L’ÉCLAIRAGE GLOBAL

Livre de référence: G: 20, S: 4

http://tinyurl.com/ift3355

Mikhail Bessmeltsev

LES MODÈLES ET ALGORITHMES D’ÉCLAIRAGE

L’éclairage local - rapide

- Plus loin de la physique
- Approximer l’apparence
- L’interaction de chaque objet avec la lumière directe

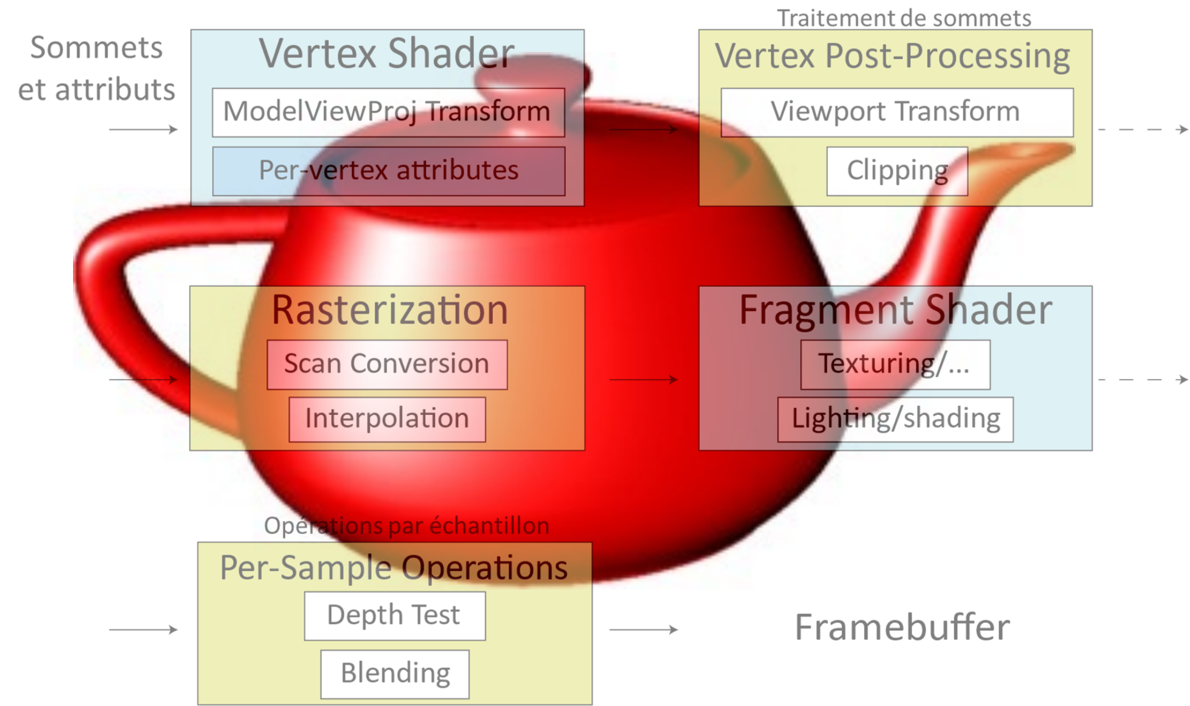
L’éclairage global – lent

- Plus proche de la physique
- Les interactions entre les objets

LES MODÈLES ET ALGORITHMES D'ÉCLAIRAGE

L'éclairage local - rapide

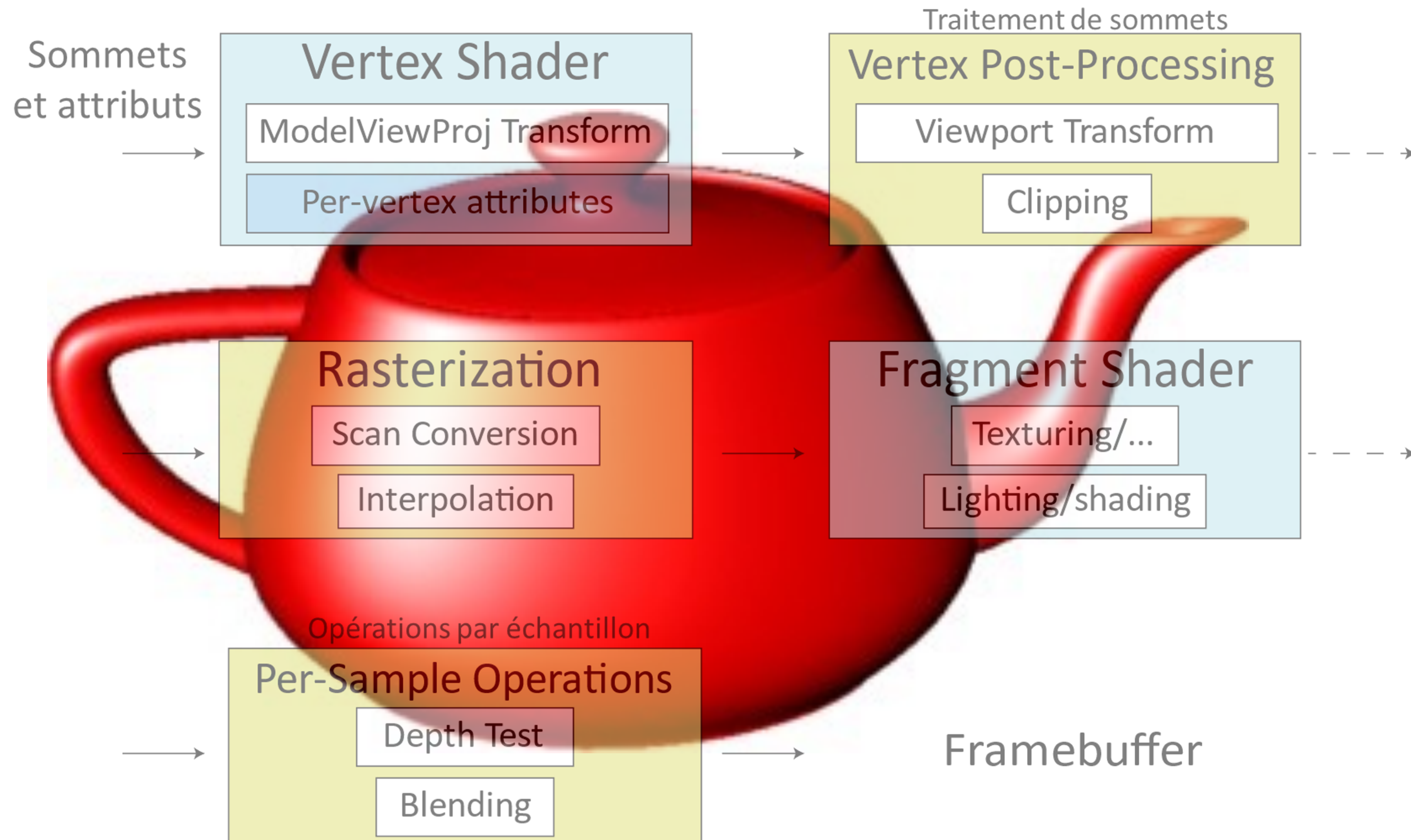
- Plus loin de la physique
- Approximer l'apparence
- L'interaction de chaque objet avec la lumière directe



L'éclairage global – lent

- Plus proche de la physique
- Les interactions entre les objets

QU'EST-CE QUI EST NON PHYSIQUE DANS L'ÉCLAIRAGE LOCAL?



LES ALGORITHMES DE L'ÉCLAIRAGE GLOBAL

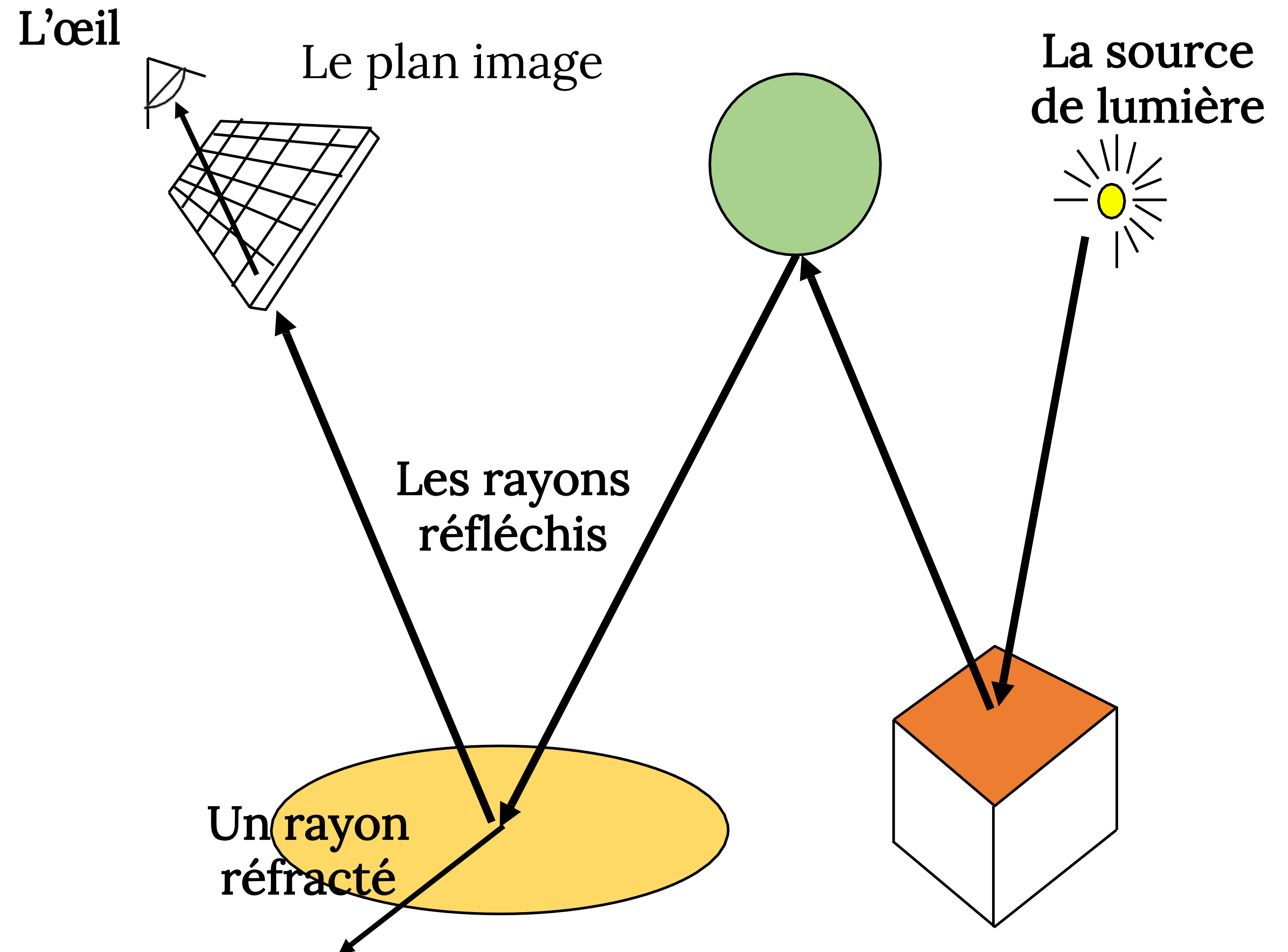
- Lancer de rayons
- Tracer de chemins
- *Photon Mapping*
- Radiosité
- *Metropolis light transport*
- …

COMMENT L'ÉCLAIRAGE GLOBAL DEVRAIT-IL FONCTIONNER?

COMMENT L'ÉCLAIRAGE GLOBAL DEVRAIT-IL FONCTIONNER?

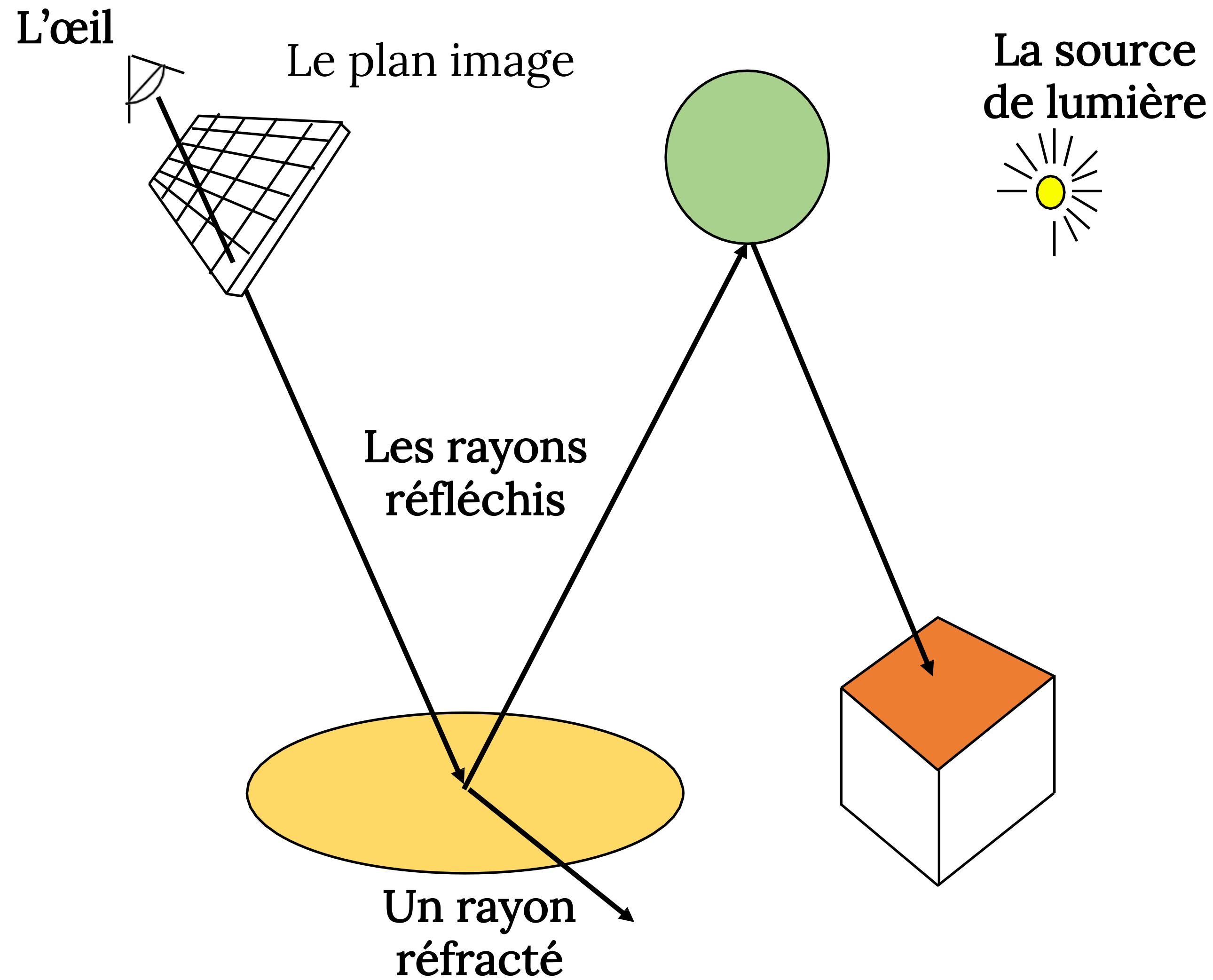
Simuler la lumière

- Telle qu'elle est émise par les sources de lumière
- Telle qu'elle rebondit sur les surfaces / est absorbée / réfléchie / réfractée
- Telle qu'elle atteint la caméra

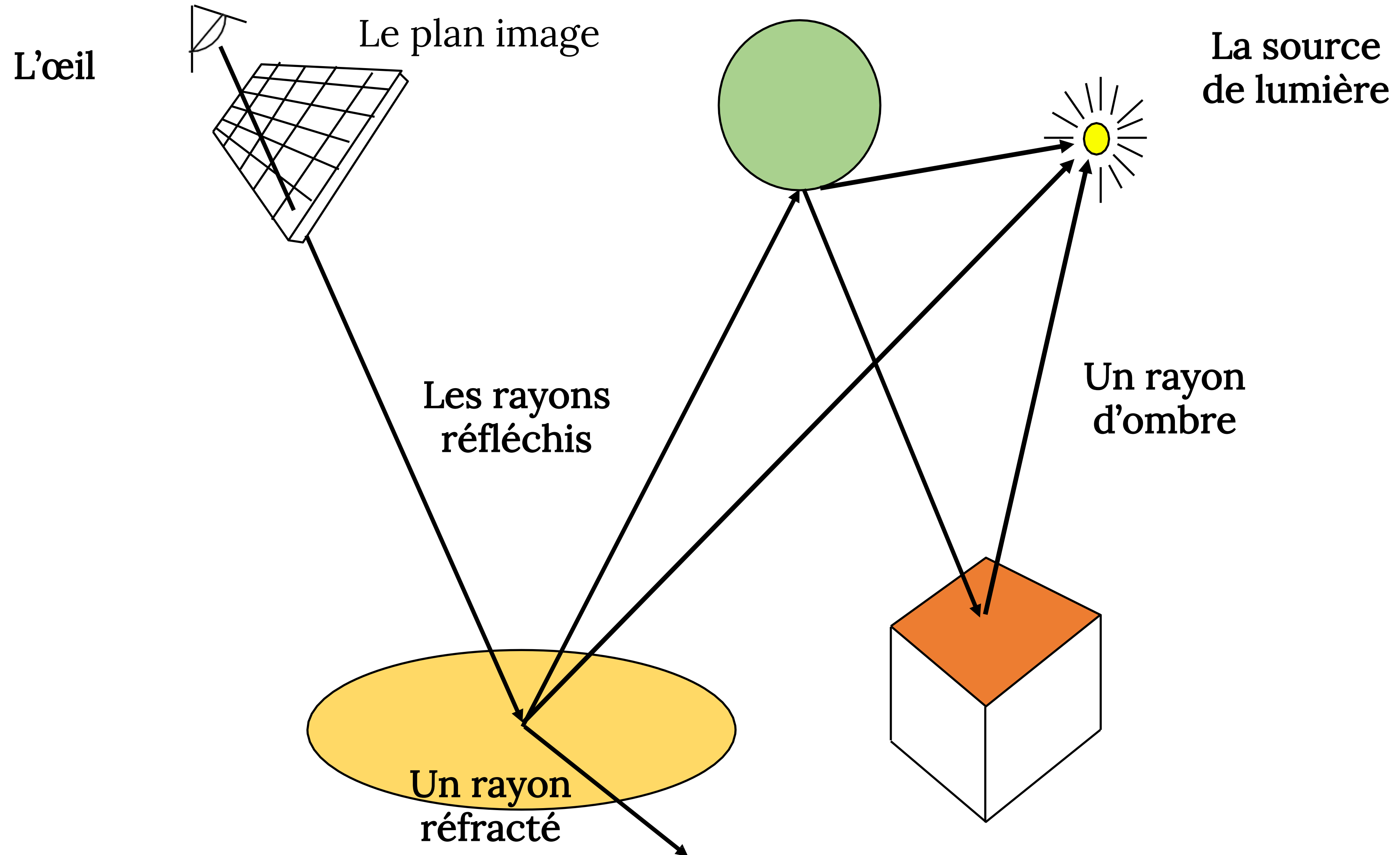


DES PROBLÈMES?

L'IDÉE DU LANCER DE RAYONS



L'IDÉE DU LANCER DE RAYONS

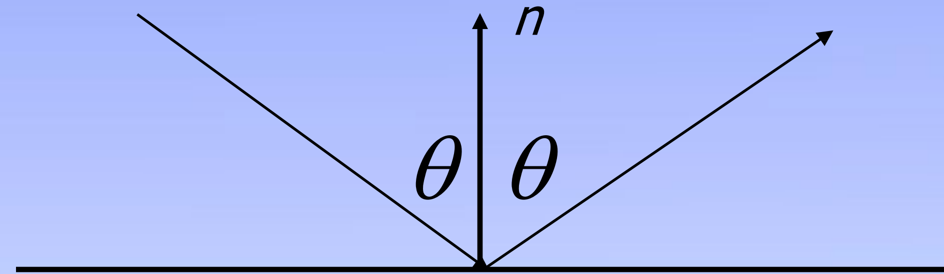


LANCER DE RAYONS

- Inverser les directions de rayons!
- Lancer les rayons de la caméra à travers chaque pixel
  - "Tracer les rayons à l’envers"
- Simuler ce que les rayons font:
  - Réflexion
  - Réfraction
  - …
- Chaque interaction d’un rayon avec un objet contribue à la couleur finale
- La majorité des rayons ne vont pas intersecter la lumière
  - Lancer les “*shadow rays*” pour calculer l’illumination directe

RÉFLEXION

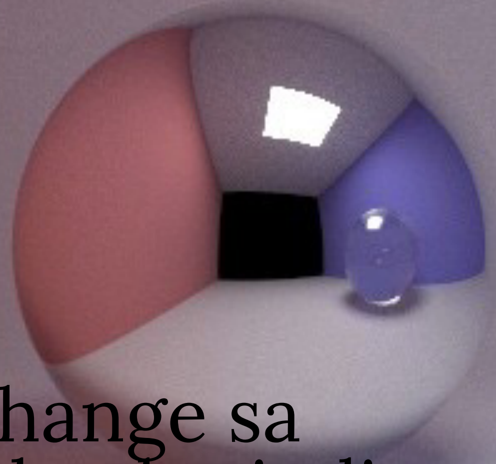
- Les effets d’un miroir
  - La réflexion spéculaire

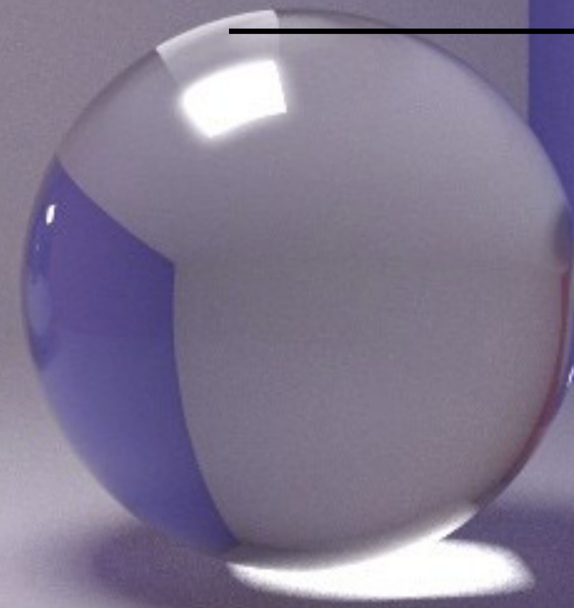


© 2010 Jules Berman ,
http://julesberman.blogspot.ca/

RÉFRACTION

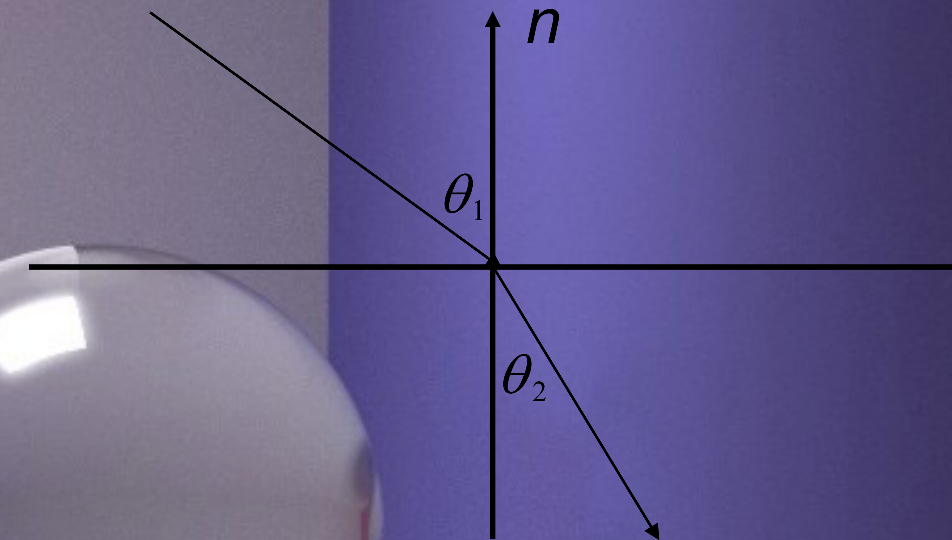
- L'interface entre l'objet non-opaque et l'environnement
  - E.g. la frontière entre le verre et l'air





La loi de Snell-Descartes

$$c_2 \sin\theta_1 = c_1 \sin\theta_2$$



- Le rayons change sa direction selon les indices de réfraction c_1, c_2

HENRIK WANN JENSEN 2000

LANCER DE RAYONS: L'ALGORITHME DE BASE

```
RayTrace(r,scene)
obj = FirstIntersection(r,scene)

if (no obj) return BackgroundColor;
else {
    if (Reflect(obj))
       reflect_color = RayTrace(ReflectRay(r,obj));
    else
       reflect_color = Black;

    if (Transparent(obj))
       refract_color = RayTrace(RefractRay(r,obj));
    else
       refract_color = Black;

   return Shade(reflect_color, refract_color, obj);
}
```

QUAND ARRÊTER?

- Cet algorithme ne se termine pas

- Les critères de terminaison
  - Aucune intersection
  - La contribution des rayons secondaires est inférieure à un seuil
  - La profondeur maximale / nombre de générations est atteinte

SOUS-PROGRAMMES

- ReflectRay(r,obj) – calculer le rayon réfléchi (utiliser la normale de l'objet à l'intersection)
- RefractRay(r,obj) – calculer le rayon réfracté
  - NB: le rayon peut être à l'intérieur de l'objet
- Shade(reflect_color,refract_color,obj) – calculer l'éclairage direct

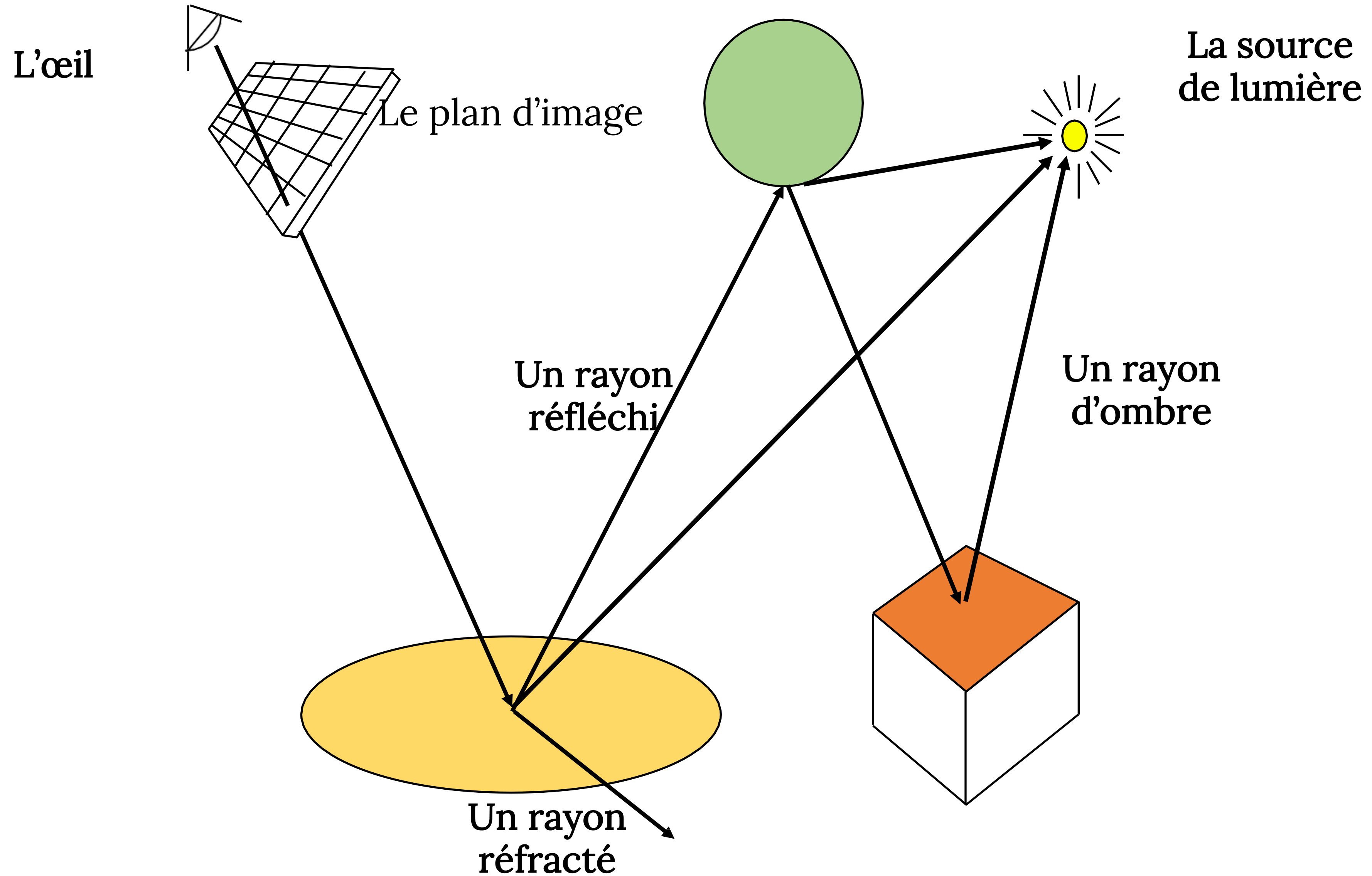
LES OMBRES

- Tracer un rayon de l'objet à la source de lumière
  - Si le rayon intersecte quelque chose ⇒ le point est dans l'ombre

```
shadow = RayTrace(LightRay(obj,r,light));


return Shade(shadow,reflect_color,refract_color,obj);
```

L'IDÉE DU LANCER DE RAYONS



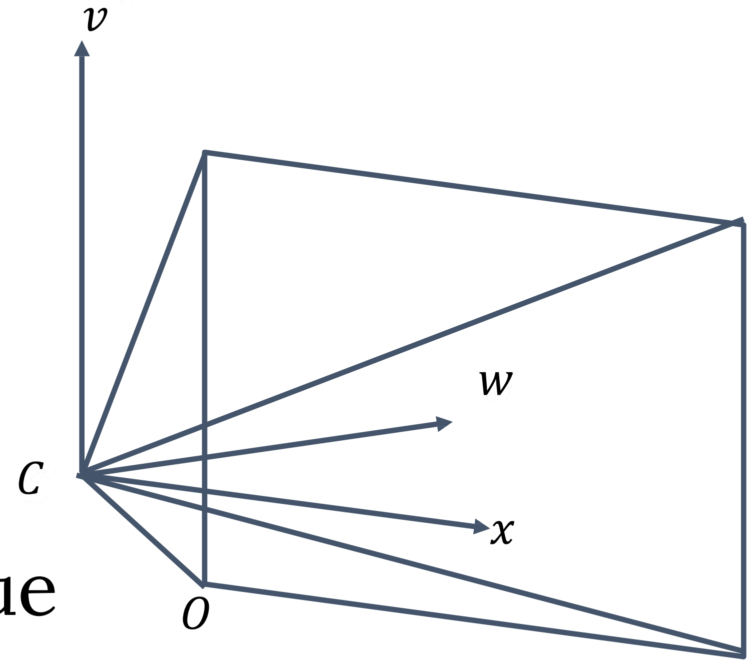
LANCER DE RAYONS:
LES DÉTAILS PRATIQUES

- Génération de rayons
- Les intersections entre les rayons et les objets
- Les transformations géométriques
- L'éclairage et *shading*
- La vitesse: Réduire le nombre de tests d'intersections
  - E.g. utiliser les arbres BSP ou les autres types de la partition de l'espace

LANCER DE RAYONS: GÉNÉRATION DE RAYONS

- Le système de coordonnées de la caméra
  - L’origine: C (la position de la caméra)
  - La direction de la vue: $\boldsymbol{w}$
  - Le vecteur vers le haut: v
  - $\boldsymbol{u} = \boldsymbol{w} \times \boldsymbol{v}$

- Similaire à la transformation de la vue



LANCER DE RAYONS: GÉNÉRATION DE RAYONS

- La distance au plan image: d
- La résolution d'image (pixels): N_x, N_y
- Les dimensions physiques du plan: l, r, t, b
- Pixel à la position i, j $(i = 0, \dots, N_x - 1; j = 0, \dots, N_y - 1)$

v w C u O

$$\boldsymbol{O} = \boldsymbol{C} + d\vec{\boldsymbol{w}} + l\vec{\boldsymbol{u}} + t\vec{\boldsymbol{v}}$$

$$P_{i,j} = O + (i + 0.5) \cdot \frac{r - l}{N_x} \cdot \vec{u} - (j + 0.5) \cdot \frac{t - b}{N_y} \cdot \vec{v}$$

$$= O + (i + 0.5) \cdot \Delta u \cdot \vec{u} - (j + 0.5) \cdot \Delta v \cdot \vec{v}$$

LANCER DE RAYONS: GÉNÉRATION DE RAYONS

- L'équation paramétrique d'un rayon:

$$\mathrm{R}_{i,j}(t) = C + t \cdot (P_{i,j} - C) = C + t \cdot \mathbf{v}_{i,j}$$

où $t = 0 \ldots \infty$

LANCER DE RAYONS:
LES DÉTAILS PRATIQUES

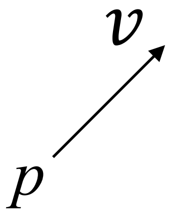
- Génération de rayons
- ***Les intersections entre les rayons et les objets***
- Les transformations géométriques
- L'éclairage et *shading*
- La vitesse: Réduire le nombre de tests d'intersection
  - E.g. utiliser les arbres BSP ou les autres types de la partition de l'espace

LES INTERSECTIONS

- Dans le pipeline OpenGL, nous étions limités à des objets discrets
    - Les maillages de triangles
- Ici, on peut utiliser des formes analytiques
    - Presqu'aucun problème avec l'interpolation des normales

LES INTERSECTIONS

- La cœur du lancer de rayons ⇒ Elles doivent être calculées très rapidement
- Normalement, elles impliquent de résoudre des équations implicites



Exemple: L'intersection entre un rayon et une sphère

Un rayon: $x(t) = p_x + v_x t,\ y(t) = p_y + v_y t,$
$z(t) = p_z + v_z t$
Une sphère unitaire: $x^2 + y^2 = 1$
L'équation quadratique en t:

$$0 = (p_x + v_x t)^2 + \left(p_y + v_y t\right)^2 + (p_z + v_z t)^2 - 1 =$$
$$= t^2\left(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2\right) + 2t\left(p_x v_x + p_y v_y + p_z v_z\right)$$
$$+ \left(p_x^2 + p_y^2 + p_z^2\right) - 1$$

INTERSECTIONS AVEC D’AUTRES PRIMITIVES

- Les fonctions implicites:
  - Les sphères et les sections de coniques (hyperboloïdes, ellipsoïdes, paraboloïdes, cônes, cylindres)
    - Toutes sont décrites par des équations quadratiques
  - Les fonctions d’ordre supérieur (e.g. tores et les autres surfaces quartiques)
    - Sont similaires, mais trouver les racines est plus difficile
    - Les méthodes numériques

LES INTERSECTIONS AVEC LES AUTRES PRIMITIVES

- Les polygones:
  - D’abord, intersecter le rayon avec le plan
    - La fonction implicite est linéaire
  - Après, tester si le point est à l’intérieur ou à l’extérieur (test 2D)
  - Pour les polygones convexes
    - Tester si le point est du même côté de chaque ligne (segment)

LANCER DE RAYONS:
LES DÉTAILS PRATIQUES

- Génération de rayons
- Les intersections entre les rayons et les objets
- **Les transformations géométriques**
- L'éclairage et *shading*
- La vitesse: Réduire le nombre de tests d'intersection
  - E.g. utiliser les arbres BSP ou les autres types de la partition de l'espace

LANCER DE RAYONS: TRANSFORMATIONS

- Remarque: les rayons remplacent la projection perspective
- Les transformations géométriques:
  - Le même but que dans le pipeline:
    - Modéliser la scène avec les objets dans leurs systèmes de coordonnées
  - Un problème:
    - Certaines représentations de la géométrie sont difficiles à transformer
      - Dans le pipeline, nous n’avons que les polygones

LANCER DE RAYONS: TRANSFORMATIONS

- Les transformations de rayons:
  - Pour un test d'intersections, il est important que les rayons et les objets soient dans un même système de coordonnées
  - Transformer tous les rayons dans le système de coordonnées de l'objet
    - Transformer la position de la caméra et la direction du rayon par l'inverse de la matrice *modelview*
  - Le *shading* est fait normalement dans les coordonnées du monde
    - Transformer le point du système de coordonnées de l'objet dans le système de coordonnées du monde
    - Il faut avoir les rayons dans les deux système de coordonnées

LANCER DE RAYONS:
LES DÉTAILS PRATIQUES

- Génération de rayons
- Les intersections entre les rayons et les objets
- Les transformations géométriques
- **L'éclairage et *shading***
- La vitesse: Réduire le nombre de tests d'intersection
    - E.g. utiliser les arbres BSP ou les autres types de la partition de l'espace

LANCER DE RAYONS: L'ÉCLAIRAGE DIRECT

- Les sources de lumière:
  - Pour le moment: les sources ponctuelles et directionnelles
  - On peut modéliser les lumières plus complexes
    - Les lumières surfaciques
    - Fluorescence

LANCER DE RAYONS: L'ÉCLAIRAGE DIRECT

- L'information de la surface locale (la normale…)
  - Pour les surfaces implicites, $F(x, y, z) = 0$:
    la normale $n(x, y, z)$ est le gradient de F:

$$n(x,y,z) = \nabla F(x,y,z) = \begin{pmatrix} \partial F(x,y,z)/\partial x \\ \partial F(x,y,z)/\partial y \\ \partial F(x,y,z)/\partial z \end{pmatrix}$$

  - Exemple:

$$F(x,y,z) = x^2 + y^2 + z^2 - r^2$$

$$\mathbf{n}(x,y,z) = \begin{pmatrix} 2x \\ 2y \\ 2z \end{pmatrix}$$

Elle doit être normalisée

LANCER DE RAYONS: L'ÉCLAIRAGE DIRECT

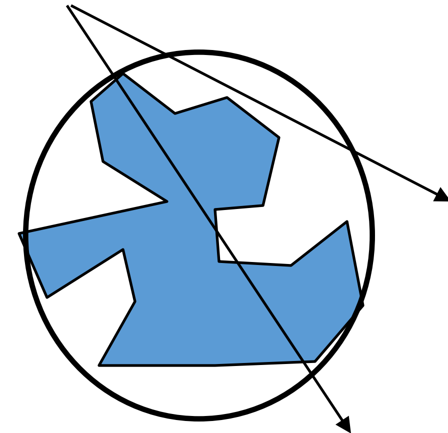
- Pour les maillages de triangles
  - Interpoler l'information par sommets
    - Phong shading!
    - Comme qu'avant
  - La différence entre le pipeline:
    - Il faut calculer les coordonnées barycentriques pour chaque point d'intersection

LANCER DE RAYONS:
LES DÉTAILS PRATIQUES

- Génération de rayons
- Les intersections entre les rayons et les objets
- Les transformations géométriques
- L'éclairage et *shading*
- **La vitesse: Réduire le nombre de tests d'intersection**
    - E.g. utiliser les arbres BSP ou les autres types de la partition de l'espace

LANCER DE RAYONS: OPTIMISÉ

- L'algorithme de base est simple mais trop lent
- Optimiser:
  - Réduire le nombre de rayons
  - Réduire le nombre de tests d'intersection
- Paralléliser
  - Cluster
  - GPU
- Les méthodes
  - Boîtes englobantes
  - La division de l'espace
    - Visibilité, Intersection/Collision
  - Élagage des arbres

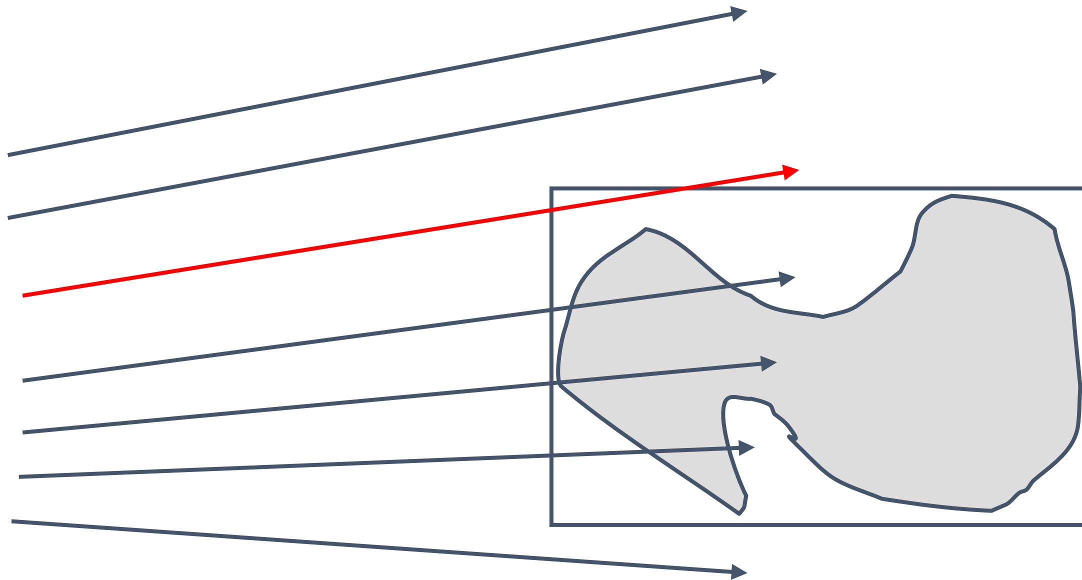


LES STRUCTURE DE DONNÉES POUR LA SUBDIVISION DE L'ESPACE

- Le but: réduire le nombre d'intersections pour chaque rayon
- Beaucoup d'approches:
  - Hiérarchie de volumes englobants
  - La subdivision de l'espace hiérarchique
    - Octree, l'arbre k-D, l'arbre BSP

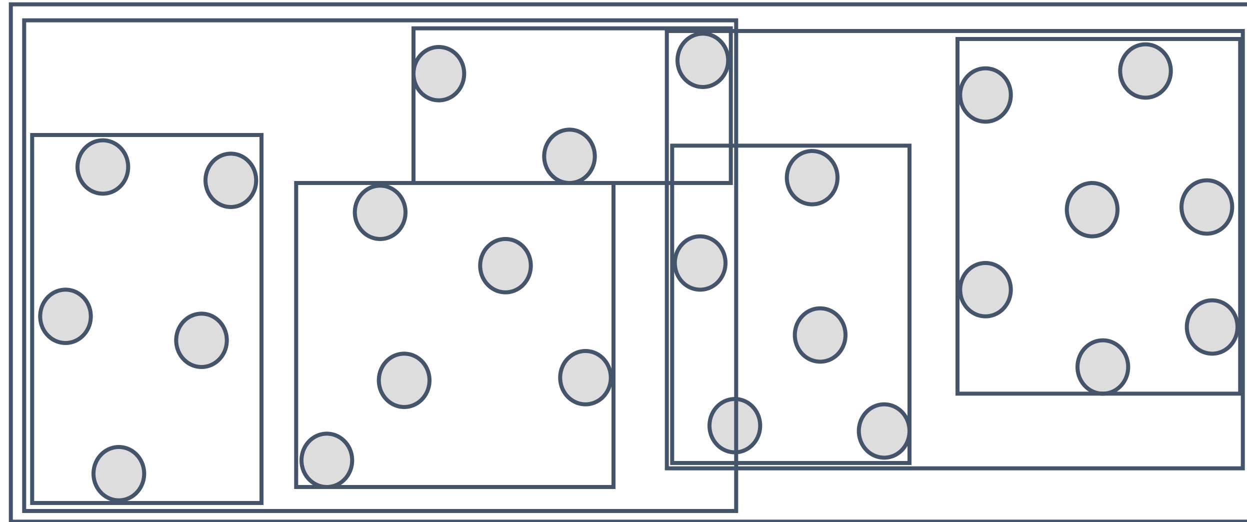
VOLUMES ENGLOBANTES: L'IDÉE

- Éviter le calcul des intersections avec les objets complexes (e.g. un maillage de triangles)
- Faire un test conservateur rapide
  - Entourer l'objet d'une géométrique simple (e.g. une sphère ou une boîte)
    - Réduire les faux positifs: créer la géométrie aussi serrée que possible



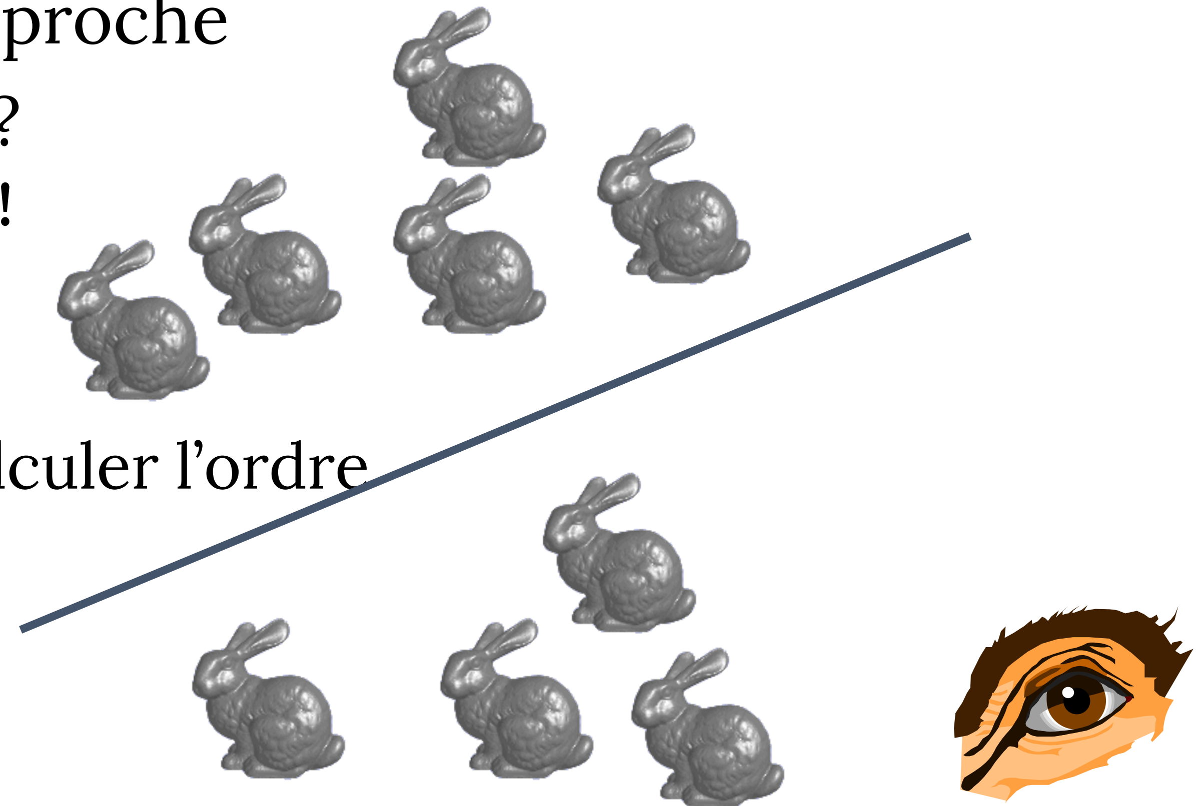
HIÉRARCHIE DE VOLUMES

- Une extension de la dernière idée:
  - Utiliser les boites pour des groupes d'objets

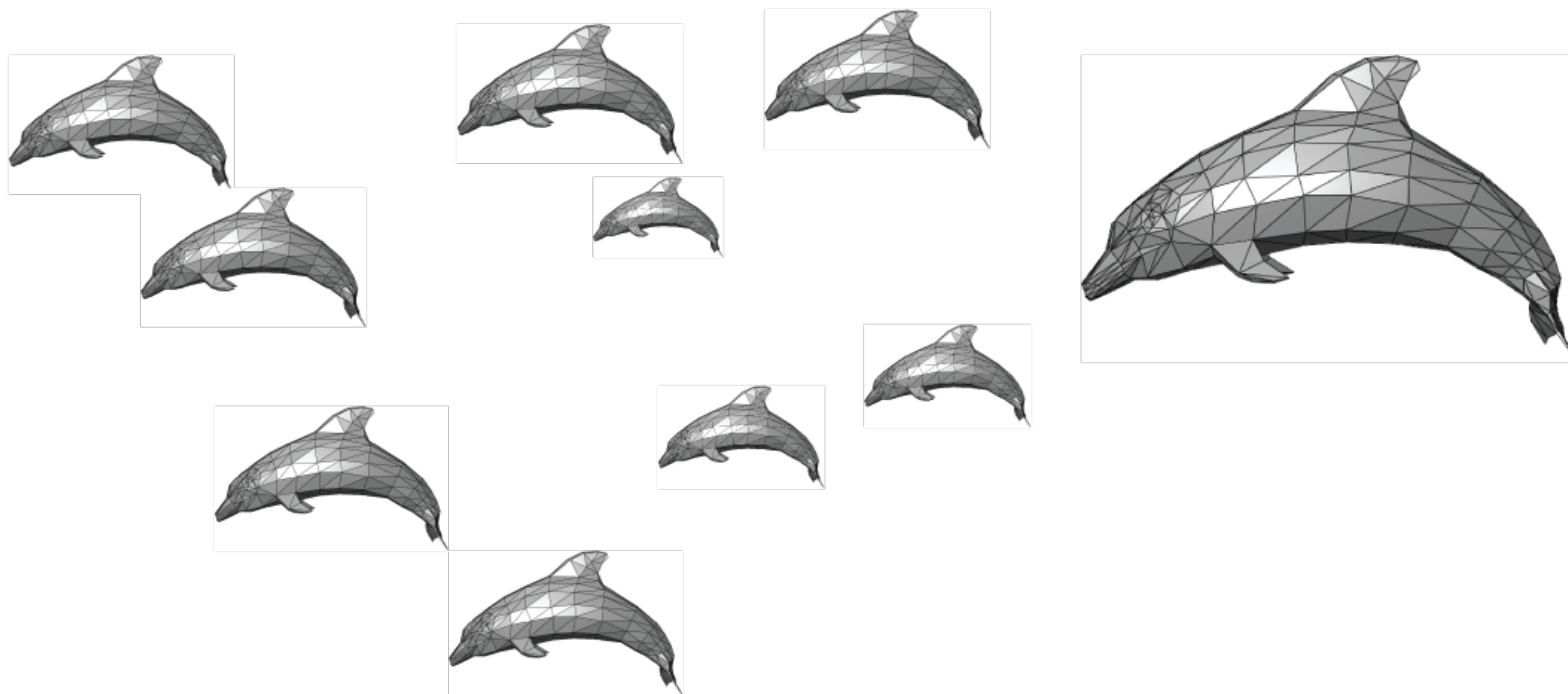


LES ARBRES BSP : L'IDÉE

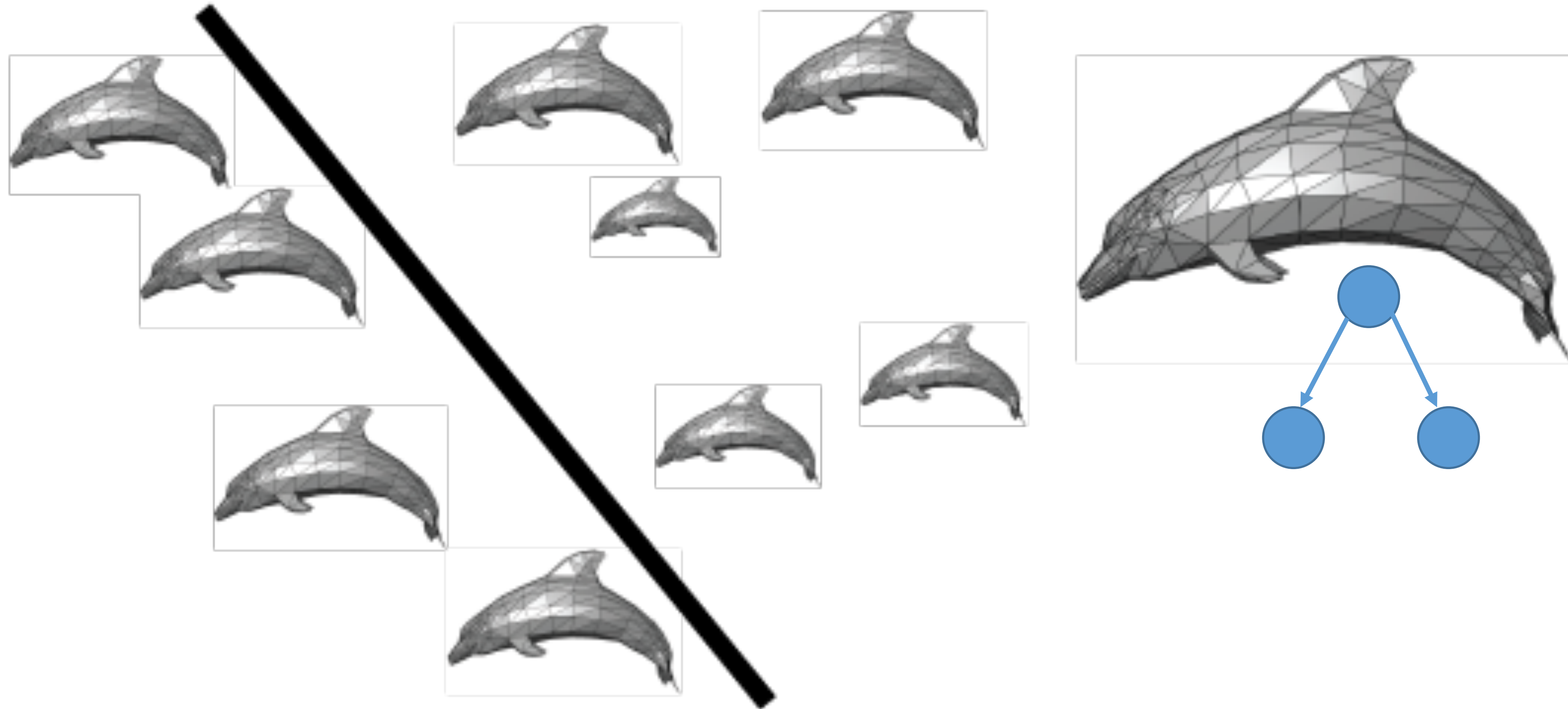
- Pour un plan, les objets du même côté que la caméra NE PEUVENT PAS être cachés par les objets d'un autre côté
- D'abord intersecter le côté le plus proche
- Si le rayon n'intersecte pas le plan?
    - **Il ne peut pas intersecter l'autre côté!**
- L'idée:
    - Diviser l'espace récursivement
    - Traverser l'arbre de plans pour calculer l'ordre des intersections/rendu
        - Tester la position de l'œil avec chaque plan



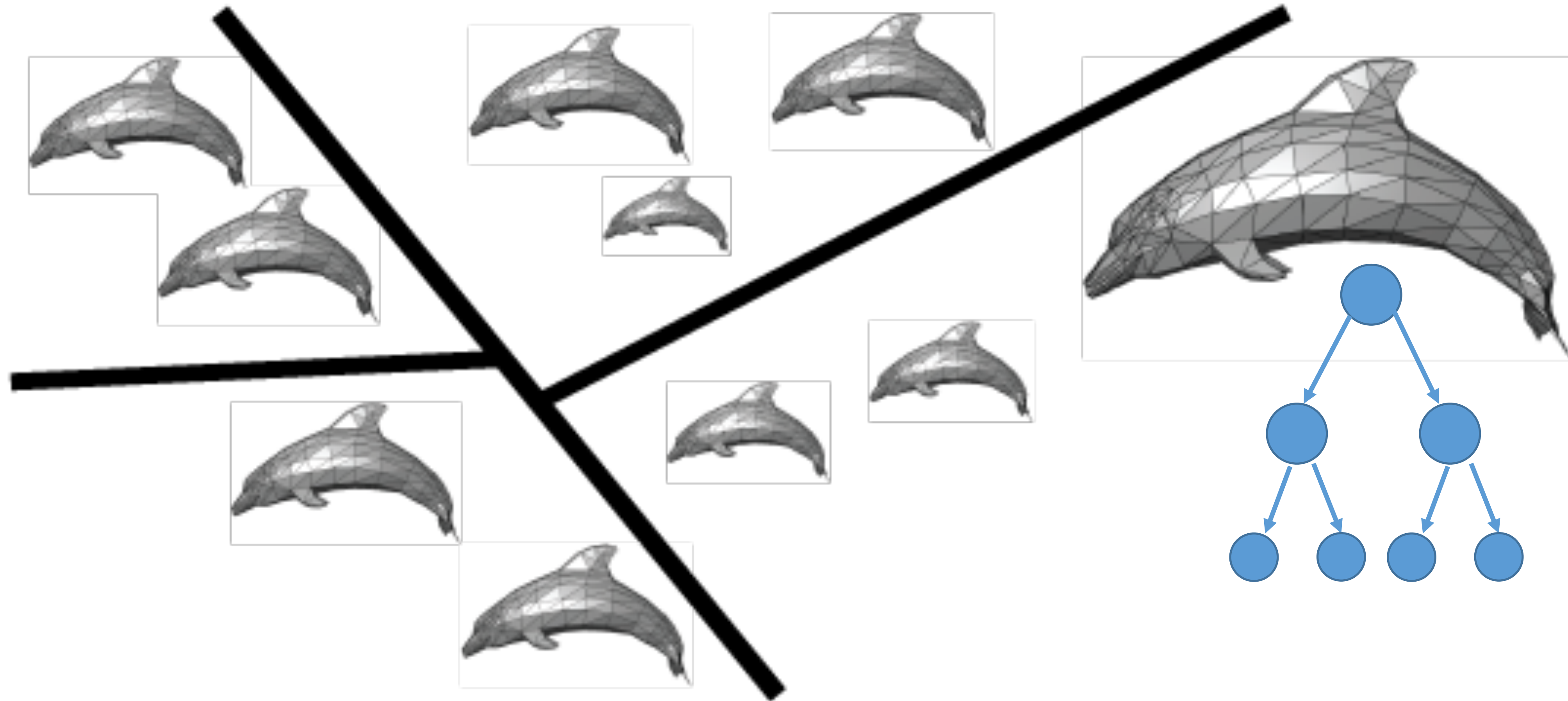
LES ARBRES BSP: UNE CONSTRUCTION



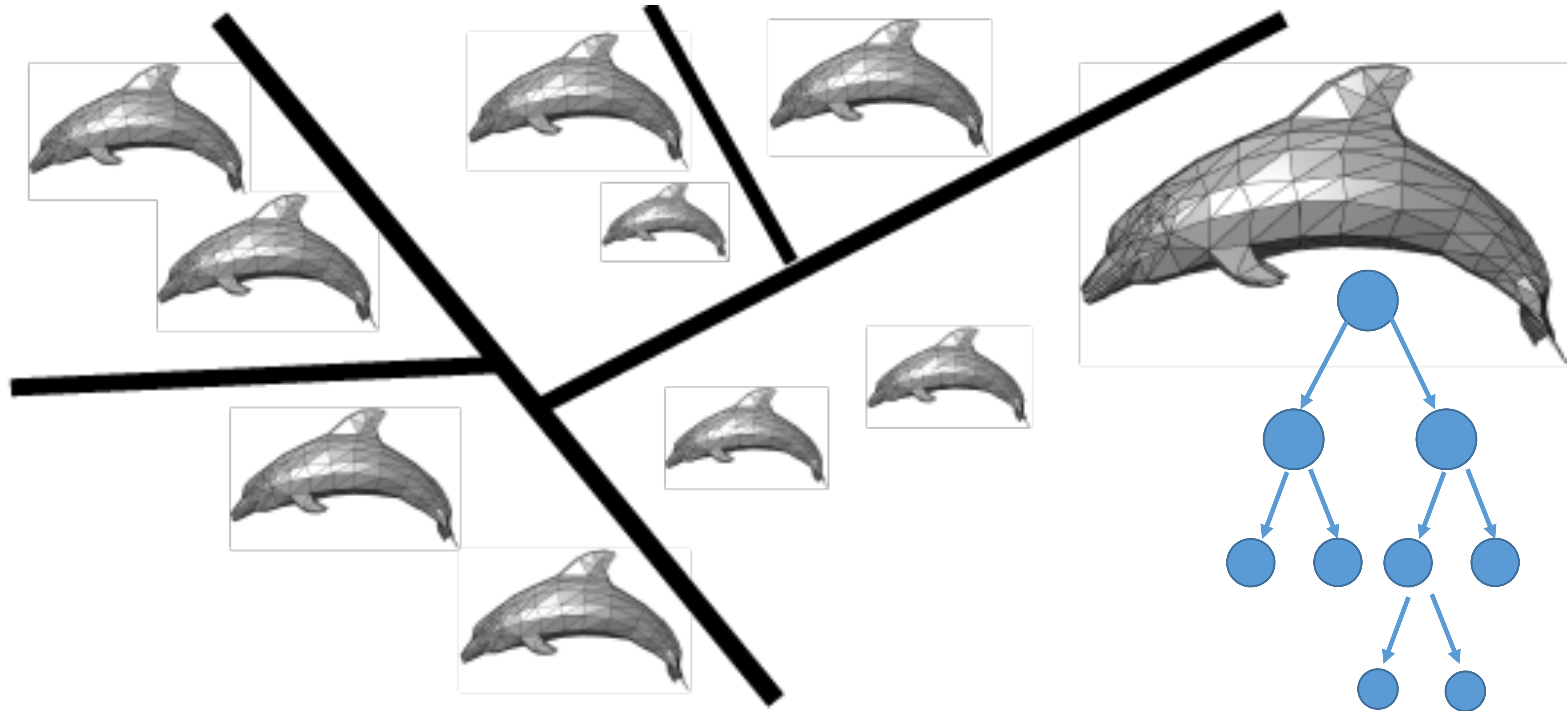
LES ARBRES BSP: UNE CONSTRUCTION



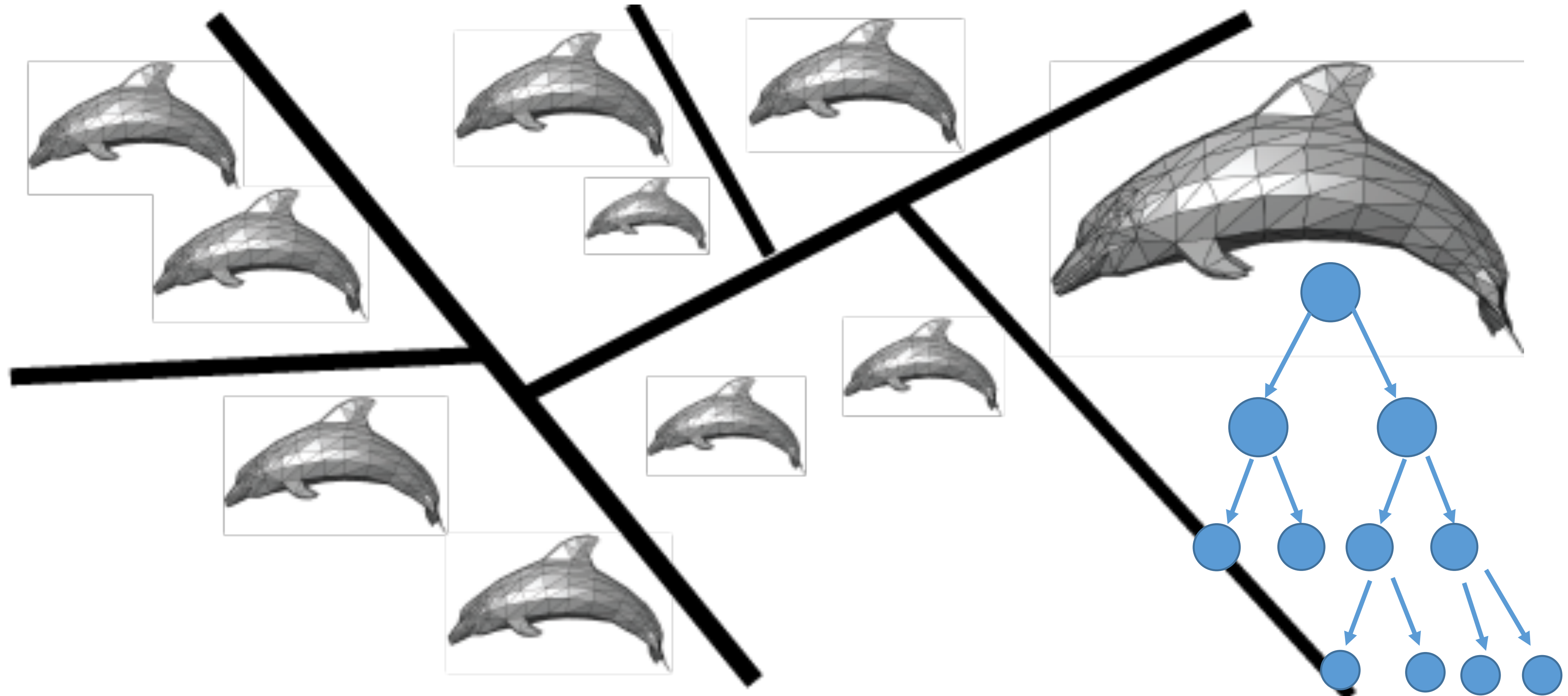
LES ARBRES BSP: UNE CONSTRUCTION



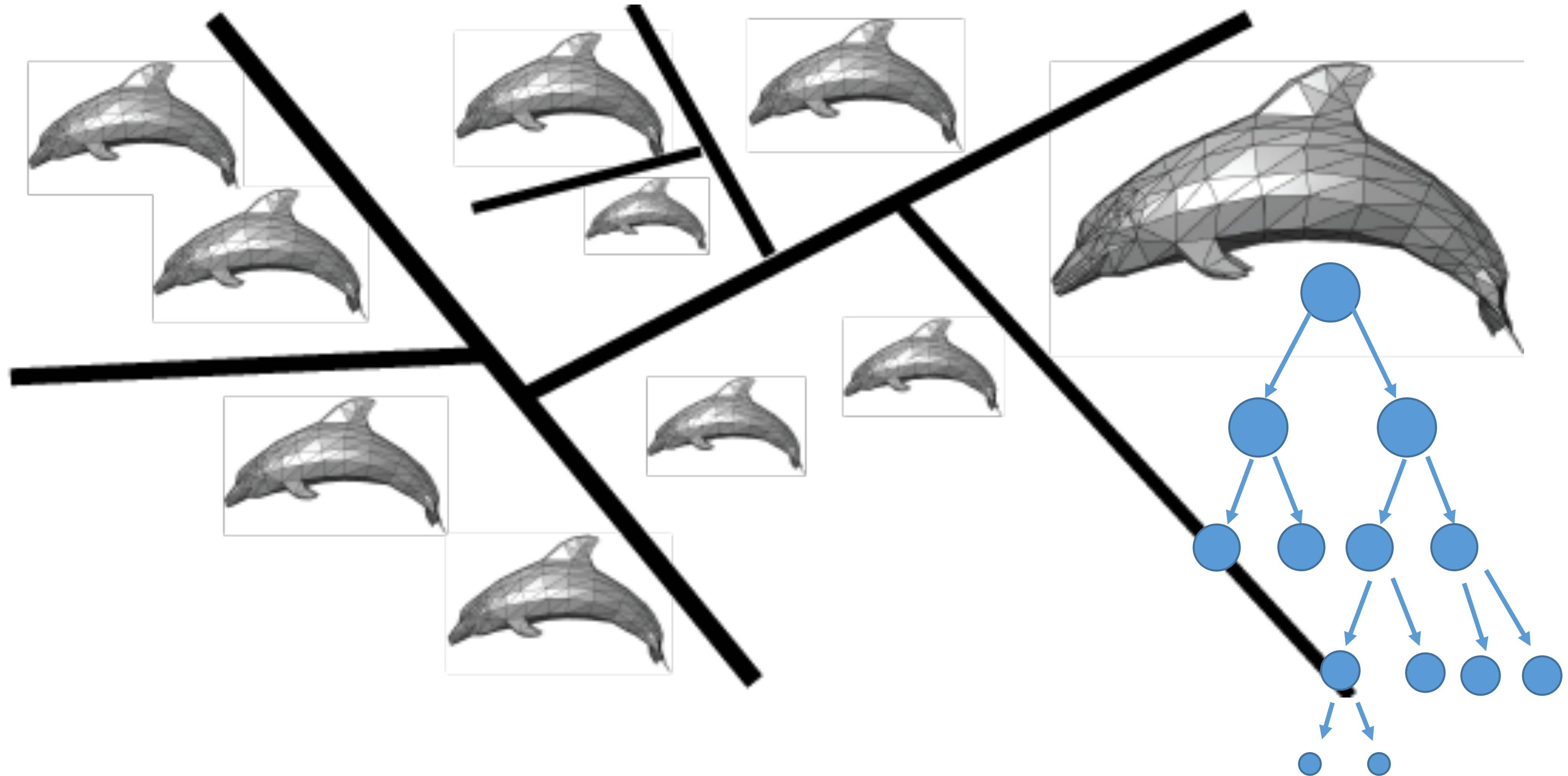
LES ARBRES BSP: UNE CONSTRUCTION



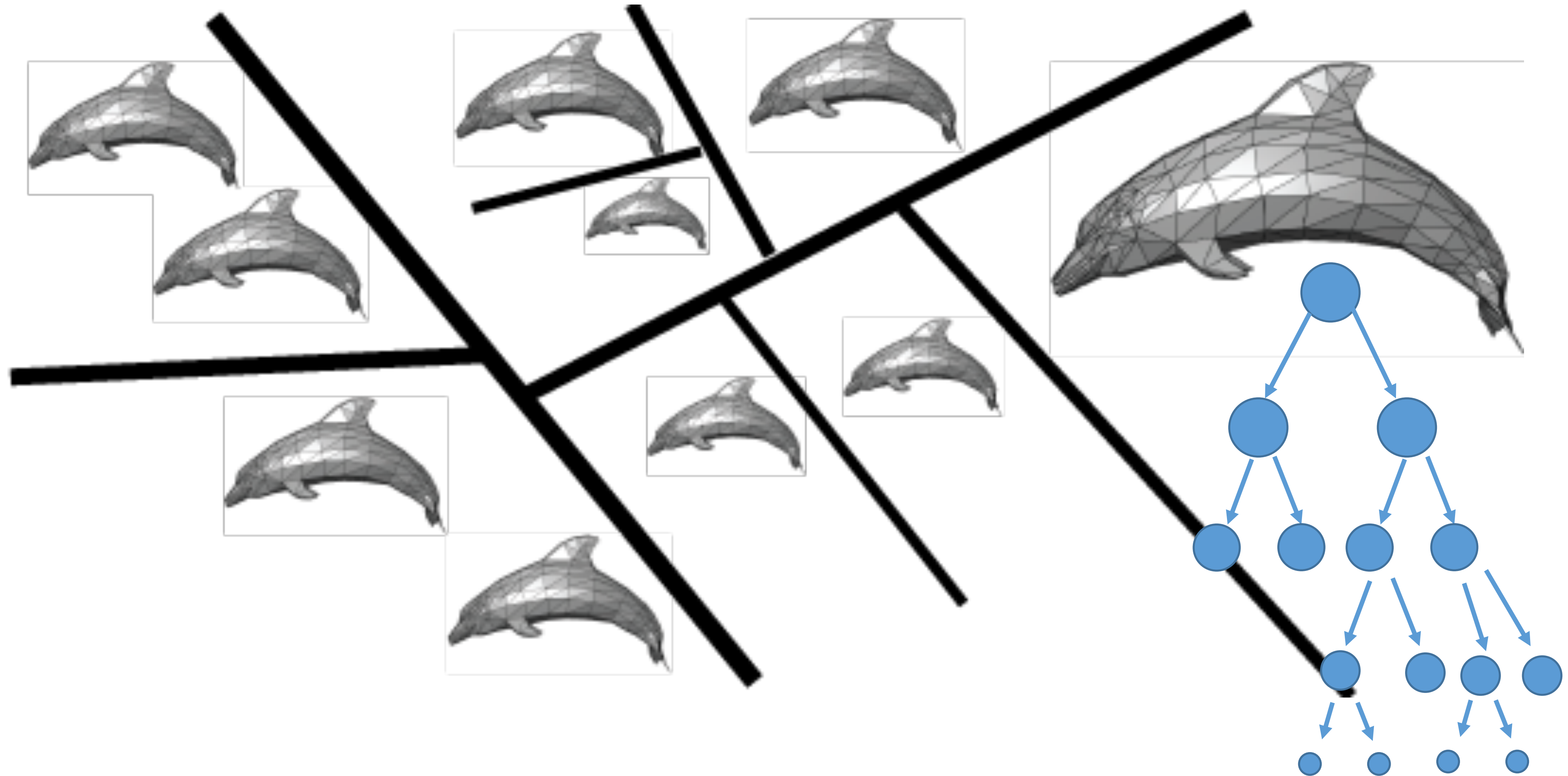
LES ARBRES BSP: UNE CONSTRUCTION



LES ARBRES BSP: UNE CONSTRUCTION

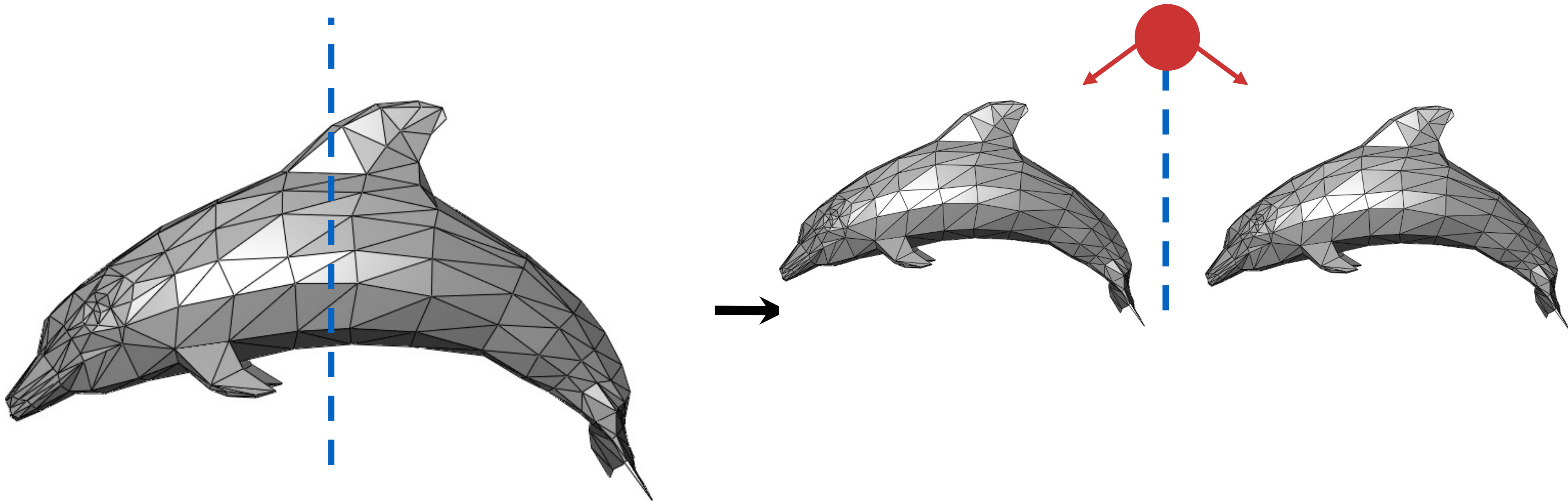


LES ARBRES BSP:
UNE CONSTRUCTION



DIVISER LES OBJETS

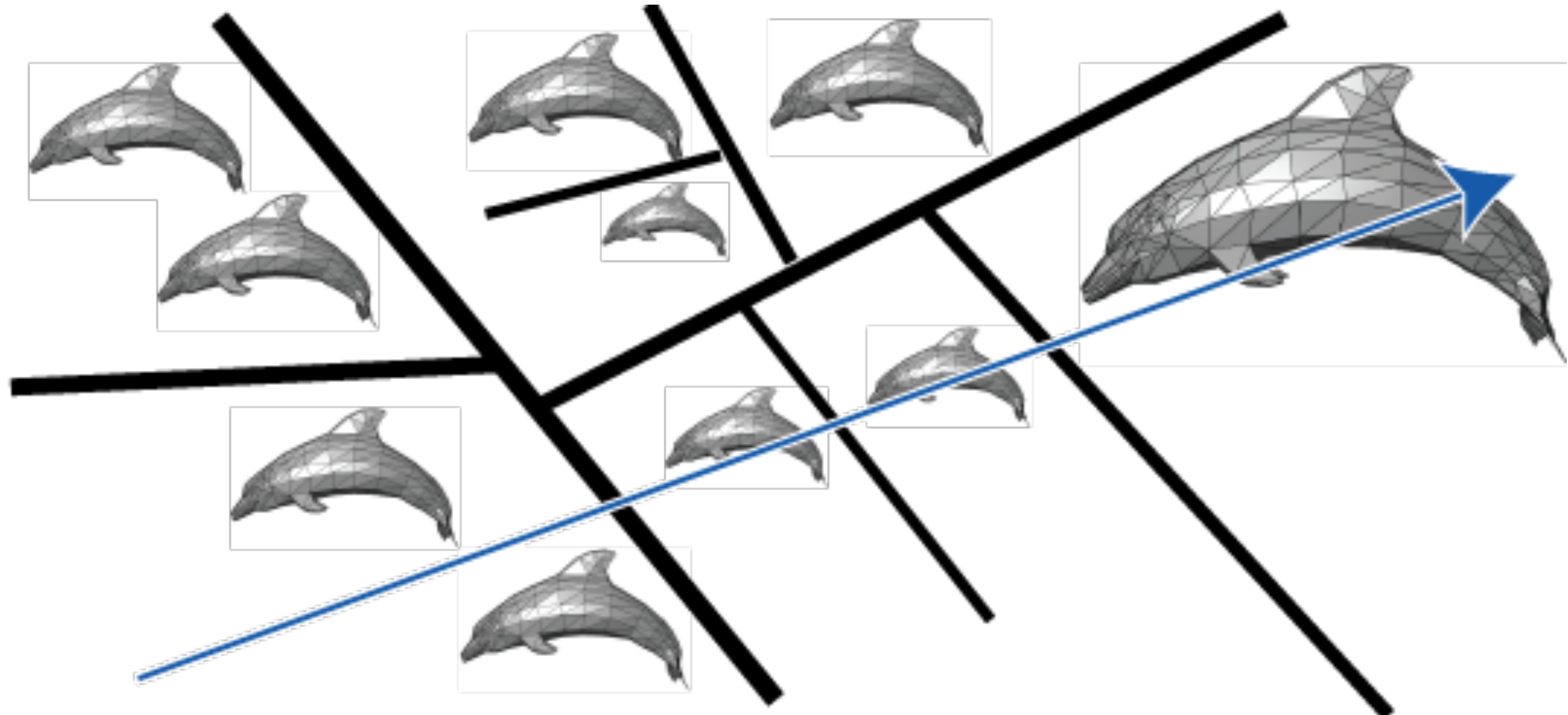
- Mais qu’est-ce qu’on fait si le plan intersecte un objet?
  - Dupliquer (considérer l’objet dans les deux parties)



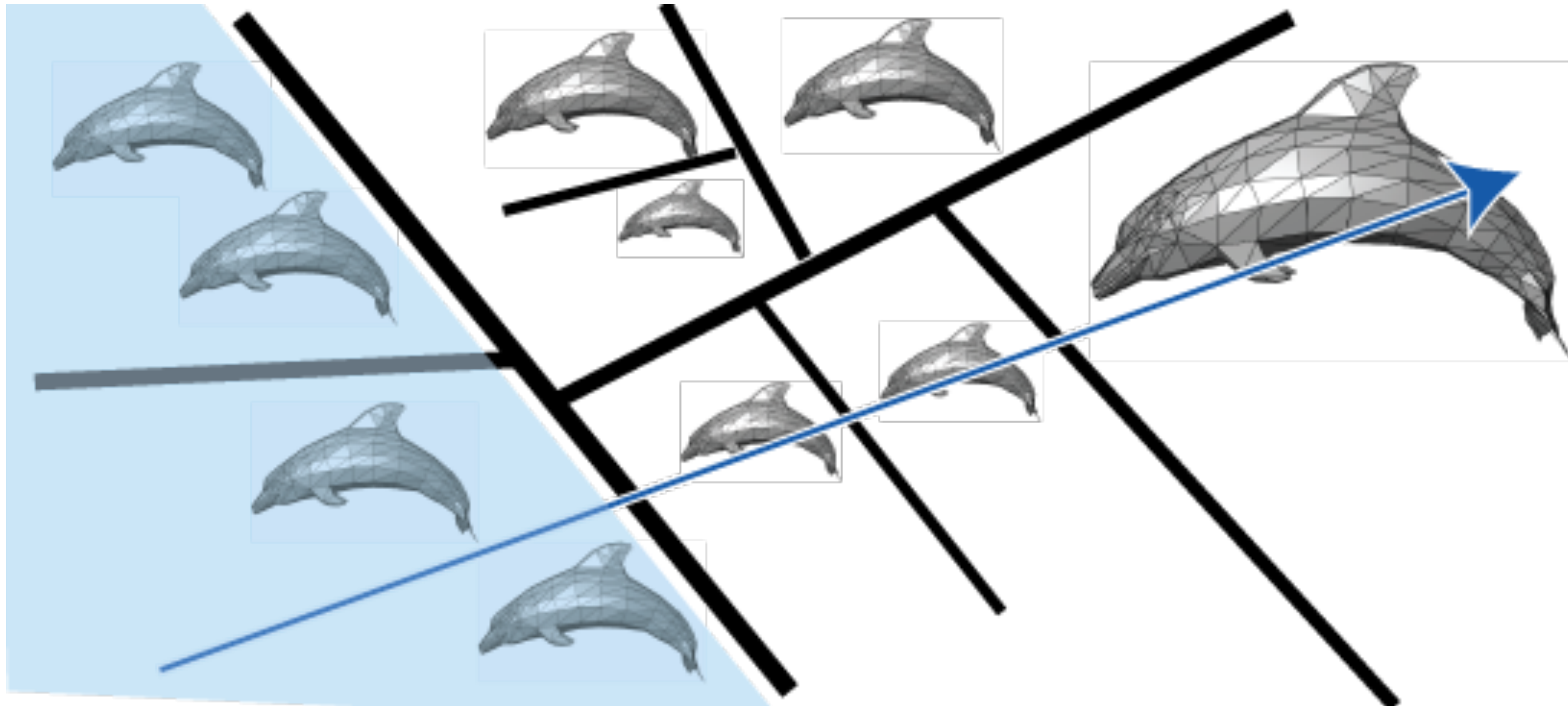
TRAVERSER LES ARBRES BSP

- La création est indépendante de la position de l'œil
  - Une étape de prétraitement
- Une traversée utilise l'origine du rayon
  - Lors de l'exécution, on utilise l'arbre pour plusieurs rayons (=les origines différentes)

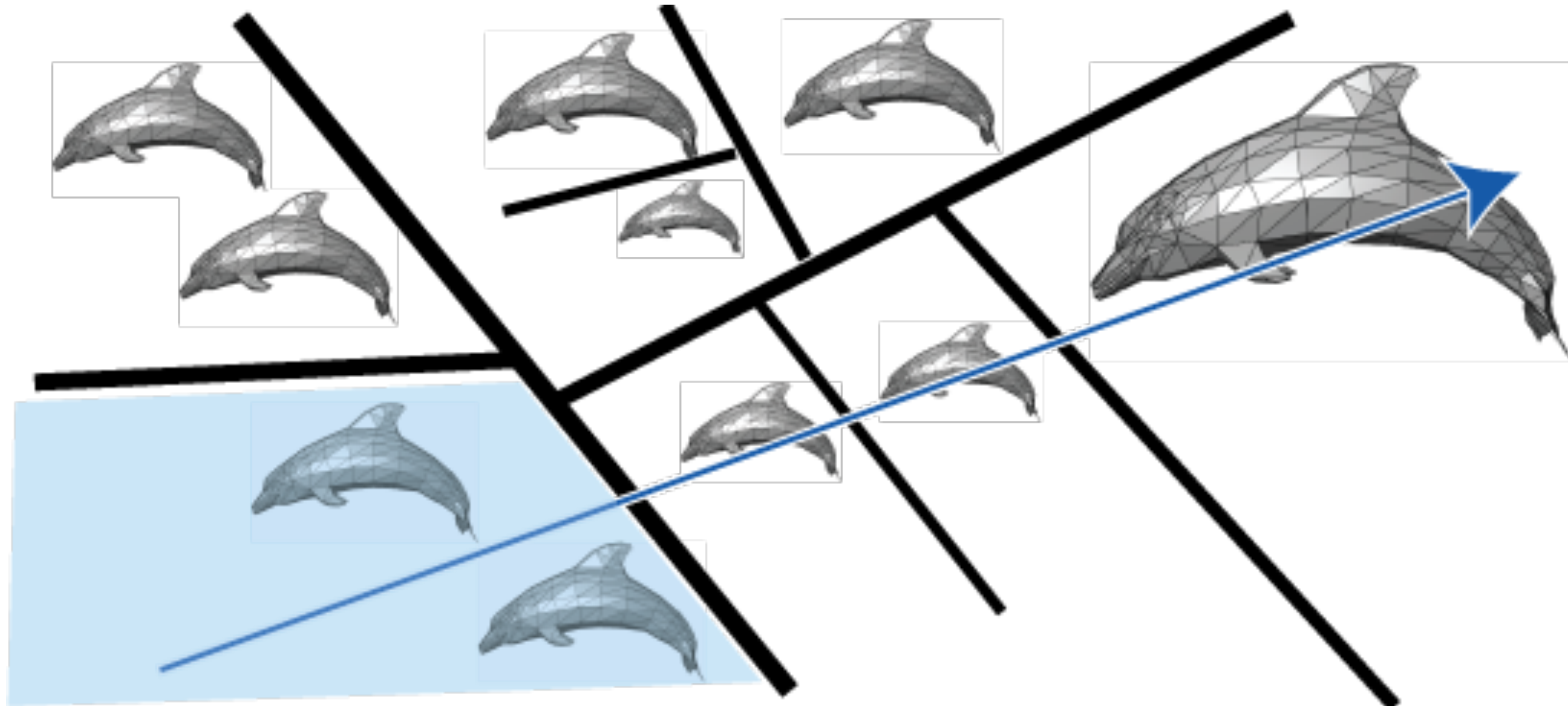
LES ARBRES BSP : LA TRAVERSÉE



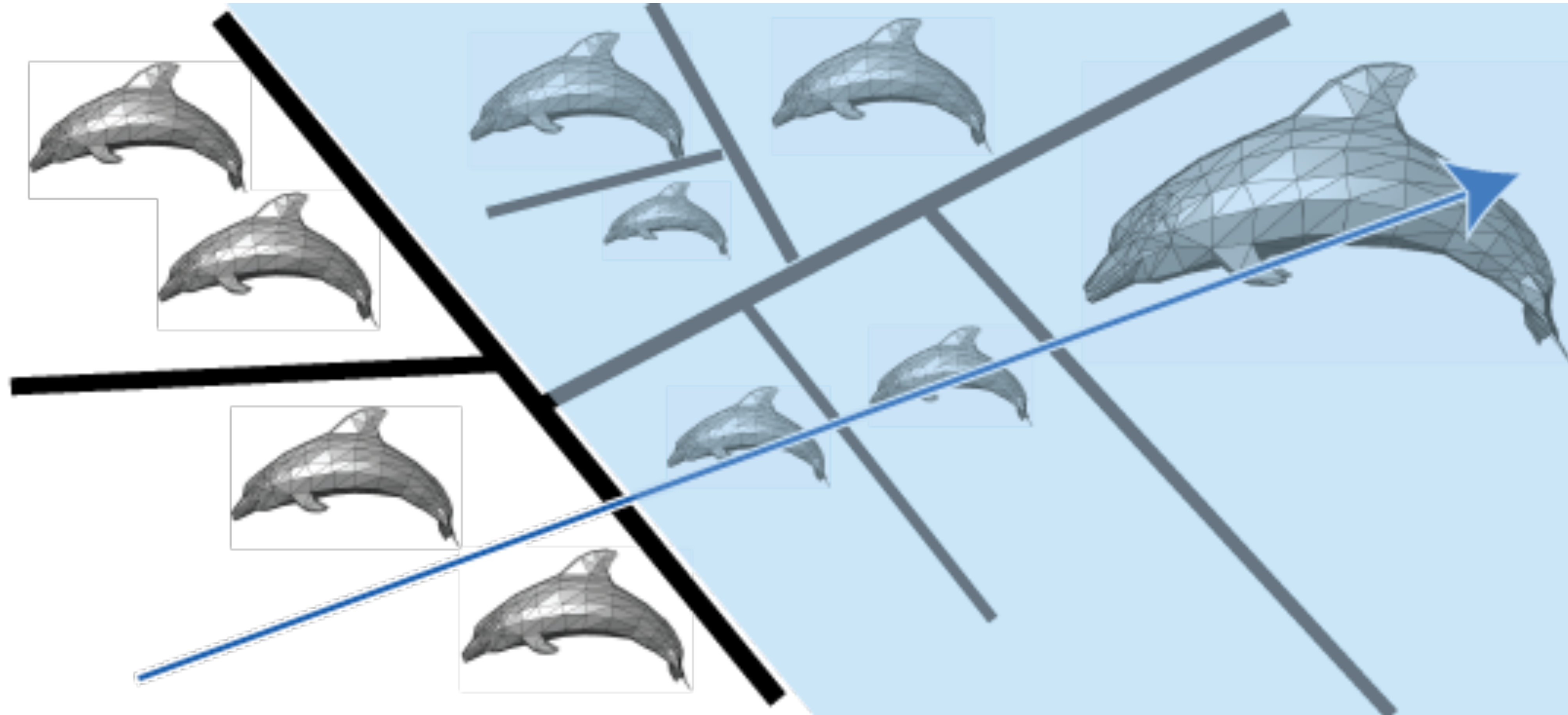
LES ARBRES BSP : LA TRAVERSÉE



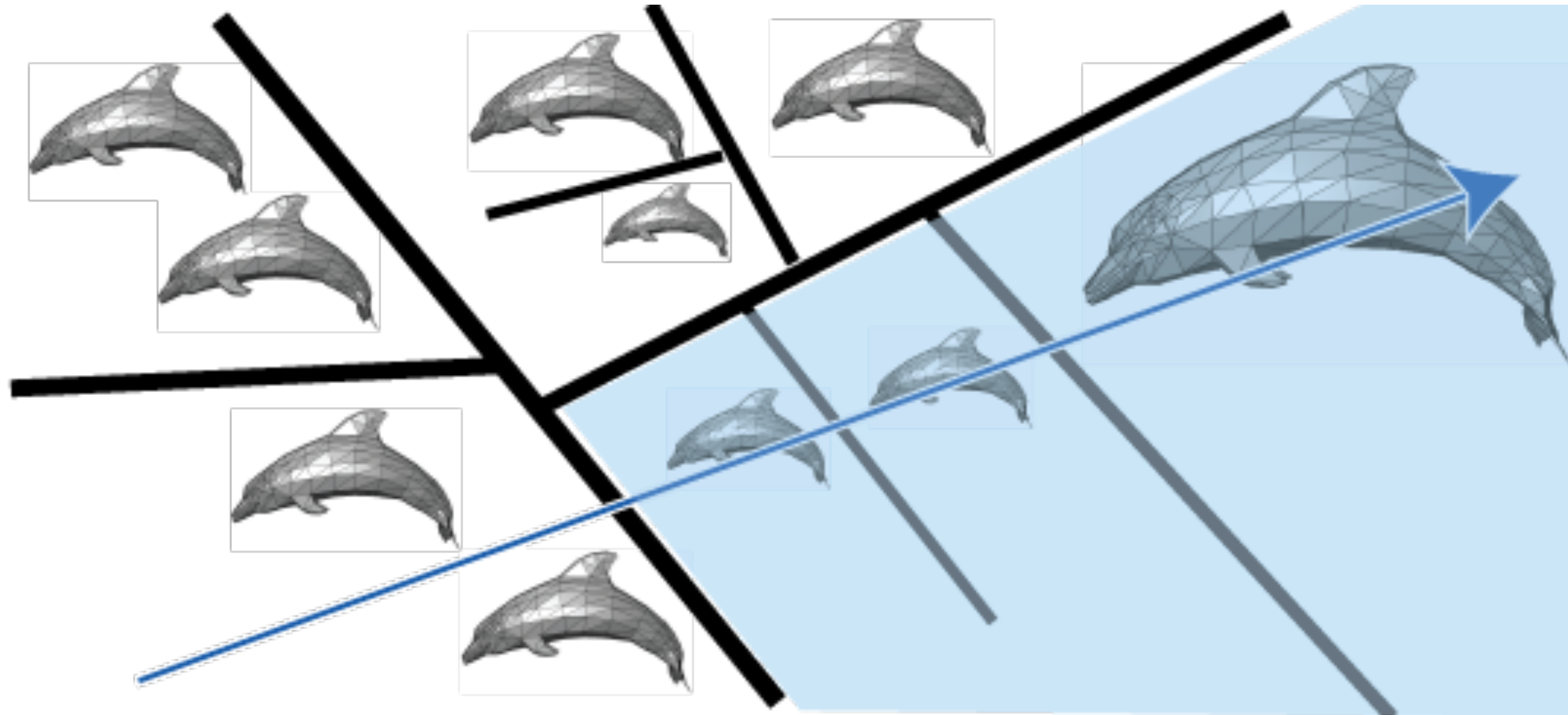
LES ARBRES BSP : LA TRAVERSÉE



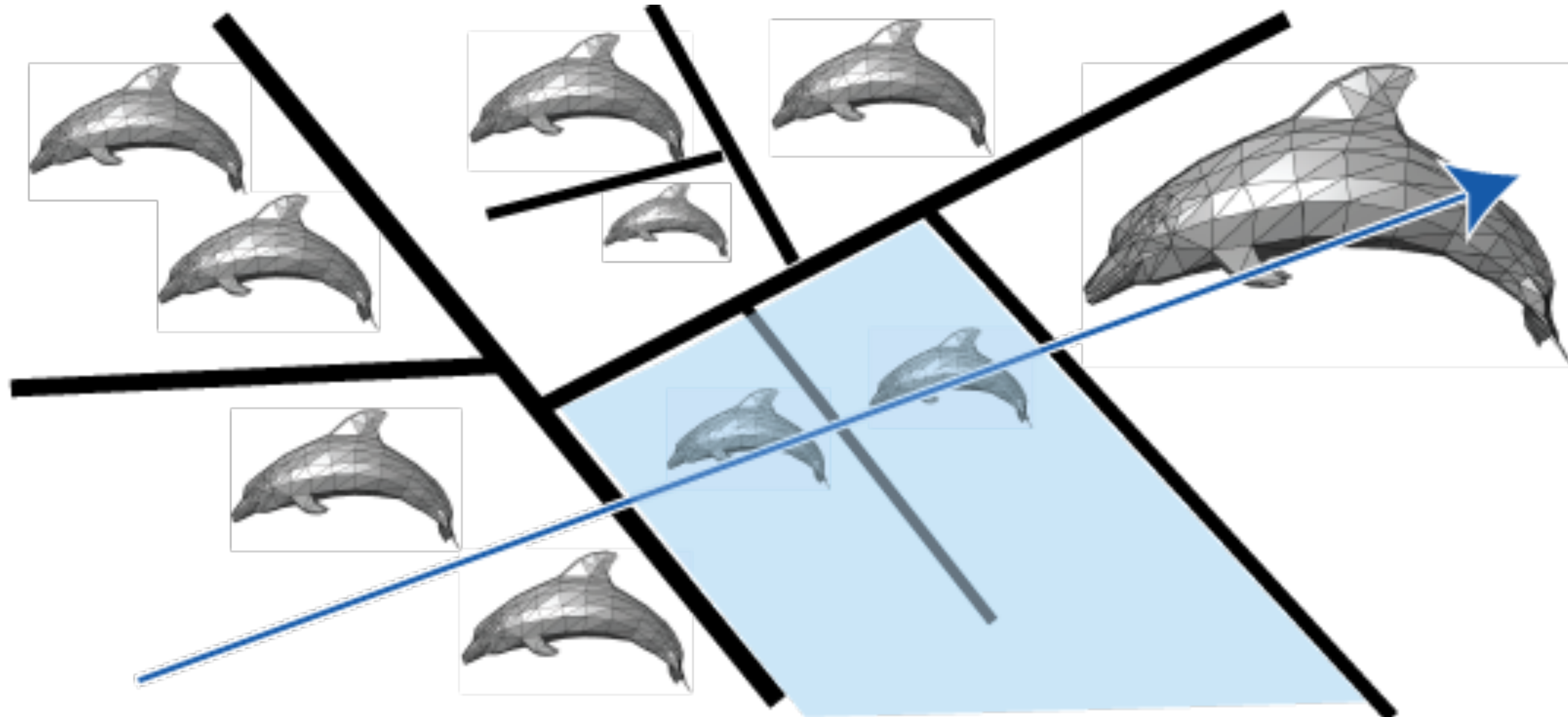
LES ARBRES BSP : LA TRAVERSÉE



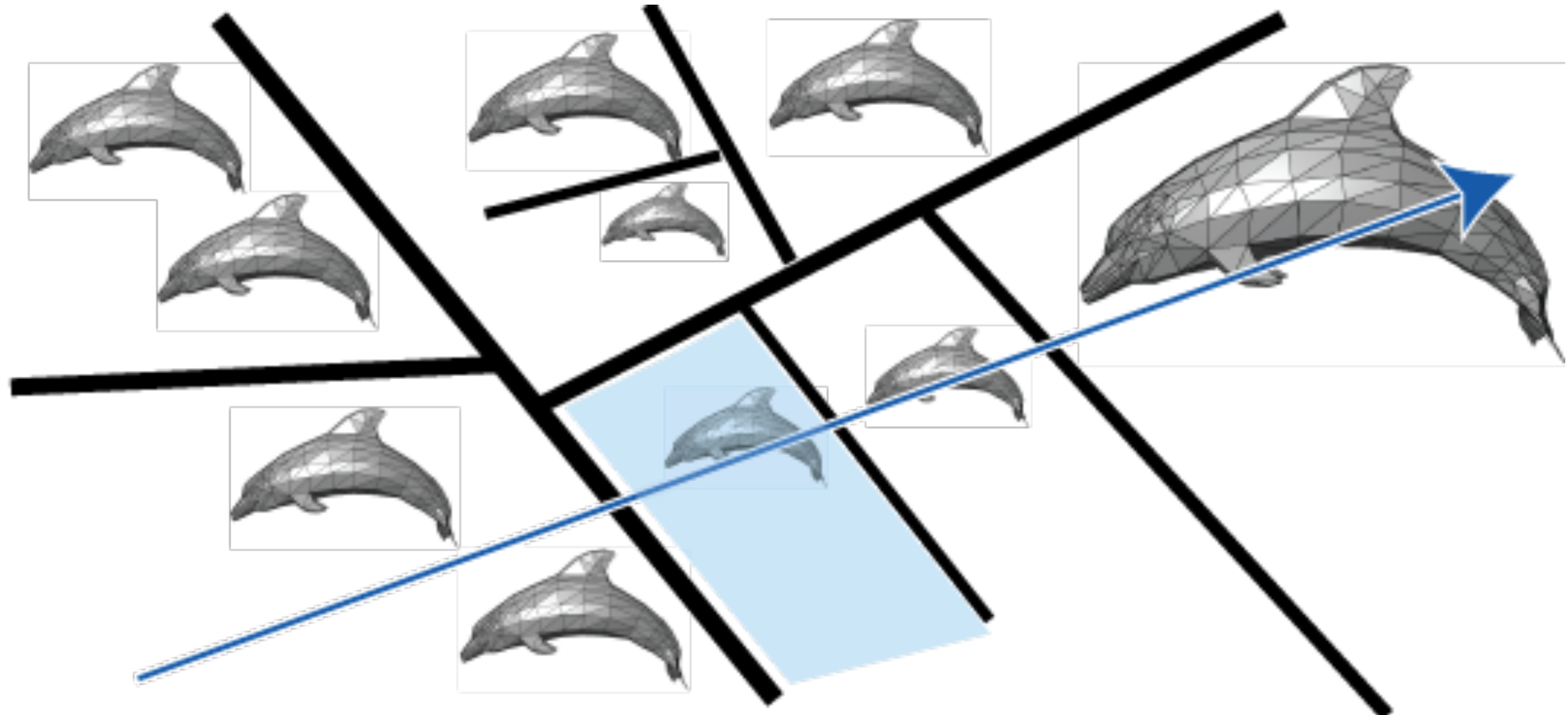
LES ARBRES BSP : LA TRAVERSÉE



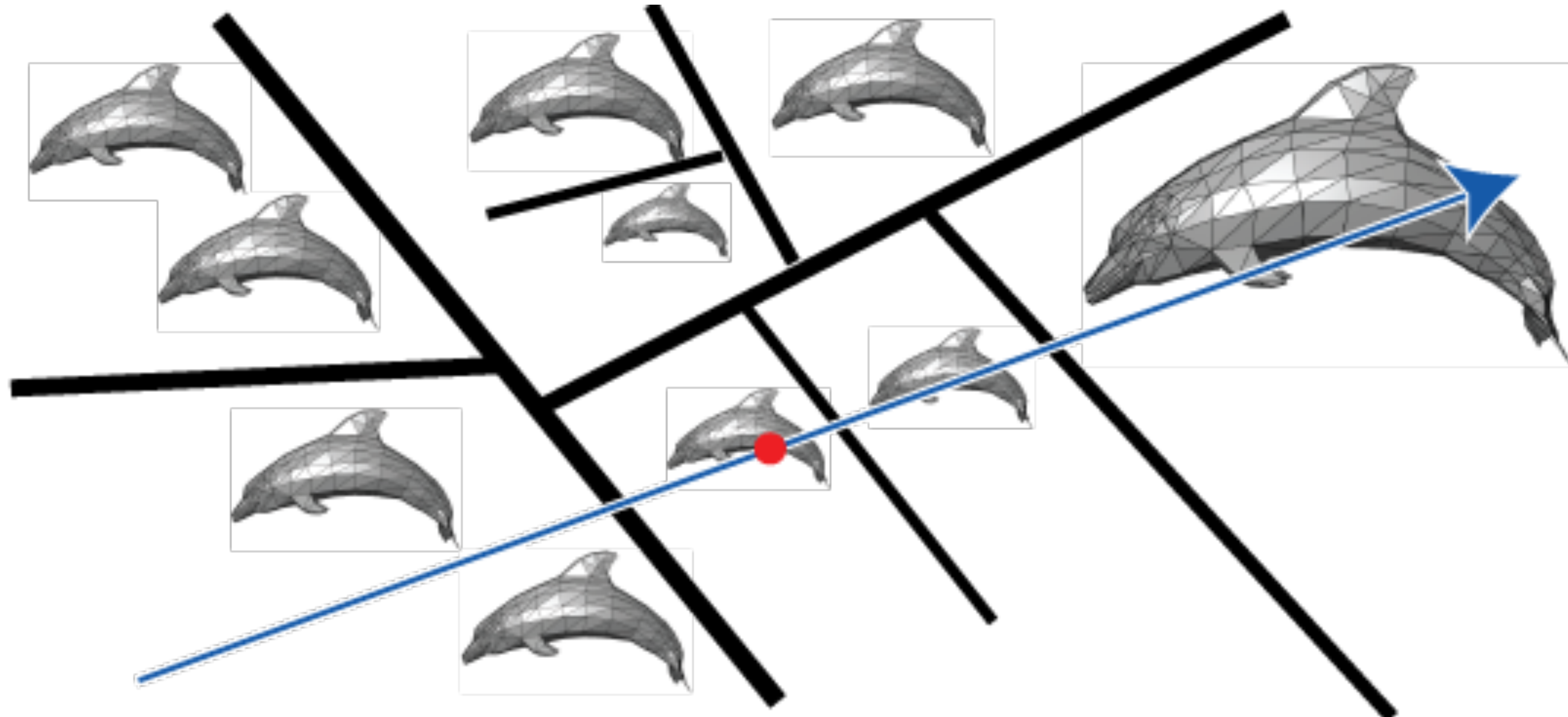
LES ARBRES BSP : LA TRAVERSÉE



LES ARBRES BSP : LA TRAVERSÉE



LES ARBRES BSP : LA TRAVERSÉE



LES ARBRES BSP : LA TRAVERSÉE

- Chaque plan divise le monde en proche et loin
  - Pour un rayon, décider quel côté est proche
    - Proche = le même côté que l'œil
    - L'œil définit l'ordre de la traversée
- L'algorithme est récursif
  - Intersecter avec le côté proche
  - Si il n'y a pas d'intersection
    - Intersecter avec le côté loin

LES ARBRES BSP : LA TRAVERSÉE

Soit *v* un nœud, *r* est un rayon
Intersect(*v*, *r*)

if *v* est une feuille
then

intersecter *r* avec chaque objet dans *v* et retourner le plus proche
ou **nil** si pas trouvé

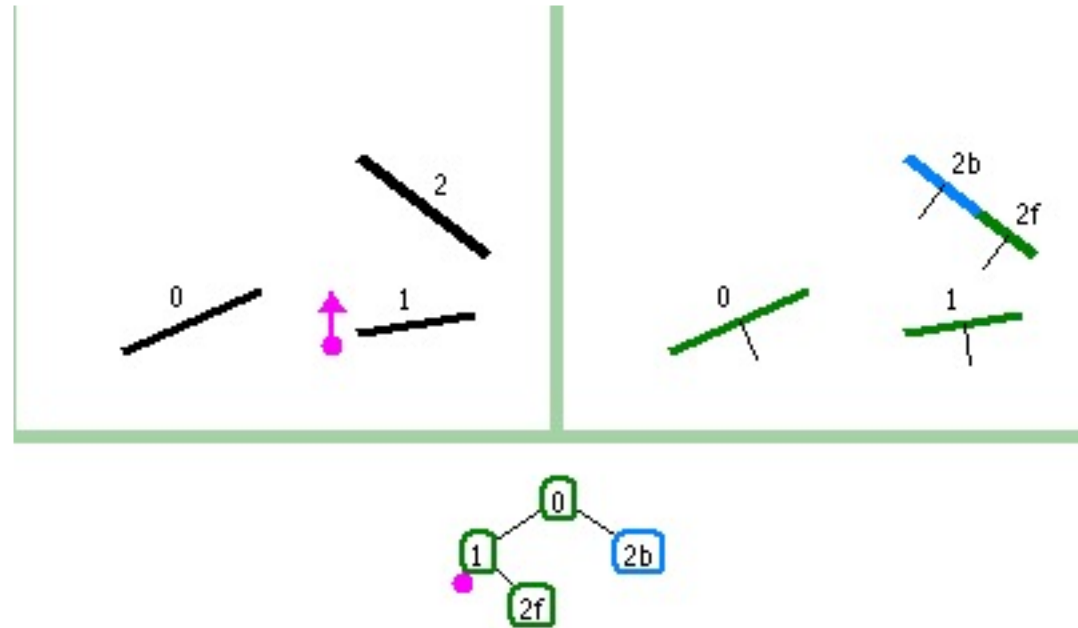
near = le nœud enfant de demi-espace qui contient l'origine de *ray*
far = l'autre enfant
hit = Intersect(near, r)
if ***hit*** est **nil** et *ray* intersecte le plan défini par *v*
then

hit = Intersect(*far*, *r*)

return *hit*

BSP DÉMO

- Démonstration
  - http://symbolcraft.com/graphics/bsp



UN RÉSUMÉ: LES ARBRES BSP

- Avantages:
  - Un schéma élégant et simple
  - Les intersections rapides
  - La version correcte de l'algorithme de peintre

n est le nombre d'objects

- Inconvénients:
  - L'arbre est lent à construire: $O(n \log n)$
  - La division d'objets augmente le nombre de polygones: $O(n^2)$ pire cas
  - => L'algorithme est limité aux cas statiques

LES STRUCTURE DE DONNÉES POUR LA SUBDIVISION DE L'ESPACE

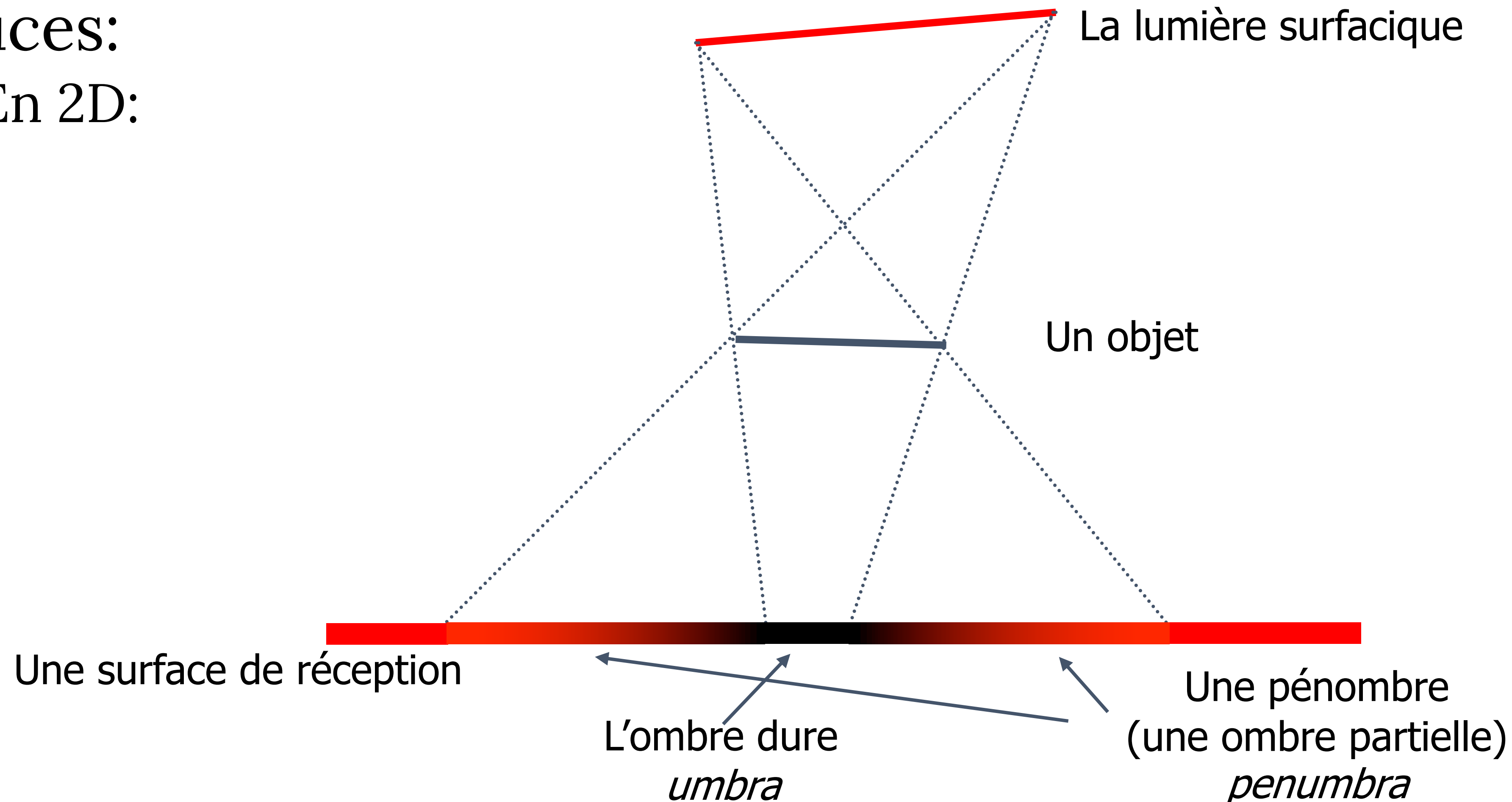
- Volumes englobantes:
  - Trouver un objet assez simple pour entourer les objets complexes
    - Les boites, les sphères
  - Les combiner hiérarchiquement
- La structure de données pour la subdivision de l'espace:
  - Diviser l'espace en cellules
    - Les grilles, les *octrees*, les arbres k-d, (les arbres BSP)
  - Simplifier et accélérer la traversée
  - La performance dépend moins de l'ordre dans lequel les objets sont insérés

LES OMBRES DOUCES: LES LUMIÈRES SURFACIQUES

- Jusqu'ici:
  - Toutes les lumières étaient ponctuelles ou directionnelles
    - Pour le pipeline OpenGL et lancer de rayons
  - Donc, à chaque point, on avait besoin de calculer l'éclairage pour UNE direction par lumière
- En réalité:
  - Toutes les lumières ont une aire finie
  - Maintenant on a besoin d'intégrer sur toutes les directions vers la lumière

LES LUMIÈRES SURFACIQUES

- Les sources de lumière surfaciques produisent des ombres douces:
  - En 2D:

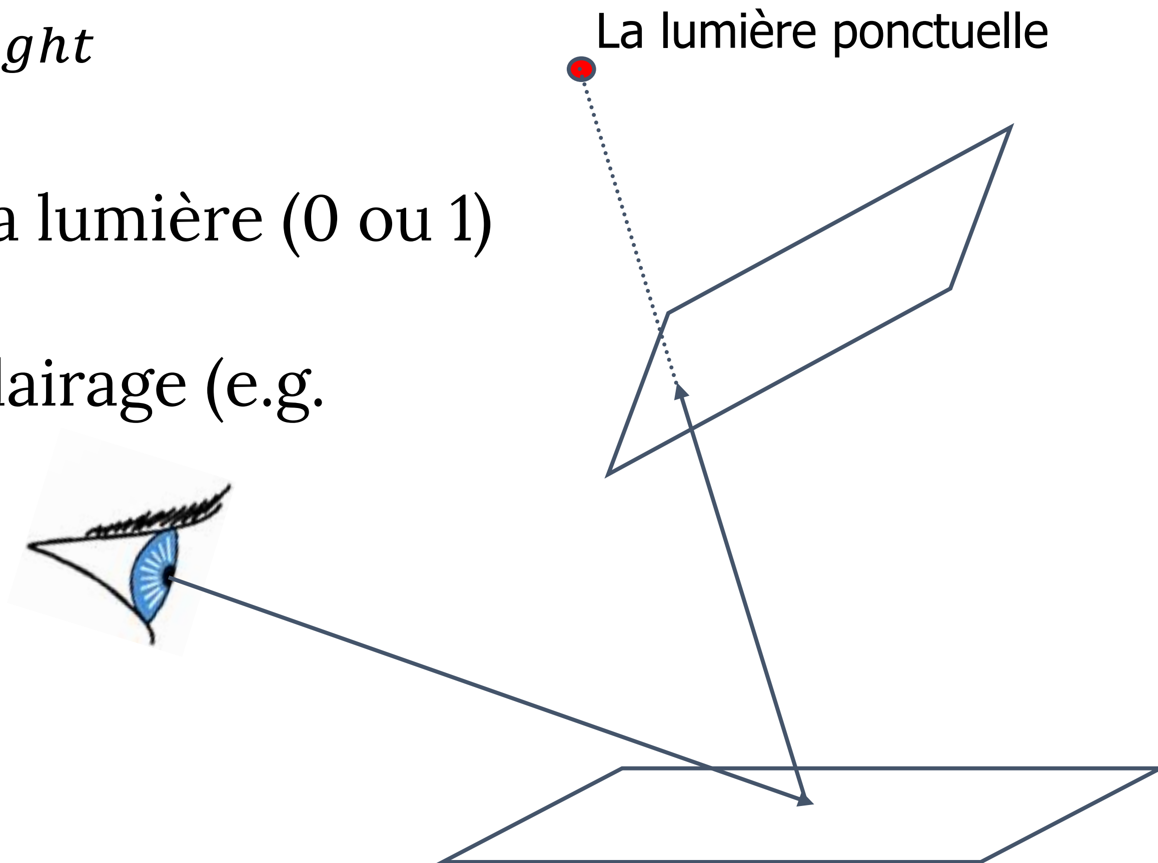


LES LUMIÈRES SURFACIQUES

- Les lumières ponctuelles:
  - ont une seule direction (par point):

$$I_{reflected} = \rho V I_{light}$$

  - V est la visibilité de la lumière (0 ou 1)
  - ρ est un modèle d'éclairage (e.g. Lambert/Phong)

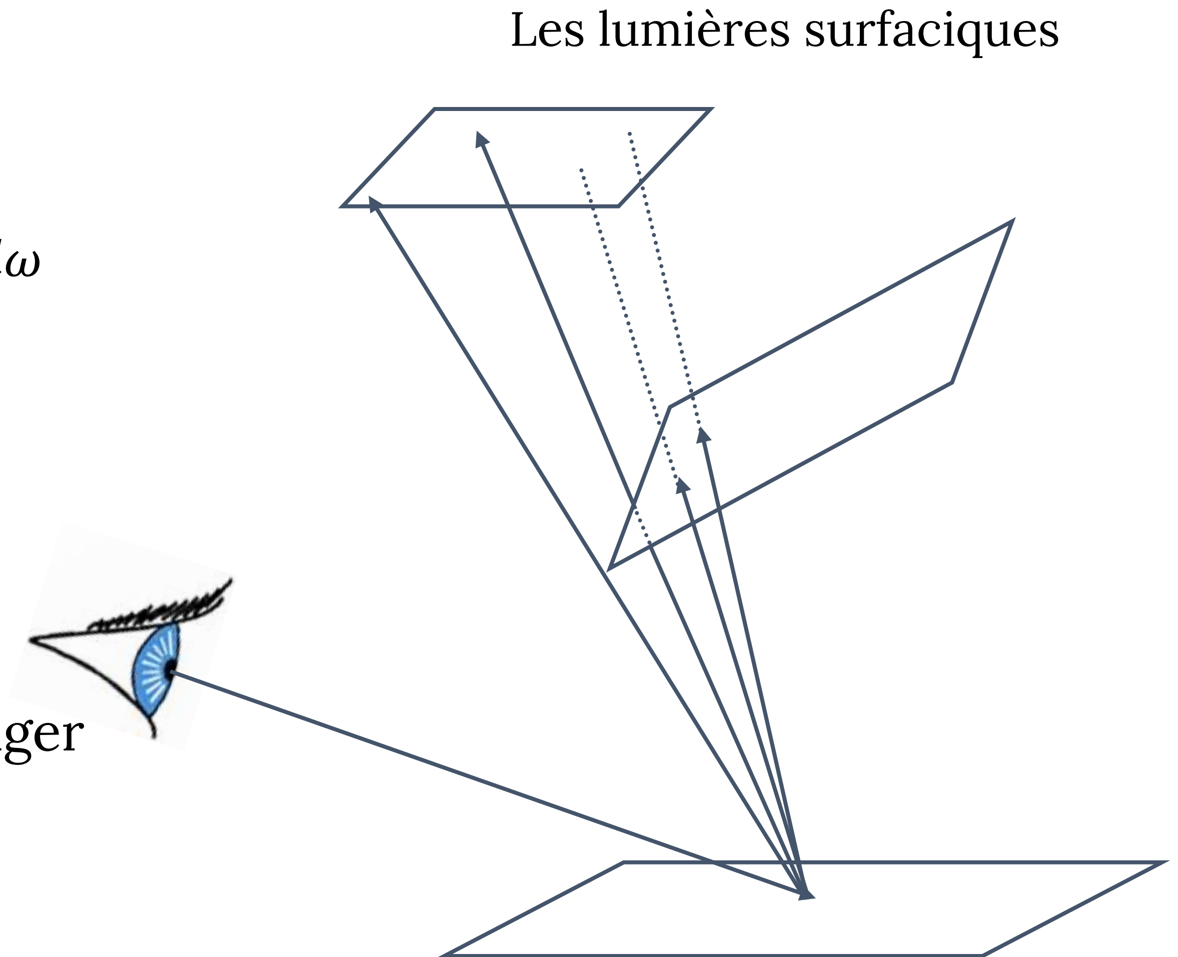


LES LUMIÈRES SURFACIQUES

- Les lumières surfaciques:
  - Nombre infini de rayons lumineux
  - Il faut intégrer:

$$I_{reflected} = \int_{\substack{light \\ directions}} \rho(\omega, \boldsymbol{n}) V(\omega) I_{light}(\omega) d\omega$$

  - La visibilité et l'intensité peuvent changer pour différents points



LES LUMIÈRES SURFACIQUES

- Récrire l'intégrale
  - Au lieu d'intégrer sur les directions

$$I_{reflected} = \int_{\substack{light \\ directions}} \rho(\omega, \boldsymbol{n}) V(\omega) I_{light}(\omega) d\omega$$

intégrer sur les points de la lumière

$$I_{reflected}(q) = \int_{s,t} \rho(p - q, \boldsymbol{n}) V(p - q) I_{light}(p) ds\, dt$$

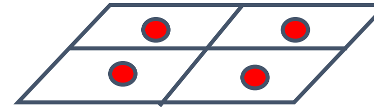
- q est un point sur l'objet
- $p = F(s, t)$ est un point sur la lumière
- Nous intégrons sur dA

L'INTÉGRATION

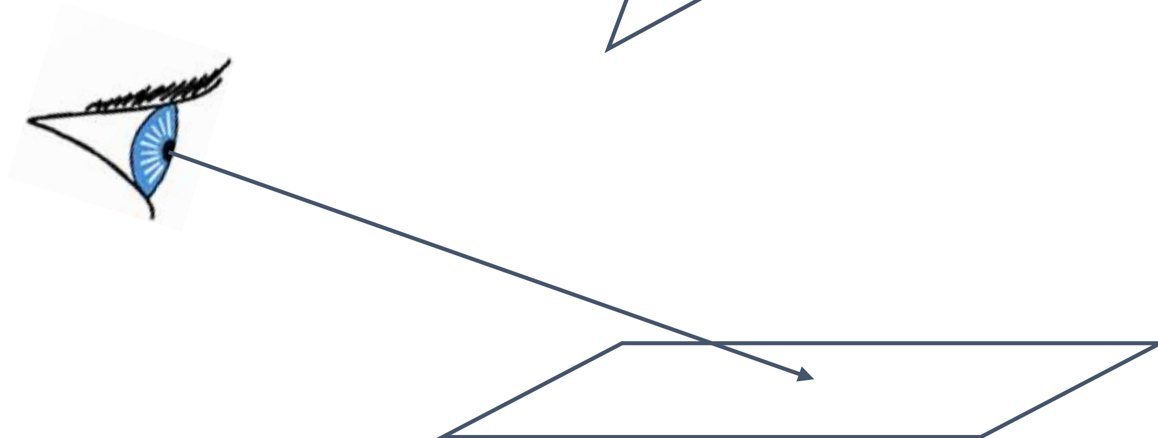
- Un problème:
  - Sauf un cas de base, **on ne peut pas le résoudre analytiquement**!
    - En partie, en raison de la visibilité
- Puis:
  - Utiliser l'intégration numérique

L'INTÉGRATION NUMÉRIQUE

La lumière surfacique



- La grille des lumières ponctuelles
  - Il faut utiliser beaucoup de points de lumière pour ça



LA SOLUTION: MONTE-CARLO

- La prochaine fois!