

Université Paris 8

Master Création Numérique

Parcours : Arts et Technologies de l'Image Virtuelle

**Le verre : de l'esthétique de la matière à
l'alchimie numérique.**

Ou comment imiter le verre en 3D ?

Chloé LEROUX



Mémoire de Master
2017 - 2018

« Il semble ainsi que l'alchimie corresponde moins à une science physique qu'à une connaissance esthétique de la matière et qu'il faille la situer à mi-chemin entre la poésie et les mathématiques, entre le monde du symbole et celui du nombre. »

René Alleau¹.

¹ René Alleau, Huginus a Barma, et Eugène Canseliet, *Aspects de l'alchimie traditionnelle: textes et symboles alchimiques* (Paris: Editions de minuit, 1986).

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Chu-Yin Chen pour m'avoir aidé à réaliser ce mémoire,
Jean-François Jégo pour m'avoir aidé à trouver le sujet de celui-ci
ainsi que toute l'équipe pédagogique d'ATI.

Je remercie grandement Maëlys Jusseaux pour m'avoir aidé dans mes recherches
ainsi que pour le prêt de nombreux livres.

Pour m'avoir soutenue et aidée je remercie aussi
Maxime Martinerie et Aurore Mignot.

Et enfin je remercie Tristan De Saint-Ceran,
Kingsize FX & Kingsize Animation et Millimages.

RESUME

Le verre est une matière esthétiquement très intéressante qui peut avoir plus d'aspect que l'on ne pense : il peut être transparent, translucide ou même opaque. Afin de pouvoir correctement imiter le verre en 3D nous allons d'abord analyser différentes techniques de fabrication et de décorations du verre à travers le temps. Après cela, je vais chercher à trouver la meilleure alchimie, c'est-à-dire le meilleur processus de création pour chaque expérimentation en 3D. Je vais aussi bien utiliser des moteurs de rendu pré-calculé que des moteurs de rendu temps réel car il n'est plus pertinent de les séparer étant donné que la frontière entre les deux tend à s'effacer. Nous explorerons leurs possibilités pour ensuite les confronter et en extraire leurs caractéristiques propres.

ABSTRACT

Glass is an interesting aesthetic material which can have more aspect than one thinks : it can be transparent, translucent or even opaque. In order to be able to correctly imitate glass in 3D, we will first analyse different manufacturing techniques and decorations over time. After that, I will try to find the best alchemy, which means the best creative process for each 3D experiment. I chosed to use both pre-computed rendering engines and real-time rendering engines because it is not relevant anymore to separate these two since the dividing line between the tends to fade. We will explore the possibilities of each and then confront them and extract their own characteristics.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	4
RESUME	5
ABSTRACT	5
INTRODUCTION	8
1. L'esthétique de la matière	9
1.1 Qu'est-ce que le verre ?	9
1.1.1 Le verre à l'état naturel	9
1.1.2 Composition du verre	10
1.1.3 Propriétés physiques du verre	11
1.2 Bref historique du verre et de ses techniques	14
1.2.1 Les origines	15
1.2.2 L'Empire Romain	16
1.2.3 Le Moyen-Âge	17
1.2.4 Venise & l'âge d'or du verre	19
1.2.5 Arts Nouveaux et Arts Décoratifs	22
1.2.6 Le verre et l'art contemporain	25
1.3 Verre et Arts Numériques	30
1.4 Peut-on alors classer le verre ?	33
2. L'alchimie numérique en pré-calculé	34
2.1 Introduction au travail du verre en pré-calculé	34
2.2 Introduction au travail du verre sur <i>Redshift</i>	37
2.3 Vitrail n°1 : Gallifrey	41
2.4 Vitrail n°2 : Rosace	44
2.5 Vase d'inspiration Art Nouveau et Art Décoratif	48
2.6 « Vetro a Reticello »	51
2.7 Pour aller plus loin	53
3. L'alchimie numérique en temps réel	55
3.1 Présentation du projet intensif	55
3.2 Présentation des quatre tableaux	56

3.2.1	L'enfance	56
3.2.2	L'amour	62
3.2.3	La peur	64
3.2.4	La folie créatrice	66
3.3	Conclusion du projet intensif et comparaison avec le pré-calculé	68
3.3.1	Exemple du triangle de Penrose	69
3.3.2	Exemple du buste	70
	CONCLUSION	72
	Bibliographie	73
	Webographie	74
	Lexique	76
	Index des illustrations	80
	Annexes	84

INTRODUCTION

Le verre est partout. Il nous entoure et nous croyons le connaître. Pourtant notre vision de cette matière est très simpliste et biaisée. C'est en effet un matériau plus complexe qu'il n'y paraît, rempli de surprises et qui cache de nombreuses facettes. Je vais profiter de ce mémoire pour briser une idée reçue bien établie : le verre est transparent.

Dans un premier temps je vais donc expliquer ce qu'est le verre, comment on l'obtient et ce quelles sont ses particularités. Ce sera l'occasion de faire un historique du verre et d'évoquer ses caractéristiques visuelles. Je parlerai aussi de l'évolution de ses techniques de fabrication et de son utilisation de nos jours dans les œuvres numériques. Enfin, nous allons voir s'il est possible de classer le verre.

Le verre est une matière faite d'alchimie. C'est pourquoi après avoir analysé l'esthétique d'un certain nombre d'œuvres en verre et d'expliquer leur processus de création, je vais tenter de recréer cette alchimie numériquement. A partir des éléments constatés dans la première partie, je vais chercher à recréer des œuvres en verre en 3D, en utilisant tout d'abord des moteurs de rendu pré-calculé. A travers ces différentes expérimentations je vais me demander s'il est possible d'imiter tous les objets en verre en 3D.

Dans une troisième partie, je vais chercher à obtenir cette alchimie en utilisant cette fois un moteur de rendu en temps réel. Ce sera l'occasion de parler du projet intensif de trois semaines de janvier 2018 et de la réalisation des objets en verre qui l'agrémentent. Enfin, je finirai en comparant la création de matériaux en verre en temps réel et en pré-calculé.

Je ne m'intéresserai ici qu'à l'utilisation du verre dans la création d'œuvres artistiques. Mon but étant de créer de belles images en essayant de me rapprocher au plus près de l'esthétique de véritables œuvres. C'est pourquoi je ne parlerai pas, ou très peu, de l'utilisation du verre dans la fabrication d'objets usuels ou de la vie courante. Sans oublier pour autant les sciences comme la physique ou l'optique, j'ai choisi de privilégier l'esthétique.

1. L'esthétique de la matière

Dans cette partie nous nous intéresserons en détail sur ce qu'est le verre et de ce qui fait son esthétique. Dans un premier temps, nous allons voir quel sont ses particularités ainsi que ses propriétés physiques et optiques. J'établirai par la suite un bref historique du verre et l'évolution de ses techniques de création et de décoration. L'identification de ces différents points est très importante afin de savoir comment il est possible d'imiter le verre en 3D. Nous aborderons ensuite l'utilisation du verre dans les Arts Numériques. Enfin, après avoir réalisé ce tour d'horizon, nous allons voir s'il est possible de classer le verre.

1.1 Qu'est-ce que le verre ?

1.1.1 Le verre à l'état naturel

En tout premier lieu, il est intéressant d'aborder le fait qu'il existe du verre à l'état naturel : les obsidiennes et les fulgurites. Les obsidiennes sont des pierres volcaniques sombres, souvent noires, grises, vertes ou rouges, qui résultent d'un refroidissement rapide de la lave. C'est une pierre souvent opaque. Les fulgurites quant à elles sont des morceaux de verre formés sous terre lorsque la foudre touche le sable. Elles sont aussi appelées « pierres de foudre ». Le verre formé a souvent une forme cylindrique et n'est absolument pas transparent à cause des nombreuses impuretés présentes naturellement dans le sable.

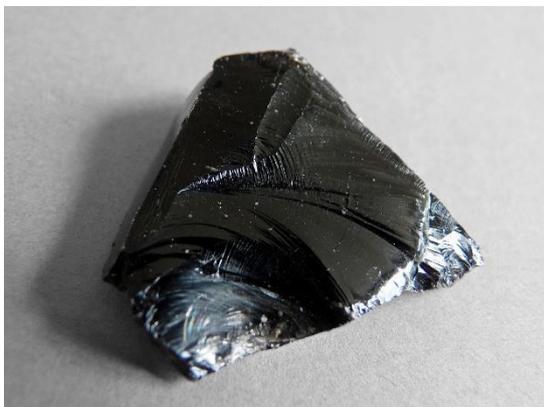


Figure 1 : Obsidienne récoltée sur l'île de Lipari.
[https://en.wikipedia.org/wiki/Obsidian#/media/File:Lipari-Obsidienne_\(5\).jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Obsidian#/media/File:Lipari-Obsidienne_(5).jpg)



Figure 2 : Fulgurite d'Algérie, exposée au San Diego Country Fair.

1.1.2 Composition du verre

Le verre que l'homme fabrique depuis des millénaires est composé de plusieurs éléments :

- *Le vitrifiant* est la base du verre. « C'est le composant principal du verre qui représente environ 70% de [sa] masse »². Plus son dosage est élevé et plus le verre sera résistant. Le plus souvent c'est la silice³ qui est utilisée.
- *Les fondants* servent à abaisser la température de fusion de la silice ce qui permet de travailler plus facilement le verre. Les fondants les plus utilisés sont les oxydes de sodium, de potassium ou magnésium.
- *Les stabilisants* sont des oxydes alcalino-terreux qui permettent de renforcer le verre. L'ajout d'oxyde de calcium permet, par exemple, d'augmenter sa résistance, son éclat et de diminuer sa solubilité à l'eau. L'ajout d'oxyde de zinc augmente son éclat et son élasticité. L'oxyde de fer, quant à lui, donne une teinte verdâtre au verre. Et l'oxyde de plomb permet de diminuer la température de fusion et donne un verre plus éclatant (un des composants du cristal).
- *Les colorants* sont des oxydes métalliques qui servent à teinter le verre. Par exemple, l'ajout d'oxyde de cobalt donne un verre bleu.

Le verre s'obtient donc en mélangeant ces différents éléments et en les chauffant à très haute température pendant très longtemps. *La fusion* s'effectue entre 800 et 1400°C : c'est à cette température que les matières se mettent à fondre. Puis vient le moment de *l'affinage* (entre 1450 et 1530°C), où les impuretés disparaissent. Le verre sera donc plus transparent. Enfin, le mélange est abaissé à une température pouvant aller jusqu'à 1000°C, cette étape s'appelle *la braise*. Elle permet d'obtenir la viscosité nécessaire afin de travailler le verre.

² « Composition du verre - Infovitrail.com », consulté le 2 janvier 2018, <http://www.infovitrail.com/index.php/fr/composition-du-verre>.

³ La silice est un composé naturel présent dans un grand nombre de minéraux comme le sable ou le quartz.

1.1.3 Propriétés physiques du verre

Comme nous avons pu le voir précédemment, une des particularités du verre est que c'est une *matière visqueuse*. Concrètement, cela se traduit par le fait que la matière en fusion n'est jamais vraiment liquide comme de l'eau mais elle aura davantage la consistance du miel. Cela permet donc de mieux être manipulée. En refroidissant : « la matière est de moins en moins visqueuse, elle redevient plastique, (on peut la déformer car elle est encore déformable) puis elle redevient finalement solide et rigide »⁴.

La maniabilité à l'état visqueux est due au fait que les molécules sont extrêmement mobiles. Théoriquement, quand la température d'une matière diminue, la cristallisation commence et les molécules se figent de manière ordonnée. Cependant, ce n'est pas le cas pour le verre à cause de sa viscosité. Comme nous pouvons le voir sur la figure 3, lorsque la température diminue, la viscosité augmente doucement et la matière commence à se cristalliser. Cependant, plus la température diminue et plus le changement de viscosité est brusque : cela empêche la cristallisation. « Vers 550°C, la viscosité est telle que les molécules sont totalement immobiles. Le verre est devenu un solide amorphe et on dit qu'on a passé la température de transition vitreuse. »⁵. Ainsi, à cause de ce phénomène, les molécules du verre après refroidissement se sont immobilisées de manière chaotique : c'est pour cela que le verre est une matière fragile qui peut facilement casser.

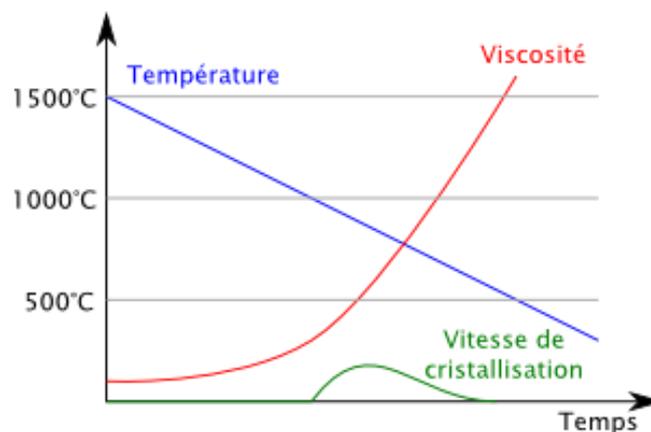


Figure 3 : Schéma représentant la viscosité et la vitesse de cristallisation du verre en fonction de la température et du temps
<https://sciencetonnante.wordpress.com/2011/05/09/le-verre-cet-inconnu/>

⁴ « État physique du verre - Infovitrail.com - Infovitrail.com », consulté le 2 janvier 2018, <http://www.infovitrail.com/index.php/fr/etat-physique-du-verre>.

⁵ David Louapre, « Le verre, cet inconnu », *Science étonnante* (blog), 8 mai 2011, <https://sciencetonnante.wordpress.com/2011/05/09/le-verre-cet-inconnu/>.

Afin de pouvoir par la suite recréer du verre en 3D, il va falloir nous intéresser encore plus en détail à cette matière. Nous allons donc voir quelles sont les propriétés physiques et optiques du verre. En premier lieu, nous allons aborder les lois de Snell-Descartes⁶.

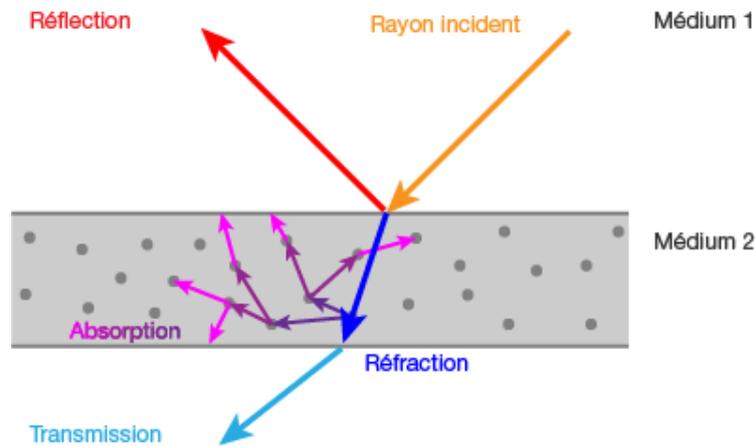


Figure 4 : Schéma représentant le trajet d'un rayon lumineux lorsqu'il subit un changement de milieu.

Ainsi, comme le montre le schéma ci-dessus, pour les objets non métalliques comme le verre : quand un rayon lumineux (le rayon incident) passe d'un médium à un autre (par exemple de l'air, médium 1, au verre, médium 2) plusieurs phénomènes vont se produire. Une partie de ce rayon va être réfléchi (en rouge) et une autre va être réfractée à l'intérieur du nouveau milieu (rayon bleu foncé). Nous pouvons voir que le rayon réfracté change de direction. Il subit une déviation au moment du passage d'un médium à un autre. Cela est dû au fait que la lumière ne se déplace pas à la même vitesse à travers ces deux médiums. C'est ce que l'on appelle l'indice de réfraction (index of refraction ou IOR en anglais)⁷. Il s'obtient en faisant le calcul suivant :

$$\text{indice de réfraction} = \frac{\text{vitesse de la lumière dans le vide}}{\text{vitesse de la lumière dans le nouveau milieu}}$$

En plus de la réfraction, le rayon traversant le médium 2 subit d'autres phénomènes comme l'absorption (rayons roses et violets). Cela correspond à la perte d'énergie du rayon

⁶ Willebrord Snell (1580-1626) est un mathématicien et physicien néerlandais.

René Descartes (1596-1650) est un mathématicien et physicien français.

⁷ Voici une liste d'indices de réfraction les plus courants : Air : 1, Eau : 1,33, Verre : 1,5, Diamant : 2,5.

lumineux quand il traverse le nouveau milieu. Ce phénomène est très utile en 3D pour créer des matériaux ayant du *Subsurface Scattering*⁸ par exemple. Enfin, à travers le schéma on peut voir qu'il existe un dernier phénomène : la transmission (rayon bleu clair). Cela correspond au rayon sortant de l'autre côté du deuxième médium. Ces deux derniers phénomènes sont très importants dans les matériaux translucides.

Maintenant que nous avons abordé plus en détails les phénomènes optiques du verre, nous allons pouvoir prendre le temps de faire la distinction entre la transparence et la translucidité. Il y a transparence quand la lumière est réfractée à l'intérieur de l'objet et qu'elle n'est pas absorbée. A ce moment-là nous pouvons distinguer très nettement les objets à travers lui. Un objet translucide ne laisse pas passer entièrement les rayons lumineux, ils sont partiellement absorbés. C'est pourquoi les objets derrière lui paraîtront flous.

En 3D il existe le principe de rendu physique réaliste, plus généralement appelé *Physically Based Rendering* ou *PBR*⁹. Avec cette technique, lorsque l'on effectue un rendu d'une scène 3D, des rayons vont être lancés depuis la caméra (ce sont les *primary rays*) vers l'infini. Quand ses rayons rencontrent un matériau (un *shader*) le moteur de rendu va créer un « objet » nommé *BSDF* (*Bidirectional Scattering Distribution Function*)¹⁰. Le *BSDF* décrit comment la lumière interagit avec un objet donné. « En d'autres mots, *BSDF* décrit les propriétés optiques du matériau »¹¹. Il peut se résumer par l'équation suivante :

$$BSDF = BRDF + BTDF$$

Il est donc composé du *BRDF* (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*) qui décrit la réflexion de la lumière sur la surface de l'objet et du *BTDF* (*Bidirectional Transmittance*

⁸ Le *Subsurface Scattering* ou *SSS*, est une technique en 3D qui permet de simuler la réaction de la lumière réagit quand elle entre en contact avec un objet translucide. Cette technique est notamment utilisée pour faire des bougies ou encore de la peau.

⁹ Le *Physically Based Rendering* « est une méthode de shading et de rendu qui permet d'avoir une représentation plus précise de la façon dont la lumière réagit avec des surfaces », c'est donc une méthode de rendu plus réaliste. Allegorithmic, « The PBR Guide - Vol.2 », 3 août 2018, <https://academy-api.allegorithmic.com/static/files/pdfs/the-pbr-guide-vol-2.pdf>.

¹⁰ *BSDF* est un terme introduit par F. O. Bartell, E. L. Dereniak, et W. L. Wolfe, *The theory and measurement of bidirectional reflectance distribution function (BRDF) and bidirectional transmittance distribution function (BTDF)* (Proceedings of SPIE Vol. 257 Radiation Scattering in Optical Systems, 1980), <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=1230783>.

¹¹ « *BSDF* | anish.r.khadka », consulté le 2 janvier 2018, <https://anishrkhadkablog.wordpress.com/tag/bsdf/>.

Distribution Function) qui décrit la transmission la lumière à travers l'objet. Cette équation reprend les mêmes phénomènes, décrits plus haut, et illustrés dans le schéma précédent (figure 4) et est très bien résumée dans le schéma suivant (figure 5).

Ces objets, stockés dans la mémoire de l'ordinateur, vont permettre de mieux calculer et de mieux paramétrer le rendu. Ainsi, il est possible de contrôler séparément la réflexion et la réfraction.

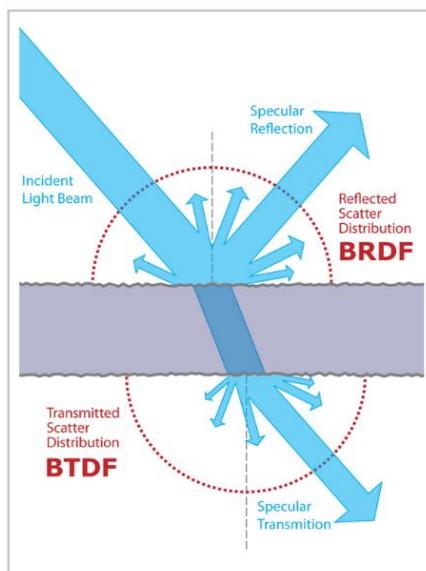


Figure 5 : Schéma représentant l'équation de BSDF

1.2 Bref historique du verre et de ses techniques

Nous allons maintenant établir une chronologie du verre et de ses techniques de fabrication à travers différentes œuvres et techniques. Cet historique est bien entendu un résumé de l'histoire du verre qui s'étend sur plus de 5000 ans. C'est une liste non-exhaustive d'œuvres et de techniques qui me paraissent les plus intéressantes à aborder. Les œuvres choisies, subjectivement, sont un support pour aborder différentes techniques de fabrication et de décoration.

Cette première sous-partie a aussi pour but de démontrer que le verre n'est pas simplement une matière transparente qui sert à faire des objets de la vie courante. Mais que c'est une matière complexe qui peut être travaillée de différentes manières et peut avoir des aspects très différents.

1.2.1 Les origines

Les premières traces d'objets en verre fabriqués par l'homme remontent aux environs de -3000 à -1500 ans avant J.-C. en Mésopotamie. A cette époque le verre était travaillé de la manière suivante : on créait un noyau d'argile (qui correspond à la forme intérieure de l'objet) avant d'y insérer une tige métallique. Une fois le noyau sec, on venait le tremper dans du verre en fusion. Puis, on décorait l'objet avec des filets de verre chaud. Une fois l'objet refroidi on retirait la tige de métal et on détruisait le noyau en argile ce qui libérait l'objet en verre. Cette technique permet de fabriquer de petits objets. L'utilisation du verre se développe de plus en plus à cette époque et dans cette région car c'est un matériau très pratique : « dans une civilisation où parfums, baumes et onguents sont prisés, on découvre avec le verre un matériau de choix pour conserver ces substances »¹².

La principale caractéristique de ce verre est l'absence de transparence. Comme nous pouvons le voir sur la figure 6 (ci-dessous), nous pouvons penser que cet objet n'est pas réalisé en verre de prime abord, mais c'est pourtant bien le cas. Il est constitué de verre bleu, opaque sur lequel on a déposé des filaments de verre opaque blancs et jaunes que l'on a déformés avec une sorte de peigne pour obtenir ces zigzags avant d'aplanir la surface.

« En réalité, les premiers verres n'étaient pas translucides, mais opaques à cause de fusions incomplètes et de la présence de nombreuses impuretés dans la matière utilisée. »¹³



Figure 6 : Vase à onguent en forme de poisson, verre sur noyau, Egypte, XVIII^{ème} dynastie (environ -1350 avant J.-C.), British Museum, Londres.

¹² Pascal Richet, *L'âge du verre*, Découvertes Gallimard 399 (Paris: Gallimard, 2000).

¹³ Ibid.

1.2.2 L'Empire Romain

Durant l'Empire Romain, les techniques de création ont évolué. Dans un premier temps, grâce à des températures de chauffe plus élevées. Le verre devient translucide voire transparent. Par la suite, une des principales techniques de fabrication a été inventée : *le soufflage du verre*. Cette technique révolutionna le travail du verre. Cela a engendré un « changement complet de l'industrie qui n'a jamais été égalé ou, plutôt surpassé »¹⁴. Elle s'utilise notamment pour créer des objets creux.

Le principe est le suivant : on recueille tout d'abord au bout d'une canne cylindrique et percée une petite masse de verre en fusion, c'est la paraison. On vient ensuite souffler dans la canne afin de faire gonfler l'objet en verre. Celui-ci doit sans arrêt être remis au four pour pouvoir être manipulé et ainsi lui donner la forme voulue. Sur l'objet de droite de la figure 7, pour obtenir une anse, il suffit, à l'aide d'une autre canne, de rajouter une boule de verre en fusion sur le premier objet (la base de l'objet final) puis de l'étirer à l'aide d'une pince avant de venir la coller sur le haut de l'objet. Les détails de cet objet sont obtenus en rajoutant des morceaux de verre blanc opaque qui, à force de cuisson et de travail s'aplatissent.

Pour réaliser des objets plus complexes avec des décors intéressants comme sur la figure 8, les verriers ont créé des moules en terre cuite ou en plâtre dans lesquels ils soufflent la paraison de verre. Ainsi, le verre prendra la forme du moule préalablement conçu.



Figure 7 : Pot et carafe en verre soufflé, Italie, 1^{er} siècle après J.-C.,
British Museum, Londres.



Figure 8 : Gobelet, verre soufflé-moulé, Gaule
ou Suisse, 1^{er} siècle, British Museum, Londres.

¹⁴ « A complete change in the industry that was never to be matched or, rather, surpassed » Hugh Tait, *5000 Years of Glass* (London, UK: British Museum Press, 2012).

1.2.3 Le Moyen-Âge

Au Moyen-Âge, en Europe, on voit apparaître et se développer le vitrail. Il existe deux techniques pour obtenir les carreaux de verre plat et coloré dans lesquels sont découpés les pièces qui composent le vitrail. Pour ces deux techniques on utilise le soufflage du verre. La première méthode est le *soufflage en couronne* (ou plateau) qui consiste à souffler une bulle de verre en fusion puis d'en ouvrir une extrémité et de l'élargir. Et, grâce à des mouvements de rotation très rapides, on obtiendra un fin plateau circulaire plat. La deuxième technique est le *soufflage en manchon*. On souffle un cylindre de verre que l'on détache de la canne avant de le couper dans la longueur. Après une nouvelle chauffe, le cylindre va être aplati pour obtenir un rectangle de verre. Le verrier peut alors découper les pièces avant de les assembler avec des baguettes de plomb.

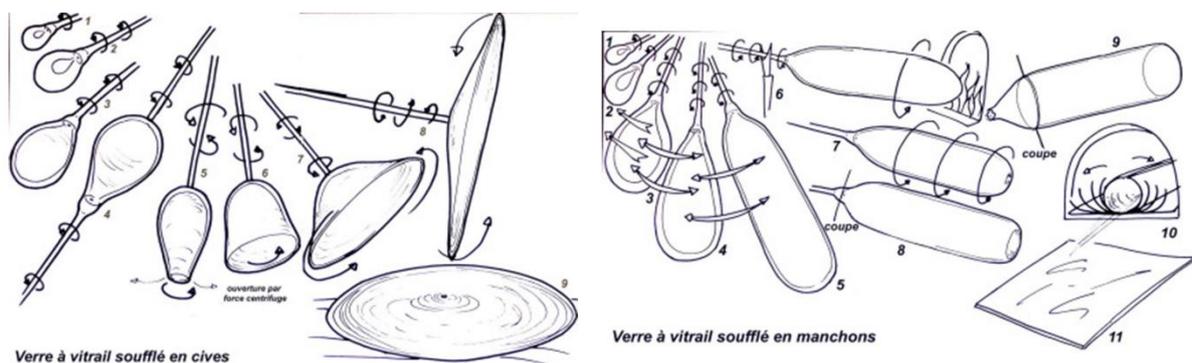


Figure 9 : Schéma expliquant le soufflage en couronne (à gauche) et en manchon (à droite).

Pour décorer les vitraux on les peint à la grisaille (mélange d'oxyde, de verre pilé et de liant de couleur noire ou brune) des détails sur le verre avant qu'il ne soit réchauffé une dernière fois. Une autre technique de peinture consiste à utiliser des céments. «La cémentation est une coloration obtenue par des sels métalliques qui pénètrent dans la masse du verre pendant la cuisson »¹⁵. Le jaune d'argent, qui est le ciment le plus utilisé et donne une couleur jaune au verre. Ces deux techniques ont notamment été utilisées pour décorer le vitrail des *Joueurs d'Échec*, ci-dessous. Nous pouvons remarquer que ce vitrail n'est pas composé de beaucoup de morceaux de verre mais il est pourtant très détaillé. En effet, les personnages ainsi que le décor sont peints à la grisaille et l'utilisation du jaune d'argent permet

¹⁵ « Le jaune d'argent (peinture sur verre) - Infovitrail.com - Infovitrail.com », consulté le 2 janvier 2018, <http://www.infovitrail.com/index.php/fr/decoration-sur-verre/276-le-jaune-d-argent>.

de colorer certaines zones comme les murs de la pièce, le plateau d'échec ou encore des éléments des habits de l'homme à droite.



Figure 10 : Les Joueurs d'Echec (à droite le vitrail en entier et à gauche un gros plan), vitrail, hôtel de la Bessée, Villefranche-sur-Saône, XVème siècle, Musée de Cluny – musée national du Moyen-Âge, Paris

Au Moyen-Âge, au Proche et Moyen Orient, les verriers s'illustrent grâce aux techniques décoratives de *l'émail* et de la peinture à l'or sur verre. L'émail est une peinture colorée composée de différents minéraux qui se vitrifie à la cuisson. Il peut être plus ou moins transparent. Les émaux sur verre des Arabes se distinguent par l'utilisation de couleurs vives et de décors très riches composés d'arabesques comme il est possible de voir sur la figure 11. En plus des émaux, nous pouvons aussi distinguer des décorations peintes à l'or qui en font un objet richement décoré.



Figure 11 : Gourde de pèlerin, verre émaillé et peinture à l'or, Syrie, 1250-60, British Museum, Londres

1.2.4 Venise & l'âge d'or du verre

Lors de la Renaissance, les Italiens et plus particulièrement les Vénitiens, se sont distingués par leur travail très minutieux du verre. Le verre crée est « d'une grande transparence, d'une finesse et d'une légèreté remarquable qu'on nomme, en référence au cristal de roche « Cristallo » »¹⁶. La plupart de leurs créations sont des objets très raffinés et donc très chers. La coupe au pied en forme de dragon (figure 12, ci-dessous) est composée de trois parties : la coupe, le pied et le dragon. Les deux premiers objets sont faits en verre soufflé et moulé. La fabrication du dragon est, quant à elle, un peu plus compliquée. En effet, après avoir créé la paraison on vient y déposer des cannes de verre rouge et bleu, qui vont ensuite être réchauffées et aplaties sur une plaque métallique recouverte d'argile réfractaire¹⁷ (ou sur une plaque céramique). En même temps que l'on lisse la paraison sur la plaque métallique, le verrier continue de souffler l'objet. Puis, l'objet est replongé dans la cuve de verre en fusion avant d'être inséré dans un moule (comme nous avons pu le voir précédemment). Le verrier allonge alors lentement la paraison en la tordant, avant de former le corps du dragon. Enfin, il ajoute du verre coloré pour former les ailes, les yeux et la crête. Les stries sur le corps du dragon et les reliefs (les parties en verre bleu) sont obtenus à l'aide d'une pince et de ciseaux en métal sur le verre très chaud¹⁸.



Figure 12 : Coupe avec pied en forme de dragon, verre soufflé-moulé, Venise, 1630-70, Corning Museum of Glass, New York.

¹⁶ « Chronologie du verre », Les Arts Décoratifs - Site officiel, consulté le 16 octobre 2017, <http://www.lesartsdecoratifs.fr/francais/musees/musee-des-arts-decoratifs/collections/dossiers-thematiques/chronologie-du-verre/>.

¹⁷ Un matériau réfractaire est un matériau qui résiste à de très hautes températures.

¹⁸ Le processus de création de cet objet est reproduit et expliqué en détail à l'adresse suivante : « Dragon-stem Goblet | The Techniques of Renaissance Venetian Glassworking », consulté le 16 avril 2018, <https://renvenetian.cmog.org/object/dragon-stem-goblet>.

Au milieu du XVI^{ème} siècle, les maîtres verriers de Murano ont mis au point plusieurs techniques décoratives du verre dont celle du *verre en filigrane*. Avec cette méthode on a en effet l'impression que plusieurs « fils » sont pris au piège à l'intérieur du verre. Cette technique se divise en trois catégories : le « *vetro a fili* » dont le filigrane forme des lignes parallèles, la « *vetro a retorti* » où les lignes forment des spirales et enfin le « *vetro a reticello* » où les lignes s'entrecroisent.



Figure 13 : De gauche à droite : un vase en « *vetro a retorti* », un vase en « *vetro a reticello* » et un vase en « *vetro a fili* », Venise, XVI^{ème} siècle, British Museum, Londres.

Afin d'obtenir cet effet, le verrier plonge sa canne dans du verre opaque blanc, la plupart du temps, mais il peut être coloré. Puis, il la plonge dans du verre incolore qu'il va ensuite étirer jusqu'à atteindre plusieurs mètres. Le maître verrier va ensuite couper ce tube en segments de taille égale. Les segments sont alors « disposés en parallèle sur une plaque métallique[...] qui est insérée à plusieurs reprises dans le four »¹⁹. Cette première chauffe sert à souder les tubes entre eux. Puis, sur une canne à souffler, le verrier prépare une base en verre sur laquelle il va venir enrouler la plaque de verre obtenue à partir des tubes préalablement soudés, pour former un cylindre. Il passe ensuite au façonnage de la pièce. Et, c'est avec les mouvements de rotation (dans un seul sens) de la canne à souffler sur la plaque

¹⁹ « Le verre filigrané: une technique décorative très raffinée Le Magazine de Proantic », Le Magazine de Proantic, 15 janvier 2017, <http://www.proantic.com/magazine/verre-filigrane-technique-decorative-plus-raffinees/>.

métallique que les tubes vont se déformer pour créer une spirale. C'est aussi à force de rotations et de chauffes que la surface va s'aplanir.

Pour avoir cet effet de « *reticello* », il faut répéter l'étape précédente. Cependant, cette fois-ci, au moment du façonnage il faudra faire tourner la canne dans le sens inverse. C'est en effet en associant cet objet avec l'objet précédemment obtenu que l'on obtiendra cet effet de filigrane entrecroisé.

1.2.5 Arts Nouveaux et Arts Décoratifs

A partir de la fin du XIX^{ème} et début du XX^{ème} siècle, avec les expositions universelles de Paris et de Londres, un renouveau dans le travail du verre apparaît. De nouveaux maîtres verriers voient le jour et redonnent un nouveau souffle au verre. Un de ses artistes est Emile Gallé²⁰ qui « a réussi à extraire la verrerie du cadre étroit des Arts Décoratifs, pour en faire un art universel et unique, art métaphysique »²¹. Il n'hésite pas à mélanger de nombreuses techniques pour réaliser ses œuvres. Fiona Gallagher²² décrit son art en ces mots : « dans les fours de Gallé, le verre devient une matière vivante, mobile qui, associant la gravure à l'acide, les patines, les émaux, les cabochons de verre appliqué, les couleurs tourbillonnantes, et les inclusions entre deux couches de décors à la feuille d'argent, d'or, de platine, et de cristaux aux oxydes métalliques, reflétait l'intense complexité de la nature elle-même »²³.

Il a inventé et breveté en 1898 un nouveau procédé de décoration : *la marqueterie*. Cette méthode consiste à insérer à la pince des morceaux de verre colorés préalablement préparés à l'intérieur de la paraison. Cette technique permet d'obtenir des décors complexes, comme nous pouvons le voir sur le vase ci-dessous (figure 14).



Figure 14 : Vase Les Lumineuses, cristal soufflé à deux couches, marqueterie, gravure, Emile Gallé, 1900, Museum für Kunst und Gewerbe, Hambourg.

²⁰ Emile Gallé (1846-1904) est un maître verrier, ébéniste et céramiste français fondateur de l'École de Nancy.

²¹ Pierre Ennès, *Histoire du verre: au carrefour de l'art et de l'industrie: le XIXe siècle* (Paris: Massin, 2006).

²² Fiona Gallagher est une spécialiste des arts décoratifs travaillant pour la société de vente aux enchères de Londres : Christie's

²³ Fiona Gallagher et Christie's International Group, *Christie's Art Nouveau* (New York: Watson-Guption, 2000), <http://books.google.com/books?id=tdZPAAAAMAAJ>.

Dans le même principe que la marqueterie, un autre type de décoration du verre va aussi faire son apparition à cette époque : c'est *les décors intercalaires*. « Ce procédé consiste à emprisonner un décor entre deux couches de verre »²⁴ comme pour le verre en filigrane. Maurice Marinot²⁵ a réalisé de nombreuses pièces uniques en verre soufflé en utilisant cette technique. Les objets ci-dessous (figure 16 et figure 15) ont un verre épais, avec des formes géométriques très prononcées et de nombreuses bulles.



Figure 16 : Flacon [1101], verre soufflé, modelé à chaud, bulles et décor intercalaires, Maurice Marinot, 1925, Musée des Arts Décoratifs, Paris



Figure 15 : Flacon [1655], verre soufflé, bulles et décor intercalaires, modelé à chaud, Maurice Marinot, 1929, Musée des Arts Décoratifs, Paris

Marinot s'est aussi fait connaître par ses expérimentations de décoration à l'acide (*ou gravure à l'acide*) qui seront reprises plus tard par la manufacture Daum. Il existait déjà plusieurs techniques de gravure (à la roue ou à la pointe de diamant) qui consistaient à enlever de la matière. La gravure à l'acide, quant à elle, consiste à plonger l'œuvre dans un bain d'acide et seules les parties enduites d'un vernis protecteur seront épargnées par la corrosion. Cette technique donne du relief au verre qui prend un aspect givré.



Figure 17 : Vase couvert [19], verre soufflé et, modelé à chaud, décor gravé à l'acide, Maurice Marinot, 1929, Musée des Arts Décoratifs, Paris

²⁴ « Glossaire des principales techniques », consulté le 6 février 2018, <http://mban.nancy.fr/fr/collections/collection-daum/glossaire-des-principales-techniques.html>.

²⁵ Maurice Marinot (1882 – 1960) est un peintre et maître verrier français.

Une autre technique de fabrication des œuvres en verre se répand à cette époque : c'est la *pâte de verre moulée à cire perdue*. Cette technique a été redécouverte par la cristallerie Daum²⁶ en 1900. Elle consiste à créer une première fois l'œuvre voulue en plâtre, puis, à réaliser un premier moule dans lequel on viendra couler la cire. Une fois sec, on pourra démouler l'objet en cire puis le perfectionner. On vient ensuite créer un nouveau moule, en plâtre réfractaire cette fois-ci. Ce moule est placé dans un four pour se solidifier. La cire va alors fondre et laisser un moule creux. On y insère ensuite le groisil qui est composé de morceaux de verre ou de cristal coloré broyé. Après une chauffe très lente, on vient casser le plâtre réfractaire afin de libérer l'œuvre en verre comme il est représenté sur la figure 19. C'est la pâte de verre qui donne cet aspect particulier et translucide au verre. Le vase de François Décorchemont²⁷ (figure 18) en est un parfait exemple.

Avec cette technique « il est possible de donner au verre les formes les plus variées et les plus complexes »²⁸, cependant la réalisation des moules est assez compliqué à réaliser et elle ne se diffusera massivement qu'à partir de la fin du XX^{ème} siècle.



Figure 19 : Photographie illustrant la sortie d'une œuvre en verre d'un moule en plâtre réfractaire
<https://www.vessiere-cristaux.fr/categorie-produit/cristal-daum/>



Figure 18 : Vase Buprestes, pâte de verre moulée à cire perdue, François Décorchemont, 1912, Musée des Arts Décoratifs, Paris.

²⁶ La manufacture de Daum est une cristallerie, créée à Nancy en 1878.

²⁷ François Emile Décorchemont (1880-1971) est un maître verrier, vitrailliste et céramiste français.

²⁸ Jean-Luc Olivié et Véronique Ayroles, *Verres, XXe-XXIe siècles: collection du Musée des arts décoratifs* (Paris: Les Arts décoratifs, 2012).

1.2.6 Le verre et l'art contemporain

Au-delà des Arts Nouveaux et des Arts Décoratifs qui ont vu l'émergence de grands maîtres verriers, le verre a continué à être utilisé par de nombreux artistes contemporains. Ces derniers ne se concentrent plus sur la réalisations d'objets décoratifs comme des vases, mais ils utilisent le verre comme matière première de leur sculpture. Ils s'intéressent aux questions de transparence et de translucidité mais aussi sur la question de la forme, de la lumière et de la couleur comme nous pouvons le retrouver dans le travail de Stanislav Libenský et Jaroslava Brychtová²⁹. Sur la *Red Pyramid* (ci-dessous), nous voyons que la lumière se diffuse différemment au sein de ce bloc de *verre moulé*. En fonction de l'épaisseur de la pièce et de la taille spécifique de celle-ci, elle aborde un nuancier de couleur allant du jaune, au rouge en passant par l'orange. Des parties de celle-là nous apparaissent noires à cause de l'éclairage. De plus, l'aspect patiné du verre, voire rugueux et accidenté (en bas de la pyramide) donne un sentiment d'étrangeté à l'œuvre qui semble venir d'un film de science-fiction.

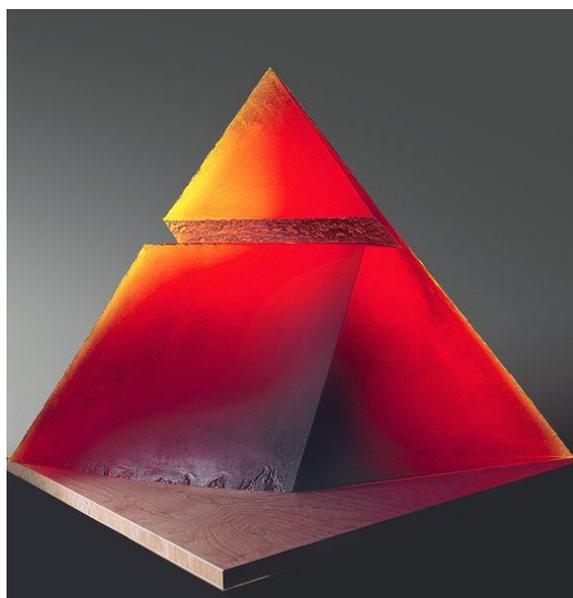


Figure 20 : *Red Pyramid*, sculpture en verre, Stanislav Libenský et Jaroslava Brychtová, 1993, Corning Museum of Glass, New York

²⁹ Stanislav Libenský (1921-2002) et Jaroslava Brychtová (1924-) sont un couple d'artistes Tchèques, respectivement peintre et sculptrice qui ont travaillé le verre.

Certains artistes utilisent toujours des techniques de travail du verre dont j'ai pu parler précédemment. Libenský et Brychtová, utilisent le verre moulé pour confectionner leurs œuvres. Cependant, d'autres artistes utilisent de nouveaux types de verre. C'est le cas de Niyoko Ikuta³⁰, qui a décidé de créer ses sculptures à partir de *verre laminé*³¹, un verre industriel très résistant. En superposant plusieurs couches de ce matériaux taillé, elle obtient des formes abstraites très aériennes. Là aussi, l'artiste s'interroge sur la transparence et la couleur du verre. Les parties où il y a peu de couches superposées sont très transparentes, et peuvent même paraître invisibles. Ce n'est qu'avec le chevauchement des couches que la couleur se dévoile. Sur la figure 21, cette superposition créé un tunnel qui semble n'être fait que d'une seule matière, comme si le verre avait fusionné à cet endroit.

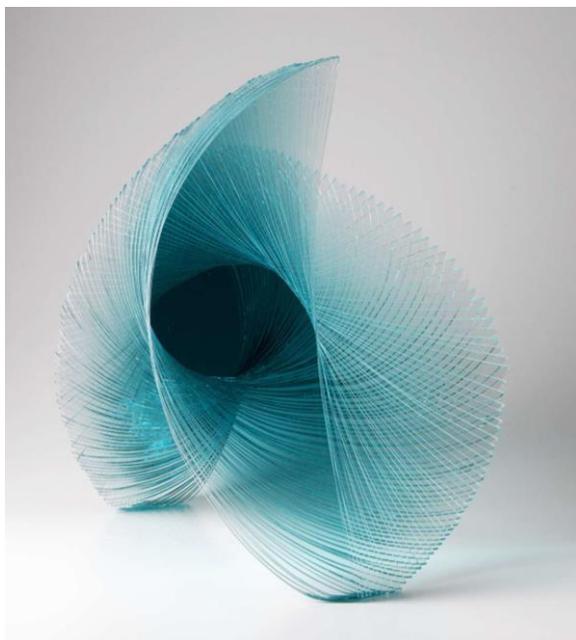


Figure 21 : Ku-32 (*Free Essence-32*), sculpture en couche de verre laminé, Niyoko Ikuta, 2013, <http://www.yufuku.net>



Figure 22 : Swing – 135, sculpture en couche de verre laminé, Niyoko Ikuta, 2015, <http://www.yufuku.net>

³⁰ Niyoko Ikuta (1953-) est une artiste japonaise travaillant principalement le verre.

³¹ Le verre laminé, est un verre sécuritaire utilisé notamment pour la fabrication de pare-brise.

Niyoko Ikuta n'est pas la seule à avoir utilisé du verre industriel. *AGC Asashi Glass* est une entreprise japonaise spécialisée dans la fabrication de verre architectural et de verre pour l'automobile qui a, à plusieurs reprises réalisé des installations en verre³². En 2016, lors de la *Milan Design Week*, ils ont exposé *Amorphous*, une œuvre composée de 5000 fins carreaux de verre. En fonction de la couleur de la lumière projetée, les carreaux incolores vont se teinter et cela va donner une ambiance particulière à chaque sensation lumineuse. Il existe plusieurs ambiances lumineuses comme vous pouvez le voir sur les images ci-dessous :

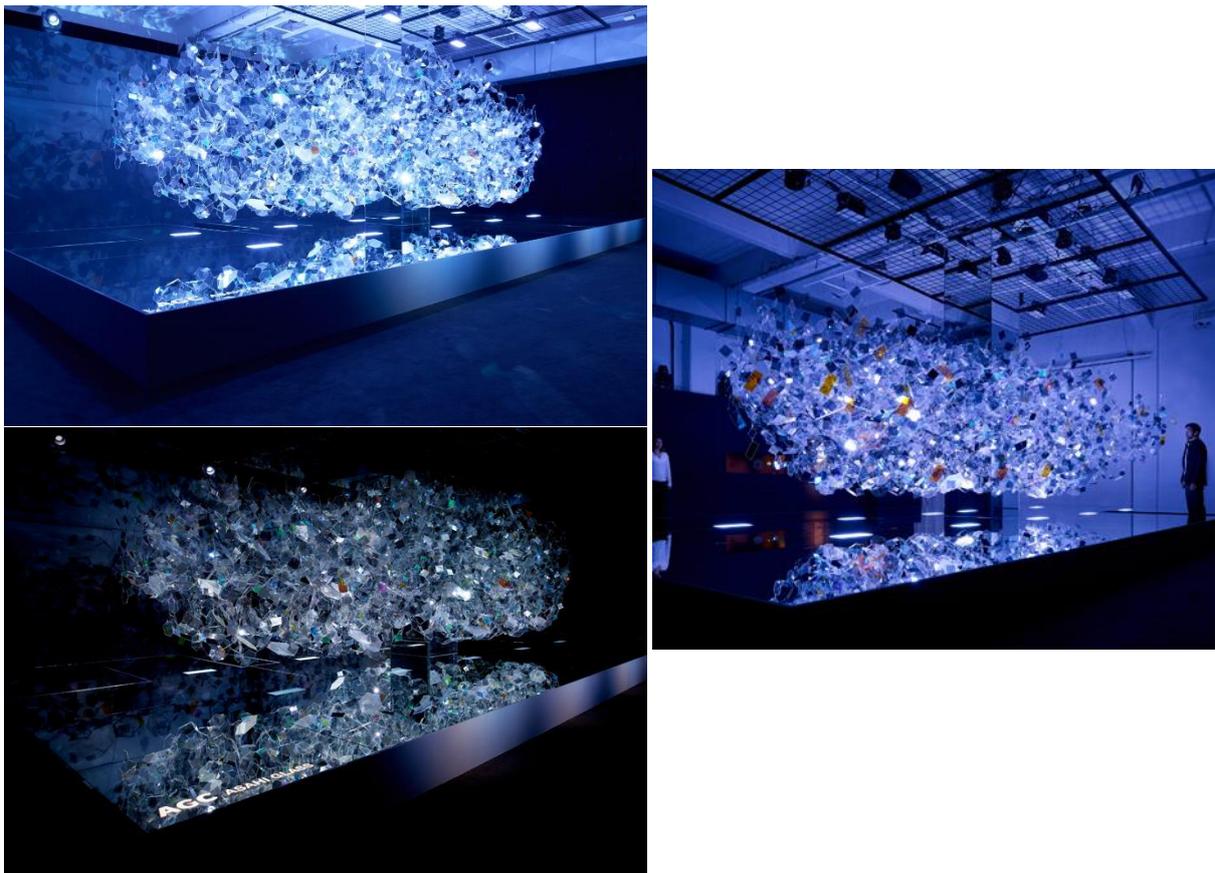


Figure 23 : *Amorphous*, installation en verre pour la Milan Design Week, AGC Asashi Glass, 2016, Superstudio Più, Milan.

³² « AGC Asahi Glass Holding “FEEL! GLASS” Exhibition to Celebrate Its 110th Anniversary | News | AGC », AGC, consulté le 18 mars 2018, http://www.agc.com/en/news/detail/1195957_2814.html.

Depuis quelques années les imprimantes 3D se démocratisent. Elles utilisent plus communément des matériaux comme des métaux ou des plastiques pour réaliser des objets. Mais en 2015, une équipe de chercheurs du MIT ³³, le *Mediated Matter Group* a créé une imprimante spécialement conçue pour réaliser, en 3D, des objets en verre. Ils ont « ouvert une nouvelle frontière à l'impression 3D : la capacité d'imprimer optiquement des objets en verre transparent »³⁴. Ce sont les premiers à avoir trouvé comment contourner l'obstacle majeur de la création de pièces en verre, à savoir comment atteindre des températures de chauffe extrêmement élevées afin d'obtenir du verre en fusion. Ils ont même trouvé deux méthodes : la première consiste à « faire fondre des billes de verre dans le four à creuset de l'imprimante en les chauffant à 1.165 °C »³⁵. Cependant c'est une méthode très longue. La seconde solution, plus rapide, consiste à « faire fondre le verre dans un four indépendant puis de le verser dans le creuset »³⁶. Dans les deux cas les objets imprimés sont constitués d'un seul filament de verre comme nous pouvons le voir sur l'image suivante :



Figure 24 : Photo d'une exposition du MIT Media Lab ,d'objets en verre réalisés avec l'imprimante 3D.

<http://news.mit.edu/2015/3-d-printing-transparent-glass-0914>

³³ *Massachusetts Institute of Technology* est une université américaine formant des ingénieurs, mais aussi un institut de recherche dans les sciences et la technologie.

³⁴ «A new frontier in 3D printing: the ability to print optically transparent glass objects » « Printing transparent glass in 3-D », MIT News, consulté le 24 avril 2018, <http://news.mit.edu/2015/3-d-printing-transparent-glass-0914>.

³⁵ Futura, « G3DP : de l'impression 3D avec du verre en fusion », Futura, consulté le 24 avril 2018, <https://www.futura-sciences.com/tech/actualites/imprimante-3d-g3dp-impression-3d-verre-fusion-59533/>.

³⁶ Ibid.

Cette évolution technologique est tout d'abord pensée pour améliorer ou remplacer des composants comme des processeurs d'ordinateur. Cependant, comme l'impression 3D commence à se démocratiser et qu'elle permet d'obtenir des formes plus complexes et très minutieuses, nous pouvons penser que des personnes s'empareront de ce médium à des fins artistiques et poursuivront dans la lancée des premières impressions 3D du MIT.

Nous avons donc pu voir à travers ce bref historique que le verre n'est pas que transparent. En effet, les premiers verres étaient opaques puis sont devenus translucides. Ce n'est qu'avec l'évolution des techniques et notamment des fours³⁷ que la fabrication de verres très transparents est devenue possible. C'est ensuite avec la maîtrise des maîtres verriers Vénitiens puis de Bohême que la recherche absolue de la transparence est apparue. Cependant, cette recherche est remise en question dès la fin du XIX^{ème} siècle où les artistes ont cherché de nouvelles méthodes de travail du verre.

Pour résumer, nous avons pu voir que le verre :

- n'est pas forcément transparent, il peut être translucide voire opaque ;
- peut être incolore ou coloré ;
- dans le cas où il est incolore, prend sa couleur de la lumière qu'il reçoit.

Les principales techniques de fabrications de verre sont :

- le verre soufflé ;
- le verre moulé à base de pâte de verre.

Les différentes techniques de décoration du verre sont :

- l'émail ;
- les filigranes (« a fili », « a retorti », « a reticello ») ;
- la marqueterie ;
- les décors intercallaires ;
- la gravure (à la roue, à la pointe de diamant ou encore à l'acide).

³⁷ Les premiers fours étaient à bois, ce qui obligeait les verreries à se situer aux abords de forêts. Avec l'apparition du charbon, les verreries ont pu se rapprocher des villes. Aujourd'hui une grande partie des fours sont au gaz ou à l'électricité.

1.3 Verre et Arts Numériques

Le verre en image de synthèse est présent dans beaucoup de vidéos ou jeux-vidéo mais aucun ne se concentre en particulier sur ce matériau hormis les publicités pour des parfums ou des boissons.

Cependant, après avoir analysé de nombreuses publicités de parfum, on se rend rapidement compte que le traitement du flacon est souvent identique. Dans une grande majorité des cas, le verre est transparent et il peut être incolore ou coloré. Dans le premier cas la couleur est souvent donnée par la couleur du parfum, comme nous pouvons le voir sur la figure 25.

La chose la plus intéressante pour un flacon de parfum est sa forme. Elle est en effet très importante afin d'obtenir un bel objet qui sera plaisant à regarder. La forme extérieure, comme intérieure, sont minutieusement travaillées pour avoir un objet élégant qui sera un véritable objet de luxe. Sur l'image ci-dessous, la forme intérieure est facettée pour ressembler à des pierres précieuses ce qui donne au liquide rose un aspect luxueux. Le bouchon du parfum ainsi que la partie du bas, quant à eux, mettent en valeur le tout en accrochant la lumière.



Figure 25 : Capture d'écran de La Vie est Belle l'Eclat, film commercial en images de synthèse, réalisé par Frédéric Colin – produit par l'agence ONIRIM pour Lancôme, 2017.

L'autre exemple cité est celui des publicités pour des boissons. Encore une fois, le verre n'y est pas souvent exploité à son maximum. Lors de mon stage et de mon alternance à KingSize FX³⁸, j'ai participé à la création de vidéos pour la marque de champagne *Nicolas Feuillatte* et peu de temps avant avait été réalisée une autre publicité pour une marque de brandy, *St-Rémy*. Comme vous pouvez le voir ci-dessous, sur la figure 26 et la figure 27, dans ces deux réalisations, le verre des bouteilles de chaque vidéo est très simple. En réalité, sur aucun des matériaux des bouteilles il n'y a de réfraction. C'est simplement un matériau réfléchissant qui a été utilisé. Encore une fois, c'est la forme du produit qui est mise en avant.



Figure 26 : Capture d'écran, film commercial en images de synthèse, réalisé par KingSize FX – agence Desdoigts et Associés pour Nicolas Feuillatte, 2018.



Figure 27 : Capture d'écran, film commercial en images de synthèse, réalisé par KingSize FX – agence Desdoigts et Associés pour St-Remy, 2018.

³⁸ KingSize FX est un studio d'animation 3D et de post-production parisien.

Comme nous avons pu le voir dans les deux exemples précédents, le verre est très simple et transparent dans une majorité des films commerciaux. On recherche davantage à avoir un produit avec une forme particulière pour le mettre en valeur. Les concepteurs de parfum choisissent le verre avant tout car il conserve très bien son contenu et avec son aspect le plus commun, c'est-à-dire brillant et transparent. Le produit paraîtra ainsi davantage luxueux.

En dehors de la publicité je n'ai pas trouvé d'autres films, jeux-vidéo ou installations interactives dont le verre est le sujet principal, alors qu'il existe pourtant de nombreux tutoriaux pour apprendre à créer du verre en 3D. On en trouve même pour chaque moteur de rendu que ce soit pour le pré-calculé ou pour le temps réel. Ces tutoriaux nous apprennent donc à faire un matériau de verre, classique, qui permet de créer des objets de la vie courante comme une bouteille de vin ou une vitre.

Cependant, comme la plupart des tutoriaux nous expliquent quels paramètres utiliser pour obtenir du verre, ils sont assez vite limités quand on veut concevoir des objets plus artistiques comme ce que l'on a pu voir précédemment (1.2 Bref historique du verre et de ses techniques p.14). Certes, cela pourra être suffisant pour reproduire certaines œuvres comme la coupe avec le pied de dragon (figure 12 p.19) mais cela s'avèrera plus compliqué, voire inutile, pour recréer des objets qui ne sont pas transparents mais translucides comme le *vase Buprestes* (figure 18, p.24) ou la *Red Pyramid* (figure 20 p.25). Cela est en parti dû à l'idée reçue, largement répandue, que le verre est forcément transparent, ce qui est très réducteur.

Toutefois, en dehors des tutoriaux il existe de nombreux articles et conférences parlant du verre ou plus généralement comment rendre du verre ou tout autre matériau en pré-calculé comme en temps réel. Mais ces articles sont beaucoup plus axés « scientifique » que « artistique ». Je peux citer les conférences de Morgan McGuire du SIGGRAPH 2016 « Peering Through a Glass, Darkly at the Future of Real-Time Transparency »³⁹ ainsi que celle de Naty Hoffman du SIGGRAPH 2015 « Introduction to « Physically Based Shading in theory and Practice » »⁴⁰ qui m'ont aidé à mieux comprendre la physique derrière les moteurs de rendu.

³⁹ graphics3d, *Peering Through a Glass, Darkly at the Future of Real-Time Transparency, SIGGRAPH 2016*, consulté le 18 février 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=rVh-tnsJv54>.

⁴⁰ ACM SIGGRAPH, *SIGGRAPH University - Introduction to « Physically Based Shading in Theory and Practice »*, consulté le 19 avril 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=j-A0mwsJRmk&t=6s>.

1.4 Peut-on alors classer le verre ?

Maintenant que nous avons vu plus en détail ce qu'était le verre, quelles étaient ses caractéristiques et comment on en obtient je vais donc essayer de répondre à la question posée au début de cette partie : comment classer le verre ?

Premièrement, j'ai essayé de classer le verre selon sa composition mais cela ne m'a pas paru pertinent. En effet, visuellement il y a peu de différenciations et en image de synthèse cela n'a pas beaucoup d'importance.

Deuxièmement j'ai tenté de classer le verre selon sa transparence. En effet, comme je tenais aussi à démontrer que la transparence n'était pas un élément primordial caractérisant le verre cela m'a paru sensé. J'aurai ainsi mis d'un côté les objets transparents, d'un autre côté les objets translucides et enfin les objets opaques. Cependant, pour toutes les raisons évoquées précédemment cela m'a paru encore une fois maladroit.

En troisième hypothèse, j'aurai pu classer les objets en fonction de leurs techniques de fabrication. Avec cette méthode de classement j'aurai mis d'un côté les objets créés par soufflage et d'un autre côté les objets en verre moulés à base de pâte de verre. Cela m'a paru comme étant un bon compromis pendant longtemps car la pâte de verre donne des objets plus souvent translucides que par soufflage. Cependant, il peut y avoir des objets translucides ou opaques en verre soufflé, du coup la frontière est très mince. De plus, visuellement il peut être très difficile de faire cette différenciation ou d'identifier quelle méthode a été utilisée pour fabriquer tel ou tel objet. C'est pourquoi j'en ai conclu que ce n'était pas une bonne méthode pour classer le verre.

La dernière méthode consiste à faire simplement une distinction entre les objets de tous les jours comme les verres à vin ou les fenêtres et les objets à caractère artistique. C'est ce que j'avais déjà fait inconsciemment dès mes premières recherches. En effet, je ne voulais pas chercher à reproduire un simple verre mais je voulais faire quelque chose de plus recherché, de plus artistique.

2. L'alchimie numérique en pré-calculé

2.1 Introduction au travail du verre en pré-calculé

Dans cette partie je vais donc m'intéresser au processus de création des objets en verre en pré-calculé. Pour chaque cas je vais donc me demander quel procédé utiliser et sur quels logiciels il serait intéressant de travailler.

Au tout début de mes recherches, je me suis d'abord interrogée sur quel moteur de rendu j'allais effectuer mes expérimentations. J'ai donc effectué une phase de tests sur plusieurs d'entre eux afin de voir lequel me permettait le plus de choses et lequel était le plus rapide. Mes premiers tests ont été réalisés sur *Redshift*⁴¹.

J'ai donc réalisé plusieurs *shaders*⁴² (matériaux) de verre, en changeant à chaque fois un paramètre, que j'ai appliqué à une sphère et un vase comme on peut le voir ci-dessous :

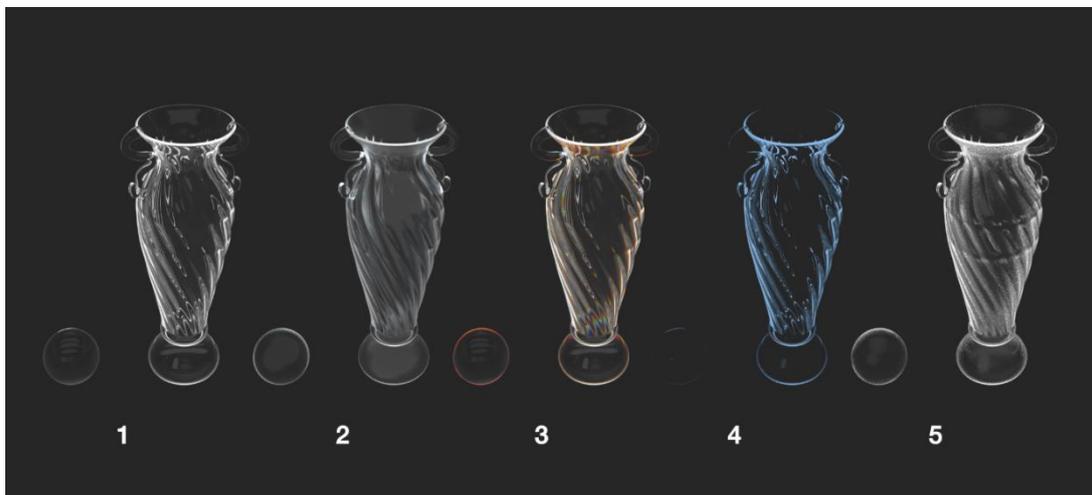


Figure 28 : Test de shaders en verre sur Redshift.

Tous les tests ci-dessus ont tous une *diffuse*⁴³ nulle (une valeur nulle équivaut à 0, cela correspond donc à du noir) et ont tous une réflexion et réfraction de 1 (la valeur 1 correspond au blanc). Le dernier paramètre commun est celui de l'indice de réfraction (ou *IOR*) qui est à

⁴¹ *Redshift* est un moteur de rendu GPU (qui utilise les cartes graphiques de l'ordinateur).

⁴² Nom (anglais) donné à un matériau que l'on applique sur un objet en 3D.

⁴³ La *Diffuse* (ou *Base Color*) est le nom du paramètre de la couleur de l'objet.

1,51. Cela correspond bien à l'indice de réfraction du verre. Les paramètres évoqués plus haut correspondent aux paramètres de base (dits *preset*⁴⁴), je suis partie de ce *preset* pour créer chaque test.

Voici les détails des matériaux de gauche à droite :

- Le premier test correspond aux paramètres de base du verre (*preset*) sur *Redshift*
- Pour le second test, j'ai augmenté la valeur de la *Roughness*⁴⁵ à 0,2 ce qui rend le verre moins transparent ;
- Pour le troisième test, j'ai augmenté le paramètre de dispersion⁴⁶. C'est ce qui donne cet aspect plus coloré. En bas du vase, nous pouvons même distinguer les couleurs du spectre lumineux ;
- Sur le quatrième test, j'ai voulu voir comment il était possible d'obtenir un verre coloré et j'ai donc mis une teinte bleue dans le paramètre de la réfraction ;
- Et enfin, dans le dernier test, j'ai ajouté un nœud de bruit (*noise* en anglais) dans le paramètre de *Bump*⁴⁷.

Les tests 1, 3 et 4 ont été relativement rapides à rendre (moins d'une minute). Cependant, plus on augmente le paramètre de *Roughness* et plus on ajoute du relief (*Bump map*⁴⁸, *Normal map* ou *Displacement map*⁴⁹) , plus le temps de calcul augmente et peut prendre jusqu'à 10 minutes pour ces tests.

Après avoir réalisé ces premiers essais, j'ai voulu voir comment on pouvait rendre des caustiques⁵⁰. Et il s'avère très facile de créer des caustiques avec *Redshift*. Il faut tout d'abord

⁴⁴ Un preset est le nom anglais que l'on donne à un ensemble de réglages prédéfinis.

⁴⁵ Plus un objet a de la « *roughness* » plus il paraîtra mat, moins il en aura, plus il paraîtra brillant.

⁴⁶ La dispersion de la lumière est le nom d'un phénomène physique que l'on peut notamment apercevoir quand la lumière traverse un prisme. On l'aperçoit car les rayons de couleurs qui composent la lumière blanche n'ont pas la même longueur d'onde et sont donc réfractés différemment.

⁴⁷ Le *bump* (nom anglais) permet de donner une impression de volume à un objet. Dans ce cas, grâce au nœud de bruit, cela donnera un effet granuleux à l'objet.

⁴⁸ Une map (terme anglais) désigne une image qui sert à réaliser un matériau.

⁴⁹ Voir l'annexe pour obtenir plus de détails sur le bump, la normal map et la displacement map.

⁵⁰ En optique, une caustique (caustic, en anglais) est le terme employé pour parler des rayons lumineux qui sont reflétés ou réfractés par une surface. Nous pouvons voir des caustiques au fond d'une piscine ou quand un objet en verre est posé sur une surface et est traversé par un rayon lumineux.

aller dans la *shape* de l'objet et cocher *Casts Caustic Photons*⁵¹. Puis, dans les lumières que l'on veut, il faut cocher *Emit Caustic Photons*. Il est déconseillé d'émettre des photons à partir d'un dôme de lumière car la surface qui va émettre ces photons est beaucoup trop grande. Enfin, il faut bien vérifier que dans l'onglet *Photon*, dans les paramètres de rendu, l'émission de caustique est bien activée. Une fois ces paramètres réglés, dans notre cas, nous obtenons l'image ci-dessous. Le rendu avec des caustiques est plus long que sans et dure un peu moins de dix minutes.

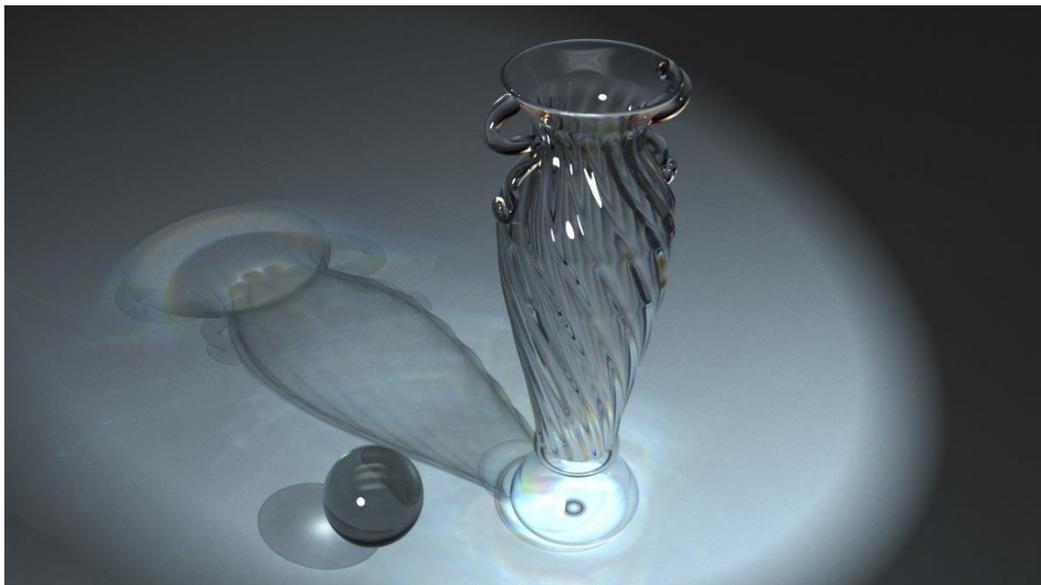


Figure 29 : Test de rendu avec des caustiques.

Mes seconds tests ont été effectués avec *Arnold*⁵². J'ai donc créé plusieurs matériaux en essayant d'obtenir un résultat similaire à mes tests réalisés avec *Redshift*. Cependant, je me suis vite rendue compte que le temps était beaucoup plus long. En effet, un matériau de verre très simple, appliqué sur les mêmes objets, prenait déjà dix minutes à rendre par rapport aux une ou deux minutes sur le moteur de rendu précédent. J'ai donc arrêté là mes rendus sur *Arnold* et j'ai naturellement décidé de choisir *Redshift* comme moteur de rendu pour mes tests à venir.

⁵¹ « Les photons sont des petits paquets d'énergie émis d'une source directe de lumière. » Pluralsight, « Understanding Caustics for a Higher Level of Realism in Your Renders », Pluralsight, 2 septembre 2015, <https://www.pluralsight.com/blog/film-games/understanding-caustics-higher-level-realism-renders>.

⁵² *Arnold* est un moteur de rendu CPU (qui utilise le processeur de l'ordinateur), développé par *Solid Angle* et maintenant automatiquement intégré à *Maya*.

2.2 Introduction au travail du verre sur *Redshift*

Après m'être fixée sur le choix du moteur de rendu, j'ai dû analyser plus en détails les possibilités que m'offrait *Redshift* et ses matériaux. Il est en effet important de savoir à quoi correspond chaque paramètre et sur quoi ils agissent. C'est dans cette optique que j'ai réalisé une série de tests. Dans une scène *Maya* j'ai disposé trois fois le même objet (ici, le *Stanford dragon*⁵³) sur lesquels j'ai appliqué un matériau de verre auquel j'ai changé un paramètre à chaque fois.

Mes premiers tests ont porté sur le paramètre d'*IOR*. Comme on peut le voir sur l'image ci-dessous, mon premier objet a un *IOR* de 1,5, ce qui est l'indice de réfraction du verre. Le deuxième objet a un *IOR* de 2, cela correspond plutôt à l'*IOR* du cristal. Le dernier objet a un *IOR* de 10, cette valeur est excessive et n'existe pas dans la réalité. Mais cela montre bien que plus on augmente l'indice de réfraction d'un objet en verre, plus les déformations à l'intérieur de l'objet sont fortes.

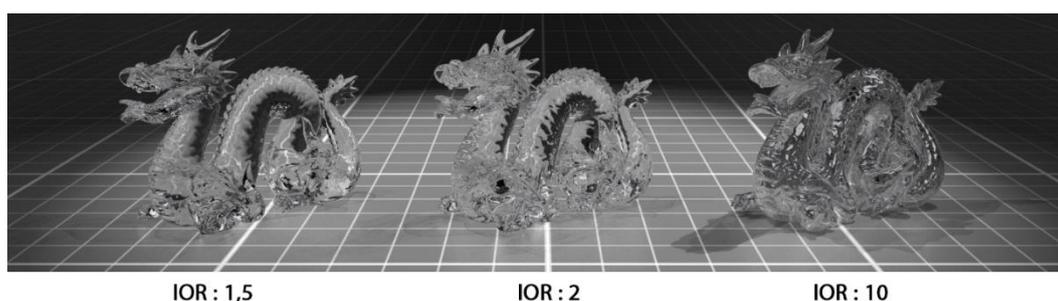


Figure 30 : Rendu test avec différents IOR.

Les tests suivants se sont concentrés sur la *Roughness* d'un objet. Comme nous pouvons le voir sur l'image ci-dessous, plus la valeur de la *Roughness* est grande, plus les reflets seront floutés et plus l'objet apparaîtra mat.

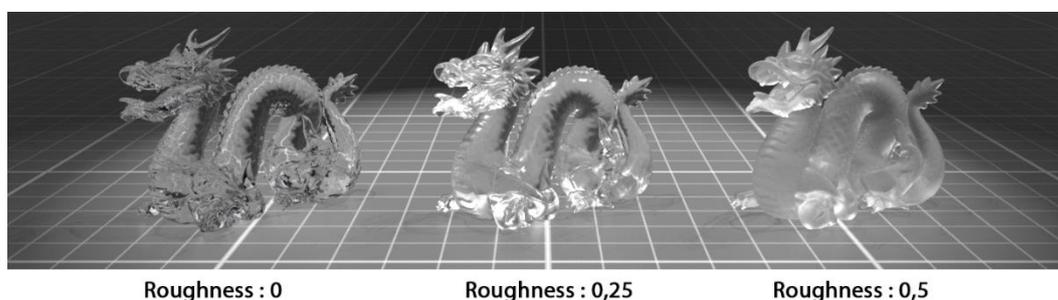


Figure 31 : Rendu test avec différentes valeurs de Roughness.

⁵³ Le *Stanford Dragon* est une modélisation 3D réalisée à partir d'un scan 3D créé par l'université de Stanford et disponible gratuitement sur le site de l'université.

Ensuite, je me suis demandée comment il est possible de donner une couleur au verre. Il s'avère qu'il y a deux manières de procéder sur *Redshift* : on peut soit teinter la couleur de la *réfraction*, soit teinter la couleur de la *transmittance*. Comme on peut le voir sur les images ci-dessous, il n'y a pas beaucoup de différence entre les deux méthodes, hormis sur le 2^{ème} dragon de chaque test. En effet, le 2^{ème} dragon de la figure 32 est plus uniformément bleu que le 2^{ème} dragon de la figure 33, sur lequel les zones bleues sont plus concentrées à l'intérieur de l'objet. La différence entre ces deux paramètres réside surtout dans le fait que la *Transmittance Color*, est un paramètre de *Subsurface Scattering* (ou *SSS*), c'est-à-dire qu'il ne réagira pas de la même façon en fonction de l'épaisseur de la modélisation. Ainsi, plus la couleur sera foncée, plus celle-ci absorbera la lumière.

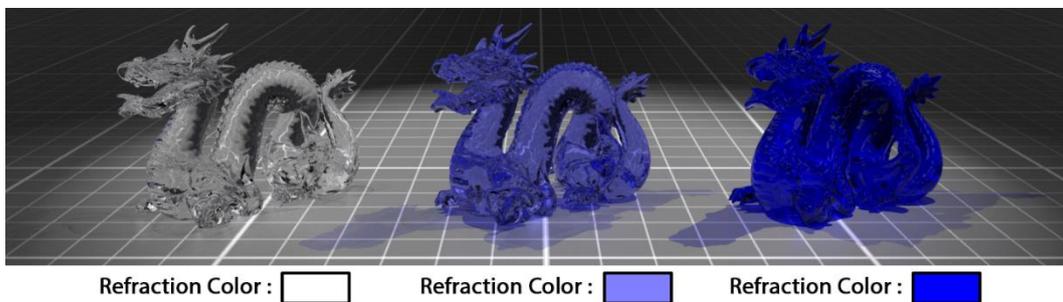


Figure 32 : Rendu test avec différents paramètres de Refraction Color.

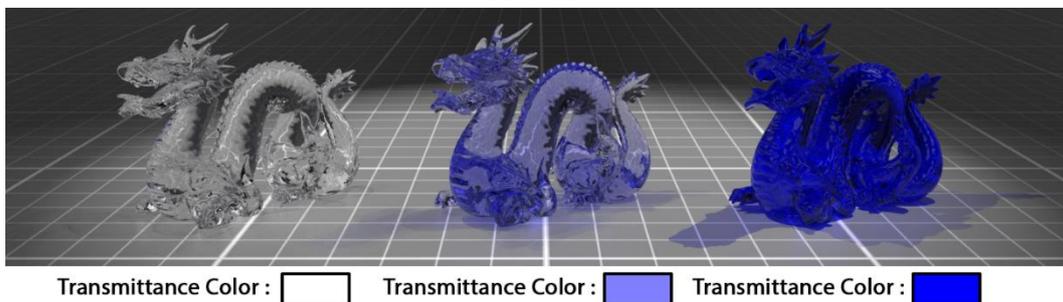


Figure 33 : Rendu test avec différents paramètres de Transmittance Color.

Voyant que la couleur de la réfraction et de la transmittance donne sensiblement le même résultat, j'ai voulu voir ce que cela donnerait si on les mélangeait. Ainsi, plus les deux couleurs sont foncées, plus le résultat sera sombre car les deux couleurs se multiplient.

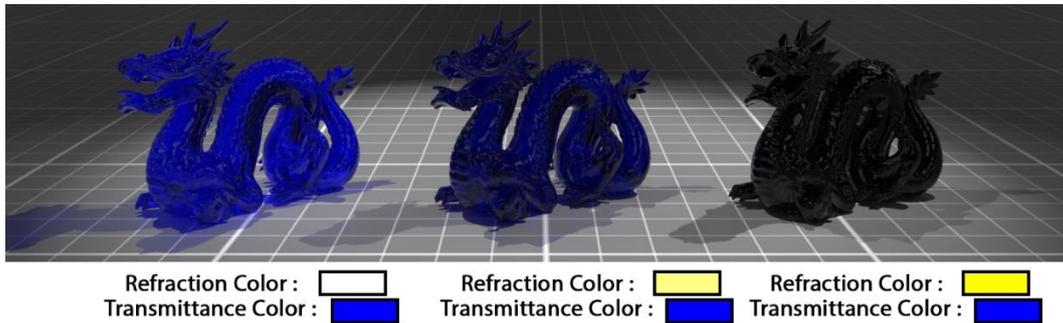


Figure 34 : Rendu test avec différentes valeurs de Transmittance Color et de Refraction Color.

Le paramètre de *Scatter Scale* est lui aussi un paramètre servant à régler le SSS. Quand il est à 0, il n'y a pas d'absorption de la lumière. Plus on en met, plus la lumière sera absorbée et l'objet paraîtra plus « dense ». Il faut faire très attention avec les paramètres de SSS car ils se règlent aussi en fonction de la taille de la scène et des objets.

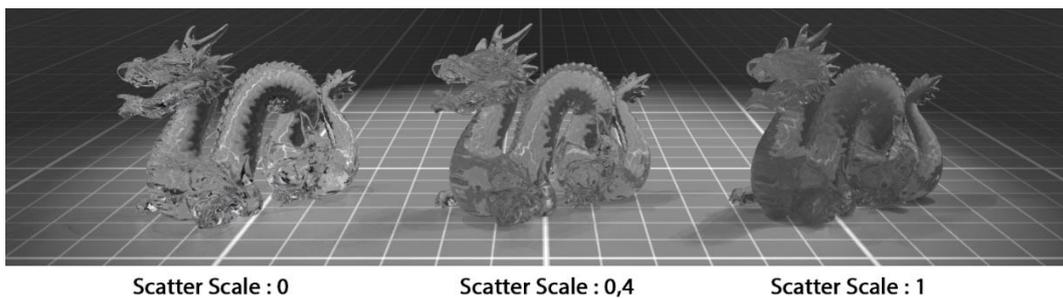


Figure 35 : Rendu test avec différentes valeurs de Scatter Scale.

J'ai ensuite mis une couleur dans la *Transmission* et décidé de tester différentes valeurs de *Scatter Scale*. Cela n'a fait que confirmer ce que l'on a pu voir précédemment. Plus le *Scatter Scale* est grand, plus l'objet paraît dense, et cet effet couplé avec la *Transmittance Color* rend l'objet beaucoup moins translucide.

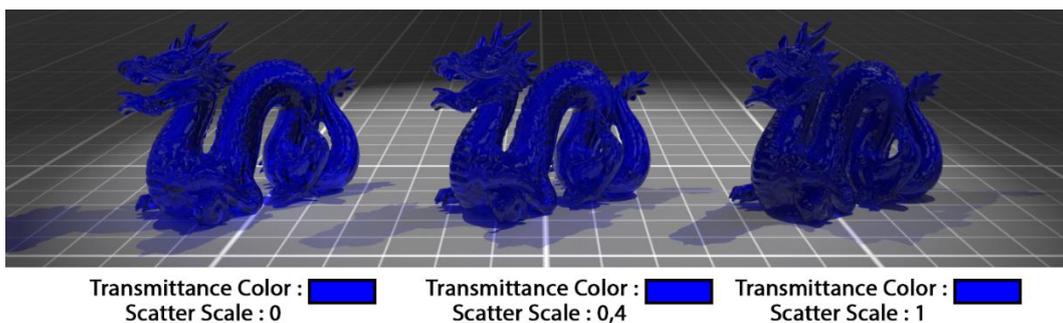


Figure 36 : Rendu test avec différents paramètres de Transmittance Color et de Scatter Scale.

Pour mes derniers tests préliminaires, je me suis intéressée à la relation entre la couleur d'un objet en verre et la couleur de la lumière. Dans un premier temps j'ai donc fait des tests avec un objet en verre de base (blanc) et des spots de lumières de couleur (blanc, orange et rouge). Puis, j'ai utilisé un objet en verre orange et ces mêmes spots de lumières. Comme nous pouvons le voir sur la figure 37, même si les objets n'ont pas de couleur, ils prennent tout de même la teinte de la lumière à cause de la réfraction. Sur la figure 38, nous pouvons aussi constater cet effet. Cependant, les dragons nous paraissent plus foncés. Nous pouvons aussi noter que les réflexions des objets sur le sol sont elles aussi colorées. Ce n'est cependant pas le cas pour le troisième dragon avec la lumière rouge (à droite). En effet, la lumière rouge prend le dessus sur la réflexion de l'objet au sol, et celle-ci disparaît.

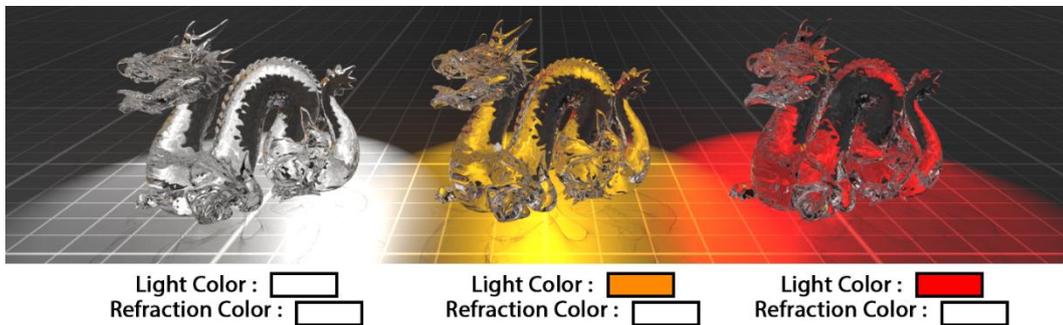


Figure 37 : Rendu test avec des lumières de couleur.

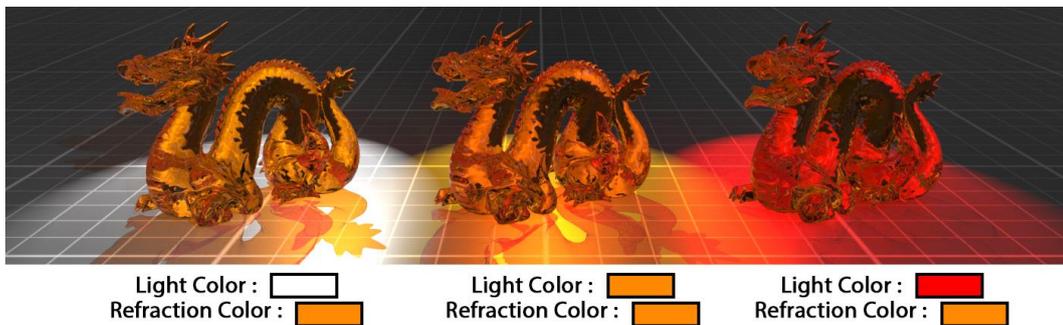


Figure 38 : Rendu test avec des objets de couleur orange et des lumières de couleur.

2.3 Vitrail n°1 : Gallifrey

J'ai choisi le vitrail comme première expérimentation. Cependant, je ne voulais pas recréer une scène religieuse comme c'est souvent le cas avec le vitrail. Au cours de mes recherches je suis tombée sur les vitraux de style Art Déco réalisés par l'atelier *Au Passeur de Lumière* (Paris). Ces vitraux (figure 39) me sont donc apparus comme très intéressants :

- le motif est assez simple car c'est un assemblage de formes géométriques ;
- sur certains il n'y a pas de couleur et, s'il y en a, elles sont peu nombreuses (rouge et jaune comme on peut le voir sur le vitrail ci-dessous à droite) ;
- la caractéristique principale de ses vitraux réside dans la déformation du verre. En effet, chaque carreau de verre est travaillé différemment et c'est cela qui habille le vitrail.

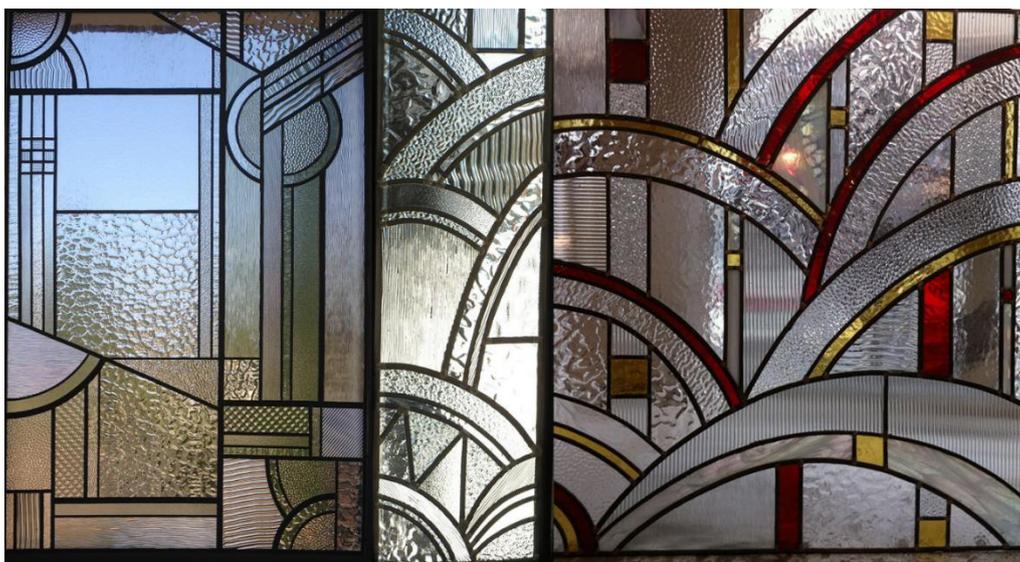


Figure 39 : Vitraux de style Art Déco réalisé par l'atelier Au Passeur de Lumière, Paris, années 2000-2010 .

Pour mon vitrail j'ai donc décidé de reproduire le symbole de Gallifrey de la série britannique *Doctor Who*. L'idée était de ne pas modéliser en 3D chaque carreau de verre. Cela aurait été fastidieux, chronophage et peu intéressant dans le cadre de mon mémoire. J'ai donc créé trois plans superposés sur *Maya*. Le premier a pour matériau les carreaux de verre, le second celui des bords du vitrail en plomb et le dernier est tout simplement celui du mur.

J'ai donc tout d'abord reproduit le motif des bords de mon vitrail sur *Adobe Illustrator* (figure 40, ci-dessous). Puis, j'ai séparé les carreaux de verre en plusieurs images qui me serviront de masques par la suite (figure 41 à figure 44). Sur *Substance Designer* j'ai créé les différents motifs que j'ai utilisé pour créer les *Normal Map* (figure 45). Enfin, à l'aide des masques précédemment créés, j'ai pu appliquer les images de relief réalisées sur *Substance Designer* afin d'exporter une seule *Normal Map* pour tous les carreaux de verre (figure 46).

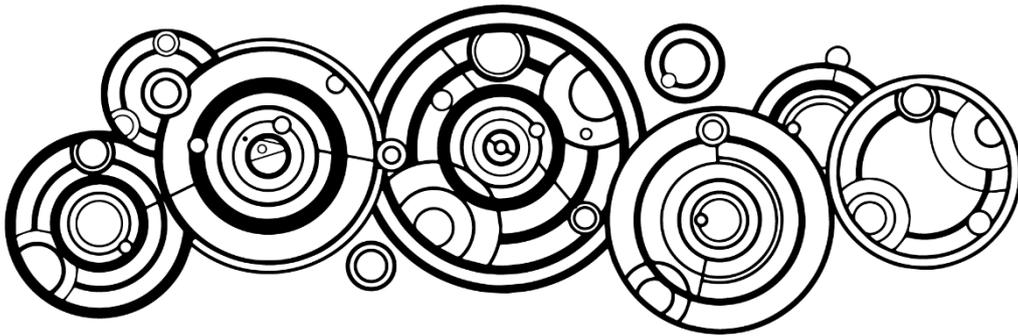


Figure 40 : Symbole de Gallifrey reproduite sur Adobe Illustrator.



Figure 41 : Masque 1



Figure 42 : Masque 2

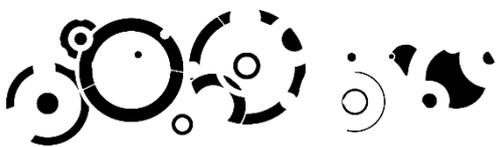


Figure 43 : Masque 3

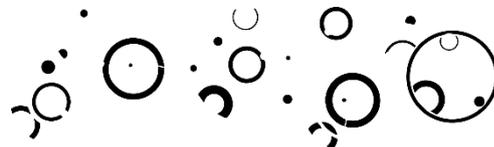


Figure 44 : Masque 4

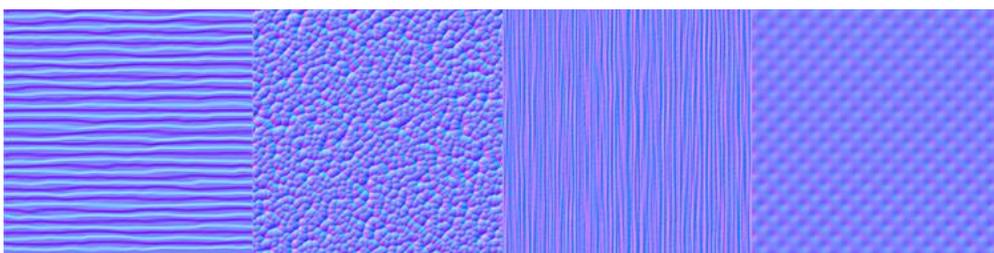


Figure 45 : Les Normal map des quatre motifs créés sur Substance Designer



Figure 46 : La Normal map des carreaux de verre avec les différents motifs.

Après avoir réalisé ces différentes images sur *Substance Designer*, ainsi que le matériau de plomb (dont je n'aborderai pas ici la fabrication), j'ai pu retourner sur *Maya* et créer deux *shaders*. Le premier matériel est donc celui du verre. Je suis partie du *preset* de verre de *Redshift* auquel j'ai ajouté mes images d'opacité, de *Normal Map* et de *Displacement Map*. J'ai par la suite créé les matériaux de plomb et celui du mur. En ce qui concerne l'éclairage j'ai réalisé un éclairage en trois points comme on utilise souvent au cinéma afin de mettre en valeur l'objet. J'ai toutefois rajouté une image d'environnement (via les paramètres de rendu). En effet, il est important d'avoir un environnement quand on rend des objets en verre.

Comme nous avons pu le voir précédemment (1.1.3 Propriétés physiques du verre p.11), les rayons lumineux vont traverser l'objet en verre et vont être réfractés. Or, sans environnement, sans image de fond, nous ne verrions que très mal, voire pas du tout, notre objet car rien ne sera réfléchi ou réfracté. Ensuite, autour de nous, tous les objets sont éclairés par une ou plusieurs sources lumineuses mais aussi par les rebonds de ces derniers dans l'environnement qui les entoure. C'est ce qu'on appelle l'*Illumination Globale*⁵⁴. C'est donc à cause de ces phénomènes optiques qu'il est nécessaire de mettre une image d'environnement dans *Redshift*, afin d'obtenir de belles réflexions et réfractions.

Pour en revenir à la scène *Maya*, je me suis rendue compte qu'il y avait un problème d'opacité quand on rendait la scène. Ce problème est dû à la superposition des plans. Pour régler ce problème il a simplement fallu créer un nœud de *RedshiftSprite* pour chaque matériau et d'y connecter les *shaders* précédemment réalisés. En effet, ce nœud permet de calculer plus efficacement l'opacité et d'éviter ce genre de problème quand il y a plusieurs objets avec de l'opacité superposés. Une fois ce problème réglé j'ai pu enfin rendre mon premier vitrail :



Figure 47 : Rendu final du vitrail sur Maya avec Redshift.

⁵⁴ *Illumination Globale*, ou *Global Illumination (GI)* en anglais.

2.4 Vitrail n°2 : Rosace

En m'inspirant du travail de Vincent Dérozier⁵⁵ et de la façon dont il a décomposé son travail sur ses vitraux *Zelda*, je me suis demandée à mon tour comment j'aurais pu réaliser d'autres vitraux plus complexes en 3D. Ainsi, ne voulant toujours pas reproduire un vitrail au sujet religieux, j'ai décidé d'essayer de reproduire le vitrail suivant aux motifs floraux :

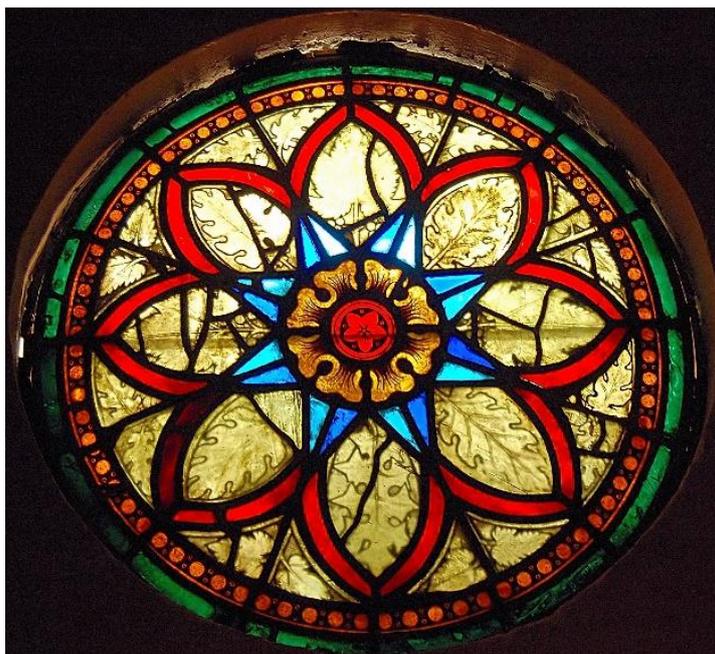
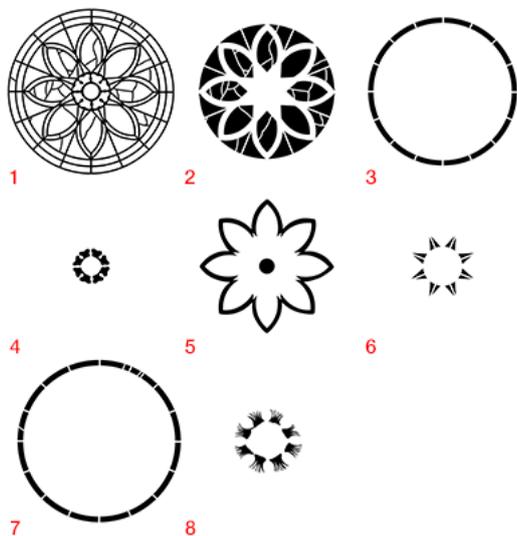


Figure 48 : Rosace gothique, vitrail, Strasbourg, XIV^{ème} siècle, Musée De L'Oeuvre Notre Dame de Strasbourg.

Comme nous pouvons le voir sur l'image ci-dessus, ce vitrail comporte de nombreux détails que je n'avais pas traités précédemment. En effet, il possède plusieurs couleurs. Nous distinguons aussi plusieurs motifs peints à la grisaille (sur le verre orange, orangé et le verre rouge au centre). Nous pouvons voir qu'il y a plusieurs motifs de feuilles qui sont soit en relief, soit peints à la grisaille ou alors un mélange des deux. Enfin, nous pouvons voir la présence de poussière qui assombrit le vitrail.

⁵⁵ Vincent Dérozier est un artiste français, travaillant en temps *qu'Environnement Artist* à *Ubisoft Annecy* puis *Ubisoft Québec*. Il a expliqué son processus de création de ses vitraux *Zelda* (projet personnel). 80.lv, « Creating Stained Glass Material in Substance », consulté le 14 novembre 2017, <https://80.lv/articles/creating-stained-glass-material-in-substance-designer/>.

Selon le même principe que pour le vitrail n°1, j'ai dessiné le vitrail sur *Adobe Illustrator* et j'en ai exporté différentes images afin de m'en servir comme des masques. Sur la figure 49, ci-dessous, nous pouvons donc voir les différents masques :



- Le masque n°1 correspond aux bords en plomb du vitrail.
- Le masque n°2 correspond au verre jaunâtre sur la figure 48.
- Le masque n°3 correspond au verre orange.
- Le masque n°4 correspond au verre orange foncé.
- Le masque n°5 correspond au verre rouge.
- Le masque n°6 correspond au verre bleu.
- Le masque n°7 correspond au verre vert.
- L'image n°8 correspond à la peinture à la grisaille que l'on retrouve sur le verre orangé.

Figure 49 : Toutes les images exportées d'illustrator ou de Substance Designer.

Dans un premier temps, sur *Substance Designer*, j'ai cherché à retrouver l'esprit général du vitrail, sans m'occuper pour l'instant des feuilles en relief. J'ai donc d'abord fabriqué l'image de couleur du verre à l'aide des différents masques, puis j'ai fini le masque correspondant à la grisaille. J'ai aussi créé une *Normal Map* pour créer des imperfections au verre et pour éviter d'avoir un verre entièrement lisse. Enfin, j'en ai profité pour créer une *map* pour la *Roughness* afin d'accentuer les imperfections du verre et pour lui donner une impression de polissage, j'ai appliqué un bruit général à l'image. J'ai donc exporté les *maps* suivantes :

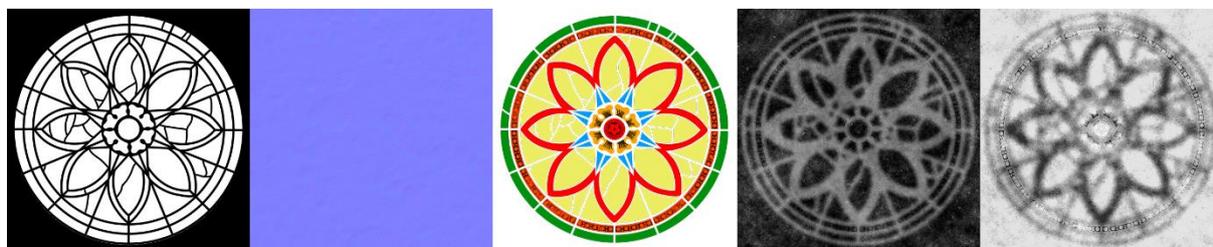


Figure 50 : Images exportées de Substance Designer, de gauche à droite : l'image d'opacité, la Normal Map, la map de couleur, la map de Roughness et l'image de réflexion (specular)

Sur *Maya* j'ai cette fois réalisé trois cercles superposés, toujours dans l'optique d'éviter de modéliser chaque carreau de verre et le plomb. Comme j'ai utilisé le même principe que sur le cas n°1. J'ai là aussi utilisé des *RedshiftSprite* pour éviter les problèmes de superposition et d'alpha. J'ai ainsi créé trois matériaux différents : un premier pour le mur, un deuxième pour le plomb et un dernier pour les carreaux de verre. Pour celui-ci, j'ai donc procédé de la même façon que dans le cas précédent, et j'ai utilisé les images sorties de *Substance Designer*.

Contrairement à Vincent Dérozier qui a fait en sorte d'avoir un verre opaque⁵⁶. J'ai tout d'abord voulu essayer de créer un matériau de verre classique (transparent et avec de la réfraction). J'ai donc obtenu le résultat suivant :



Figure 51 : Premier rendu de la rosace avec Redshift.

Ce rendu est donc une bonne base pour ce vitrail. Les couleurs sont assez similaires, bien que l'on pourrait rajouter des nuances dans certaines couleurs. En effet, sur la figure 48, nous pouvons voir plusieurs camaïeux de bleu et de vert. Il y a de belles réflexions et l'utilisation de la *Normal Map* et de la *Roughness* sur le verre donne beaucoup de détail comme on peut le voir par exemple sur le verre jaunâtre. Enfin, la grisaille s'intègre très bien

⁵⁶ « Je n'avais pas besoin d'un matériau de verre complexe avec de l'Alpha. Au contraire, je ne veux pas que l'on puisse voir à travers, donc je l'ai travaillé comme une surface opaque » traduction, extrait de l'article « Creating Stained Glass Material in Substance » de Vincent Dérozier du 10 Août 2017.

et le fait qu'il soit estompé par endroit, comme s'il avait été altéré par le temps, donne du réalisme.

Je me suis arrêtée à cette étape mais, pour aller plus loin, j'aurais pu réaliser les motifs de feuilles sur *Substance Painter*, en peignant directement sur l'objet afin de créer une image de *Normal* ou de *Displacement*. Après avoir réalisé ces feuilles en relief, j'aurais exporté aussi une image de *Roughness* pour simuler l'ajout de poussière à la base des feuilles. J'aurais enfin mixé ces images avec celles existantes pour les rajouter sur *Maya*.

2.5 Vase d'inspiration Art Nouveau et Art Décoratif

Comme je l'ai évoqué dans la première partie, tous les objets en verre ne sont pas forcément transparents. En m'inspirant des créations de Lalique⁵⁷ et Daum, pour ne citer qu'eux, j'ai décidé de reproduire une œuvre plus translucide que transparente.

Pour la réalisation de cet objet je suis partie d'une modélisation de vase créée par David Mussaffi⁵⁸. Après avoir déplié les UVs⁵⁹ de l'objet, j'ai peint sur *Adobe Photoshop* un dégradé en noir et blanc dans l'idée d'avoir un objet peu transparent excepté au niveau de l'échancrure.

A part ce dégradé que j'ai réalisé sur *Adobe Photoshop*, tout le reste de la création du matériau a été effectué sur *Maya*. En repartant du *preset* de verre de *Redshift*, j'ai dans un premier temps coloré la *Transmission* à l'aide de mon image de dégradé (figure 52, première image). Puis j'ai utilisé celle-ci dans la *Roughness* (figure 52, deuxième image). Afin d'avoir un rendu plus translucide, j'ai aussi changé le *Scatter Scale*⁶⁰ (figure 52, troisième image). Augmenter ce paramètre fait que les rayons lumineux qui traversent l'objet vont au fur et à mesure le foncer, lui donner un aspect plus trouble. A cette étape on obtient un objet assez mat et déjà satisfaisant.

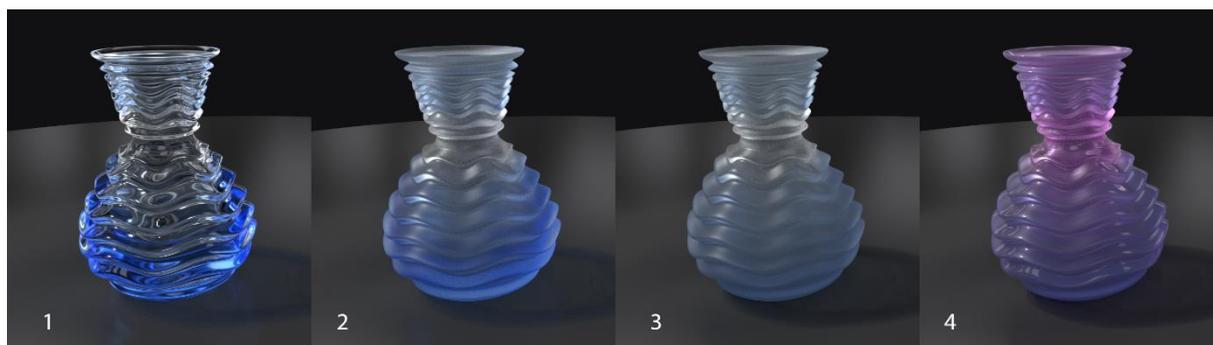


Figure 52 : Etapes de réalisation du vase.

⁵⁷ René Lalique (1860-1945) est un bijoutier-joaillier et maître verrier français.

⁵⁸ David Mussaffi est un graphiste 3D qui met à disposition des modélisations libres de droit sur le site <https://www.cgtrader.com/davidmus>.

⁵⁹ Le dépliage d'UV, consiste à déplier le modèle 3D à plat, à en faire un patron pour pouvoir plus facilement appliqué des textures.

⁶⁰ Voir annexe pour en savoir plus.

Par curiosité, j'ai rajouté du *Coating*⁶¹. J'ai trouvé que l'ajout de cette couche de vernis rose (figure 52, dernière image) était très intéressante. Pour aller plus loin, j'ai donc décidé de rajouter de l'iridescence⁶², ce qui fait qu'en fonction de l'angle de vue, l'objet paraît plus bleu, rose ou vert (figure 53).



Figure 53 : Rendu final du vase.

Comme on peut vaguement le distinguer sur les images précédentes, il y a du grain présent sur l'objet. Cela est dû au fait que plus on rajoute de la *Roughness*, plus le temps de rendu augmente. Je n'ai pas réussi à faire disparaître ce grain malgré plusieurs tentatives infructueuses. En effet, j'ai dû beaucoup augmenter les *samples* des paramètres de rendu, parfois avec des valeurs poussées à l'extrême, mais cela n'a pas donné de résultats satisfaisants.

⁶¹ *Coating* (terme anglais) signifie couche. En 3D, il permet de simuler comme une couche de vernis sur l'objet.

⁶² L'iridescence (ou goniochromisme) est « la propriété de certaines surfaces qui semblent changer de couleur selon l'angle de vue ou d'illumination » « Iridescence », *Wikipédia*, 10 mai 2017, <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Iridescence&oldid=137218934>.

Le fait d'avoir donné un effet irisé à mon objet est pertinent, car il existe une technique décorative du verre qui s'appelle le *fuming*⁶³, elle consiste à vaporiser des particules de métal sur le verre avant d'être de nouveau chauffé pour fixer les particules. Cette technique sert notamment à donner un effet iridescent au verre. Elle a par ailleurs été utilisée par Louis Comfort Tiffany⁶⁴ dans beaucoup de ses œuvres. Nous pouvons notamment voir cet effet irisé, avec ses couleurs bleu, vert et violet en haut du vase ci-dessous :



Figure 54 : Vase, Favrite Glass, New York, Louis Comfort Tiffany, XX^{ème} siècle, Metropolitan Museum of Art, New York.

⁶³ Le nom français qui désignerait cette technique serait : dépôt électrolytique. Cependant, beaucoup d'artistes français utilisent le terme anglo-saxon.

⁶⁴ Louis Comfort Tiffany (1848-1933) est un célèbre artiste américain connu pour ses œuvres en verre.

2.6 « Vetro a Reticello »

Pour réaliser un objet en verre filigrané en 3D j'avais donc plusieurs possibilités. En me basant sur le procédé que j'ai décrit dans la première partie de mon mémoire (1.2.4, page 19), j'aurais donc pu modéliser des tubes et les torsader. Certes, j'aurais essayé de reproduire la même méthode de création mais elle ne m'est pas apparue comme la plus adaptée ni la plus simple. J'ai donc décidé de réaliser mon objet en deux parties : la couche extérieure du verre et la couche intérieure du verre. Cette manière de procéder peut aussi s'apparenter au processus de création réel d'un objet en filigrane. En effet, un objet réalisé en verre soufflé est composé de plusieurs couches de verre. Ainsi, la couche intérieure de l'objet correspondra au filigrane en verre blanc opaque et la couche extérieure correspondra au verre transparent.

En ce qui concerne la forme de l'objet même, j'ai décidé de modéliser une coupe après avoir longtemps hésité et testé d'autres formes plus complexes. Cette coupe est donc composée de deux objets comme précisé précédemment : la couche intérieure et l'enveloppe extérieure. Le matériau de la couche extérieure fut très simple à réaliser. J'ai simplement appliqué un matériau de verre basique, sur lequel j'ai coloré les bords de la coupe.

Le matériau de la couche intérieure fut un peu plus compliqué. J'ai tout d'abord déplié les UVs de l'objet pour obtenir un patron afin d'appliquer une texture sans avoir la moindre couture. Ce dépliage a été réalisé très rapidement grâce à la forme simple de la coupe. Avec un objet plus complexe, cela aurait pris plus de temps et la création de la texture aurait été plus difficile. Cependant, j'ai donc pu créer sans soucis ma texture de filigrane « *a reticello* » sur *Adobe Illustrator*. J'ai réalisé mon motif à partir de quelques arcs de cercle et losanges qui ont été dupliqués pour former une rosace. Cette texture m'a servi pour deux choses. Premièrement je l'ai utilisée en tant que *Map* d'opacité et ensuite elle m'a permis d'obtenir du volume grâce au *Displacement*.

Contrairement au premier matériau, je n'ai pas souhaité utiliser un *preset* de verre pour avoir un motif très net. Je suis donc partie d'un *rsMaterial* auquel j'ai donné une couleur blanche et sur lequel j'ai réduit la réflexion. En effet je ne voulais pas qu'il y ait de réflexion sur cet objet car, bien que cela soit une des couches de verre de l'objet, elles sont fusionnées entre elles, et donc il n'y a que l'enveloppe extérieure qui doit avoir des reflets.



Figure 55 : Rendu final de la coupe "a reticello".

2.7 Pour aller plus loin

Au cours de mes expérimentations sur *Maya / Redshift* j'ai donc pu m'intéresser à la façon de reproduire certains objets comme des vitraux ou des objets d'Art Décoratif. J'ai choisi de travailler à la manière de l'artiste pour concevoir l'objet pour ensuite essayer de trouver la meilleure manière de réaliser cet objet en 3D.

En réalisant ces derniers j'ai donc pu travailler, entre autre, la couleur du verre, sa transparence ou encore son volume. Je me suis principalement intéressée à l'aspect esthétique des objets que j'ai créés sans trop regarder le temps de rendu. L'idée étant d'expérimenter autour du verre, de voir ce qu'il est possible ou non de faire. Hélas, certains de ces objets ne pourraient sans doute pas être intégrés à une production. Je pense par exemple à mon vase d'inspiration Art Nouveau / Art Décoratif. En effet, plus un objet en verre a une *Roughness* élevée, plus il y aura du grain dans l'image. Par conséquent, le temps de calcul sera plus long.

Pour avoir des scènes plus légères à rendre, j'aurais pu également regarder de quelle manière il aurait été possible de simuler des caustiques. Je n'ai pas hésité à calculer des caustiques pour mes tests à cause de la rapidité de *Redshift*. Cependant, afin d'optimiser mon temps de rendu j'aurai pu essayer de les simuler. Il en effet courant d'utiliser des textures dans des lumières (tel que des gobos qui sont des sortes de pochoirs que l'on place devant la lumière pour obtenir un motif) pour ne pas avoir à calculer les caustiques d'eau par exemple. Selon ce principe, j'aurai pu essayer de trouver une texture spéciale pour simuler les caustiques de mes objets en verre. Cependant, cela s'avère difficile et donnerait sans doute un résultat peu réaliste étant donné que chaque objet a une forme particulière.

Ensuite, je n'ai pas abordé certaines techniques de création et de décoration du verre. Une des techniques que j'aurais aimé aborder est le travail des décors intercalaires. La création de décors intercalaires s'obtient de la même façon que celle du verre filigrané. En effet, les deux sont faits en verre soufflé. Les deux s'obtiennent aussi par trempage successif dans du verre en fusion. Pour obtenir des décors intercalaires, comme des taches de couleurs, il suffit de rajouter à la paraison des morceaux de verre coloré que l'on a recueilli dans une autre cuve avant de replonger le tout dans du verre incolore. En 3D, il aurait fallu modéliser

ces différentes taches de couleurs à l'intérieur de la masse. On aurait donc un objet avec un matériau de verre basique et à l'intérieur plusieurs objets avec plusieurs matériaux de verre plus ou moins transparents et colorés. Avec cette technique il est aussi possible d'obtenir des bulles d'air.

La deuxième technique décorative que j'aurais souhaité aborder est le travail de l'émail. En m'inspirant d'émaux existants, j'aurais pu ajouter des émaux à la surface de l'objet, en appliquant une texture réalisée sur *Photoshop* ou *Substance Painter*. Cette idée s'approche du travail de la grisaille abordé plus tôt (1.2.3 Le Moyen-Âge p.17).

La troisième technique qu'il aurait été intéressant d'aborder est celle du *millefiori*. Un décor *millefiori* est obtenu de la même façon que sont conçus les tubes de verre qui servent à créer les décors en filigranes. Le maître verrier, trempe sa canne à souffler dans plusieurs cuves de verre coloré en fusion avant d'étirer la paraison. Une fois refroidie, l'artisan vient ensuite découper de fines tranches qu'il va assembler avant de les chauffer de nouveau pour ne former plus qu'un seul objet. Cela me paraissait compliqué et complexe et je n'ai pas trouvé la meilleure méthode pour le reproduire de manière réaliste en 3D. Une texture aurait-elle suffi ou aurait-il fallu modéliser tous les tubes de couleur ?

La dernière technique que j'aurais souhaité réaliser est la gravure sur verre. Il existe plusieurs types de gravure sur verre : à l'acide, à la roue, à la pointe de diamant. Une de mes expérimentations pourrait s'apparenter à de la gravure à l'acide : le vase d'inspiration Art Nouveau / Art Décoratif. En effet, pendant cette période, il n'était pas rare de créer des pièces avec cette technique, cela donnait à l'objet en verre un aspect plus trouble, et moins transparent. La gravure à la roue ou à la pointe de diamant, quant à elles, permettaient de dessiner des scènes très détaillées. Pour réaliser en 3D cette technique j'aurais simulé la matière creusée à l'aide d'une *Displacement Map* (ou d'une *Normal Map* ou encore d'une *Bump Map*). J'aurais aussi dû utiliser une texture dans le paramètre de *Roughness* pour que le verre soit moins transparent dans les zones gravées.

3. L'alchimie numérique en temps réel

3.1 Présentation du projet intensif

Pour le projet intensif de trois semaines réalisé en janvier 2018, nous avons décidé de créer une installation interactive en réalité virtuelle combinant nos trois sujets de recherche ; le patrimoine à l'ère du numérique, la réalisation d'effets spéciaux oniriques et la reproduction du verre en 3D. Nous avons donc pensé *Résilience* comme une exposition virtuelle d'œuvres en verre à première vue « classique ».

En effet, quand le spectateur met le casque de réalité virtuelle il se retrouve dans ce qui semble être un musée ou une galerie d'art : autour de lui se dressent quatre socles sur chacun desquels repose un objet. Ces créations sont dans l'ombre et ce n'est que quand le spectateur se rapproche qu'elles s'éclairent et s'animent : elles nous livrent leurs histoires. Cependant, cette explication ne nous est pas livrée par un cartel⁶⁵, comme fréquemment dans un musée, mais par une animation. Ce musée évoluera et s'augmentera donc au fur et à mesure que les objets nous raconteront leurs histoires.

Via ces animations et ces effets spéciaux, nous avons voulu faire appel aux ressentis du spectateur et les confronter aux nôtres. C'est pourquoi nous avons choisi de donner un nom à l'artiste à l'origine de ces œuvres : *Fanny Echolambel*. Nous avons choisi ce nom pour plusieurs raisons. La première est que c'est l'anagramme de nos trois prénoms (Fabienne, Maëlys et Chloé) et ensuite il parce qu'il contient le mot « écho » qui évoque la trace laissée par un souvenir au-delà du simple phénomène physique. Ainsi, ce pseudonyme se prêtait parfaitement à cet exercice puisque ces œuvres ont été imaginées et pensées par chacune d'entre nous. Elles sont donc forcément subjectives et sont des échos de nos histoires respectives.

C'est aussi pourquoi le choix du mot *Résilience* comme nom de notre exposition n'est pas anodin puisqu'il évoque le fait de surmonter un obstacle, un traumatisme. Ainsi les objets

⁶⁵ Un cartel est un texte se situant près d'une œuvre et apportant diverses informations comme l'auteur, la date ou encore une explication du contexte.

que nous présentons et dont nous sommes à la fois les commissaires d'exposition et artistes fictives sont porteurs de nos histoires vécues.

Ce projet intensif fut donc l'occasion d'aborder le verre en temps réel étant donné que je me suis occupée de la réalisation des différents objets exposés. Ce fût, il faut le dire, un défi. En effet, je ne m'étais pas aventurée plus que ça dans la création de matériaux sur *Unreal Engine 4* auparavant. Et encore moins dans la réalisation d'objets en verre. Bien entendu, j'avais réalisé quelques tests en amont des intensifs pour me familiariser avec le moteur de rendu, mais la majeure partie des expérimentations autour du verre fût réalisée pendant la création de ce projet.

3.2 Présentation des quatre tableaux

Notre exposition s'articule donc autour de quatre objets auxquels nous avons donné les noms suivants : *L'enfance*, *L'amour*, *La peur* et *La folie créatrice*.

3.2.1 L'enfance

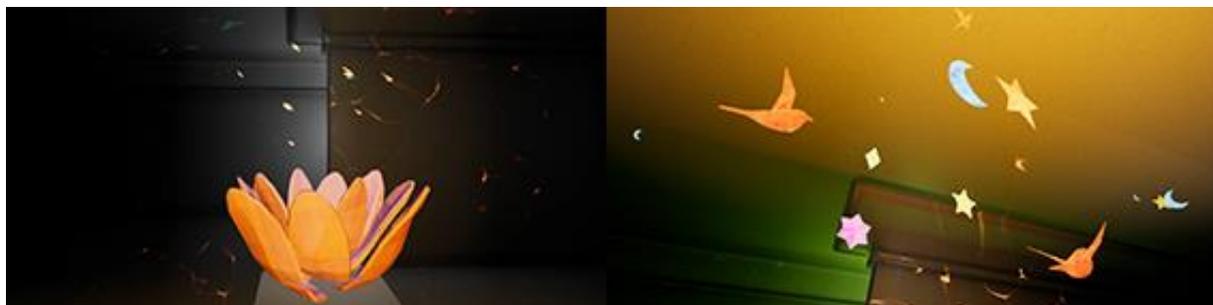


Figure 56 : Captures d'écran du tableau de *L'enfance* de Résilience.

Le premier objet est celui que nous avons associé à l'enfance, à la naissance, à l'innocence. C'est pourquoi, nous avons choisi de faire une fleur qui éclot et de laquelle s'échappent des particules qui vont venir former plusieurs objets (étoiles, lune, oiseaux, ...) et qui vont par la suite tourner tel un mobile dans une chambre d'enfant. J'ai aussi voulu apparenter cet objet à l'un des moyens de création du verre évoqué plus haut : le soufflage du verre.

Pour chaque objet qui compose le mobile j'ai donc réalisé quatre *Blend Shape*⁶⁶ pour avoir un meilleur contrôle sur la formation des objets. Ceux-ci ont été déclinés selon ce principe : au début ils sont sous la forme d'une petite bille qui grossit et gonfle avant de former l'objet final (voir ci-dessous).



Figure 57 : Les Blend Shapes pour l'oiseau du mobile

Cependant, il s'est avéré un peu trop complexe, mais surtout chronophage, de gérer toutes ces déformations dans l'*Animation Sequencer Editor*⁶⁷ de *Unreal Engine*. C'est pourquoi chaque objet a simplement une forme de base (la petite sphère) et sa forme finale. Parallèlement, au début, ces objets ont un matériau incandescent puis au cours de leur métamorphose celui-ci deviendra le matériau final grâce à un paramètre permettant de passer de l'un à l'autre.

Dans ce tableau il y a trois matériaux différents : celui de la fleur de lotus, celui du matériau incandescent du début de la métamorphose des objets du mobile et celui de la fin de la métamorphose (décliné en plusieurs couleurs). En ce qui concerne cette fleur, j'ai réalisé un matériau de verre « basique ». En effet, afin d'obtenir un objet en verre sur *Unreal Engine 4* il faut tout d'abord changer certains paramètres tel que le *Blend Mode* et le *Lighting Mode* comme nous pouvons le voir sur l'image ci-dessous.

⁶⁶ Les *Blend Shapes* (sur *Maya* ou *Morph Target* sur *Unreal Engine 4* ou *3DS Max*) correspond au nom donné à une ou plusieurs copie(s) d'un objet de base qui une fois déformées permettent d'animer l'objet de base. Ils sont le plus souvent utilisés pour des animations faciales, telles que les formes de la bouche.

⁶⁷ L'*Animation Sequencer Editor* est un menu qui permet de gérer les animations dans *Unreal Engine 4* dont les transitions entre les *Blend Shapes*.

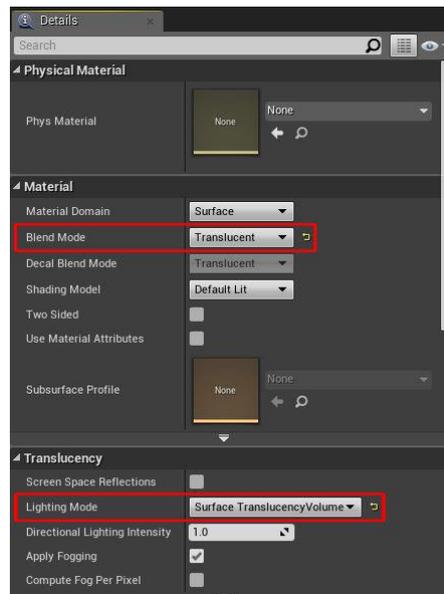


Figure 58 : Capture d'écran des premiers réglages appliqué pour obtenir du verre sur Unreal Engine

Ces deux paramètres impliquent que le matériau de verre doit être translucide et non opaque. Contrairement à un matériau pré-calculé où il suffit souvent d'ajouter de la réfraction et d'ajuster son index pour obtenir du verre, sur *Unreal Engine 4* il faudra passer par un nœud de Fresnel et un nœud de *Lerp*⁶⁸. Le Fresnel permettra de définir comment réagira la lumière sur un objet par rapport à l'angle de vue (souvent une caméra). Ainsi, dans le cas de la réfraction d'un matériau en verre, le nœud de Fresnel nous permettra d'ajuster l'indice de réfraction : les faces de l'objet dont la normale pointe vers la caméra auront une valeur définie, et les faces dont les normales sont perpendiculaires à la caméra auront une autre valeur. Avec le nœud de *Lerp*, une interpolation sera faite entre ces deux valeurs.

Il ne reste alors qu'à ajuster deux derniers paramètres pour obtenir un matériau en verre sur *Unreal Engine 4*. Le premier peut surprendre quand on a l'habitude de faire du verre en pré-calculé, c'est l'opacité. En effet, même lorsque nous changeons tous les paramètres évoqués plus haut (figure 58), l'objet restera opaque. Il faut donc diminuer la valeur de l'opacité pour obtenir du verre. Le second paramètre, plus commun, est celui de la *Roughness* qu'il faut baisser pour obtenir de belles réflexions. Notons qu'il faut impérativement avoir un *Reflection Capture Actor* dans la scène pour avoir des réflexions sur un objet.

⁶⁸ *Lerp* est l'acronyme anglais de Linear Interpolation, en français c'est une interpolation linéaire.

Nous obtiendrons donc notre matériau de verre de base (image ci-dessous), qui sera décliné et augmenté pour chaque objet créé.

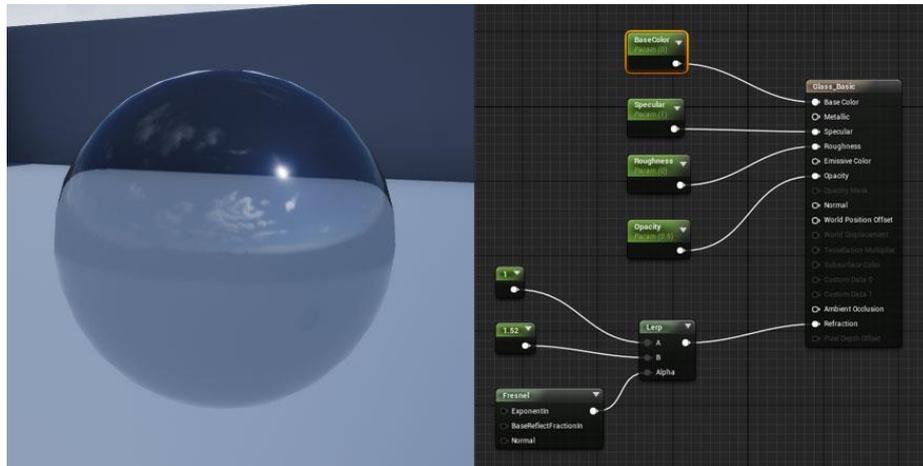


Figure 59 : Capture écran d'une sphère (à gauche) avec le matériau de verre basique (à droite)

A partir de ce matériau basique de verre, j'ai donc pu faire celui de la fleur de lotus. Sur celui-ci, j'ai changé la couleur du paramètre de *Base Color* avec un nœud de *Lerp* pour obtenir différentes nuances de rose, un rose clair pour les faces qui pointent vers la caméra et un rose plus foncé pour celles perpendiculaires à la caméra. J'ai aussi utilisé un nœud de *Lerp* avec un nœud de *Fresnel* pour l'opacité (même technique que celle utilisée pour la réfraction citée plus haut) afin d'obtenir plus de nuances.

Les éléments du mobile ont demandé, quant à eux, plus de travail. En effet, chaque objet possède deux matériaux. Le premier correspond à la phase incandescente du verre en fusion et le second au matériau final de l'objet. Pour obtenir une transition naturelle entre ceux-ci j'ai utilisé les *Material Attributes* ainsi qu'un nœud de *MatLayerBlend_Standard*.

Le premier est donc celui de l'incandescence. J'ai donc utilisé le paramètre d'émission pour que l'objet émette une couleur rouge intense en son centre et une couleur orangée sur les bords de l'objet pour imiter le verre chauffé qui refroidit plus rapidement sur les extrémités. Cependant, bien que l'idée paraissait intéressante, j'ai été un peu déçue de voir le résultat. En effet, la rapidité de la métamorphose des objets ainsi que la diminution du nombre de *Blend Shapes* (comme évoqué plus haut) fait que nous n'avons pas le temps de voir tous ces détails.

Pour ce tableau nous souhaitions créer quelque chose de très coloré et de très saturé pour évoquer l'enfance, la joie et l'innocence. Je me suis donc inspirée de la sculpture *Sparkle Palace Cocktail Table* de John Foster pour créer le matériau final des objets du mobile. En effet, dans cette sculpture, nous avons l'impression que le verre émet sa propre lumière alors que ce n'est qu'un jeu de réfraction.



Figure 60 : *Sparkle Palace Cocktail Table*, sculpture en verre, Etats-Unis, John Foster, environ 2013.

La particularité de ce matériau est donc la présence très importante de la couleur et de l'émission de lumière. C'est pourquoi, après avoir modélisé l'objet et déplié ses UVs sur *Maya*, je l'ai importé sur *Substance Painter Color* pour peindre les faces de l'objet en nuances de noir. Ainsi, cette image que j'ai nommée *Color Variation* (figure 61), une fois multiplié avec la couleur de l'objet sur *Unreal Engine 4* donnera une nuance différente à chaque face.

Sur *Substance Designer*, j'ai sorti différentes images telles que des maps de *Roughness* (figure 62), de *Normal* (figure 63), et de *Noise* (figure 64). Cette dernière image sera multipliée avec les informations de couleur obtenues plus haut pour donner davantage de nuances à l'objet. J'applique celle-ci également dans l'émission, toujours pour lui apporter plus de nuances. Avant d'importer l'objet dans *Unreal Engine 4*, j'ai aussi attribué, sur *Maya*, une couleur à certaines faces (*Color Vertex*). Cette information est facilement transposable sur le moteur de jeu et je l'ai utilisée pour donner une valeur d'opacité différente à ces faces-là.

Pour finir, j'ai ensuite fait des instances de ce matériau pour chaque objet du mobile avec plusieurs paramètres modifiables tels que la couleur, l'image de *Color Variation* et l'image de *Roughness*. Ces instances permettent de pouvoir facilement modifier le matériau créé, et est beaucoup plus léger que si l'on devait recréer le matériau.

Ci-dessous, nous pouvons retrouver les différentes images utilisées pour la création d'un des objets du mobile : l'oiseau. Les images propres à chaque objet correspondent donc aux images à changer dans chaque instance du matériau.

Images propres à l'objet de l'oiseau :



Figure 61 : Map de Color Variation créée sur Substance Designer.

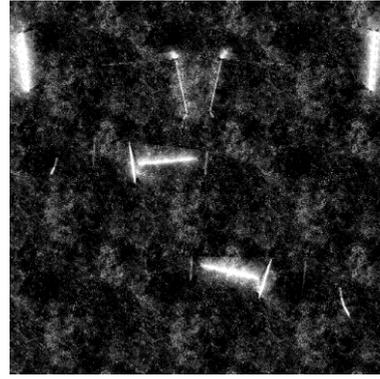


Figure 62 : Map de Roughness créée sur Substance Designer.

Images communes à chaque objet du mobile :

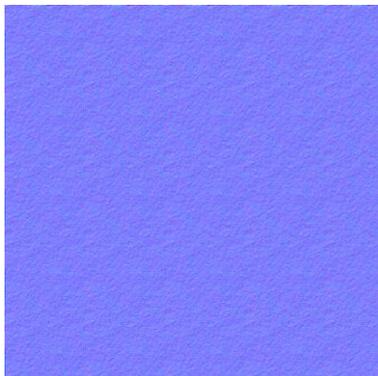


Figure 63 : Normal Map créée sur Substance Designer.

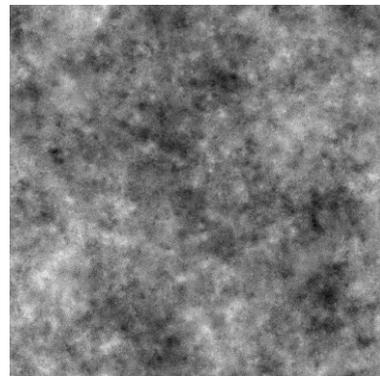


Figure 64 : Noise créée sur Substance Designer.

Le rendu de l'oiseau :

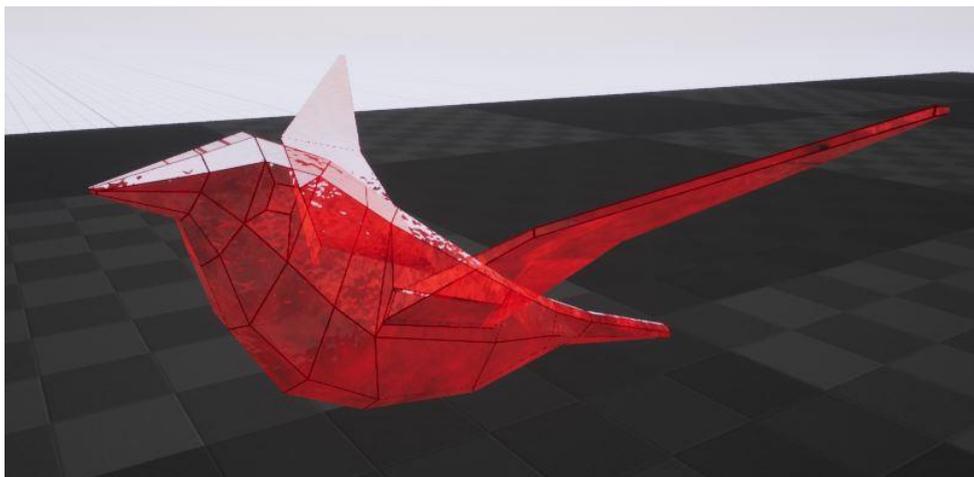


Figure 65 : Rendu de l'oiseau dans une scène vierge de Unreal Engine 4.

3.2.2 L'amour



Figure 66 : Captures d'écran du tableau de L'amour de Résilience.

Le deuxième tableau que nous avons conceptualisé concerne l'amour. Nous voulions raconter l'histoire d'un amour naissant qui devient passionnel puis fusionnel avant de s'apaiser. Nous avons donc décidé de créer deux sphères qui contiennent chacune un petit univers celles-là représentent les deux individus d'un couple. C'est pourquoi nous avons décidé d'utiliser des couleurs complémentaires : le rouge et le vert.

Le matériau de verre que j'ai créé pour ce tableau fonctionne bien grâce à l'utilisation d'un nœud de *Bump Offset* qui fait ressortir plusieurs niveaux de détail comme des petites bulles ou des griffures. Il faut cependant relever un petit bémol à ce nœud, pour notre cas. En effet, le *Bump Offset* fait ressortir les détails à l'extérieur du volume de l'objet et non à l'intérieur, comme je l'aurais souhaité afin de créer des petites bulles d'air qui seraient emprisonnées dans le verre. Il a fallu pour cela utiliser de très faibles valeurs.

J'ai donc peint différents détails directement sur l'objet dans *Substance Painter* en utilisant différentes couleurs : le rouge, le vert et le bleu (figure 67, ci-dessous). Ce principe est très intéressant car il permet de stocker de nombreuses informations sur une seule et même image grâce aux différentes couches ce qui permet donc un gain de place et de rapidité. Une fois cette image créée et importée dans *Unreal Engine 4* avec un nœud de *Texture Sampler*, j'ai donné à chaque couche (rouge, verte et bleue) une valeur de profondeur grâce au nœud de *Bump Offset*. Ainsi, en mettant ces diverses valeurs dans le paramètre de *Normal* et dans celui de la couleur du matériau j'ai pu obtenir ces diverses couches de détails.

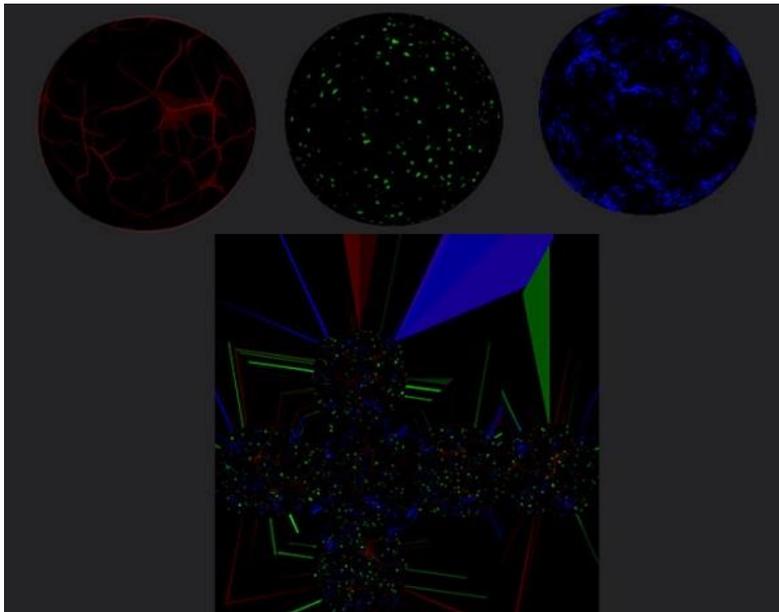


Figure 67 : En haut, de gauche à droite on peut voir :

- sur la couche rouge, des craquelures ;*
 - sur la couche verte des bulles ;*
 - sur la couche bleue, des formes plus abstraites.*
- En bas ces mêmes détails sur une seule image.*

C'est avec cet objet que j'ai pleinement pris conscience de l'importance de l'utilisation du nœud Fresnel dans un matériau en verre. En effet, je l'ai souvent utilisé dans le réglage de l'opacité et dans celui de la réfraction. Utilisé dans la réfraction il permet d'obtenir les déformations du décor à l'intérieur de la sphère en verre. Contrairement au pré-calculé, nous pouvons plus facilement nous affranchir de la réalité et mettre des valeurs qui ne sont pas physiquement correctes dans l'indice de réfraction afin d'obtenir une déformation qui nous conviendra.

Au début de chaque tableau, la sphère ne se détachait pas assez du fond étant donné que notre environnement est plutôt sombre. C'est pourquoi, j'ai aussi utilisé un nœud de Fresnel dans le paramètre de couleur (*Base Color*) afin d'obtenir un contour coloré et ainsi mieux faire ressortir l'objet. Cette couleur sera différente pour chacune des sphères créées.

3.2.3 La peur



Figure 68 : Captures d'écran du tableau de La peur de Résilience.

Notre troisième objet évoque la peur, l'angoisse et le sentiment de tourner en rond. Au début, nous voulions que notre triangle de Penrose⁶⁹ se contorsionne sur lui-même. Mais finalement nous avons décidé de simplement le faire tourner sur lui-même pour installer un sentiment de malaise plus insidieux. Nous avons réussi à transposer l'illusion d'optique en 3D sans pour autant mettre en évidence les torsions des segments du triangle.

Pour cet objet je souhaitais avoir un verre poli et peu transparent pour accentuer l'effet d'angoisse. Les sculptures de verre de Stanislav Libenský et Jaroslava Brychtová dont j'ai évoqué le travail en première partie (1.2.6 Le verre et l'art contemporain p.25) fut une grande inspiration.

Ce matériau a été compliqué à réaliser sur *Unreal Engine 4* pour deux raisons : la *Roughness* et la transparence. Cela me fait dire qu'il n'est pas possible de faire un véritable verre poli sur *Unreal Engine 4*.

La première raison concerne donc la *Roughness* de l'objet. J'ai pu observer que quand nous créons un matériau de verre (*Blend Mode* en *Translucent* et *Surface Translucency* pour le *Lighting Mode* comme nous avons pu le voir plus haut), nous n'avons plus qu'un contrôle partiel de la *Roughness*. En effet, en changeant les paramètres de *Roughness* de l'objet, cela étale bien le spéculaire, le rendant plus flou, mais cela ne concerne que les reflets de l'objet, et non la réfraction comme nous pouvons le voir sur l'image ci-dessous (figure 69) sur les zones entourées en bleu. Je ne connais pas exactement la raison pour laquelle la *Roughness* ne

⁶⁹ Le triangle de Penrose, ou triangle impossible, est une illusion d'optique rendue célèbre par R. Penrose (un mathématicien et physicien anglais).

s'applique pas partout mais cela peut venir de l'utilisation de l'opacité ou encore de la combinaison du *Blend Mode* et du *Lighting Mode*.

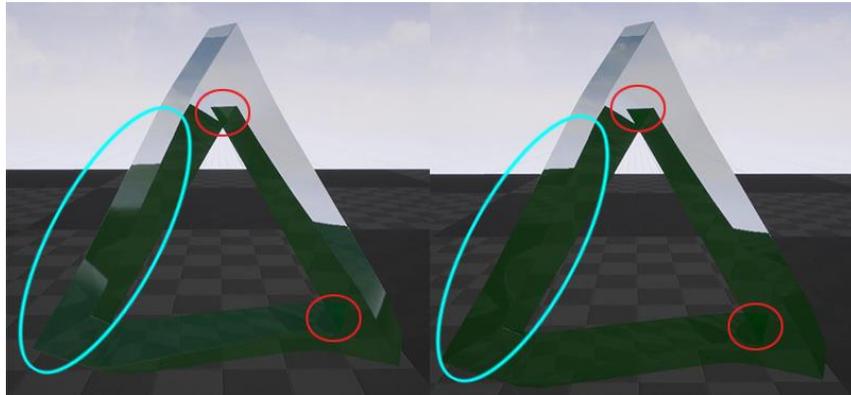


Figure 69 : Capture d'écran d'un matériau de verre basique sans Roughness (à gauche) et avec de la Roughness (à droite)

Le second problème concerne la transparence comme nous pouvons le voir entouré en rouge ci-dessus. Avec ce problème on ne sait plus dans quel sens est l'objet et quelles faces sont en-dessous ou au-dessus des autres. Je parlerai davantage de ce problème avec le prochain objet.

Ainsi, pour obtenir l'effet escompté je ne suis pas partie de ma base d'objet en verre mais j'ai utilisé un matériau en *Subsurface Scattering* (*Blend Mode* en *Opaque* et *Shading Model* en *Subsurface*). Ainsi avec ce matériau j'ai eu de nouveau pleinement le contrôle de la *Roughness*, ce qui était primordial. De plus, je n'avais plus de problème de transparence. Même si j'ai laissé tomber ma base en verre, le *SSS* est tout aussi pertinent dans ce cas car il permet de bien ressentir les volumes et d'obtenir des matériaux translucides.

En partant donc de ce matériau de *Subsurface Scattering* j'ai notamment utilisé une *Normal Map* pour lui donner un aspect encore plus rugueux pour vraiment coller au thème. La couleur est aussi très importante dans cette objet. L'utilisation d'un vert glauque, avec des arêtes plus foncées (obtenues grâce à l'utilisation des *Vertex Color*) ainsi que la présence d'une pointe de jaune dans le « centre » de l'objet permet d'accentuer le sentiment d'enfermement.

3.2.4 La folie créatrice

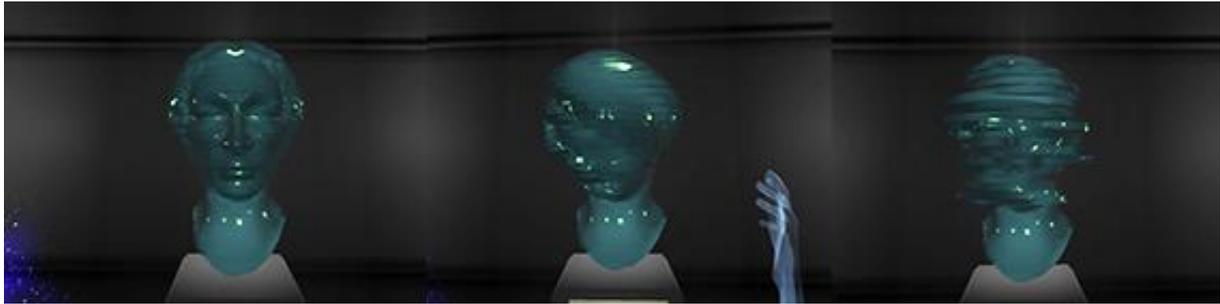


Figure 70 : Captures d'écran du tableau de La folie créatrice de Résilience.

Nous avons mis un certain temps avant de nous accorder sur l'objet représentant la folie créatrice. Nous avons évoqué beaucoup de choses dont le fait d'avoir à la fin du tableau un espace non euclidien ou des déformations de tout l'espace. Ce tableau devait représenter tout ce que quelqu'un peut imaginer de farfelu.

Cependant, nous avons réussi à concrétiser cette idée de déformation de l'espace, de construction et de déconstruction grâce à ce buste qui se fragmente et se décompose. Ainsi, l'objet n'a de sens que quand tous les fragments sont alignés et forment un visage. Celui-là représente aussi la formation d'une idée, d'une œuvre.

Nous nous sommes inspiré par une statue en acier représentant Franz Kafka et réalisée par David Černý (voir ci-dessous), pour cette réalisation.



Figure 71 : Head of Franz Kafka, sculpture en acier, David Černý, 2014, Prague.

Comme pour le matériau des sphères de *L'amour*, le matériau repose en grande partie sur l'utilisation du nœud de Fresnel. Les plus gros problèmes que nous avons rencontrés pour cet objet ont été la transparence et la superposition des strates du buste. En effet, comme nous pouvons le voir à gauche sur l'image ci-dessous (figure 72), au sommet du crâne du buste, le moteur de rendu ne semble pas savoir comment interpréter les différentes strates. Cela est causé par les matériaux translucides comme le verre. C'est un problème de performance connu du moteur comme la documentation d'*Unreal Engine 4* le souligne. Ce problème a même un nom : l'*Overdraw*⁷⁰. Celui-ci intervient quand il y a plusieurs objets transparents superposés ou les uns à côté des autres. En effet, plus il y a d'objets transparents superposés plus cela devient coûteux à rendre.

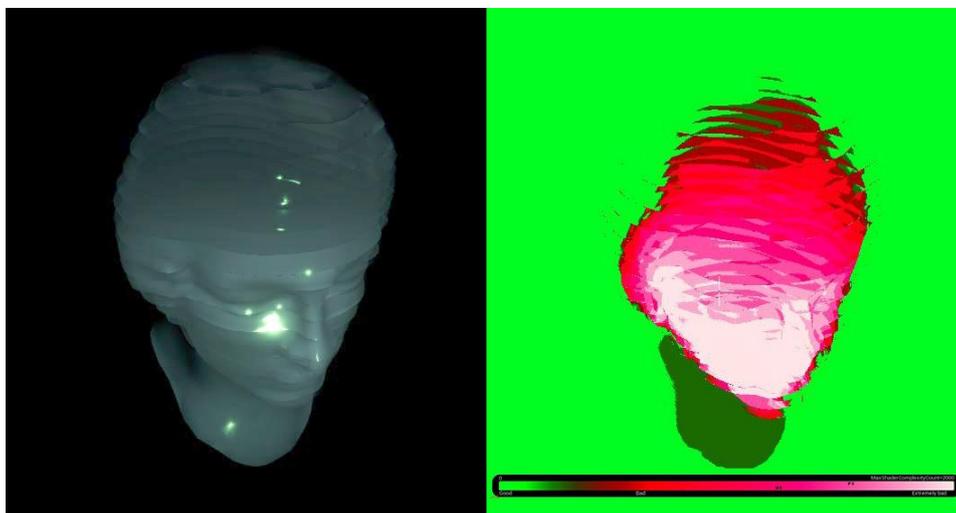


Figure 72 : A gauche une capture d'écran du problème de transparence du buste. A droite, capture de la vue dite Shader Complexity d'Unreal Engine. En vert les zones peu coûteuses à rendre, en rouges, les zones coûteuses à rendre.

Pour essayer d'atténuer cela, nous avons donc fait un matériau légèrement moins transparent tout en essayant de garder l'aspect du verre. Pour cela nous avons rajouté du *Subsurface Scattering* en changeant seulement le mode du *Shading Model* en *Subsurface*. Le *Blend Mode* reste, quant à lui, en *Translucent* Cela nous permet également d'avoir un verre plus coloré.

⁷⁰ « Using Transparency », consulté le 28 mars 2018, <https://docs.unrealengine.com/en-us/Engine/Rendering/Materials/HowTo/Transparency>.

3.3 Conclusion du projet intensif et comparaison avec le pré-calculé

Essayer de faire du verre ou reproduire des objets d'art en verre sur *Unreal Engine 4* n'a pas été évident et cela s'est même avéré difficile pour certains objets (notamment à cause des problèmes de transparence évoqués plus haut). Les matériaux que j'ai réalisés ne sont pas très complexes comparés à d'autres réalisations que j'ai pu voir. En effet, je n'ai pas évoqué certaines techniques comme l'utilisation des *Scenes Captures Cube* avec des *Textures Render Target*, qui prend une photo de la scène pour s'en servir dans les réflexions ou réfractions d'un objet. Ce procédé étant lourd et très coûteux ce qui ne s'accorde pas avec l'utilisation du verre en réalité virtuelle. Cela ne s'adaptait donc pas à notre projet intensif qui regroupe plusieurs objets en verre.

Je suis tout de même assez satisfaite de cette première incursion dans la création de matériau de verre en temps réel. Les objets du tableau de *L'enfance* fonctionnent très bien avec leurs couleurs vives et leurs formes simples. Un autre matériau qui rend bien est celui du triangle de Penrose. Il n'est certes pas créé à partir d'une base en verre mais on ressent bien les volumes. Les sphères de *L'amour* ont aussi beaucoup de détails intéressants grâce au *Bump Offset*, à la réfraction et aux petites bulles à l'intérieur de l'objet.

Cependant, il est vrai que la plupart des matériaux créés ne sont pas physiquement réalistes. En effet, quelques-uns de ceux-ci émettent de la lumière alors que le verre n'en émet que lorsqu'il est chauffé à plusieurs milliers de degrés. Autre exemple, pour les sphères de *L'amour*, les valeurs utilisées pour l'indice de réfraction ne sont pas physiquement réalistes et ont été exagérées. Par contre, bien que consciente de ce fait, j'ai choisi de privilégier l'esthétique au physiquement correct.

Cependant, cet exercice m'est parfois apparu comme étant très frustrant et contrariant. En effet, les options et les possibilités du moteur de rendu me paraissent assez limitées. Contrairement au pré-calculé où peu de paramètres permettent d'obtenir facilement le rendu escompté.

3.3.1 Exemple du triangle de Penrose

Prenons par exemple le triangle de Penrose, pour lequel il fut compliqué d'obtenir un aspect rugueux et peu transparent. Sur *Maya*, avec *Redshift*, il suffit de régler seulement quelques paramètres pour obtenir facilement ce rendu. Dans cet exemple, après avoir réglé les paramètres classiques pour avoir du verre (augmenter la réflexion et la réfraction, mettre l'indice de réfraction à 1,51 comme vu précédemment), j'ai choisi d'utiliser le nœud de *rsCurvature* de *Redshift* qui génère une image en noir et blanc en fonction des arêtes de l'objet pour gérer la *Roughness*. Ensuite, il suffit de multiplier ce nœud avec un autre nœud d'*Ambient Occlusion* pour accentuer l'effet foncé sur les arêtes. Et enfin, je le multiplie avec mes couleurs verdâtres. J'ai donc obtenu plus facilement le matériau de mon triangle de Penrose (figure 74).



Figure 73 : Triangle de Penrose rendu sur Unreal Engine 4.

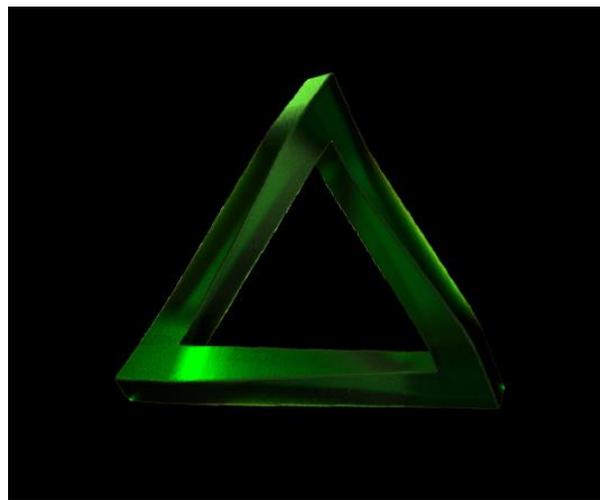


Figure 74 : Triangle de Penrose rendu sur Maya avec Redshift.

Comme nous pouvons le voir ci-dessus, les résultats obtenus en temps réel et en pré-calculé sont tout de même très différents. Le triangle de Penrose à gauche, rendu sur *Unreal Engine 4*, est beaucoup plus opaque que celui rendu sur Redshift, à droite. Ce dernier nous fait davantage penser à un objet en verre grâce à la transparence. Il ressemble aussi davantage aux œuvres de Libenský et Brychtová, qui ont été mon inspiration. Cependant, le résultat obtenu à gauche correspond mieux aux sentiments et aux intentions que nous avons attribué à cet objet.

3.3.2 Exemple du buste

Le deuxième exemple qui montre qu'il est plus facile de faire des matériaux de verre complexe en pré-calculé est celui du buste. Sans le problème de transparence et d'*Overdraw*, dont j'ai parlé plus haut, il est tout de suite beaucoup plus simple d'obtenir le résultat désiré. Pour le matériau du buste, sur *Maya* et avec *Redshift*, j'ai utilisé un nœud appelé *rsMaterialBlender* et qui sert à mixer plusieurs matériaux. Ainsi, j'ai donc pu mélanger, à l'aide d'un nœud de Fresnel (figure 78), deux matériaux de verre ayant chacun une couleur légèrement différente (figure 76 et figure 77). Nous obtenons donc un objet qui, en fonction de l'angle de vue, aura une teinte légèrement différente comme nous pouvons le voir sur les images ci-dessous :



Figure 75 : Le buste avec le matériau final (mélange des deux matériaux).



Figure 76 : Le buste avec le premier matériau.

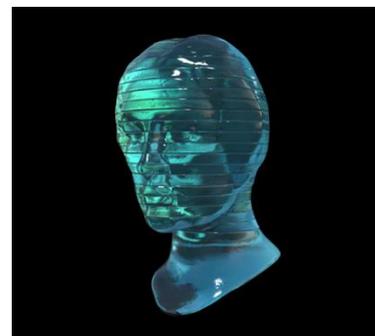


Figure 77 : Le buste avec le second matériau.



Figure 78 : L'image de Fresnel. En rouge le matériau 1 et en vert le matériau 2.

Quand nous comparons les résultats entre l'image en temps réel (figure 79) et celle en pré-calculé (figure 80) nous constatons que l'aspect est, là aussi, très différent. Sur la figure 79 le buste paraît presque fantomatique. De plus, nous pouvons remarquer que le relief causé par la *Normal Map* ressort davantage sur l'image en pré-calculé. La différence de rendu du buste peut s'expliquer aussi par le fait que celui réalisé sur *Maya* et rendu avec *Redshift*, est plus éclairé grâce à l'image d'environnement (comme vu précédemment lors de la réalisation de mon vitrail de Gallifrey p.41), alors que la scène rendue *Unreal Engine 4* est plus sobre et sombre.



Figure 79 : Le buste en temps réel.



Figure 80 : Le buste en pré-calculé

CONCLUSION

Pour imiter du verre en 3D il faut déjà bien connaître cette matière. Nous avons tous l'image d'un verre transparent mais comme nous avons pu le voir à travers ce mémoire c'est une vision simpliste et décalée de la réalité. C'est une matière complexe qui a changé avec l'évolution des techniques. On est passé du verre opaque sous l'Égypte Antique à la recherche absolue de la transparence à la Renaissance à Venise, pour en arriver à la remise en question de ces codes à partir du XIX^{ème} siècle. Cela évolue encore aujourd'hui avec de nouvelles méthodes révolutionnaires telles que l'impression 3D. Il se pourrait donc que l'on voit arriver un nouveau type de verre et avec, notre vision de cette matière pourrait elle aussi changer.

Nous avons pu voir qu'il était possible de réaliser un grand nombre d'objets en verre, en 3D. Les contraintes créatives sont finalement assez peu nombreuses. Un objet en verre peut prendre beaucoup de formes et d'aspects différents. Cependant, le principal obstacle est souvent lié aux limitations-mêmes des moteurs de rendu. Il a tout de même été plus facile de créer des œuvres en pré-calculé, sur *Maya* et avec *Redshift* qu'avec *Unreal Engine 4*, notamment à cause des problèmes de transparence et de superposition. Mais aussi à cause du contrôle très faible de la rugosité des objets créés sur *Unreal Engine 4*.

Malgré le fait qu'il n'y a pour l'instant que très peu d'œuvres numériques qui ne se concentrent que sur le verre et surtout sur ses différents aspects. Cela pourrait changer dans les années à venir grâce aux évolutions technologiques. En effet, les moteurs de rendu GPU et les cartes graphiques sont de plus en plus puissants, ce qui réduira les problèmes de rendu du verre avec beaucoup de *Roughness*. De plus en plus de moteurs de rendu de pré-calculé qui sont habituellement utilisés pour les films sont implémentés dans des logiciels de développement de jeux-vidéo : comme *Octane Render*⁷¹ que l'on retrouve sur *Unity 3D*. Cela permettra peut-être de régler les problèmes des moteurs de rendu en temps réel que j'ai abordé plus haut. Et donc de permettre une meilleure représentation du verre en 3D dans les Arts Numériques.

⁷¹ *Octane Render* est un moteur de rendu physique GPU développé par *Otoy*

Bibliographie

Bartell, F. O., E. L. Dereniak, et W. L. Wolfe. *The theory and measurement of bidirectional reflectance distribution function (BRDF) and bidirectional transmittance distribution function (BTDF)*. Proceedings of SPIE Vol. 257 Radiation Scattering in Optical Systems, 1980.

Ennès, Pierre. *Histoire du verre: au carrefour de l'art et de l'industrie: le XIXe siècle*. Paris: Massin, 2006.

Jean-Luc Olivié et Véronique Ayroles, *Verres, XXe-XXIe siècles: collection du Musée des arts décoratifs* Paris: Les Arts décoratifs, 2012.

Gallagher, Fiona, et Christie's International Group. *Christie's Art Nouveau*. New York: Watson-Guptill, 2000.

René Alleau, Huginus a Barma, et Eugène Canseliet, *Aspects de l'alchimie traditionnelle: textes et symboles alchimiques* (Paris: Editions de minuit, 1986).

Richet, Pascal. *L'âge du verre*. Découvertes Gallimard 399. Paris: Gallimard, 2000.

Tait, Hugh. *5000 Years of Glass*. London, UK: British Museum Press, 2012.

Webographie

80.lv. « Creating Stained Glass Material in Substance ». Consulté le 14 novembre 2017. <https://80.lv/articles/creating-stained-glass-material-in-substance-designer/>.

ACMSIGGRAPH. *SIGGRAPH University - Introduction to « Physically Based Shading in Theory and Practice »*. Consulté le 19 avril 2018. <https://www.youtube.com/watch?v=j-A0mwsJRmk&t=6s>.

« AGC Asahi Glass Holding “FEEL! GLASS” Exhibition to Celebrate Its 110th Anniversary | News | AGC ». AGC. Consulté le 18 mars 2018. http://www.agc.com/en/news/detail/1195957_2814.html.

Allegorithmic. « The PBR Guide - Vol.2 », 3 août 2018. <https://academy-api.allegorithmic.com/static/files/pdfs/the-pbr-guide-vol-2.pdf>.

« BSDF | anish.r.khadka ». Consulté le 2 janvier 2018. <https://anishrkhadkblog.wordpress.com/tag/bsdf/>.

« Chronologie du verre ». Les Arts Décoratifs - Site officiel. Consulté le 16 octobre 2017. <http://www.lesartsdecoratifs.fr/francais/musees/musee-des-arts-decoratifs/collections/dossiers-thematiques/chronologie-du-verre/>.

« Composition du verre - Infovitrail.com ». Consulté le 2 janvier 2018. <http://www.infovitrail.com/index.php/fr/composition-du-verre>.

David Louapre. « Le verre, cet inconnu ». *Science étonnante* (blog), 8 mai 2011. <https://sciencetonnante.wordpress.com/2011/05/09/le-verre-cet-inconnu/>.

« Dragon-stem Goblet | The Techniques of Renaissance Venetian Glassworking ». Consulté le 16 avril 2018. <https://renvenetian.cmog.org/object/dragon-stem-goblet>.

« État physique du verre - Infovitrail.com - Infovitrail.com ». Consulté le 2 janvier 2018. <http://www.infovitrail.com/index.php/fr/etat-physique-du-verre>.

Futura, « G3DP : de l'impression 3D avec du verre en fusion », Futura, consulté le 24 mars 2018, <https://www.futura-sciences.com/tech/actualites/imprimante-3d-g3dp-impression-3d-verre-fusion-59533/>.

« Glossaire des principales techniques ». Consulté le 6 février 2018. <http://mban.nancy.fr/fr/collections/collection-daum/glossaire-des-principales-techniques.html>.

graphics3d. *Peering Through a Glass, Darkly at the Future of Real-Time Transparency, SIGGRAPH 2016*. Consulté le 18 février 2018. <https://www.youtube.com/watch?v=rVh-tnsJv54>.

« Iridescence ». *Wikipédia*, 10 mai 2017. <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Iridescence&oldid=137218934>.

« Le jaune d'argent (peinture sur verre) - Infovitrail.com - Infovitrail.com ». Consulté le 2 janvier 2018. <http://www.infovitrail.com/index.php/fr/decoration-sur-verre/276-le-jaune-d-argent>.

« Le verre filigrané: une technique décorative très raffinée Le Magazine de Proantic ». Le Magazine de Proantic, 15 janvier 2017. <http://www.proantic.com/magazine/verre-filigrane-technique-decorative-plus-raffinees/>.

Pluralsight. « Understanding Caustics for a Higher Level of Realism in Your Renders ». Pluralsight, 2 septembre 2015. <https://www.pluralsight.com/blog/film-games/understanding-caustics-higher-level-realism-renders>.

« Printing transparent glass in 3-D », MIT News, consulté le 24 mars 2018, <http://news.mit.edu/2015/3-d-printing-transparent-glass-0914>.

« Using Transparency », consulté le 28 mars 2018, <https://docs.unrealengine.com/en-US/Engine/Rendering/Materials/HowTo/Transparency>.

Lexique

Absorption : c'est rayon lumineux qui perd d'énergie du quand il traverse le nouveau milieu

Affinage : deuxième étape de la fabrication du verre où les composants du verre sont amenés à de très hautes températures (entre 1450 et 1530°C) afin de faire disparaître les impuretés et ainsi obtenir un verre plus transparent.

Alpha : désigne l'information de transparence d'une image.

Base Color : (ou *Diffuse Color*) : nom anglais du paramètre de couleur d'un matériau.

Blend Shape : (ou *Morph Target*) : nom donné à une ou plusieurs copies d'un objet de base qui, déformées permettent d'animer l'objet de base. Ils sont le plus souvent utilisés pour des animations faciales, telles que les formes de la bouche.

Bump Map : texture en noir et blanc permettant de simuler du relief.

Braise : dernière étape de la fabrication du verre où les composants du verre sont abaissés à une température allant de 1530 à 1000°C ce qui permet d'avoir du verre visqueux qui pourra être manipulé par le maître verrier.

Canne à souffler : canne cylindrique et percée qui sert à soufflé le verre.

Cartel : c'est un texte se situant près d'une œuvre et apportant diverses informations comme l'auteur, la date ou encore une explication du contexte.

Caustique : désigne des rayons lumineux qui sont reflétés ou réfractés par une surface. Nous pouvons voir des caustiques au fond d'une piscine ou quand un objet en verre est posé sur une surface et est traversé par un rayon lumineux.

Cément : est une coloration obtenue par des sels métalliques qui pénètrent dans la masse du verre pendant la cuisson

Coating : (terme anglais) signifie couche. En 3D, il permet de simuler comme une couche de vernis sur l'objet.

Color Vertex : image en couleur à certaines faces

Cristal : verre fort en fer.

Décor intercalaire : décor pris entre deux couches de verre.

Diffuse Color : voir *Base Color*.

Displacement Map : texture de couleur permettant de déformer un objet.

Dispersion : phénomène qui apparaît quand la lumière est réfractée et qui décompose le spectre lumineux selon ses différentes longueurs d'ondes.

Email : peinture composée de différents minéraux qui se vitrifie à la cuisson.

Fondant : composant du verre qui sert à abaisser sa température de fusion.

Fulgurite : (ou pierre de foudre) verre naturel opaque formé quand la foudre touche du sable.

Fuming : technique qui consiste à vaporiser des particules de métal sur le verre avant d'être de nouveau chauffé pour fixer les particules. Le nom français qui désignerait cette technique serait : dépôt électrolytique. Cependant, beaucoup d'artistes français utilisent le terme anglo-saxon.

Fusion : première étape de la fabrication du verre où les composants sont chauffés dans un four à très haute température (entre 800 et 1400°C) pendant très longtemps.

Gobo : sont des sortes de pochoirs que l'on place devant la lumière pour obtenir un motif.

Gravure : technique d'enlèvement de la matière à l'aide d'une roue ou d'une pointe de diamant.

Gravure à l'acide : technique où l'œuvre est plongée dans un bain d'acide pour lui donner un aspect plus trouble.

Grisaille : peinture à base de verre pilé et de liant de couleur noire ou brune qui se vitrifie à la cuisson.

Groisil : est composé de morceaux de verre ou de cristal coloré broyé qui sert à recréer du verre.

Indice de réfraction (Index of refraction ou IOR en anglais) : correspond au changement de direction des rayons lumineux quand ils passent d'un médium à un autre. Il s'obtient avec le calcul suivant :

$$\text{indice de réfraction} = \frac{\text{vitesse de la lumière dans le vide}}{\text{vitesse de la lumière dans le nouveau milieu}}$$

Iridescence : ou goniochromisme est la propriété d'un matériau de changer de couleur selon le point de vue du spectateur.

Jaune d'argent : « peinture » à base d'argent qui ne se révèle que pendant la cuisson et qui donne des teintes jaunes au verre.

Lerp : c'est l'acronyme anglais de Linear Interpolation, en français c'est une interpolation linéaire.

Matériel réfractaire : matériel qui résiste à de fortes températures.

Marqueterie : procédé de décoration inventé par Emile Gallé en 1898, il consiste à ajouter des morceaux de verre coloré à l'intérieur de la paraison.

Normal Map : texture en couleur permettant de simuler le relief qui donne plus de détail que la *Bump Map*.

Morph Target : voir *Blend Shape*.

Obsidienne : verre naturel résultant du refroidissement rapide de la lave. Elle est souvent noire, rouge, grise ou vert foncé.

Opaque : matériau qui ne laisse pas passer la lumière.

Overdraw : problème de performance sur *Unreal Engine 4* qui intervient notamment quand plusieurs objets transparents sont superposés.

Paraison : amas de verre en fusion recueilli au bout d'une canne à souffler

Pâte de verre : matériau composé de verre broyé qui donne un aspect translucide aux objets. Elle est souvent utilisée dans la technique du moulage à cire perdue.

Photon : est une toute particule élémentaire, elle transporte de l'énergie.

Réflexion : changement de direction des rayons lumineux quand ils touchent une surface réfléchissante.

Réfraction : changement de direction des rayons lumineux quand ils passent d'un milieu à un autre.

Roughness : nom anglais du paramètre qui influe sur la rugosité de la surface d'un objet.

Shader : nom anglais donné à un matériau en 3D.

Soufflage en couronne : technique de soufflage du verre pour obtenir un morceau circulaire et plat de verre.

Soufflage en manchon : technique de soufflage du verre pour obtenir un morceau rectangulaire et plat de verre.

Soufflage du verre : technique de fabrication qui consiste à recueillir au bout d'une canne à souffler un peu de verre en fusion pour former l'objet après manipulation du maître verrier.

Spéculaire : c'est une réflexion de la scène sur l'objet.

Stabilisant : composant du verre qui permet de renforcer sa structure.

Subsurface Scattering : technique en 3D qui permet de simuler la réaction de la lumière quand elle entre en contact avec un objet translucide. Cette technique est notamment utilisée pour faire des bougies ou encore de la peau.

Transmission : rayon lumineux sortant de l'autre côté du deuxième médium.

Transparent : un objet est transparent quand la lumière est réfractée à l'intérieur de celui-ci sans être absorbée. On peut alors voir nettement les objets à travers.

Translucide : un objet est translucide quand la lumière est réfractée à l'intérieur de celui-ci et y est absorbée. On ne peut alors pas voir nettement les objets à travers. Ils sont flous.

UV : c'est une sorte de patron 2D de l'objet 3D. Il permet de créer facilement des textures.

Verre en filigrane : décor pris dans la masse du verre.

Verre laminé : verre sécuritaire très résistant utilisé pour la fabrication de pare-brise.

Verre moulé à cire perdue : technique de moulage qui consiste à fabriquer un moule à l'aide d'un modèle en cire qui fondra pendant la cuisson de celui-là, dans lequel on viendra placer du verre broyé.

Vertex Color : information de couleur donnée pour chaque vertex d'un modèle. Il permet de faciliter la réalisation de textures et de matériaux.

Vetro a fili : verre soufflé filigrané dans lequel est incorporé du verre de couleur qui forme des lignes parallèles.

Vetro a retorti : verre soufflé filigrané dans lequel est incorporé du verre de couleur qui forme des lignes en spirales.

Vetro a reticello : verre soufflé filigrané dans lequel est incorporé du verre de couleur où les lignes s'entrecroisent.

Vitrifiant : composant principal du verre, le plus souvent de la silice.

Index des illustrations

Figure 1 : Obsidienne récoltée sur l'île de Lipari.....	9
Figure 2 : Fulgurite d'Algérie, exposée au San Diego Country Fair.....	9
Figure 3 : Schéma représentant la viscosité et la vitesse de cristallisation du verre en fonction de la température et du temps https://sciencetonnante.wordpress.com/2011/05/09/le-verre-cet-inconnu/	11
Figure 4 : Schéma représentant le trajet d'un rayon lumineux lorsqu'il subit un changement de milieu.....	12
Figure 5 : Schéma représentant l'équation de BSDF.....	14
Figure 6 : Vase à onguent en forme de poisson, verre sur noyau, Egypte, XVIII ^{ème} dynastie (environ -1350 avant J.-C.),	15
Figure 7 : Pot et carafe en verre soufflé, Italie, I ^{er} siècle après J.-C,	16
Figure 8 : Gobelet , verre soufflé-moulé, Gaule ou Suisse, I ^{er} siècle, British Museum, Londres.	16
Figure 9 : Schéma expliquant le soufflage en couronne (à gauche) et en manchon (à droite).	17
Figure 10 : Les Joueurs d'Echec (à droite le vitrail en entier et à gauche un gros plan), vitrail, hôtel de la Bessée, Villefranche-sur-Saône, XV ^{ème} siècle, Musée de Cluny – musée national du Moyen-Âge, Paris	18
Figure 11 : Gourde de pèlerin, verre émaillé et peinture à l'or, Syrie, 1250-60, British Museum, Londres.....	18
Figure 12 : Coupe avec pied en forme de dragon, verre soufflé-moulé, Venise, 1630-70, Corning Museum of Glass, New York.....	19
Figure 13 : De gauche à droite : un vase en « vetro a retorti », un vase en « vetro a reticello » et un vase en « vetro a fili », Venise, XVI ^{ème} siècle, British Museum, Londres.....	20
Figure 14 : Vase Les Lumineuses, cristal soufflé à deux couches, marqueterie, gravure, Emile Gallé, 1900, Museum für Kunst und Gewerbe, Hambourg.....	22
Figure 15 : Flacon [1655], verre soufflé, bulles et décor intercalaires, modelé à chaud, Maurice Marinot, 1929, Musée des Arts Décoratifs, Paris	23
Figure 16 : Flacon [1101], verre soufflé, modelé à chaud, bulles et décor intercalaires, Maurice Marinot, 1925, Musée des Arts Décoratifs, Paris	23

Figure 17 : Vase couvert [19], verre soufflé et, modelé à chaud, décor gravé à l'acide, Maurice Marinot, 1929, Musée des Arts Décoratifs, Paris	23
Figure 18 : Vase Buprestes, pâte de verre moulée à cire perdue, François Décorchemont, 1912, Musée des Arts Décoratifs, Paris.	24
Figure 19 : Photographie illustrant la sortie d'une œuvre en verre d'un moule en plâtre réfractaire https://www.vessiere-cristaux.fr/categorie-produit/cristal-daum/	24
Figure 20 : Red Pyramid, sculpture en verre, Stanislav Libensky et Jaroslava Brychtova, 1993, Corning Museum of Glass, New York.....	25
Figure 21 : Ku-32 (Free Essence-32), sculpture en couche de verre laminé, Niyoko Ikuta, 2013, http://www.yufuku.net	26
Figure 22 : Swing – 135, sculpture en couche de verre laminé, Niyoko Ikuta, 2015, http://www.yufuku.net	26
Figure 23 : Amorphous, installation en verre pour la Milan Design Week, AGC Asashi Glass, 2016, Superstudio Più, Milan.	27
Figure 24 : Photo d'une exposition du MIT Media Lab ,d'objets en verre réalisés avec l'imprimante 3D.....	28
Figure 25 : Capture d'écran de La Vie est Belle l'Eclat, film commercial en images de synthèse, réalisé par Frédéric Colin – produit par l'agence ONIRIM pour Lancôme, 2017.	30
Figure 26 : Capture d'écran, film commercial en images de synthèse, réalisé par KingSize FX – agence Desdoigts et Associés pour Nicolas Feuillatte, 2018.	31
Figure 27 : Capture d'écran, film commercial en images de synthèse, réalisé par KingSize FX – agence Desdoigts et Associés pour St-Remy, 2018.	31
Figure 28 : Test de shaders en verre sur Redshift.....	34
Figure 29 : Test de rendu avec des caustiques.	36
Figure 30 : Rendu test avec différents IOR.....	37
Figure 31 : Rendu test avec différentes valeurs de Roughness.	37
Figure 32 : Rendu test avec différents paramètres de Refraction Color.	38
Figure 33 : Rendu test avec différents paramètres de Transmittance Color.....	38
Figure 34 : Rendu test avec différentes valeurs de Transmittance Color et de Refraction Color.	39
Figure 35 : Rendu test avec différentes valeurs de Scatter Scale.	39
Figure 36 : Rendu test avec différents paramètres de Transmittance Color et de Scatter Scale.	39

Figure 37 : Rendu test avec des lumières de couleur.	40
Figure 38 : Rendu test avec des objets de couleur orange et des lumières de couleur.	40
Figure 39 : Vitraux de style Art Déco réalisés par l'atelier Au Passeur de Lumière, Paris, années 2000-2010	41
Figure 40 : Symbole de Gallifrey reproduite sur Adobe Illustrator.....	42
Figure 41 : Masque 1.....	42
Figure 42 : Masque 2.....	42
Figure 43 : Masque 3.....	42
Figure 44 : Masque 4.....	42
Figure 45 : Les Normal map des quatre motifs créés sur Substance Designer.....	42
Figure 46 : La Normal map des carreaux de verre avec les différents motifs.	42
Figure 47 : Rendu final du vitrail sur Maya avec Redshift.....	43
Figure 48 : Rosace gothique, vitrail, Strasbourg, XIV ^{ème} siècle, Musée De L'Oeuvre Notre Dame de Strasbourg.	44
Figure 49 : Toutes les images exportées d'Illustrator ou de Substance Designer.	45
Figure 50 : Images exportées de Substance Designer, de gauche à droite : l'image d'opacité, la Normal Map, la map de couleur, la map de Roughness et l'image de réflexion (specular)....	45
Figure 51 : Premier rendu de la rosace avec Redshift.	46
Figure 52 : Etapes de réalisation du vase.....	48
Figure 53 : Rendu final du vase.	49
Figure 54 : Vase, Favrile Glass, New York, Louis Comfort Tiffany, XX ^{ème} siècle, Metropolitan Museum of Art, New York.....	50
Figure 55 : Rendu final de la coupe "a reticello".....	52
Figure 56 : Captures d'écran du tableau de L'enfance de Résilience.	56
Figure 57 : Les Blend Shapes pour l'oiseau du mobile.....	57
Figure 58 : Capture d'écran des premiers réglages appliqué pour obtenir du verre sur Unreal Engine.....	58
Figure 59 : Capture écran d'une sphère (à gauche) avec le matériau de verre basique (à droite)	59
Figure 60 : Sparkle Palace Cocktail Table, sculpture en verre, Etats-Unis, John Foster, environ 2013.....	60
Figure 61 : Map de Color Variation créée sur Substance Designer.	61
Figure 62 : Map de Roughness créée sur Substance Designer.	61

Figure 63 : Normal Map créée sur Substance Designer.....	61
Figure 64 : Noise créée sur Substance Designer.	61
Figure 65 : Rendu de l'oiseau dans une scène vierge de Unreal Engine 4.....	61
Figure 66 : Captures d'écran du tableau de L'amour de Résilience.....	62
Figure 67 : En haut, de gauche à droite on peut voir :.....	63
Figure 68 : Captures d'écran du tableau de La peur de Résilience.....	64
Figure 69 : Capture d'écran d'un matériau de verre basique sans Roughness (à gauche) et avec de la Roughness (à droite).....	65
Figure 70 : Captures d'écran du tableau de La folie créatrice de Résilience.	66
Figure 71 : Head of Franz Kafka, sculpture en acier, David Černý, 2014, Prague.....	66
Figure 72 : A gauche une capture d'écran du problème de transparence du buste. A droite, capture de la vue dite Shader Complexity d'Unreal Engine. En vert les zones peu coûteuses à rendre, en rouges, les zones coûteuses à rendre.	67
Figure 73 : Triangle de Penrose rendu sur Unreal Engine 4.....	69
Figure 74 : Triangle de Penrose rendu sur Maya avec Redshift.....	69
Figure 75 : Le buste avec le matériau final (mélange des deux matériaux).	70
Figure 76 : Le buste avec le premier matériau.....	70
Figure 77 : Le buste avec le second matériau.....	70
Figure 78 : L'image de Fresnel. En rouge le matériau 1 et en vert le matériau 2.....	70
Figure 79 : Le buste en temps réel.....	71
Figure 80 : Le buste en pré-calculé	71

Annexes

La différence entre la *Bump Map* / *Normal Map* / *Displacement Map* :

La Bump map :

Image en noir et blanc qui crée du « faux » volume. Cela fonctionne sur le principe suivant : le blanc fera ressortir les détails de l'objet et le noir semblera creuser l'objet.

Avantage : cela fonctionne très bien pour de petits détails.

Inconvénients : cela ne change pas la véritable forme de l'objet. Ainsi sur certains angles de caméra ou des gros plans, cela pourra ne pas fonctionner visuellement.

La Normal map :

Ce principe est plus récent que la *Bump Map* et fonctionne sur le même principe. La *Normal Map* donnera tout de même plus de détails car c'est une image en couleur (encodée en RVB, Rouge, Vert et Bleu). Chaque couche de couleur correspond à un des axes 3D.

Il existe deux sortes de normal map :

- *Tangent Space* : c'est une image souvent violette et bleue. Majoritairement appliqué sur des objets déformables. C'est ce qui est le plus souvent utilisé ;
- *Object Space* : c'est une image souvent verte, rose et bleue. Elle est plus performante que la précédente et convient très bien pour les objets non déformables.

La Displacement map :

C'est une image en noir et blanc qui, contrairement à la *Bump Map* ou à la *Normal Map*, déforme véritablement l'objet. Il faut donc que cet objet soit assez subdivisé pour pouvoir y appliquer ses déformations. On peut très bien utiliser une image en 8 bits mais on obtiendra de meilleurs résultats si l'image est en 16 bits, et un encore meilleur résultat si l'image est en 32 bits.

Avantages : plus de détails, résout le problème qu'ont la *Bump* et la *Normal Map*.

Inconvénient : temps de calcul beaucoup plus long.

Il est possible d'utiliser plusieurs de ces images en même temps : la *Displacement Map* pour des gros détails et la *Bump* ou *Normal Map* pour des détails plus fins.