

Rendu

Partie 1.1

État de l'art

Partie 1.2

Éclairage ambiant

1.2.1

De la physique aux mathématiques

Le calcul de l'énergie reçu en un point de l'objet revient à intégrer le flux lumineux sur l'ensemble des direction visibles.

$$\mathcal{E}(p, \vec{n}) = \frac{1}{\pi} \int_{\mathcal{H}^2(\vec{n})} \mathcal{L}(p, \vec{\omega}) \times \vec{\omega} \cdot \vec{n} d\vec{\omega} \quad (1.2.1.1)$$

L'intégrale selon $\int_{\mathcal{H}^2(\vec{n})} d\omega$ correspond à une intégrale suivant l'hémisphère visible et pondéré par l'angle solide en supposant qu'il n'y a pas d'occultation. Afin de modéliser les phénomènes d'auto-occultation on devrai utiliser la formule suivante

$$\mathcal{E}(p, \vec{n}) = \frac{1}{\pi} \int_{\mathcal{V}(p, \vec{n})} \mathcal{L}(p, \vec{\omega}) \times \vec{\omega} \cdot \vec{n} d\vec{\omega} \quad (1.2.1.2)$$

Ou $\mathcal{V}(p, \vec{n})$ est la restriction de l'hémisphère suivant le vecteur \vec{n} à l'espace effectivement visible depuis le point p (ce qui revient à considérer $\mathcal{H}^2(\vec{n})$ privée des direction correspondants à de l'auto-occultation).

Ici on fait d'abord la supposition que l'éclairement selon une direction $\vec{\omega}$ est indépendant du point considéré. Cette approximation, est nécessaire pour utiliser, sans reconstruction 3D complexe, l'envmap reconstruite dynamiquement.

On obtient donc l'équation

$$\mathcal{E}(p, \vec{n}) = \frac{1}{\pi} \int_{\mathcal{V}(p, \vec{n})} \mathcal{L}_{glob}(\vec{\omega}) \times \vec{\omega} \cdot \vec{n} d\vec{\omega} \quad (1.2.1.3)$$

On fait alors la supposition que les phénomènes d'auto-occultation influencent de manière moyenne et globale l'énergie reçu en un point. Cela nous permet de revenir à une intégration sur tout le demi espace $\mathcal{H}^2(\vec{n})$ en ajoutant simplement un coefficient de $\mathcal{P}_{\mathcal{V}}(p)$ valant 1 en l'absence d'auto-occultation et 0 pour une auto-occultation totale.

Ce coefficient définit sur la surface de l'objet pourra être pré-calculé et fournit sous forme de texture (voir section ??, page ??).

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_{\mathcal{V}}(p) &= \frac{\int_{\mathcal{V}(p, \vec{n}(p))} \vec{\omega} \cdot \vec{n} d\vec{\omega}}{\int_{\mathcal{H}^2(\vec{n}(p))} \vec{\omega} \cdot \vec{n} d\vec{\omega}} \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{\mathcal{V}(p, \vec{n}(p))} \vec{\omega} \cdot \vec{n} d\vec{\omega} \end{aligned} \quad (1.2.1.4)$$

d'où

$$\mathcal{E}(p, \vec{n}) = \frac{\mathcal{P}_{\mathcal{V}}(p)}{\pi} \int_{\mathcal{H}^2(p, \vec{n})} \mathcal{L}_{glob}(\vec{\omega}) \times \vec{\omega} \cdot \vec{n} d\vec{\omega} \quad (1.2.1.5)$$

Enfin, on fera une dernière approximation suivant la méthode proposé dans [Mcguire et al., 2013] : on considère la fonction \mathcal{L}_{glob} (décrite par l'envmap) comme constante sur chaque face de l'envmap. Le niveau de mipmap le moins détaillé nous donne en effet une valeur moyenne pour la face considérée.

Si l'on oublie un instants les problèmes d'auto-occultation et que l'on s'intéresse à l'angle solide décrit par une face du cube centrée au point de vue, un rapide calcul permet d'évaluer l'angle solide décrit par une face complètement visible comme étant

$$\Omega_F = \iint_F \frac{1}{\|\vec{\omega}\|^3} d\omega = \frac{2\pi}{3} \quad (1.2.1.6)$$

L'angle solide sur une face partiellement visible (selon une demi sphère caractérisée par l'hyperplan de vecteur \vec{n}) est alors défini par

$$\Omega_F(\vec{n}) = \iint_F \frac{\text{HS}(\vec{\omega} \cdot \vec{n})}{\|\vec{\omega}\|^3} d\omega \quad (1.2.1.7)$$

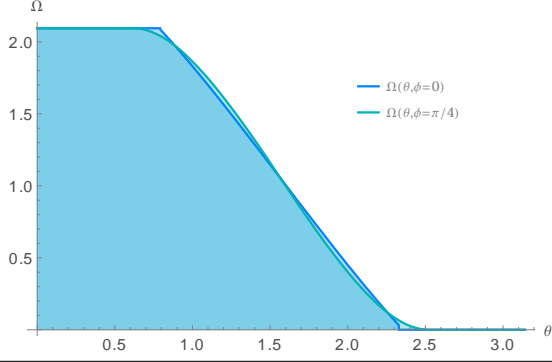
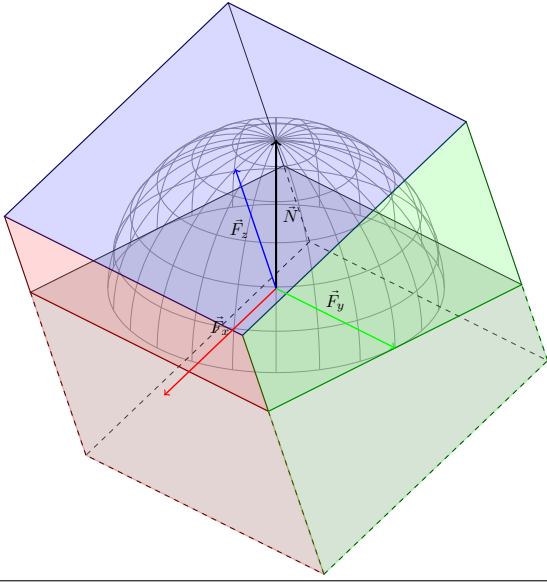
Avec HS la fonction de HeavySide définie par :

$$\text{HS}(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0 \\ 1 & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$$

La figure 1.1 retrace l'évolution de $\Omega_F(\vec{n})$ selon l'angle θ pour des orientation de $\phi = 0$ et $\phi = \frac{\pi}{2}$

Les poids affectés aux valeurs de chaque face de l'envmap sont donc l'intégration du produit scalaire normalisé $\frac{\vec{\omega} \cdot \vec{n}}{\|\vec{\omega}\|}$ par rapport à l'angle solide sur la face considéré

$$\begin{aligned} W_F(\vec{n}) &= \iint_F \frac{\vec{\omega} \cdot \vec{n}}{\|\vec{\omega}\|} \times \frac{\text{HS}(\vec{\omega} \cdot \vec{n})}{\|\vec{\omega}\|^3} d\omega \\ &= \iint_F \frac{\vec{\omega} \cdot \vec{n} \times \text{HS}(\vec{\omega} \cdot \vec{n})}{\|\vec{\omega}\|^4} d\omega \end{aligned} \quad (1.2.1.8)$$

FIGURE 1.1 Évolution de $\Omega_F(\vec{n})$ selon l'orientation de \vec{n}

FIGURE 1.2 Intégration de l'envmap par rapport à une facette


On notera qu'on a bien

$$\sum_{F \in \text{Faces}} \Omega(F) = 4\pi \quad (1.2.1.9a)$$

$$\forall \vec{n} \sum_{F \in \text{Faces}} \Omega(F, \vec{n}) = 2\pi \quad (1.2.1.9b)$$

$$\forall \vec{n} \sum_{F \in \text{Faces}} W_F(\vec{n}) = \pi \quad (1.2.1.9c)$$

Dès lors, l'approximation selon laquelle \mathcal{L} est constante sur chaque face nous donne

$$\begin{aligned} \mathcal{E}(p, \vec{n}) &= \frac{\mathcal{P}_V(p)}{\pi} \sum_{F \in \text{Faces}} \mathcal{L}_{glob}(\vec{F}) W_F(\vec{n}) \\ &= \frac{\mathcal{P}_V(p)}{\pi} \sum_{F \in \text{Faces}} \mathcal{L}_{glob}(\vec{F}) \iint_F \frac{\vec{\omega} \cdot \vec{n} \times \text{HS}(\vec{\omega} \cdot \vec{n})}{\|\vec{\omega}\|^4} d\omega \end{aligned} \quad (1.2.1.10)$$

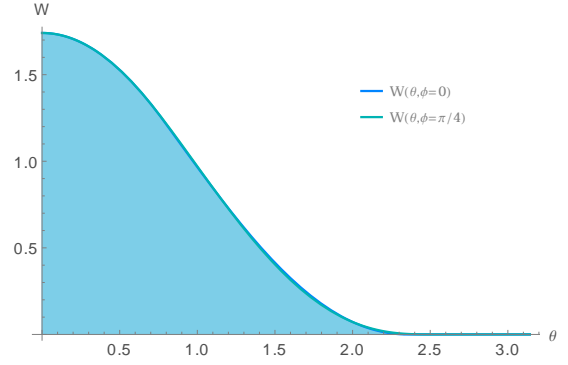
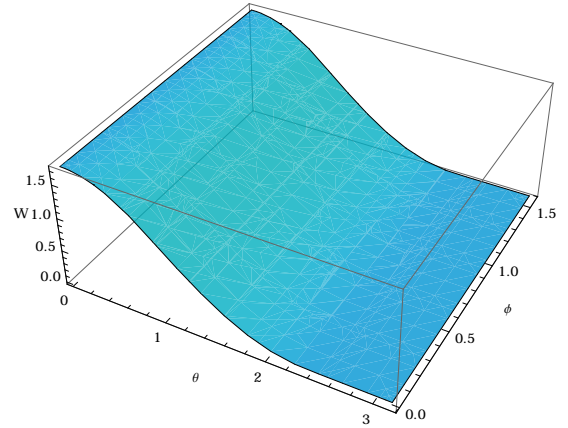
1.2.2

Approximation numérique

En considérant la face F_{Z+} on obtient (sans perte de généralité)

$$W_{F_{Z+}}(\vec{n}) = \iint_{[-1;1]^2} \left[\frac{(x \cdot \vec{n}_x + y \cdot \vec{n}_y + \vec{n}_z)}{(x^2 + y^2 + 1)^2} \text{HS}(x \cdot \vec{n}_x + y \cdot \vec{n}_y + \vec{n}_z) dx dy \right] \quad (1.2.2.1)$$

Le problème est alors de trouver un moyen de calculer, ou au moins d'approcher, la fonction $W_F(\vec{n})$. Ce calcul étant par ailleurs fait en chaque nœud du maillage, il est primordial de le faire en utilisant un minimum de ressource, quitte à évaluer une valeur approchée qui affectera le résultat de manière faible comparativement avec l'approximation faite précédemment et selon laquelle \mathcal{L} est constante sur chacune faces.

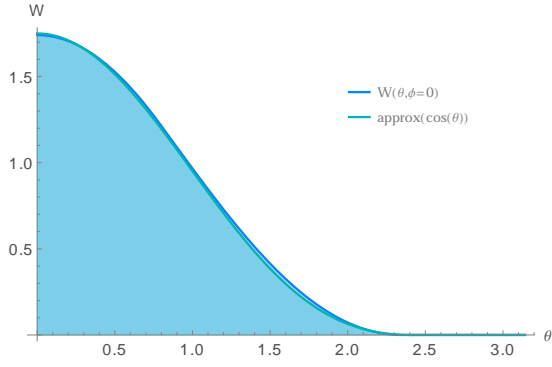
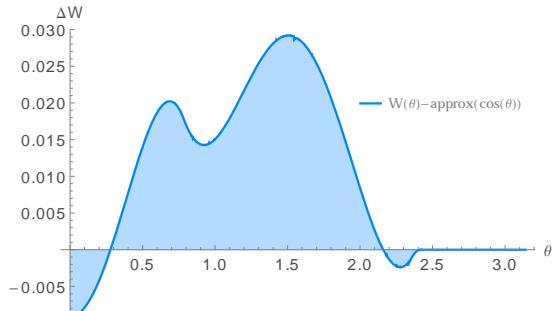
FIGURE 1.3 Évolution de $W_F(\vec{n})$ selon l'orientation de \vec{n}

 (a) $W(\theta)$

 (b) $W(\theta, \phi)$

Comme le montre la figure 1.3, la fonction W_F dépendant principalement de θ on tentera de l'approximer par une fonction de $\vec{n} \cdot \vec{F} = \cos(\theta)$

Une approximation simple est la fonction

$$\text{approx} : \cos(\theta) \mapsto \frac{[\max(.75 + \cos(\theta), 0)]^2}{1.75} \quad (1.2.2.2)$$

Comme le montre la figure 1.4, cette fonction est, malgré sa grande simplicité proche de la fonction $W_F(\vec{n})$.

FIGURE 1.4 Comparaison entre $W_F(\vec{n})$ et $\text{approx}(\cos(\theta))$ (a) $W(\theta)$ et $\text{approx}(\cos(\theta))$ (b) ΔW

1.2.3

Discussion

La méthode développée ici repose sur l'approximation de la formule (1.2.1.10) et plus particulièrement de l'intégrale présenté dans la formule (1.2.1.8). La complexité de cette intégrale réside dans le domaine effectif d'intégration, conditionné à la fois par la forme carré des faces de l'envmap et la présence d'un terme caractéristique de l'hémisphère visible.

Plusieurs formules ont été étudiée pour des domaines d'intégration hémisphériques ou partiellement hémisphérique ainsi que pour des polygones entièrement visibles [Snyder and Report, 1996] (ce qui fait disparaître le terme de HS).

Il aurait été possible d'adapter un modèle polygonale évoqué dans [Snyder and Report, 1996] mais les polygones sur lesquels il aurait fallu intégrer variant selon les conditions de visibilité il aurait été nécessaire d'effectuer de coûteux calculs de géométrie.

L'objectif principal étant ici une grande vitesse d'exécution, l'inexactitude des résultats étant de toute façon largement oubliée au regard des approximations faites précédemment on préféra utiliser une fonction grossièrement approché mais simple à calculer.

Partie 1.3

Ombrage

1.3.1

Modèle

Un indice visuel primordial à la vraisemblance visuelle des images produites est la présence d'ombres portées provoquées par l'ajout de l'objet .

La modélisation de l'impact d'un tel ajout peut théoriquement être calculé qu'en connaissant la géométrie de la scène et la nature des matériaux qui la compose.

On fera ici plusieurs hypothèses dans le but d'obtenir un modèle qui soit calculable en temps réels tout en donnant des résultats vraisemblables.

Le calcul d'ombre douces est alors fait en décomposant l'objet en une hiérarchie de sphère comme présenté dans [Iwanicki, 2013] et en sommant les contribution des différentes sphères.

Pour évaluer l'ombre douce projeté par une sphère il suffit alors d'évaluer le manque d'illumination. On rappelle les formules suivantes

$$\mathcal{E}_{\text{ambient}}(p, \vec{n}) = \frac{1}{\pi} \int_{\mathcal{H}^2(\vec{n})} \mathcal{L}_{\text{glob}}(\vec{\omega}) \times \vec{\omega} \cdot \vec{n} d\vec{\omega}$$

$$\mathcal{E}_{\text{ombre}}(p, \vec{n}) = \mathcal{E}_{\text{ambient}}(p, \vec{n}) - \frac{1}{\pi} \int_{\mathcal{S}(p)} \mathcal{L}_{\text{glob}}(\vec{\omega}) \times \vec{\omega} \cdot \vec{n} d\vec{\omega}$$

avec $\mathcal{S}(p)$ la portion de sphère visible depuis la point considéré.

L'ombre est rendu en assombrissant le pixel associé ce point d'un facteur

$$\begin{aligned} \mathcal{F}(p) &= \frac{\mathcal{E}_{\text{ombre}}(p, \vec{n})}{\mathcal{E}_{\text{ambient}}(p, \vec{n})} \\ &= 1 - \frac{\int_{\mathcal{S}(p)} \mathcal{L}_{\text{glob}}(\vec{\omega}) \times \vec{\omega} \cdot \vec{n} d\vec{\omega}}{\int_{\mathcal{H}^2(\vec{n})} \mathcal{L}_{\text{glob}}(\vec{\omega}) \times \vec{\omega} \cdot \vec{n} d\vec{\omega}} \end{aligned} \quad (1.3.1.1)$$

Les différents niveaux de détail de l'envmap nous permettant d'obtenir des approximations de $L(p, \vec{\omega})$ sur $\mathcal{S}(p)$ et sur $\mathcal{H}^2(\vec{n})$ on peut simplifier la formule en :

$$\mathcal{F}(p) = 1 - \frac{\mathcal{L}_{\text{glob}}(\mathcal{S}(p))}{\mathcal{L}_{\text{glob}}(\mathcal{H}^2(\vec{n}))} \left(\frac{1}{\pi} \int_{\mathcal{S}(p)} \vec{\omega} \cdot \vec{n} d\vec{\omega} \right) \quad (1.3.1.2)$$

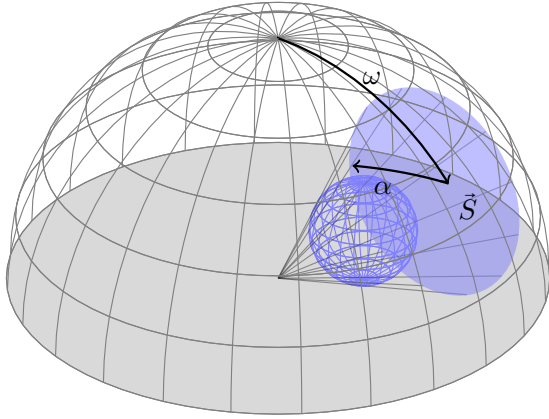
Le calcul de l'angle solide formé par la sphère, et pondéré par un cosinus est détaillé dans [Snyder and Report, 1996]. On retiendra que dans notre cas ou la sphère est supposée au dessus du plan sur lequel se projettent les ombres :

$$\int_{\mathcal{S}(p)} \vec{\omega} \cdot \vec{n} d\vec{\omega} = \cos(\omega) \sin^2(\alpha) \quad (1.3.1.3)$$

avec α le demi angle sous lequel est vu la sphère et ω l'angle entre la vertical (normale à la surface sur laquelle se projettent les ombres) et la direction de la sphère.

On obtient ainsi :

$$\mathcal{F}(p) = 1 - \cos(\omega) \sin^2(\alpha) \frac{\mathcal{L}_{\text{glob}}(\mathcal{S}(p))}{\mathcal{L}_{\text{glob}}(\mathcal{H}^2(\vec{n}))} \quad (1.3.1.4)$$

FIGURE 1.5 Obstruction par une sphere

1.3.2

Discussion

La ou il est habituel de segmenter l'environnement pour en extraire une hiérarchie de sources lumineuses, la méthode proposée ici permet d'évaluer des ombres douces à partir de données d'environnement sans étape de segmentation ni calcul de visibilité.

Un développement intéressant serait de construire une décomposition hiérarchique, potentiellement intégrée dans un octree, et de l'évaluer plus ou moins profondément selon la distance considérée.

Partie 1.4

Reflets spéculaires

Le calcul de l'éclairage ambiant revient à considérer une BRDF purement lambertienne. Afin d'améliorer le réalisme du rendu il convient d'adopter un modèle de Phong en ajoutant une part d'éclairage spéculaire.

Cet éclairage spéculaire permet de rendre de manière intéressante des surfaces métallique, dans la limite d'un seul reflet. Le modèle adopté ici est par ailleurs isotrope, ce qui ne permet pas le rendu de matières comme du métal brossé pour lesquels on retrouve des directions privilégiées.

Dans notre cas l'évaluation du reflet se fait naturellement en calculant la réflexion du rayon incident, donné par la position du point considéré dans l'espace de la caméra, relativement à la normale de l'objet dans ce même espace. On accédera ensuite à la valeur d'éclairage directement dans l'envmap.

Une fois de plus on pourra utiliser les différents niveaux de mipmap à notre avantage, la considération du niveau de mipmap revenant à considérer l'angle d'un cône autour de l'axe du reflet. Un tel cône permet ainsi de caractériser le caractère spéculaire de l'objet, cette dernière pouvant varier d'un reflet parfait –miroir– à un reflet plus diffus –plastique–. On utilisera également l'ombre projeté calculé précédemment afin de moduler les reflets.

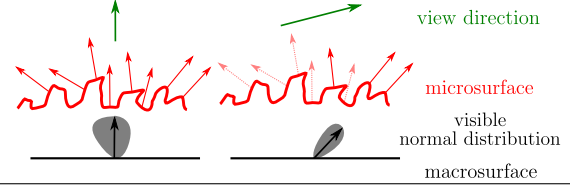
Partie 1.5

Vers un modèles à micro-facettes

Les modèles employés ici permettent un rendu rapide mais présentes des limitations en terme de qualité. Il serait

FIGURE 1.6 Mézo-normales et point de vue

(source [Dupuy et al., 2012])



intéressant, dans l'optique améliorer encore la qualité du rendu, de considérer un modèle à micro-facette. Le principe des modèles à micro-facette est de considérer la surface de l'objet comme un ensemble de petites faces orientées selon des normales propres à chacune (micro-normales). La distribution statistique des micro-normales autour de la normale géométrique du maillage (macro-normale) permet de déterminer les mécanismes de réflexion. Parmi les nombreux avantages d'une telle méthode il y a la possibilité de caractériser des surfaces anisotropes par le biais de directions privilégiées dans la distribution de facettes.

L'auto-occultation entre facettes, variable selon le point de vue, permet par ailleurs de calculer une normale intermédiaire entre la normale géométrique et les micro-normales des facettes (mézo-normale) qui correspond à l'intégration des micro-normales sur l'ensemble des facettes visibles [Bruneton et al., 2010] [Dupuy et al., 2012] [Heitz et al., 2013b].

Cette mézo-normale, utilisée à la place de normale géométrique, permet de corriger les reflets sur des surfaces vue sous un angle important.

L'intégration complète d'un tel modèle a été envisagée de la manière suivante :

1. Choix d'une distribution de normale (gaussienne) et étude du modèle associé ;
2. Ajout aux objets 3D d'une texture (optionnelle) caractérisant localement la direction privilégiée et la force de l'anisotropie associée ;
3. Évaluer, dans le fragment shader, la distribution de direction reflétées en fonction de l'angle de vue et des caractéristiques stockées dans la texture ;
4. Évaluer la lumière incidente selon la distribution calculée précédemment.

Au delà des calculs complexes, mais heureusement déjà documentées, du premier point [Heitz et al., 2013a], l'évaluation de l'envmap selon des distributions anisotropes nécessite de lourds calculs. Il serait possible de les réduire fortement via un pré-calcul (convolution) mais dans notre cas le caractère dynamique de l'environnement ne permet pas une telle approche.

Dans notre cas, il serait nécessaire d'évaluer, sans pré-calcul, l'intégration anisotrope de l'envmap. Les outils de filtrages anisotropes ne sont ici pas exploitables en l'état car un filtre anisotrope est défini entre autre par le facteur d'anisotropie qui le caractérise. Le nombre d'unités de texture étant grandement limité, il n'est pas possible de charger plusieurs fois l'envmap avec des filtrages différents qui couvriraient toutes nos attentes.

Les outils de lecture de texture par gradient¹ mis en place dans OpenGL ne conviennent pas non plus car même

1. `textureGrad()`

si les vecteurs fournis (dX et dY) sont caractéristique d'une forte anisotropie, le filtrage anisotropique est en l'état limité aux faces constituant l'envmap cubique. Il en résulte des défauts aux jonctions entre les faces.

Il conviendrait donc, pour permettre en place les mécanismes d'évaluation anisotrope voulus, d'approximer l'intégration vis de multiples accès à la texture, le long de la direction privilégie d'anisotropie pour procéder à une intégration implicite.

Partie 1.6

Pipeline

Compte tenu des méthodes décrites précédemment, le pipeline de rendu se décompose en différentes parties (voir figure 1.7)

1. L'étape de pré-calcul permet l'évaluation de données propres au modèle. Ces données n'étant pas influencé par la localisation dans l'espace ni par les caractéristiques d'environnement lumineux, il n'est pas nécessaire de les recalculer en temps réelle et on préfère donc stocker les résultats pré-calculés.

Ambiant : information d'auto-occultation ($\mathcal{P}_V(p)$), stocké dans une `texture2D` ;

Sphères : décomposition de l'objet comme union de sphères, stocké sous forme de `vec4[]`.

2. L'étape de calcul temps réel, qui évalue des résultats temporaires nécessaires à la réalisation du rendu final. Ces résultats doivent être réévalués dynamiquement car ils dépendent de paramètres dynamique tel que les données d'environnement.

Ombre : ombre douce projeté par l'objet, elle dépend de l'environnement lumineux décrit par l'envmap.

3. L'étape de rendu qui produit l'image telle qu'elle est vue par l'utilisateur.

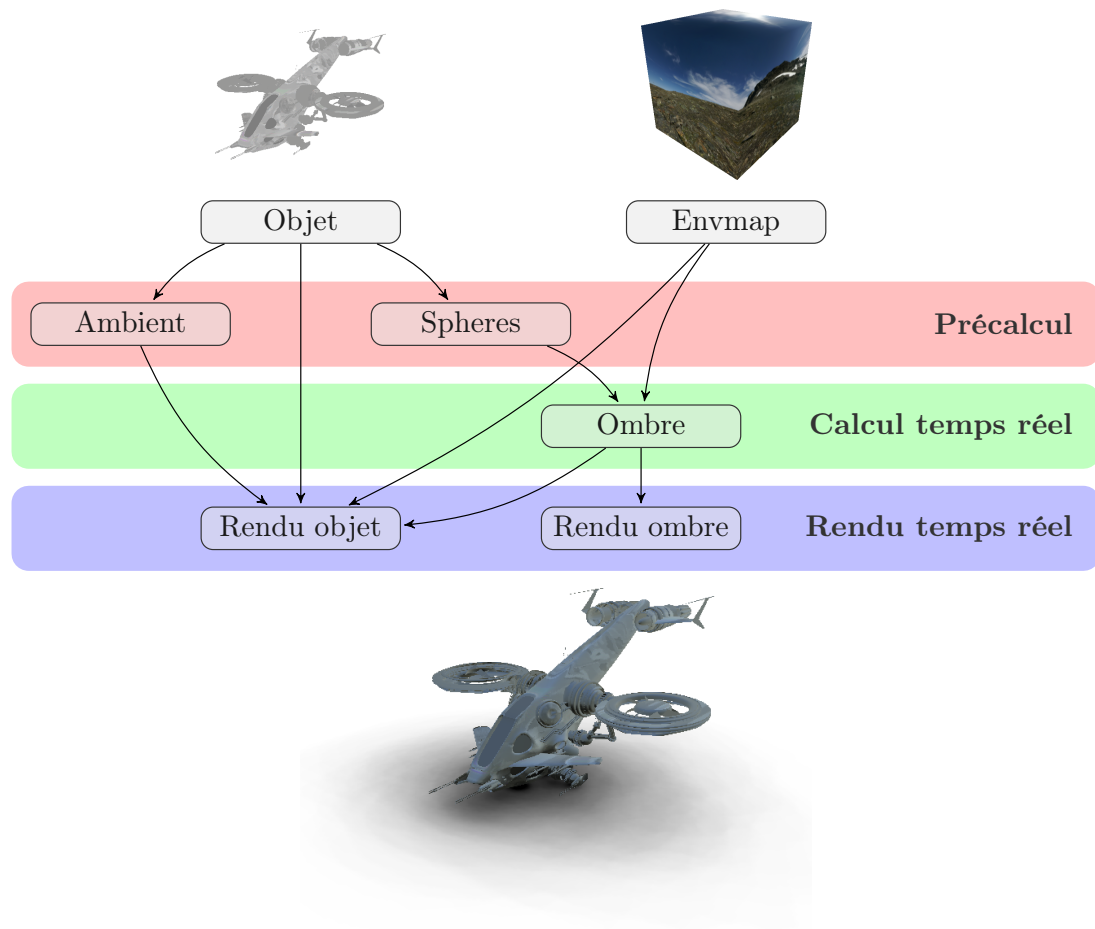
Rendu objet : affichage de l'objet, en tenant compte de l'éclairage ambiant, et des reflets spéculaires ;

Rendu ombre : affichage des ombres en surimpression afin d'intégrer l'objet de manière plus réaliste.

Partie 1.7

Résultats

FIGURE 1.7 Pipeline développé



Bibliographie

- [Bruneton et al., 2010] Bruneton, E., Neyret, F., and Holzschuch, N. (2010). Real-time Realistic Ocean Lighting using Seamless Transitions from Geometry to BRDF. *Computer Graphics Forum*, 29(2) :487–496.
- [Dupuy et al., 2012] Dupuy, J., Heitz, E., Iehl, J.-c., Poulin, P., Neyret, F., and Ostromoukhov, V. (2012). Linear Efficient Antialiased Displacement and Reflectance Mapping. 32(6) :1–11.
- [Heitz et al., 2013a] Heitz, E., Nowrouzezahrai, D., Poulin, P., and Neyret, F. (2013a). Filtering color mapped textures and surfaces. *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games - I3D '13*, page 129.
- [Heitz et al., 2013b] Heitz, E., Nowrouzezahrai, D., Poulin, P., and Neyret, F. (2013b). Filtering Non-Linear Transfer Functions on Surfaces. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, XX(X) :1–14.
- [Iwanicki, 2013] Iwanicki, M. (2013). Lighting technology of The Last of Us.
- [Mcguire et al., 2013] Mcguire, M., Evangelakos, D., Wilcox, J., Donow, S., and Mara, M. (2013). Plausible Blinn-Phong Reflection of Standard Cube MIP-Maps. pages 1–8.
- [Snyder and Report, 1996] Snyder, J. M. and Report, T. (1996). Area Light Sources for Real-Time Graphics.