

LANCER DE RAYONS

SIMON Coumes, THÉO Losekoot, KERIAN Thuillier

DIT - ENS de Rennes

7 Décembre 2018

Résumé

Compte rendu du projet sur le lancer de rayons. Ce projet consiste à générer des images représentant des scènes d'objets en trois dimensions, éclairés par des lumières, en respectant les principes de réflexion et de diffusion de la lumière.

Mots-clés : lancer de rayons, génération d'images, lumière, couleur, Phong, optique

Classification ACM : I.3.3, I.3.7

Table des matières

1	Introduction	1
2	Lancer de rayons simples	1
2.1	Détection d'objets	1
2.2	Diffusion de la lumière	2
3	Extension : modèle de Phong	4
3.1	Principe de réflexion	4
3.2	Lumière spéculaire	4
4	Extension : cône de diffusion	5
4.1	Génération du cône	5
4.2	Atténuation des rayons	5
4.3	Limites de l'approche	6
5	Conclusion	6

1 Introduction

Le lancer de rayons est une technique de synthèse d'images permettant de représenter des scènes en trois dimensions. Les images générées ainsi sont réalistes et complexes. Ce procédé est assez coûteux en ressources. Le lancer de rayon génère une image dont chaque pixel est traité indépendamment. Ainsi pour chacun d'entre eux, un rayon est émis depuis la caméra en direction de son plan focal, l'image à générer. Ce rayon suivra le chemin inverse parcouru par la lumière. L'objectif est de calculer pour chaque rayon la couleur du pixel dont il est issu. Le rayon va donc évoluer dans cet environnement en suivant les lois d'optique géométrique, c'est-à-dire la réflexion, la réfraction ou encore la diffusion. Des modèles plus élaborés de lancer de rayons peuvent prendre en compte d'autres phénomènes comme la dispersion lumineuse ou la diffraction.

L'objectif de ce projet était de réaliser un algorithme de lancer de rayons traitant une scène d'objets tridimensionnels constituée de formes simples.

Pour cela, nous avons tout d'abord implémenté les algorithmes permettant de détecter la collision d'un rayon avec des objets de différentes natures. Ensuite, nous avons ajouté la gestion de sources lumineuses à nos scènes en employant le principe de diffusion de la lumière. Pour finir, nous nous sommes intéressés au principe de réflexion et à l'amélioration de nos rendus grâce à l'emploi de cônes de dispersion des rayons.

2 Lancer de rayons simples

Pour démarrer ce projet dans de bonnes conditions, différentes classes nous ont d'emblée été fournies : des classes définissant des points et des vecteurs en trois dimensions, définissant des formes, ou encore d'autres permettant la gestion de l'affichage.

2.1 Détection d'objets

Afin de pouvoir détecter des objets, il faut tout d'abord implémenter des objets géométriques en trois dimensions. Ces derniers héritent d'une même classe `Shape` contenant, dans un premier temps¹, la position de l'objet et sa couleur². Chaque classe héritant de `Shape` doit définir une méthode virtuelle permettant de trouver un point de collision, s'il existe, entre un rayon de lumière³ et l'objet qu'elle représente.

Il est à noter que seul le premier objet percuté doit être pris en compte. En effet, nous considérons que la lumière ne peut pas traverser les objets. Pour cela, nous déterminons l'ensemble des éléments percutés par notre rayon, puis nous récupérons le plus proche d'entre eux par rapport à l'origine du rayon. Nous avons donc implémenté trois objets distincts : les plans bornés, les sphères et les parallélépipèdes.

-
1. La liste des attributs de la classe `Shape` sera complétée lorsque nous aborderons le modèle de Phong.
 2. Une couleur définit comme un triplet d'entiers représentant le format *RVB* : une composante rouge, une verte et une bleue.
 3. Un rayon de lumière est un objet de la classe `Lightray` définit par un point origine et un vecteur directeur.

2.1.1 Collisions avec les sphères

Commençons par nous intéresser aux sphères. Afin de détecter la collision d'un rayon avec une sphère, il suffit de déterminer le point d'intersection entre la droite définie par le vecteur directeur du rayon et la sphère. La formule ci-dessous permet de déterminer s'il y a collision, et si oui les coordonnées de ce point.

$$\|origine_{rayon} + vecteur_{rayon} \times d - centre_{sphere}\|^2 = rayon_{sphere}^2$$

Ici, d représente la valeur à déterminer. Cette formule peut être mise sous la forme d'un polynôme du second degré avec δ son coefficient :

- si $\delta > precision^4$, alors nous conserverons la plus petite racine positive comme valeur de d . Le point d'intersection sera le point $I = origine_{rayon} + vecteur_{rayon} \times d$.
- sinon, le rayon n'entre pas en collision avec la sphère.

Il est possible de visualiser l'intersection de sphères avec les rayons sur les figures 1 et 2 présentes en annexe. Il faut également faire attention à ce que le point d'impact retourné ne soit pas à l'intérieur de la sphère, mais bien à l'extérieur, sans quoi des artefacts apparaîtraient sur l'image. En effet, si le point se trouve à l'intérieur de la sphère, celle-ci sera considérée comme un obstacle par les rayons réfléchis et diffusés : aucune lumière n'étant détectée, des pixels noirs sont affichés.

2.1.2 Collisions avec les plans bornés

De la même façon pour les plans bornés, nous cherchons un point d'intersection entre le rayon et le plan (sans considérer les bornes), puis nous vérifions si celui-ci est dans les limites du plan. Pour cela, il suffit de projeter le point d'intersection trouvé dans la base définissant le plan.

- Si ses coordonnées sont comprises entre 0 et la taille du plan alors il y a collision, et le point trouvé est le point d'intersection avec le plan.
- Sinon, il n'y a pas de collision.

Il est possible de constater l'intersection des rayons avec des plans bornés sur la figure 3. La précision est également à prendre en compte ici, il ne faut pas considérer un impact sur un plan si l'origine du rayon de lumière est à une distance inférieure à la précision du plan.

2.1.3 Collisions avec les parallélépipèdes

Le cas des parallélépipèdes est assez spécifique, car nous avons défini un parallélépipède comme un regroupement de 6 plans bornés s'intersectant aux niveaux des arêtes. Les plans bornés ayant leur fonction d'intersection de définie, il n'y a donc pas nécessité d'en définir une pour les parallélépipèdes.

2.2 Diffusion de la lumière

Une fois que nous avons été capables de définir l'intersection d'un rayon avec un objet, il est désormais possible d'ajouter des sources de lumière à nos scènes.

4. La précision est nécessaire à cause du calcul sur les flottants qui engendre des décalages et des artefacts visuels.

2.2.1 Sources de lumière

Nous avons défini tout objet géométrique comme une potentielle source de lumière en rajoutant une variable booléenne, valant vrai s'il s'agit d'une source, à la classe `Shape`. Ainsi, une nouvelle contrainte s'ajoute au calcul de la couleur d'un pixel : un pixel n'est coloré que s'il est possible d'atteindre directement une source lumineuse depuis le point de collision d'un rayon avec un objet. C'est-à-dire s'il est possible de définir un nouveau rayon ayant pour origine le point d'impact et pointant vers une source de lumière tel que le premier objet percuté par ce rayon soit cette source de lumière. Le schéma en figure 4 illustre ce principe. Il est possible de constater ce résultat sur la figure 7 où les pixels apparaissent de la couleur de l'objet intersecté si la condition précédente est remplie.

2.2.2 Dégradés d'ombres et de couleurs

Afin d'obtenir un dégradé des ombres, nous appliquons un coefficient aux couleurs des sources accessibles.

$$\text{coefficient} = \vec{n} \bullet \vec{r}$$

où n est le vecteur unitaire normal au point d'impact par rapport à la surface de l'objet, et r le vecteur unitaire directeur du rayon dirigé vers les sources de lumière. Cela revient à calculer le cosinus de l'angle entre ces deux vecteurs. Cette valeur sera toujours contenue entre 0 et 1, car pour que la source de lumière soit accessible, il ne peut pas y avoir d'angle de plus de 90° entre la normale et la source.

Les couleurs des sources accessibles sont alors multipliées par le coefficient associé à leur rayon, puis sommées. Un exemple de l'addition des couleurs est visible sur la figure 9 où une sphère blanche est éclairée par une source verte et une source rouge.

$$\text{Couleur} = \text{Couleur}_1 + \text{Couleur}_2 = \begin{pmatrix} \min(255, \text{rouge}_1 + \text{rouge}_2) \\ \min(255, \text{vert}_1 + \text{vert}_2) \\ \min(255, \text{bleu}_1 + \text{bleu}_2) \end{pmatrix}$$

La figure 8 illustre quant à elle la même scène que la figure 7 en utilisant deux sources lumineuses à la fois.

2.2.3 Absorption de la lumière

Les sources pouvant émettre une lumière colorée, nous avons implémenté le principe d'absorption des couleurs comme nous le montrons sur la figure 10. Pour cela, nous définissons un coefficient d'atténuation de la couleur à partir de la couleur de l'objet. Ce coefficient est un triplet de réels calculé en divisant chaque composante de la couleur de l'objet par 255^5 . Cette formule a du sens par le fait que si un objet est blanc, alors ses coefficients seront $(1, 1, 1)$. Elle n'absorbera donc rien. En revanche, dans le cas d'un objet rouge, ses coefficients seront $(1, 0, 0)$. Cet objet absorbera alors le vert et le bleu, et réfléchira le rouge. Nous multiplions ensuite chaque composante de la lumière perçue par l'objet par leur coefficient respectif. La couleur résultante de cette opération est la couleur émise par l'objet.

5. Valeur maximale d'un composant au format RVB.

3 Extension : modèle de Phong

3.1 Principe de réflexion

Maintenant que nous avons une image ayant des ombres diffuses, nous avons souhaité améliorer le réalisme du rendu en y ajoutant le phénomène de réflexion. Ce phénomène permet d'ajouter un aspect miroir aux objets.

Pour cela, nous considérons un nouveau rayon émergeant émis lors de l'impact d'un rayon de lumière avec un objet. Ce nouveau rayon est le rayon réfléchi selon la loi de Snell-Descartes, il est représenté en noir sur la figure 4 et illustré par la figure 5. Nous faisons alors ricocher ce rayon sur les objets de la scène un nombre prédéfini de fois, en retournant à chaque fois une couleur. Cette couleur est obtenue en utilisant la lumière provenant de la diffusion et du rayon rebondit.

L'algorithme de calcul de la couleur associée à un rayon devient alors récursif et s'arrête après un nombre maximal de rebonds, nombre que nous avons fixé à 3 pour des raisons de temps de calcul. Afin de pouvoir utiliser des objets de natures différentes dans une même scène, nous avons rajouté des coefficients de diffusion et de réflexion aux objets, soit de nouveaux attributs à la classe `Shape`. Ces attributs permettent d'atténuer les effets de réflexion et de diffusion des objets. La couleur perçue par un objet est donc désormais définie par la formule ci-dessous :

$$\text{Couleur} = k_d \times C_d + k_r \times C_r$$

où k_d et k_r sont respectivement les coefficients de diffusion et de réflexion de l'objet impacté par le rayon, C_d la couleur reçue des sources de lumière, et C_r la couleur déterminée par la réflexion.

Cette somme calculée, il est ensuite possible de procéder au calcul de l'absorption. La couleur du pixel à afficher, ou celle à retourner lors de l'appel récursif, est la couleur résultante du calcul de l'absorption. La figure 11 met en scène une sphère totalement miroir présentant ce principe de réflexion.

3.2 Lumière spéculaire

Afin d'implémenter le modèle Phong, il nous reste à ajouter la gestion de la lumière spéculaire. Il s'agit de tâches lumineuses de différentes intensités dépendant de l'angle entre un rayon pointé sur la caméra et un rayon pointé sur une source lumineuse. Le modèle de Phong nous donne le calcul de la lumière spéculaire suivant :

$$C_{\text{spéculaire}} = k_s \times H^\alpha \times C_{\text{source}}$$

où H est le cosinus de l'angle entre le rayon de lumière réfléchi selon la loi de Snell-Descartes et le rayon dirigé vers la caméra, α est un paramètre à définir par l'utilisateur servant à altérer l'intensité de la lumière spéculaire, et k_s est le coefficient de réflexion spéculaire propre à l'objet.

Cette lumière spéculaire définie, il suffit d'additionner ce résultat aux couleurs calculées pour la diffusion et pour la réflexion, avant d'appliquer le calcul d'absorption. Un résultat est visible sur la figure 12, la lumière spéculaire étant particulièrement bien visible sur la sphère miroir (teinte orangée diffuse). La figure 14 est un rendu utilisant le modèle de Phong avec des objets de natures différentes.

4 Extension : cône de diffusion

Dans le cadre de cette extension, nous cherchons à employer une modélisation plus proche de la réalité physique pour rendre compte du phénomène de diffusion. Pour ce faire, nous considérerons qu'un rayon de lumière qui percute un objet ne renvoie pas qu'un seul rayon (comme le prédit la loi de Snell-Descartes) mais un grand nombre de rayons en cône. Le schéma en figure 6 illustre ce phénomène.

Rappelons que la philosophie générale du lancer de rayon est de suivre le chemin inverse à celui parcouru par la lumière. Il est donc possible se demander s'il est légitime de simplement créer un cône de diffusion à chaque fois que l'un des rebonds simulés percute un objet. Cependant, le principe de retour inverse de la lumière nous garantit une symétrie totale entre le comportement de la lumière dans un sens et dans le sens inverse. Nous pouvons donc appliquer nos cônes de diffusions dans le cadre de notre parcours inverse.

Il est évident, par nature même du processus de diffusion, que les rayons considérés ne sont pas tous équivalents. Il nous reste donc deux points à éclaircir : la construction du cône et la reconstitution du rayon incident à partir du faisceau de rayons du cône.

4.1 Génération du cône

Pour générer le cône il faut considérer le rayon principal tel que prédit par la loi de Snell-Descartes dont la direction est définie par un vecteur unitaire. Considérons ensuite un vecteur dit *modificateur*, orthogonal au rayon principal et dont la norme ne dépend que de l'ouverture du cône souhaitée. Une première série de rayons du cône est ensuite créée en faisant tourner le modificateur autour du rayon principal, le rayon à ajouter au cône étant la somme du vecteur modificateur et du vecteur directeur définissant le cône. Il suffit ensuite de diminuer la norme du vecteur modificateur et de recommencer jusqu'à l'obtention de tous les cercles, créant ainsi un cône de rayons.

Le cône est donc constitué de rayons s'appuyant sur des cercles concentriques dont le rayon principal est le centre. Notons également que notre implémentation fixe un nombre constant de rayons par cercle.

4.2 Atténuation des rayons

Pour reconstituer l'intensité lumineuse renvoyée par le rayon incident, il suffit de sommer les intensités lumineuses renvoyées par chaque rayon du cône en leur associant un coefficient. Ce coefficient est déterminé de la même manière que précédemment, c'est-à-dire en utilisant le cosinus de l'angle formé par le vecteur normal à l'objet impacté et le vecteur directeur du rayon. Afin de garantir un résultat cohérent, les coefficients sont normalisés, c'est-à-dire que la somme des coefficients de tous les rayons du cône vaut 1. Pour cela, chaque coefficient est divisé par leur somme.

4.3 Limites de l'approche

Bien que ce modèle soit plus proche de la réalité et permet de choisir la finesse de la modélisation, il présente certaines limites. L'utilisation du cône induit de très longs calculs, avec une complexité potentiellement exponentielle. Pour réduire ce temps de calcul, il est possible de diminuer le nombre de cercles ou encore de rayons par cercle. Cependant, le résultat est très peu probant pour un faible nombre de rayons. Ces deux difficultés réunies, il nous a été impossible de procéder à des essais concluants, comme vous pouvez le constater avec la figure 13 où des duplications de reflets sont visibles.

5 Conclusion

En conclusion, pour ce projet nous avons implémenté un algorithme de lancer de rayons suivant des modèles optiques de diffusion et de réflexion. Le calcul des couleurs défini suit les lois d'addition et d'absorption des couleurs des objets, l'intensité étant, quant à elle, régie selon le modèle de Phong. Nous avons également défini des objets de plusieurs natures : sphères, plans bornés et cubes, chacun de ces objets pouvant être une source de lumière. Avec plus de temps, nous aurions aimé ajouter d'autres formes, comme des pyramide ou des triangles, les triangles permettant de générer n'importe quel polygone. Nous aurions également souhaité ajouter le principe de réfraction afin d'améliorer le réalisme du rendu visuel. De plus, certains artefacts persistent encore sur les arêtes de nos cubes, il aurait été intéressant de corriger ce phénomène. De la même façon, notre implémentation des cônes de rayons réfléchis reste à valider, le rendu présentant des images réfléchies dédoublées.

Auto-évaluation

Forces. Il y avait une bonne communication et entraide au sein du groupe, les difficultés des uns ayant été compensées par les facilités des autres.

Faiblesses. Le code ne présente pas de fichiers de tests unitaires aléatoires et d'intégration, mais uniquement des vérifications d'assertion. La plupart des tests ont été réalisés par validation visuelle du rendu.

Opportunités. Ce projet nous a permis d'améliorer notre compréhension du langage C++, et de découvrir des modèles physiques comme celui de Phong.

Menaces. L'oubli de vérification du bon déroulement de la compilation et du bon fonctionnement du module avant de le déposer sur le dépôt *GIT*⁶ a été un facteur à risque pour nous.

Bibliographie

1 Modèle de Phong : https://fr.wikipedia.org/wiki/Ombrage_de_Phong.

2 Intersection d'une sphère et d'une droite : https://en.wikipedia.org/wiki/Line-sphere_intersection.

3 Nos camarades pour l'aide apportée au débogage.

6. Gestionnaire de versions décentralisé libre.

Annexe

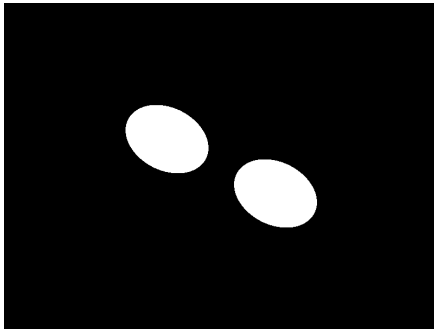


FIGURE 1 – Affichage de pixels blancs lors de l'impact d'un rayon avec une sphère, et noirs si le rayon n'a rien touché. Seules des sphères sont présentes.

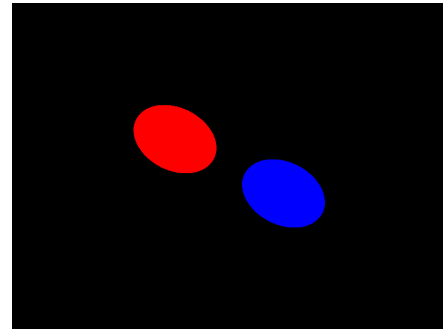


FIGURE 2 – Affichage de pixels de la couleur de l'objet impacté par un rayon, et noirs si le rayon n'a rien touché. Seules des sphères sont présentes.

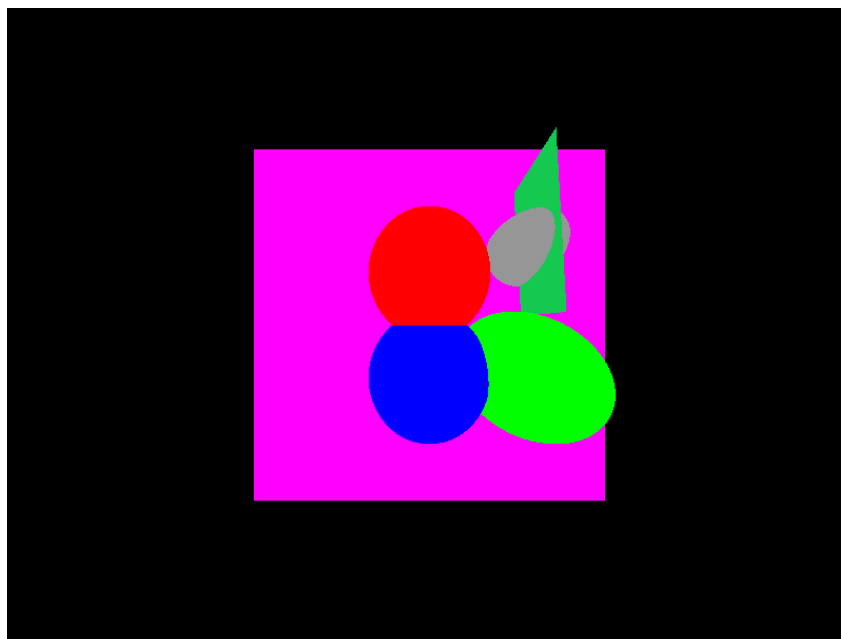


FIGURE 3 – Affichage de pixels de la couleur de l'objet impacté par un rayon, et noirs si les rayons n'ont rien touché. Des plans et des sphères imbriqués sont présents dans la scène.

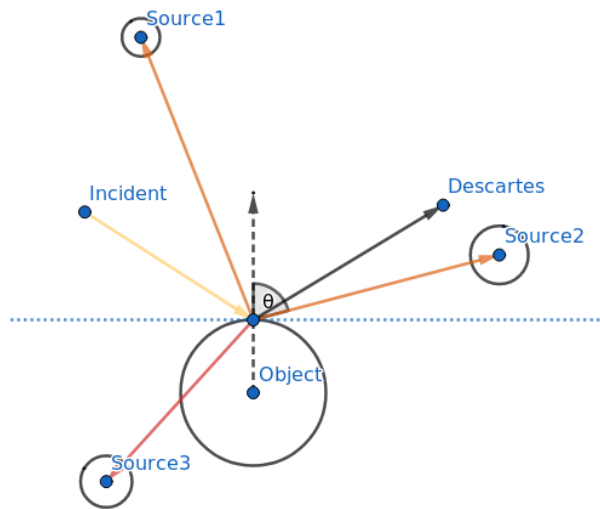


FIGURE 4 – Schéma représentant le principe de diffusion.

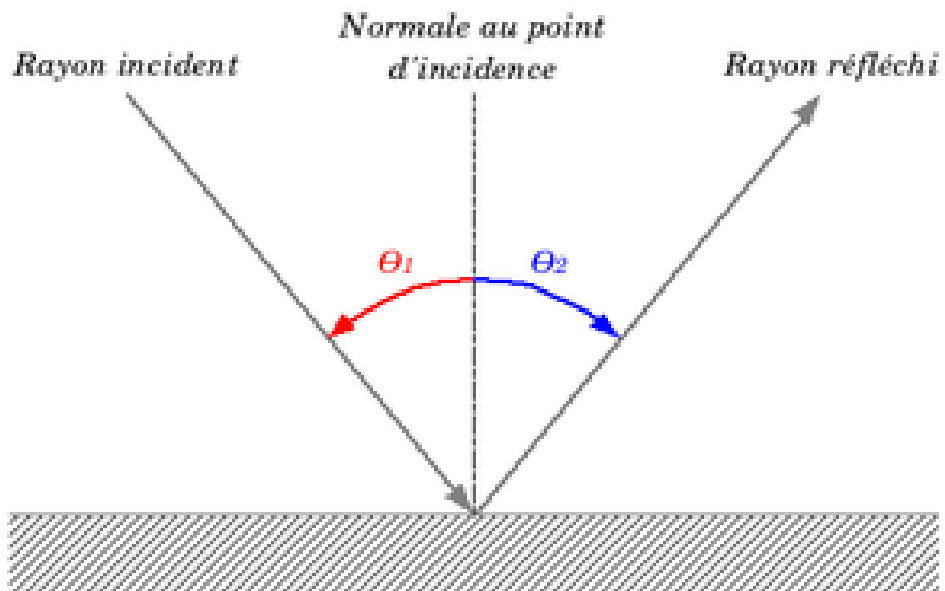


FIGURE 5 – Schéma du principe de réflexion selon la loi de Snell-Descartes : $\theta_1 = \theta_2$.
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Reflexion_\(physique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Reflexion_(physique))

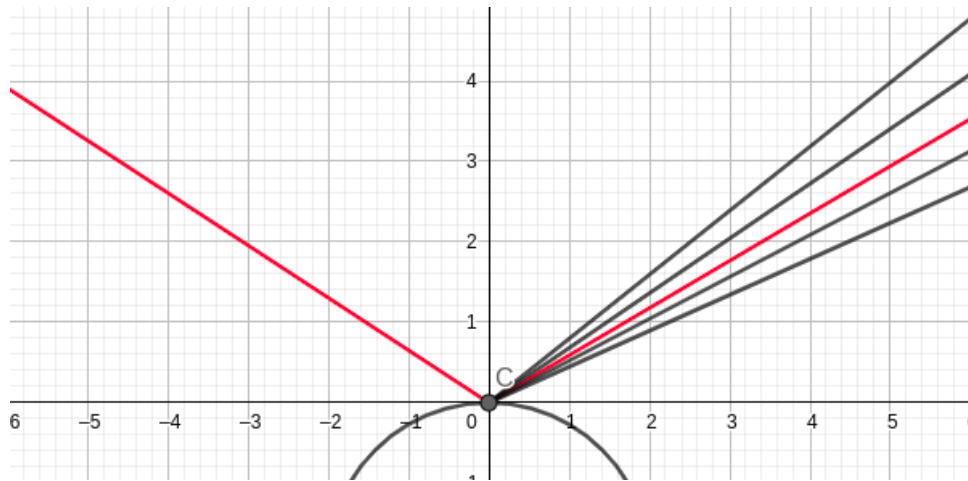


FIGURE 6 – Schéma conceptuel sur le fonctionnement des cônes de diffusion.

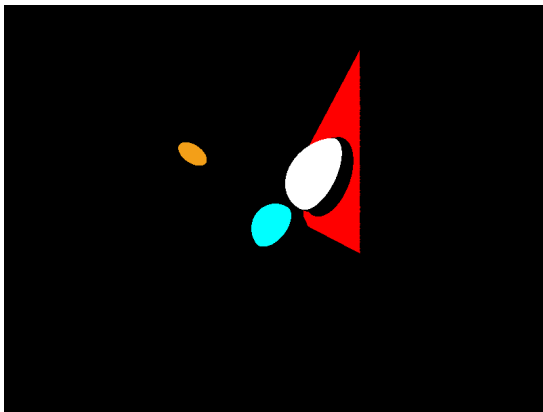


FIGURE 7 – Affichage de pixels de la couleur de l'objet intersecté par un rayon uniquement si le point d'impact est éclairé (sans coefficient).
La sphère jaune est la source de lumière.

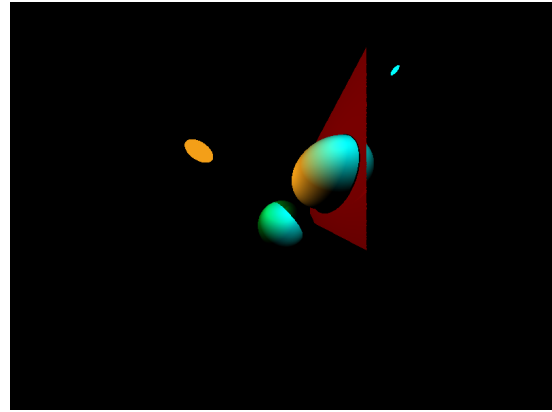


FIGURE 8 – Affichage de pixels de la couleur de l'objet intersecté par un rayon uniquement si le point d'impact est éclairé (avec coefficients).
Les sphères jaune et cyan sont les sources de lumière.

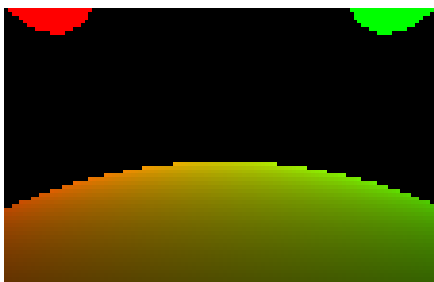


FIGURE 9 – Addition des couleurs : sphère blanche éclairée par deux sources de lumière, une verte et une rouge.

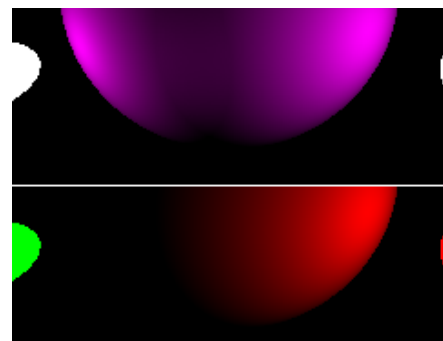


FIGURE 10 – Absorption des couleurs : sphère magenta éclairée en blanc (au-dessus), même sphère éclairée en rouge d'un côté et vert de l'autre (au-dessous).

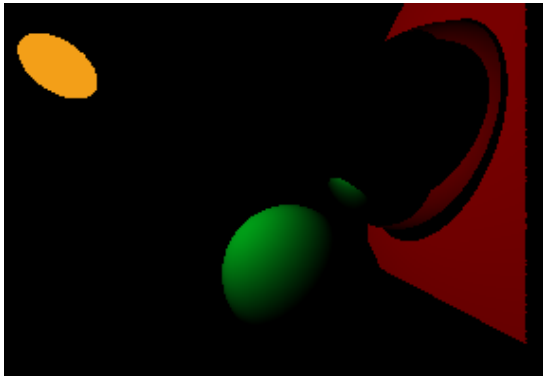


FIGURE 11 – Une sphère blanche avec les coefficients $(0, 1)$ et une sphère verte $(1, 0)$ éclairées par une lumière orangée.

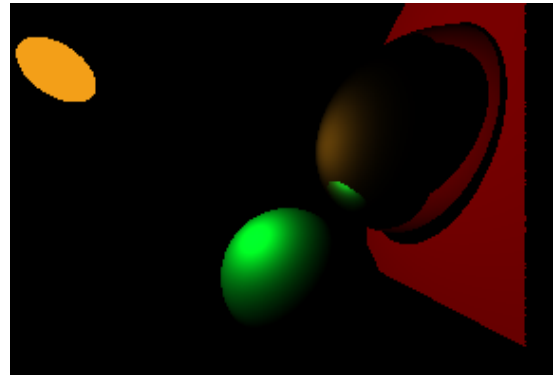


FIGURE 12 – Une sphère blanche avec les coefficients $(0, 1, 1)$ et une sphère verte $(1, 0, 0)$ éclairées par une lumière orangée, avec lumière spéculaire sur la sphère miroir.

Les tuples (k_d, k_r, k_s) représentent les tuples formés par les coefficients de diffusion, de réflexion et spéculaire des objets.

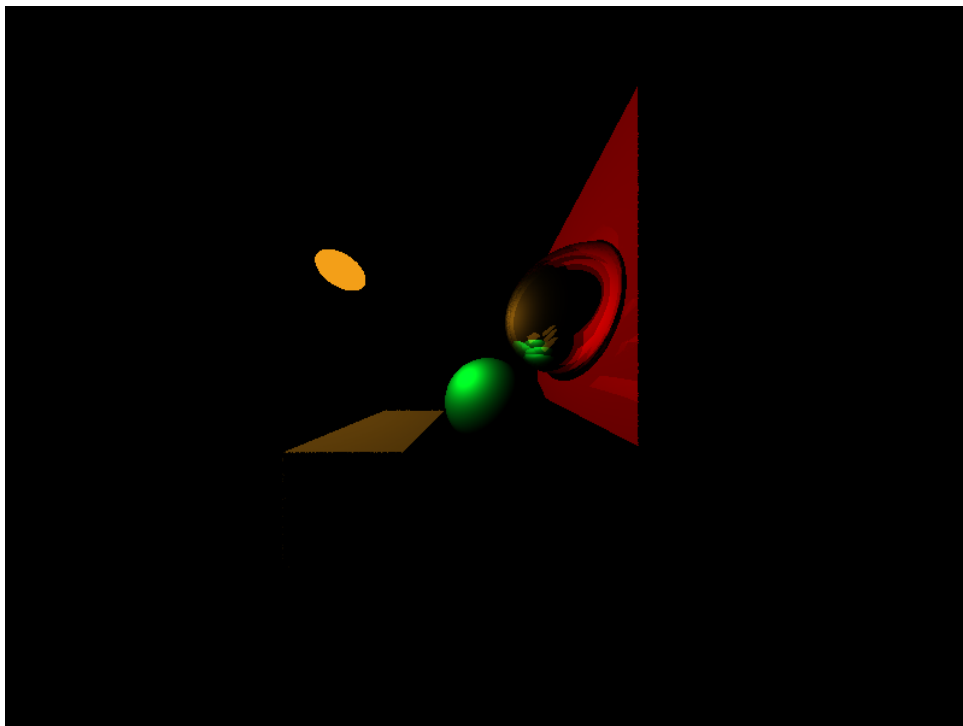


FIGURE 13 – Exemple de rendu utilisant les cônes de diffusion. Des reflets dédoublés sont visibles sur l'image, illustrant les limites de notre implémentation.

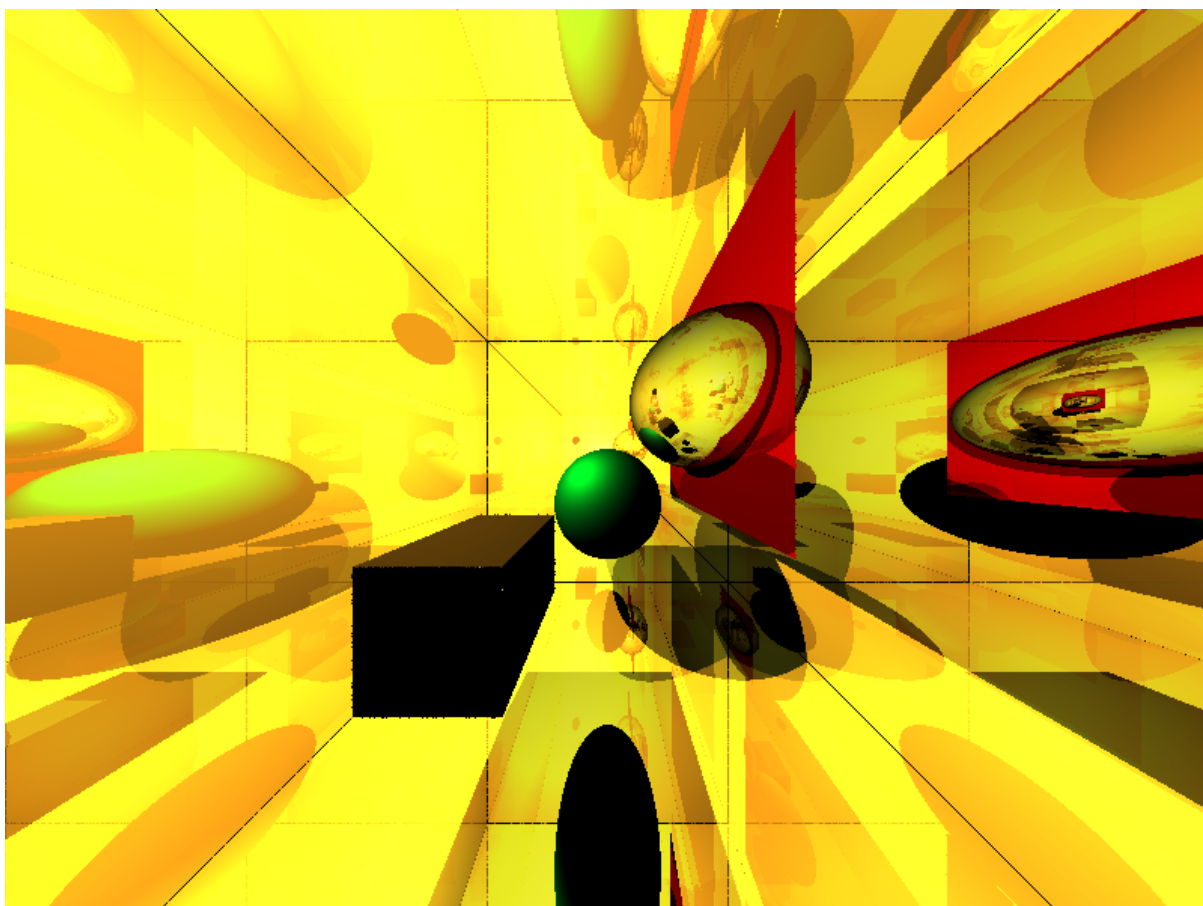


FIGURE 14 – Scène d'objets à l'intérieur d'un cube aux faces miroirs. 3 rebonds sont considérés pour la réflexion.