Rendu photoréaliste

- SYNT -

Jonathan Fabrizio

jo.fabrizio.free.fr

www.lrde.epita.fr/~jonathan

LRDE - EPITA

2 novembre 2017

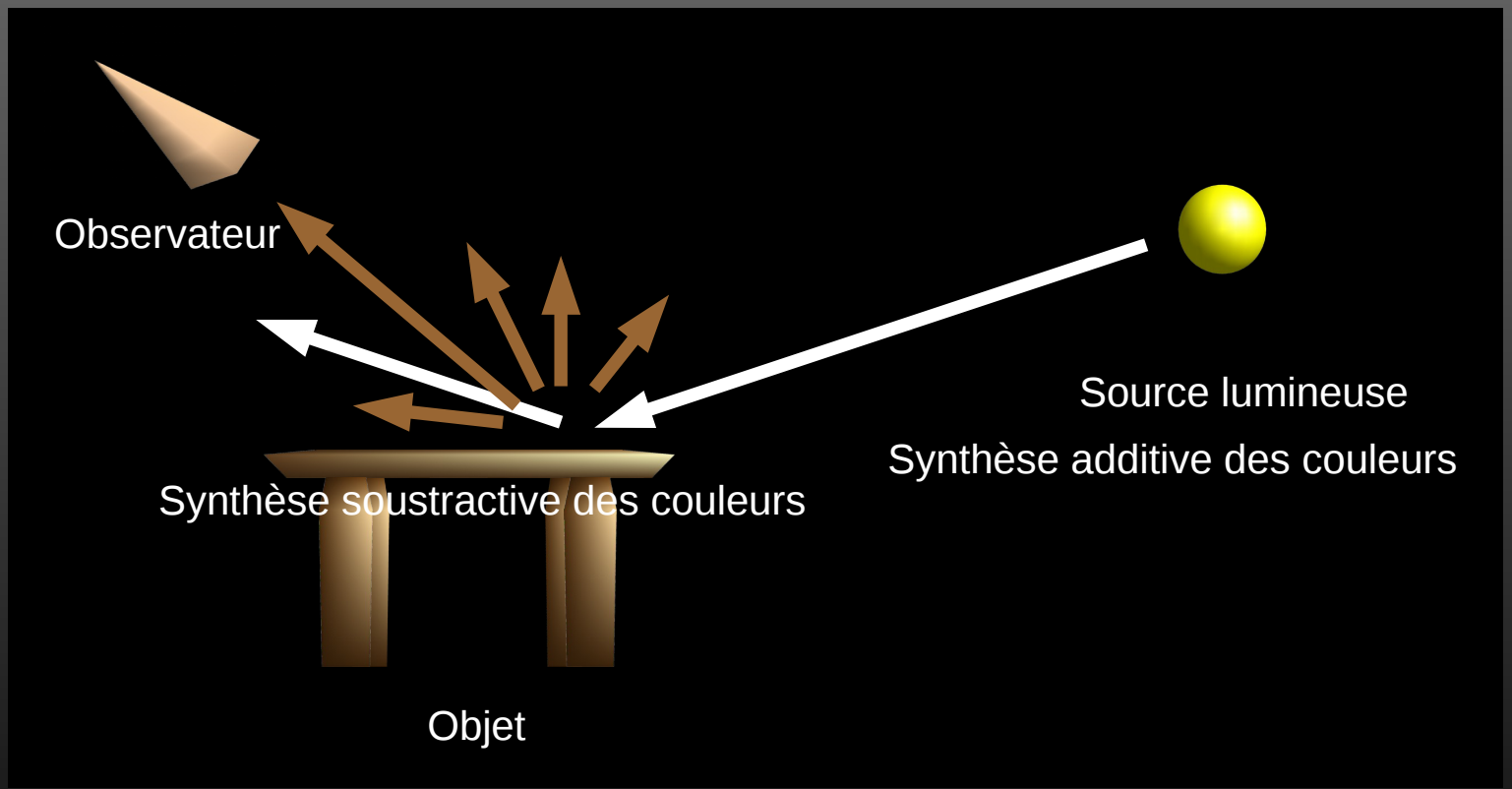
Rendu photoréaliste

- Objectif :
  - Génération d'images réalistes
  - Contrainte de temps faible...
- Stratégies :
  - *Object-based rendering algorithms*
    Illumination globale calculée indépendamment du point de vue
  - *Image-based rendering algorithms*
    Illumination calculée partiellement, en fonction du point de vue
  - *Deterministic rendering algorithms*
  - *Monte Carlo rendering algorithms*

Rendu Photoréaliste

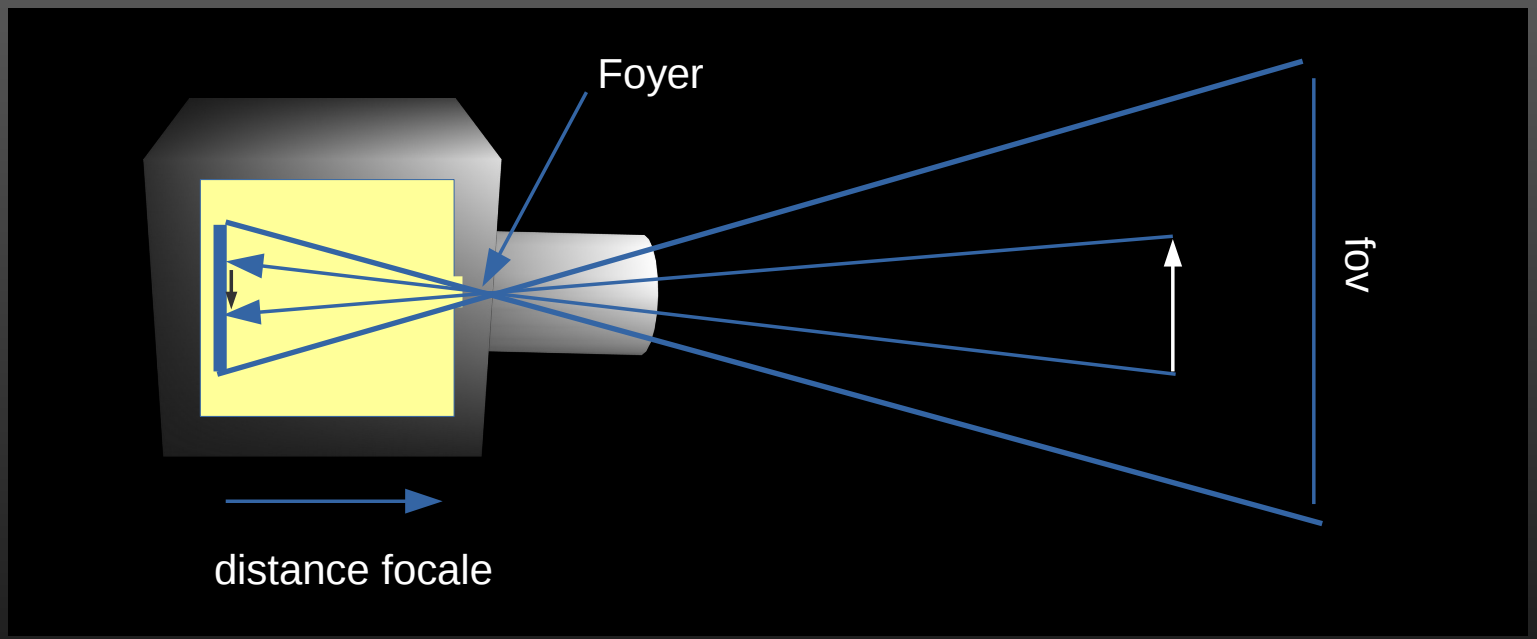
- *Raytracing*
- *Path Tracing* et *Bidirectional Path Tracing*
- *Point-Based Global Illumination - PBGI*
- ...
- *Radiosity*
- *Photon map*
- ...

Formation de l'image



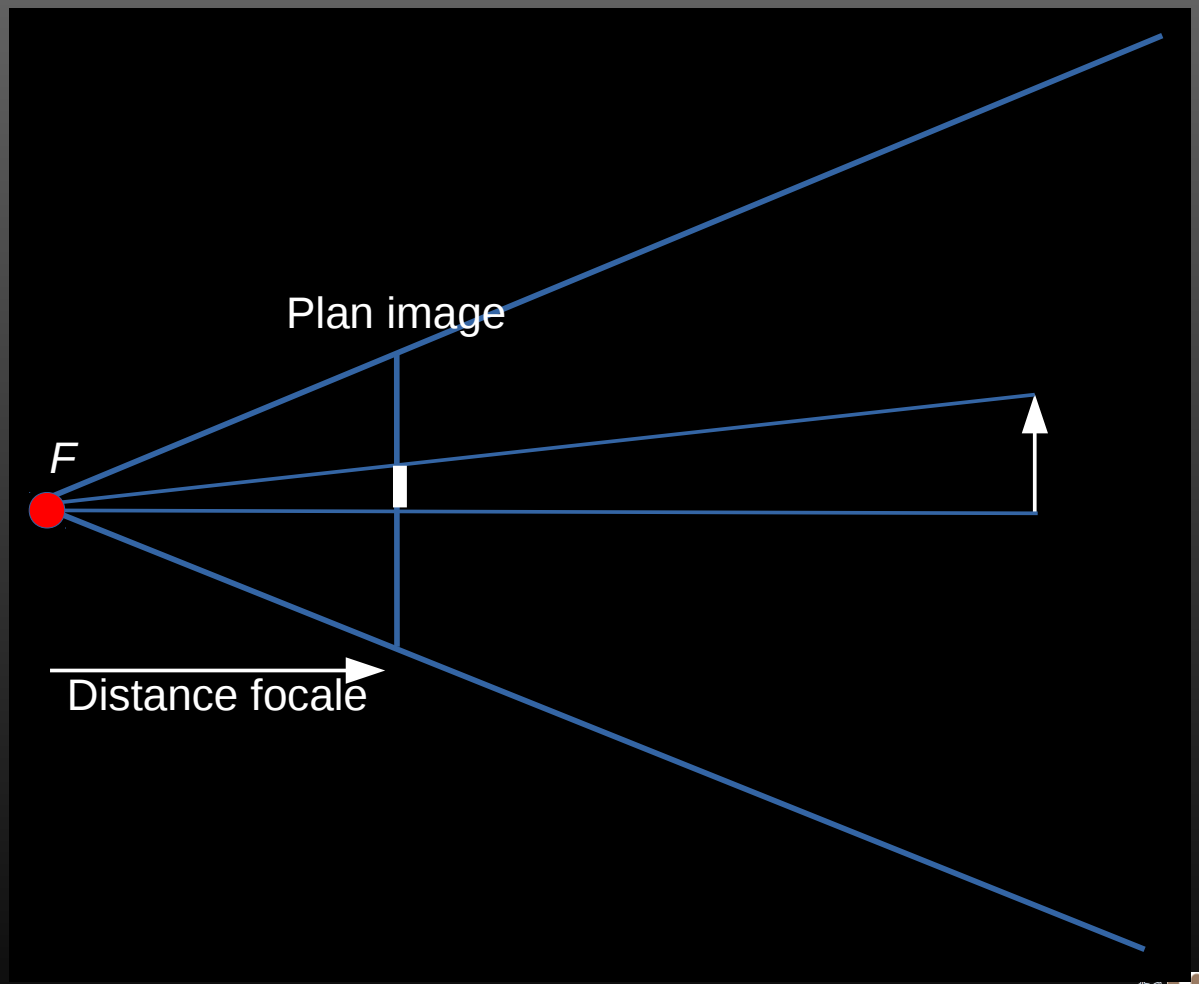
Formation de l'image

Capture de l'image



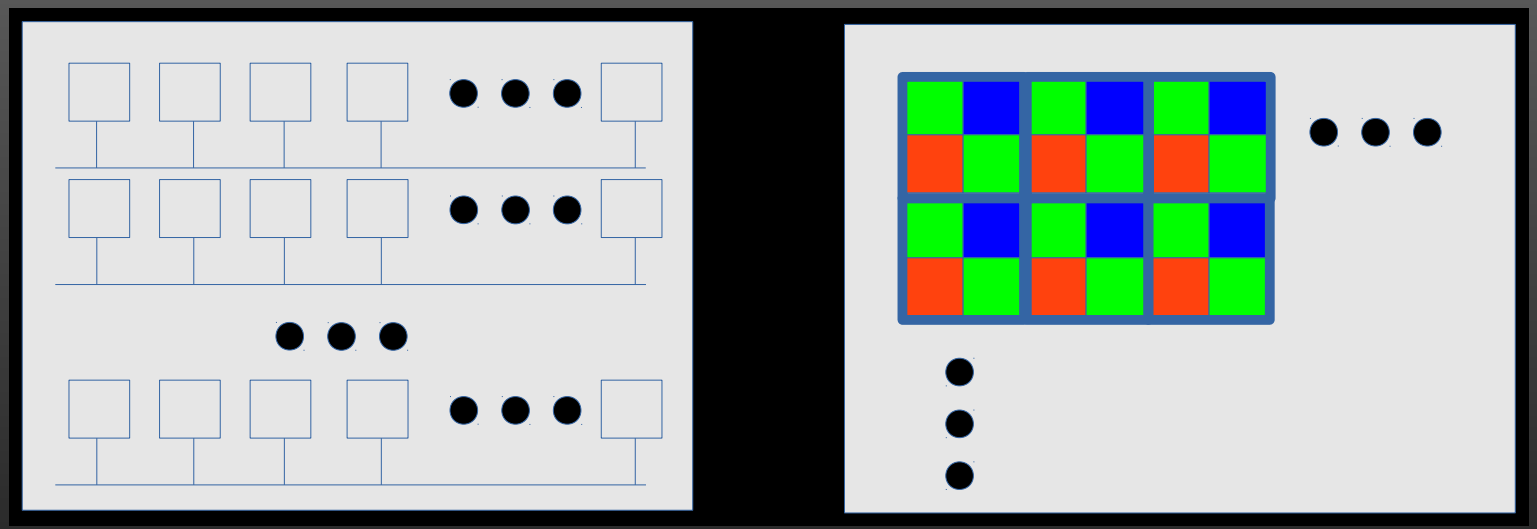
Formation de l'image

Le modèle sténopé :



Formation de l'image

Capture de l'image (capteur CCD, CMOS)



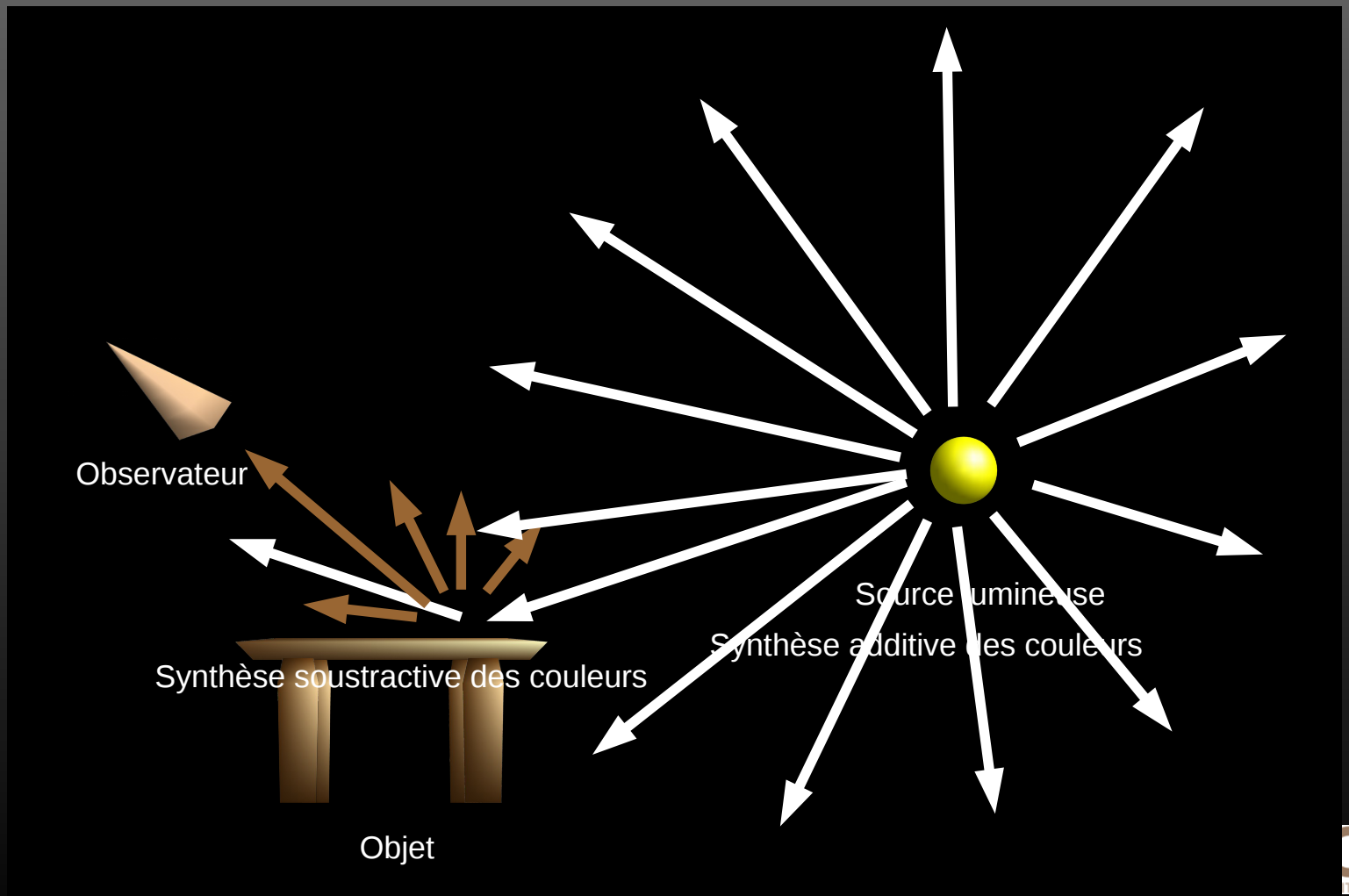
Dans notre cas nous pouvons faire passer des rayons avec différentes longueurs d'onde par le même point

Rendu photoréaliste

- On peut facilement modéliser la caméra
- Il faut réussir à modéliser l'éclairage
  - Idée : «suivre» les rayons lumineux pour trouver le chemin parcouru depuis la source lumineuse, jusqu'à l'œil.

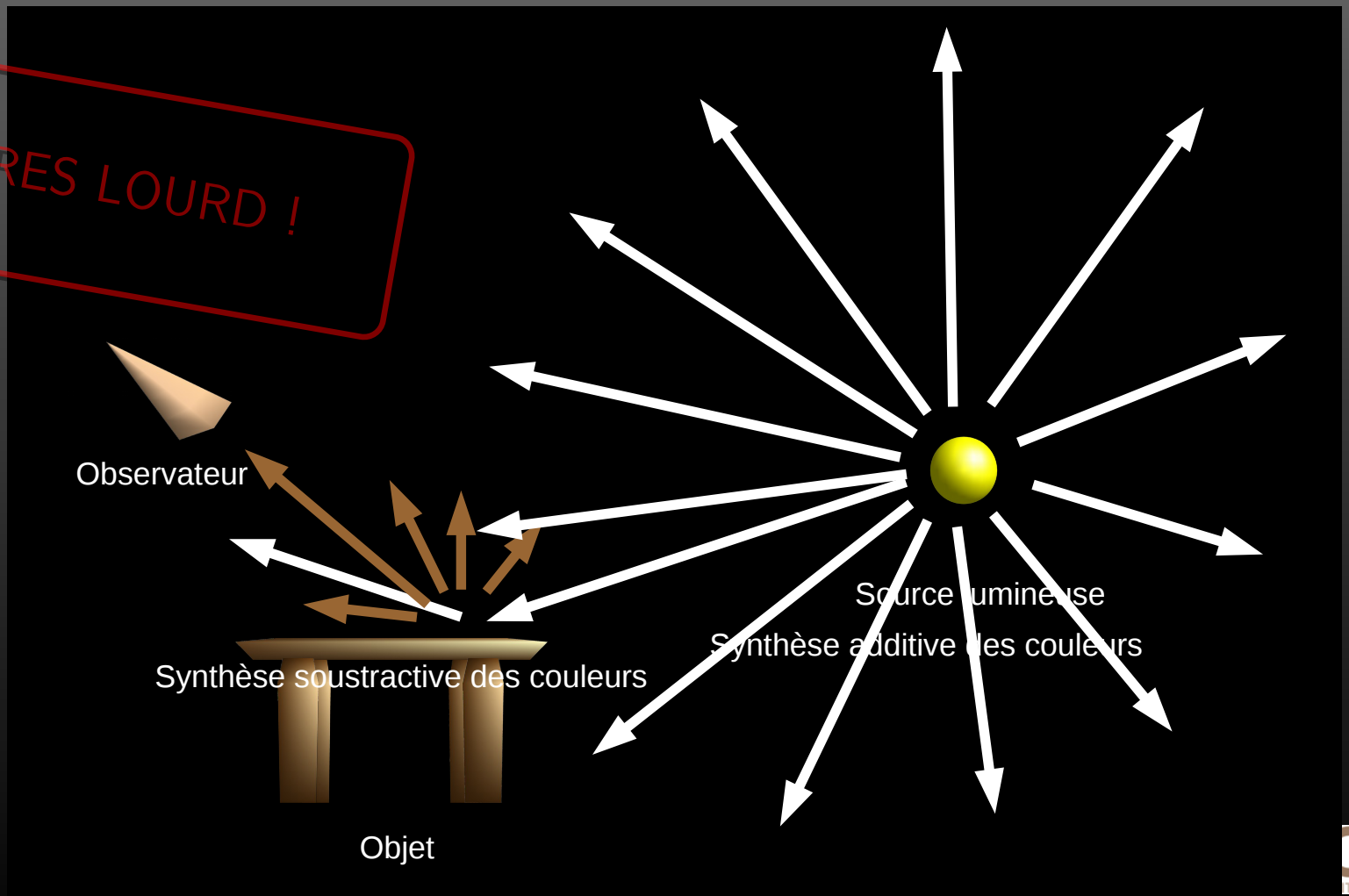
Rendu photoréaliste

- Principe : Lancer une “infinité” de rayons depuis la source pour espérer trouver ceux qui frappent l’œil de l’observateur



Rendu photoréaliste

- Principe : Lancer une “infinité” de rayons depuis la source pour espérer trouver ceux qui frappent l’œil de l’observateur



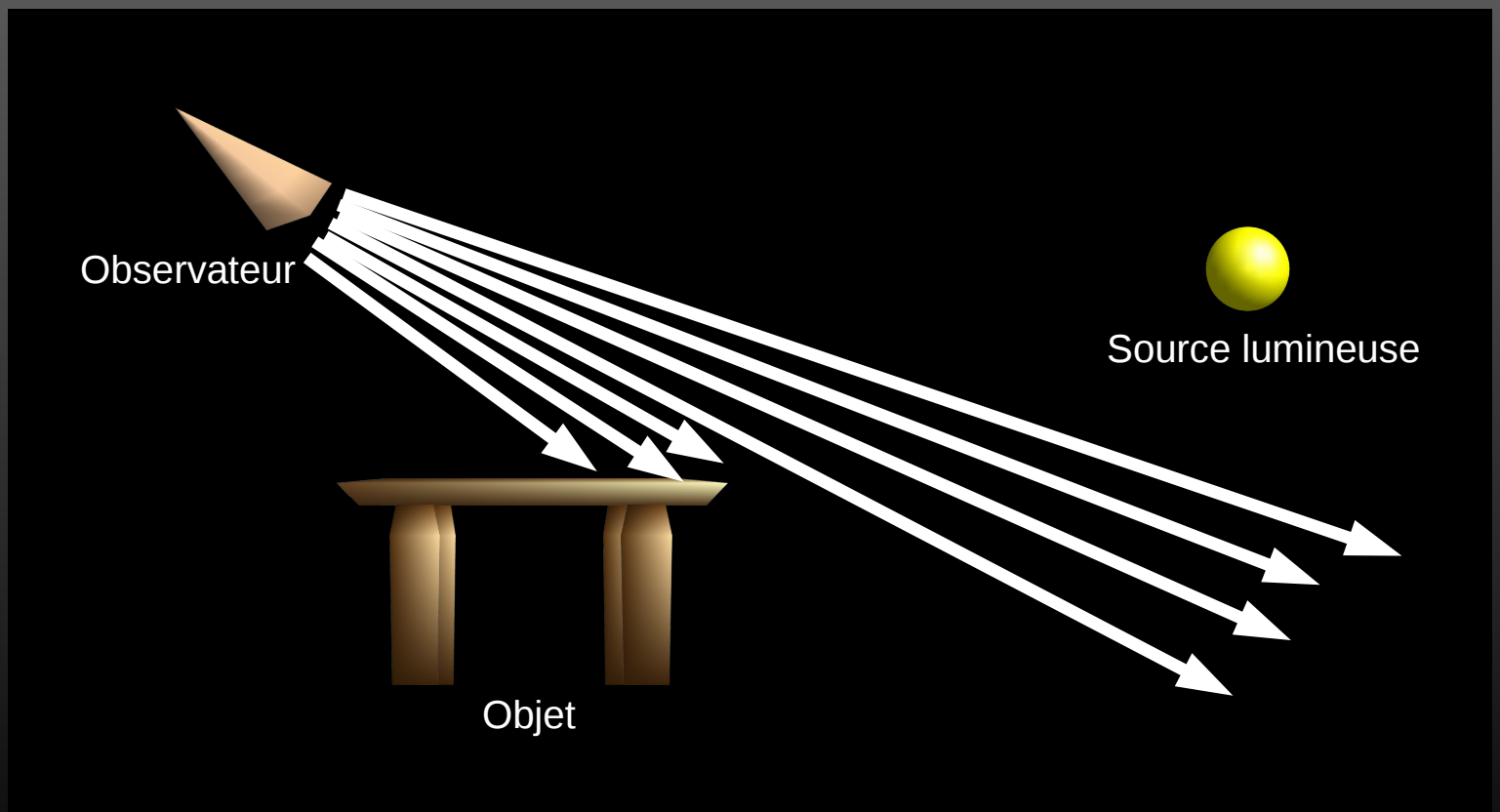
Le *Raytracing*

Raytracing

- Historique
  - 68, Appel (du *raycasting* ? ?),
  - 80, Whitted (ajoute les effets optiques : reflexion, transparence...).
- Principe
  - Idée de base : Difficile de suivre tous les rayons partant de la source en revanche il est possible d'estimer le chemin inverse.

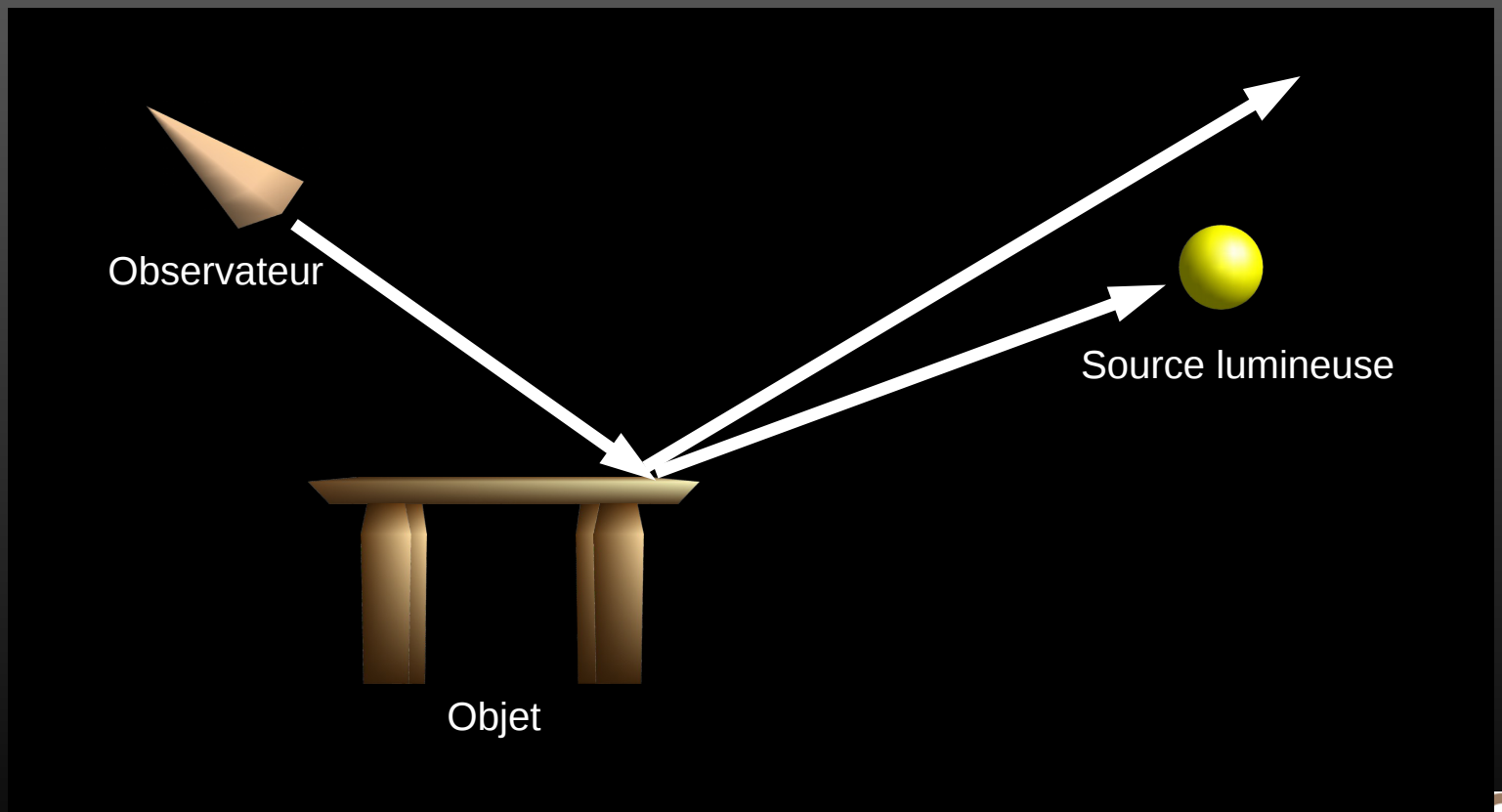
Raytracing

- Principe
  - Faire le chemin inverse pour trouver les objets «vus»



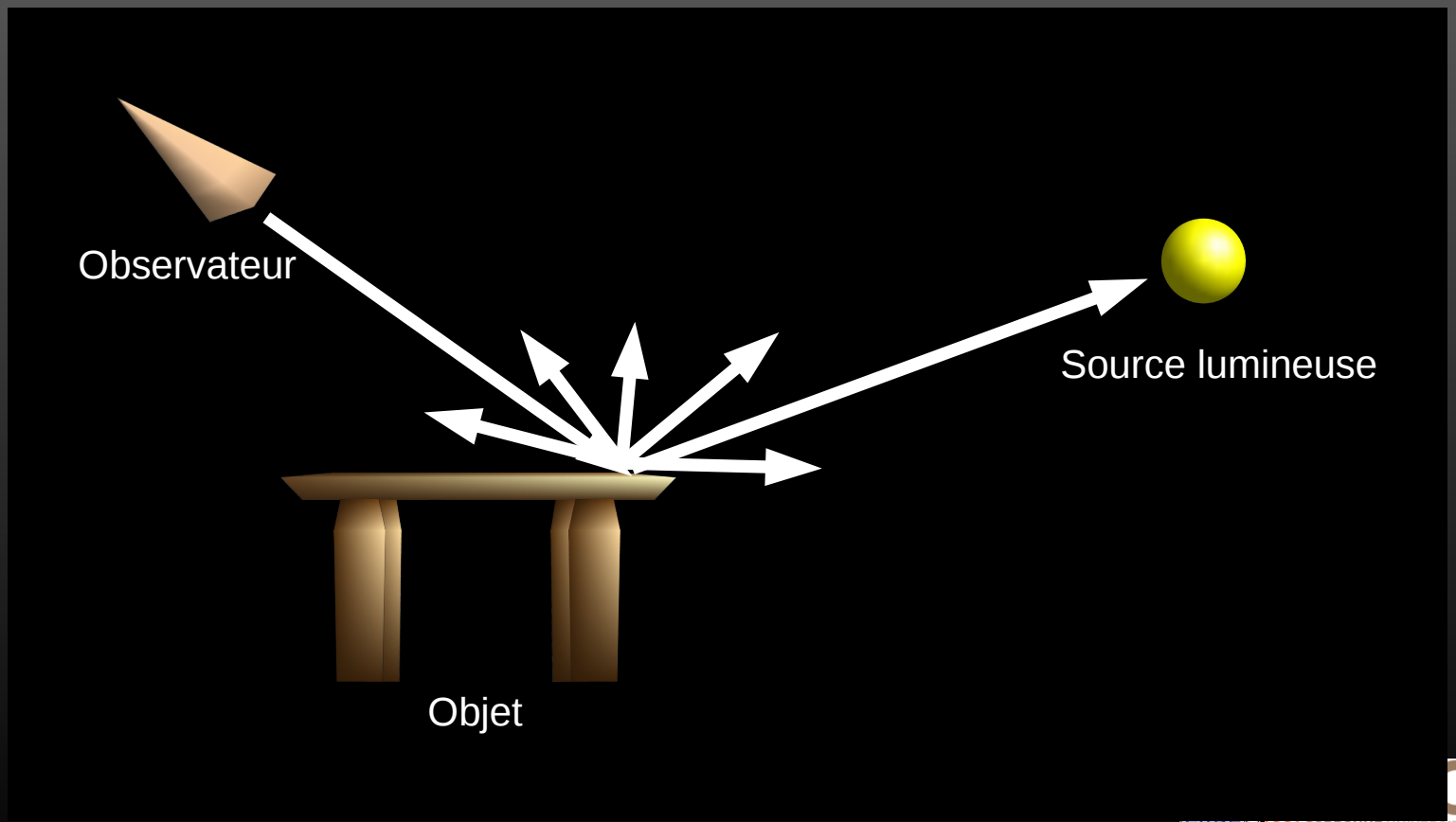
Raytracing

- Principe
  - Pour chaque objet vu, on peut estimer une approximation de l'éclairage local



Raytracing

- Principe :
  - Approximation de deux types de contributions :
    - la partie diffuse
    - la partie spéculaire

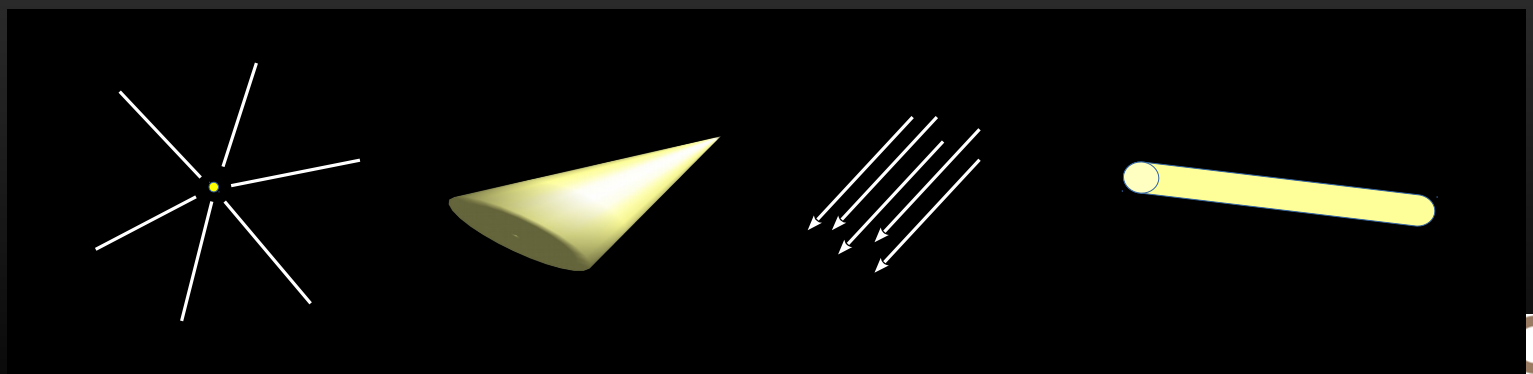


Raytracing

- Calcul de l'illumination locale :
  - Composante diffuse
  - Composante spéculaire
  - Apport des sources primaires
  - Apport des sources secondaires

Raytracing

- Calcul de l'illumination locale :
  - Composante diffuse
  - Composante spéculaire
  - Apport des sources primaires
  - Apport des sources secondaires
- Source primaires :
  - Lumières ponctuelles
  - Spots
  - Lumières directionnelles
  - Objets lumineux

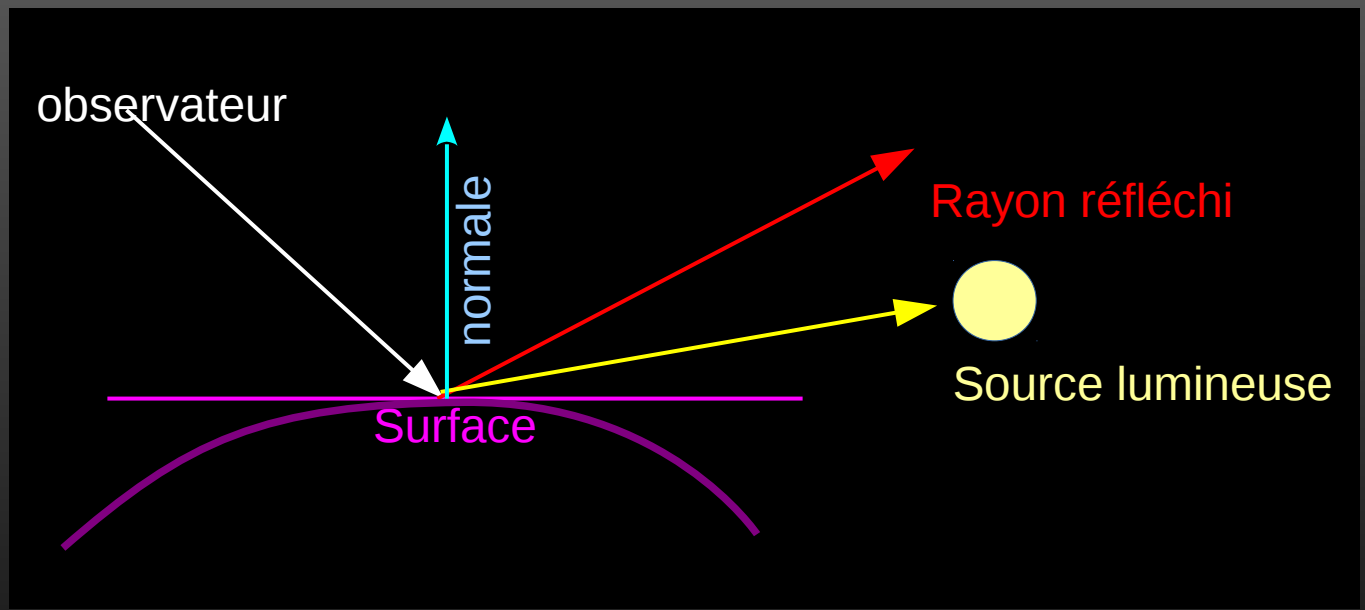


Raytracing

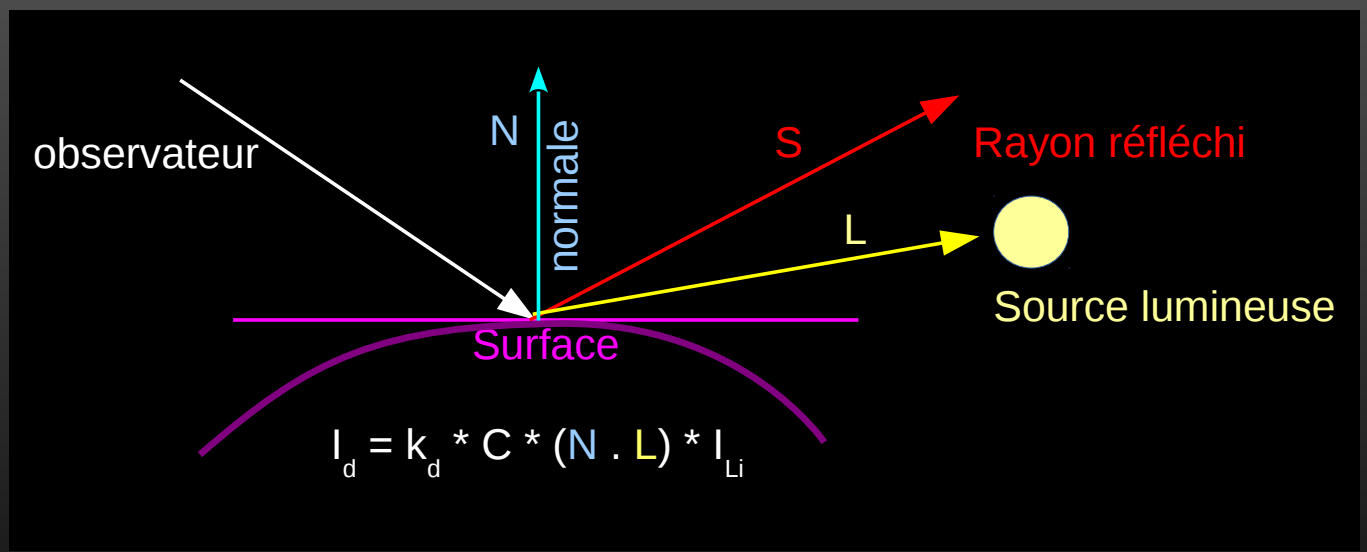
- Calcul de l'illumination locale :
  - Composante diffuse
  - Composante spéculaire
  - Apport des sources primaires
  - Apport des sources secondaires
- Source secondaires :
  - Les autres objets éclairés

Raytracing

- Modèle local

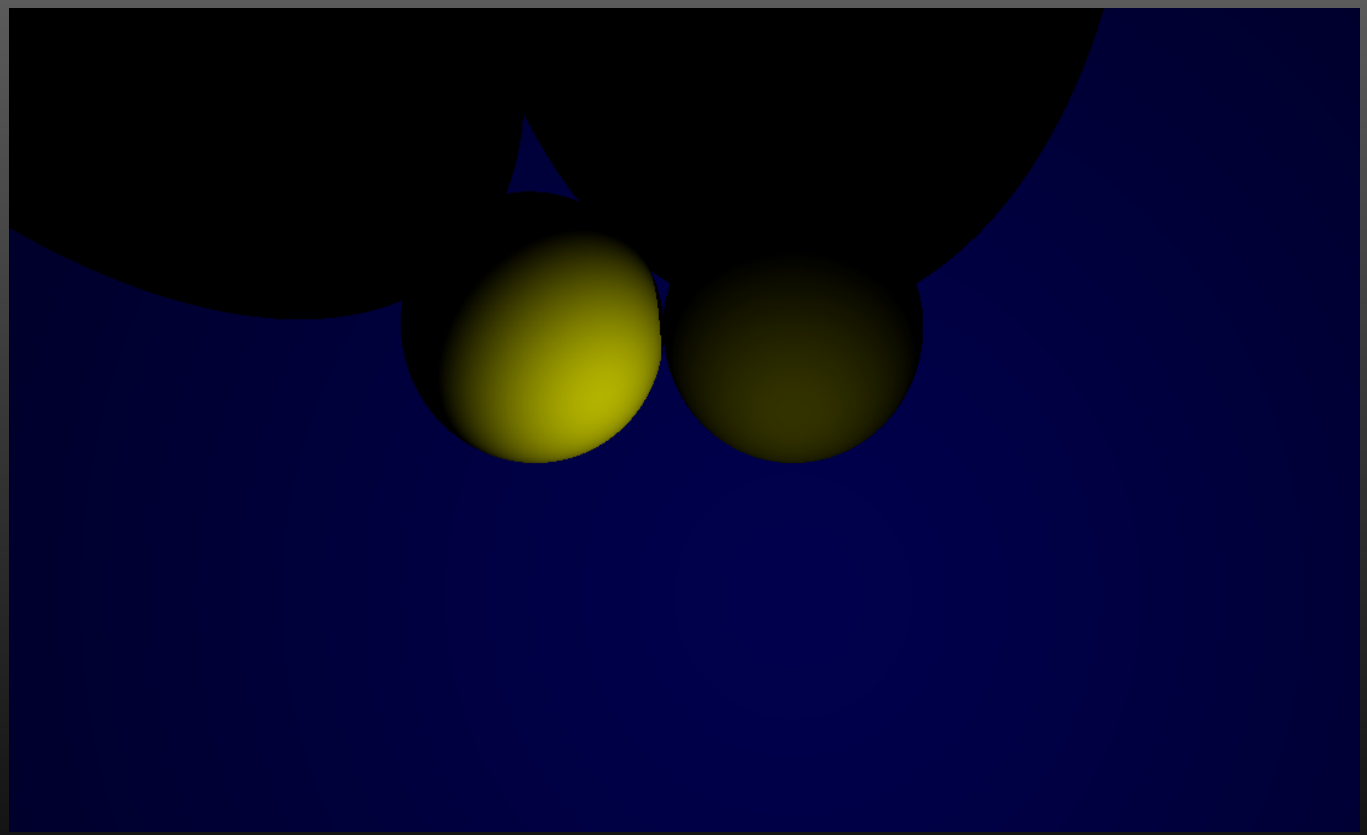


- La composante diffuse
  - La propriété de diffusion de la surface est k_d
  - La couleur de la surface est C

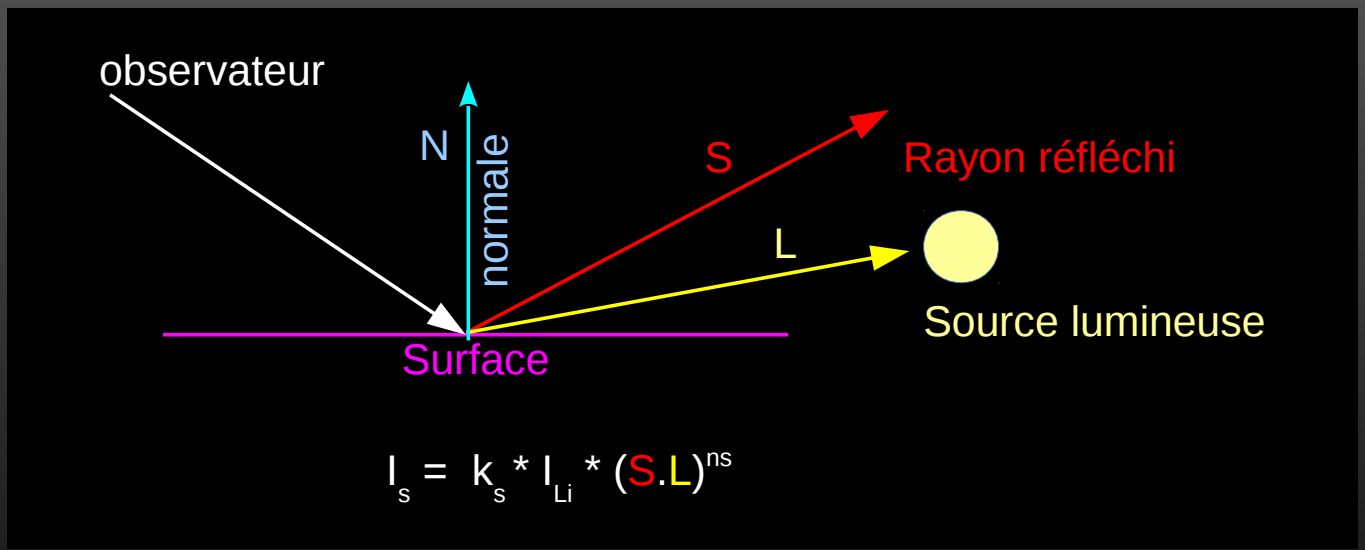


Raytracing

- La composante diffuse

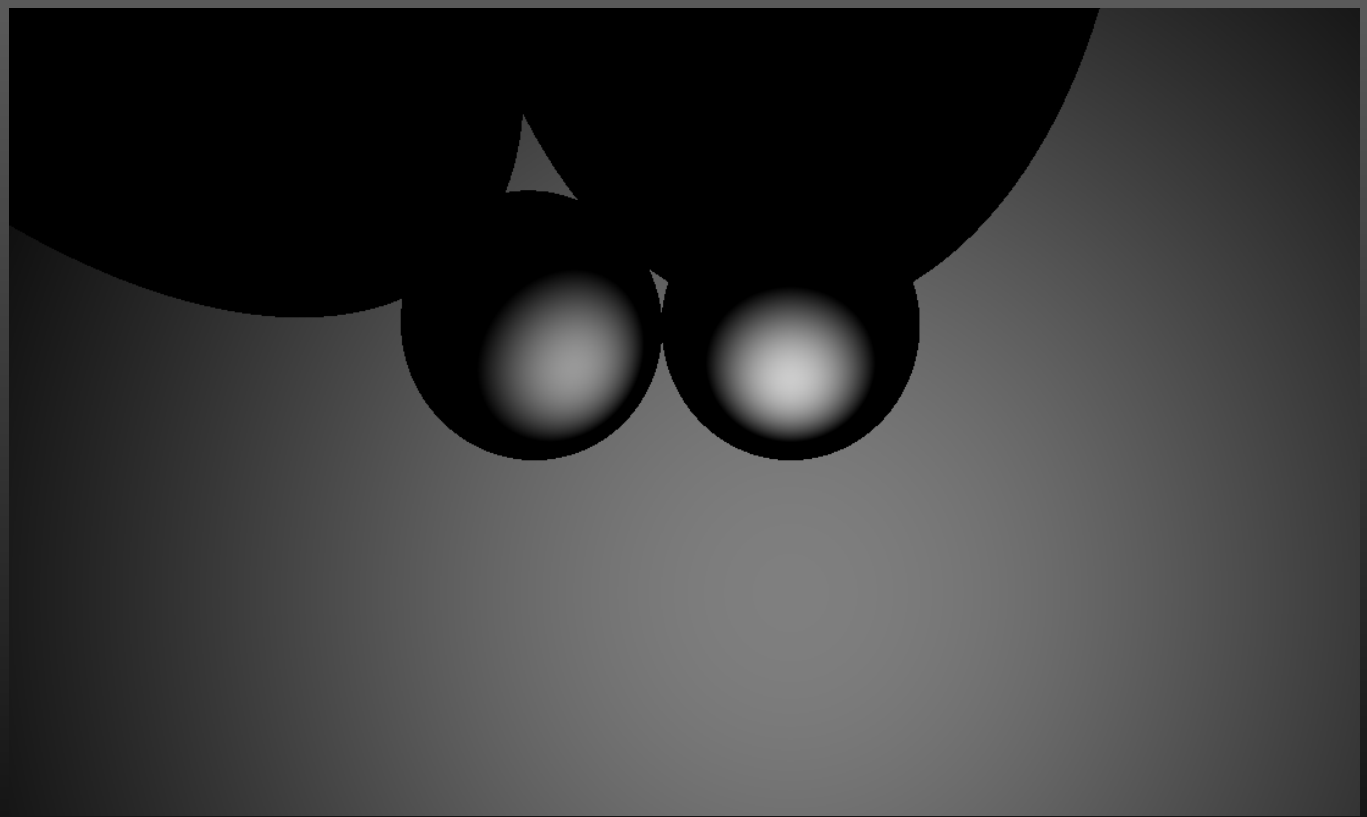


- La composante spéculaire
  - La propriété de réflexion de la surface est k_s

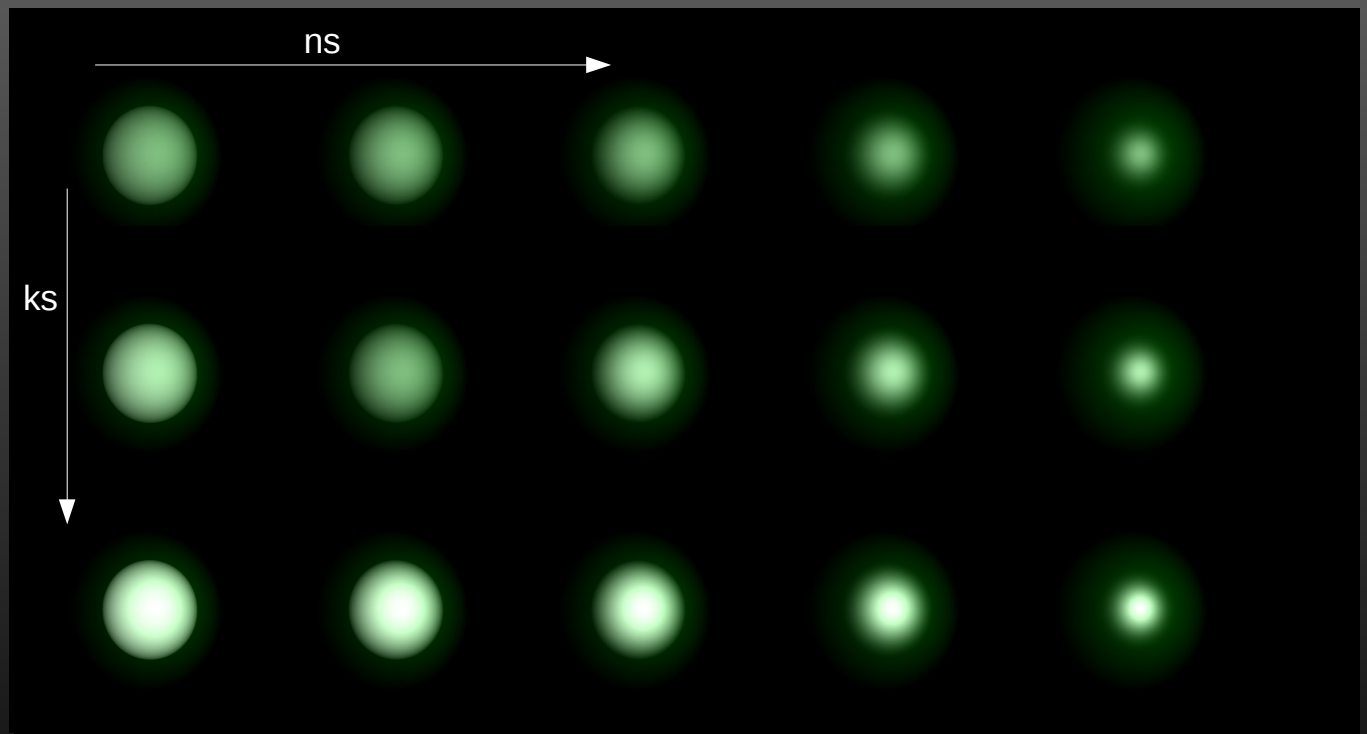


Raytracing

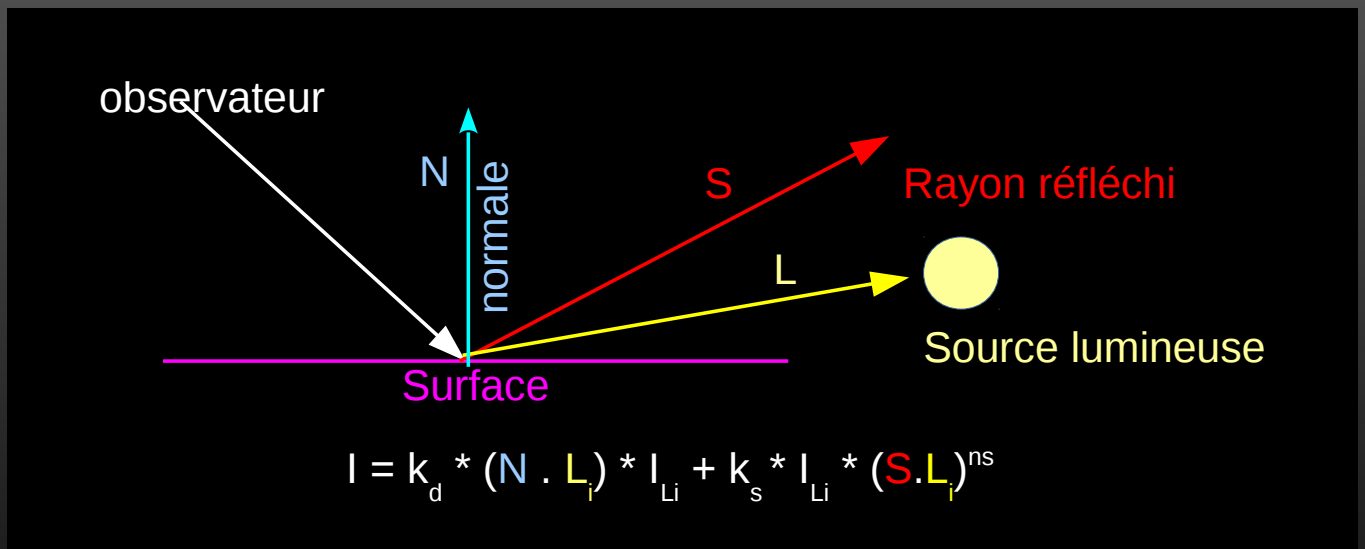
- La composante spéculaire



- La composante spéculaire

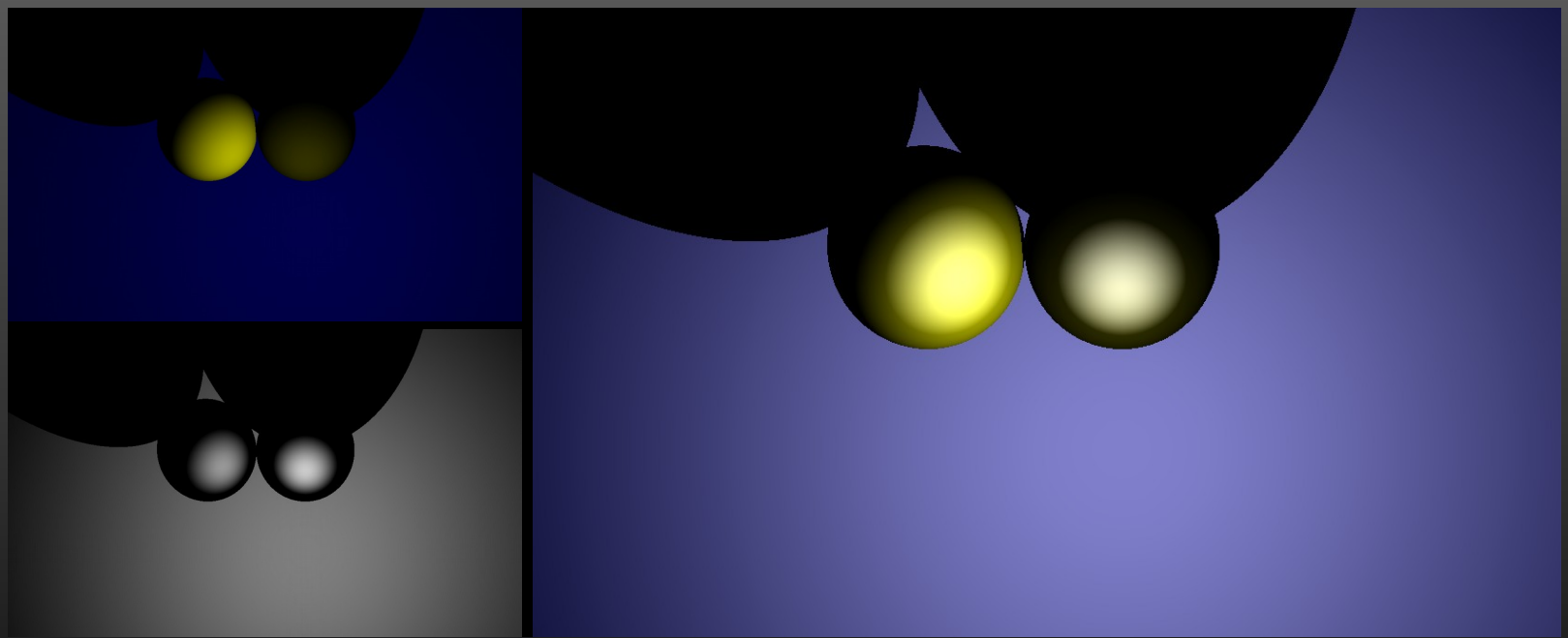


- Calcul de l'illumination locale :
  - Composante diffuse
  - Composante spéculaire
  - Apport des sources primaires
  - Ne tient pas compte des sources secondaires



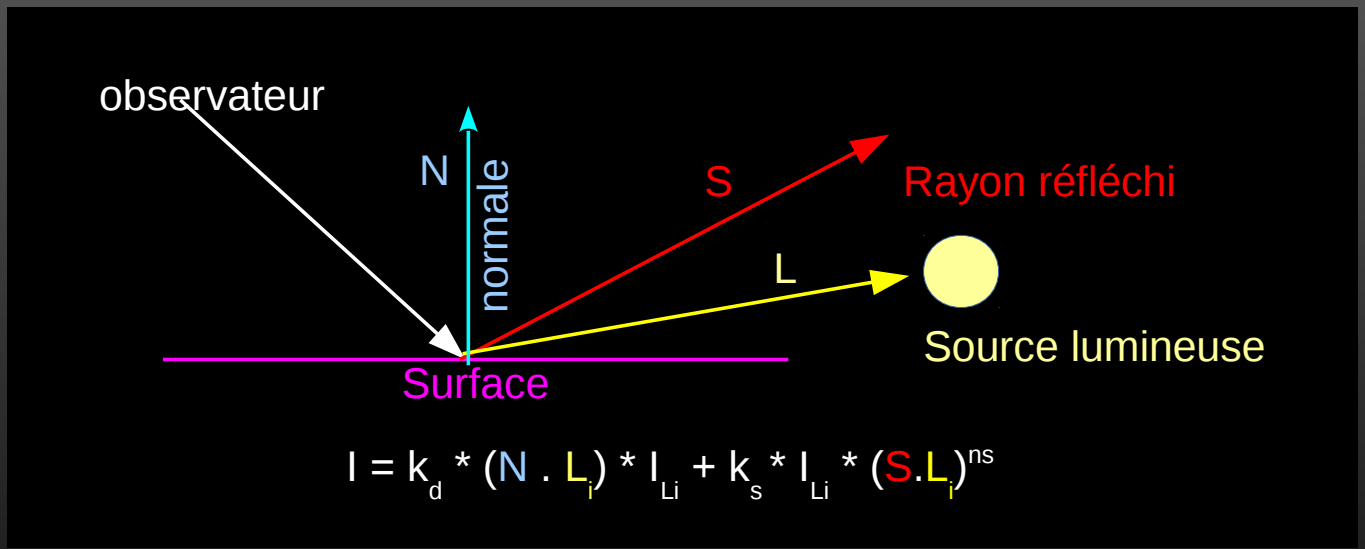
- Les « k_d » incluent la couleur
- Il faut sommer toutes les sources lumineuses i...

Résultat :



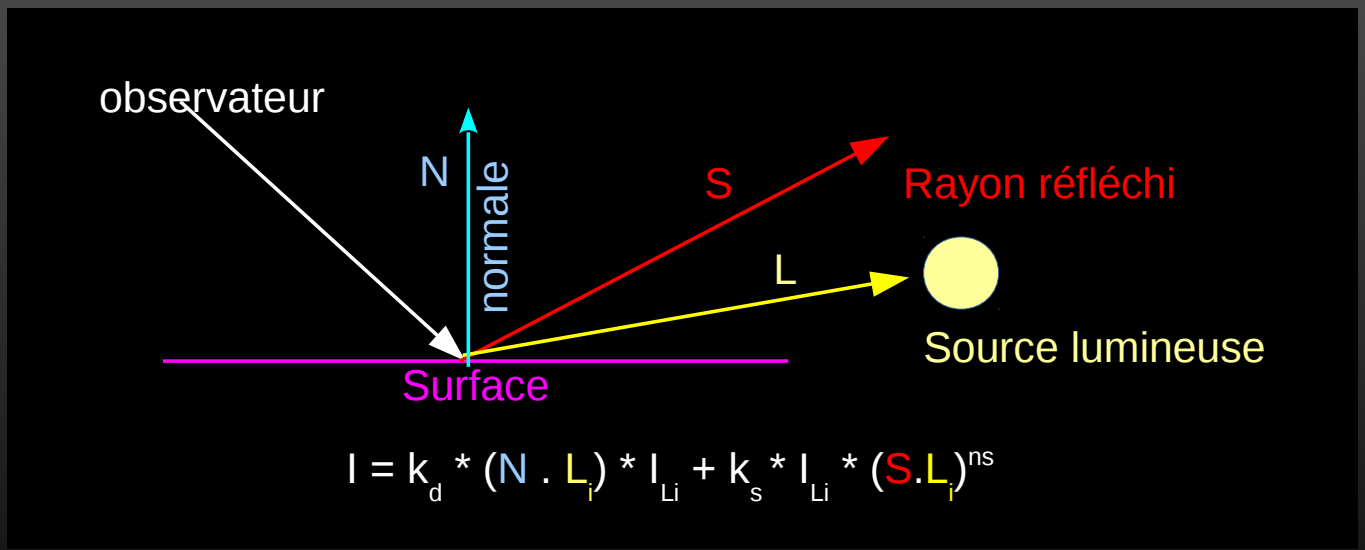
Raytracing

- Calcul de l'illumination locale :
  - Composante diffuse
  - Composante spéculaire
  - Apport des sources primaires
  - Ne tient pas compte des sources secondaires



- ajout possible d'un coefficient d'atténuation $f(d)$ ($d \rightarrow$ distance)
- $f(d) = 1/d$
- $f(d) = 1/d^2$
- $f(d) = 1/(d + k)$
- ...

- Calcul de l'illumination locale :
  - Composante diffuse
  - Composante spéculaire
  - Apport des sources primaires
  - Ne tient pas compte des sources secondaires



Quel modèle de couleur prendre ?

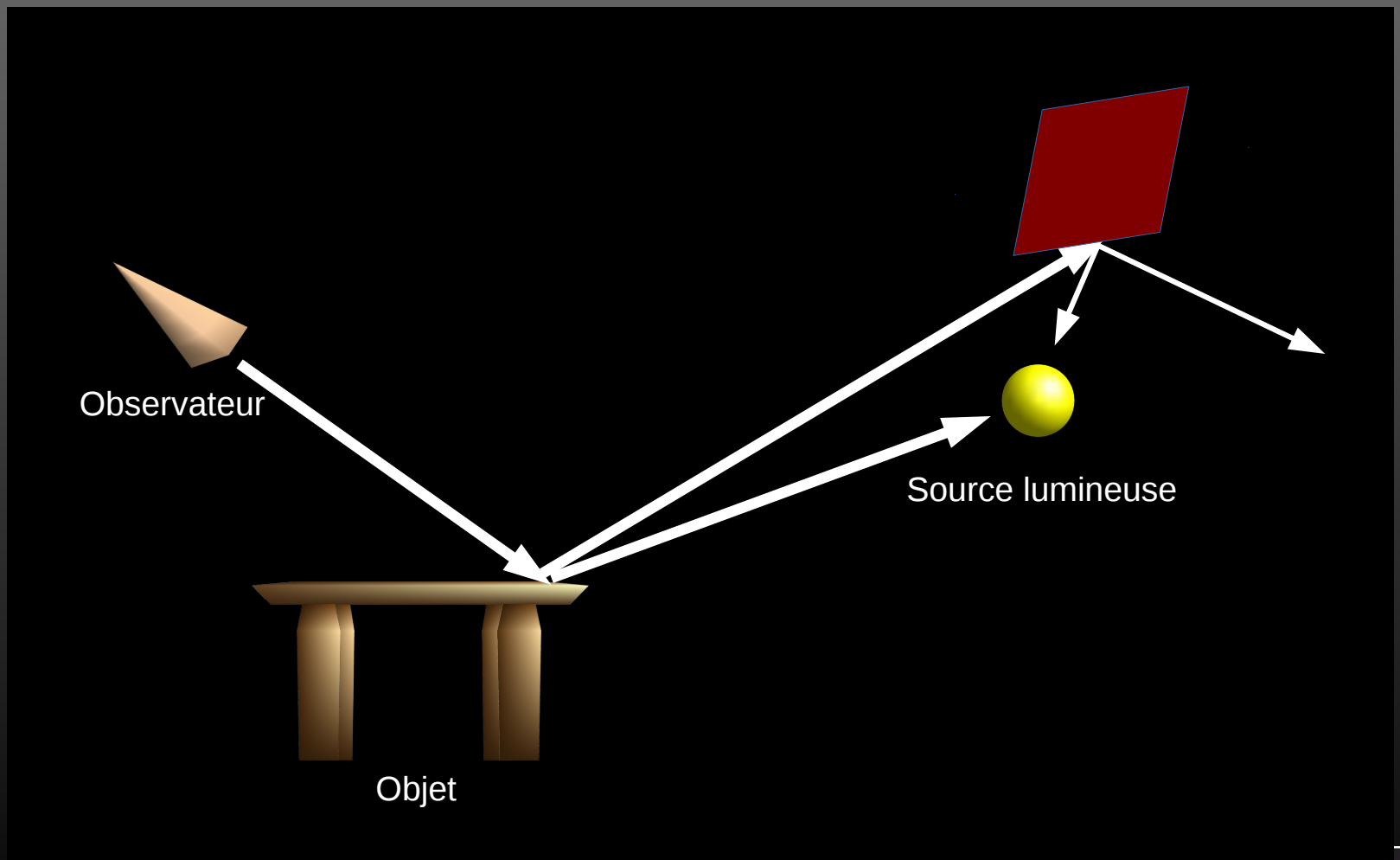
Étape 1 : Prise en compte des sources primaires
Algorithme :

- Pour l'ensemble des points de l'image :
  - Calculer le vecteur directeur du rayon lumineux v partant de l'observateur
  - Chercher les intersections de ce rayon lumineux avec l'intégralité des objets de la scène et garder le plus proche
  - Calculer le niveau d'éclairement au point d'intersection en sommant l'apport diffus et spéculaire pour chaque source lumineuse

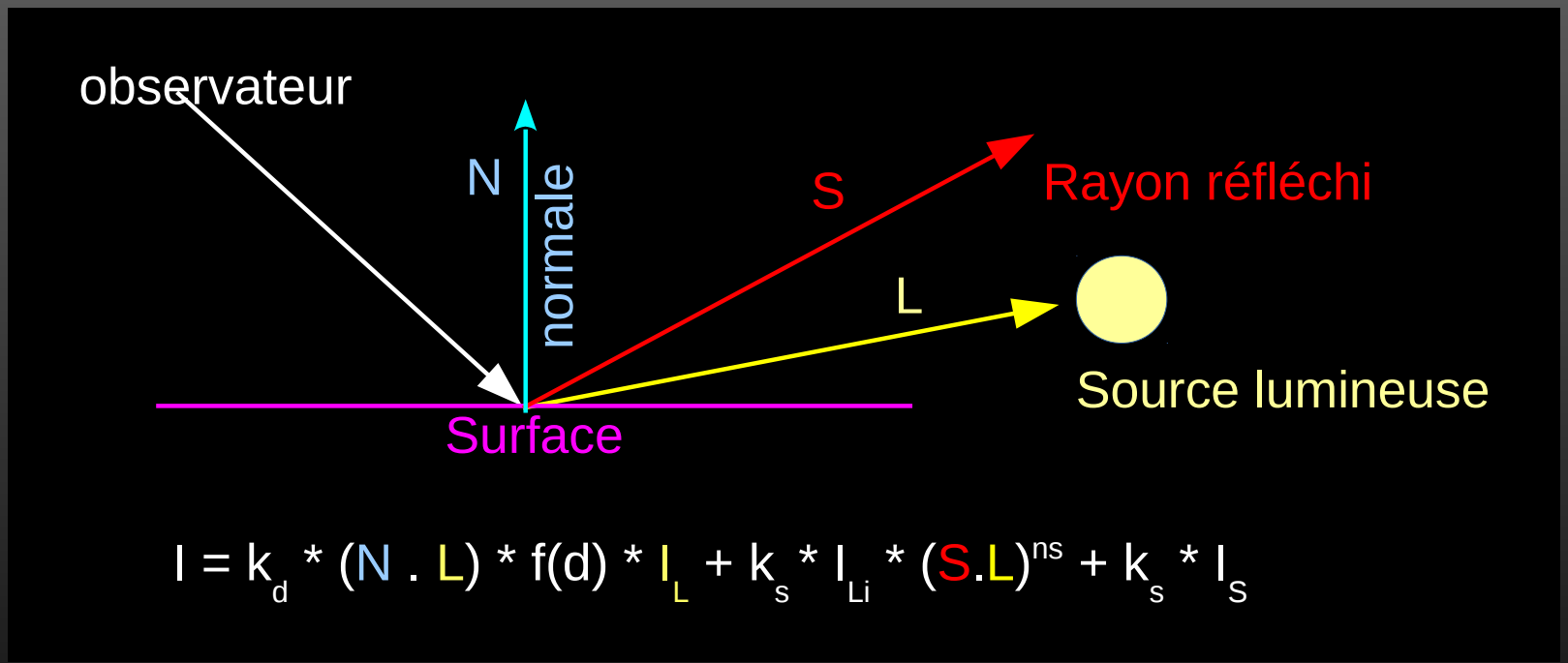
Étape 1 : Prise en compte des sources primaires
Problèmes :

- Ne tient pas compte des sources lumineuses secondaires
- Ne gère pas les ombres

Prise en compte des sources secondaires :



Prise en compte des sources secondaires :



$$I = k_d * (N \,.\, L) * f(d) * I_L + k_s * I_{Li} * (S.L)^{ns} + k_s * I_S$$

Étape 2 : Prise en compte des sources primaires et certaines sources secondaires

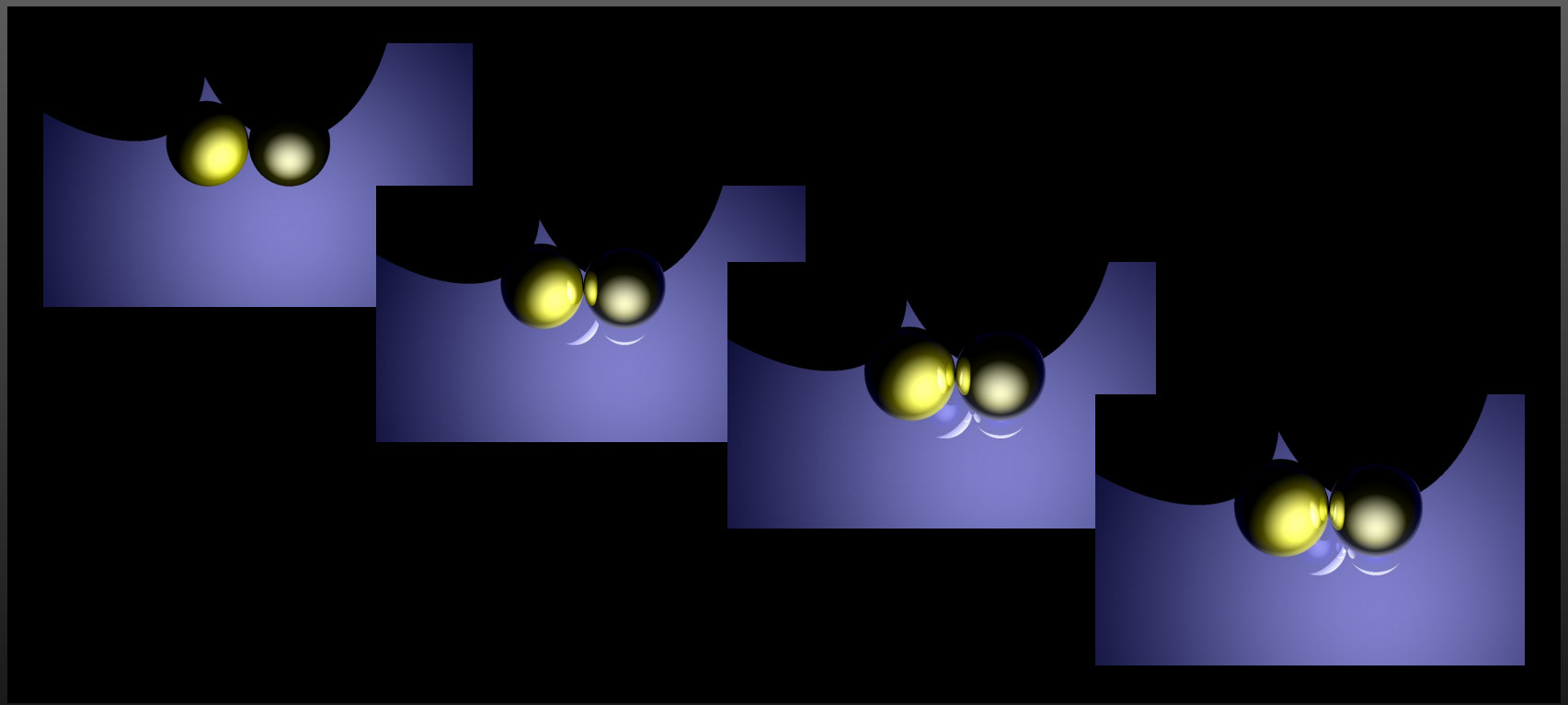
Algorithme :

- Pour l'ensemble des points de l'image :
  - Calculer le vecteur directeur du rayon lumineux v partant de l'observateur
  - Chercher les intersections de ce rayon lumineux avec l'intégralité des objets de la scène et garder le plus proche
  - Relancer un rayon dans la direction de S puis calculer le niveau d'éclairement récursivement
  - Calculer le niveau d'éclairement au point d'intersection en sommant l'apport diffus et spéculaire pour chaque source lumineuse ainsi que l'éclairement dans la direction de S

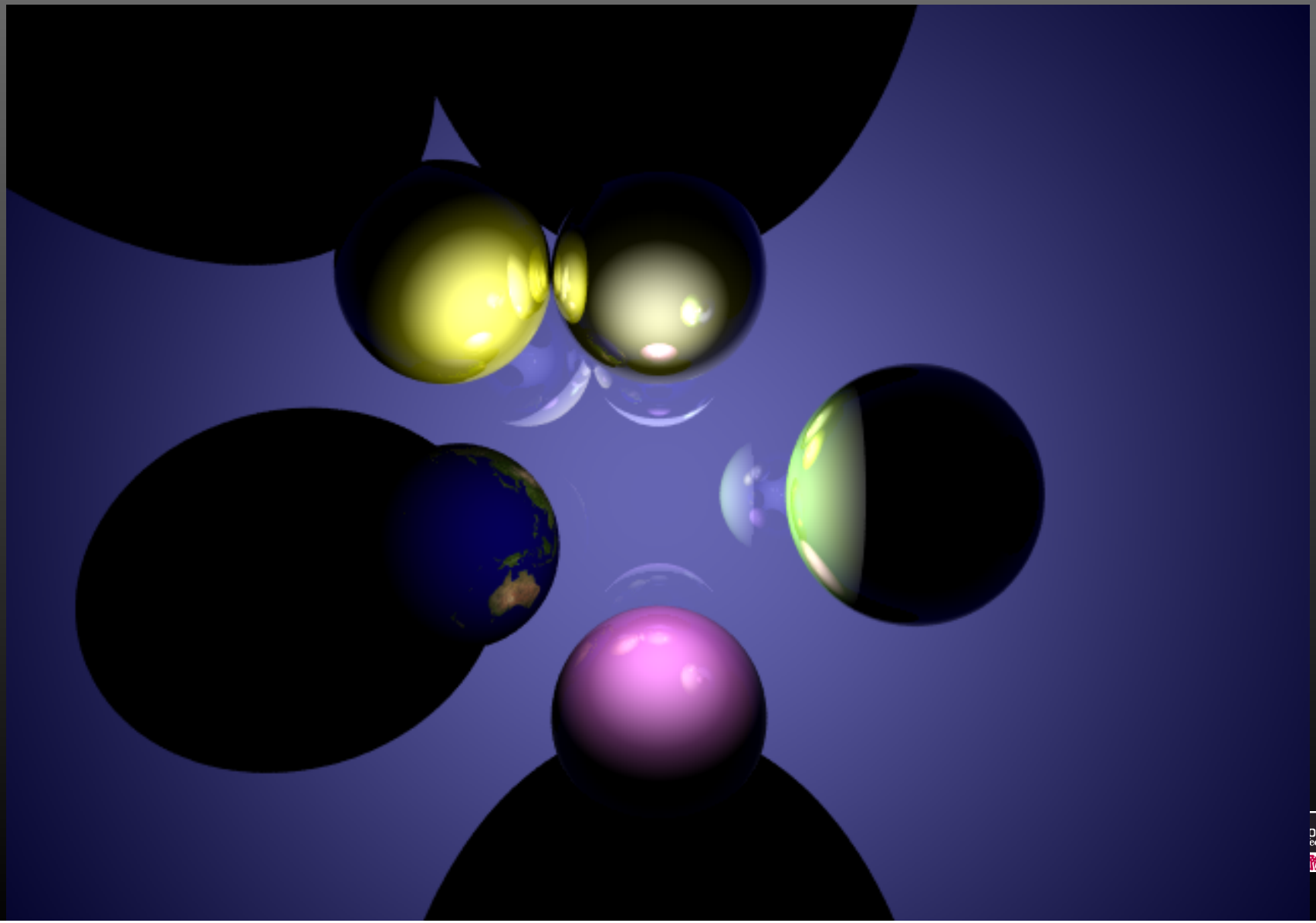
Étape 3 : Prise en compte de l'ombre

- Pour l'ensemble des rayons que l'on « lance » vers les sources primaires, il faut chercher si un objet de la scène ne s'est pas inséré entre le point considéré et la source. Pour cela, il faut à nouveau calculer l'intersection du rayon avec l'ensemble des objets de la scène et prendre le plus proche.

Résultats :



Résultats :



Raytracing

- L'algorithme du *raytracing* est un processus simple, récursif
- Il faut être capable, pour chaque objet, de calculer la normale en chaque point
- Il faut réfléchir à la condition d'arrêt

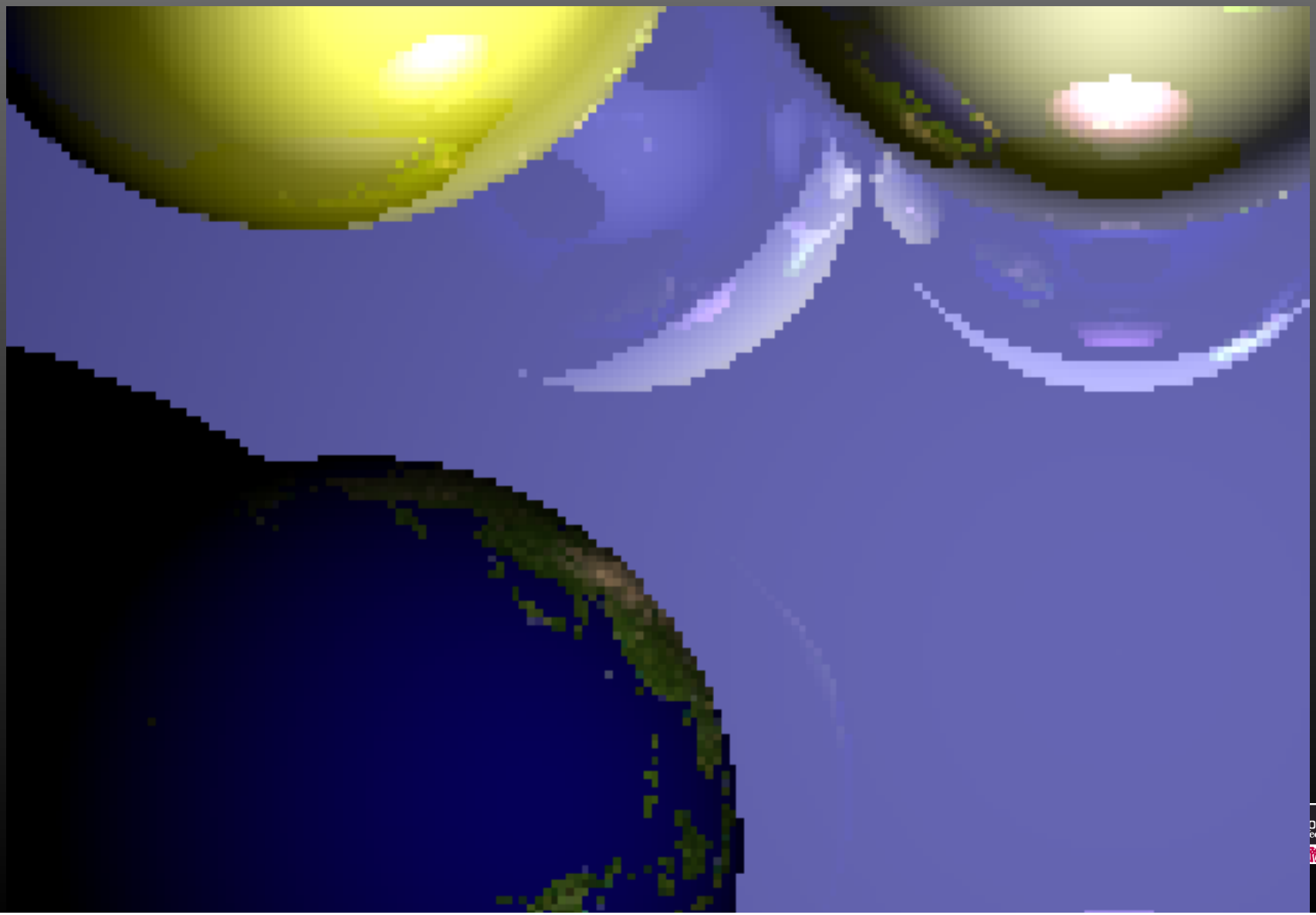
Raytracing

- Avantages
- Inconvénients

Raytracing

- Avantages
  - Algorithme simple et rapide à mettre en œuvre
  - Génère des images honorables
  - ...
- Inconvénients
  - Temps de calcul un peu élevé
  - Pas gestion de la profondeur de champ et autres effets
  - Mauvaise gestion des ombres (frontières trop brutales)
  - Sources secondaire pas suffisamment prises en compte (éclairage indirect incorrect)
  - Objets transparents
  - « *Aliasing* »
  - ...

Problème de l'*aliasing*



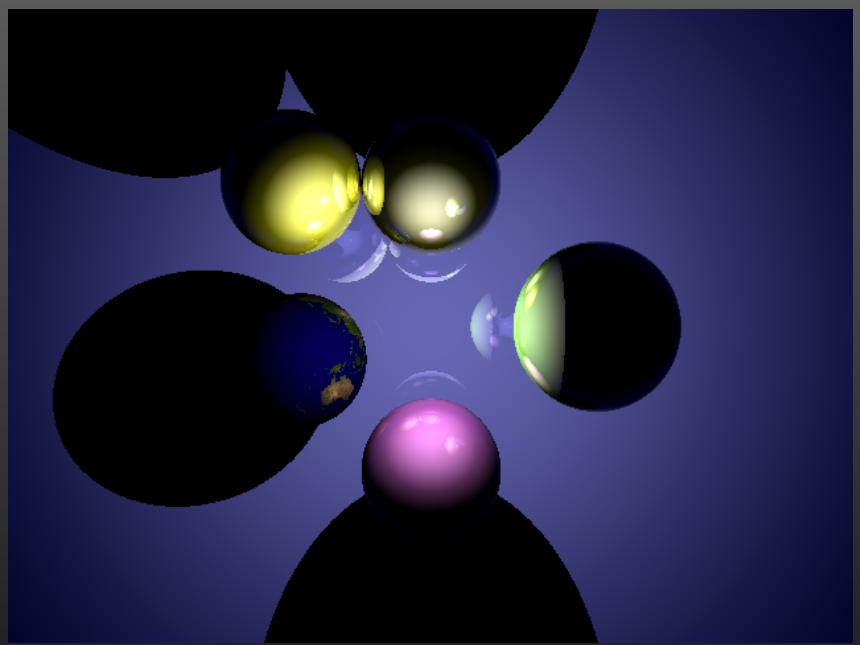
Problème de l'«aliasing»
Solutions :

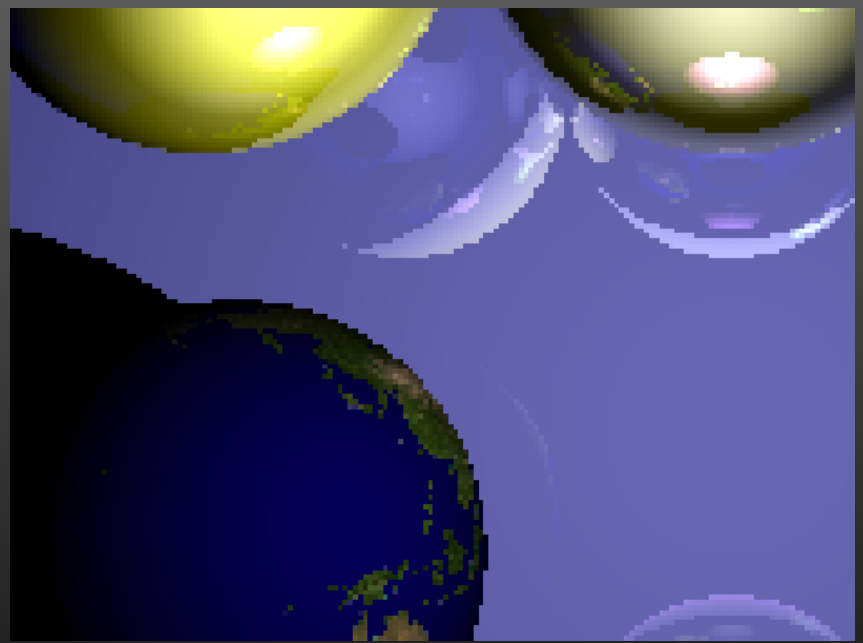
Raytracing

Problème de l'«aliasing»
Solutions :

- Sur-échantillonnage
  - Lancer plusieurs rayons pour chaque pixel
    - De manière organisée
    - Au hasard
  - Lancer plusieurs rayons pour chaque pixel où le gradient est élevé
    - Bon résultats mais peut être très lent
- Post-filtrage
  - Résultat moyen mais très rapide

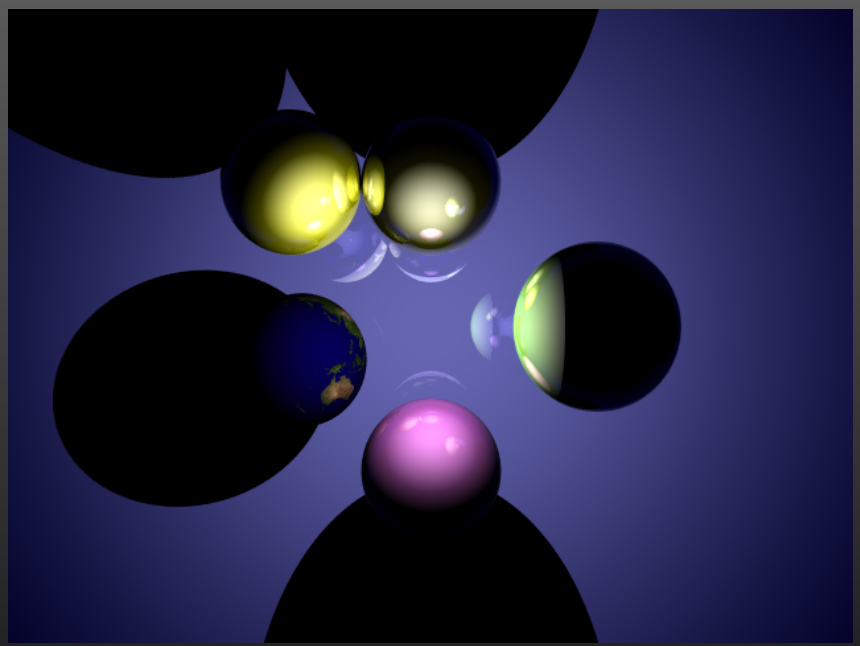
Résultats

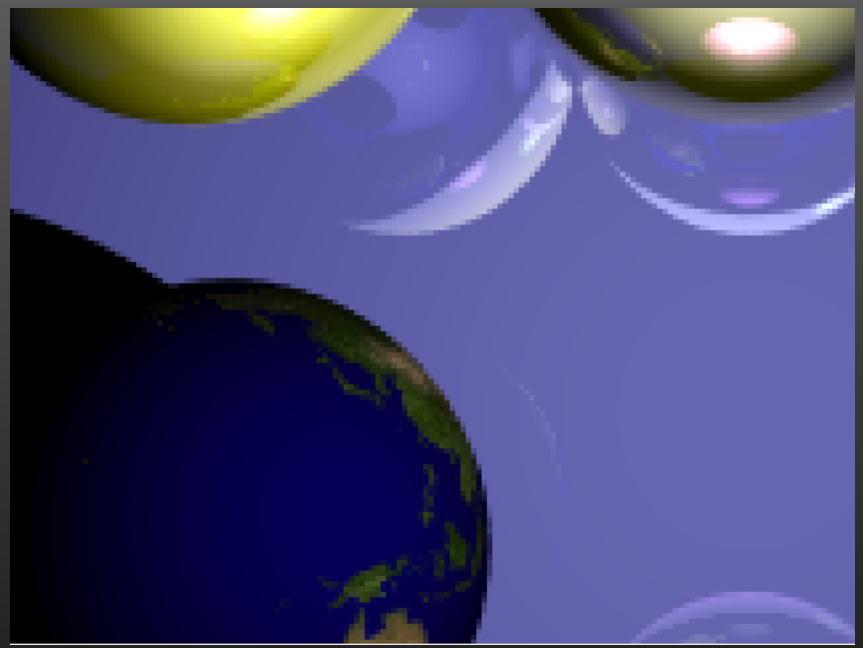




Sans anti-aliasing
Temps : de l'ordre de la seconde

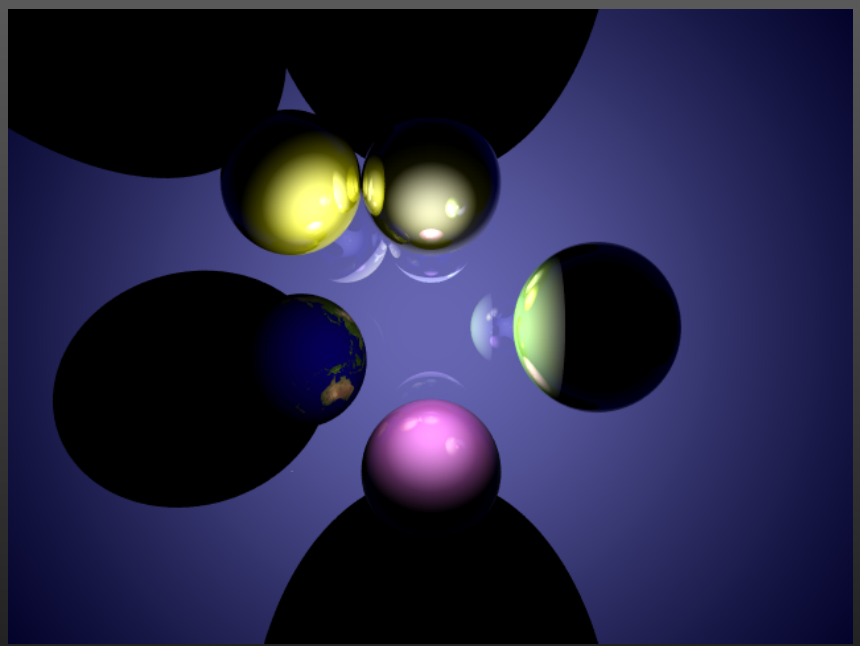
Résultats

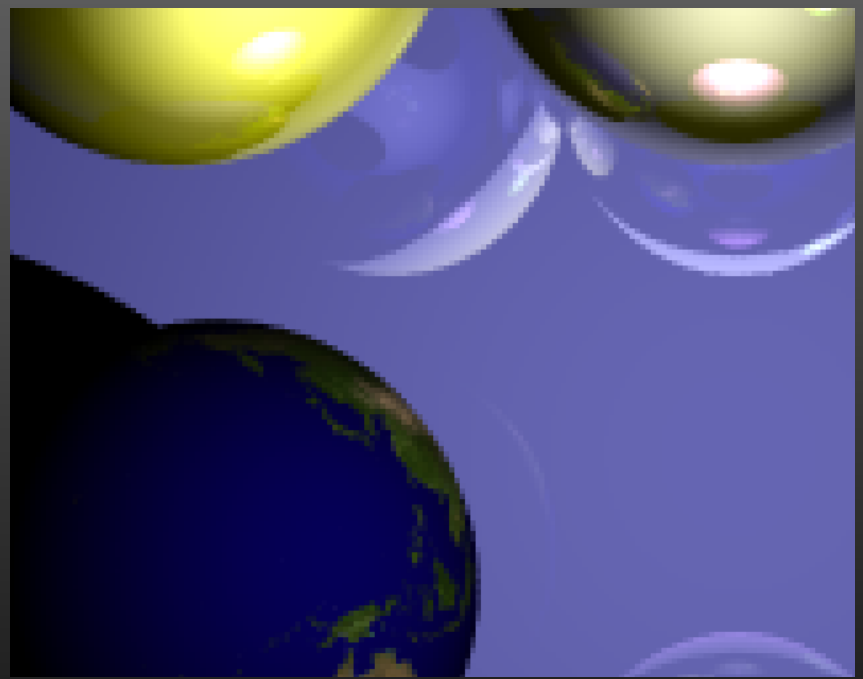




Anti-aliasing sur toute l'image (50 rays/pixel)
Temps : de l'ordre de 7-8 secondes

Résultats





Anti-aliasing sur les zones de gradient élevé (50 rays/pixel)
Temps : de l'ordre de la seconde

Problème du temps de calcul
Solutions :

Raytracing

Problème du temps de calcul
Solutions :

- Volumes englobants
- Projection sur un plan/partition de l'espace
- Pre-trier les objets ?
- Calcul parallèle
- Utilisation d'OpenGL
- ...

Problème des objets transparents
Solution :

Raytracing

Problème des objets transparents

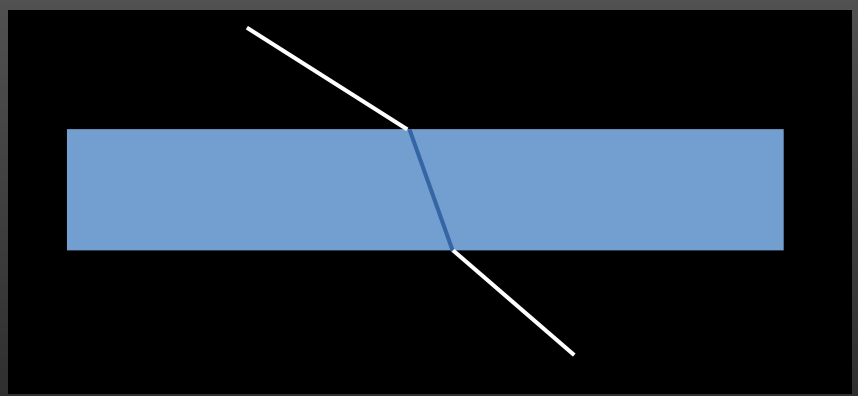
Solution :

- Comme nous avons relancé le rayon réfléchi, il faut «suivre» le rayon réfracté
  - Loi de la réfraction

Problème des objets transparents

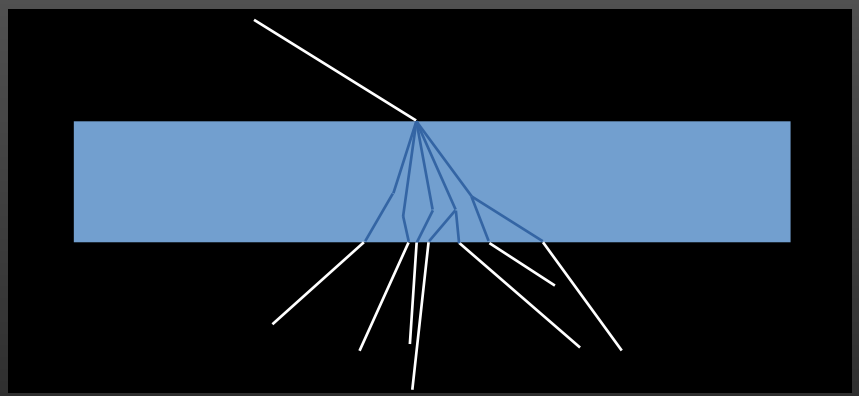
Solutions :

Milieux transparents



- Loi de la réfraction (Snell Decartes) :
  $n_1 sini_1 = n_2 sini_2$

Surfaces translucides



- Distribution probabiliste

Problème des objets transparents :

- Tenir compte du rayon réfracté pour l'illumination locale :

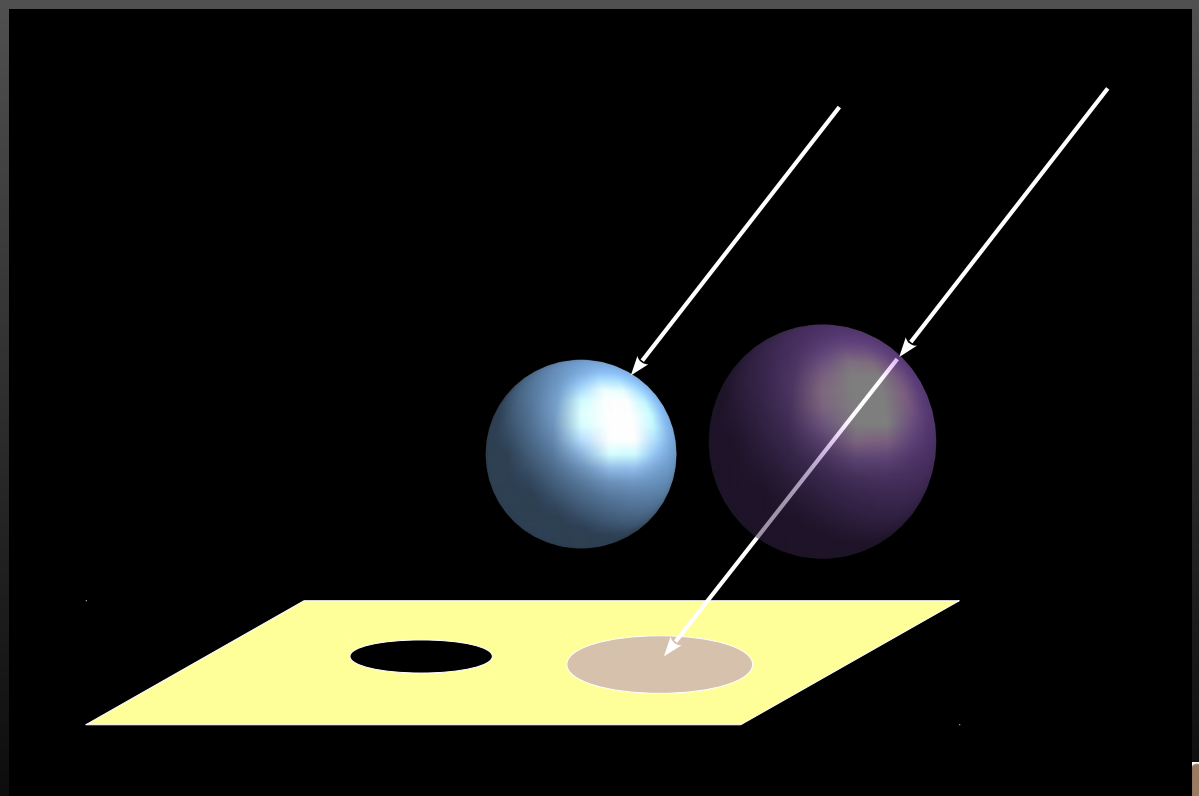
$$I = I_d + I_S + I_t + k_t T$$

Problème des objets transparents

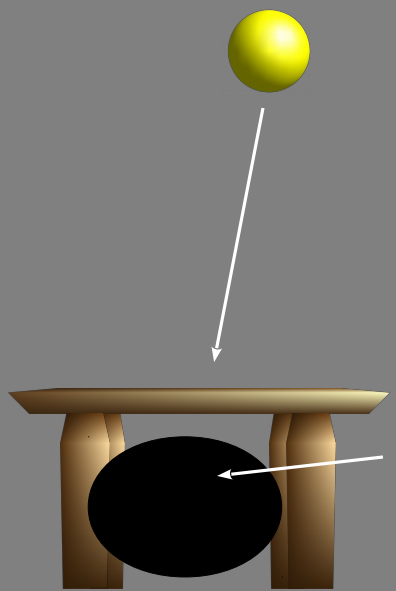
- Calcul de l'ombre des objets transparents...
  - Solution approchée :

Problème des objets transparents

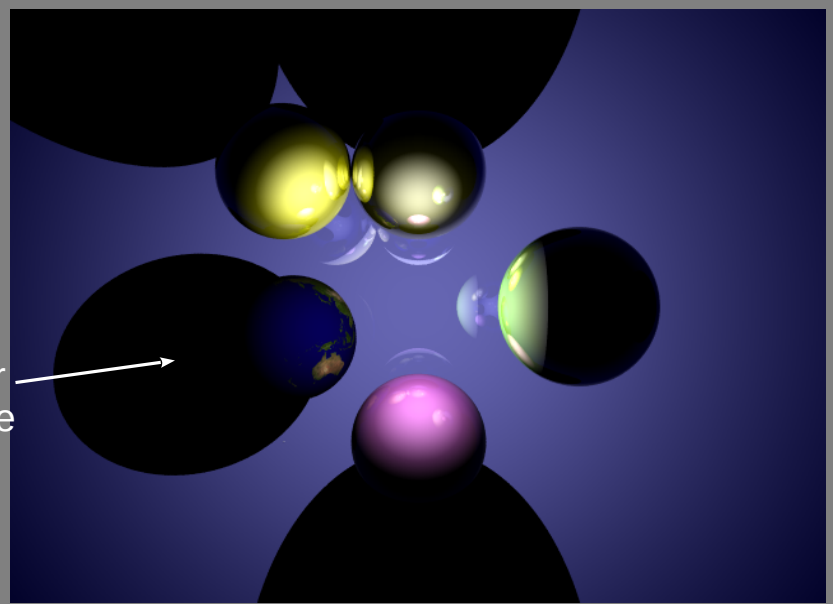
- Calcul de l'ombre des objets transparents...
  - Solution approchée :
    - Ne pas dévier le rayon mais filtrer les longueurs d'ondes



Problème de l'éclairage indirect



Zone dans le noir absolu car aucun éclairage direct



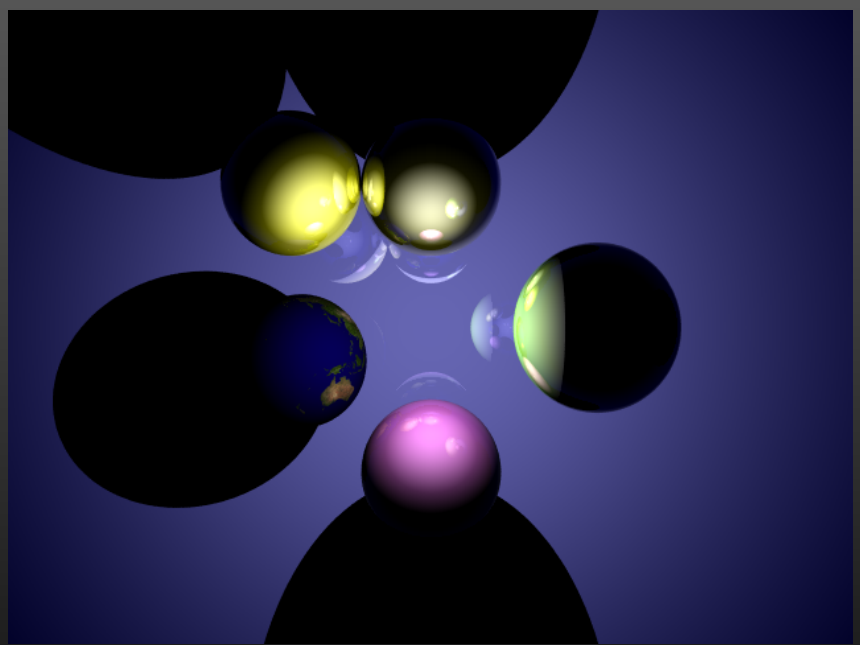
Raytracing

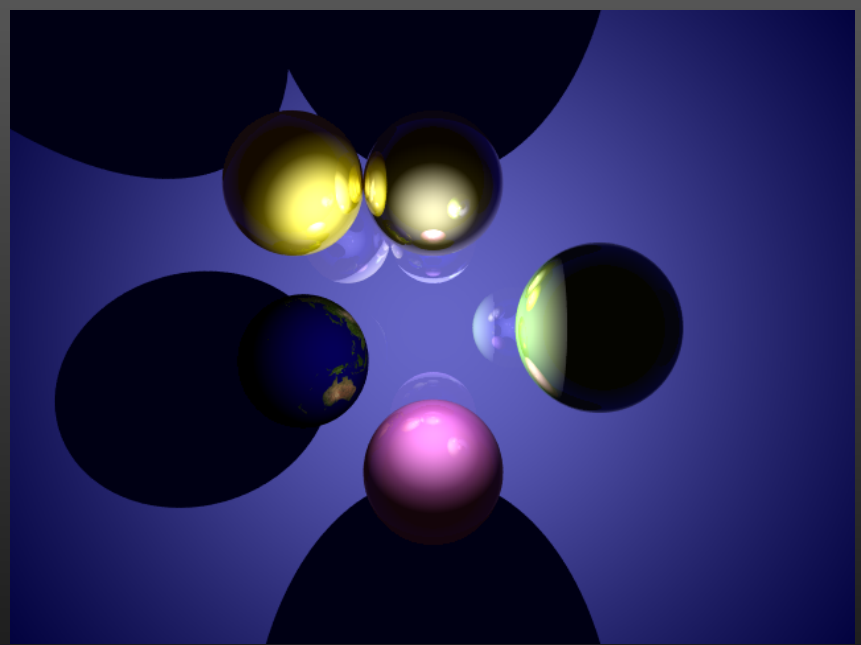
- Problème de l'éclairage indirect
- Solution :

Raytracing

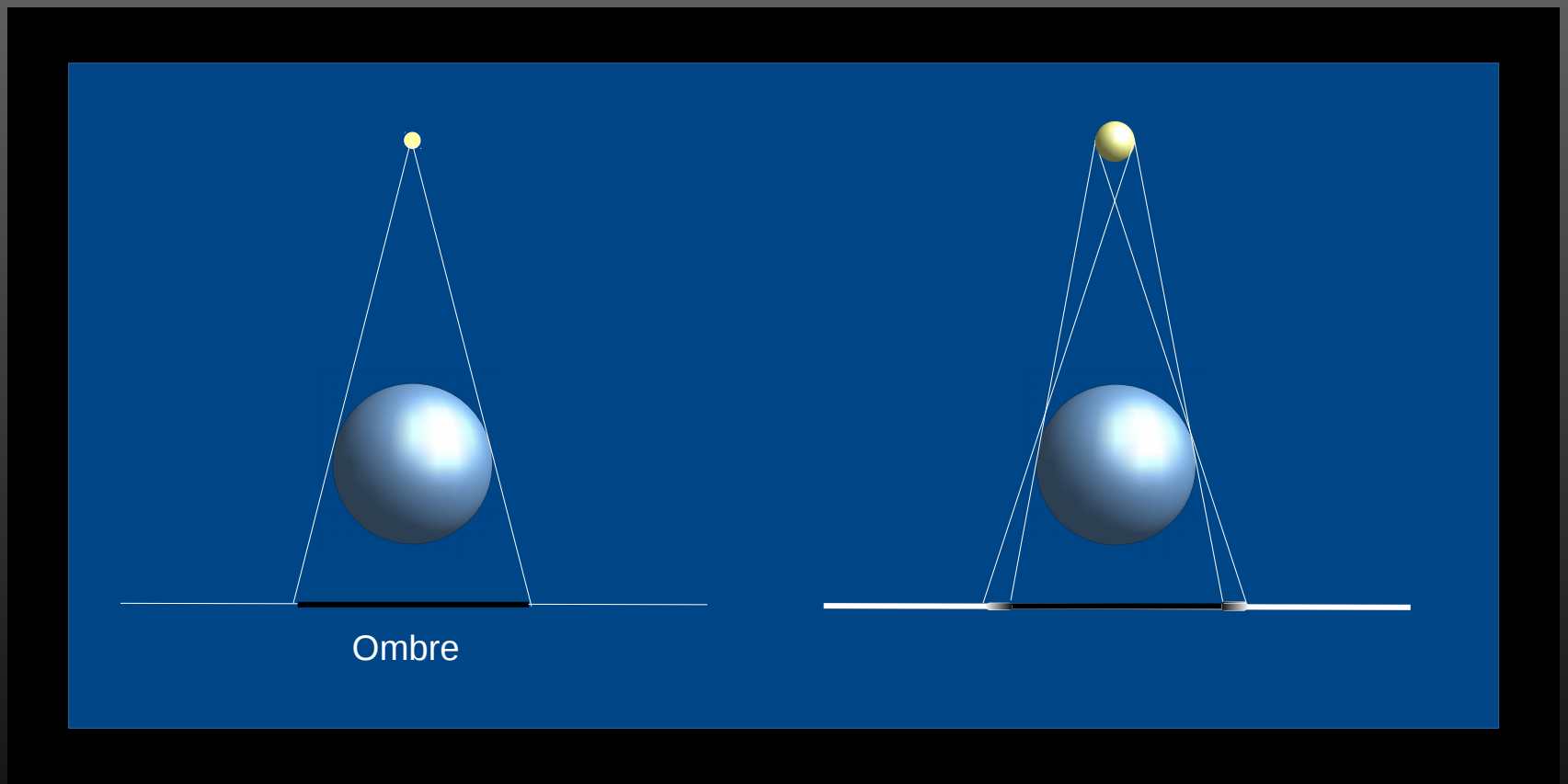
- Problème de l'éclairage indirect
- Solution :
  - Ajouter une lumière ambiante
    $I = k_a * I_a + I_d + I_s + I_r + I_t$
  - Solution vraiment approximative

Résultats





Problème de l'ombre



Problème de l'ombre
Solution :

Problème de l'ombre
Solution :

- Ne plus considérer une lumière comme ponctuelle
  - Problème du temps de calcul

Raytracing

Bilan :

- Avantages :
  - Algorithme très simple
  - Donne des images honorables
- Des problèmes majeurs persistent
  - Les sources secondaires ne sont pas suffisamment bien gérées
  - Les objets transparents non plus

Raytracing

Amélioration :

- Raytracing distribué (84)
  - Sur-échantillonnage pour simuler
  - les ombres douces
  - la profondeur de champ
  - ...
  - Ne règle pas le problème de l'apport de la diffusion des sources secondaires
  - Quantité de calcul énorme

Conclusion

- Algorithme simple
- Nécessite beaucoup d'améliorations pour avoir des images photoréalistes.

La Radiosité

La Radiosité

La Radiosité

- On essaye d'estimer la « radiosité » de chaque élément de la scène, c'est à dire la quantité d'énergie que chaque élément émet...

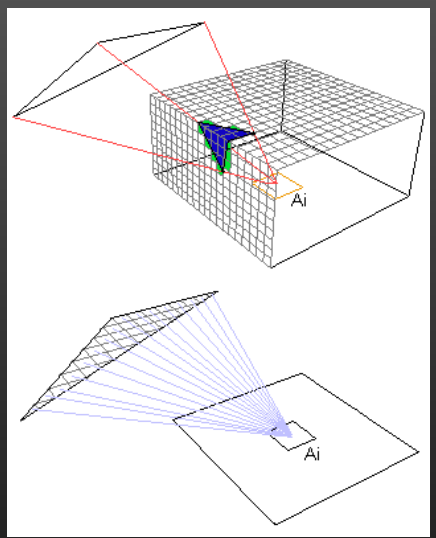
La Radiosité

- B_i la radiosité de la surface i
- E_i la quantité de lumière émise par la surface i
- P_i la fraction de lumière incidente qui est réfléchie par la surface i
- F_{ij} la fraction de lumière quittant la surface i et atteignant la surface j

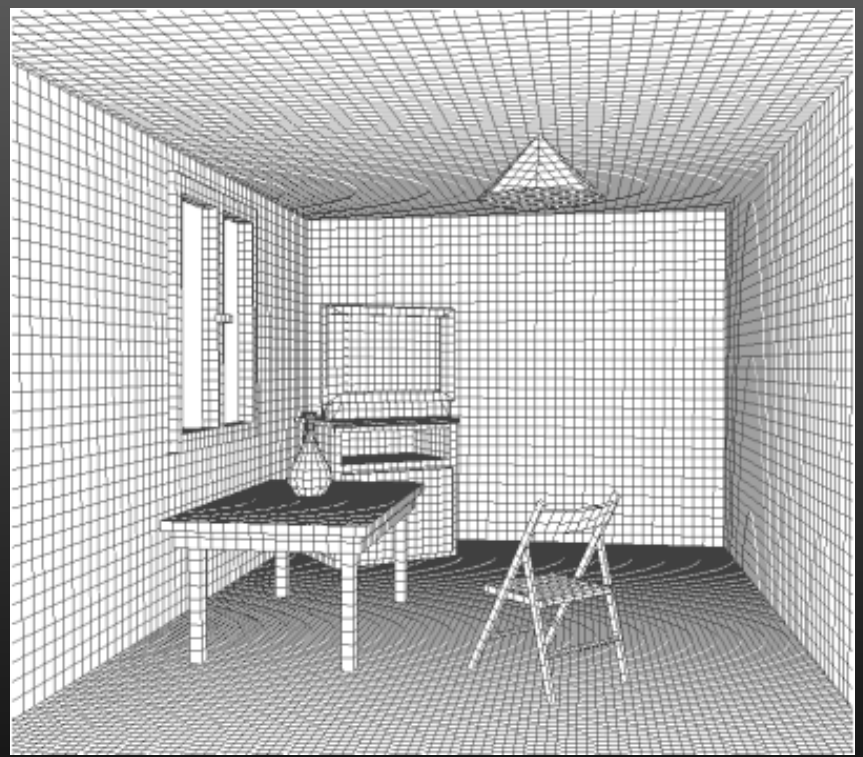
$$B_i = E_i + P_i \sum_i (F_{ji} B_j)$$

La Radiosité

Calcul des F_{ij} par hemi-cubes



source : wikipedia



La Radiosité

Ne permet pas directement de calculer une vue de la scène mais simplement l'illumination globale

- Avantages :
  - Prend mieux en compte les sources secondaires
  - Calculée une fois pour toutes
- Inconvénients
  - Tient compte que de la diffusion
  - Assez lourd
  - Obligation d'avoir un maillage (il faut discrétiser les surfaces)
  - Objets transparents ?

Photon Map

Photon Mapping

- Photon Map
  - Pré calcul de l'illumination de la scène.
  - Lancement de rayons lumineux depuis les sources et calcul des accumulations des photons.
- Avantages
  - Permet de modéliser plus proprement les sources secondaires, les ombres portées (...) et surtout les objets transparents (caustiques).
- Inconvénients
  - Calculs
  - Complexité

Photon Mapping

Résultats :...

Photon Mapping

Améliorations :

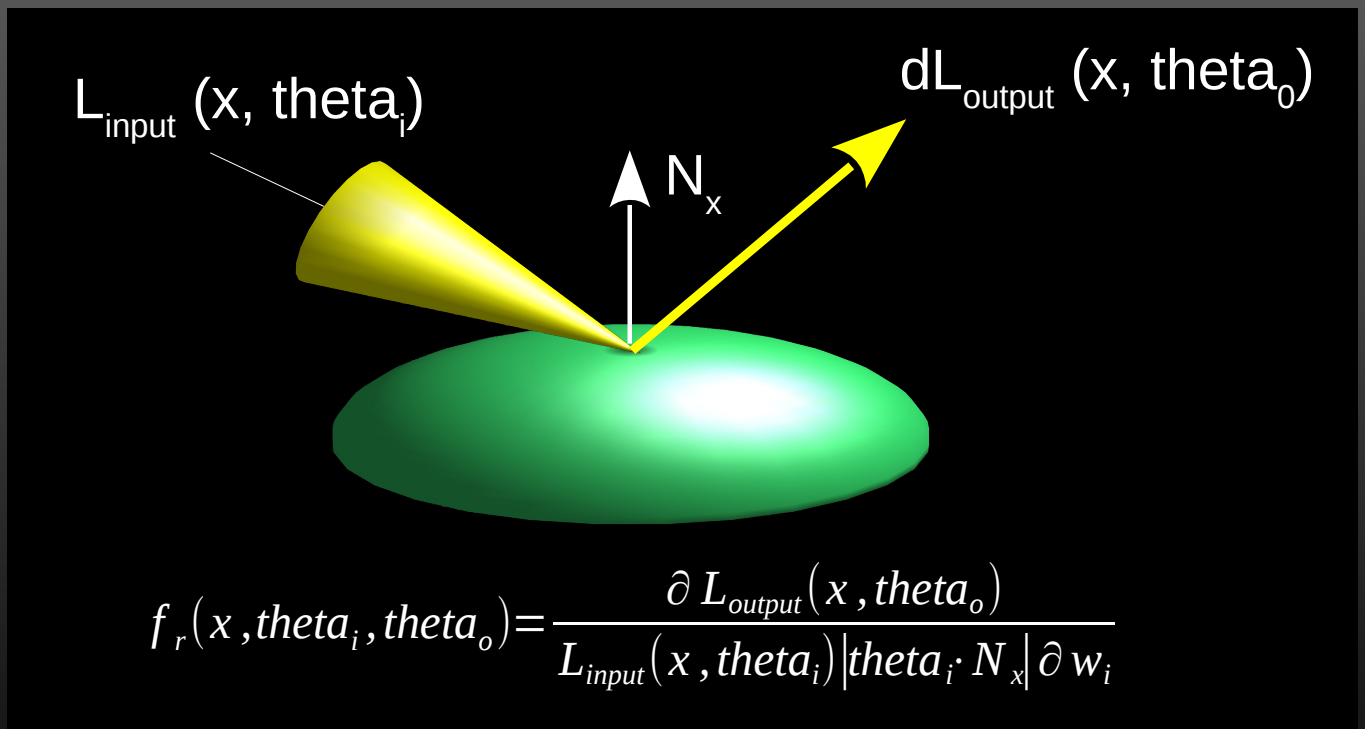
- Projection Maps
- Visual importance map (3-pass Technique)
- Shadow photons
- ...

Path Tracing/Bidirectional Path Tracing

Path Tracing

- Modélisation des propriétés de réflexion des surfaces : (Bidirectional reflectance distribution function – BRDF) (idem pour la transmission)
- Solution pour résoudre l'illumination

BRDF : Bidirectional reflectance distribution function (Réflectivité bidirectionnelle)



Path Tracing

BRDF :

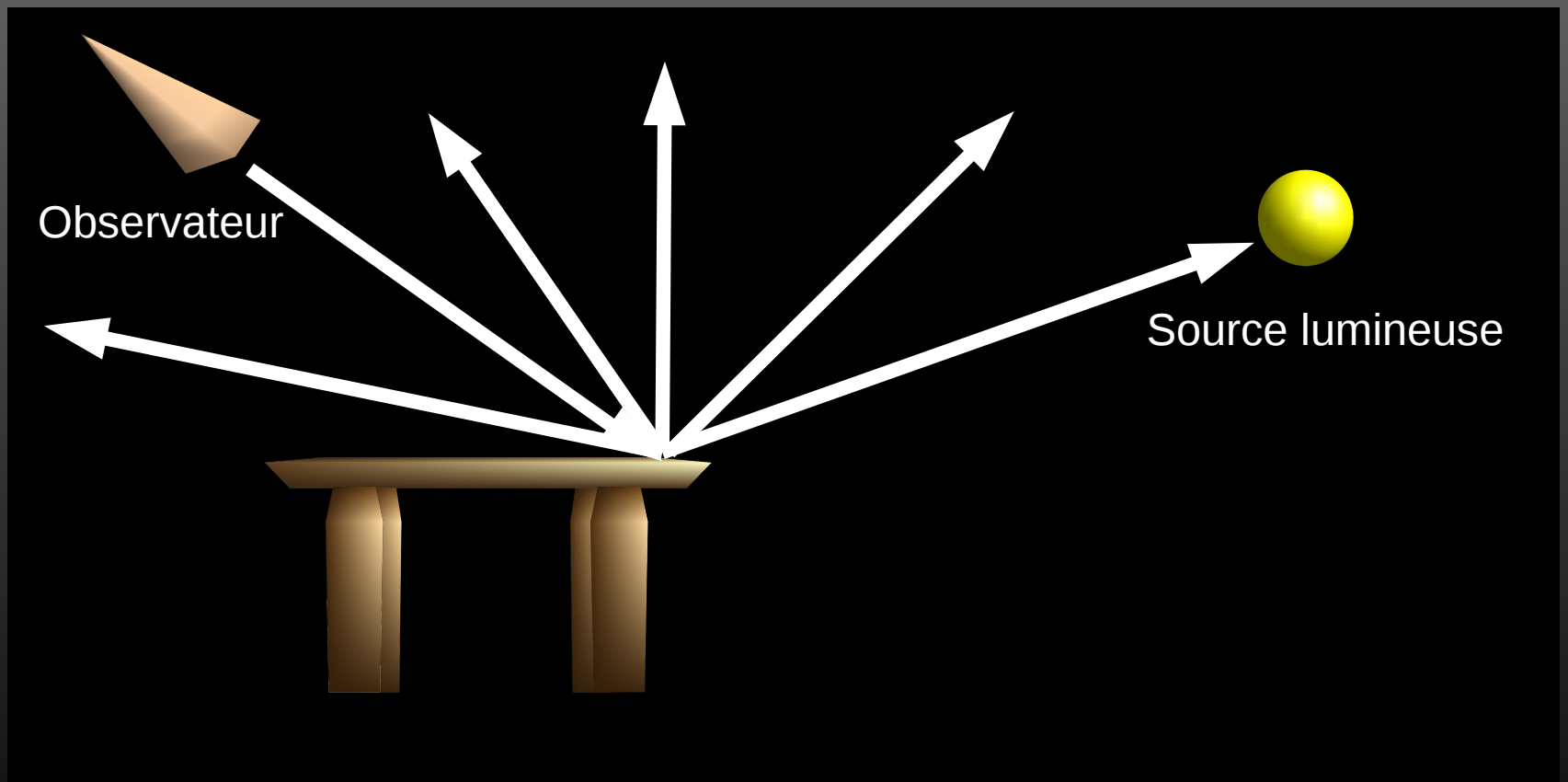
- Conservative
  $\int f_r(x, theta_i, theta_o) L_{input}(x, theta_i) |theta_i \cdot N_x| \partial w_o \leqslant 1$
- Réciprocité de Helmholtz
  $f_r(x, theta_i, theta_o) = f_r(x, theta_o^{-1}, theta_i^{-1})$
- Positivité

Path Tracing

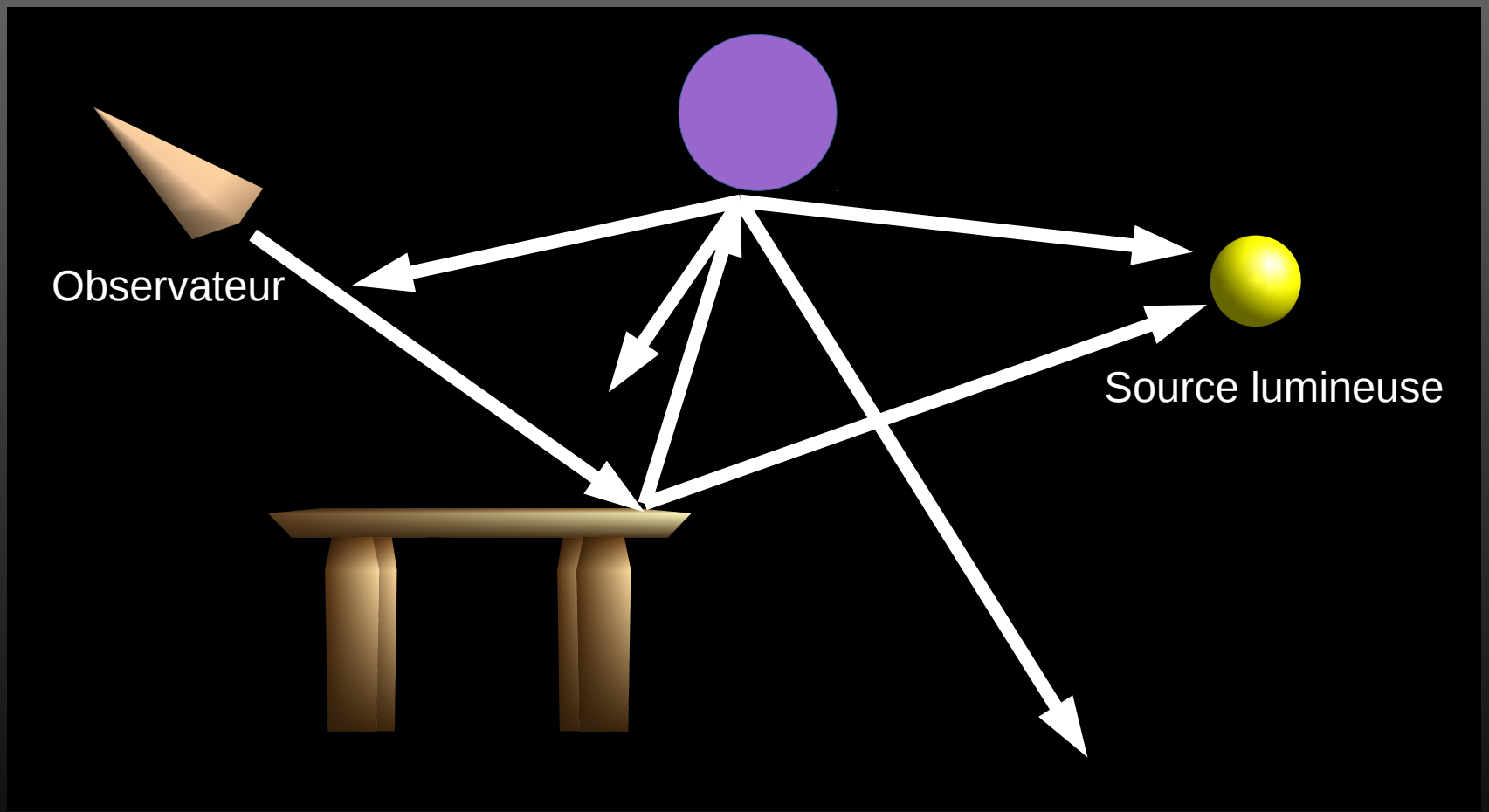
BRDF :

- Mesurée
  - Goniophotometer
  - ...
- Modèles
  - Blinn-Phong
  - Cook-Torrance
  - GGX
  - ...

Principe du rendu



Principe du rendu



Path Tracing

- Avantages :

- Inconvénients :

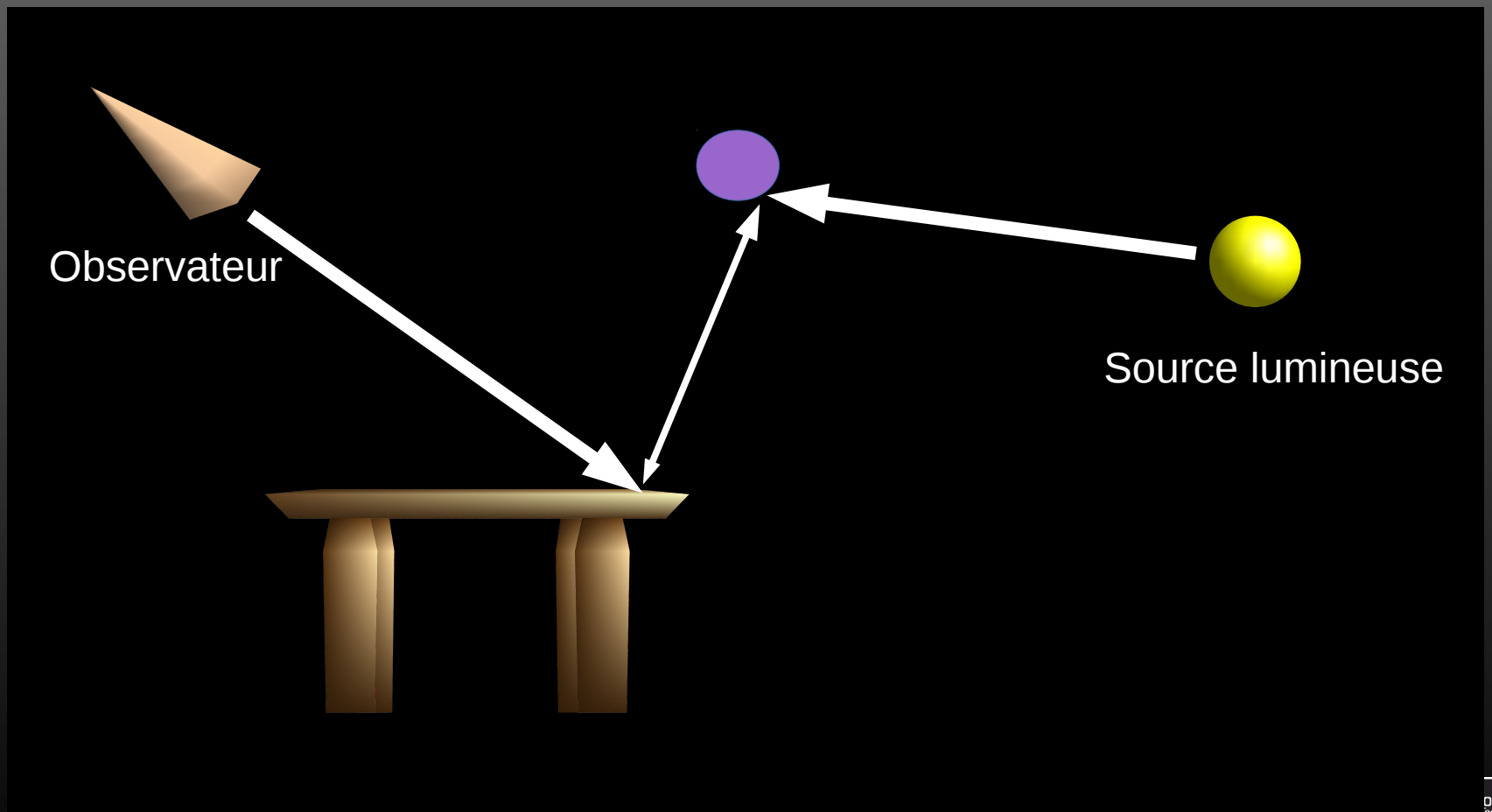
Path Tracing

- Avantages :
  - Rendu réaliste
  - Convient bien aux scènes d'extérieurs
  - Prend bien en compte l'apport des autres objets
  - Rend les caustiques
  - Possibilité de modéliser les effets (profondeur de champ...)
- Inconvénients :
  - lent
  - bruité (Il faut beaucoup d'itérations pour converger)
  - difficile pour scènes avec des petites sources lumineuses (ou des sources cachées)

Bidirectional Path Tracing

Bidirectional Path Tracing

- Amélioration du calcul du rendu
  - Lancement des rayons depuis l'observateur et depuis les sources



Bidirectional Path Tracing

Avantages :

- Facilite la recherche de chemin vers la source lumineuse
- Permet de modéliser des petites sources lumineuses

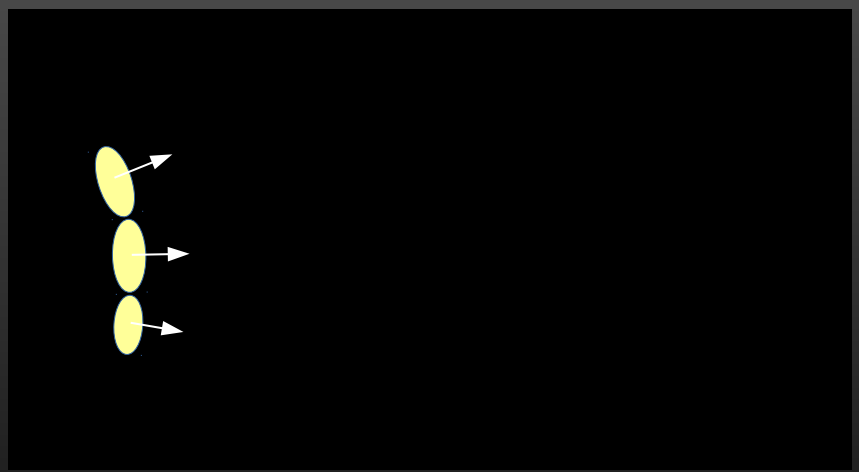
PBGI : Point-Based Global Illumination

PBGI : Point-Based Global Illumination

- Méthode pour estimer l'illumination globale
- Beaucoup utilisée pour le cinéma
- Avantages
  - Rapide
  - Image non bruitée (*pas d'artefacts temporel*)
- Inconvénients
  - Pas aussi précis que le *raytracing*
  - Difficile de gérer les effets miroir

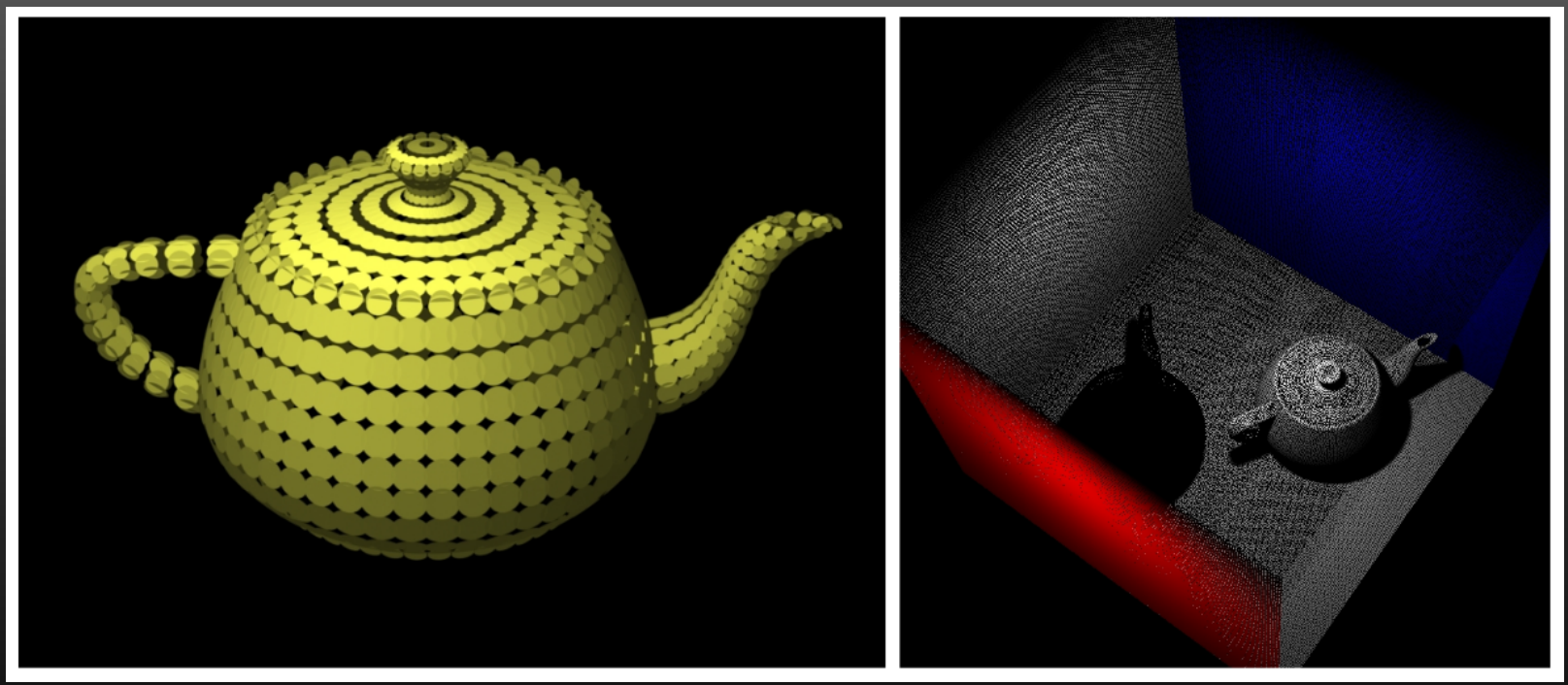
PBGI : Point-Based Global Illumination

- Approximation de la scène par nuage de points
  - Un point = un disque de couleur
  - Calcul de l'illumination directe de la scène



PBGI : Point-Based Global Illumination

- Approximation de la scène par nuage de points
  - Un point = un disque de couleur
  - Calcul de l'illumination directe de la scène



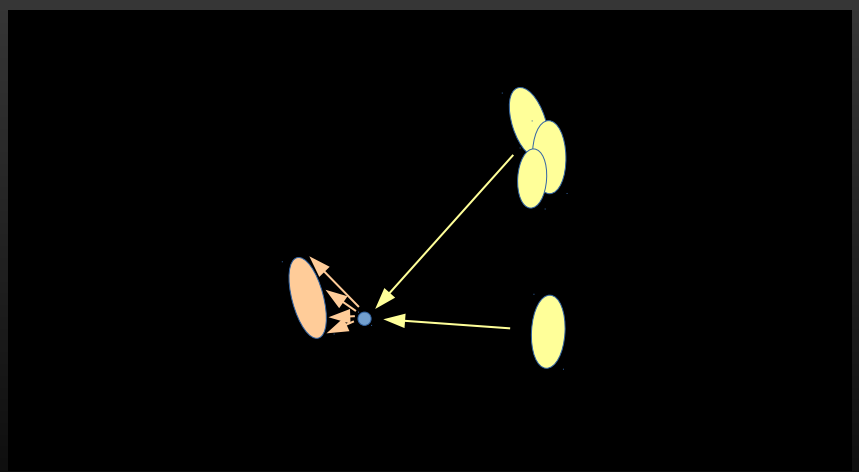
source : Point-Based Global Illumination for Movie Production, H. Christensen

Regroupement des points

PBGI : Point-Based Global Illumination

Calcul de l'illumination globale

- Calcul de la contribution des points sur un disque :
  - Pour les points éloignés
    - Utilisation du cluster
  - Pour les points proches
    - Raytracing
  - Pour les autres points
    - Utilisation directe du disque



Rendu photoréaliste

Bilan et remarques

Illustration

```
#version 3.5;

#declare Radiosity=off;
#declare Photons=off;
#include "rad_def.inc"

global_settings{

  max_trace_level 15
  assumed_gamma 1
  #if (Radiosity=on)
  radiosity {
    Rad_Settings(Radiosity_Final,on,on)
  }
  #end
  #if (Photons=on)
  photons {
    spacing 0.002
  }
  #end
}
```

Illustration

```
camera {
  location <1,1.5,-3>
  look_at <0,0,0>
}

light_source {
  <0,4,-3>
  rgb <1,1,1>
}
```

Illustration

```
plane {
  y
  0
  texture{
    finish{
      reflection 0.4
      diffuse 1
    }
    pigment {
      checker
      rgb<1,1,1>
      rgb<0.5,0.5,0.5>
    }
  }
  #if (Photons=on)
  photons {
    target
    reflection on
    refraction off
  }
  #end
```

```
box {
  <-0.5,0,-0.5>
  <0.5,1,0.5>
  pigment {
    rgb <1,0,0>
  }
  #if (Photons=on)
  photons {
    target
    reflection on
    refraction off
  }
  #end
}
```

```
sphere {
  <1,0.3,-1>
  0.2
  texture{
    finish {
    diffuse 1
    }
    pigment {
      rgb <0,0,1>
    }
  }

  #if (Photons=on)
  photons {
    target
    reflection on
    refraction off
  }
  #end
}
```

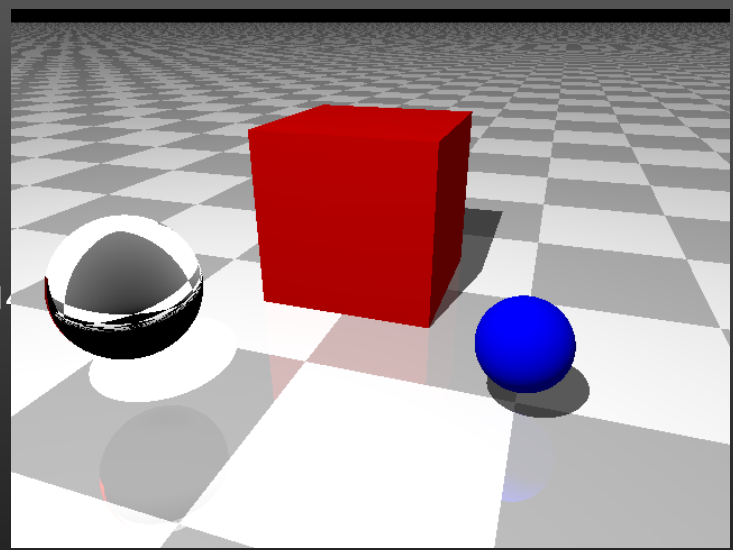
```
sphere {
  <-0.6,0.5,-1.
  0.3
  pigment {
    rgbft <1,1
  }
  interior{ior
  #if (Photons=
  photons {
    target
    reflection
    refraction
  }
  #end
}
```

Illustration

- Rendu simple

```
povray +Itest.pov +Otest.tga +W640 +H4
```

real 0m2.129s user 0m1.628s



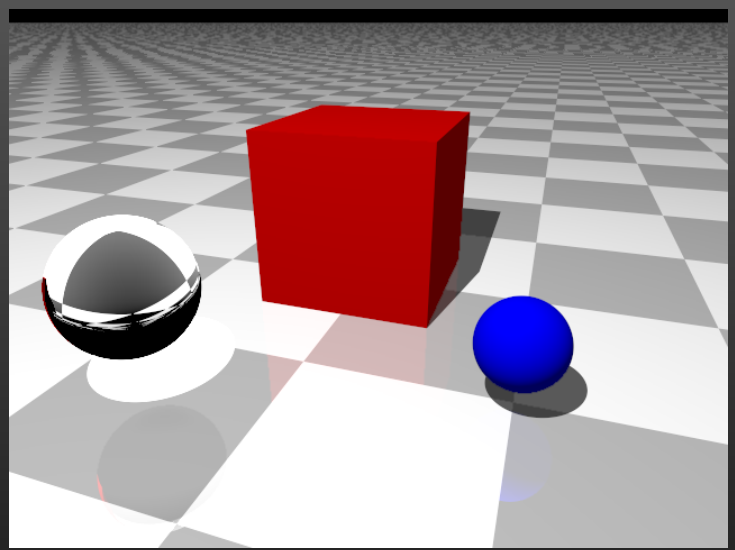
Calculé avec : Persistence Of Vision RAYtracer

Illustration

- Rendu simple avec *anti-aliasing*

```
povray +Itest.pov +Otest_aa.tga +W640
```

real 1m8.129s user 1m6.420s



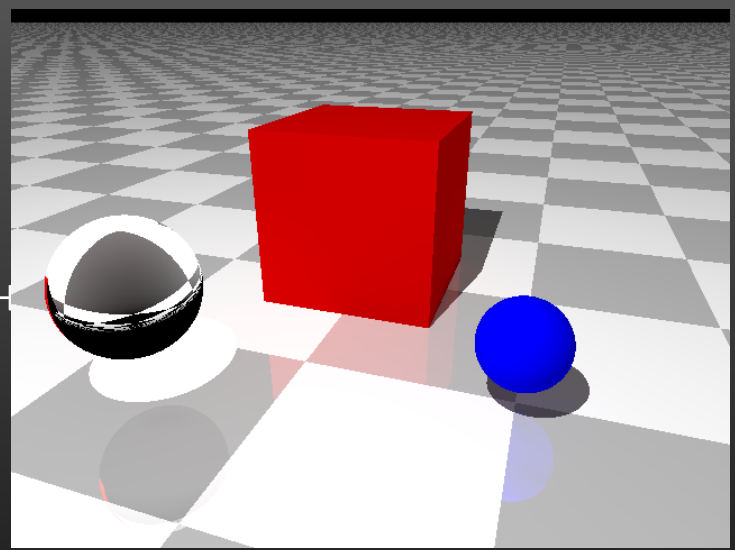
Calculé avec : Persistence Of Vision RAYtracer

Illustration

- Rendu avec la radiosité

```
povray +Itest.pov +Otest_r.tga +W640 +
```

real 0m19.309s user 0m18.161s



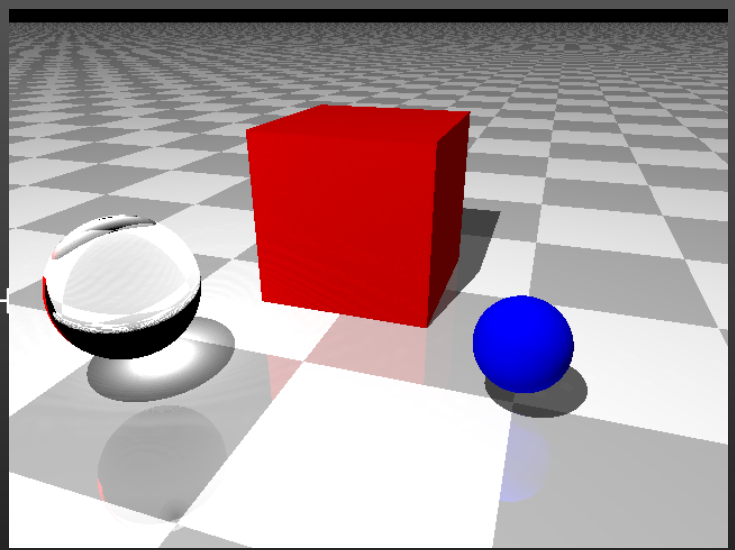
Calculé avec : Persistence Of Vision RAYtracer

Illustration

- Rendu avec les photons

```
povray +Itest.pov +Otest_p.tga +W640 +
```

real 1m16.313s user 1m14.545s



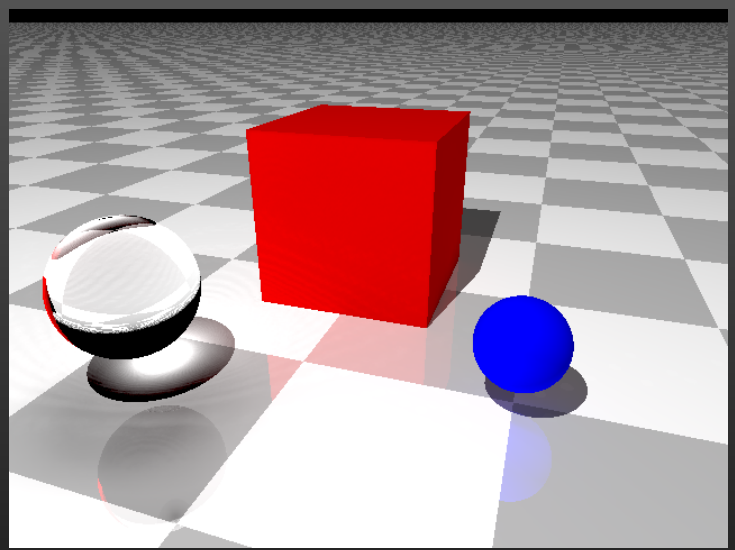
Calculé avec : Persistence Of Vision RAYtracer

Illustration

- Rendu avec la radiosité et les photons

```
povray +Itest.pov +Otest_rp.tga +W640
```

real 2m39.034s user 2m36.274s



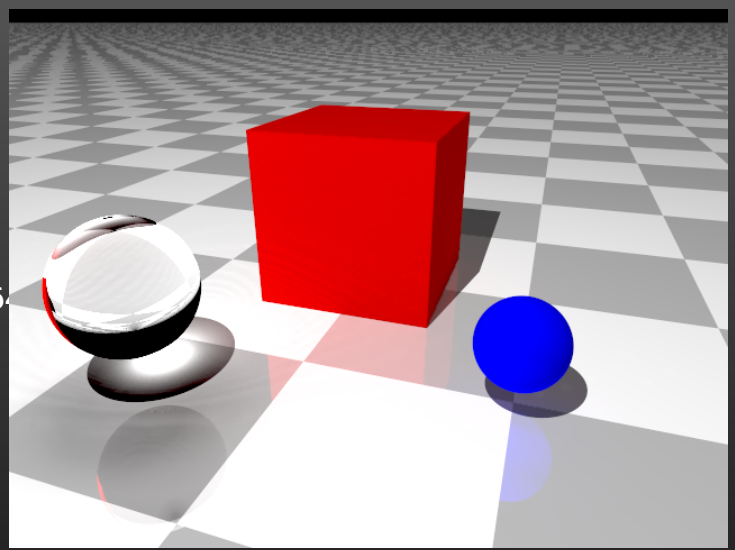
Calculé avec : Persistence Of Vision RAYtracer

Illustration

- Rendu avec *anti-alisiasing*

```
povray +Itest.pov +Otest_aarp.tga +W6
```

real 26m34.801s user 26m38.660s



Calculé avec : Persistence Of Vision RAYtracer

Rendu photoréaliste

Bilan :

- *Raytracing*
  - Calcul l'illumination en fonction d'un point de vue
  - Calcul l'illumination approximatif : gère mal les objets transparents, les lumières secondaires, les ombres portées...
  - Améliorations avec le *raytracing* distribué
  - On peut combiner cet algorithme avec des techniques de calcul d'illumination globale pour palier à ces problèmes
  - En 82, l'équipe du MAGI utilise ce type d'algo pour réaliser certaines images du film TRON
- *Radiosity*
  - Calcul l'illumination globale
  - Gère que la diffusion mais améliore l'apport des lumières secondaires
- *PhotonMap*
  - Calcul l'illumination globale
  - Plus difficile à mettre en œuvre (implémentation, artéfacts...)
  - Gère bien les objets transparents (caustiques) et éventuellement les ombres portées et les sources secondaires
- *PathTracing*
  - Gère bien les objets transparents, les lumières secondaires, les ombres portées
  - Calcul très long
  - Risque d'apparition de bruit
- *P.B.G.I.*

Rendu photoréaliste

- Remarques sur l'implémentation

Rendu photoréaliste

- Remarques sur l'implémentation
  - Doit être bien réfléchie
  - Parallélisation possible
  - Utilisation du *GPU* possible
  - ...

Rendu photoréaliste

Modélisation :

- Pour chaque « forme » il faut être capable de :
  - calculer la normale en chaque point,
  - calculer l'intersection avec un droite,
  - éventuellement calculer les coordonnées de la texture

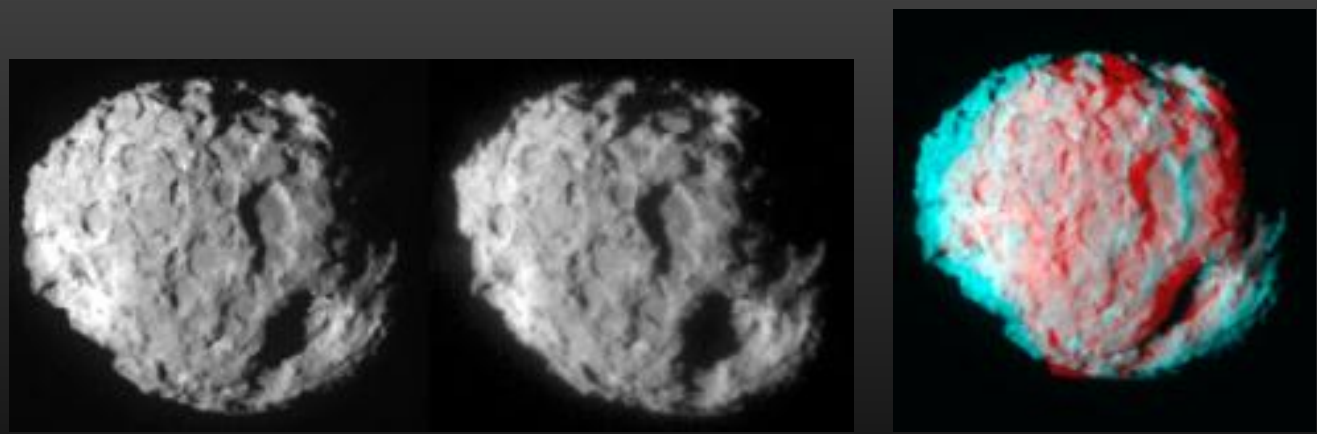
Rendu photoréaliste

- Calcul des intersections : dans le repère monde ou le repère objet ?

Rendu photoréaliste

Pour aller plus loin :

- Textures
- Autres effets (Brouillard, Bleu atmosphérique, ...)
- ...
- génération d'anaglyphes (cyan et rouge (espacement $1/30 * f$))



source : NASA

Rendu photoréaliste

Fin ?
Pas encore...

Post scriptum

Raycasting

Raycasting

Principe :

- On ne lance que les rayons depuis l'observateur et on ne calcul pas les rebonds...

(Raytracing est une extension du raycasting ?)

Raycasting

Wolfstein :

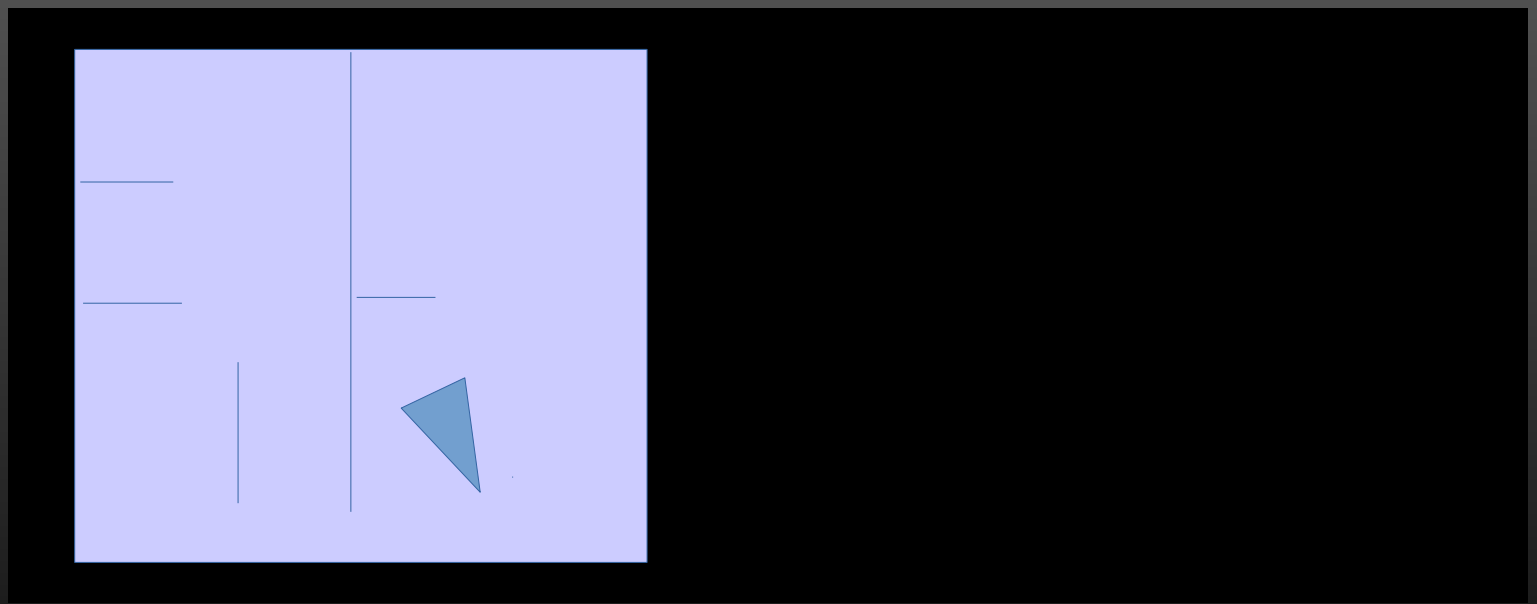
- on lance les rayons dans le plan !

source : Wolfstein

Raycasting

Wolfstein :

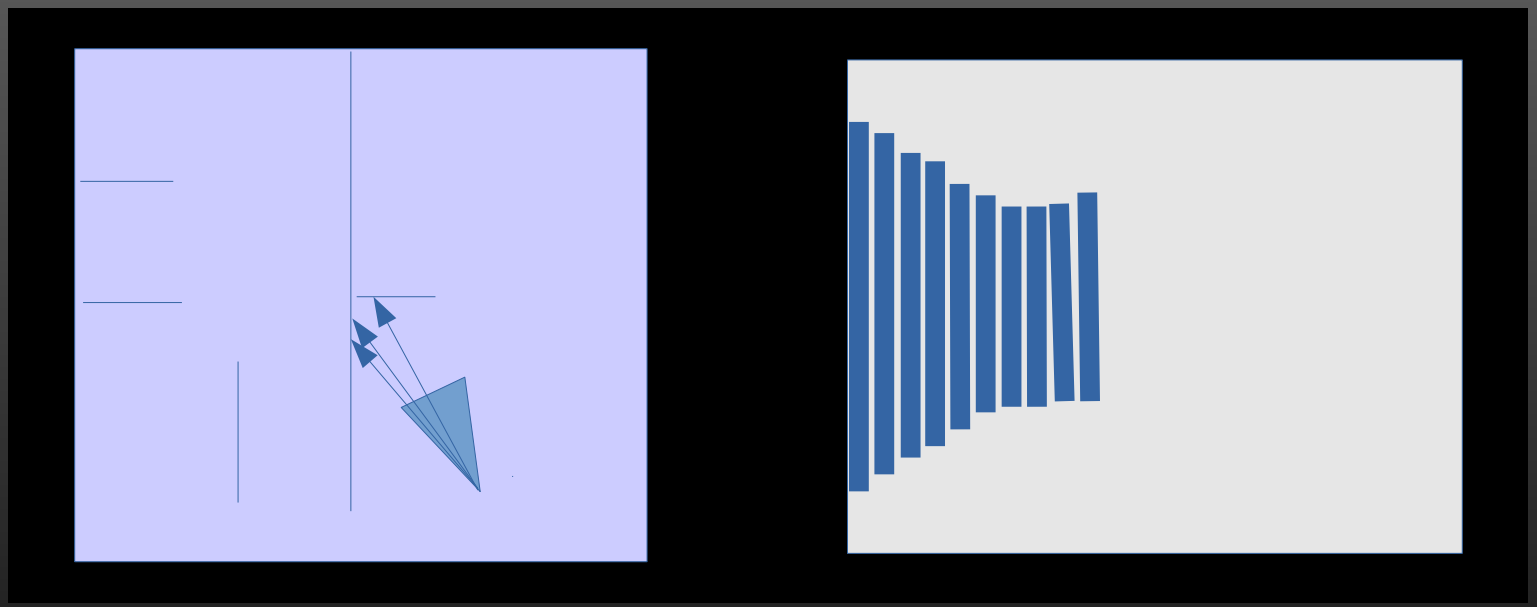
- on lance les rayons dans le plan !



Raycasting

Wolfstein :

- on lance les rayons dans le plan !



La longueur du rayon permet de conclure sur la hauteur du mur

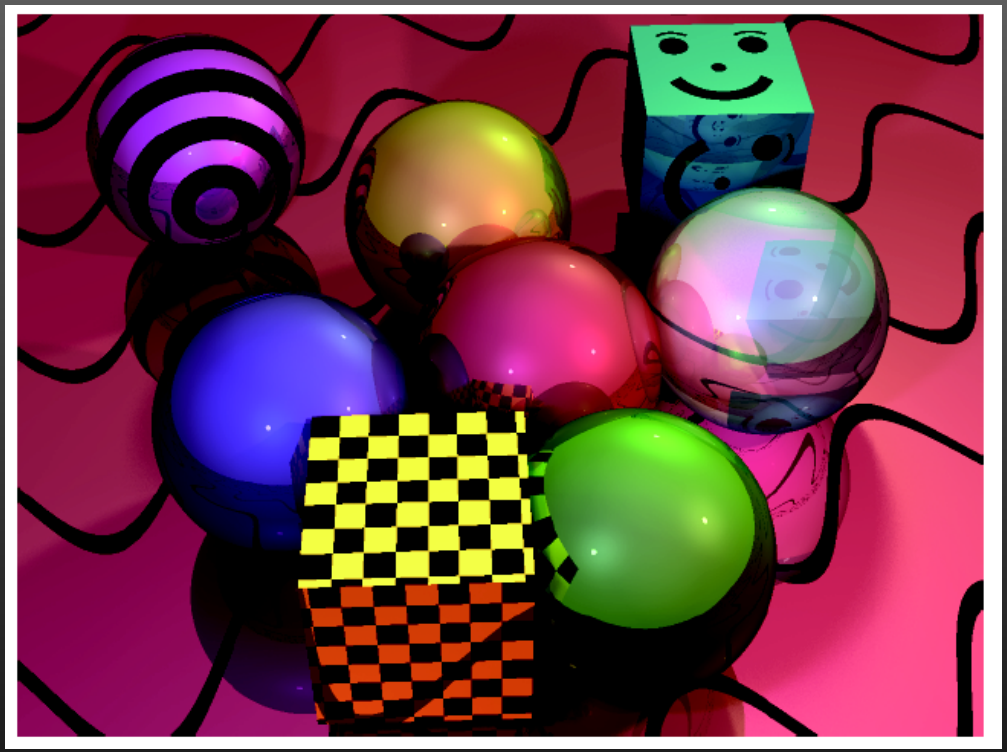
- 1 rayon donne 1 colonne de l'image + gestion des objets

Raycasting

- Algorithme rapide
- On est loin du rendu photoréaliste...

Rendu photoréaliste

Cette fois, c'est la fin !



source : Michel Huynh & Samuel Kvaalen