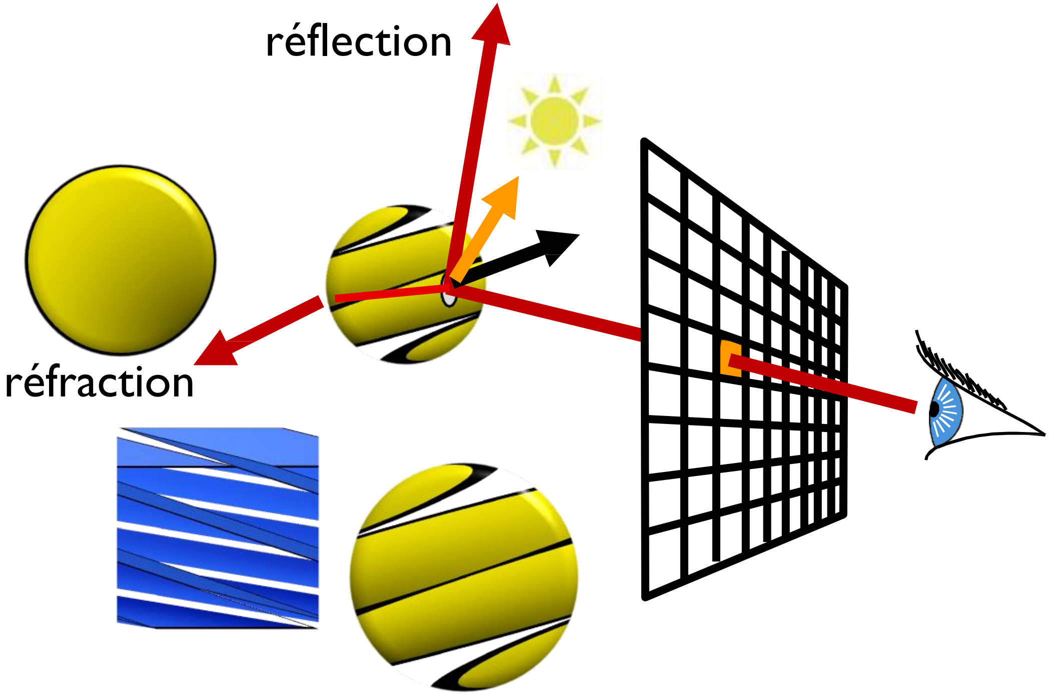
Trois nouveaux rayons sont générés :

- un rayon **réfracté***,
- un rayon **réfléchi***,
- un rayon **d'ombre**

$\Longrightarrow$ **lancer de rayon récursif**

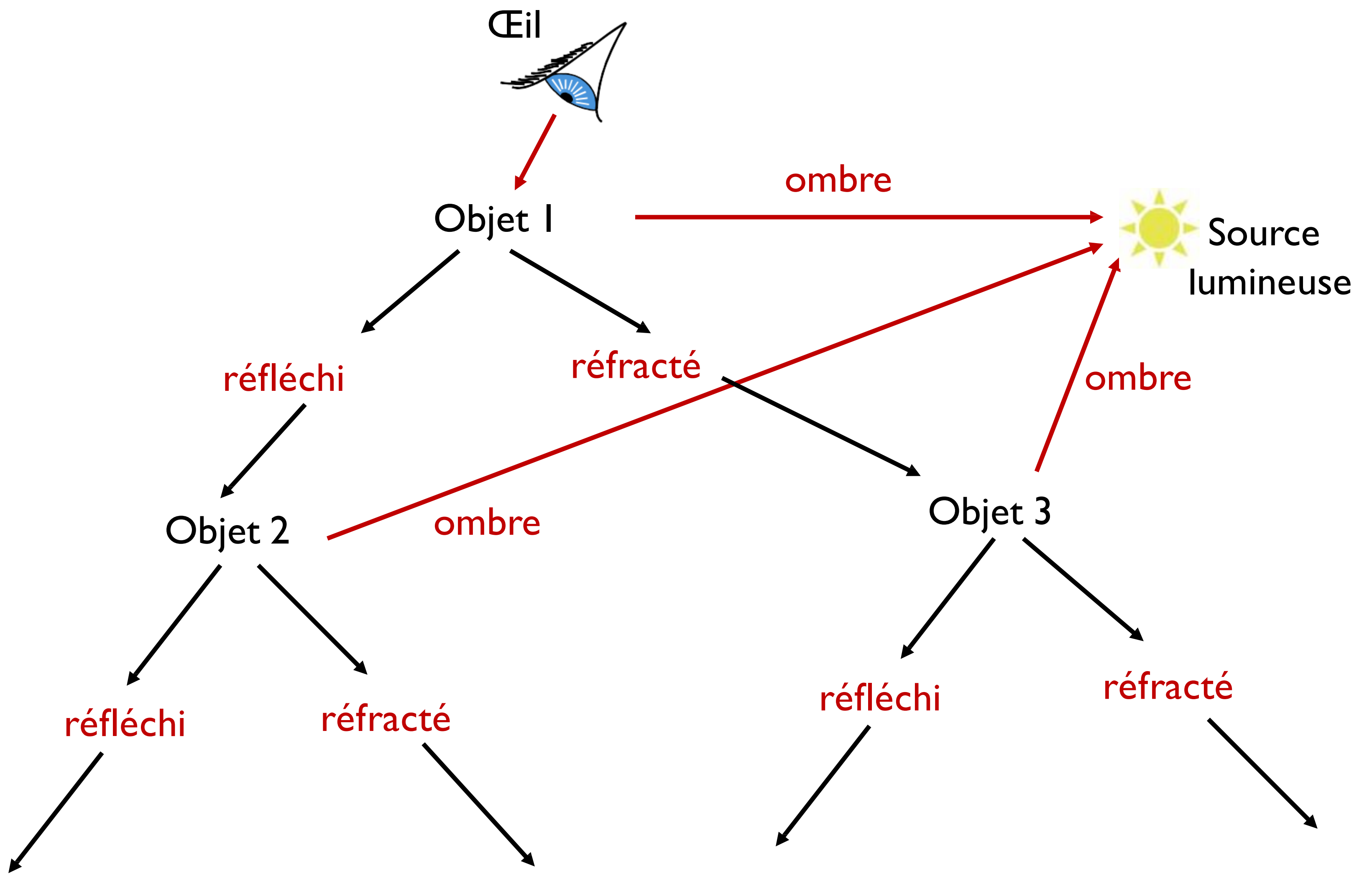


En 1980, 74 min de calcul.

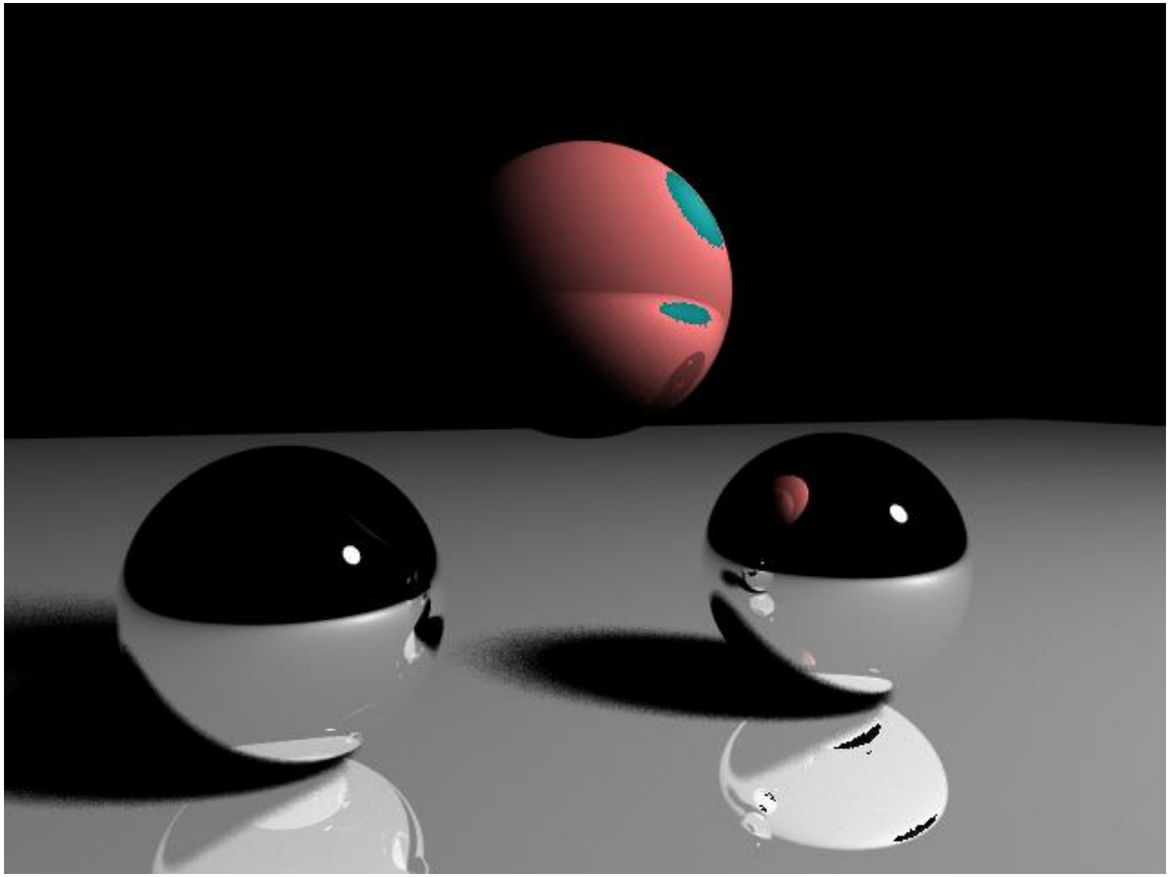



(*) formules réflexion et réfraction

# L’arbre des rayons

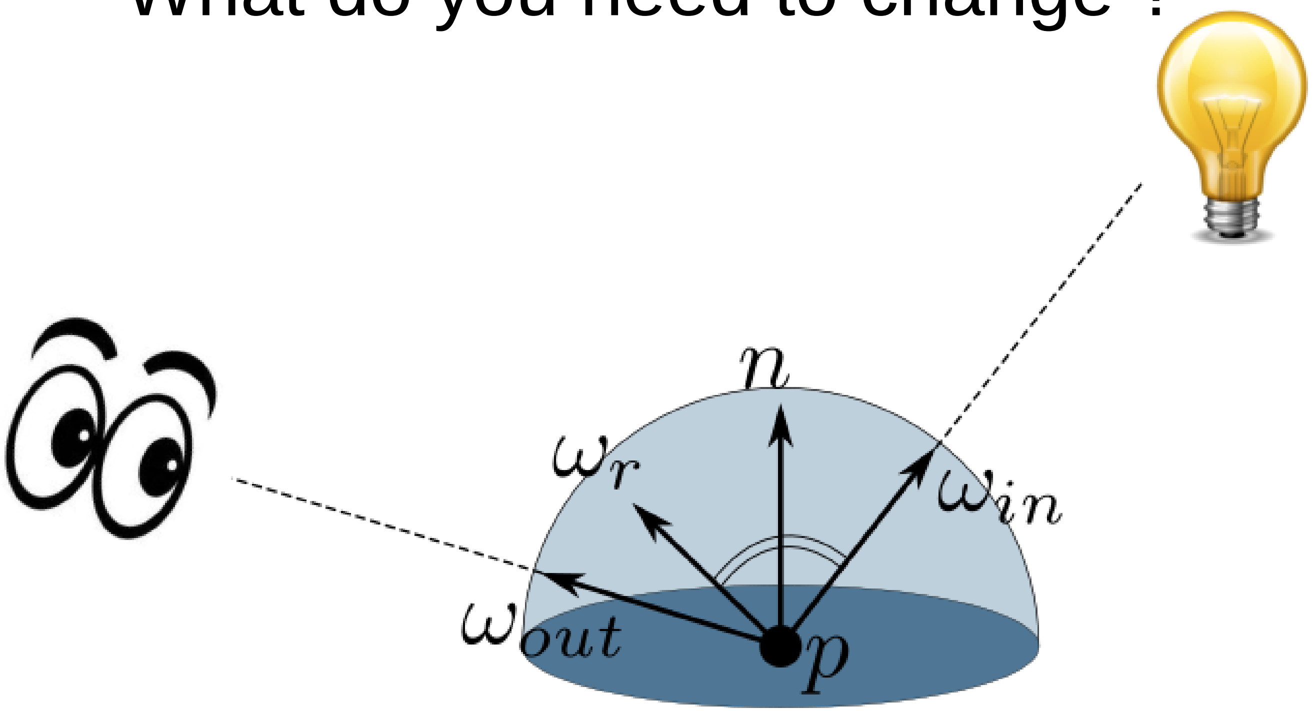


# Reflections



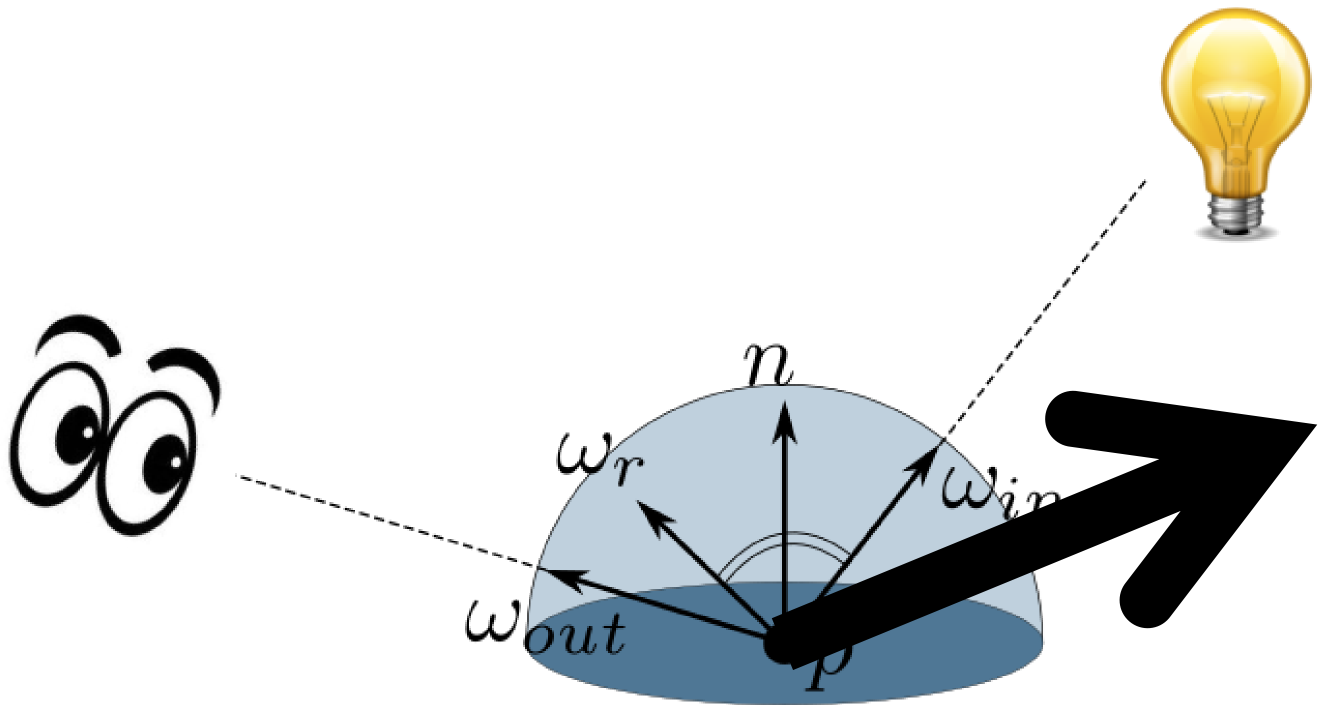
# Reflections

What do you need to change ?



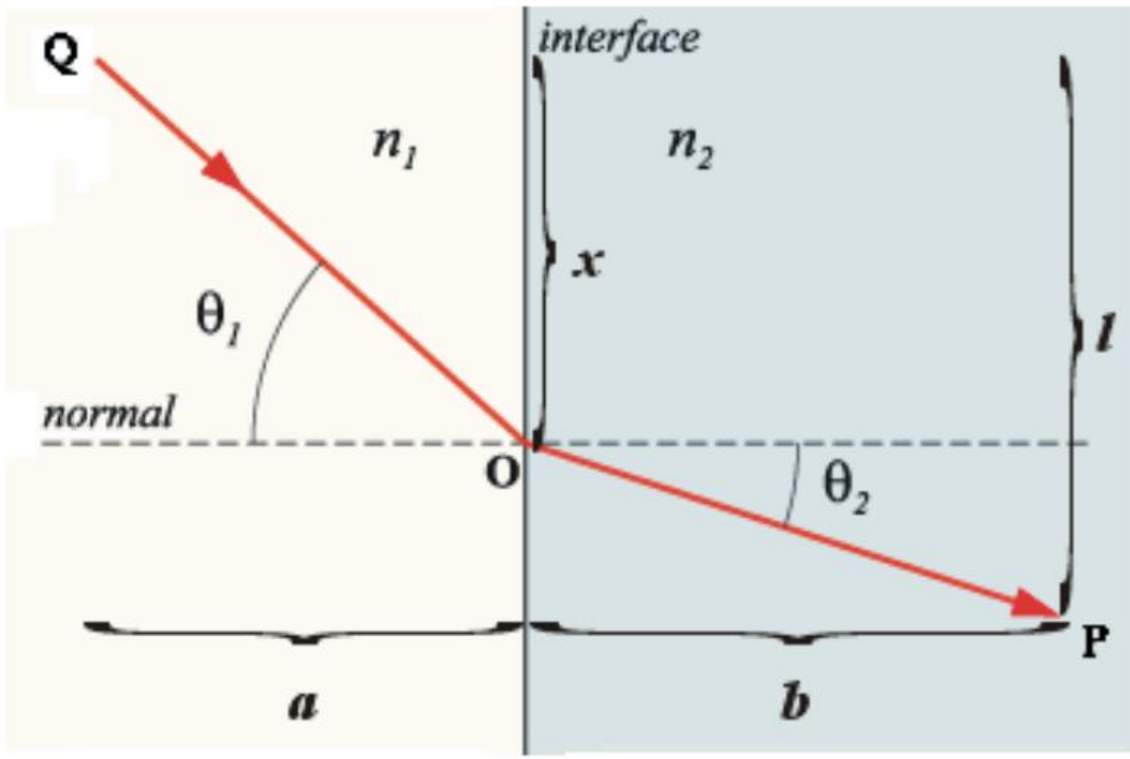

$$L(p,\omega_{out}) = L_e(p,\omega_{out}) + \int_{\omega_{in}\in\mathcal{H}(p,n)} L(p,\omega_{in}) * brdf(p,\omega_{in},\omega_{out}).\underbrace{(n\cdot\omega_{in})}_{\text{produit scalaire}}.d\omega_{in}$$

# Reflections



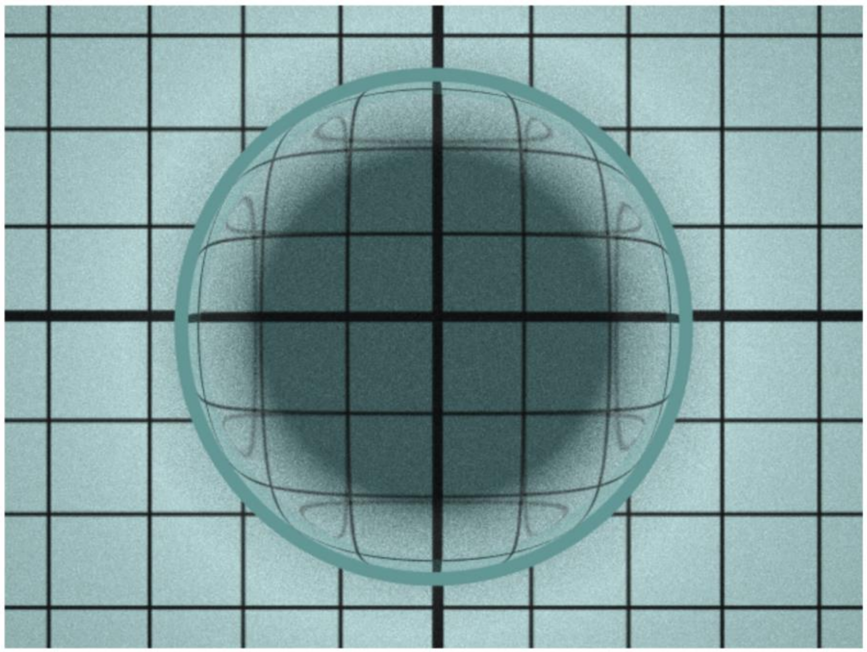

$$L(p,\omega_{out}) = L_e(p,\omega_{out}) + \int_{\omega_{in}\in\mathcal{H}(p,n)} L(p,\omega_{in}) * brdf(p,\omega_{in},\omega_{out}).\underbrace{(n\cdot\omega_{in})}_{\text{produit scalaire}}.d\omega_{in}$$

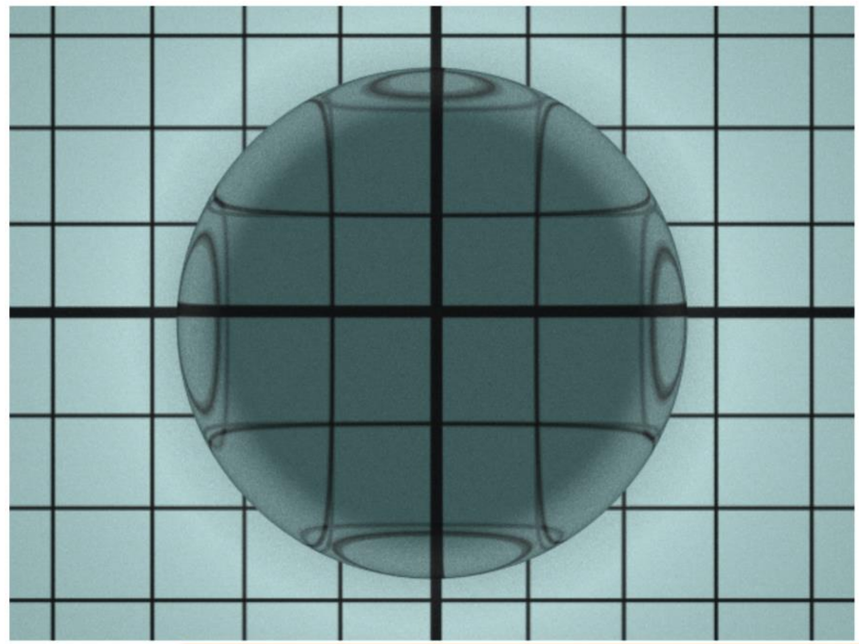
# Refractions




Law of sines

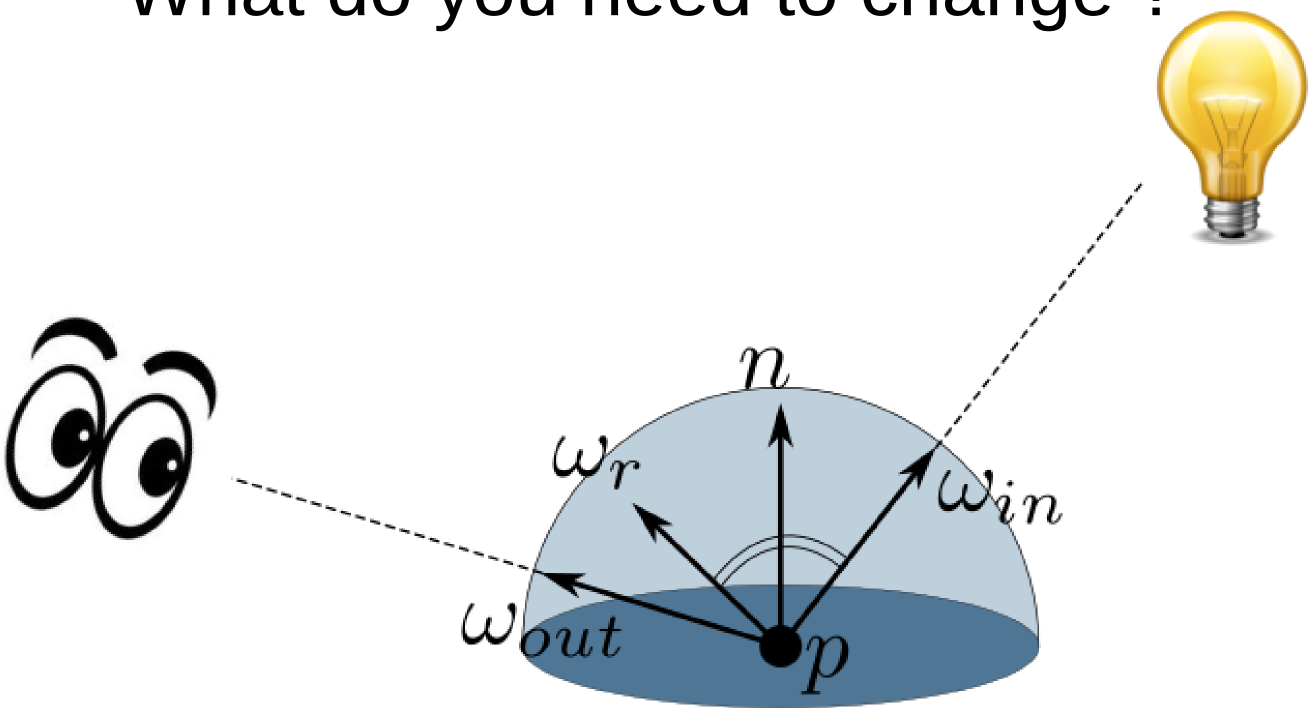
# Refractions





# Refractions

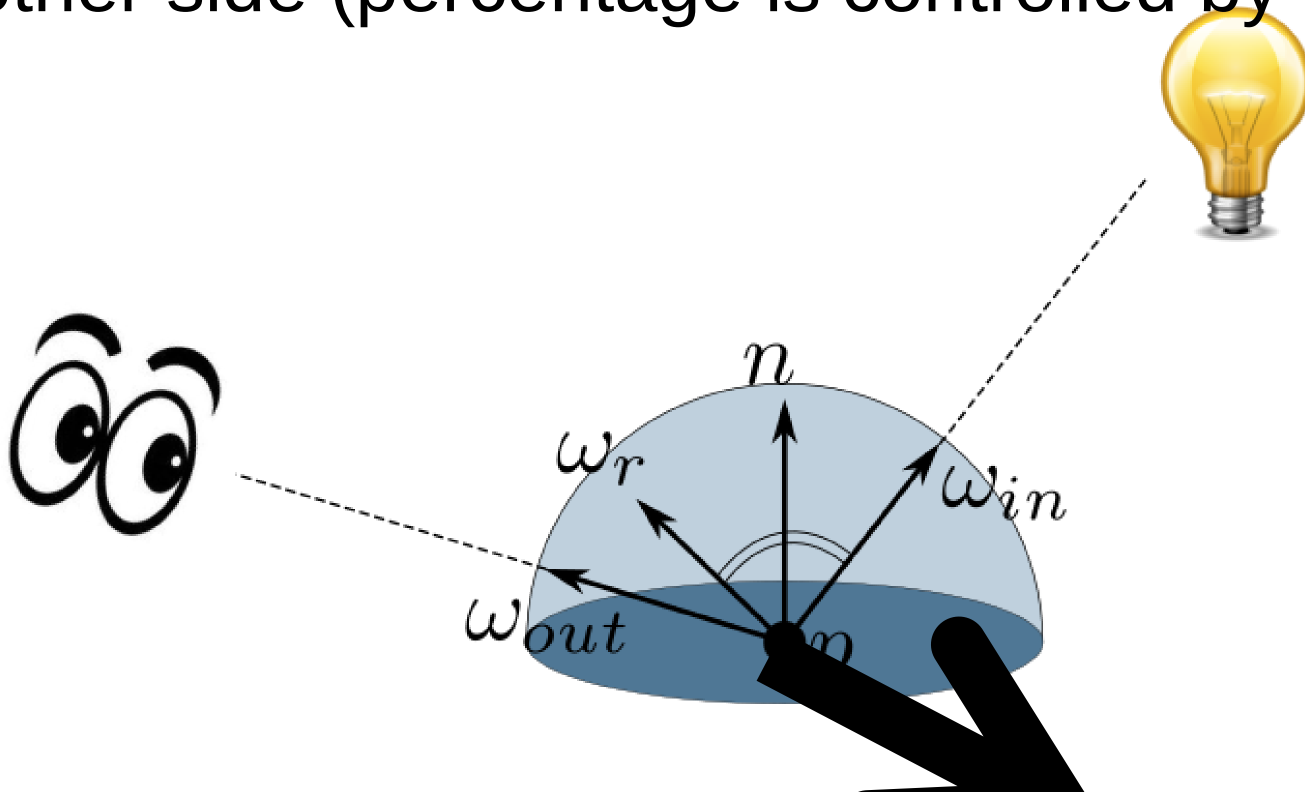
What do you need to change ?




$$L(p,\omega_{out}) = L_e(p,\omega_{out}) + \int_{\omega_{in}\in\mathcal{H}(p,n)} L(p,\omega_{in}) * brdf(p,\omega_{in},\omega_{out}).\underbrace{(n\cdot\omega_{in})}_{\text{produit scalaire}}.d\omega_{in}$$

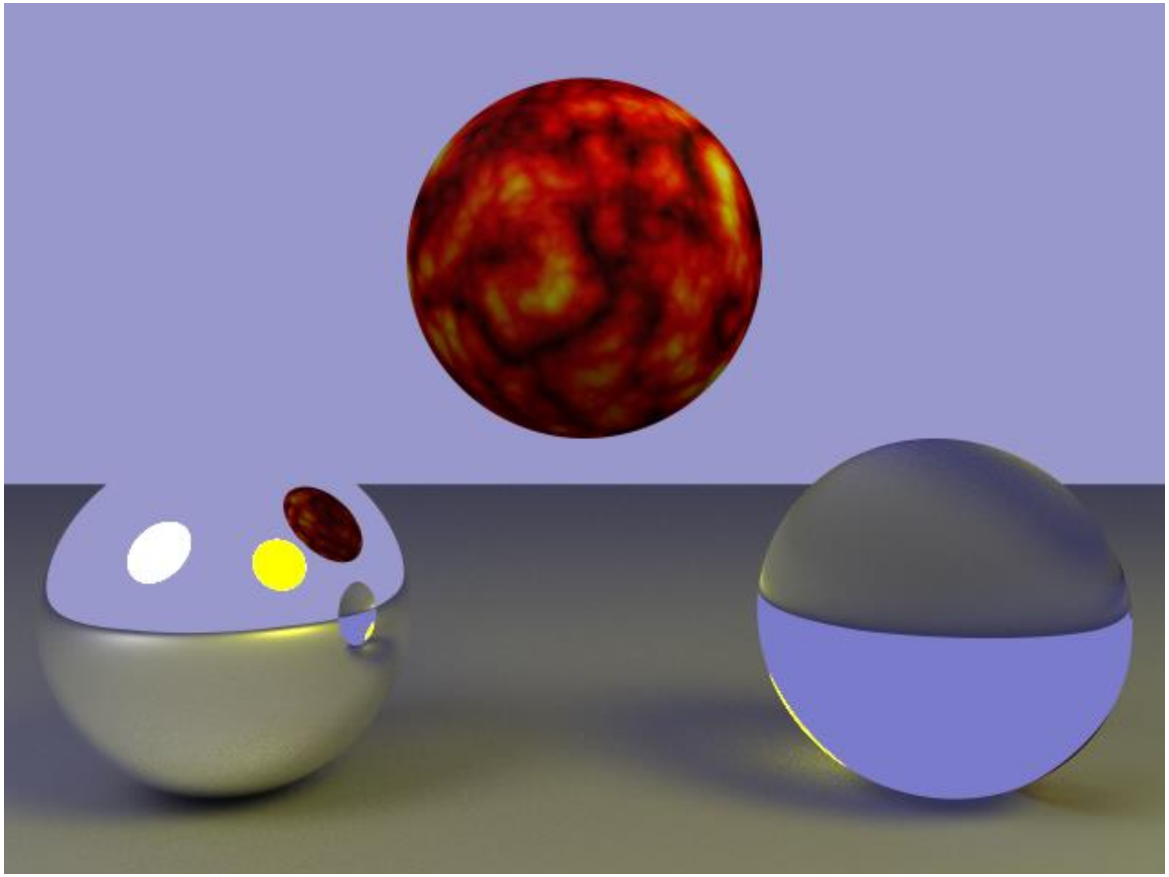
# Refractions

on the other side (percentage is controlled by the transp




$$L(p,\omega_{out}) = L_e(p,\omega_{out}) + \int_{\omega_{in}\in\mathcal{H}(p,n)} L(p,\omega_{in}) * brdf(p,\omega_{in},\omega_{out}). \underbrace{(n\cdot\omega_{in})}_{\text{produit scalaire}} .d\omega_{in}$$

# Refractions



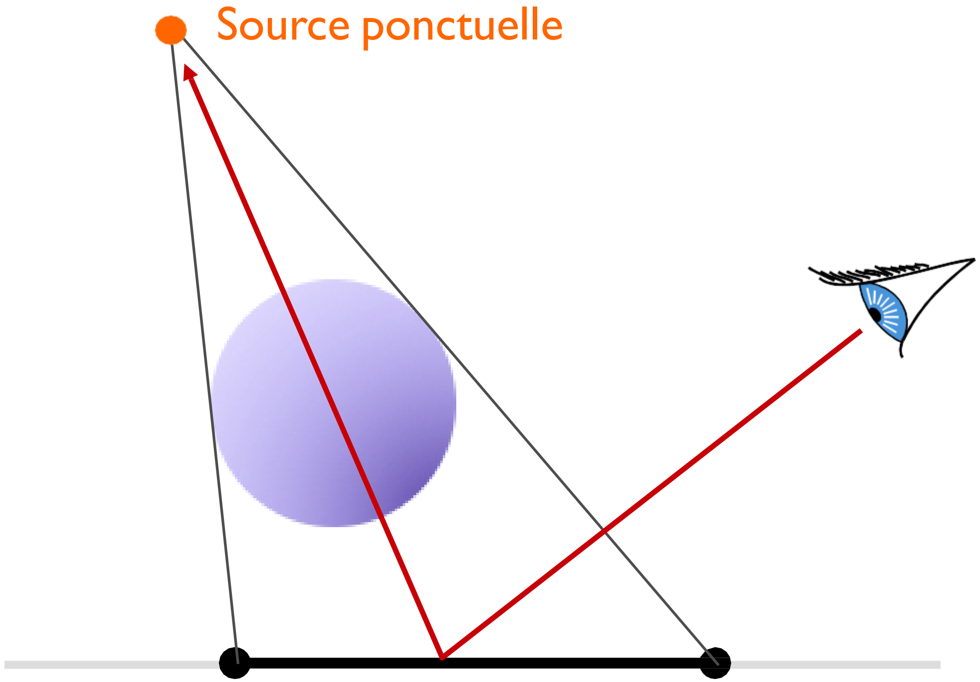
Create caustics

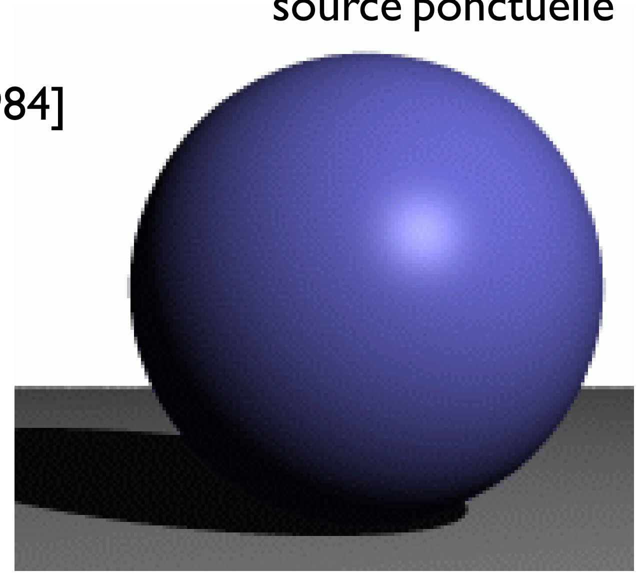
# Encore plus de rayons

[Cook et al.1984]

## Ombres douces

plusieurs rayons par source
de lumière étendue



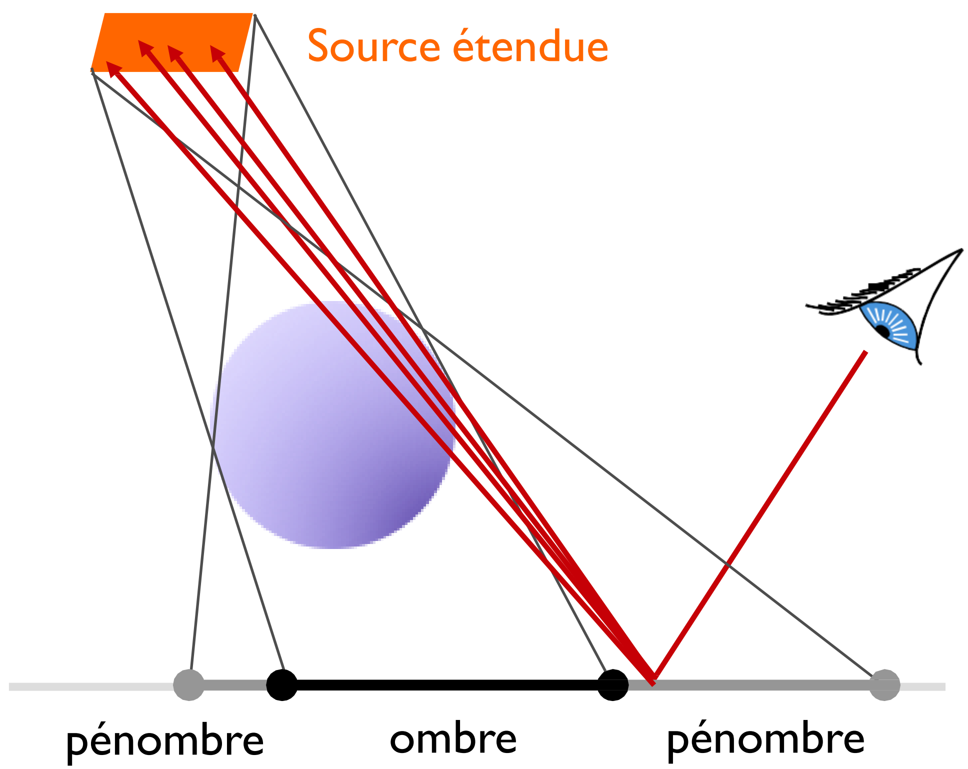


source ponctuelle

# Encore plus de rayons

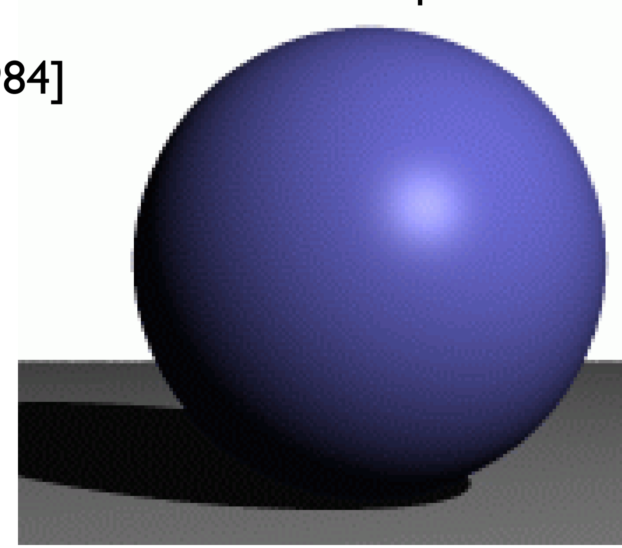
[Cook et al.1984]

## Ombres douces

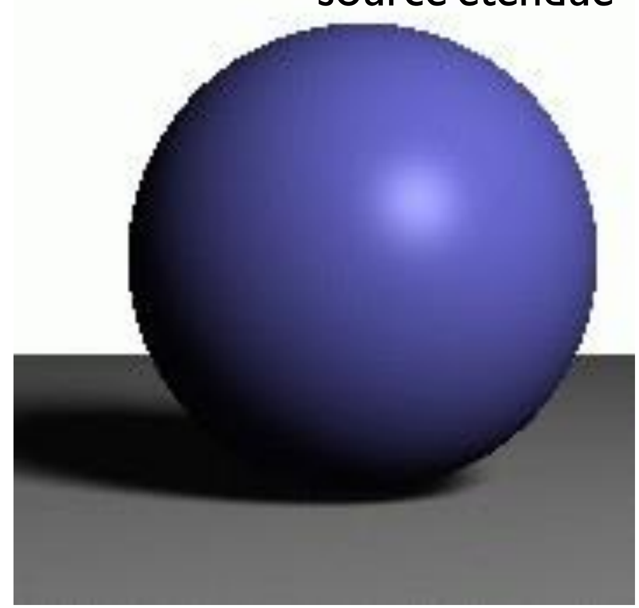
plusieurs rayons par source
de lumière étendue



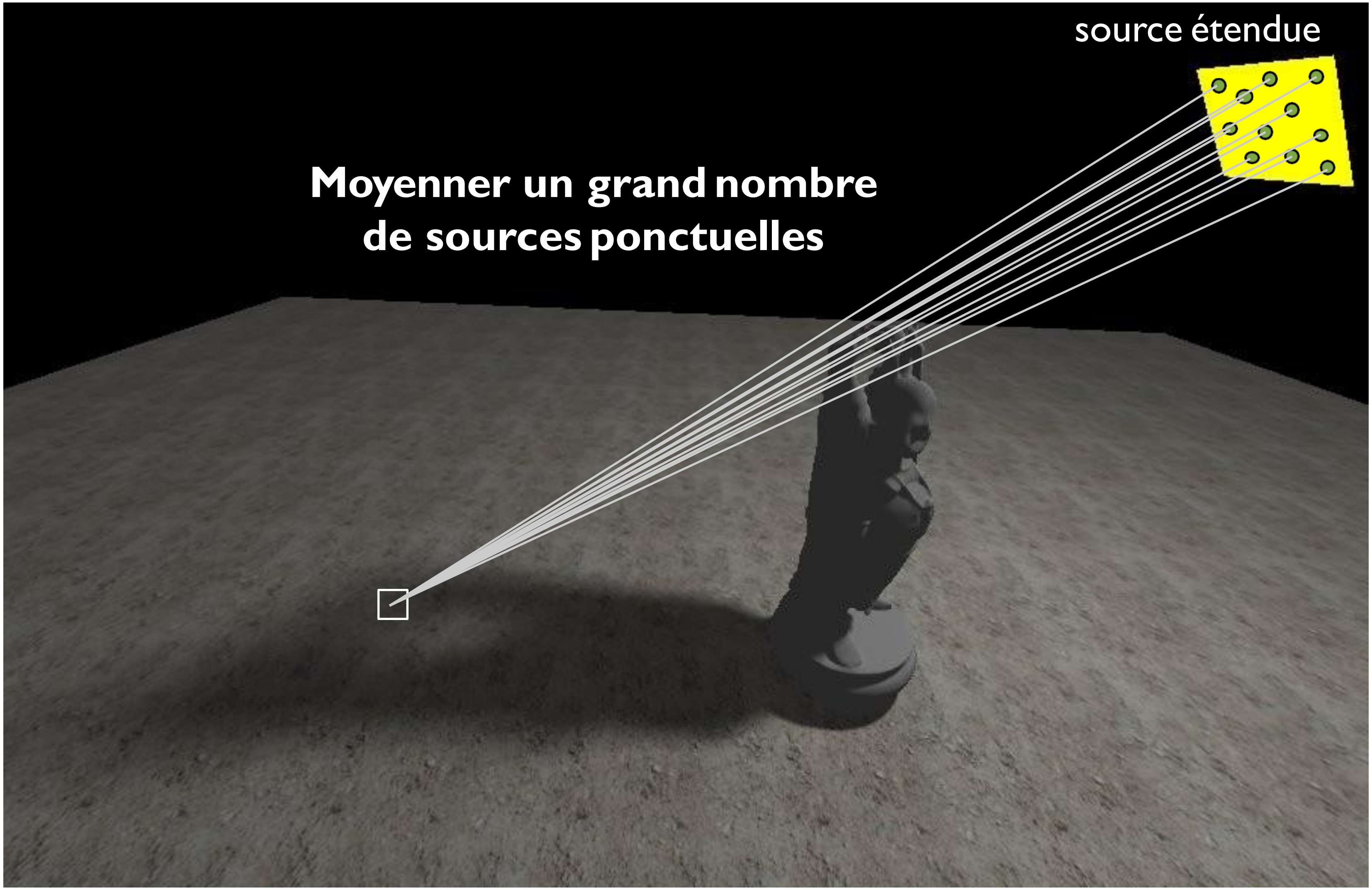

source ponctuelle



source étendue



# Ombres douces

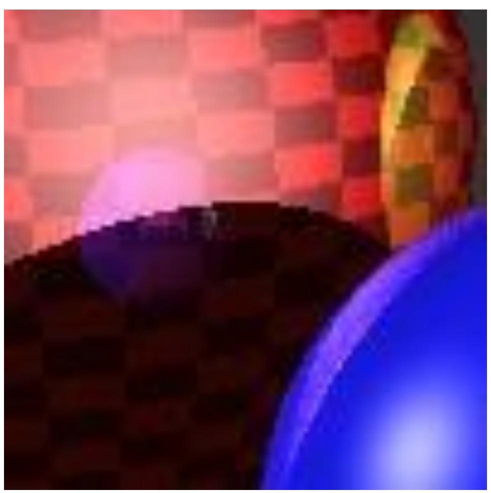


# Encore plus de rayons

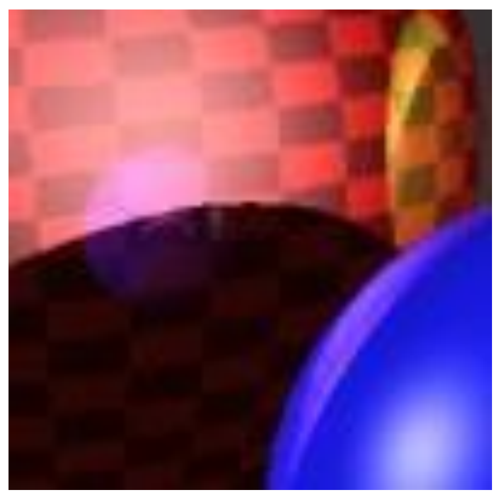
[Cook et al.1984]

## Anti-aliasing

- 1 pixel $\neq$ 1 point $\Longrightarrow$ 1 pixel = petit élément de surface
- idéalement : intégrer sur toute la surface du pixel
- en pratique : plusieurs rayons par pixel et moyenner



1 rayon



2 rayons

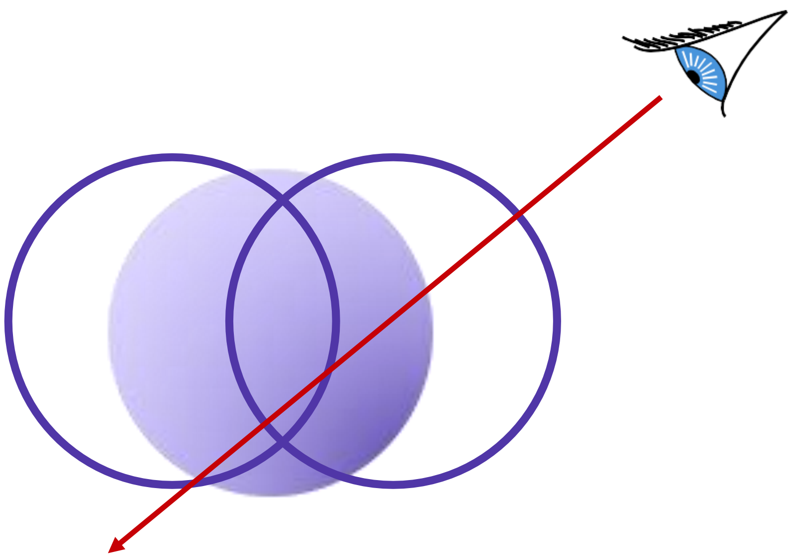
3 rayons

# Encore plus de rayons

[Cook et al.1984]

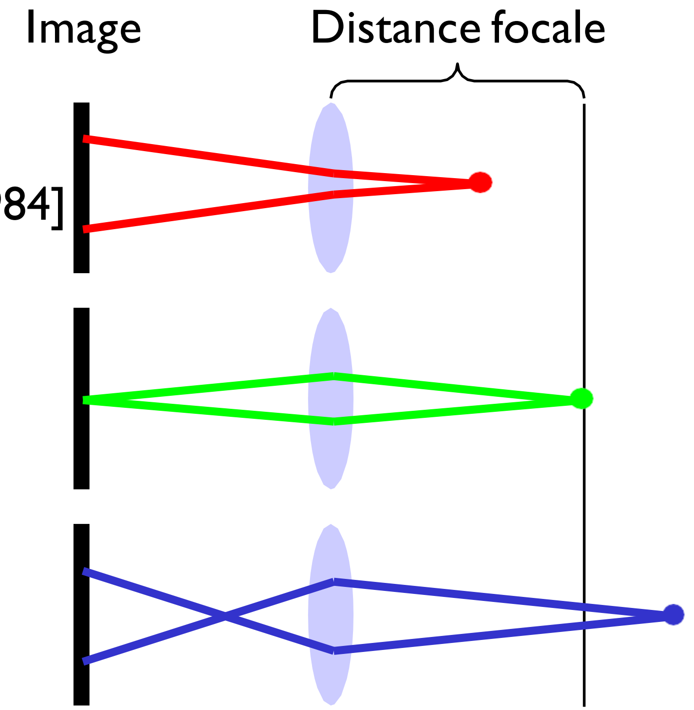
## Flou cinétique

plusieurs rayon au cours du temps



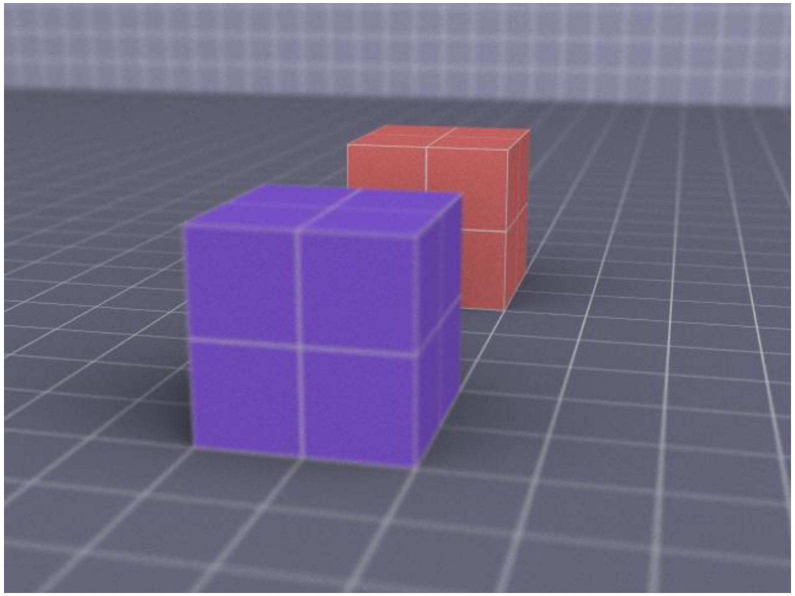
# Encore plus de rayons

[Cook et al.1984]

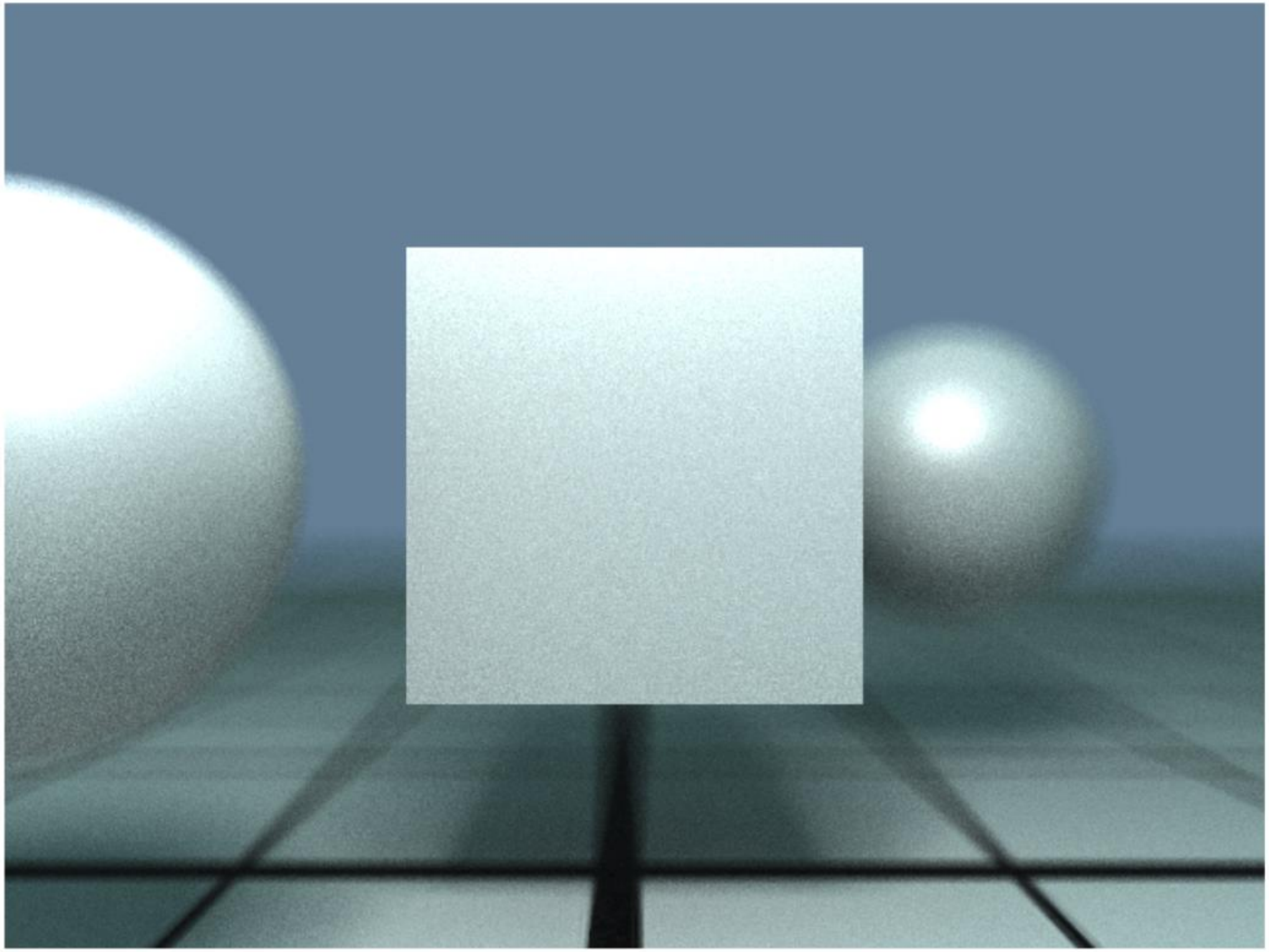



## Profondeur de champ

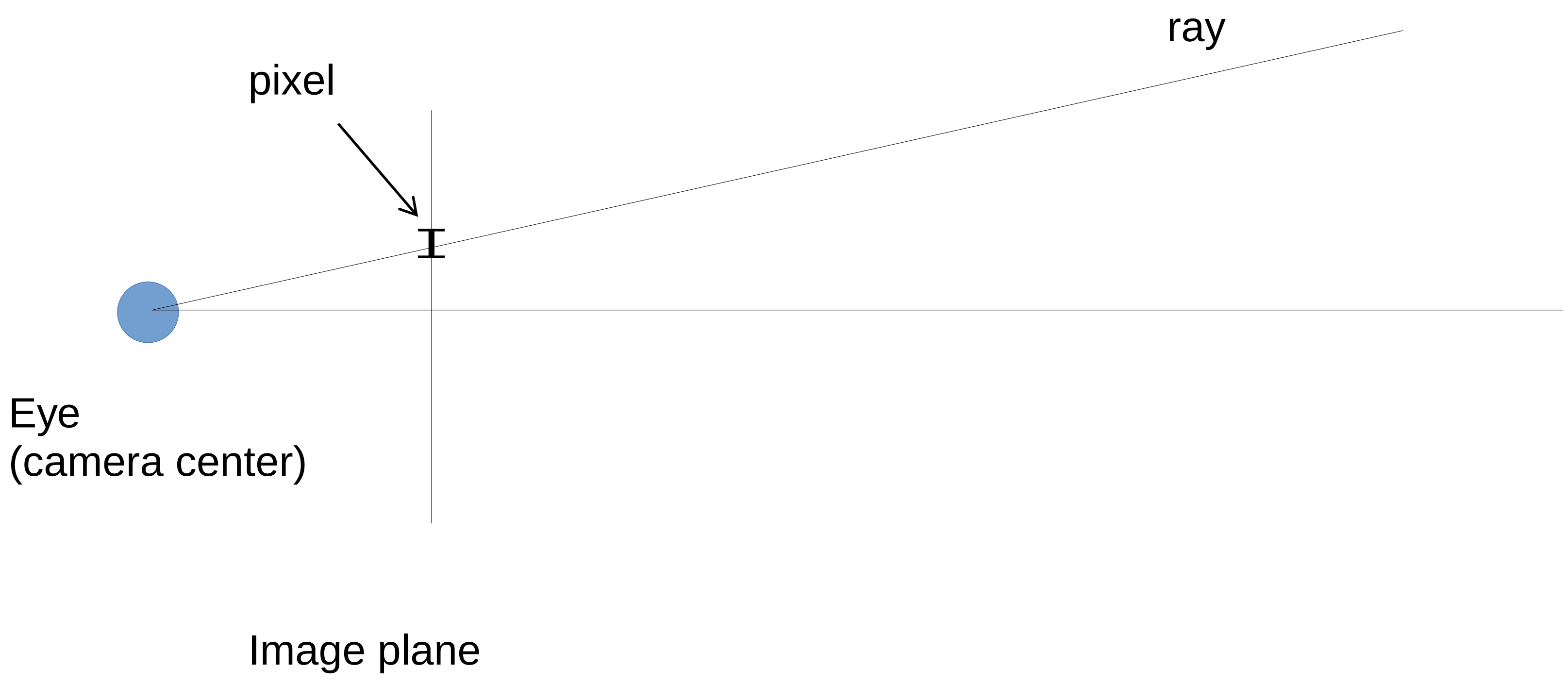
- plusieurs rayons par pixel en considérant une lentille
- changements de direction dû à l'objectif



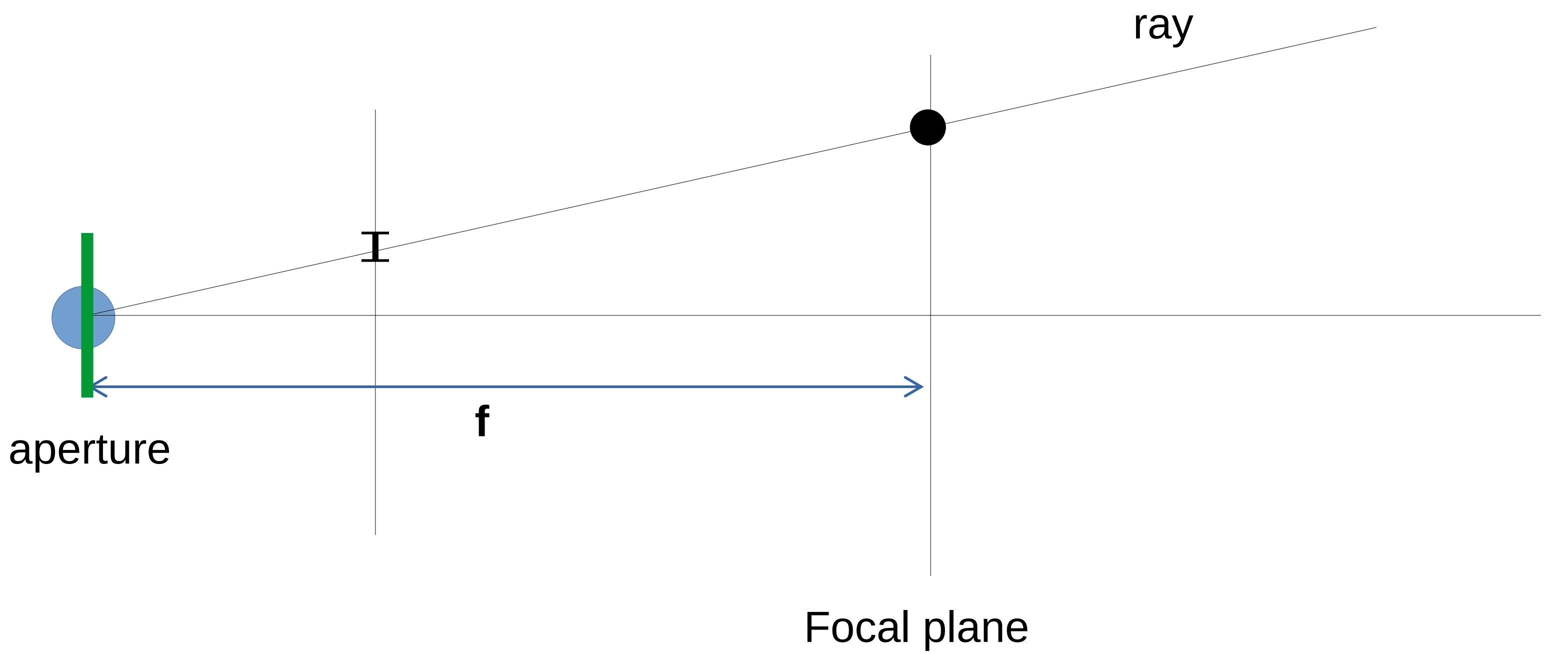
# Depth of field



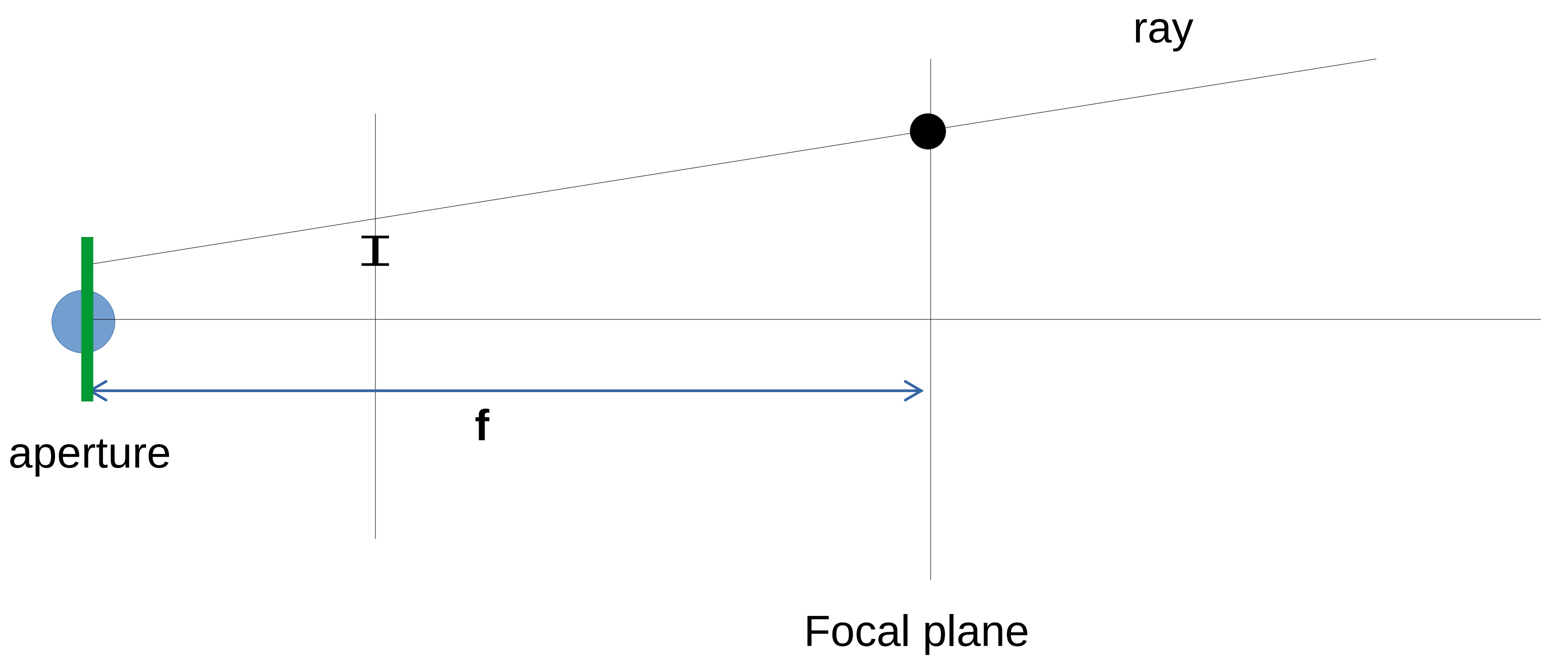
# What to change ?



# What to change ?



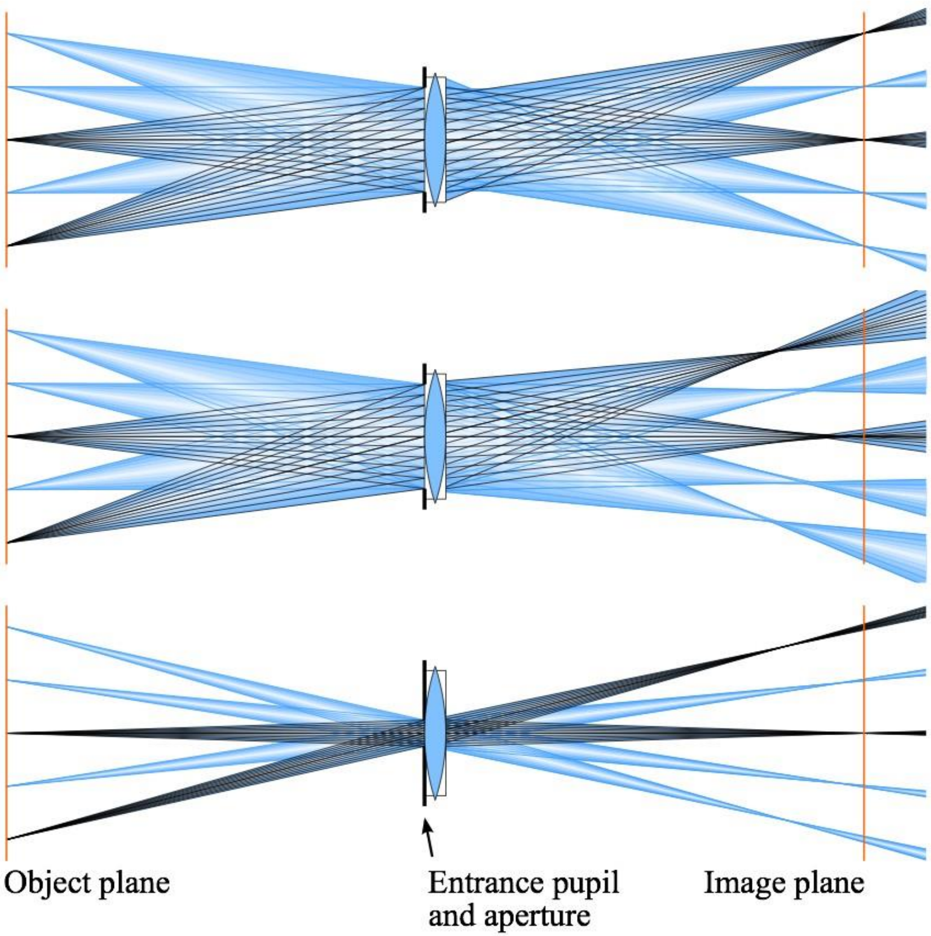
# New ray from random point in aperture

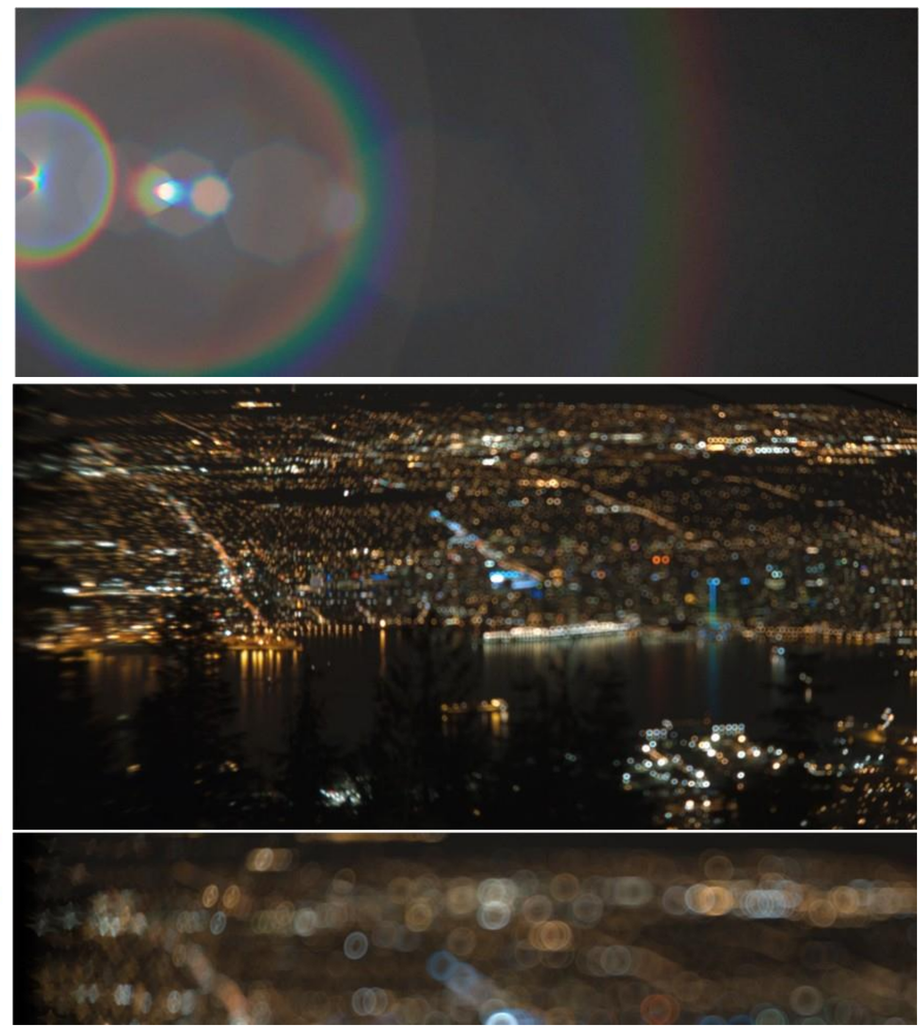



Careful ! You still add the contribution of the ray to the original pixel !

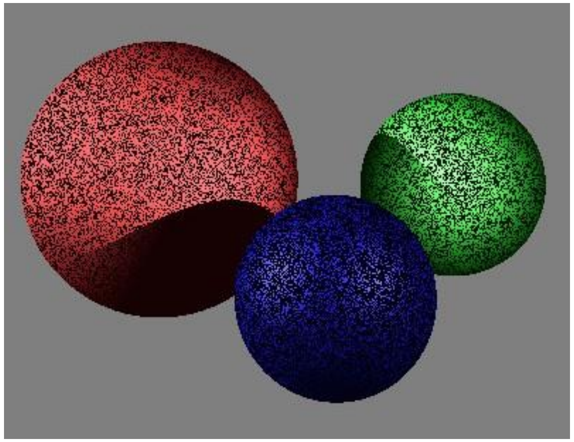
# Simulation avancée

## En pratique les optiques ne sont pas parfaites



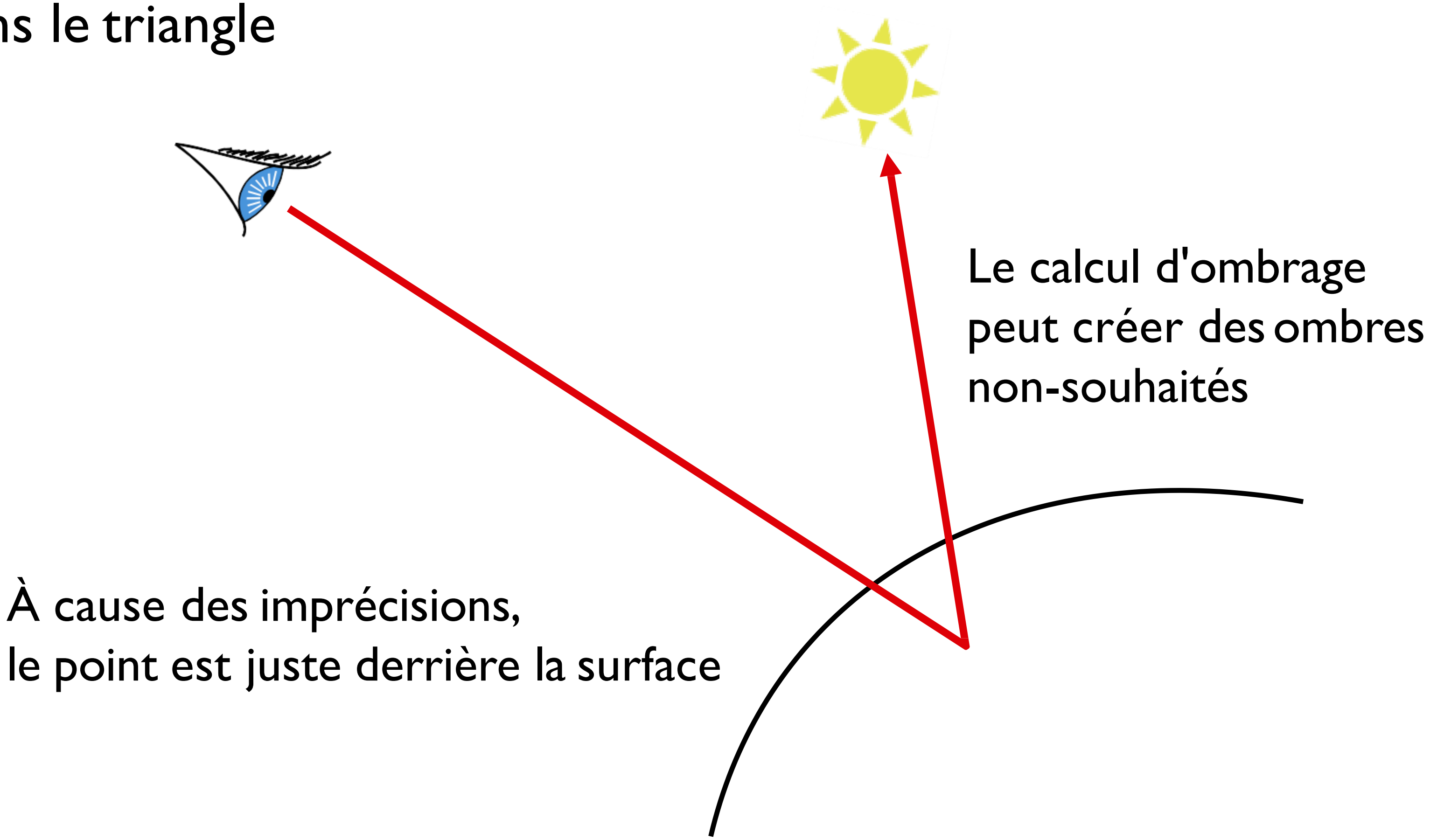



# Problème de précision

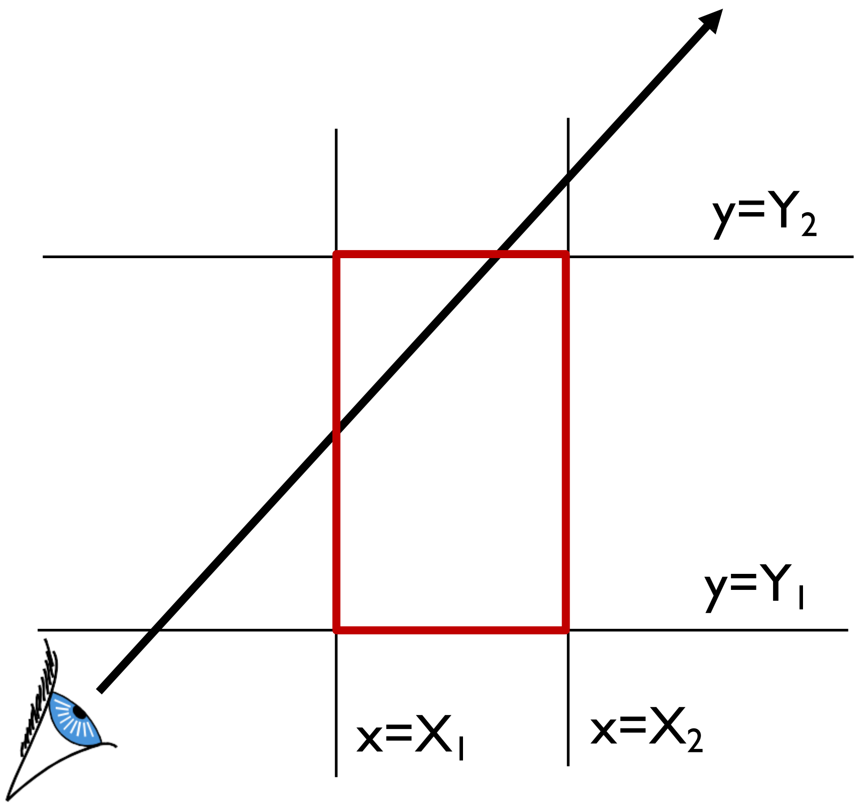


Un point n'est jamais **exactement**

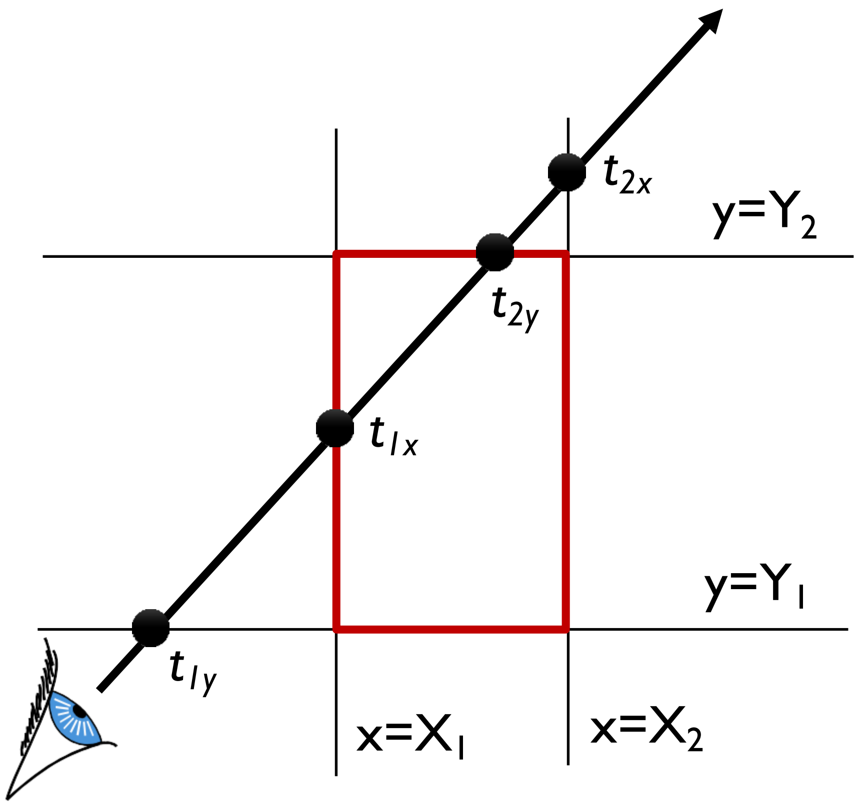
- sur le plan ou la sphère
- dans le triangle



# Boîte englobante alignée sur les axes

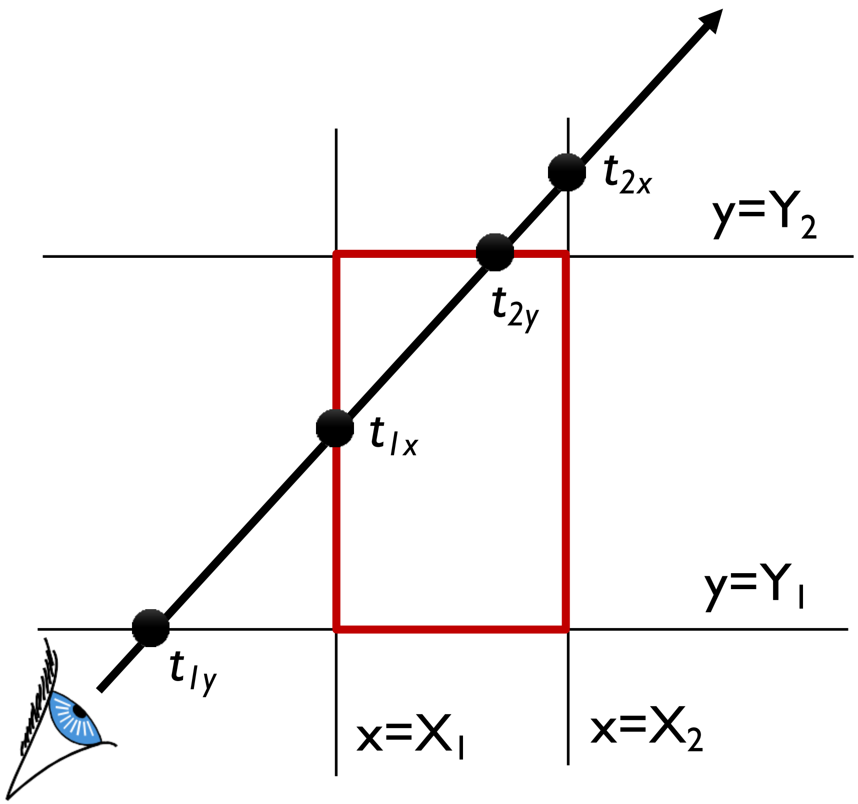


# Boîte englobante alignée sur les axes




- Boîte = 6 plans
- Calculer toutes les intersections
- Conserver la plus proche **à l'intérieur** de la boîte

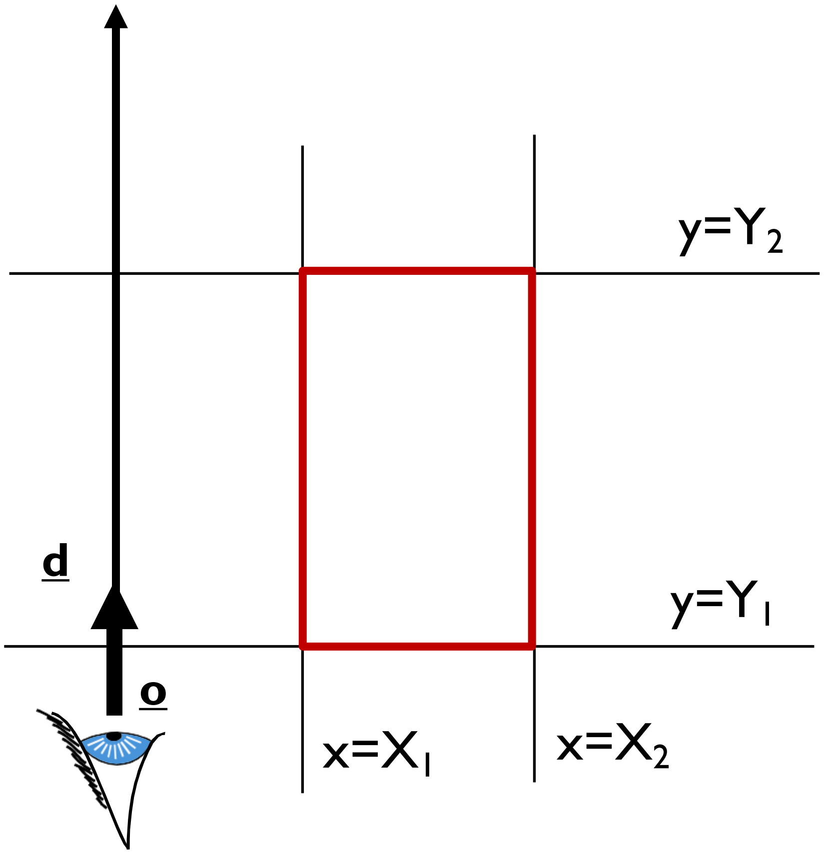
# Simplifier les calculs




- Chaque paire de plan a la **mêmes normale**
- Une **seule** composante de la normale est **non-nulle**

$\Longrightarrow$ considérer une dimension à la fois

# Tester si le rayon est parallèle



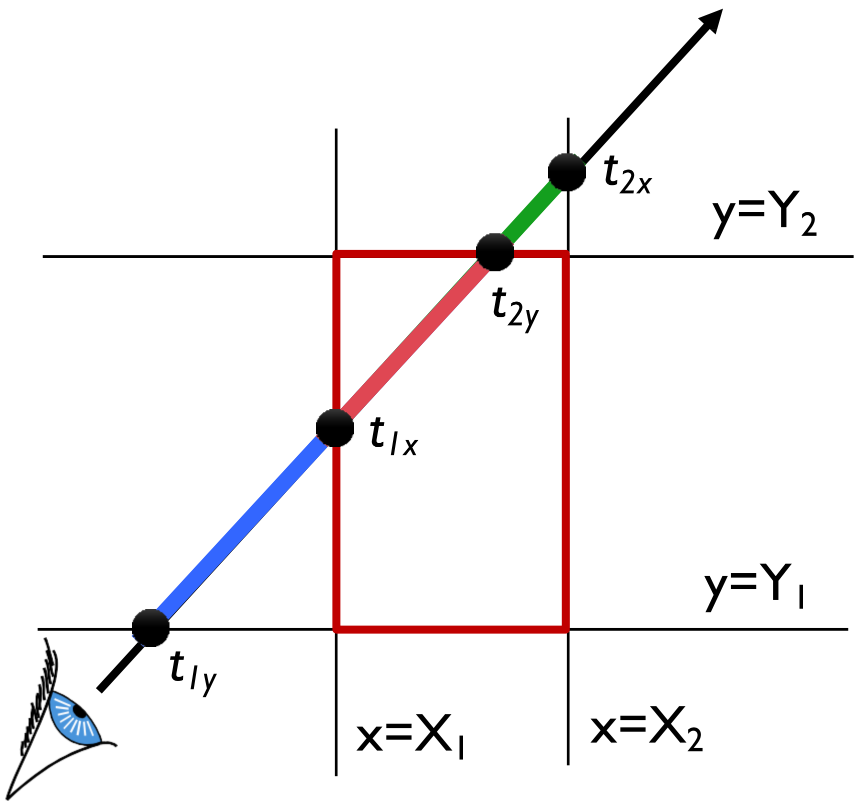

$\underline{d}_x = 0$

…et s'il n'y a pas d'intersection :

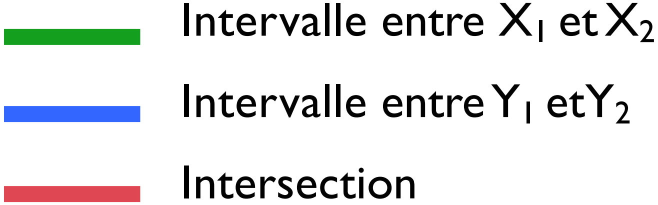
$\underline{o}_x < X_1$ ou $\underline{o}_x > X_2$

(Idem en Y et Z, bien-sûr)

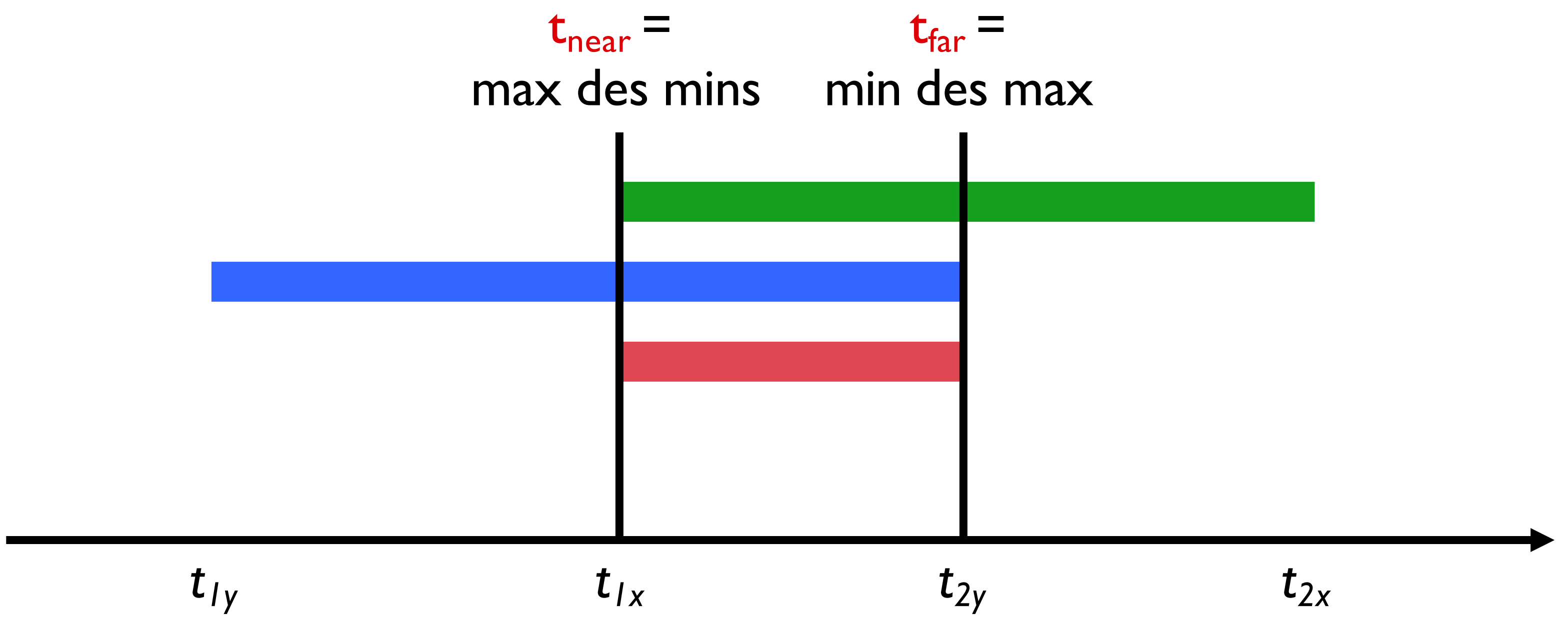
# Trouver les intersections par axe



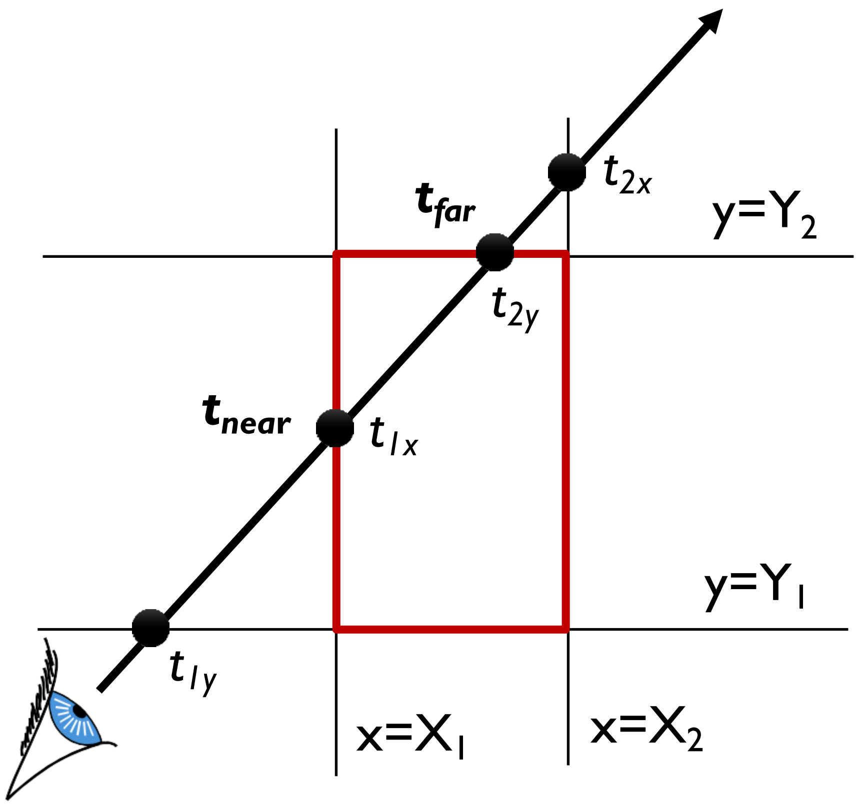

- Déterminer un intervalle par dimension
- Calculer l'intersection de ces intervalles 1D



# Intersection d'intervalles 1D



# Boîte englobante alignée sur les axes



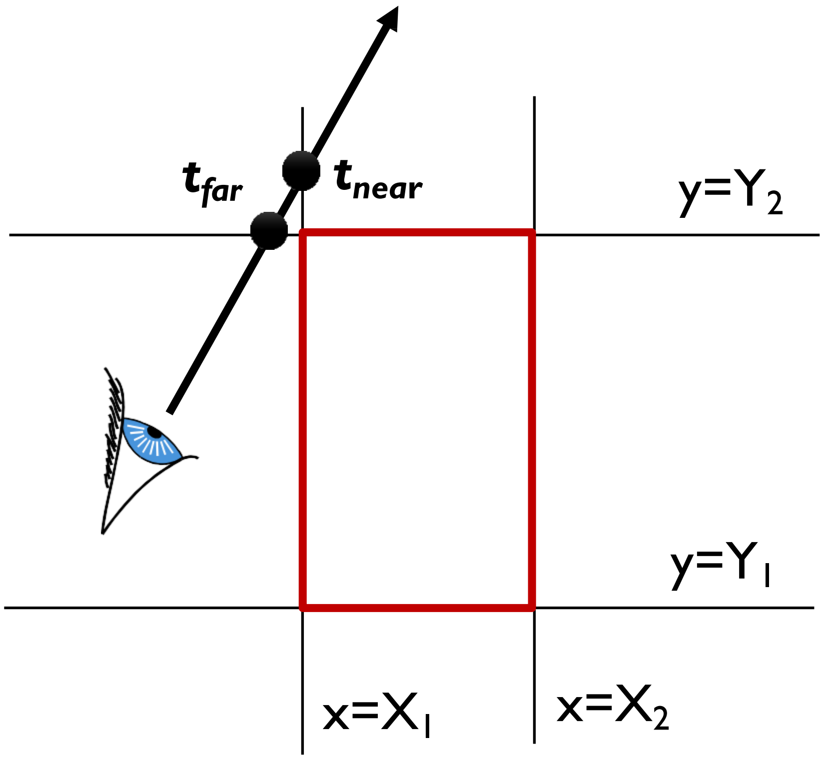

Calculer les distances d'intersection $t_1$ et $t_2$ pour chaque axe :

- $t_{1x} = (X_1 - \underline{o}_x) \,/\, \underline{\mathbf{d}}_\mathbf{x}$
- $t_{2x} = (X_2 - \underline{o}_x) \,/\, \underline{\mathbf{d}}_\mathbf{x}$

puis :

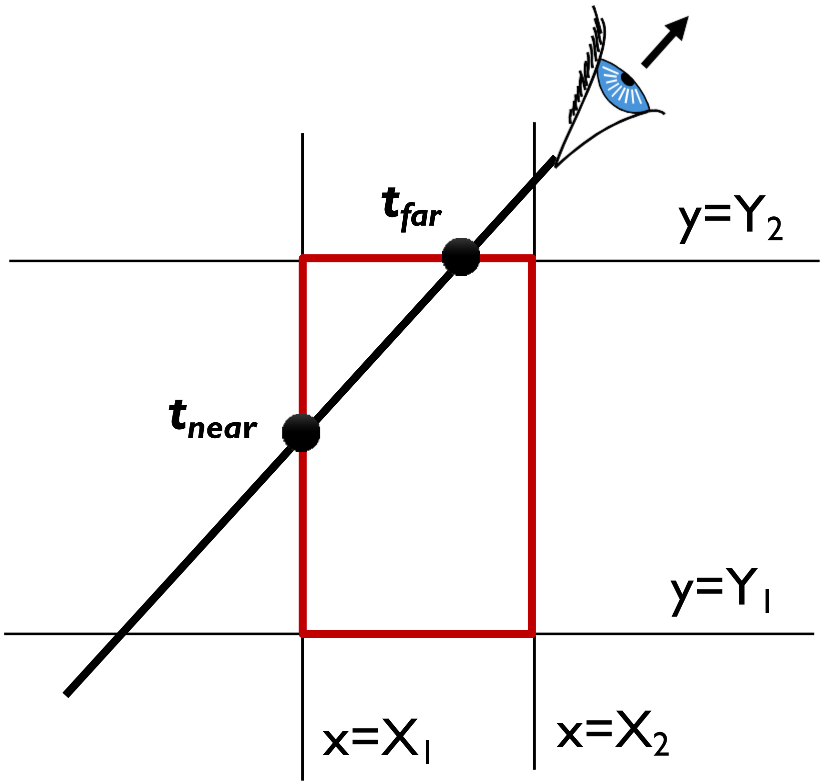
- $t_{near} = \max(t_{1x}, t_{1y})$
- $t_{far} = \min(t_{2x}, t_{2y})$

# Boîte englobante alignée sur les axes



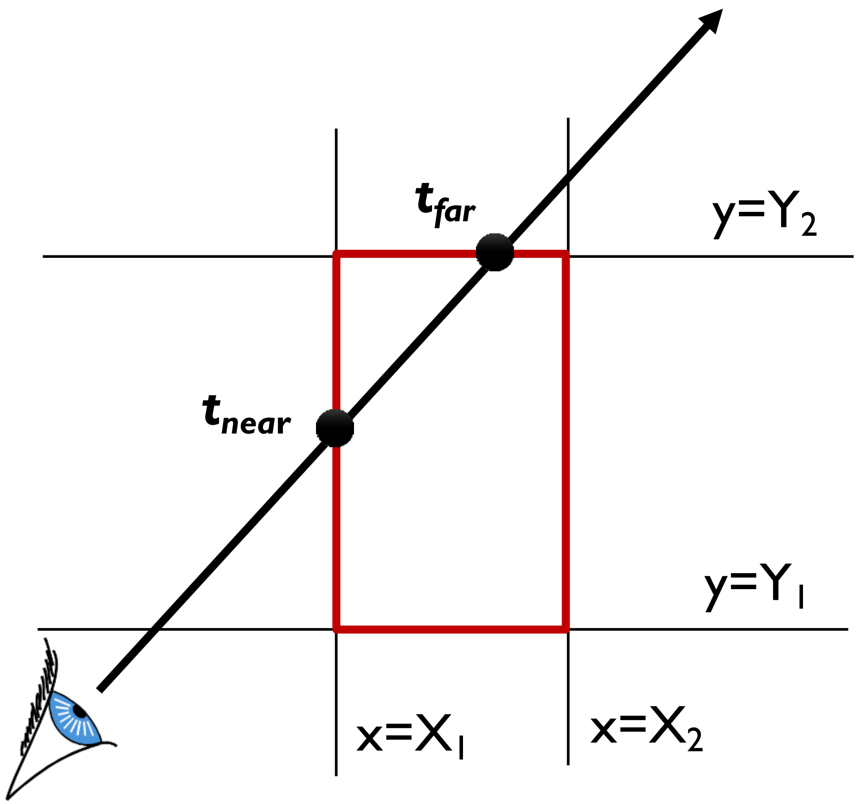

Si $t_{near} > t_{far}$, pas d'intersection

# Boîte englobante alignée sur les axes



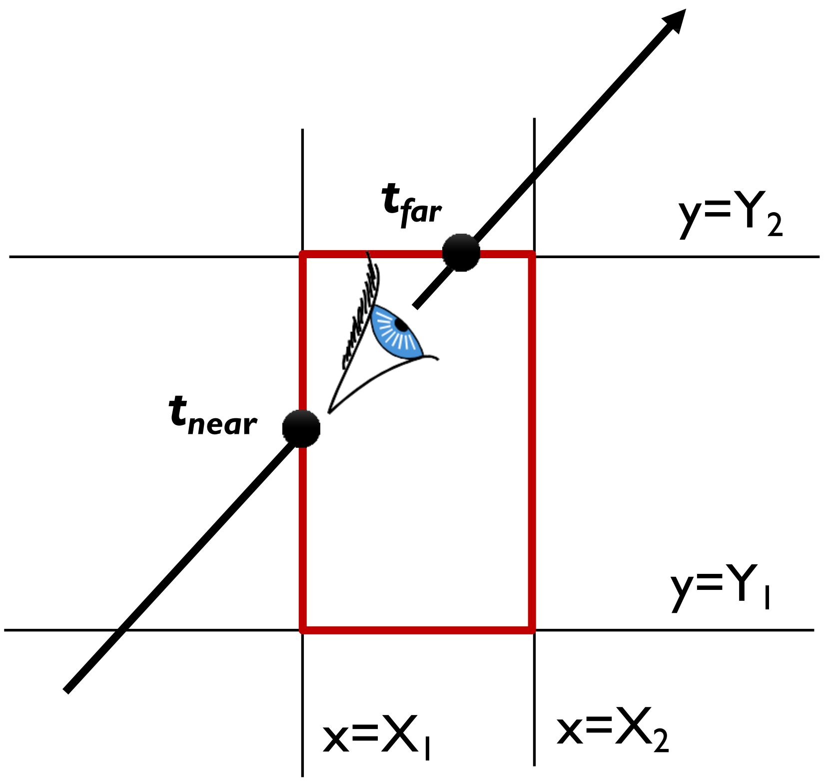

Si $t_{far} < t_{min}$, la boîte est derrière

# Boîte englobante alignée sur les axes




Si $t_{near} > t_{min}$, l'intersection se fait à la distance $t_{near}$

# Boîte englobante alignée sur les axes




Sinon, elle se fait à $t_{far}$

# Intersection rayon-scène

| | |
|---|---|
| - Polygones : | [Appel '68] |
| - Quadriques, CSG : | [Goldstein & Nagel '71] |
| - Torres : | [Roth '82] |
| - Patches bi-cubiques : | [Whitted '80, Kajiya '82, Benthin '04] |
| - Surfaces algébriques : | [Hanrahan '82] |
| - Swept surfaces : | [Kajiya '83, van Wijk '84] |
| - Fractales : | [Kajiya '83] |
| - NURBS : | [Stürzlinger '98] |
| - Surfaces de subdivision : | [Kobbelt et al. '98, Benthin '04] |
| - Points : | [Schaufler et al. '00, Wald '05] |

# Structures d'accélération

## Trouver l'intersection la plus proche

- Tester l'intersection du rayon avec **tous** les objets
- N objets, M rayons $\Longrightarrow$ O(NM)
- Trop coûteux !

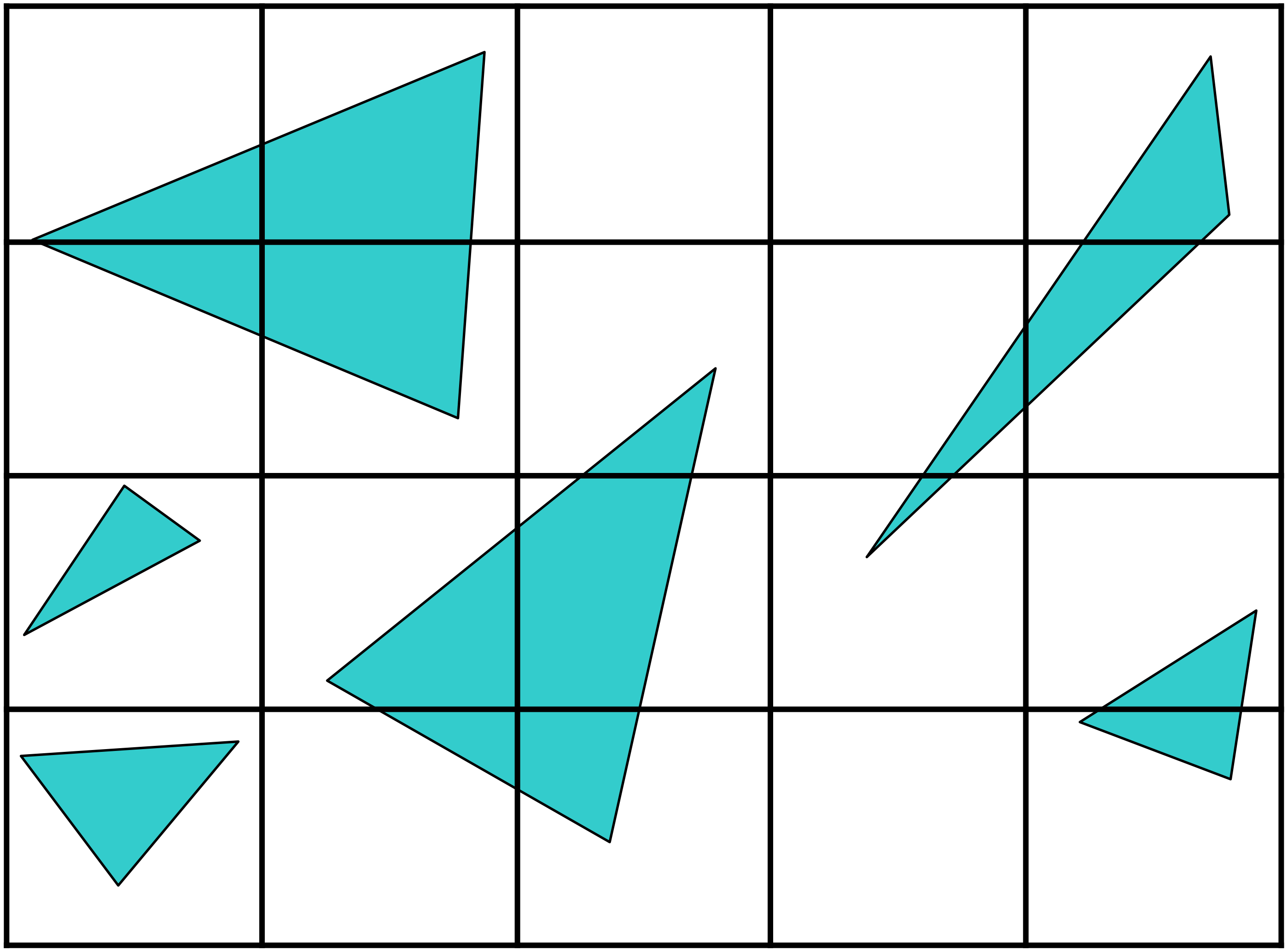
## Objectif

- Faire en sorte que la 1ère intersection calculée soit la bonne
- En pratique : compromis

## Solution : partitionnement de l'espace

(souvent hiérarchique)

# Grille régulière



# Grille régulière

## Construction

- Subdivision de la boîte englobante
- Résolution :souvent $\sim \sqrt[3]{n}$
- Une cellule : liste des objets l'intersectant

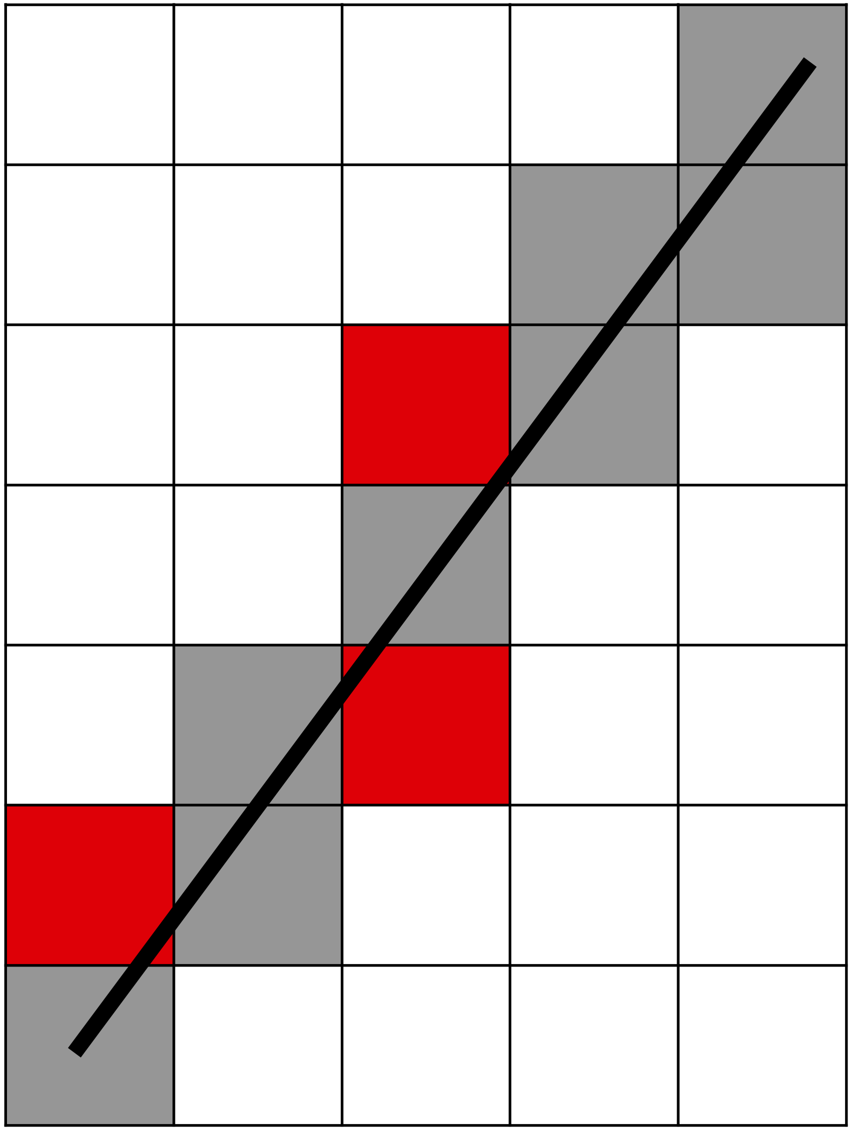
## Parcours

- De proche en proche
- De l'origine vers l'arrière
- Arrêt si une intersection est trouvée

# Parcours dans la grille

**3DDDA**
*Three Dimensional Digital Difference Analyzer*

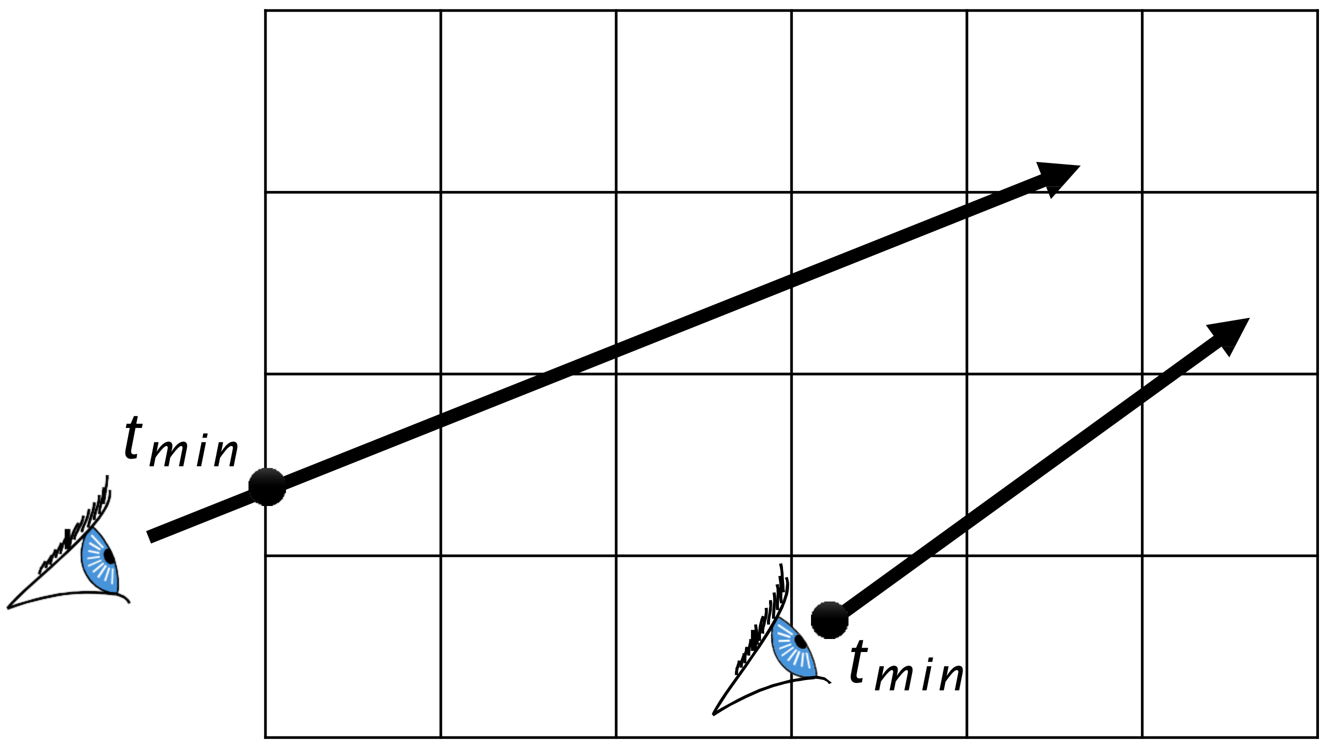
**Similaire à la rastérisation**
…mais on veut **toutes les cellules intersectant le rayon**



# Initialisation

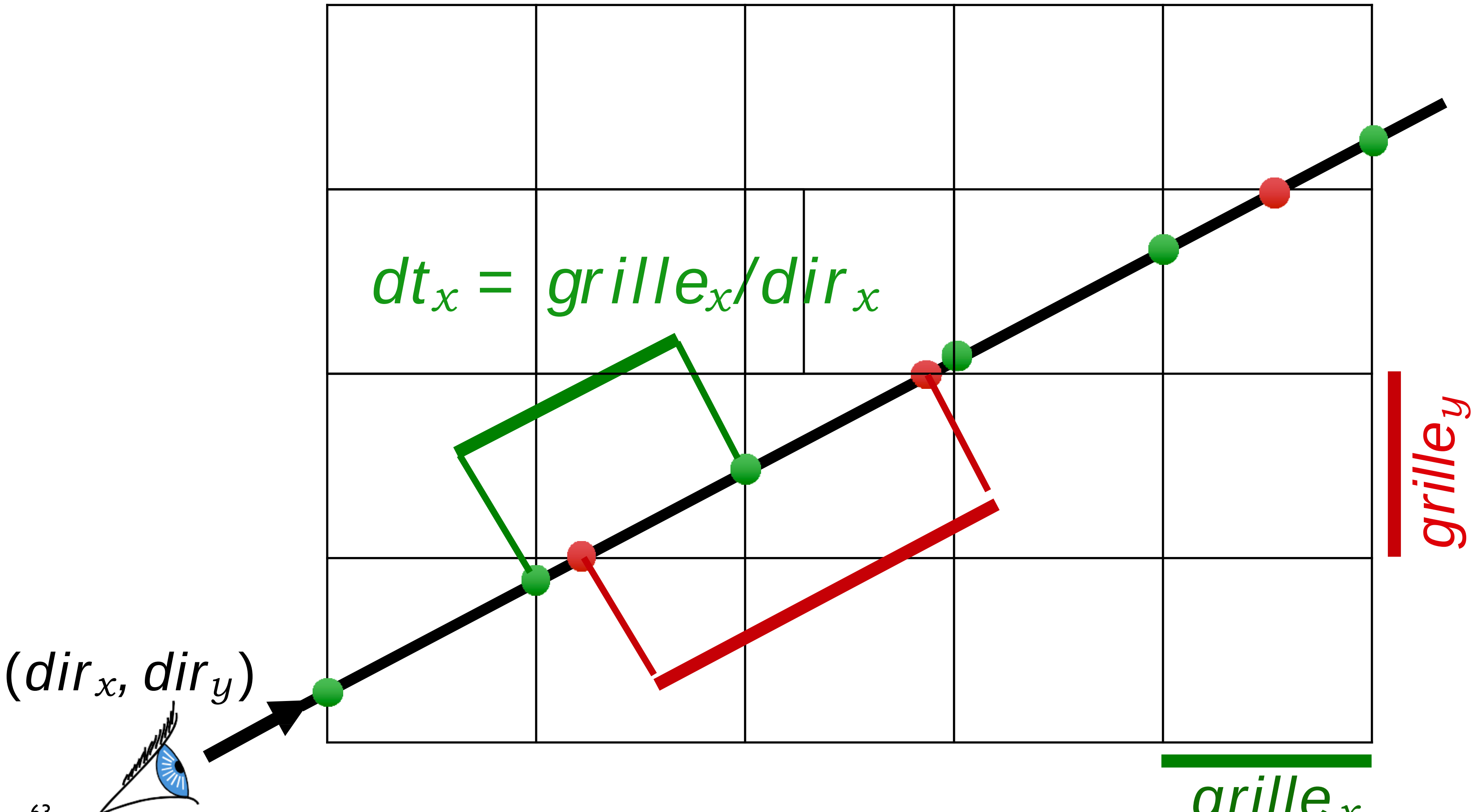
Calculer l'intersection avec la boite englobante $t_{min}$

(Attention, l'origine du rayon peut être dans la boîte)



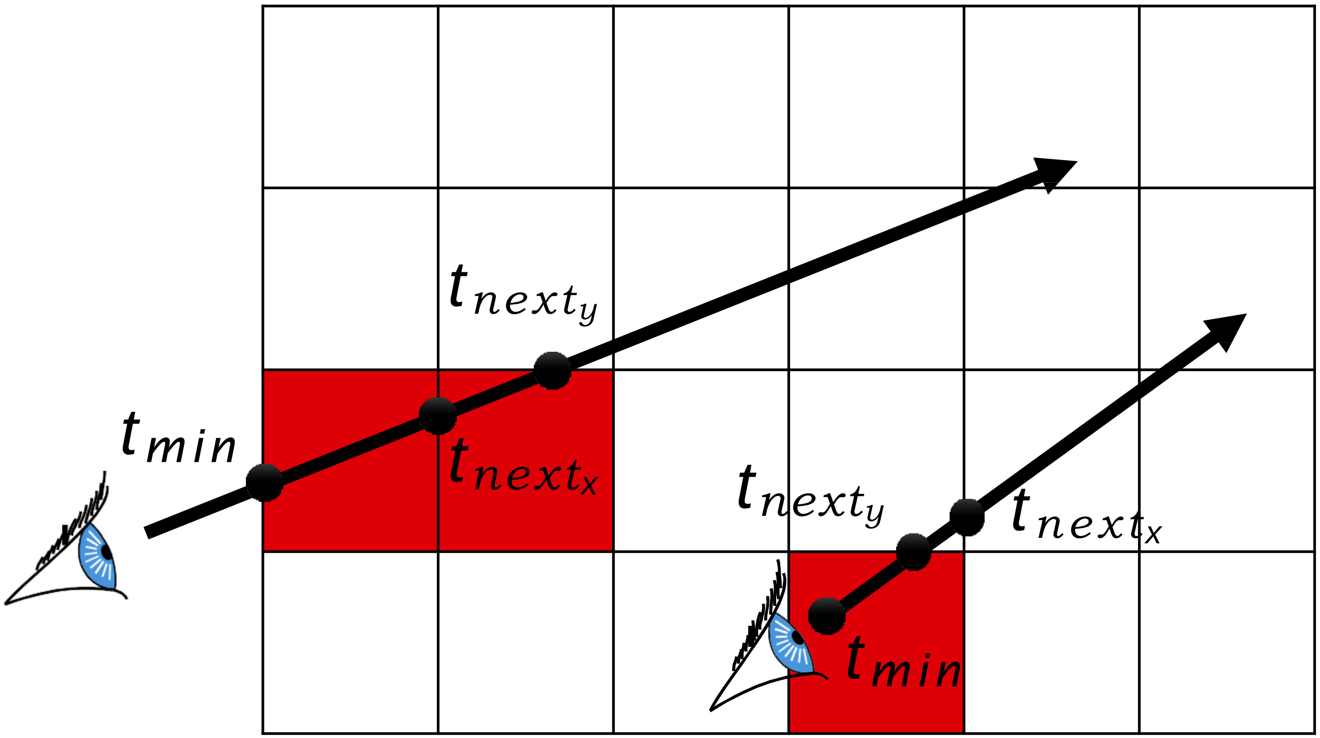
# L'intersection est répétitive

Les intersections sur les axes sont équidistantes



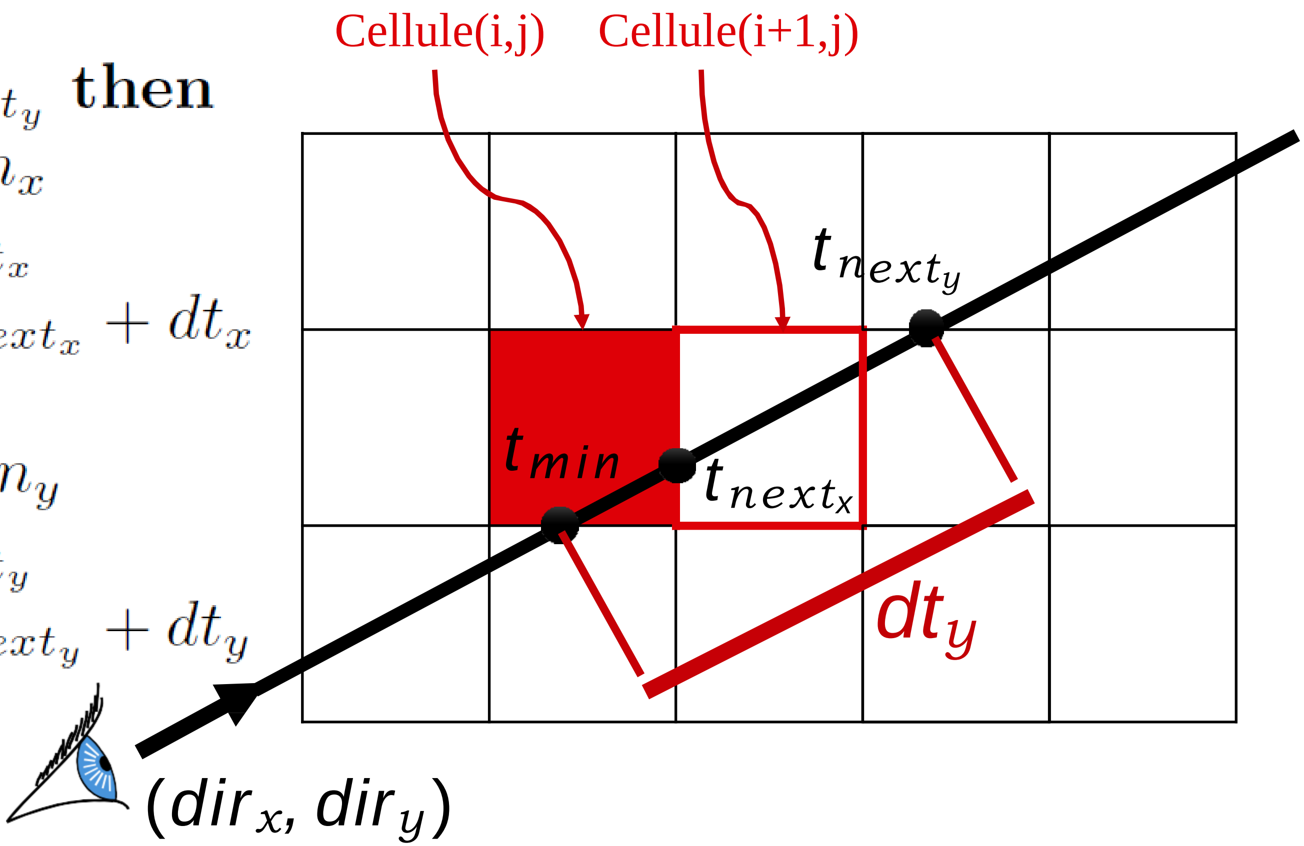
# Choisir la cellule suivante

Calculer les 2 intersections suivantes avec les axes $\begin{cases} t_{next_x} \\ t_{next_y} \end{cases}$



# Choisir la cellule suivante

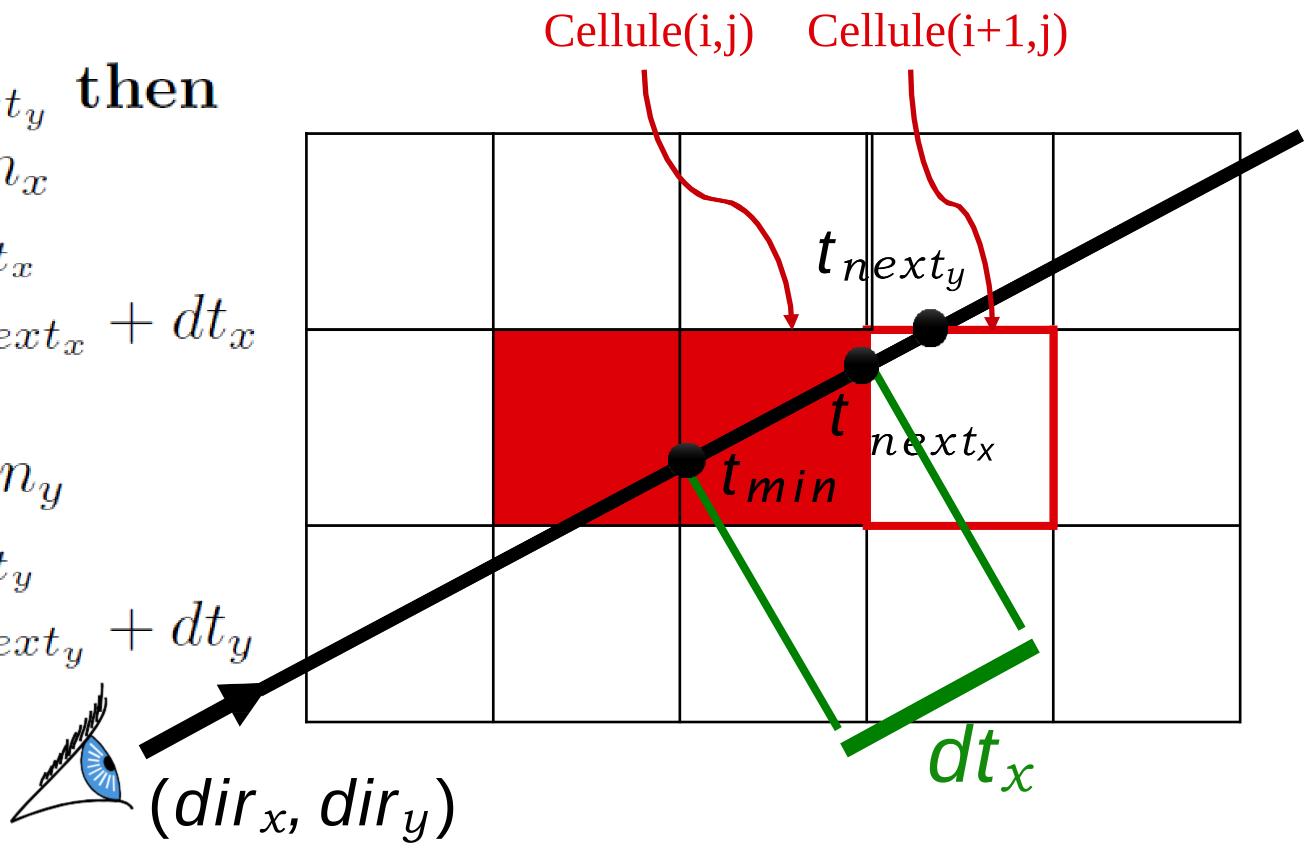
**if** $t_{next_x} < t_{next_y}$ **then**
$\quad i \leftarrow i + sign_x$
$\quad t_{min} = t_{next_x}$
$\quad t_{next_x} \leftarrow t_{next_x} + dt_x$
**else**
$\quad j \leftarrow j + sign_y$
$\quad t_{min} = t_{next_y}$
$\quad t_{next_y} \leftarrow t_{next_y} + dt_y$
**end if**




**if** $dir_n > 0$ **then** $sign_n \leftarrow 1$ **else** $sign_n \leftarrow -1$ **end if**

# Choisir la cellule suivante

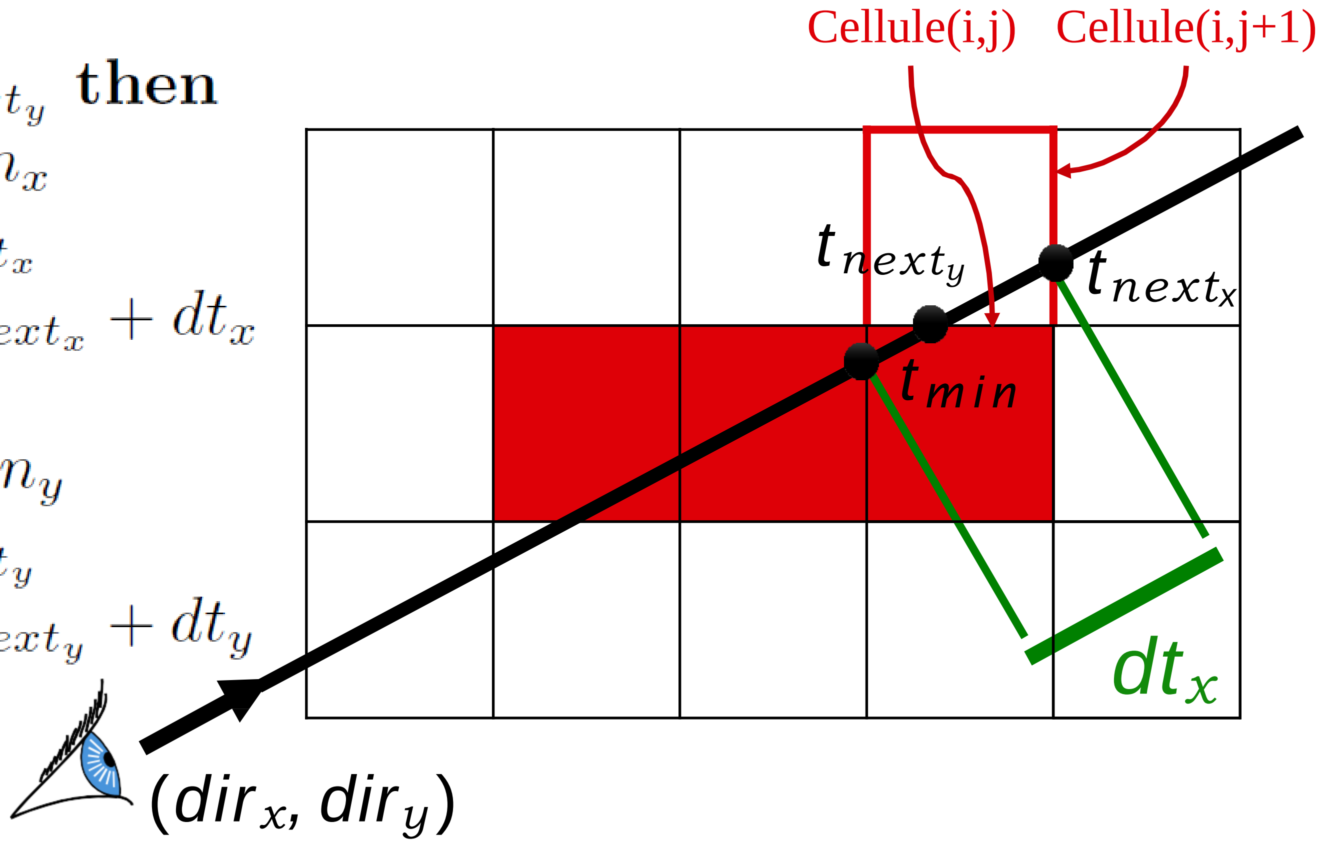
$$
\begin{array}{l}
\textbf{if } t_{next_x} < t_{next_y} \textbf{ then} \\
\quad i \leftarrow i + sign_x \\
\quad t_{min} = t_{next_x} \\
\quad t_{next_x} \leftarrow t_{next_x} + dt_x \\
\textbf{else} \\
\quad j \leftarrow j + sign_y \\
\quad t_{min} = t_{next_y} \\
\quad t_{next_y} \leftarrow t_{next_y} + dt_y \\
\textbf{end if}
\end{array}
$$




$$\textbf{if } dir_n > 0 \textbf{ then } sign_n \leftarrow 1 \textbf{ else } sign_n \leftarrow -1 \textbf{ end if}$$

# Choisir la cellule suivante

**if** $t_{next_x} < t_{next_y}$ **then**
$i \leftarrow i + sign_x$
$t_{min} = t_{next_x}$
$t_{next_x} \leftarrow t_{next_x} + dt_x$
**else**
$j \leftarrow j + sign_y$
$t_{min} = t_{next_y}$
$t_{next_y} \leftarrow t_{next_y} + dt_y$
**end if**




**if** $dir_n > 0$ **then** $sign_n \leftarrow 1$ **else** $sign_n \leftarrow -1$ **end if**

# Test à faire sur chaque cellule

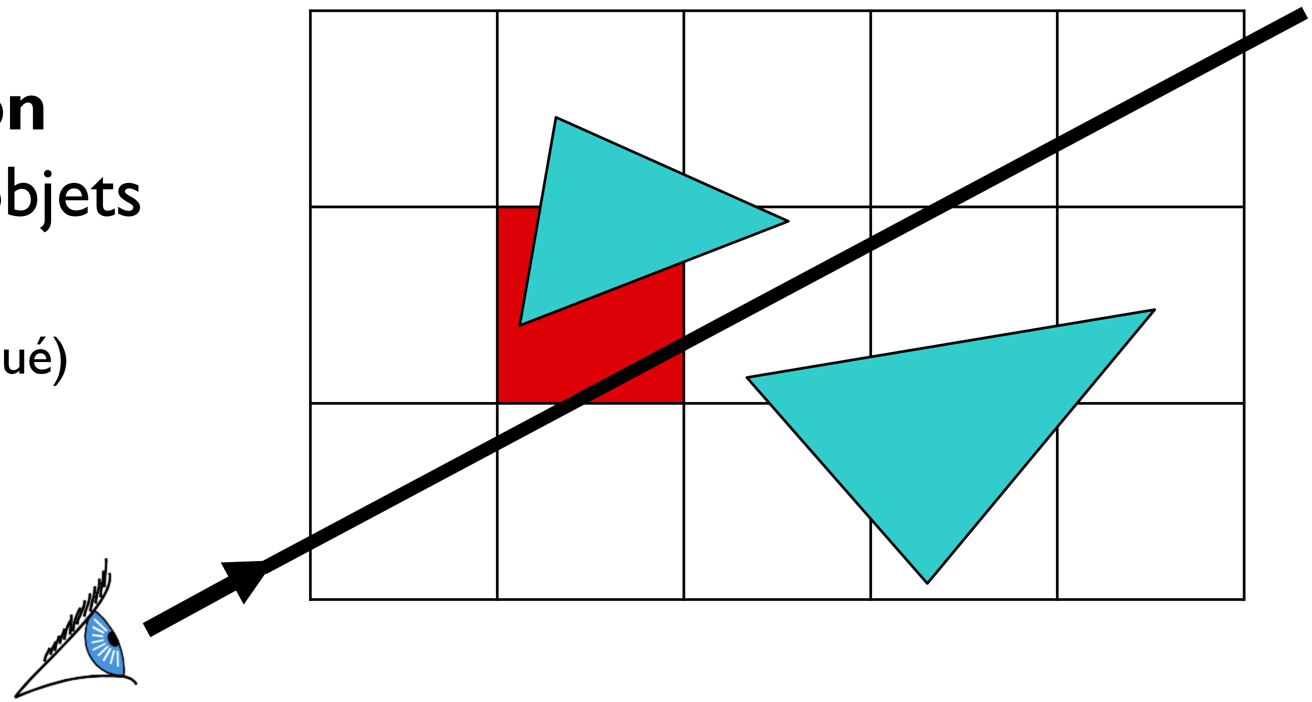
**Intersection(s) dans la cellule ?**

- Oui : retourner la plus proche
- Non : continuer

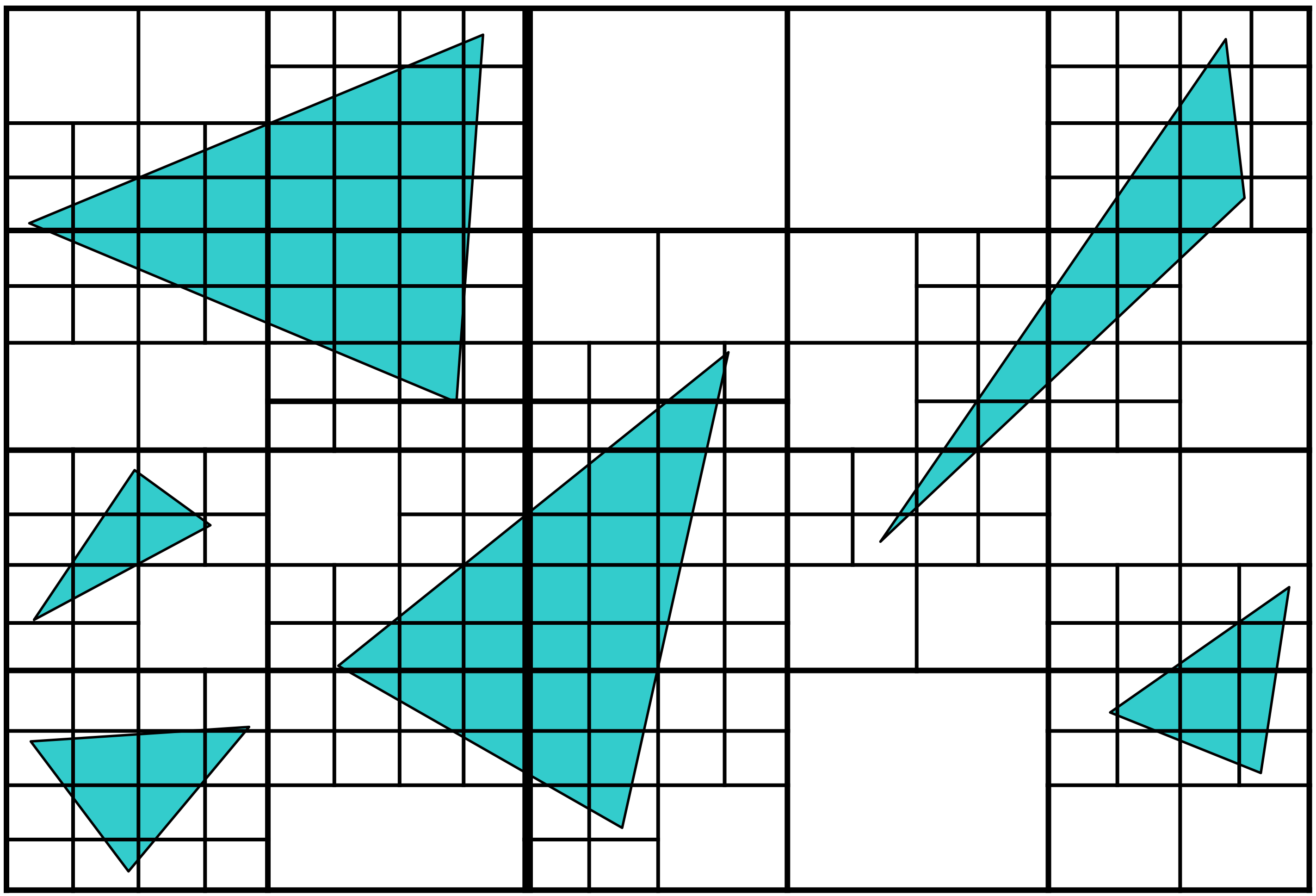
**Optimisation**

marquer les objets déjà testés

(mais plus compliqué)



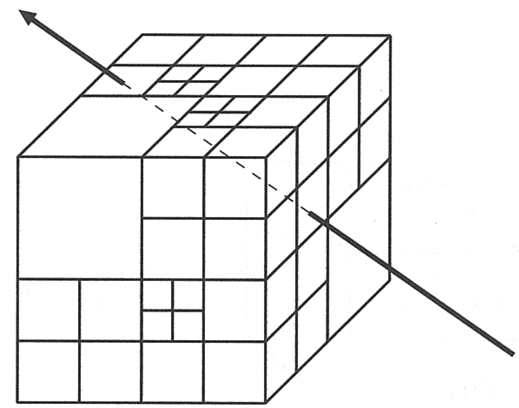
# Grille adaptative : Octree [Meagher '80]

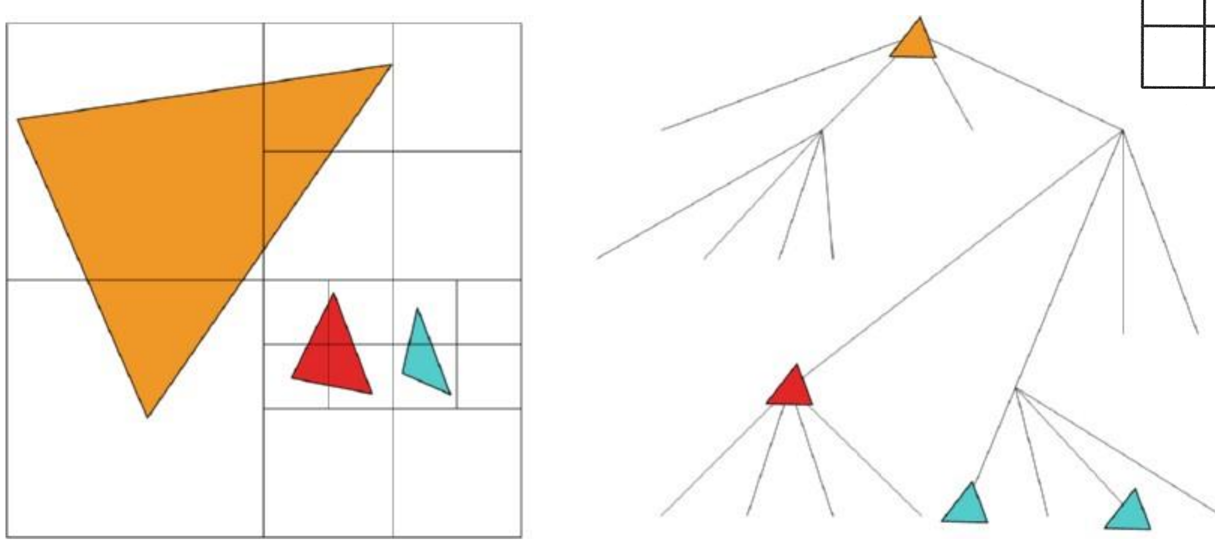


# Grille adaptative : Octree

## Partitionnement hiérarchique de l'espace

- Subdivise adaptivement chaque voxel en **8** sous-voxels de manière récursive
- Différents critères possibles
  - nombre de primitives par cellules
  - ratio de « vide »





# Comparaison

## Grille régulière

- ✓ construction facile et rapide
- ✓ parcours simple
- ✗ nombreuses cellules vides
- ✗ cellules avec beaucoup d'objets
- ✗ choix de la résolution

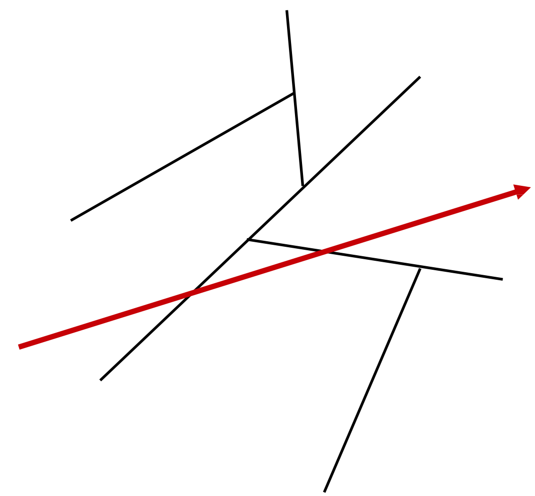
## Octree

- ✓ initialisation rapide
- ✓ peu de cellules vides
- ✗ parcours récursif couteux
- ✗ convergence lente pour les zones complexes

# Grille adaptative : BSP- et Kd-Trees

## Arbres binaires

- Nœud = plan de subdivision de l'espace

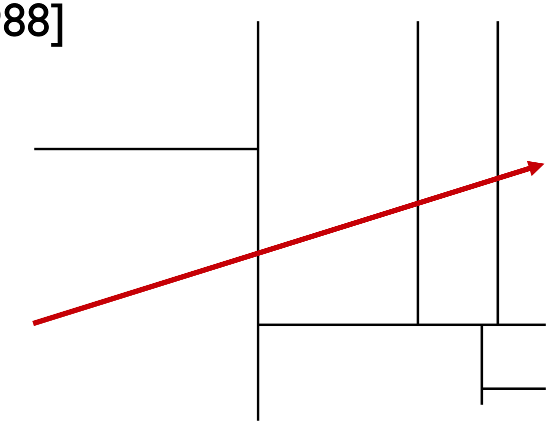


## Binary Space Partition [Fuchs et al. 1980]

- Plans quelconques « judicieusement » placés
- Couteux à construire,stocker et utiliser
-

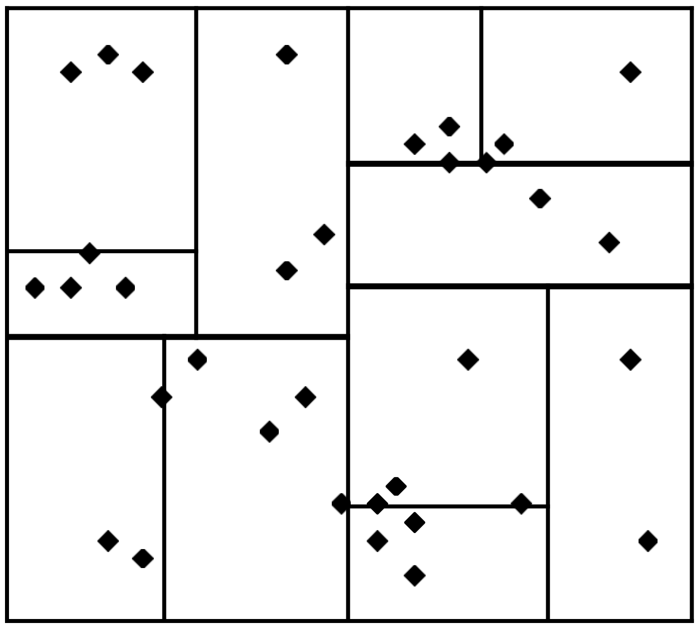
## Kd-Tree [Bentley 1975, Fussell and Subramanian 1988]

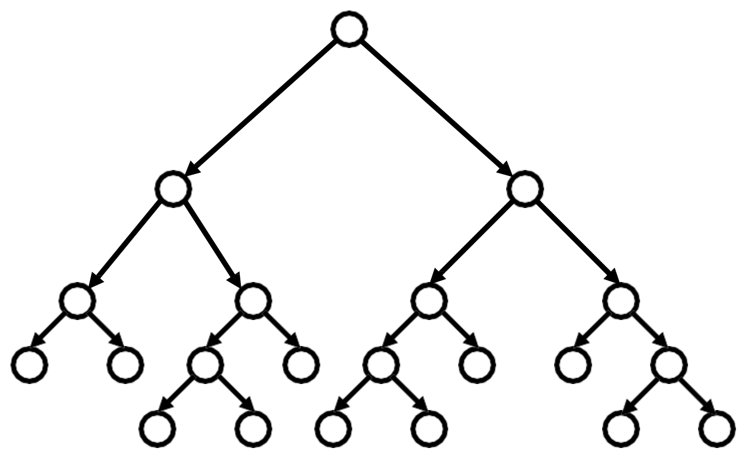
- Plans alignés sur les axes
- Simple, léger et très efficace



# KD-tree :définition

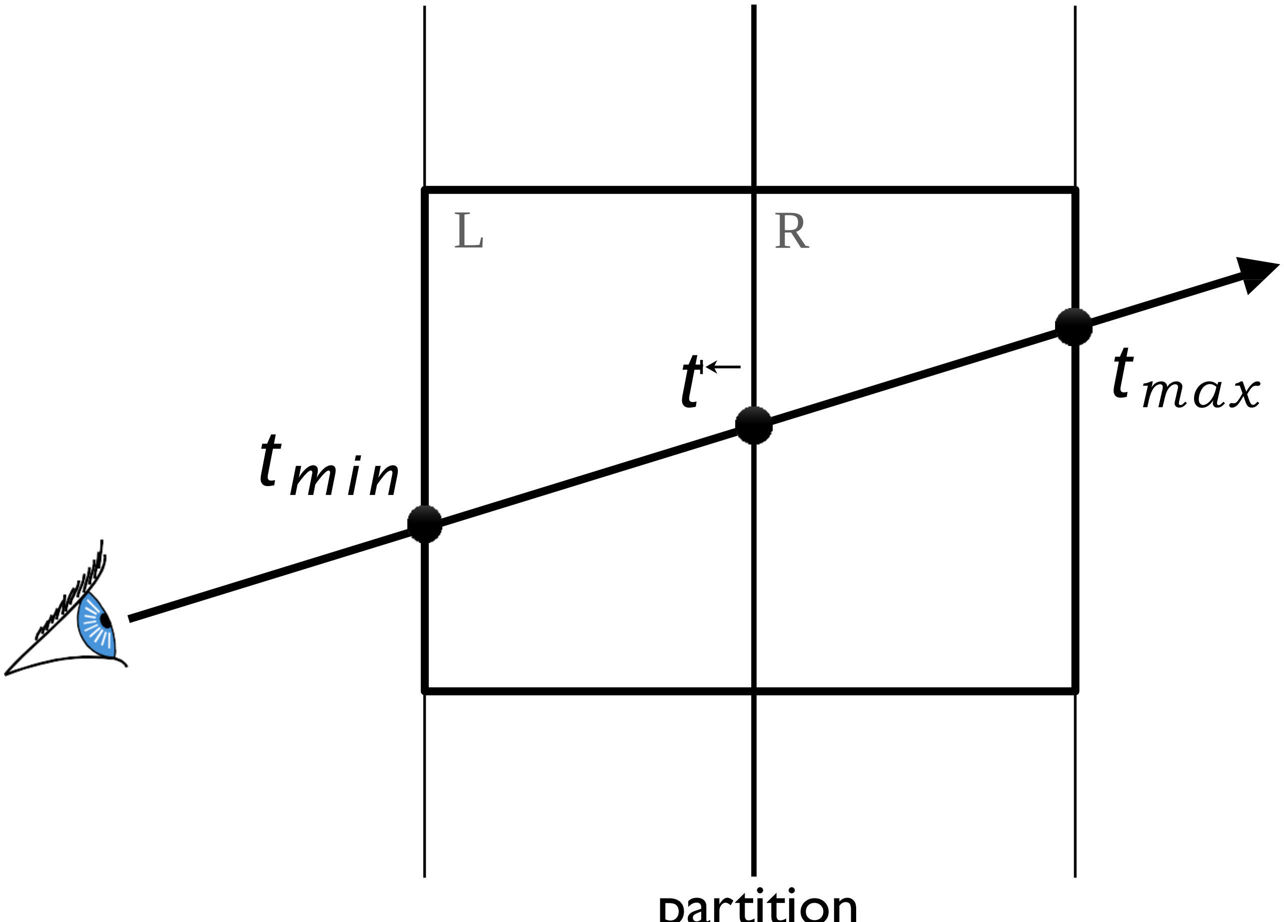
## Subdivision récursive





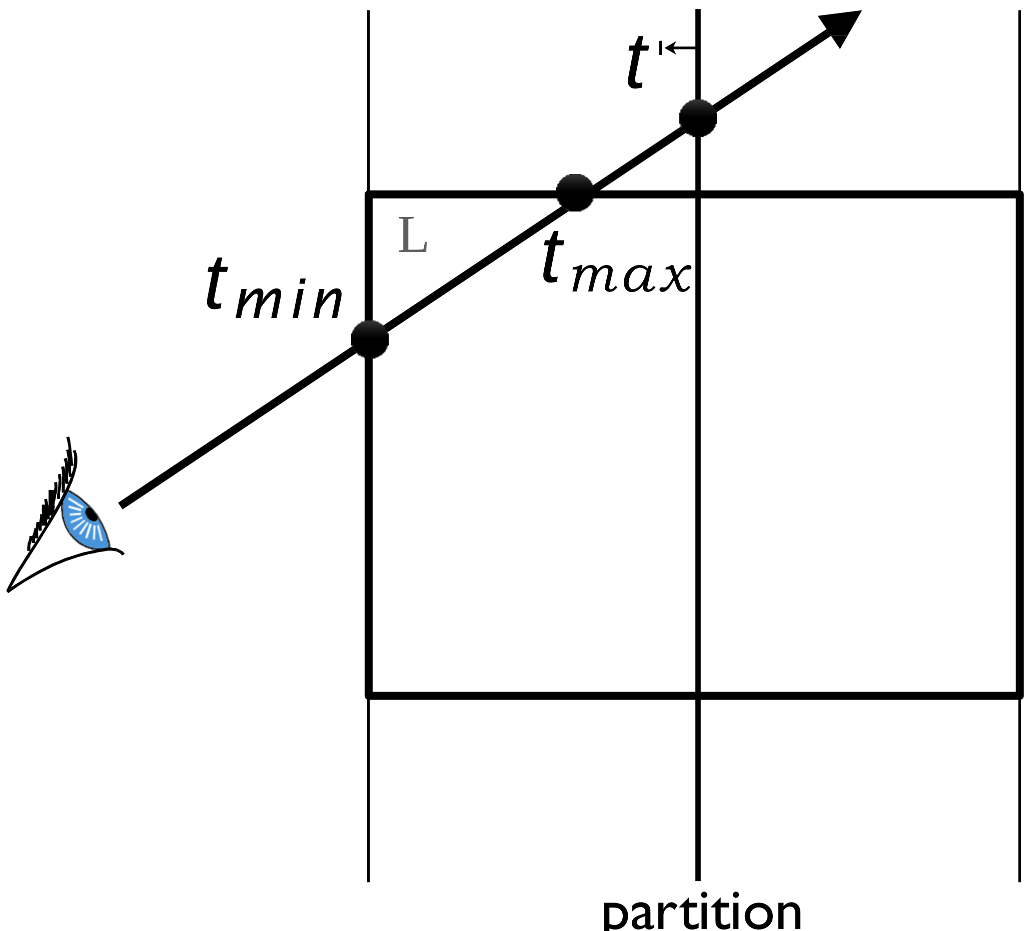
# KD-tree : parcours récursif

$t_{min} < t_{\leftarrow} < t_{max}$ ) Intersect(L,$t_{min}$,$t^{\leftarrow}$) et Intersect(R,$t^{\leftarrow}$,$t_{max}$)



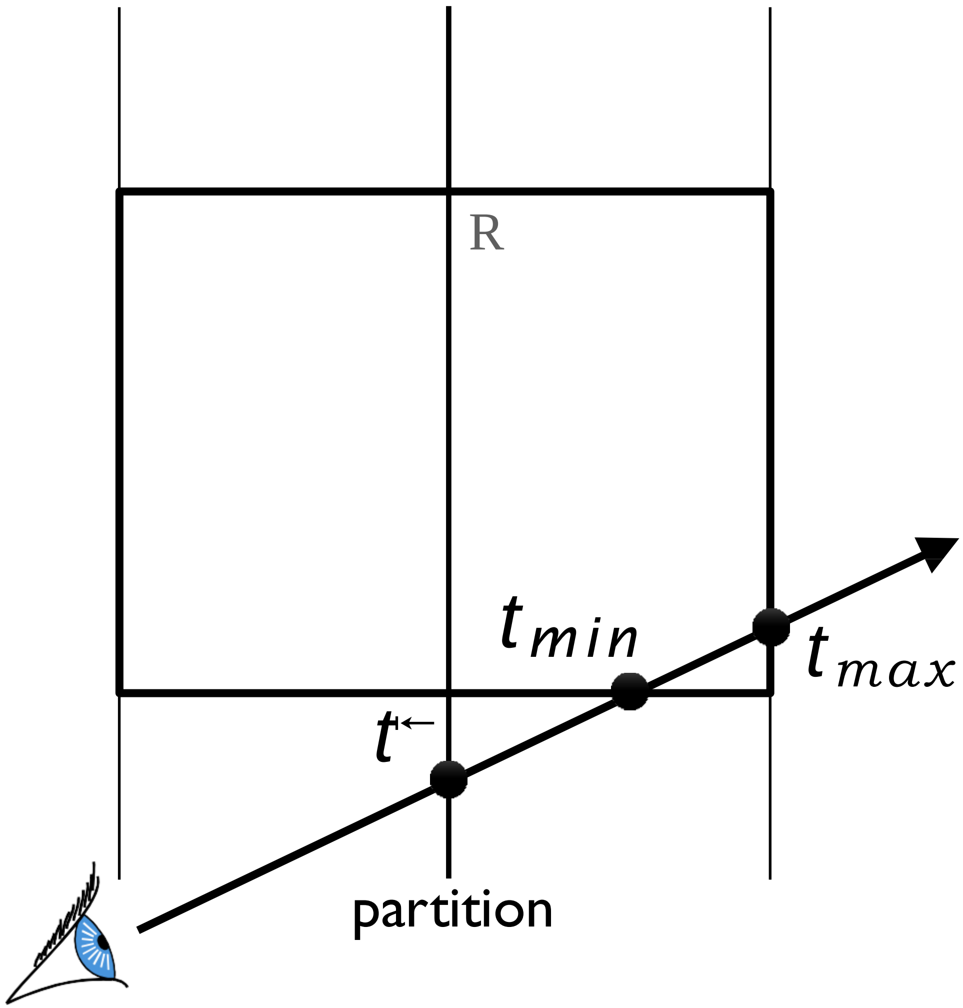
# KD-tree : parcours récursif

$t_{max} <\ \ t^{\leftarrow})$   Intersect(L,$t_{min}$,$t_{max}$)



# KD-tree : parcours récursif

$t_{\leftarrow} < t^{min}$ ) Intersect(R, $t_{min}$, $t_{max}$)



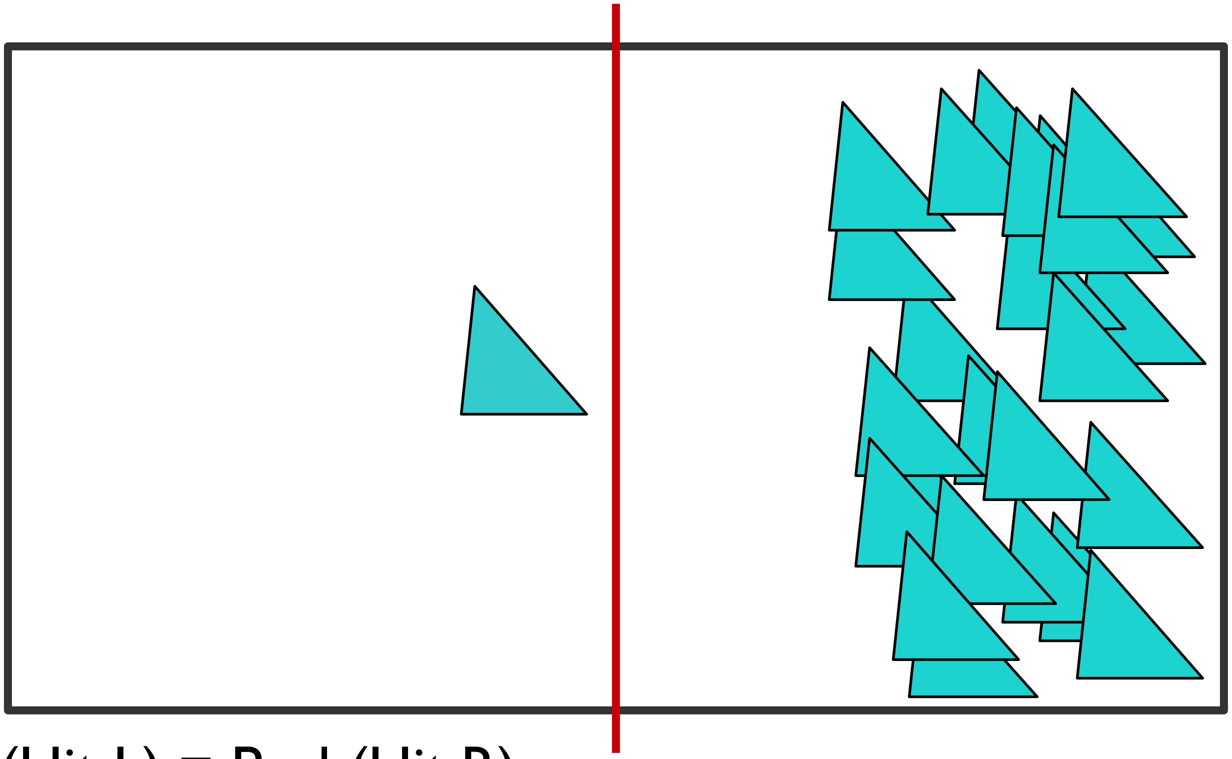
# KD-tree : construction

**Algo « naïf »**

- Axe de coupe : le long de la plus grande dimension
- Position de coupe : au centre ou médian de la géométries (arbre équilibré)
- Critère d'arrêt : nombre de primitives, profondeur max.

# KD-tree : construction

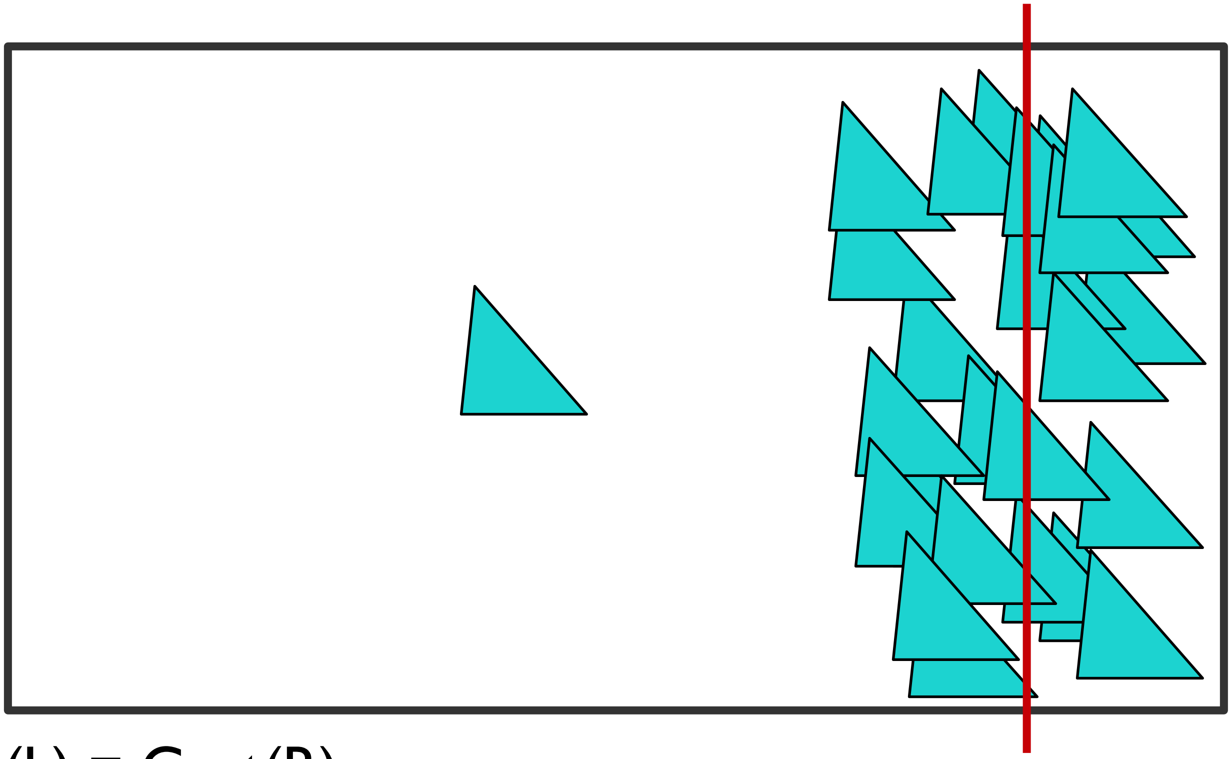
## Couper au milieu



- Prob(Hit L) = Prob(Hit R)
- Ne prend pas en compte le coût de L & R

# KD-tree : construction

## Couper à la médiane



- Cost(L) = Cost(R)
- Ne prend pas en compte les probabilités d'entrer dans L et R

# KD-tree : construction

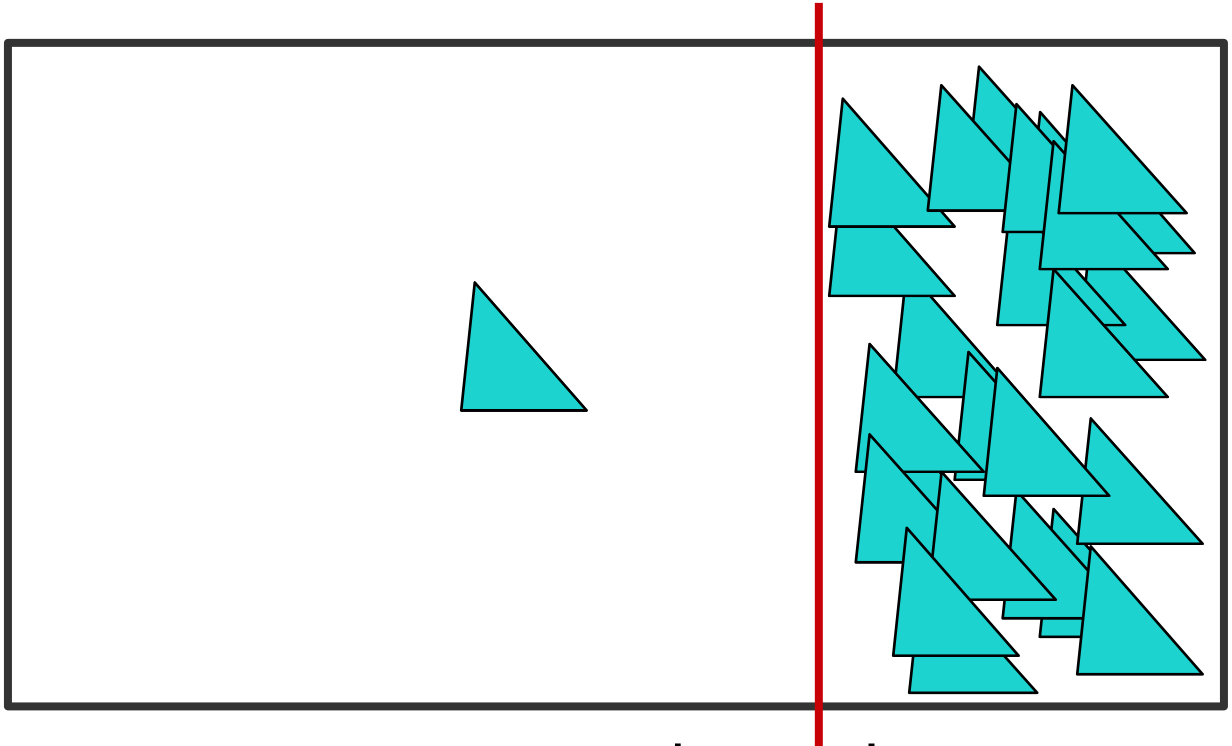
## Algo « intelligent »

- Objectif : choisir le plan de coupe qui rend le tracé de rayon le moins couteux possible
- Définir un modèle de coût et le minimiser
- Quel est le coût de tracer un rayon au travers d'une cellule ?

Cost(cell) = C_trav + Prob(hit L) x Cost(L) + Prob(hit R) x Cost(R)

# KD-tree : construction

## Optimisation de la fonction de coût



- Isole automatiquement et rapidement les zones complexes
- Génère de grands espaces vides / concentre les primitives dans de petits nœuds

# KD-tree : construction [MacDonald and Booth 1990]

**Probabilité de rentrer dans une cellule**

$\Longrightarrow$ proportionnel à l'aire de la surface de la cellule (SA)

**Coût de parcours d'une cellule**

$\Longrightarrow$ nombre de triangles (TriCount)

Cost(cell) = C_trav + Prob(hit L) x Cost(L) + Prob(hit R) x Cost(R)
= C_trav + SA(L) x TriCount(L) + SA(R) x TriCount(R)

**Critère d'arrêt**

$\Longrightarrow$ quand subdiviser ne réduit plus le modèle de coût (seuillage)

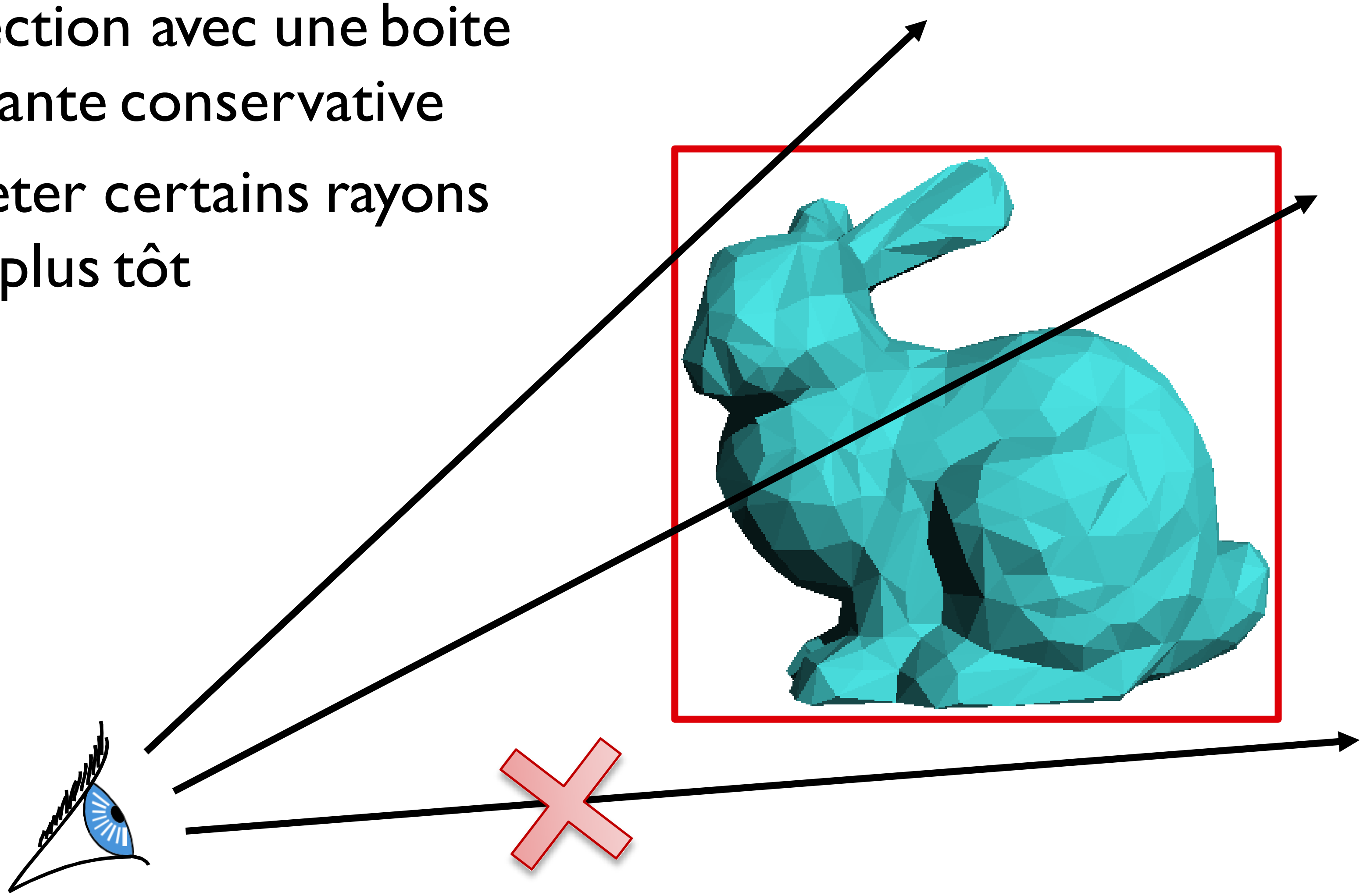
**Résultats**

$\Longrightarrow$ un « bon » KD-tree est de 2 à 5 fois plus rapide

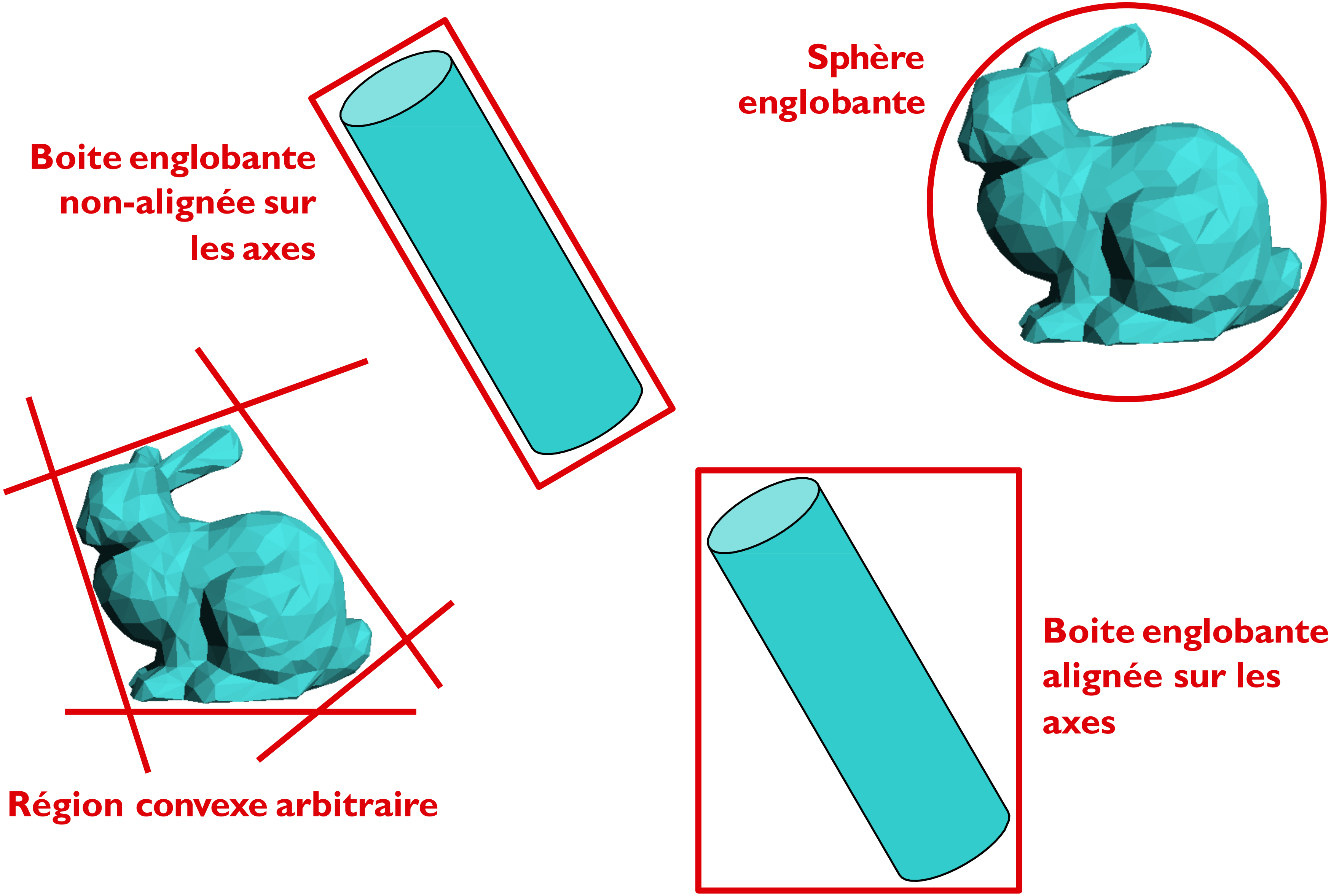
# Boites englobantes

Intersection avec une boite englobante conservative

$\Longrightarrow$ rejeter certains rayons au plus tôt

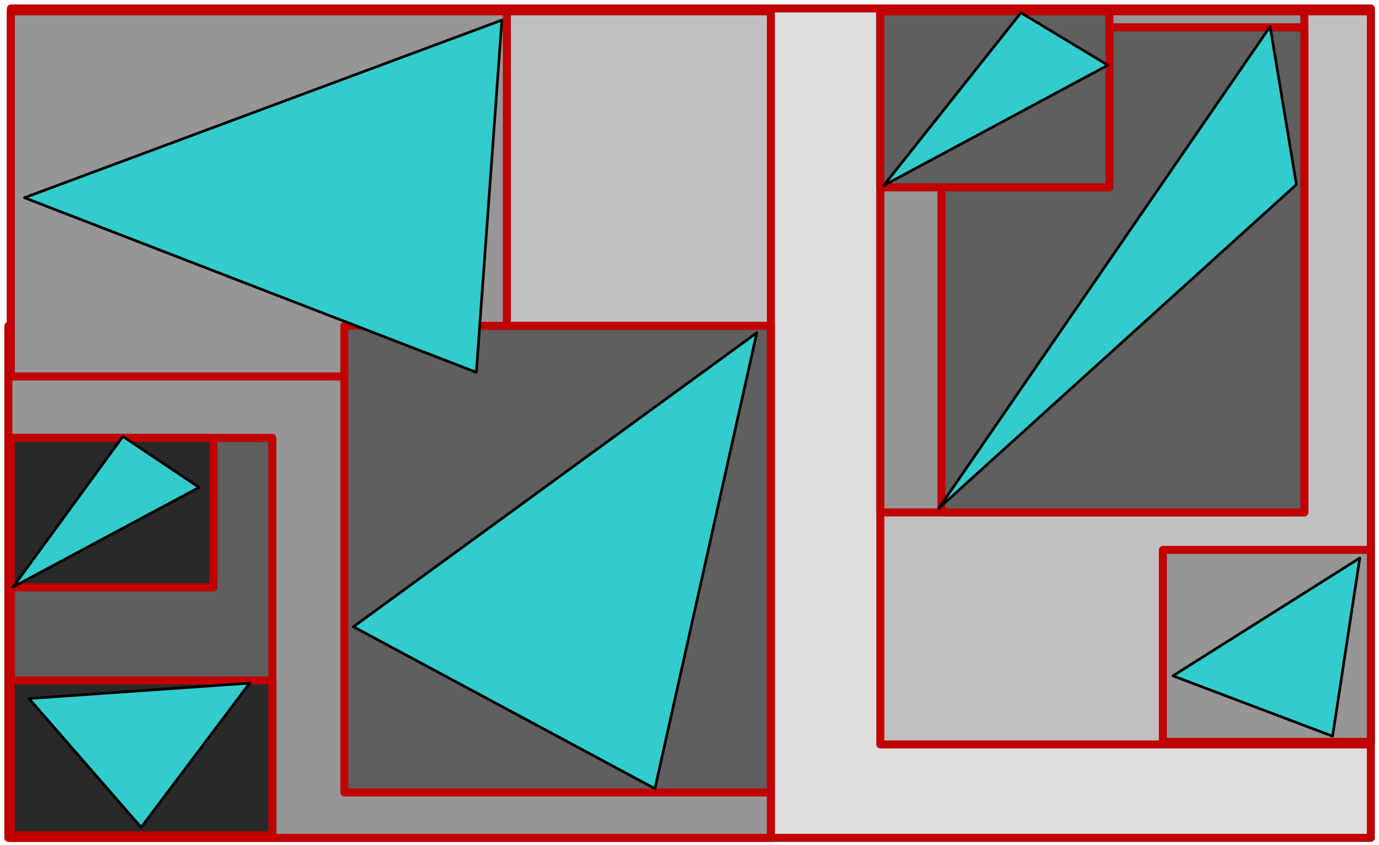


# Boites englobantes



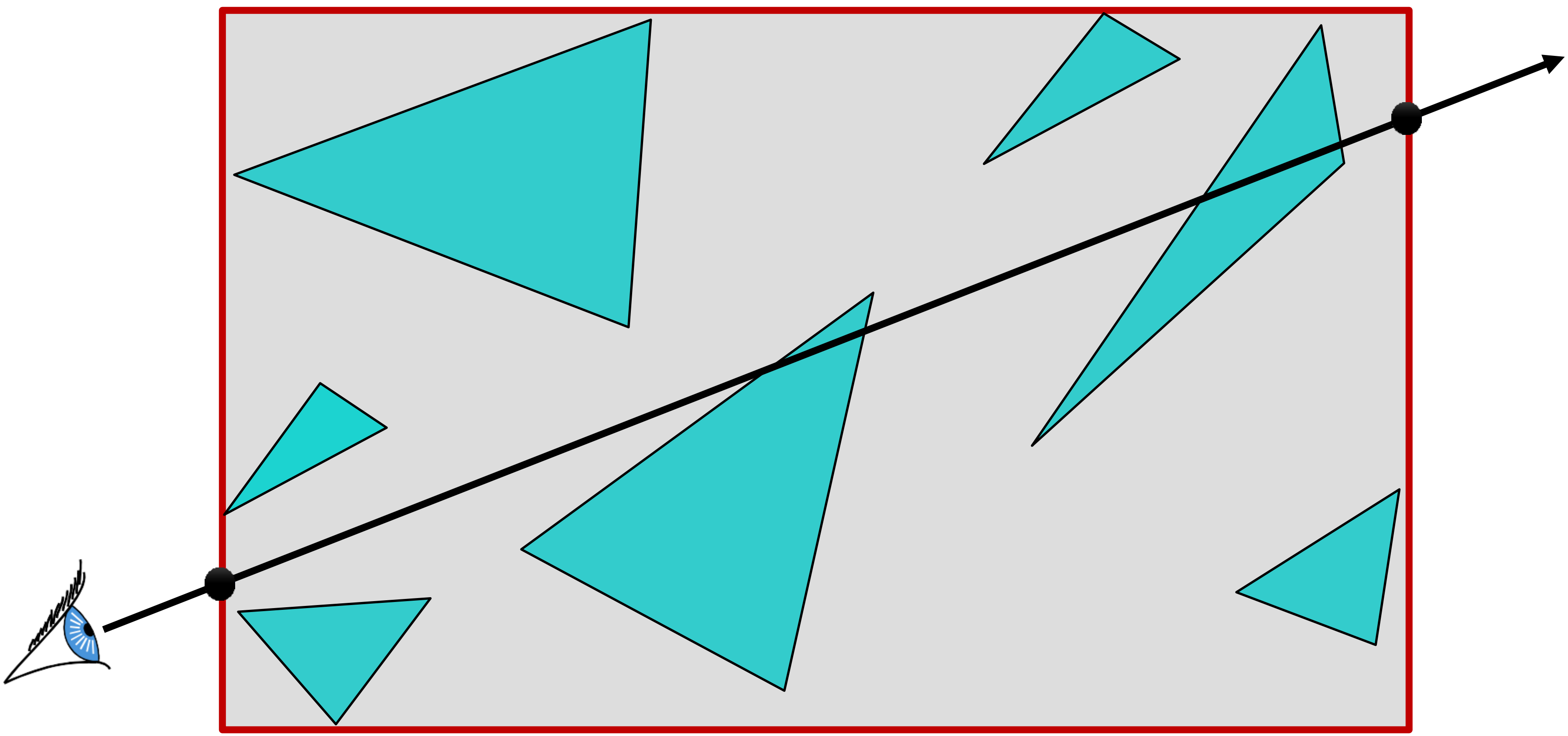
# Hiérarchie de boites englobantes

**BVH = KD-tree avec 1 boîte par nœud**



# BVH : intersection

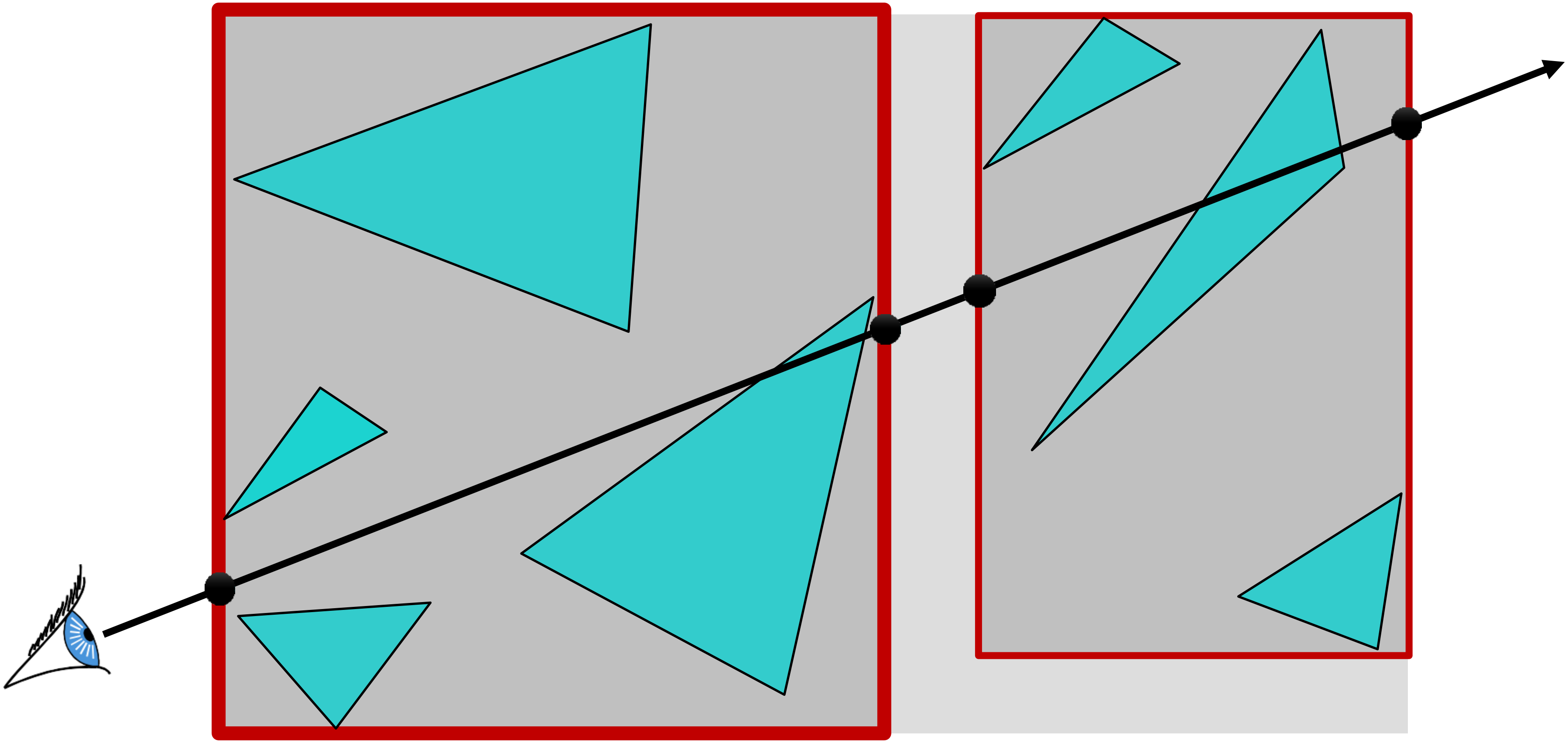
**Tester la boîte parente**



# Hiérarchie de boites englobantes

**Si Intersection,descendre sur les fils**

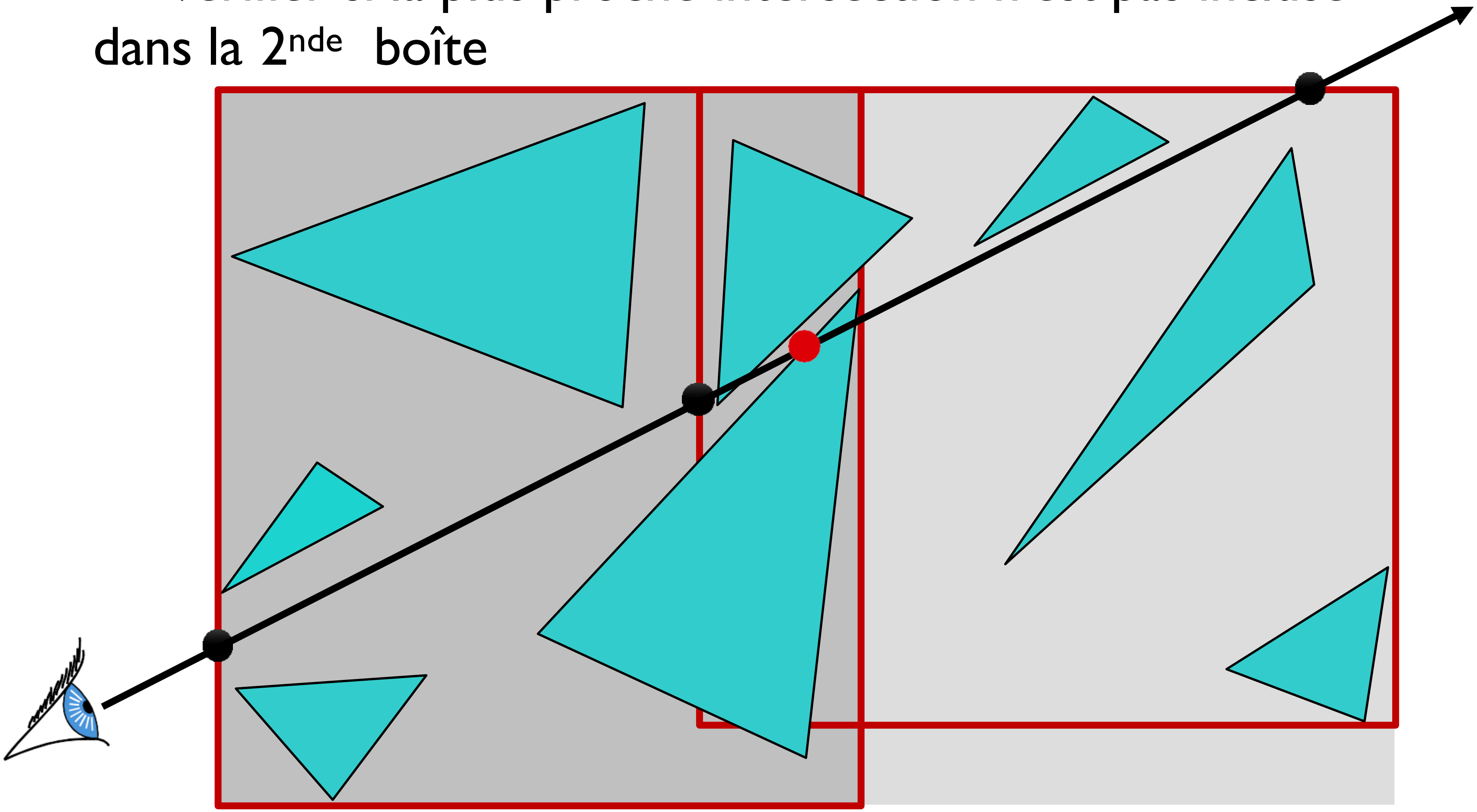
**Tester la boîte avec l'intersection la plus proche**



# Hiérarchie de boites englobantes

**Attention, les boîtes peuvent se superposer !**

$\Longrightarrow$ vérifier si la plus proche intersection n'est pas incluse dans la 2nde boîte



# Comparaison

## KD-tree

- léger en mémoire (si bien codé)
- parcours simple et rapide
- construction optimale plus facile

## BVH

- arbre moins profond
- permet de décaler légèrement un objet sans avoir à reconstruire entièrement l'arbre

## Conclusion

- Scènes statiques $\Longrightarrow$ KD-tree
- Scènes dynamiques $\Longrightarrow$ BVH

  (les préférences semblent converger vers le tout BVH)

# Lancer de rayon cohérent

**Idée :** 2 rayons proches ont de fortes chances d'intersecter la même primitive

- Tracer des paquets de KxK rayons en même temps (e.g., 8x8)
- Amortissement du coût de traversée de l'arbre
- Permet d'exploiter au mieux les instructions SIMD (e.g., SSE)
- Réduit les défauts de cache

**Gros facteur d'accélération (~ x10)**

**Attention aux rayons secondaires !**

(vectorisation par rayon préférable)


[Wald et al. EG 2001]

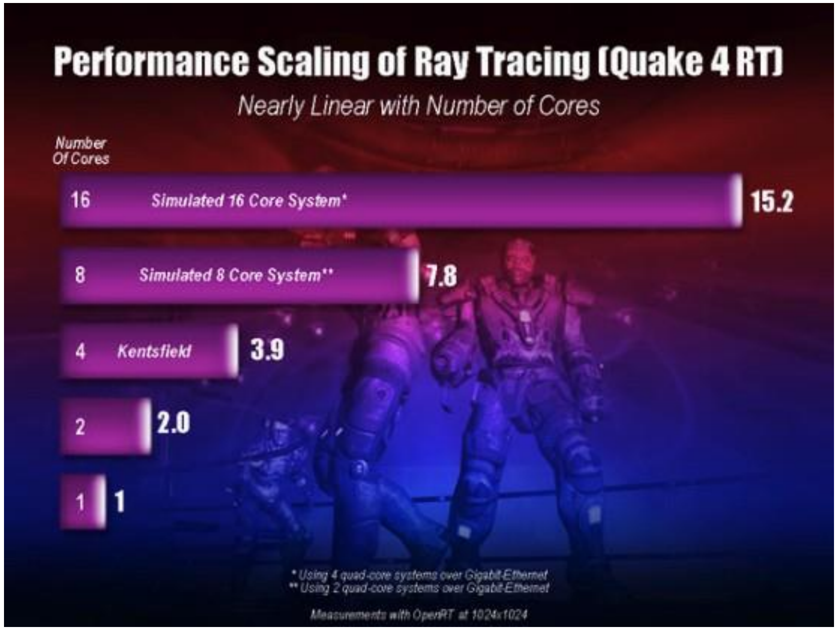
# Parallélisation

Plusieurs possibilités :

- distribution image
- distribution scène
- distribution rayon / fonctionnelle

Dépend de l'architecture de la machine, souvent combinaison des 3 !

Exemple
(quake4 RT, distribution image)



# Cohérence + Parallélisation

Exemple :

**Intel Embree** [Wald et al. Siggraph2014]

Kernels bas-niveau optimisés +API

# Lancer de rayon temps réel

## Exploitation des GPU

Structures de données sophistiquées

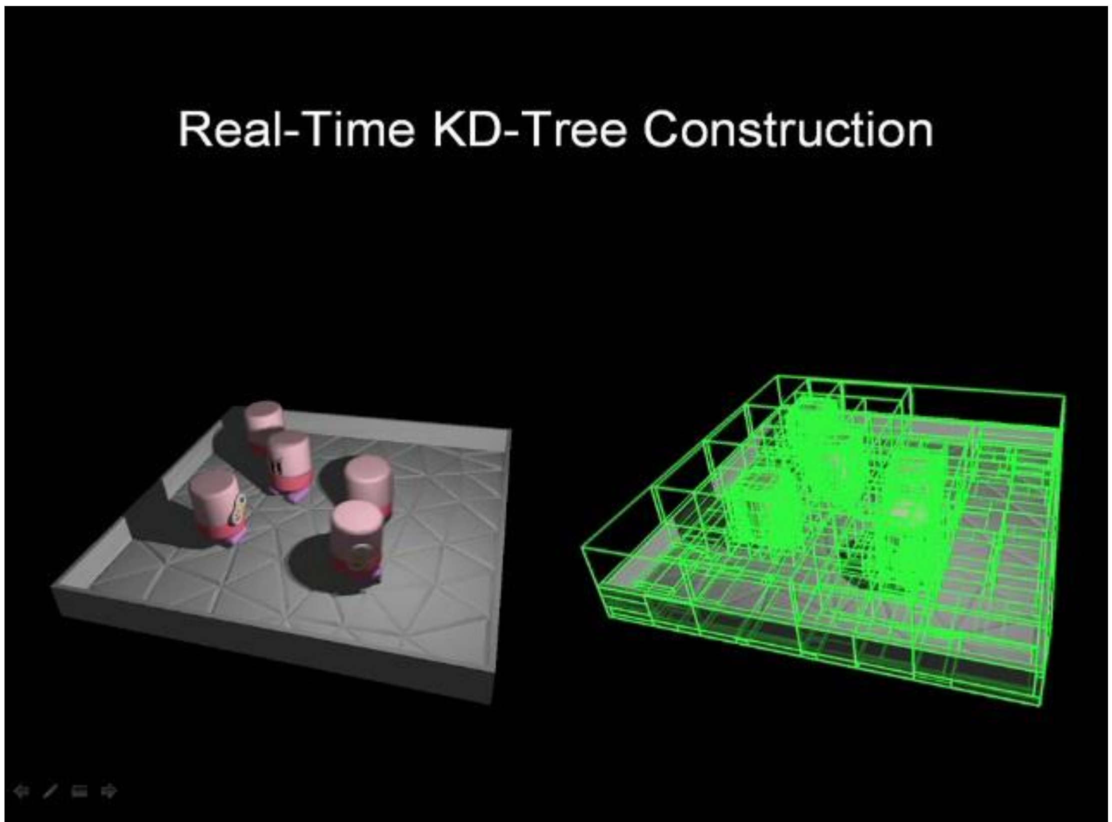
- Peu adaptées aux GPU des générations précédentes
- OK pour les GPU les plus récents, et futures

# KD-tree GPU

**Scènes animées :**

*Real-Time KD-Tree Construction on Graphics Hardware*

Zhou et al. SIGGRAPH 2008



# BVH GPU

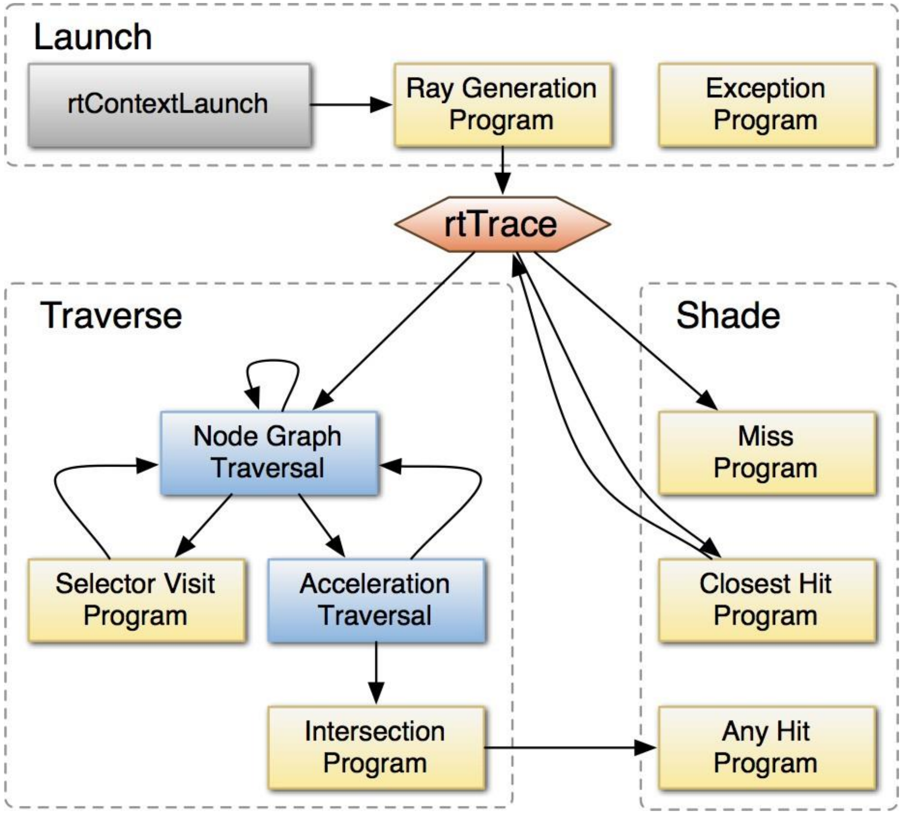
*Fast BVH Construction on GPUs*, Lauterbach et al., Eurographics 2009

# Lancer de rayon sur GPU

## **Nvidia OptiX** [Parker et al. Siggraph 2010]

bibliothèque bas-niveau destinée aux développeurs

- structure de données :*BVH
- génération des rayons
- entièrement configurable




## **Autres**

- Lightworks : basé sur OptiX
- Arion : GPU(CUDA)/CPU
- OctaneRender (CUDA)
- V-Ray RT (OpenCL)
- …

# Source

**Cours**
**Pierre Benard**
**Jean-Marc Thiery**