

Université Paris 8

Master Création Numérique

Parcours : Arts et Technologies de l'Image Virtuelle

Interprétation visuelle de données astronomiques

Anthony Le Guen



Mémoire de Master 2

2019 - 2020

Résumé

Le cosmos émerveille, passionne, questionne et attire. Religieux, scientifiques et artistes se sont essayés à le comprendre et à le représenter. S'il nous fait tant rêver, c'est parce qu'il a longtemps été inconnu à nos yeux et encore aujourd'hui, nous ne pouvons pas nous vanter de connaître parfaitement l'espace. L'inconnu et l'incompréhension ont poussé tant de femmes et d'hommes à décrypter la voûte céleste, si bien que l'Histoire abonde d'interprétation.

L'objectif de mon mémoire est, d'une part, d'étudier et de comprendre les interprétations visuelles du cosmos à travers les temps. Et d'autre part, de m'essayer à la représentation visuelle en me positionnant dans une démarche scientifique puis artistique.

Summary

Cosmos fascinate, question and attract. Men of religion, scientists and artists tried to understand and represent it. If we dream so much about space, it's because he has long been unknown to us and even today we cannot boast of knowing it so well. The unknown and incomprehension have pushed so many women and men to decipher the sky, and thanks to them, today History is rich in interpretation.

My goal in this memory is to study and understand visuals interpretations of the cosmos through time. Furthermore, I will experiment few representations by positioning myself in a scientific and then artistic approach.

Remerciements

Je tiens à remercier Lolet Ong, Superviseuse d'Effets Visuels à Digital District, pour son suivi durant mes recherches et l'écriture de ce mémoire ainsi que pour ses précieux conseils et encouragements.

Un grand merci à Dominique Vidal, Superviseur d'Effets Visuels chez BUF, pour son suivi, sa confiance et ses enseignements d'une richesse incroyable qui me serviront tout au long de mon parcours professionnel. J'adresse aussi mes remerciements à mes collègues et amis chez BUF qui ont contribué à faire de mon alternance une année inoubliable.

Je remercie également les astrophysiciens Francis Rocard et Guillaume Hébrard qui ont pris le temps de me rencontrer pour m'accompagner et m'orienter dans mes recherches scientifiques.

Merci également à l'équipe pédagogique de la formation d'Arts et Technologie de l'Image Virtuelle, qui malgré les événements fortuits de ces trois dernières années, a toujours fait de son mieux pour nous donner accès à la connaissance et à l'enseignement.

Je tiens également à remercier Marion Perrier, Clément David ainsi que ma famille pour leur soutien indéfectible pendant ces années d'intenses études.

SOMMAIRE

Résumé	3
Summary	3
Remerciements	4
SOMMAIRE	5
Introduction	7
De la religion à la science	9
1. Le space art et ses fondations	9
a) Définition du space art	9
b) Les premières traces du space art	10
2. L'univers interprété par les mythes et les croyances	11
a) Le geoterrapinism	11
b) L'arbre monde	12
c) La mythologie grecque	13
d) La théorie chrétienne	13
3. Des hommes de sciences contre un système établi	14
a) Giordano Bruno et l'univers infini	14
b) Nicolas Copernic et l'héliocentrisme	16
c) Galileo Galilée et la lunette astronomique	17
Une représentation scientifique de l'univers	19
1. Une volonté de fidélité dans la reproduction	19
a) Des peintres religieux qui camouflent l'astronomie dans leurs œuvres	19
b) Astrophysiciens, artistes et étroites collaborations	25
c) Lucien Rudaux : Rencontre avec Francis Rocard	31
d) Hubble et l'avènement de la photographie	34
2. EXO-Tool : Outil de création d'exoplanète	37
a) Genèse du projet et rencontre avec Guillaume Hébrard	37
b) Mathématiques et images de synthèses : la solution Houdini	39
c) Création de l'orbite et de l'exoplanète	43
d) Lighting et rendu	47
e) Stars HDRI : HDRI de voûtes célestes et wedging	50
3. Étude de l'activité nucléaire du soleil	55
a) Décomposition de l'activité solaire et référence	55

b)	Création d'un effet de magnétisme sur Houdini.....	56
c)	Petites et grosses explosions	60
d)	Rendu et compositing	61
	Une représentation subjective de l'univers	66
1.	L'infiniment grand pour raconter des sentiments humains.....	66
a)	Interprétation de l'univers par les peintres.....	66
b)	L'espace à la conquête de tous les arts	73
c)	L'univers vu à travers la caméra	76
d)	COSMOS, entretien avec Dominique Vidal	79
e)	WHIRL, danse, effets visuels et cosmos.....	82
2.	Création d'un espace magnifié : Star Wars.....	89
a)	ACES, un système de gestion de couleur indispensable.....	89
b)	S'approprier l'univers dans une licence universellement connu	90
c)	Création de la stellogénèse.....	91
i.	Références	91
ii.	Différences VDB et Volume dans Houdini.....	93
iii.	Création du vector field.....	94
iv.	Génération de la spirale.....	95
v.	Dynamique et microsolvers.....	96
d)	Réflexion soulevé et étude de la création volumétrique	98
	Conclusion	101
	Bibliographie.....	103
	Webographie	105
	Filmographie	108
	Table des illustrations.....	109

Introduction

L'astronomie, domaine étudié depuis des milliers d'années, nous pousse à nous interroger sur nos origines. Les civilisations préhistoriques et antiques ont été les premières à s'y intéresser et nous travaillons encore aujourd'hui avec leur héritage. C'est un domaine scientifique qui donne un vertige impressionnant et offre une compréhension du monde à une échelle inconcevable.

Le plafond de notre Terre nous amène à regarder un spectacle qui s'étend vers l'infini et sur une temporalité de près de 14 milliards d'années, au moins. C'est une spécialité qui fait appel à d'autres compétences qui viennent l'enrichir et nous permet à chaque fois de mieux comprendre notre monde : les mathématiques, l'optique, la physique, la chimie, la logique, la biologie etc... Enfin, l'astronomie enrichit les arts avec ses diverses représentations et interprétations.

Lorsque l'art s'approprie un sujet astronomique, on parle de *Space Art* ou d'*Astronomical Art*. Je développerai ce thème dans ma première partie du mémoire. S'intéresser à l'histoire du *Space Art* permet de comprendre l'évolution du regard humain et de sa compréhension sur le monde astronomique. Ce passé est lourdement attaché à l'histoire des religions à travers le monde avant de devenir un récit scientifique. Les interprétations religieuses sont extrêmement enrichissantes à étudier car elles se rapprochent de la méthode d'interprétation scientifique. En effet, lorsque l'on va tenter de comprendre un phénomène astronomique on va poser une hypothèse sur son origine, en fonction des lois qui régissent notre monde. La grande différence étant que les religieux vont s'appuyer sur des textes sacrés tandis que les scientifiques vont expérimenter à partir de données mathématiques et physiques. L'ennemi de l'astronomie à l'ère religieuse était, à mon sens, l'impossibilité de contredire un fait avéré. Grâce à la science, on peut aujourd'hui accepter de partir du principe que nos études sont erronées et qu'il faut étudier le phénomène d'un point de vue différent.

Ce point de vue scientifique sera adopté dans la seconde partie de mon étude. C'est-à-dire le désir de s'éloigner d'une représentation religieuse et de se rapprocher au maximum d'une véracité scientifique dans la représentation de ces phénomènes astronomiques. Les critères de ces représentations sont dépendants de recherches sérieuses, d'observations et de calculs mathématiques pour valider les images qui seront proposées comme des visuels de l'au-delà.

Il est indéniable que les lunettes astronomiques et la photographie ont bouleversé notre vision de l'espace. Je développerai pendant cette partie un outil de création d'exo-planète en image de synthèse qui devra répondre aux critères de véracité scientifique. Je m'intéresserai ensuite à l'étude de l'activité nucléaire du Soleil pour le recréer en image et étudier la meilleure manière de représenter un objet céleste capable de nous aveugler. Ces expériences ont pour but d'explicitier les avantages et inconvénients de cette démarche rationnelle.

L'étude finale se portera sur l'interprétation de l'Univers par les artistes à travers les différentes disciplines et les intérêts de s'approprier le Cosmos lorsque l'on veut raconter une histoire ou faire passer un message. En parallèle de mes recherches, j'ai effectué une alternance chez BUF Compagnie, une entreprise d'effets visuels qui a travaillé sur de nombreux films français, hollywoodiens et internationaux. Elle est notamment très reconnue dans la création d'effets visuels dans l'espace. BUF a travaillé sur la série COSMOS, un documentaire de vulgarisation scientifique présenté par Neil deGrasse Tyson. Nous aurons l'occasion d'analyser leur travail. D'autres artistes, comme Sahar Dehghan, avec qui j'ai travaillé sur le teaser de son nouveau spectacle, *WHIRL*, allie l'art et l'espace.

La fiction joue aussi un rôle très important parmi les œuvres d'arts qui utilisent l'espace, c'est pour cela que je terminerai avec l'étude de mon travail sur le dernier projet intensif réalisé à ATI. Il s'agit d'un très court métrage sur l'univers de Star Wars pour lequel j'étais responsable de la création de l'environnement spatial.

Après les études de ces diverses formes d'interprétation astronomique, nous serons en capacité de définir la meilleure manière de représenter un phénomène céleste en fonction de l'objectif de notre œuvre.

De la religion à la science

1. Le space art et ses fondations

a) Définition du space art

Le space art, aussi appelé art astronomique, est un genre d'expression artistique moderne émergeant du savoir et des idées associées à l'espace lointain. Ces œuvres permettent d'imager des faits, de promouvoir le voyage interstellaire et deviennent de grandes sources d'inspirations pour de nombreux artistes et citoyens. L'art pictural, la musique, le cinéma, la sculpture, l'abstrait et même le land art ont su s'approprier ce genre pour en faire un art pluridisciplinaire. C'est pourtant un genre encore à ses balbutiements qui a connu un essor incroyable lorsque les grands scientifiques ont commencé à comprendre ce qu'était véritablement l'espace. La vulgarisation scientifique et l'accès aux connaissances scientifiques pour le grand public ont été une contribution conséquente à la richesse du space art. Au milieu des années 1800, le physicien et chimiste anglais Michael Faraday va s'intéresser à la vulgarisation scientifique en créant des conférences publiques à la Royal Institute de Londres. Chaque hiver, il organisera ce qu'il appelle les "Christmas Lectures", une série annuelle de conférences qui a pour but d'éveiller la curiosité du jeune public sur l'état de la science à l'époque.

Depuis l'apogée du space art au début du XXème siècle, on a découpé le space art en plusieurs catégories :

- a. *Descriptive Realism* : les artistes de ce sous-genre tente de dépeindre un visuel scientifique véridique d'éléments du Cosmos, l'œuvre doit être appuyée d'une preuve scientifique. Les artistes de cette catégorie avait souvent la double étiquette astrophysicien et artiste. Lucien Rudaux et Chesley Bonestell sont des avant-gardistes de cette catégorie.
- b. *Cosmic Impression* : ce genre utilise les formes et les couleurs pour donner au spectateur une impression de l'image sans être juste scientifiquement, détaillée ou proche de la réalité. Le ressenti émotionnel prime sur le réel, il est intimement lié au mouvement impressionniste.
- c. *Hardware Art* : proche du "descriptive realism", ce genre doit être d'une justesse technique mais il se concentre sur des équipements technologiques, engins interstellaires, vaisseaux, sondes, en soit, tout objet utilisé pour l'exploration spatiale.
- d. *Space Sculpture* : on associe à ce genre des sculptures qui s'inspirent de l'espace ou d'une expérience spatiale.

e. *Cosmic zoology* : on s'intéresse ici à la spéculation visuelle sur la vie extraterrestre. C'est un genre qui a explosé avec la bande dessinée, le cinéma, le jeu vidéo et les arts numériques.

f. *Astronomical Photography* : enfin, cette catégorie regroupe toutes les photographies de l'espace que l'on a pu acquérir, notamment grâce au télescope Hubble.

Néanmoins, malgré la multitude de sous-genres du space art, il existe des œuvres inclassables, car antérieures à la compréhension actuelle de l'espace. On dénombre ainsi quelques œuvres d'interprétation de phénomènes célestes bien avant l'avènement scientifique.

b) Les premières traces du space art

L'espace n'a pas attendu l'homme avant de manifester sa présence et son éternel mouvement, il a encore moins attendu la science. Ainsi, les premiers hommes ont pu observer des phénomènes surréalistes qu'ils n'étaient pas en mesure de comprendre. C'est ainsi qu'on a retrouvé dans une grotte au Tennessee une peinture rupestre que l'on estime âgée de près de 6000 ans représentant une comète ou une étoile filante.



Illustration 1 - Peinture rupestre représentant un objet céleste

Si la représentation est rudimentaire, il est incroyable de constater que nos lointains ancêtres ont eux aussi été émerveillés par un spectacle qui continue de nous fasciner aujourd'hui.

Il faudra attendre des millénaires avant de découvrir de nouvelles œuvres d'arts astronomiques. Entre temps, l'Homme aura évolué et la Religion aura pris une place importante dans la société. Des formes variées de religions auront vu le jour mais toutes ont en commun l'envie de fournir une interprétation du fonctionnement du monde ainsi que des phénomènes que l'homme n'était pas en mesure d'expliquer des siècles auparavant. Entre science et fiction, les croyants du monde entier nous ont offert une représentation de l'univers fascinante.

2. L'univers interprété par les mythes et les croyances

a) Le geoterrapinism

Le mot geoterrapinism est un néologisme pour définir la théorie de la Terre plate. Très popularisée aujourd'hui, notamment grâce à l'auteur Terry Pratchett, on retrouve ce concept dans les civilisations indiennes datant d'il y a 2500 ans. Les religieux hindous ont émis l'hypothèse que la surface de la Terre était portée par quatre éléphants placés aux points cardinaux assurant l'équilibre du monde. Dans leur cosmogonie, les animaux symbolisent très souvent des divinités indiennes. Ces pachydermes étaient eux-mêmes postés sur le dos d'une tortue géante l'un des avatars du dieu Vishnu, qui était quant à lui positionné sur un serpent géant. Le serpent, Ananta, qui signifie "sans fin", voilà pour quelle raison il est représenté en se mordant la queue, il est le symbole du temps infini. Le serpent qui se mord la queue est présent dans diverses religions, il est très connu par son nom grec *Ouroboros*.

Au XVII^{ème} siècle, Jasper Danckaers traverse l'Amérique du nord pour créer une colonie. Pendant son voyage, il rencontrera des communautés amérindiennes qui lui parleront de leur conception du monde. Parmi ces communautés, les Hurons-Wendats, accordent une place importante à la tortue dans la création de l'univers. Selon eux, autrefois la vie animale et végétale était établie dans les cieux. Et les lacs, les forêts et les champs peuplaient les nuages. Jusqu'au jour où une jeune fille tomba des cieux et dans sa chute, tenta de s'agripper à un arbre. Mais au lieu de la retenir, l'arbre tomba avec elle et entraîna tout ce qui l'entourait. La jeune fille atterrit sur la carapace d'une immense tortue qui l'a recueillie et fit apporter de la terre sur son dos pour que l'enfant s'y sente bien. Avec le temps, le monde s'agrandit sur le dos de la tortue.

Il est étonnant de constater que deux civilisations si éloignées dans le temps et dans l'espace ont adopté la création du monde où la Terre plate est portée sur le dos d'une tortue.

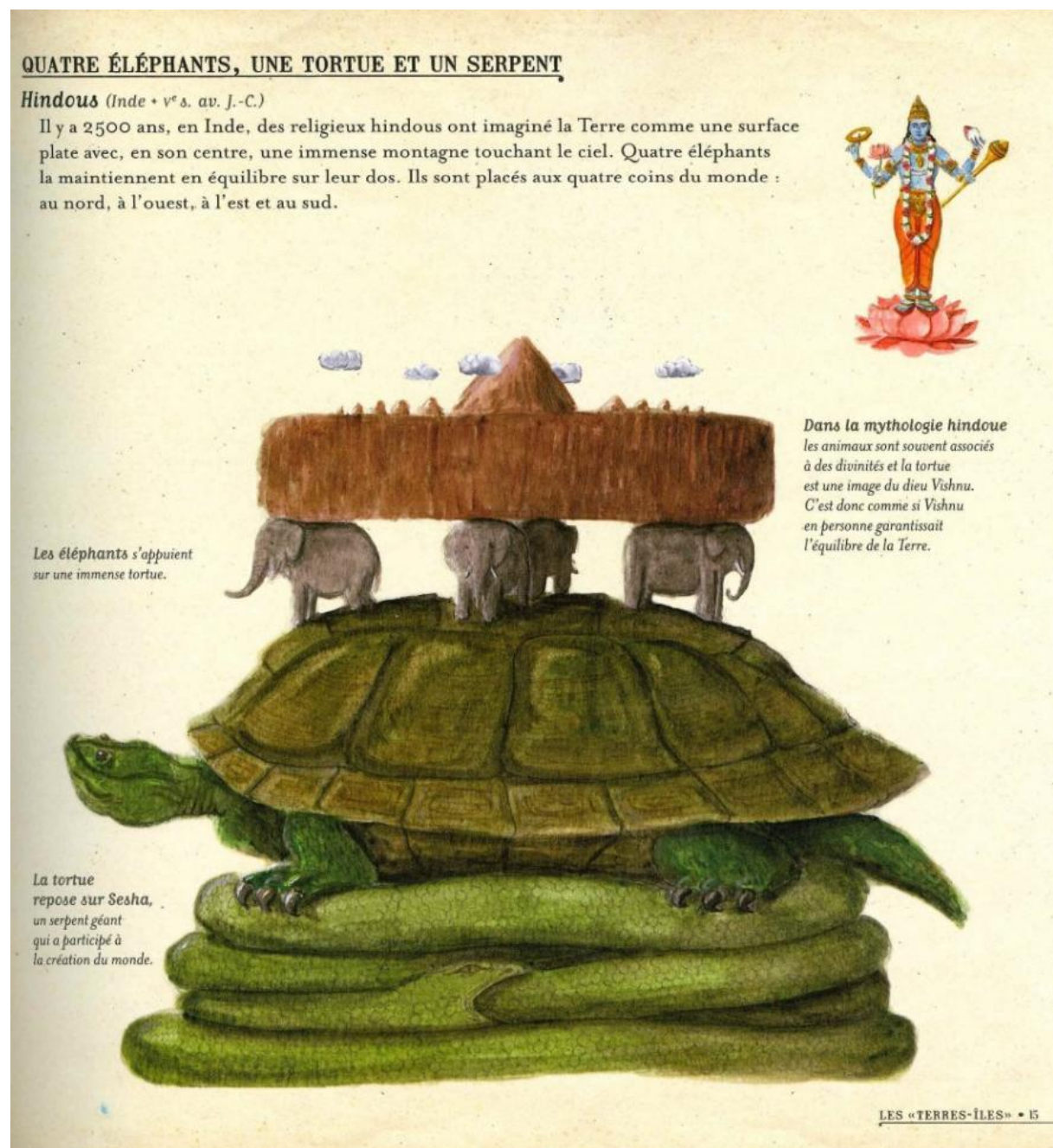


Illustration 2 - Description visuelle de la cosmogonie indienne

b) L'arbre monde

Dans la cosmogonie précédente, la vénération se tournait vers l'animal. Pour d'autres, elle se tourne vers la nature. Plusieurs religions ont donné une place très importante aux arbres dans leur culture. Il est au cœur du récit d'Adam et Eve dans la Bible et dans la plupart des

croyances, il est l'axe qui permet de passer de notre monde à un autre. "Kien mou" en Chine, "Kiskanu" à Babylone, Ceiba chez les Mayas, tous ces termes se réfèrent à l'arbre monde (l'*axis mundi* en latin). Dans la mythologie scandinave, il se nomme Yggdrasil et son rôle y est central.

Yggdrasil est le frêne qui relie tous les mondes du cosmos, ses racines vont de l'inframonde vers le supra monde et la Terre se trouve au pied de l'arbre. La Terre n'est qu'un des neuf mondes qu'abrite l'arbre cosmique, qui permet de séparer les royaumes permet d'établir une harmonie au sein du monde.

c) La mythologie grecque

Parmi les cosmologies les plus populaires, la mythologie grecque joue certainement un rôle important. Encore aujourd'hui, elle est une source d'inspiration inépuisable pour grand nombre d'écrivains et d'artistes. Les sentiments et émotions des protagonistes sont des éléments les plus fascinants de ces mythes. Titans, dieux, déesses, nymphes, hommes, etc... sont tous riches de qualités et de défauts, cette imperfection humaine est ce qui va être à l'origine de toutes les créations et tragédies. Dans cette cosmogonie, l'origine du monde vient du chaos. Pas le néant, mais bien le chaos, c'est à dire un monde où tout ce qui constitue le monde était mélangé en un corps. De ce chaos émergeront quatre entités: Gaïa, Éros, Érèbe et Nyx. Gaïa, la Terre, engendra Ouranos, le Ciel avec qui elle engendra par la suite les Titans dont Cronos.

d) La théorie chrétienne

L'histoire de l'astronomie occidentale prend pour religion protagoniste le christianisme. Selon la Bible, le monde fut créé en sept jours par Dieu. L'homme fut créé à l'aube du sixième jour et placé dans le jardin d'Éden jusqu'au péché originel.

Dans l'histoire de la création, on apprend que le monde était inondé par les eaux afin de permettre à la vie d'exister. Dieu a bâti un toit céleste, appelé firmament, soutenu par deux colonnes aux bords de la Terre pour la protéger de l'inondation. Il arrive que ce toit laisse passer de l'eau de temps en temps pour abreuver les cultures, c'est la pluie.

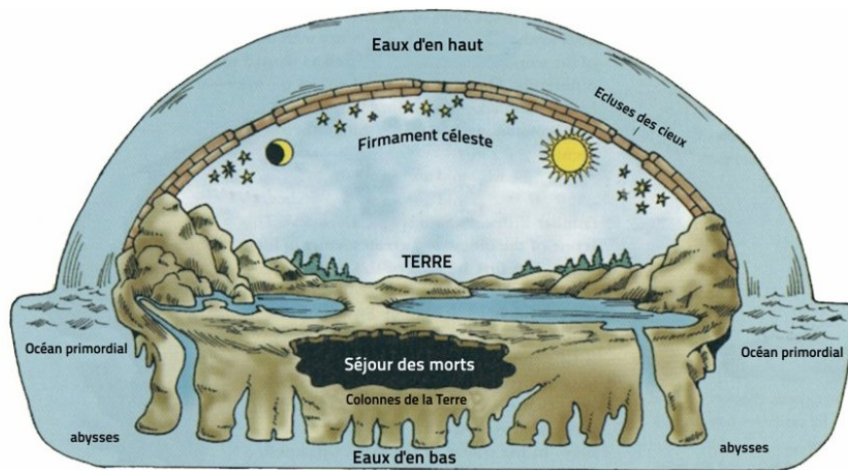


Illustration 3 - Représentation du monde selon la Bible

Il existe bien d'autres cosmogonies mais il me semble que ces quatre-là, même si on peut leur trouver des similitudes, avaient assez de différences pour présenter les réflexions de nos ancêtres sur la voûte céleste et la création du monde. Les animaux, la nature et les hommes sont souvent au centre de ces mythes. Certaines de ces croyances encouragent la remise en question de la création du monde par leurs dieux et cela a permis de faire des découvertes scientifiques incroyables. En occident cependant, remettre en question la Bible est une hérésie et elle est sévèrement punie.

3. Des hommes de sciences contre un système établi

a) Giordano Bruno et l'univers infini

Alors que l'Église interdisait la remise en question de notre monde, la rupture va commencer en son sein. Filippo Bruno était un jeune moine de Naples qui avait la certitude que le monde de son Dieu était bien plus grand que les hommes voulaient le concevoir. Il s'intéresse à de multiples domaines tels que la philosophie, les mathématiques ou la mnémotechnique, c'est-à-dire l'art de mémoriser des informations. Mais c'était avant tout un moine curieux qui n'avait pas peur de remettre en question des vérités établies. À l'époque, on commençait à peine à entendre parler de l'héliocentrisme de Nicolas Copernic mais cela fit réfléchir Filippo à l'idée d'un univers infini et sans centre, une idée déjà plus ambitieuse que la révolution copernicienne.

Réputé pour avoir une grande mémoire, il étudie les textes des grands philosophes grecs et devient l'élève de Giordano Crispo qui lui enseigne la recherche des causes et des principes. C'est en son hommage que le jeune Filippo adoptera le prénom de son maître, Giordano.

En 1576, alors qu'il est ordonné prêtre, il sera déclaré hérétique parce qu'il ne croit ni en la virginité de Marie, ni en la divinité de Jésus. C'est le début de sa croisade contre la croyance commune. En 1582, le roi Henri III découvre ses écrits sur la mémorisation et lui offre une chaire au Collège des lecteurs royaux à Paris. Puis il donnera des conférences sur la doctrine de Copernic en Angleterre. C'est là-bas qu'il publiera son œuvre "Le banquet des Cendres" inspirée d'un débat qu'il a eu avec deux docteurs d'Oxford, le mercredi des Cendres 1584. Ce jour marque le début de la Carême et est fêté le lendemain du Mardi Gras. Son œuvre prendra la forme d'un dialogue. Ces deux docteurs qui défendent le géocentrisme contre l'idée d'un univers infini comprenant des multitudes de mondes défendus par Giordano Bruno. Malheureusement, son point de vue sera loin de faire l'unanimité et il devra quitter Londres. Après cela, rare seront les endroits où l'ex-dominicain sera toléré. Il sera finalement transféré à Rome en 1593 pour être enfermé dans les geôles du Vatican. Jusqu'à son exécution, le 17 février 1600, où on lui coupera la langue et où il sera brûlé, Giordano Bruno reniera la vierge, le Christ, la transsubstantiation et évidemment, le géocentrisme. Jusqu'au bout, il refusera de nier ses idées et se battra pour la liberté d'expression et la remise en cause des dogmes. Loin d'être un scientifique, Bruno était à l'écoute de son intuition et se permettait d'aller plus loin que Copernic dans ses thèses puisqu'il affirmait l'existence d'un univers infini, mais évidemment, sans être capable d'apporter des preuves concrètes. Il avait pour seule preuve une théorie avancée par le romain Lucrèce au Ier siècle : "Si on tire une flèche et qu'elle rencontre un mur, on atteint la limite mais si on peut tirer une flèche du haut de ce mur et atteindre une nouvelle limite et ainsi de suite l'univers ne peut donc être qu'infini."

Après que Giordano ait découvert le texte de Lucrèce, il fit un rêve qu'il mit en écrit : "Plein de confiance j'ai pris mon envol. Et je me suis élevé en direction de l'infini, laissant loin derrière moi ce que mes semblables ne discernaient qu'à peine. Là où j'étais il n'y avait ni haut ni bas ni centre ni extrémité. J'ai vu que le soleil n'était qu'une étoile parmi tant d'autres. Et que chaque étoile était un soleil qui accompagnait des planètes semblables à la nôtre. Prendre conscience de cette immensité m'a touché comme un coup de foudre."

Alors, s'il n'était pas un scientifique, Giordano Bruno était sans aucun doute un pionnier dans la manière de repenser les textes sacrés et de penser l'univers de manière rationnelle.

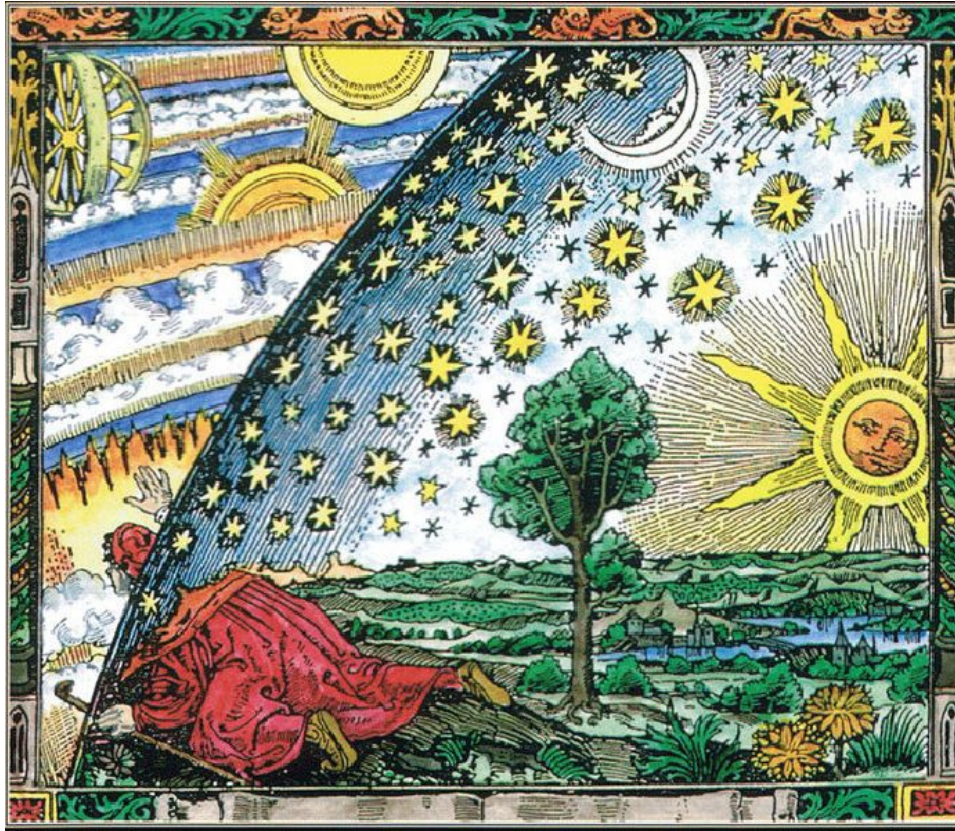


Illustration 4 - Giordano Bruno rêvant de ce qu'il y a derrière les étoiles

b) Nicolas Copernic et l'héliocentrisme

Alors que Giordano Bruno n'est pas encore né, un jeune médecin et astronome polonais qui va venir bouleverser l'autorité suprême de cosmologie de Ptolémée. Ce dernier place la Terre au centre du monde, c'est le géocentrisme, où il définit que les planètes sont accrochées à un grand cercle dont le centre tournait lui-même par rapport à un autre grand cercle surnommé "déférent". Nicolas Copernic étudie en 1491 à l'université de Cracovie les mathématiques, l'astronomie, la philosophie, le droit et la médecine avant d'aller en 1496 à l'université de Boulogne pour étudier le droit canonique et le droit civil en plus de la médecine, le grec et l'astronomie. Il y fera la rencontre de l'astronome Domenico Maria Novara qui est l'un des premiers à remettre en cause la cosmologie de Ptolémée. Dans les années 1513, il écrira la première ébauche à sa cosmologie héliocentrique. Son ouvrage le plus célèbre, qui relate justement sa cosmologie, s'appelle *Des révolutions des sphères célestes* et ne sera publié qu'en 1543, la même année que la mort de Nicolas Copernic.

La révolution copernicienne fait perdre son statut de centre de l'Univers à la Terre et le transfère au Soleil. Il affirme que la Terre est animée de deux mouvements, l'un entraîne une rotation de la planète sur elle-même où elle accomplit un tour complet en vingt-quatre heures.

Et un second autour de l'astre centrale, le Soleil, en un an. Cette cosmologie vient placer la Terre à la même place que les autres planètes. Toutes les autres étoiles sont dites fixes. Cependant, de la même manière que Giordano Bruno, Copernic n'était pas en mesure de prouver totalement ce qu'il avançait. Pour lui, si parmi toutes les orbes célestes, le Soleil devait régner en son centre, c'est parce qu' "il est le plus parfait de l'Univers." Il faudra attendre 150 ans pour qu'Isaac Newton apporte les preuves de l'héliocentrisme. Mort peu après la publication de son œuvre, Nicolas Copernic n'eut pas à défendre ses idées bien qu'il fût très longtemps remis en question et controversé par diverses religions.

c) Galileo Galilée et la lunette astronomique

L'observation de la voûte céleste a toujours eu une place importante pour l'humanité comme nous l'avons vu avec la peinture rupestre d'un objet céleste. L'observation peut être sujette à contemplation, mais aussi à interrogation. C'est ainsi que l'astrologie est née, cette science s'intéresse à la configuration céleste pour comprendre le comportement humain en société ou individuellement. Ainsi de nombreux rois et reines s'entourent d'astrologue pour étudier les conjonctions astrales avant de prendre de grandes décisions. Un des exemples le plus connu est celui de Catherine de Médicis qui était entourée de Nostradamus.

Au début du XVIIe siècle, Galileo Galilée pousse l'observation des étoiles un cran plus loin avec l'invention de la lunette astronomique. En réalité, on doit la création de la lunette au hollandais Hans Lippershey en 1608. Inspiré par le principe, Galilée fera réaliser une copie permettant de grossir une vue trente fois. L'instrument inventé par le hollandais n'avait pas pour vocation d'observer les étoiles, c'est donc Galileo qui en fera l'expérience. Se faisant, il découvrit d'innombrables secrets de la Voie Lactée : les étoiles invisibles à l'œil nu, les mers lunaires et surtout les quatre satellites de Jupiter qu'il nomme "planètes médicéennes", plus tard renommés Io, Europe, Ganymède et Callisto. Alors qu'il est nommé savant officiel par l'Eglise catholique, il découvre les taches solaires prouvant l'imperfection de l'astre lumineux et décide de se déclarer ouvertement copernicien. Il va se mêler de questions religieuses sensibles.

À compter de ce moment-là, le cardinal inquisiteur Robert Bellarmine, responsable du bûcher de Giordano Bruno, interdit à Galilée de prêcher l'héliocentrisme.

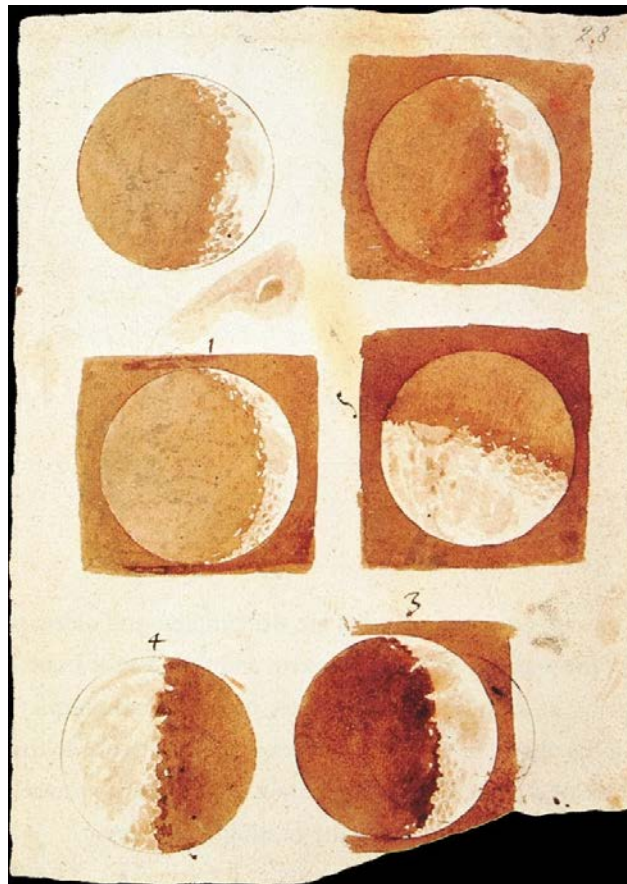


Illustration 5 - Dessin de Galilée suite à son observation lunaire

En 1616, Galilée dessine les différentes phases de la lune suite à ses observations à la lunette astronomique. C'est une date très importante pour le space art puisque Galilée va créer la première représentation visuelle d'une observation céleste. Jamais dans l'histoire il n'y a eu d'œuvre avant celle-ci qui cherchait à se rapprocher de la véracité scientifique d'un élément du cosmos sans faire le rapprochement à la religion ou passer par une interprétation personnelle. Les dessins de Galileo Galilée sont le fruit de son observation et il tente d'être le plus juste possible.

Il continuera à défendre l'héliocentrisme jusqu'en 1633 où il fut jugé pour ses propos. Il y renoncera afin d'éviter la condamnation à mort comme Giordano Bruno.

Ainsi, ces trois hommes ont chacun apporté leur pierre à l'édifice pour l'émancipation de la science et de l'art pour s'acquitter de leur passé religieux. Ouvrant à l'avenir un chemin riche en hypothèses, interprétations, appropriations, et découvertes.

Une représentation scientifique de l'univers

1. Une volonté de fidélité dans la reproduction

a) Des peintres religieux qui camouflent l'astronomie dans leurs œuvres

Le XVe siècle, par son renouveau de la pensée du monde céleste, d'un point de vue scientifique, va amener l'art religieux vers des représentations plus importantes de la voûte céleste. On compte très peu de peinture astronomique avant cette époque. Une des premières œuvres chrétiennes sur l'astronomie a été le Mausolée de Galla Placidia construit dans les années 430 à Ravenne en Italie. On y retrouve des mosaïques sur le martyre de Saint Laurent, mais aussi sur Saint Paul et Saint Pierre. Et sur la voûte du mausolée on retrouve un ciel étoilé, toujours en mosaïque, avec une croix christique.

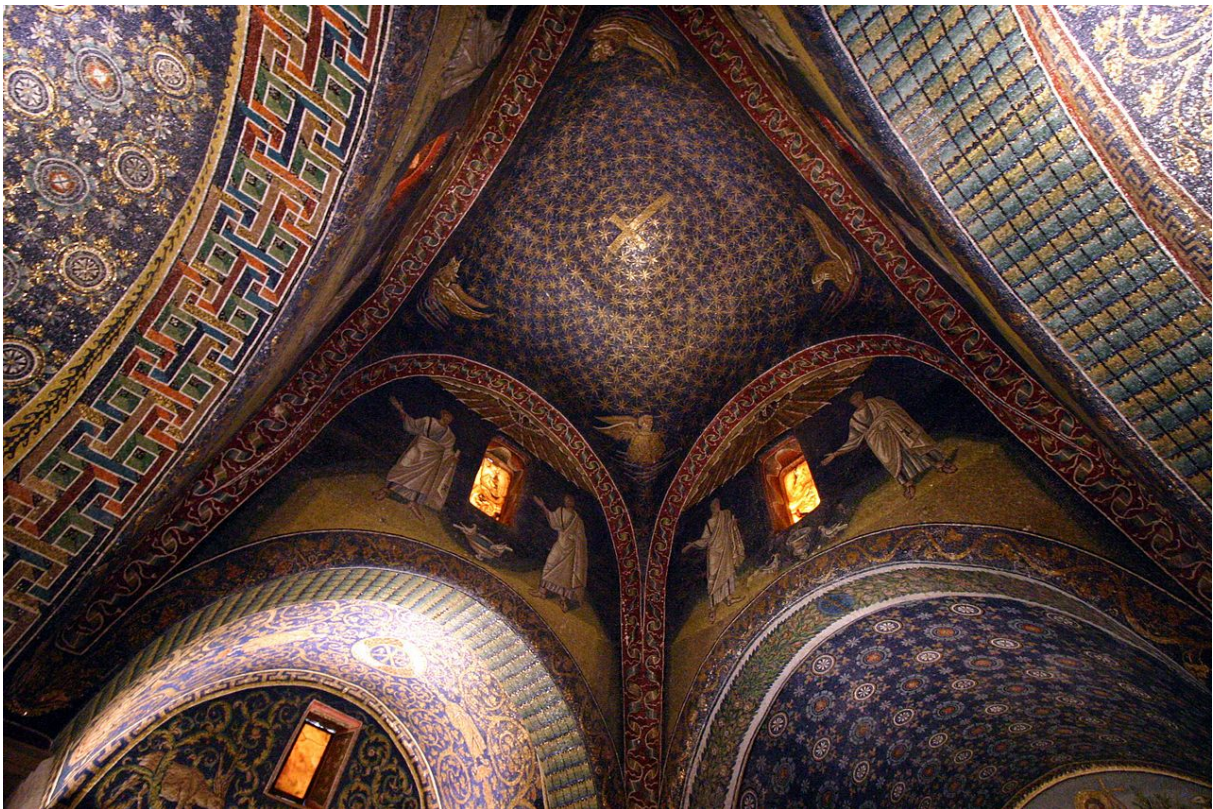


Illustration 6 - Coupole étoilée du Mausolée de Galla Placidia

L'astronomie a évidemment une place en arrière-plan dans les peintures religieuses et n'a aucune vocation à remettre en question les paroles de la Bible. Pour le mausolée, c'est la voûte céleste observable à l'œil nu qui est représentée, il n'y a donc pas d'interprétation

réelle. Cependant, entre 1303 et 1306, Giotto peint l'*Adoration des Rois Mages* qui met en image la vénération des Rois Mages pour l'Enfant Christ. Dans la Bible, les Rois Mages se voient annoncer la naissance de Jésus grâce à l'apparition de l'étoile de Bethléem. Cette dernière les guidera jusqu'à l'étable. Dans l'œuvre de Giotto, l'étoile est remplacée par une comète, une interprétation audacieuse pour l'époque mais très intéressante car on peut comprendre aujourd'hui comment "une étoile" a pu apparaître et les guider vers un lieu. Certains théologiens défendent la théorie que l'étoile de Bethléem serait en réalité la comète de Halley.



Illustration 7 - *L'adoration des Mages*, Giotto, 1303-1306

Edmond Halley démontra en 1705 que les comètes apparus en 1531, 1607 et 1682 n'étaient qu'une seule et même comète et que celle-ci se déplaçait sur une orbite elliptique autour du Soleil et avec une période de révolution de 76 ans. Il prédit son retour en 1758 et il avait raison. Malheureusement Edmond Halley avait quitté notre monde pour assister à sa prédiction scientifique qui permit à la mécanique newtonienne de valider ses théories.

Les chrétiens ont aussi peint des phénomènes célestes qu'ils interprétaient comme des signes divins. Les éclipses solaires notamment étaient sujet à curiosité et épouvante. Dans les textes juifs et chrétiens, les éclipses étaient causées par l'interposition de la main de Dieu devant

l'astre privant ainsi l'humanité de sa lumière divine. À de rares fois, elle fut associée à des miracles, notamment chez Taddeo Gaddi dans sa fresque *L'Annonce aux bergers* en 1330 à la Chapelle Baroncelli de la Basilique Santa Croce de Florence. L'annonce précède l'adoration des Rois Mages, il s'agit du passage où un ange vient annoncer aux bergers la naissance du Messie. Dans ce tableau, l'ange vient se positionner devant le Soleil et ainsi éclipser sa lumière plongeant le ciel dans l'obscurité. Pourtant dans ce tableau, même si le ciel est obscur, les bergers sont inondés par la lumière de l'ange positionné à la place du Soleil. Racontant ainsi la lumière divine qui vient toucher les humbles bergers.



Illustration 8 - *L'annonce aux bergers*, Taddeo Gaddi, 1328-1330

Gaddi et Giotto vont donc nous proposer des épisodes de la nativité riche en phénomène astronomique. Mais ces événements n'ont pas toujours été annonciateurs de miracle. En 1834, John Martin va peindre une scène religieuse très sombre, c'est *Le Déluge*. Lorsqu'il peint cette œuvre romantique, l'astronomie a fait un grand pas en avant, des hommes comme Copernic, Galilée, Kepler, Newton et Halley avait fait avancer la science astrale à un nouveau niveau, on comprenait les éclipses et les comètes. Dans cette interprétation de fin du monde, l'astre lumineux est éclipsé suite à une collision entre une comète et la lune. Elle met en avant une théorie personnelle de l'auteur sur une scène biblique avec les connaissances nouvelles de la science.

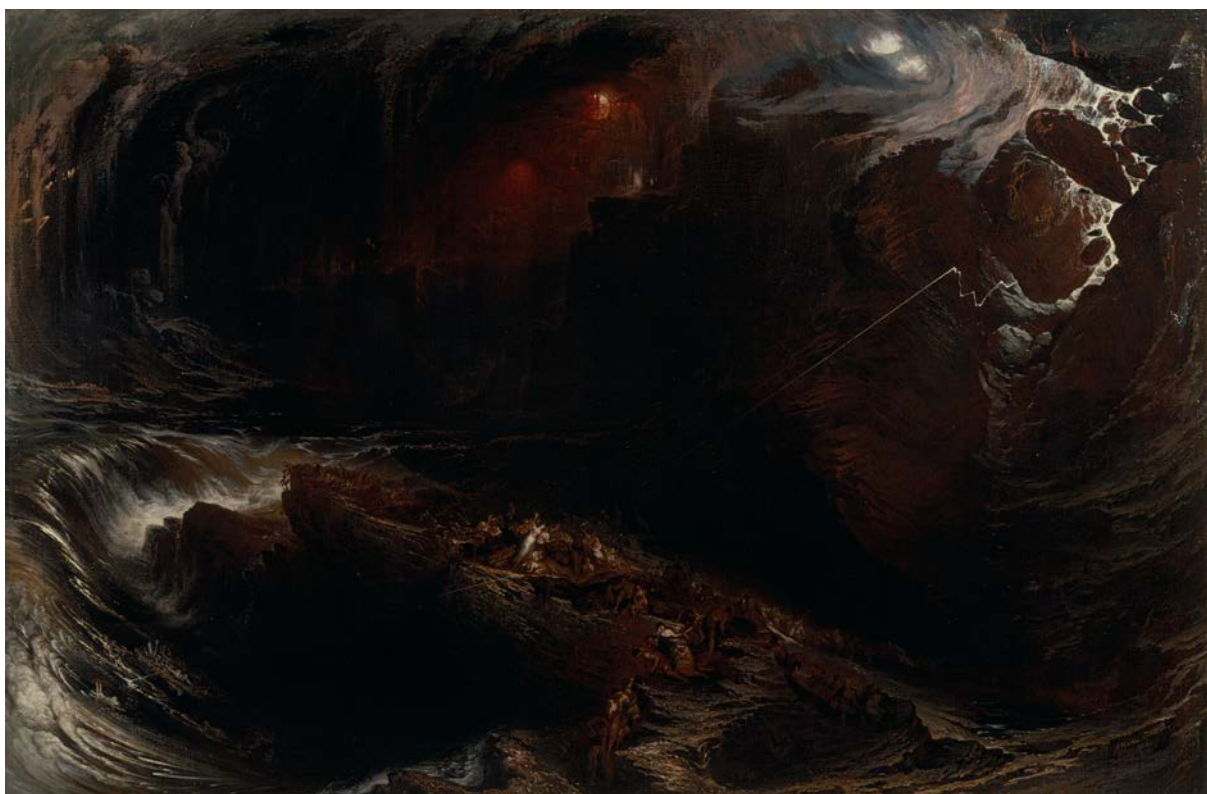


Illustration 9 - *Le Déluge*, John Martin, 1834

Dans les années 1400, alors que l'astrologie gagne de l'importance aux yeux des grands de ce monde, on retrouve dans la basilique de San Lorenzo à Florence le *Ciel astronomique* peint sur la voûte de la chapelle de l'abside de la *Sagrestia Vecchia* par Giuliano Pesello. Mille ans après le mausolée de Ravenne, cette voûte représente les différentes constellations étudiées des siècles plus tôt par Ptolémée. Ironie du sort, Ptolémée avait étudié ces constellations au II^e siècle, soit 2 siècle avant l'œuvre de Ravenne ! Mais ce n'est qu'en 1442 que l'art chrétien mettra en image ces constellations. Ce siècle marquera un vrai tournant vers la recherche

véridique des secrets célestes. On retrouve ces constellations dans le manuscrit *Les très riches heures du duc de Berry* commencé en 1410 et achevé en 1486.



Illustration 10 - La constellation de Persée du *Ciel Astronomique*, Giuliano Pesello, 1442

Au début des années 1500, Raphaël va lui aussi s'intéresser à l'astronomie avec deux peintures notables. Tout d'abord *l'astronomie* en 1508 peinte au plafond de la chambre de la signature au Vatican qui représente la Terre ronde, entouré par la voûte céleste et ses constellations en trois dimensions. Puis dans la *Madone de Foligno* en 1512 où l'on peut voir en arrière-plan une comète s'écraser sur la ville. L'œuvre a été commandée par le secrétaire du pape Jule II qui voulait remercier la vierge d'avoir épargné sa maison lorsque la foudre est tombée sur sa ville. Raphaël a bien représenté symboliquement la foudre avec l'arc de cercle au-dessus de la ville mais il a inséré une comète qui s'écrase sur la ville.



Illustration 11 - *L'astronomie*, Raphaël, 1508

Avec la révolution copernicienne et l'invention de la lunette astronomique, l'art et la religion vont porter un œil nouveau sur les cieux. C'est le cas très tôt avec *La fuite en Egypte* d'Adam Elsheimer en 1609 qui peindra pour son temps, le paysage nocturne le plus réaliste avec la représentation astronomique de la Voie Lactée, de la constellation de la Grande Ourse et de celle du Lion. Il a inspiré de nombreux peintres tels que le Lorrain ou Pierre Paul Rubens qui représentera, non pas une scène christique, mais gréco-romaine avec *La Naissance de la Voie Lactée*, en 1636 où l'on voit Hera donner le sein à Héraclès devant Zeus sur un char tiré par des paons, animaux préférés de la déesse.



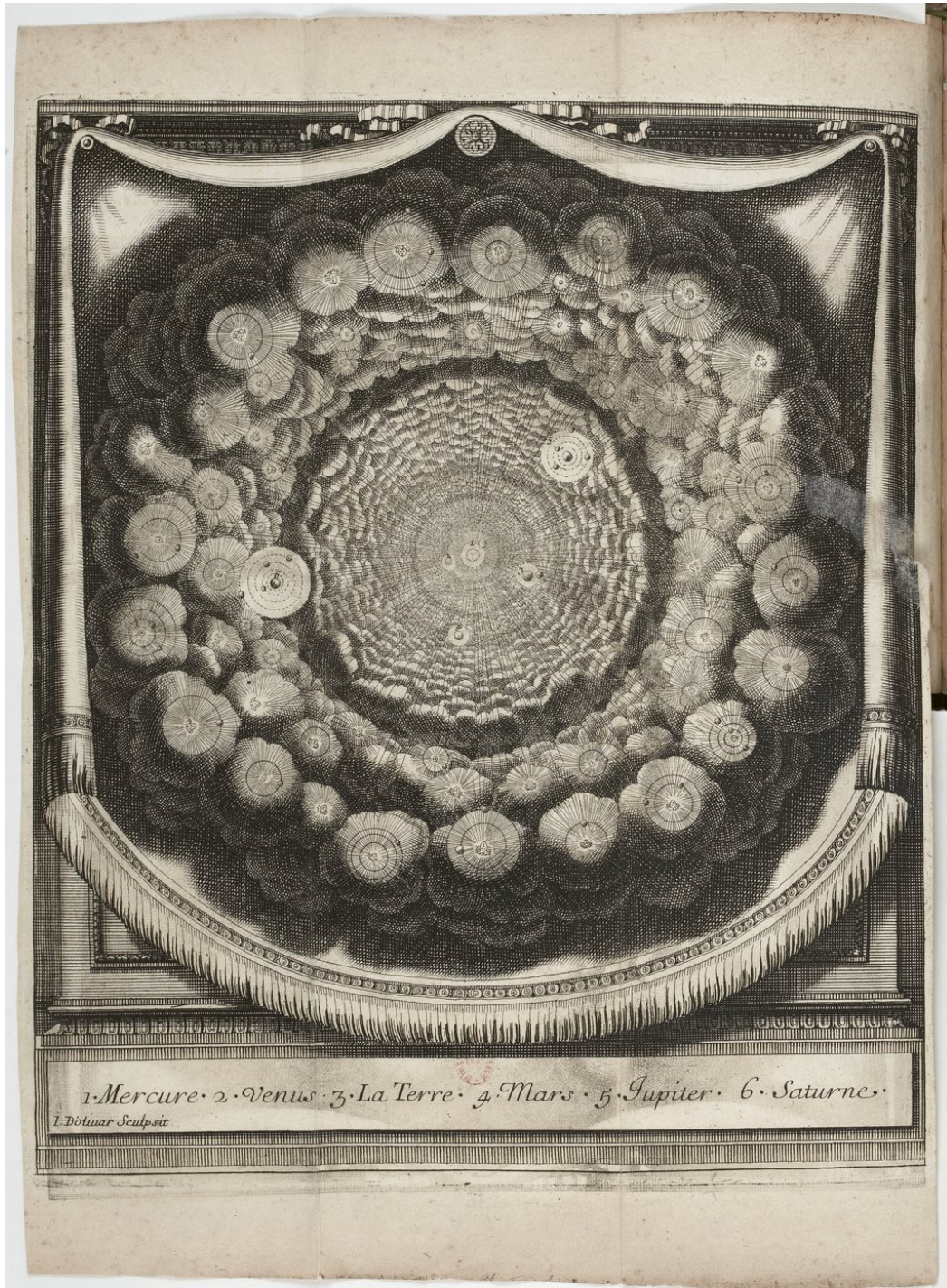
Illustration 12- *La Fuite en Égypte*, Adam Elsheimer, 1609

La lunette astronomique et les dessins de la lune de Galilée auront aussi touché Bartolomé Esteban Murillo, puisqu'en 1652 il peint l'*Immaculée Conception*, tableau de la vierge qui se tient debout sur la lune, astre à la blancheur pure, à l'image de la vierge. Même s'il est difficile de savoir si Murillo s'est inspiré des dessins de Galilée, il est indéniable qu'il a dû observer la lune ou des représentations de celle-ci pour réaliser cette œuvre, créant ainsi une collaboration scientifico-artistique.

b) Astrophysiciens, artistes et étroites collaborations

L'étude de la voûte céleste va se développer et la question de sa représentation se pose. Comment doit-on représenter un univers si vaste où les astres dansent les uns autour des autres, où des étoiles semblent fixes car profondément lointaines. On connaît la forme sphérique des astres, pourtant, on choisit en premier lieu de les représenter en deux dimensions, plus simple pour vulgariser et schématiser le mouvement des corps astraux. On trouve donc des premiers planétaires en version aplani, notamment dans le livre *Entretiens sur la pluralité du monde* où Bernard de Fontenelle en 1686 va vulgariser l'essentiel de la physique de Descartes réactualisé par les plus récentes découvertes de l'astronomie. Il agencera le livre sous la forme d'un dialogue entre le narrateur et la marquise de la Mésangère sur la pluralité du monde. On retrouve dans son livre une représentation du système solaire en

deux dimensions avec le soleil et son centre et ses 6 planètes : Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter et Saturne. En l'effet, à l'époque Uranus et Neptune n'ont pas encore été découvertes.



Source gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France

Illustration 13 - Le système solaire, *Entretiens sur la pluralité du monde*, Bernard de Fontenelle, 1686

Il faudra attendre 1781 pour que Herschel découvre Uranus et 1846 pour que Le Verrier découvre Neptune. Les anneaux de Saturne ont été découverts en 1610 par Credi mais c'est Jean Dominique Cassini qui les comprendra en 1675. Les mentalités évolueront avec le temps, on accepte que la Terre tourne autour du Soleil, et les planètes et les étoiles n'aient pas toutes la même taille. En 1744, Eberhard Kindermann va publier en image un premier modèle en trois dimensions du cosmos. Deux ans plus tôt, on retrouve l'*Atlas Coelestis* qui allie une représentation 3D de notre planète surplombée par le système solaire en deux dimensions entouré par des étoiles ayant leur propre système solaire.

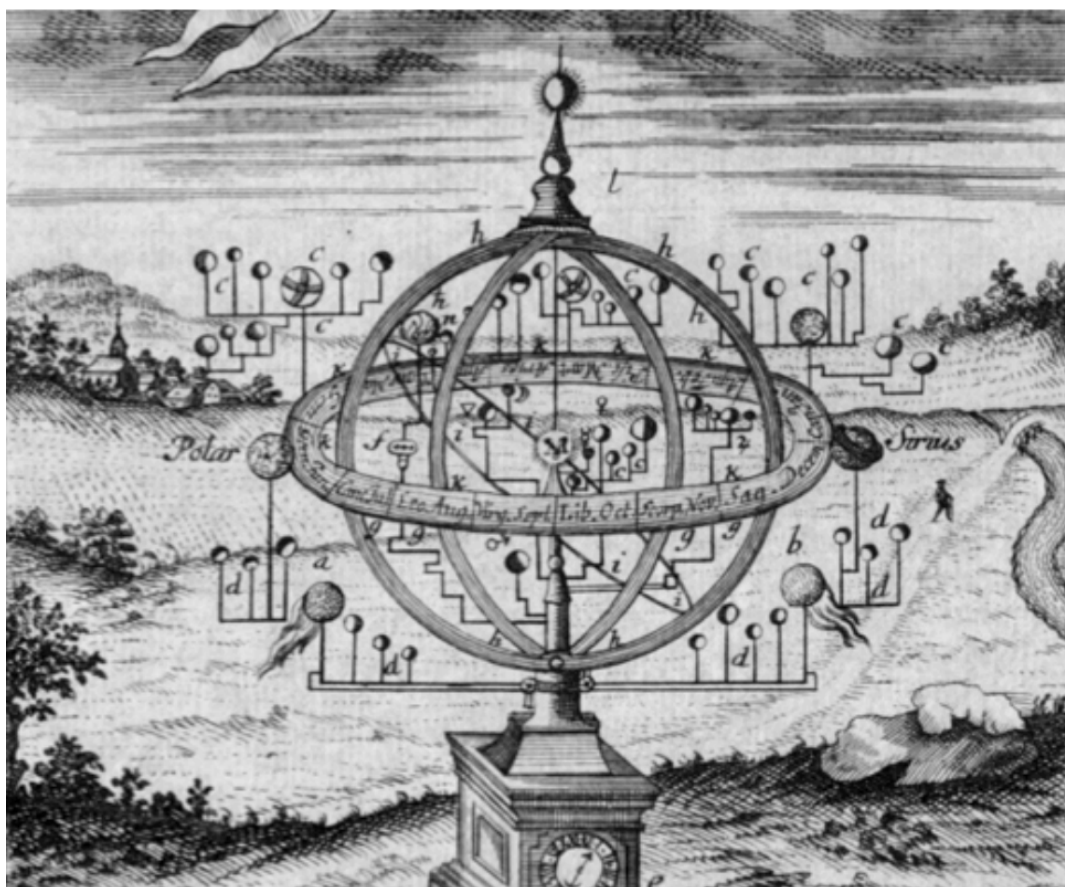


Illustration 14 – Representation 3D d'Eberhard Kindermann, 1744

À cette époque, les peintres commencent à représenter des astrophysiciens, astrophysiciennes et planétaire. On retrouve par exemple *Philosophe faisant son exposé sur le planétaire* en 1766 par Joseph Wright of Derby qui reproduit un soleil miniature qui illumine les protagonistes. Des enfants regardent ébahis la reproduction de l'astre, mettant en avant l'essor de la vulgarisation scientifique de l'époque.



Illustration 15 - *Philosophe faisant son exposé sur le planétaire*, Joseph Wright of Derby, 1766

Mais l'âge d'or du space art ne commencera qu'au milieu du XIXe siècle avec les premières œuvres de vulgarisation destinées au grand public ainsi que la vraie collaboration entre les astrophysiciens et les artistes. En 1865 Jules Verne travaille sur des nouvelles de science-fiction *From the Earth to the Moon* qu'il veut illustrer de dessins réalistes de la surface lunaire. Il va s'associer avec des sélénographes, des artistes dédiés à l'étude lunaire, pour obtenir des références, et créer des cartographies de la lune en portant une attention particulière aux détails. C'est grâce à ces cartes qu'Émile Antoine Bayard et Alphonse Neuville illustreront les nouvelles de Jules Verne. Il fera ensuite appel à Paul Dominique Philppoteaux en 1877 pour dessiner Jupiter et ses satellites vus depuis un astéroïde ainsi qu'une illustration des anneaux de Saturne observés depuis sa propre surface pour la nouvelle Hector Servadac. Ces illustrations ont été étudiées sérieusement pour tenter d'imaginer ce qu'un observateur extra-terrestre verrait depuis ces positions. Bien qu'encore approximatif, les dessins de science-fiction vont commencer à fleurir. On doit aussi énormément à Camille Flammarion, astronome vulgarisateur qui publiera beaucoup de revues pour expliquer des phénomènes astronomiques au grand public. Souvent accompagné de dessins très précis que l'on doit entre autre à Paul Fouché, Motty Blanadet ou Hellé. On retrouve parmi ces dessins des paysages de Vénus, des mers et des montagnes de Mars et des vues de la Terre depuis la

Lune. On doit ces dessins de la Terre à Abbé Théophile Moreau, artiste de la fin des années 1800 et directeur de l'observatoire de Bourges.

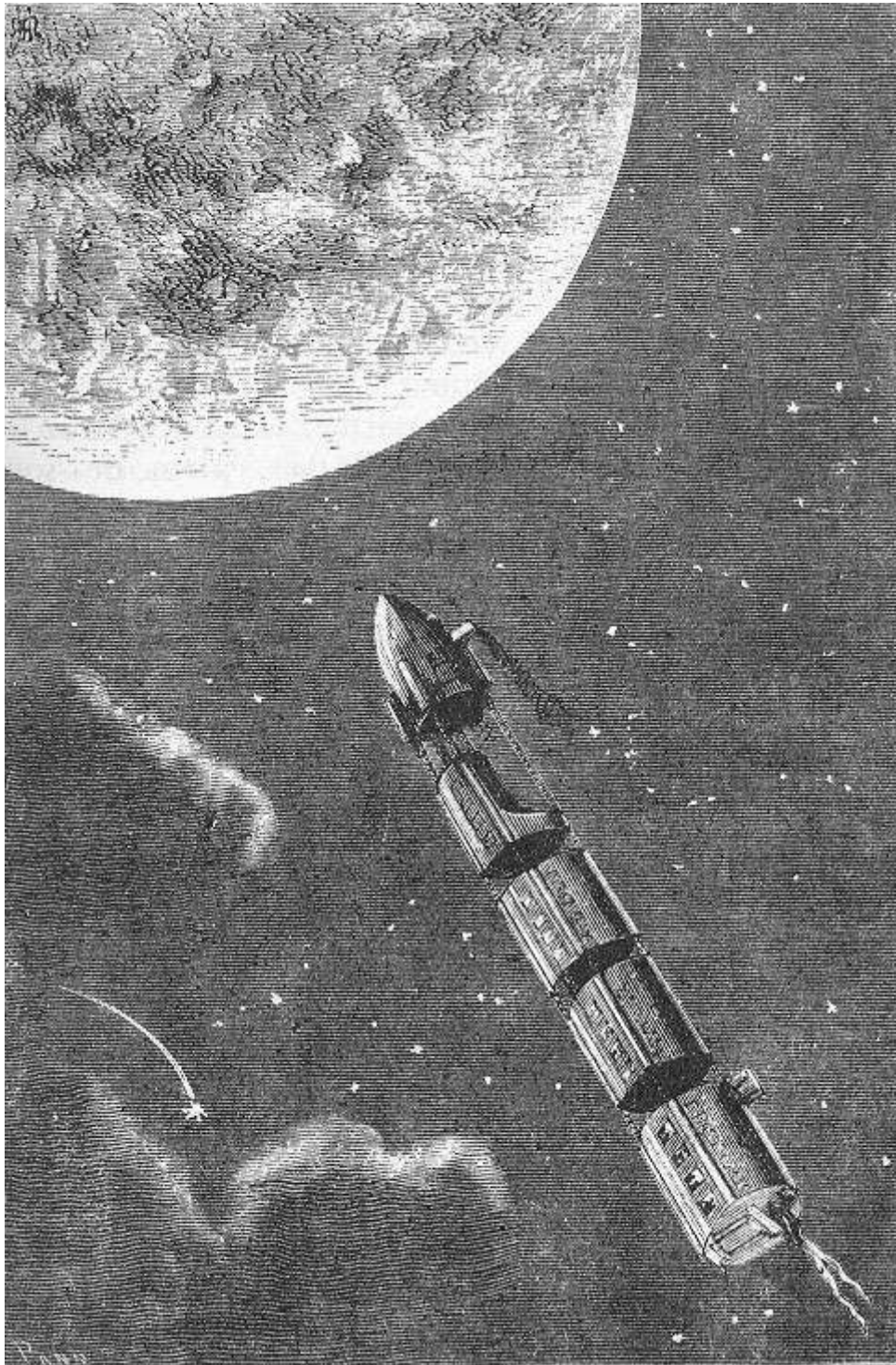


Illustration 16 - Illustration de *From Earth to Moon*, Jules Verne, 1865

Mais l'art astronomique doit son essor à trois hommes : Scriven Bolton, Chesley Bonestell et Lucien Rudaux. Scriven Bolton était un astronome amateur anglais et un artiste. Si les artistes cités plus haut ont dessiné l'espace, ce n'était pas leur domaine de prédilection. Bolton a véritablement été le premier artiste à se concentrer sur les paysages astronomiques poussant

ses vues d'artistes dans des détails importants qui ont ensuite été publiées dans de nombreux magazines et livres en Europe et Amérique pendant les années 1920.

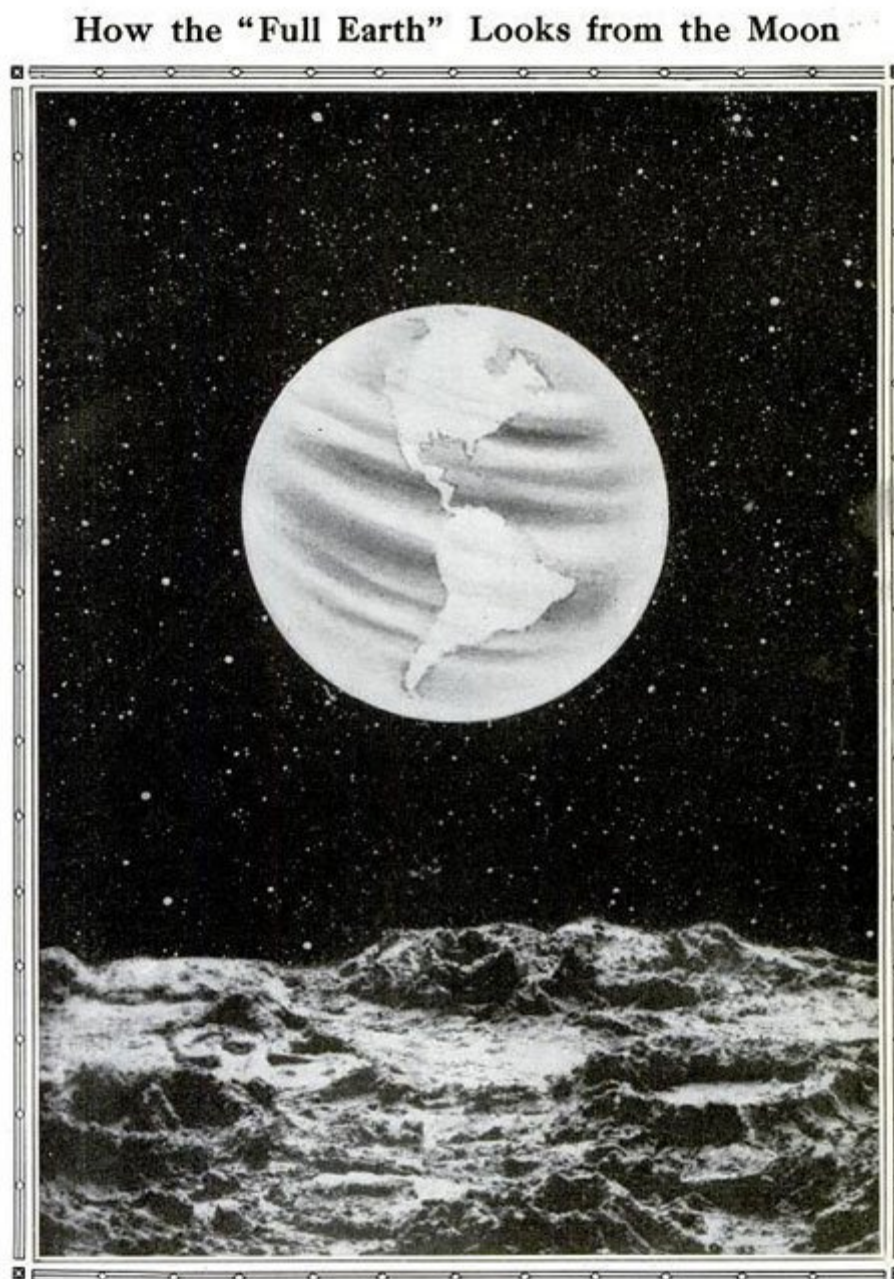


Illustration 17 - La Terre vue depuis la Lune de Scriven Bolton

Chesley Bonestell, quant à lui, est un peintre américain qui a eu une carrière d'architecte puis de créateur d'effets spéciaux pour le cinéma, sur *Citizen Kane* notamment. Dans cette phase cinématographique, il comprend qu'il pourrait utiliser ses connaissances pour créer de l'art astronomique très détaillé. Il a notamment créé une série sur le voyage spatial en dessinant en couleur des vues de Saturne depuis chacun de ses satellites. Ses œuvres seront publiées dès 1944 dans le magazine *Life* puis dans *Collier's Magazine* où il créera une série d'images sur

le fantasme du voyage dans l'espace. Il offre une dimension incroyable à l'art astronomique puisqu'on raconte qu'en ayant vu ses peintures, le gouvernement américain aurait décidé d'investir dans l'exploration spatiale. Après sa révélation pour l'art astronomique, il continuera à faire des effets spéciaux au cinéma, mais orienté science-fiction. Il a pu travailler sur *Destination...Lune !* d'Irving Pichel, *La guerre des mondes* ou *La conquête de l'espace* de Byron Haskin.



Illustration 18 - *Saturne vue depuis Mimas*, Chesley Bonestell, 1943

c) Lucien Rudaux : Rencontre avec Francis Rocard

J'ai eu la chance de rencontrer Monsieur Francis Rocard, astrophysicien au Centre National d'Études Spatiales où il coordonne la mise en œuvre du programme d'exploration de Mars. Il est aussi le petit beau fils de Lucien Rudaux et grand admirateur de son travail. Ensemble, nous avons pu discuter de l'importance de l'art astronomique, ainsi que du lien important entre la vulgarisation scientifique, les vues d'artistes et leur évolution aujourd'hui. Nous avons aussi beaucoup parlé des avant-gardistes du space art, et parmi eux Lucien Rudaux.

Lucien Rudaux né en 1874 d'un père peintre et naturaliste qui l'éduque et lui enseigne les rudiments de l'art pictural. Autodidacte en astronomie, il se passionne pour le cosmos à l'âge de quatorze ans lorsqu'il reçoit sa première lunette astronomique. Puis à l'âge de dix-huit ans, il adhère à la Société Astronomique de France et y rencontre Camille Flammarion, fondateur de cette Société Astronomique. Lucien Rudaux publiera des articles dans divers revues de science populaire afin d'enseigner aux amateurs l'art de comprendre les cieux. Même si ses articles étaient très intéressants, il se fait surtout connaître pour ses illustrations. En alliant ses compétences graphiques avec ses connaissances astronomiques, Lucien Rudaux vient apporter un souffle nouveau à la vulgarisation scientifique. En 1894, il se fait construire un observatoire privé à Donville où il peut étudier la surface de la Lune et celle des autres planètes. Il puise son inspiration de ses observations et de ses connaissances afin de dessiner, de manière véridique ou vraisemblable, la surface des autres planètes. En offrant la peinture au profit de la science, Rudaux met en scène des paysages spectaculaires et pourtant réaliste.

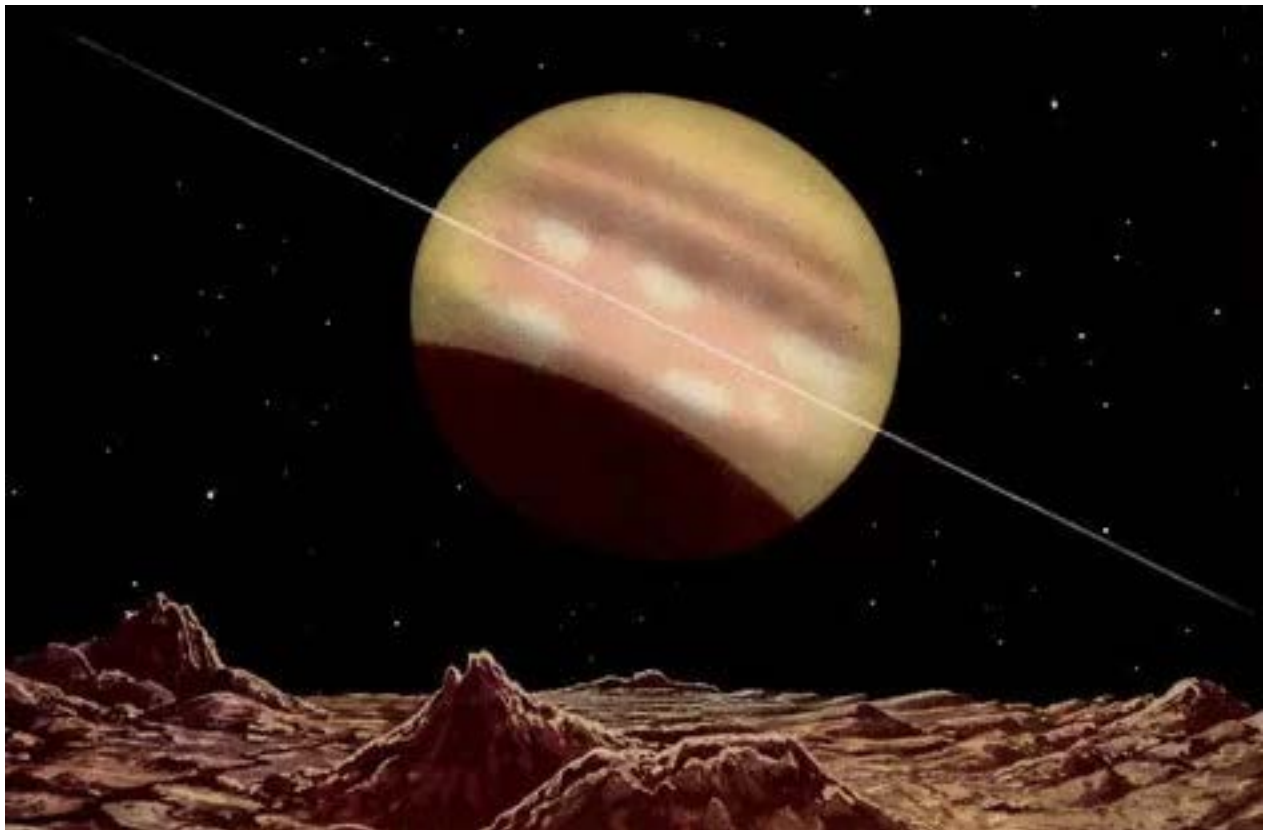


Illustration 19 - Saturne vue depuis un de ses satellites, Lucien Rudaux

Pendant longtemps, leur véracité scientifique était si juste que ses illustrations ont été utilisées dans la recherche scientifique. Francis Rocard pense même qu'Hergé s'est inspiré des dessins de Lucien Rudaux pour *Tintin Objectif Lune*.

Mais Lucien Rudaux n'était pas qu'un grand scientifique, c'était aussi un rêveur comme tout astronome. Parmi ses séries d'illustrations, on retrouve toute une série sur la spéculation de la vie extraterrestre.



Illustration 20 - Dessin sur la spéculation de la vie extraterrestre, Lucien Rudaux

Nous avons pu discuter avec monsieur Rocard du point de vue adopté par l'artiste pour représenter l'espace. Sachant qu'un œil humain n'est pas protégé par l'atmosphère dans l'espace, si on devait réaliser une vue réaliste de ce qu'un humain percevrait dans l'espace, l'œil serait "aveuglé" par le soleil, l'empêchant de voir une quelconque étoile dans l'univers. Le cosmos apparaît donc noir comme on le constate sur les images lors de la mission d'exploration lunaire de 1969. À travers une caméra ou un appareil photo, ce que l'on observe dans la voûte céleste dépend de beaucoup de facteurs, dont celui du temps d'exposition. Ainsi, il n'y a pas de vraies règles lorsque l'on crée une vue d'artiste, mais si l'on veut obtenir un maximum d'informations sur l'espace, l'objectif photographique semble être la meilleure alternative.

C'est d'ailleurs le point de vue de Francis Rocard. Même s'il est subjugué par les illustrations des grands peintres du début du XXe siècle, pour lui l'avenir de la représentation visuelle du cosmos est indéniablement la photographie.

d) Hubble et l'avènement de la photographie

Très rapidement, les astronomes ont compris l'intérêt de la photographie pour leur corps de métier. C'est François Arago, directeur de l'Observatoire de Paris en 1839, qui aurait eu l'idée d'acheter à Daguerre son brevet pour "le mettre à disposition de la France et du monde". Jusqu'au début du XXe siècle, quelques daguerréotypes astronomiques sur plaques de collodion humide sont produits mais ce procédé dispose d'une très faible sensibilité et les télescopes de l'époque ne sont pas assez lumineux pour capter la lumière. Il faut donc de longues poses d'expositions, au minimum trente minutes. Le problème étant que la Terre tourne et qu'il est difficile de compenser son mouvement lors des photographies. On résout ce problème en créant des télescopes de plus en plus lumineux et en inventant de nouveaux systèmes d'observation. On se met donc en tête de cartographier le ciel, un projet ambitieux mais qui devient possible avec les nouvelles technologies argentiques. Ce sont les frères Paul et Prosper Henry qui s'occuperont de ce fabuleux travail.

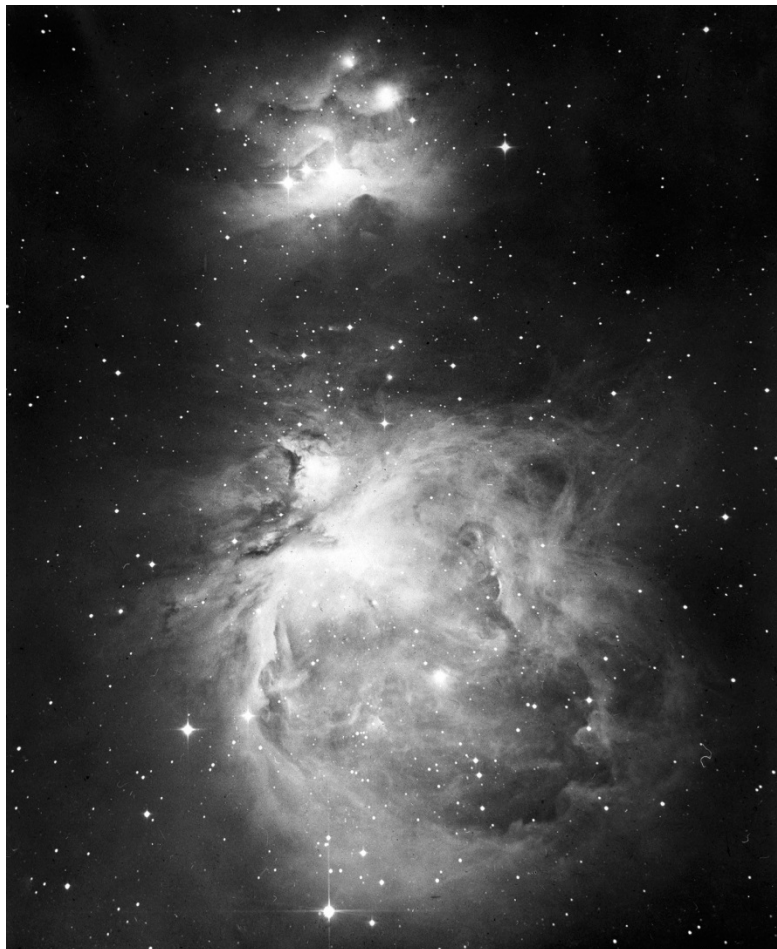


Illustration 21 - Nébuleuse d'Orion photographié en 1938 par le télescope Crossley

En 1909, on est conscient de l'utilité des télescopes et on s'attèle à la construction du plus puissant télescope de l'époque sur le Mont Wilson en Californie à 1700m d'altitude. Il est de plus équipé des nouvelles plaques photographiques de l'époque qui ont une sensibilité bien supérieure aux anciennes. À 100kms de là, sur le mont Palomar, naîtra en 1949 deux télescopes géants dont Hale, qui doit son nom à George Hale et qui a un diamètre de 5 mètres,. Grâce aux observations astronomiques, Edwin Hubble a pu démontrer l'existence d'autres galaxies en dehors de la Voie Lactée. La photographie argentique astronomique viendra s'améliorer jusqu'à l'invention du Kodak Technical Pan 2415 au début des années 1970 qui permet d'obtenir une image noir et blanc avec une hypersensibilité et avec un grain extrêmement fin. Les observateurs vont utiliser trois films avec un filtre rouge, vert, bleu pour obtenir une image composite en couleur, c'est la trichromie. Ce fut l'un des derniers films utilisés avant les capteurs numériques.

Mais une idée encore plus folle émerge. Sachant que l'atmosphère déforme les rayonnements lumineux visibles, on envisage de placer un télescope dans l'espace. Le plus connu de tous est Hubble. Il devait être mis en orbite en 1986, malheureusement la navette chargée de cette mission, Challenger, explose. Quatre ans plus tard, l'expérience fût renouvelée avec Discovery. C'est un succès ! Équipé d'un miroir de 2.4 mètres lui permettant de restituer des images dans un large champ et d'observer le rayonnement dans le proche infrarouge et l'ultraviolet, on s'attend donc à observer des images inédites après son lancement. Hélas, le miroir comportait un défaut. Il fallut attendre 1993 pour envoyer une équipe en orbite à 590 km de la surface terrestre pour réparer le miroir. Une initiative coûteuse mais qui nous a aujourd'hui permis d'obtenir des photographies jamais égalées du fond du cosmos. Hubble nous permet d'étudier l'expansion de l'Univers, des trous noirs super massifs ou de la matière noire entre autre.

Aujourd'hui les photos sont la meilleure ressource scientifique pour comprendre tout ce qu'il se passe dans l'Univers. Hubble a aussi eu un succès inattendu auprès du grand public, ce qui a popularisé la photographie astronomique. Les photos sont à la base prises en noir et blanc pour une meilleure résolution mais grâce aux données infrarouges, micro-ondes, rayon X, gamma etc...On arrive à recréer des images en couleurs, interprétées. Alors que Hubble va être désorbité en 2021, le télescope spatial James Webb prendra son relais. Équipé d'un miroir de 6,5 mètres, il devrait être mis en orbite à 1,5 millions de kilomètres de la Terre pour observer les premières étoiles et galaxies formées après le Big Bang.



Illustration 22 - Galaxie M83 photographiée par Hubble et colorisée ensuite

En attendant ces futurs images révolutionnaires, la NASA vient de publier une image de la surface martienne enregistrée par Curiosity qui compte 1.8 milliards de pixels et en couleur ! Elle a été composée de plus de 1000 images. En 400 ans nous sommes passés du premier dessin de Galilée de la surface lunaire à une photo très haute résolution de la surface martienne.

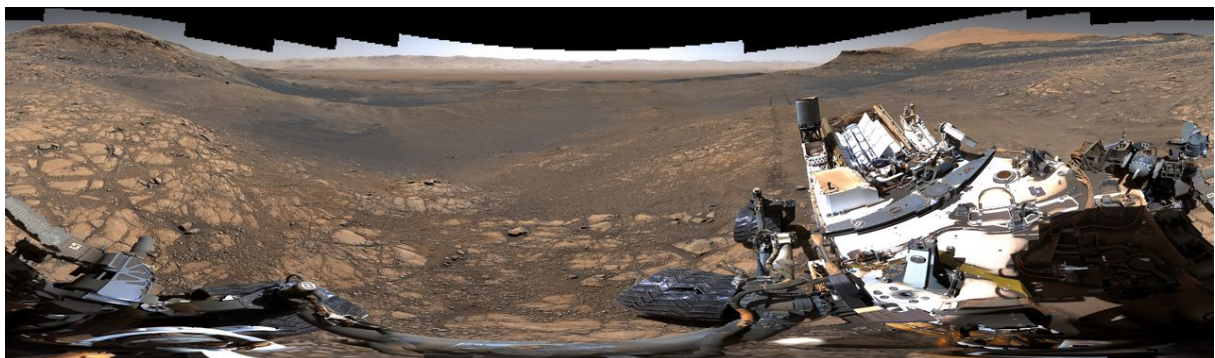


Illustration 23 - Photographie du sol martien par le rover *Curiosity*

2. EXO-Tool : Outil de création d'exoplanète

a) Genèse du projet et rencontre avec Guillaume Hébrard

Dans l'optique d'expérimenter sur la représentation visuelle de données astronomiques, je vais prendre dans cette partie le point de vue d'un artiste scientifique. Je vais étudier les avantages de la création visuelle dans la recherche de véracité et explorer les limites de ce point de vue. Ma première expérimentation porte sur la création d'un outil de rendu procédural permettant de générer une vue d'artiste d'exoplanète à partir de données astrophysiques. Les chasseurs d'exoplanètes arrivent à récupérer quelques informations sur les exoplanètes et leur étoile telle que leur rayon, leur masse, leur période orbitale, leur excentricité ou leur demi grand axe. Avec ces quelques données, je peux calculer des éléments supplémentaires qui vont me permettre d'obtenir une représentation précise de leur orbite et position par rapport au soleil ainsi qu'une représentation sommaire de la planète. Il existe un nombre inimaginable d'exoplanètes dans l'espace, certaines doivent certainement avoir des caractéristiques qui dépassent notre imagination. Mon outil n'a donc pas vocation à proposer des visuels exhaustifs mais principalement d'être un point de départ pour de la création d'exoplanète pour un artiste.

J'ai commencé mes recherches en étudiant les travaux de Michel Mayor, astrophysicien suisse, qui découvre en 1995 la première exoplanète, avec son doctorant de l'époque Didier Queloz, 51 Pegasi b. Le 8 octobre 2019, ils sont tous deux récompensés par le prix Nobel de physique.

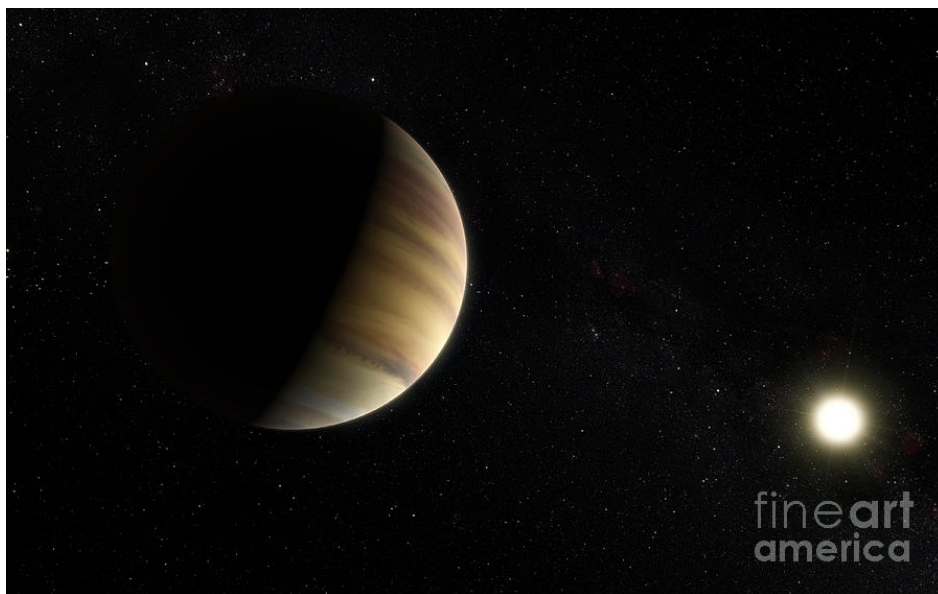


Illustration 24 - Vue d'artiste de 51 Pegasi b par Martin Kornmessernick

À l'heure actuelle, nous connaissons deux méthodes pour détecter les exoplanètes. La première est la méthode de vitesse radiale. Sachant que la gravitation de deux corps célestes vont s'influencer, cette technique repose sur la perturbation qu'une planète va provoquer sur le mouvement de son étoile dû à l'attraction gravitationnelle. On recherche les infimes variations périodiques dans la vitesse de rotation de l'étoile afin de déduire ensuite la période de la planète ainsi que sa masse approximative. C'est cette méthode qu'ont utilisé Didier Queloz et Michel Mayor pour détecter 51 Pegasi b.

La seconde méthode de détection est dite "de transit". On observe la luminosité d'une étoile afin de détecter des baisses légères revenant de manière périodique. Ces baisses de luminosité nous informent de la présence d'une planète et nous permet de définir sa période et une estimation de son rayon. Le satellite Corot a découvert des dizaines de planètes avec cette méthode, et le satellite américain Kepler a repéré plus de 2300 candidates.

J'ai eu la chance d'assister à une conférence de Guillaume Hébrard, astrophysicien et directeur de recherche au Centre National de Recherche Spatial, et d'Emmanuel Robin.

La conférence portait sur l'exoplanète HD 80 606 b qui est un système particulier puisque c'est l'orbite la plus excentrique, c'est à dire très allongée, que l'on connaisse. Guillaume Hébrard a pu revenir sur les objectifs de la recherche d'exoplanètes et a énuméré 6 missions portées par leurs recherches : l'exploration de la diversité de l'univers, la détection d'exoplanètes particulières, lister les propriétés statiques, comprendre les modèles de planètes, trouver des analogues à la Terre, c'est-à-dire où la vie est propice, et enfin, trouver de la vie extra-terrestre.

Pendant cette conférence, j'ai obtenu beaucoup d'informations sur l'exoplanète HD 80 606b qui ne sont pas forcément sur les bases de données des sites qui répertorient les exoplanètes. Je m'en suis donc servi pour tester mon outil. J'ai notamment appris que son étoile HD 80 606 était séparée de HD 80 607 de seulement 1400 Unité Astronomique, c'est à dire à peu près 209 milliards de kilomètres. On dit que ces deux astres sont des étoiles binaires. L'exoplanète ayant une forte excentricité, elle s'approche très lentement de son étoile mais s'en éloigne très rapidement puisque l'attraction gravitationnelle est plus forte à proximité de l'étoile. À cause de cette excentricité, on estime une variation de la température en quelques heures entre 500 Kelvin et 1400 Kelvin, c'est-à-dire un passage de 216°C à 1200°C !

Emmanuel Robin est ensuite intervenu sur les planétaires, la représentation d'un système planétaire à une échelle proportionnelle. En l'écoutant, j'ai rapidement compris que la logique d'un planétaire est exactement la logique que je devais adopter sur mon logiciel d'animation

3D. Si je voulais représenter les exoplanètes dans une échelle réaliste sans avoir des scènes 3D avec des objets séparés par des milliards de kilomètres et donc avoir des rendus indéfiniment lents, cette méthode est parfaite. Grâce à cette conférence, j'ai décidé qu'étant donné que je représenterai à chaque fois qu'une seule étoile par système, toutes les étoiles des systèmes planétaires auraient la même taille, c'est à dire une unité sur mon logiciel d'animation 3D. La taille de l'étoile devra tout de même être renseignée pour déterminer, mathématiquement, combien vaut une unité dans ma scène. Par exemple, si l'étoile a un rayon de 1000 km dans la vraie vie, et qu'elle mesure une unité dans l'espace du logiciel, alors pour mes calculs, une unité vaudra 1000 km. Je pourrais ensuite calculer les distances et proportions des exoplanètes.

Après une évolution de mon EXO-Tool, j'ai pu revoir Guillaume Hébrard pour avoir ses retours sur mon outil et me permettre de l'améliorer. Je reviendrai sur ses propos au cours de ce chapitre.

b) Mathématiques et images de synthèses : la solution Houdini

La première étape a été de choisir sur quel logiciel j'allais développer mon outil. L'objectif n'était évidemment pas de recréer un moteur de rendu mais de me concentrer sur la partie création de système exoplanétaire. Parmi les étapes de créations de l'outil, je dois d'abord modéliser l'étoile et la planète selon leur coefficient d'aplatissement, créer une interface pour indiquer toutes les données astronomiques liées à l'exoplanète et son étoile, calculer la taille de la planète, sa densité, sa température ou son orbite pour ensuite la positionner correctement dans l'espace et lui définir une texture selon ses informations de densité, température et atmosphère. Puis je dois préparer la caméra nécessaire au rendu et la lumière émise par le soleil. Ces deux étapes doivent être fonctionnelles en toute position de la planète sur son orbite. Enfin, si l'utilisateur souhaite améliorer l'image, je prépare l'étape du rendu et prépare les passes de compositing. Une option d'export des modèles 3D et des textures sera aussi disponible. Il faut donc un logiciel capable de gérer toutes ces étapes et de les faire communiquer entre elles en temps réel. Étant donné le temps dont je disposais pour réaliser une version alpha de l'outil, j'ai choisi de le réaliser sous la forme d'un Digital Asset sur Houdini.

Houdini est un logiciel d'animation 3D développé par SideFX et qui se distingue par son approche procédurale de chaque étape de la production 3D. Il dispose d'opérateurs permettant d'agir sur divers objets et d'effectuer différentes tâches selon le contexte. Les nœuds, ou

nodes, prennent une ou plusieurs entrées pour effectuer des calculs et des actions sur ces dernières et sortir ces entrées modifiées. S'il existe de nombreux *nodes* pour effectuer tout un panel d'action, il est possible de créer ses propres fonctions avec des *nodes* de VEX. C'est un langage de programmation propre à Houdini qui a des performances proches d'un code C ou C++ compilé et qui permet d'effectuer des actions sur chaque point, primitive ou même de créer des shaders par exemple.

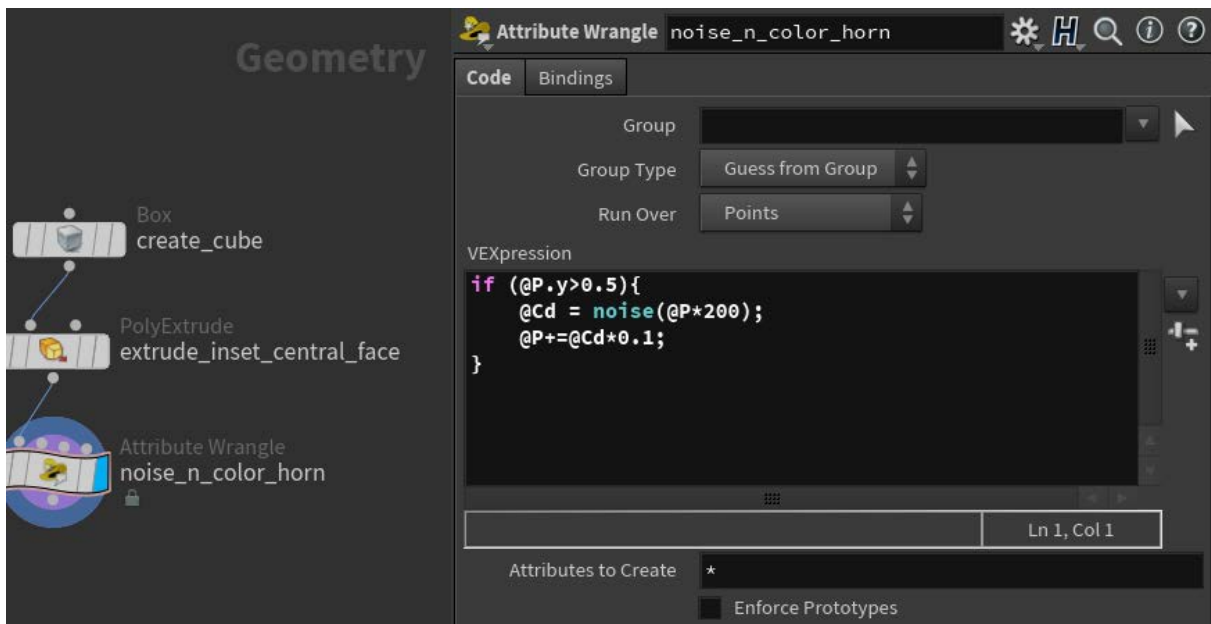


Illustration 25 - Interface nodale d'Houdini avec code VEX

Un shader est une fonction informatique propre au moteur de rendu qui permet de définir la manière dont la lumière va se comporter sur un pixel de l'image. Dans le cas d'Houdini, la programmation de shader en VEX fonctionne principalement avec Mantra, qui est le moteur de rendu interne à ce logiciel. C'est lui qui sera chargé de calculer l'image de synthèse finale. Une fois l'outil développé, il sera exporté sous la forme d'un digital asset, c'est-à-dire un node composé de plusieurs sous-nodes et où les paramètres d'expositions du node sont liés aux nodes qui le composent et vont permettre de faire évoluer la sortie de l'asset.

Houdini se présente donc comme un logiciel idéal pour la création de mon outil. Il présente cependant certains inconvénients. C'est avant tout un logiciel propriétaire, ainsi mon outil n'est pas accessible facilement car il est nécessaire d'avoir une licence pour utiliser des images de synthèses sans water mark. C'est pour cela que j'ai beaucoup hésité avec Blender qui est un logiciel d'animation 3D open source, sous licence GNU GPL, c'est-à-dire que l'on peut utiliser le logiciel pour n'importe quel usage, étudier son code source, redistribuer des

copies et que l'on doit faire bénéficier les versions modifiées afin de faire progresser le logiciel. De plus, il dispose d'un espace de compositing un peu plus évolué que le contexte d'Houdini, ce qui m'aurait permis d'assembler et de modifier toutes mes passes de rendu dans le même logiciel et donc de pousser la création de vue d'artiste d'exoplanète encore plus loin. Blender dispose depuis la version 2.8 d'un nouveau moteur de rendu, Eevee, qui a l'avantage d'être temps réel et qui aurait simplifié le choix du point de vue de la caméra pour le rendu final. Cependant, la mise en place d'un outil sur Blender doit se faire intégralement en langage de programmation (Python ou C), l'architecture interne de Blender ne permettant pas d'avoir une approche nodale procédurale. La mise en place aurait été bien plus longue que sur Houdini, c'est pour cela que j'ai privilégié ce second logiciel, afin d'avoir rapidement une première version et de continuer mes autres expérimentations. Mais l'EXO-Tool sera porté en digital asset et si ça suscite de l'intérêt, alors je développerai l'équivalent sur Blender pour le rendre accessible à tous.

La première étape a donc été de lister toutes les données primordiales qui vont me permettre de définir l'exoplanète. Tout d'abord je récupère les noms de l'étoile et de son exoplanète pour les afficher (ou non) sur le rendu final. Pour les données du soleil, je récupère le rayon de l'étoile en unité de rayon solaire. Je rappelle que c'est cette donnée qui me permet de déterminer l'échelle de la scène, puis je vais multiplier cette donnée avec le rayon du soleil pour obtenir la taille de l'étoile en kilomètre, enfin je divise une unité astronomique par le rayon de l'étoile de km pour obtenir la taille d'une UA par rapport à l'échelle de la scène.

$$UA_{taille.scène} = \frac{R_{etoile_{RS}} * R_{soleil_{km}}}{UA_{km}}$$

Toutes les données métriques seront donc multipliées par rapport à l'UA de notre scène. Puisque l'on souhaite conserver une proportion véridique, l'échelle de la scène sera grande sans être immense, cependant la taille des planètes va devenir ridiculement petite. Par soucis de confort de navigation j'ai rajouté un paramètre global d'échelle qui me permet de multiplier l'échelle initiale des corps célestes afin de mieux naviguer dans l'espace 3D. Cependant ce paramètre fausse littéralement les proportions de taille par rapport à la distance de l'étoile et il est impératif de le remettre à l'échelle initial si l'on souhaite avoir un résultat réaliste.

Pour vérifier les résultats de mon outil, j'utilise les données de la planète dont j'ai le plus d'informations, à savoir la planète Terre. Guillaume Hébrard m'a informé que l'on détermine

si une planète est gazeuse ou tellurique en fonction de sa densité. Les exoplanètes les plus denses ont plus de chance d'être telluriques que gazeuses. Pour obtenir la densité, j'ai simplement besoin du rayon de la planète et de sa masse, en effet, la densité est calculée par la masse divisée par le volume. Un premier point où il va être compliqué d'obtenir le résultat véridique car avec les méthodes actuelles il est difficile de connaître l'aplatissement d'une exoplanète alors nous devons simplifier en partant du principe que l'exoplanète a une forme proche d'une sphère. Nous permettant ainsi de calculer son volume à partir de la formule de la sphère. La formule de notre densité sera donc :

$$D = \frac{M}{V} = \frac{M}{\frac{4\pi R^3}{3}}$$

Enfin, même si toutes les exoplanètes ne disposent pas de la donnée de l'albédo, c'est-à-dire du taux de réflexion d'une surface, on peut calculer la température approximative avec la formule suivante :

$$T_{eq} = \left(\frac{L(1 - A_B)}{16\sigma\pi\alpha^2} \right)^{1/4}$$

Où L est la luminosité de l'étoile en Watt, Ab est l'albédo qui est une valeur comprise entre 0 et 1 où 0 est un corps noir et 1 un miroir, alpha est la distance à son étoile en mètre et epsilon est la constante de Stefan Boltzmann ($5.670273 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$). Une fois que nous avons ces données initiales, on peut entamer la création de l'orbite.

The screenshot shows the EXO-Tool interface with two main sections: Star and Exoplanet. The Star section is for Kepler-442, and the Exoplanet section is for Kepler-442b. Both sections have sliders for various parameters.

Parameter	Star (Kepler-442)	Exoplanet (Kepler-442b)
Star Name	Kepler-442	Kepler-442b
Radius(Solar Radius)	0.6	8546
Mass(Solar Mass)	0.61	1.37361e+25
Temperature(Kelvin)	4402	233
Luminosity(Solar lum)	0.117	
Density(g/cm3)		0
Orbital Period(day)		112.305
Semi-major axis (AU)		0.409
Eccentricity		0.04
Inclination(Degree)		89.94
Bond Albedo		0.34
Planet type		Terrestrial
Planet Similarity		Terre
Has Ring?		No
Ring Color		White
Atmosphere Color		Blue

Illustration 26 - Menu de l'EXO-Tool

c) Création de l'orbite et de l'exoplanète

Pour définir l'orbite de l'exoplanète, nous partons d'un cercle parfait. La déformation de l'orbite dépend d'un coefficient k qui dépend lui-même de son excentricité. L'excentricité est définie par la distance focale de la planète sur le demi grand axe. La distance focale, défini par c , est la distance d'un des foyers au centre de l'orbite, et le demi grand axe, défini par a , est la moitié du plus long diamètre de l'ellipse. On a donc : $e = c/a$

Excentricité maximum (excentricité fortement exagérée)

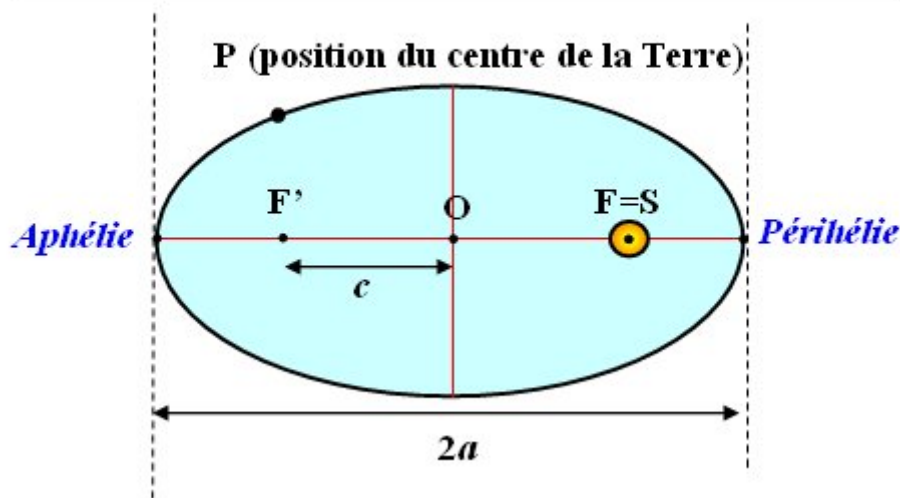


Illustration 27 - Visualisation de l'excentricité par rapport à la Terre

À partir de l'excentricité, on peut donc calculer la déformation de l'orbite avec :

$$k = \sqrt{1/(1 - e^2)}$$

On modifie donc l'échelle sur un axe du cercle parfait pour obtenir une ellipse si e est supérieur à 0. On doit maintenant calculer le centre de l'orbite. Pour cela on doit trouver le centre entre le périastre et l'apoastre, soit le centre du point de l'orbite le plus proche de son étoile et le plus éloigné. Si l'on soustrait la distance de l'apoastre au centre à la distance du périastre au centre, on aura donc le centre. On le définit de cette manière :

$$centre = apoastre - priastre = a(1 + e) - a(1 - e)$$

Où a est le demi grand axe et e l'excentricité. Si on dispose de la donnée d'inclinaison de l'orbite, on va pouvoir l'utiliser pour définir la rotation de l'orbite. L'échelle globale sera multipliée par rapport à la donnée du demi grand axe convertie à notre échelle de scène. On va construire une matrice 4x4 avec toutes ces données, le centre pour définir la translation,

l'inclinaison pour la rotation, le demi grand axe et le coefficient k de déformation pour l'échelle. On va appliquer cette matrice à notre cercle parfait qui va se transformer parfaitement aux indications de la matrice et nous aurons l'orbite de notre exoplanète à dimension réaliste.

```
//coeff deformation
@ex_orbitK = sqrt(1 / (1 - pow(@ex_eccent,2)));

float ap = @ex_major_axis*(1+@ex_eccent);
float pe = @ex_major_axis*(1-@ex_eccent);
@ex_orbit_center = ap-pe;
```

Illustration 28 - Calcul de l'orbite en VEX

Pour l'animation de la rotation de la planète autour de son astre et donc sur l'orbite, je me sers de la seconde loi de Kepler sous les recommandations de Guillaume Hébrard, aussi appelée loi des Aires : *“le rayon-vecteur reliant une planète au Soleil balaie des aires égales en des temps égaux”*. Pour utiliser cette loi, je calcule l'aire totale de l'orbite, où A est l'aire, a est le demi grand axe et b est le demi petit axe : $A = \pi * a * b$.

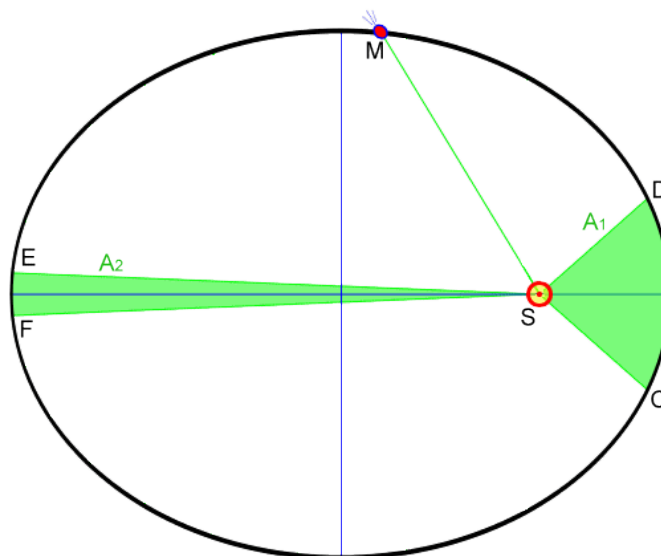


Illustration 29 - Visualisation de la loi des Aires

On sait que l'aire totale est parcourue en un temps égal à la période de révolution de la planète autour de son étoile, il suffira donc d'une relation de proportionnalité pour calculer le temps

parcouru entre deux points de l'orbite. Dès lors qu'on aura l'aire entre ces deux points et la distance à l'astre. Cependant, sur notre logiciel d'infographie, il va falloir définir une échelle temporelle, car les données en *jour* n'ont pas de signification pour notre logiciel. J'ai donc créé un paramètre pour déterminer à combien d'images correspond une journée dans notre logiciel.

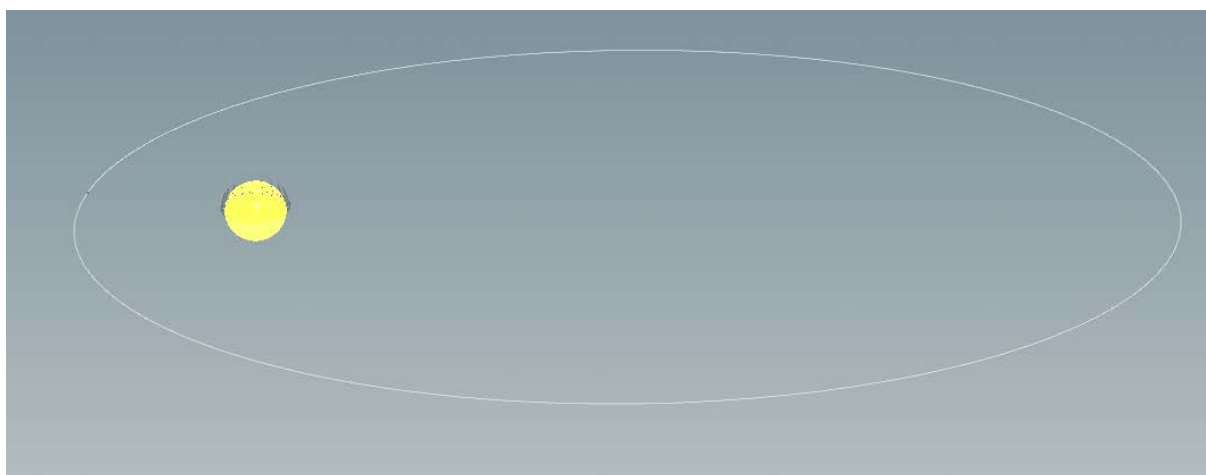


Illustration 30 - Orbite de HD 80606b avec l'EXO-Tool

Passons à la création de l'exoplanète. La matière de départ, comme je l'ai précisé plus haut, est assez spéculative puisqu'on ne peut pas vraiment connaître son aplatissement. Je simplifie donc la modélisation en créant une sphère. Celle-ci va être composée en réalité de deux à trois sphères, la première pour la surface de l'exoplanète, la seconde pour des nuages si l'atmosphère est propice à la création de nuages, et la dernière pour l'atmosphère. En parallèle, je modélise un anneau relativement plat autour de la planète, au cas où l'on détecte une planète qui dispose d'anneaux. Pour une grande majorité d'exoplanète, on détient de très peu d'information, la densité va nous permettre de savoir si elle est tellurique ou gazeuse, mais la plupart du temps les informations d'albédo, d'atmosphère ou même de couleur dominante de la planète sont manquantes. Il est de même pour son relief et d'une estimation de sa composition. Nous voici donc dans les limites de la véracité de mon outil. Tant que les technologies ne nous permettront pas de connaître ces informations, j'ai choisi de mettre à disposition de l'artiste des paramètres de personnalisations de la texture de la planète. Étant donné que la NASA fournit des textures de très haute définition des planètes du système solaire, l'utilisateur pourra choisir quel modèle planétaire du système solaire se rapproche le plus de son exoplanète pour que l'outil applique la texture de ce modèle à la planète. Cependant je déforme la texture afin de la distinguer de la planète de référence du système

solaire. Si la planète est gazeuse j'applique une deuxième déformation légèrement animée afin d'apporter un semblant de vie sur la planète. Enfin, je vais modifier la couleur dominante de la planète de référence par la couleur dominante choisie par l'artiste. On aura donc une texture sommaire de la planète proche de ce que pourrait être l'exoplanète selon les scientifiques. Même si les données officielles ne sont pas toutes présentes, ces paramètres de "spéculation scientifique" permettent d'ouvrir un dialogue entre artiste et scientifique pour estimer la texture et la couleur probable de la planète. D'autant plus que l'outil se veut être un point de départ, il va offrir à l'artiste un exoplanétaire réaliste et des paramètres de personnalisation pour une première version de la vue d'artiste. La logique du digital asset est proche de la logique de travail de Tim Pyle, animateur VFX pour les films Hollywoodiens. Il travaille aussi avec la NASA depuis plus de 10 ans pour réaliser des vues d'artistes d'exoplanètes, il a notamment réalisé celle de Kepler 452-b, une super-Terre. Voici ce qu'il dit sur la relation scientifico-artistique : *"Commence alors un dialogue avec les scientifiques. Ils m'expliquent ce qu'on sait avec certitude sur la planète, comme sa taille ou la couleur de son soleil. Puis ils détaillent ce qu'on peut déduire grâce à des modèles scientifiques : l'épaisseur de l'atmosphère, la présence d'eau liquide ou de volcans en surface..."*.

Il explique que la véracité scientifique est limitée par le pôle chargé de la communication de la NASA. Lorsqu'il a créé la vue d'artiste de Kepler 452-b, tout indiquait qu'avec de la roche, de l'eau liquide en surface et un soleil de la même température que le nôtre, cette planète devrait avoir des nuages blancs, des plantes vertes et de l'eau bleu. Cependant le pôle communication avait peur que le public associe trop la planète avec la Terre ! Des modifications graphiques ont été apportées pour éviter la confusion au détriment de la plausibilité scientifique.



Illustration 31 - Kepler 452b, Tim Pyle

Je suis d'ailleurs en cours de réflexion sur l'intérêt de créer une texture procédurale sur Substance Designer, un logiciel procédural de création de textures, pour la faire évoluer selon les paramètres de densité, température, de spéculations afin d'offrir à l'artiste un contrôle et une liberté plus importante sur la texture.

d) Lighting et rendu

La scène ne doit être éclairée que par l'étoile du système exoplanétaire puisque c'est elle qui fournit la lumière à sa planète. Pour définir la couleur de mon soleil, j'utilise sa température. La fonction VEX *blackbody* prend sa température en Kelvin et sa luminance et ressort un vecteur qui correspond aux composantes trichromatiques dans l'espace colorimétrique CIE XYZ. J'utilise donc la fonction *xyztorgb* pour obtenir la couleur dans l'espace RGB. Les étoiles sont amenées à évoluer au cours de leur longue vie et changent de classe. Leur classe est définie par leur température effective et leur luminosité. Une étoile se forme suite à l'effondrement d'un nuage de gaz qui va être responsable de la création de protoétoile, c'est-à-dire une grande masse formée par la contraction de ce nuage de gaz avec un milieu riche en hydrogène et en hélium. La contraction va faire monter la température pour allumer son cœur, ce qui entraînera une fusion de l'hydrogène et de l'hélium et va équilibrer la contraction. L'étoile va donc débuter sa longue vie de consommation d'hydrogène et d'émission de radiations sous forme de rayonnements, de vents stellaires et de neutrinos. On répertorie plusieurs catégories d'étoiles :

- les naines brunes sont des étoiles avortées qui n'ont pas réussi à maintenir leur fusion nucléaire.
- les naines rouges ont une masse comprise entre 0.3 et 0.08 fois celle du Soleil.
- les naines jaunes, catégorie à laquelle notre soleil appartient, ont une température avoisinant les 6000 Kelvin. En fin de vie ces étoiles grossissent pour devenir des géantes rouges avant de s'écrouler sur elle-même et devenir des naines blanches.
- les géantes rouges sont dû à la combustion de la couche d'hydrogène et à la contraction du cœur d'hélium. Le rayon de l'étoile et sa masse vont considérablement augmenter et sa température diminuer car son énergie reste la même pour "chauffer" une surface bien plus large, d'où sa couleur rouge.
- les géantes bleues sont très chaudes et très massives, leur température est d'au moins 20 000 Kelvin, cependant leur durée de vie est courte et terminent en super nova.

- les super géantes rouges sont les étoiles qui ont terminé de consommer leur hydrogène et où leur température décroît considérablement.
- les naines blanches sont à peu près de la dimension d'une planète et sont créés après consommation de tout le combustible nucléaire.
- les naines noires sont des naines blanches qui n'émettent plus de lumière, cependant ces naines sont seulement théorique puisque l'Univers visible est trop récent pour avoir vu une naine blanche se refroidir.

Toutes ces catégories sont gérées par l'outil dès lors que l'on connaît la masse, la température et la luminosité de l'étoile. Et fort heureusement, ce sont des données très bien répertoriées.

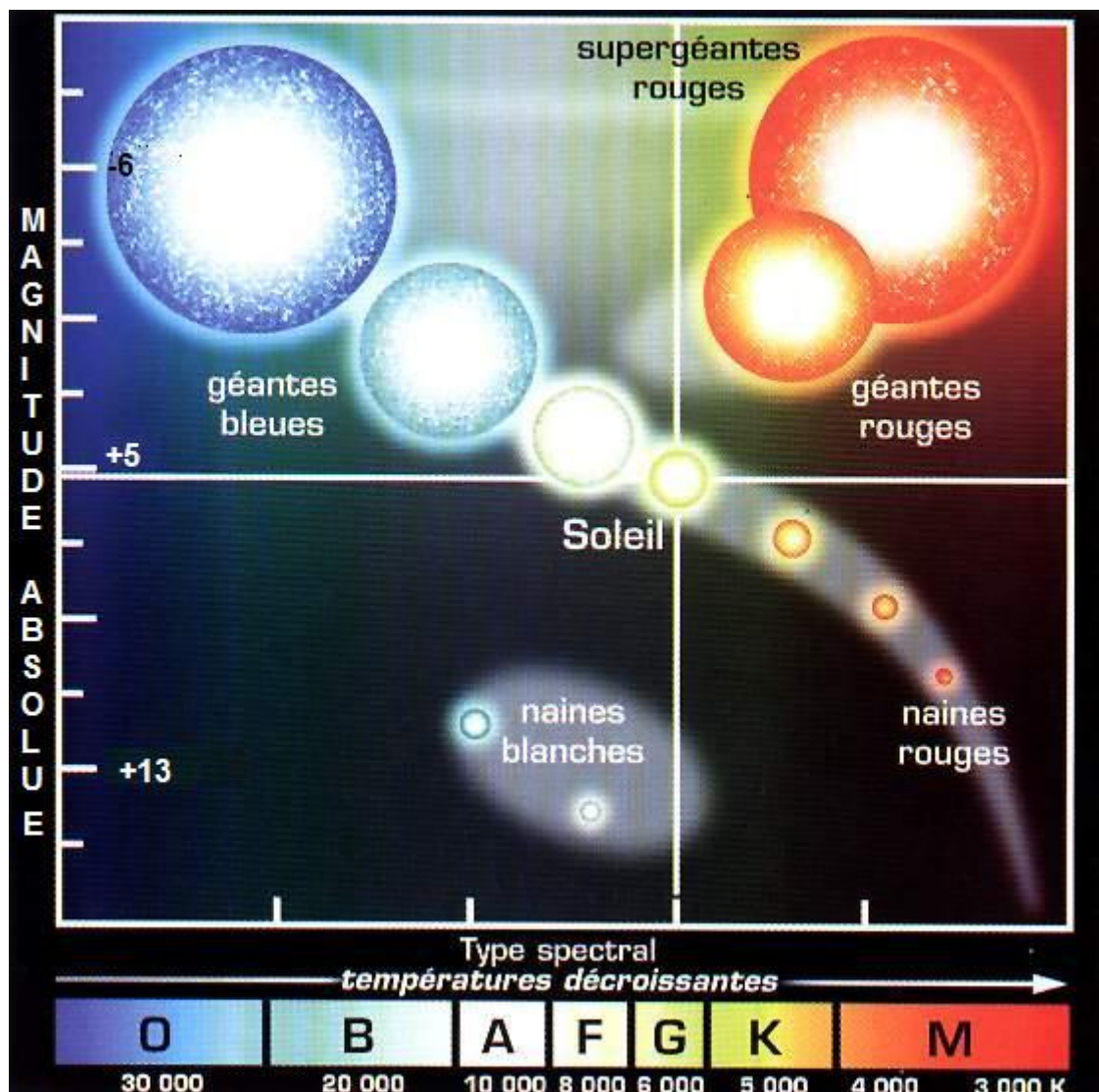


Illustration 32 - Type spectral des étoiles

Pour l'éclairage, je n'utilise pas mon mesh (maillage 3D composé de points, arrêtes et faces) de Soleil comme *mesh light*. Un mesh light est un objet 3D qui sera considéré comme une source lumineuse. J'ai choisi d'utiliser une lumière directionnelle qui présente l'avantage de se comporter de la même façon que le Soleil à l'inverse d'une point light qui ne donne pas des ombres aussi franches. Cependant, la lumière directionnelle doit toujours pointer vers mon exoplanète et pour cela je dois d'abord calculer le vecteur directeur normalisé de l'étoile vers ma planète. Puis je vais construire une matrice avec la fonction VEX *maketransform* qui me permet de prendre un vecteur directeur et son vecteur *up* pour définir une matrice d'orientation. Je convertis donc cette matrice en quaternion pour définir la variable *built-in* d'Houdini *orient* qui est une variable que le logiciel connaît et qui, lorsqu'elle sera modifiée, appliquera directement les changements d'orientation à la classe touchée (point, primitive, vertices...).

```
vector cen_tgt = getbbox_center(1);
vector cen_sou = getbbox_center(0);

vector dir = normalize(cen_sou - cen_tgt);

matrix3 m = maketransform(dir,{0,1,0});
@orient = quaternion(m);
@P *= m;
```

Illustration 33 - Code VEX pour orienter la lumière vers l'exoplanète

J'utilise aussi un *rivet* qui est un objet d'Houdini qui sert pour le parentage. Il prend les transformations dans l'espace *world/monde* d'un autre objet pour l'appliquer aux objets qui lui sont parentés. Dans mon cas, ce sont les informations du quaternion *orient* qui vont me servir à créer les transformations du rivet. Ainsi, lorsque mon exoplanète tournera autour de son étoile, la lumière qu'elle recevra sera toujours cohérente.

Pour ce qui est de la caméra, elle prend la position de la planète additionnée à son diamètre et est orientée afin d'avoir la planète et l'étoile dans son axe. J'ajoute cette matrice à une matrice de transformation supplémentaire pour permettre à l'utilisateur de modifier ce cadrage selon ses goûts. Durant l'animation, de base l'axe restera toujours le même mais grâce à cette matrice complémentaire *d'offset*, l'utilisateur aura le choix de modifier ou d'animer la caméra.

Finalement, il ne nous reste plus qu'à lancer le rendu, mais il nous manque un élément essentiel : un environnement spatial.

e) Stars HDRI : HDRI de voûtes célestes et wedging

Je m'interrogeais sur la manière de représenter les étoiles dans le lointain du système exoplanétaire. Du point de vue de notre caméra, les étoiles doivent paraître infiniment loin, de la même manière que nous les percevons sur Terre. C'est pour cela qu'une texture d'environnement me paraît être la solution la plus adaptée puisqu'elle ne prend en compte que la rotation de la caméra pour le rendu de l'image. Seulement, les HDRI (High Dynamic Range Image) sur des voûtes célestes sont très peu nombreuses sur internet et de très mauvaises qualités. Il existe tout de même une image à 360° de la Voie Lactée fournie par la NASA et qui est d'une très bonne qualité. On peut imaginer que depuis la Terre, si on peut voir l'étoile à laquelle notre exoplanète est rattachée, alors les étoiles à proximité de celle-ci seront visibles. Mais encore une fois, on ne peut pas précisément déterminer les étoiles observables depuis ce point de vue éloigné de la Terre. Plutôt que de créer une approximation scientifique, je préfère partir de l'hypothèse que l'on ignore ce que l'on verrait là-bas et donc de générer moi-même mes images 360 de nébuleuses et d'étoiles.



Illustration 34 - HDRI de la Voie Lactée

L'avantage de générer mes HDRI de voûte céleste c'est que cela me permet d'obtenir de nombreuses variations de position d'étoiles, de couleurs de nébuleuses et surtout d'avoir des images en 16K. Je les passe ensuite dans l'opérateur de compositing d'Houdini pour sortir des versions 8K, 4K, 2K et 1K.

Pour générer ces HDRI, je crée en premier lieu une *VR Camera* qui me permet d'avoir une image au rendu en 360°. J'aurai pu aussi passer par un *Lens Shader* qui est un shader sur Houdini qui permet de modifier la position et la direction des rayons qui seront envoyés par la caméra permettant de créer de cette façon des effets de fish-eyes, caméra orthographique ou trou noir comme on le verra bientôt.

Pour la création des étoiles, je pars de deux sphères en volume avec deux rayons différents et je calcule leur intersection pour avoir une sphère volumétrique avec un cœur vide. Après discussion avec Dominique Vidal, mon superviseur VFX chez BUF qui a étudié le positionnement des étoiles dans l'espace pour la série documentaire Cosmos, j'ai appris que le placement des étoiles ne paraissait pas aléatoire. Si on observe notre voûte céleste, on remarque que certaines étoiles sont plus rapprochées et plus lumineuses que d'autres, ce sont ces étoiles qui forment les constellations. J'ai donc conçu mon générateur en deux couches. La première couche va prendre le volume et va lui ajouter un mélange entre un *simplex noise* et un *turbulent noise* pour obtenir un motif intéressant pour la distribution des étoiles, je dispose d'un paramètre pour définir le nombre d'étoiles voulu, la taille moyenne qui sera définie grâce à l'attribut *pscale* qui est lui aussi *built-in* de la même manière que l'*orient* que l'on a vu plus haut. Le *pscale* permet de déterminer la taille d'un point au moment du rendu sans avoir à instancier de sphère à sa position. Je définis aussi la magnitude minimale et maximale de mes étoiles, c'est-à-dire l'irradiance depuis le point de vue de l'observateur. Enfin, j'utilise une rampe de couleur pour définir la couleur de mes étoiles, pour cette variation j'interprète les couleurs des étoiles par rapport à leur température, à savoir de 1000 Kelvin à 20 000 K environ. On a donc déjà un joli champ étoilé pour notre HDRI mais on va ajouter des étoiles plus rapprochées et certaines plus lumineuses pour créer les constellations. Pour cela, on passe une seconde couche où l'on va prendre le volume et on change le seed (paramètre permettant de varier le résultat sans modifier les paramètres principaux) du noise pour avoir un motif différent. On génère beaucoup moins d'étoiles cette fois-ci, puis je vais itérer sur chacune de ces étoiles et ajouter avec la fonction VEX *addpoint* entre une et quinze étoiles à proximité de ces étoiles avec une magnitude et un *pscale* proche de leur étoile "mère". Avec cette méthode on voit des formes se dessiner dans l'espace. Pour calculer la position des étoiles dans la constellation, j'ajoute une probabilité aléatoire de changer d'étoile

mère à chaque itération supplémentaire, ainsi la distribution ne se fait pas autour de l'étoile initiale mais peut se faire par rapport à chaque étoile générée sur la constellation et ainsi créer des motifs.

Je passe enfin à la poussière stellaire présente dans l'espace. On se rend compte de sa présence lorsque l'on prend en photo la Voie Lactée avec une longue exposition, une teinte bleutée apparaît sur la photographie. Pour simuler cette poussière, je crée un volume avec une très faible densité et un bruit pour le déformer, puis selon un second bruit je vais colorer le volume. J'instancie de plus quelques points lights dans la nébuleuse pour lui donner un peu de volume.

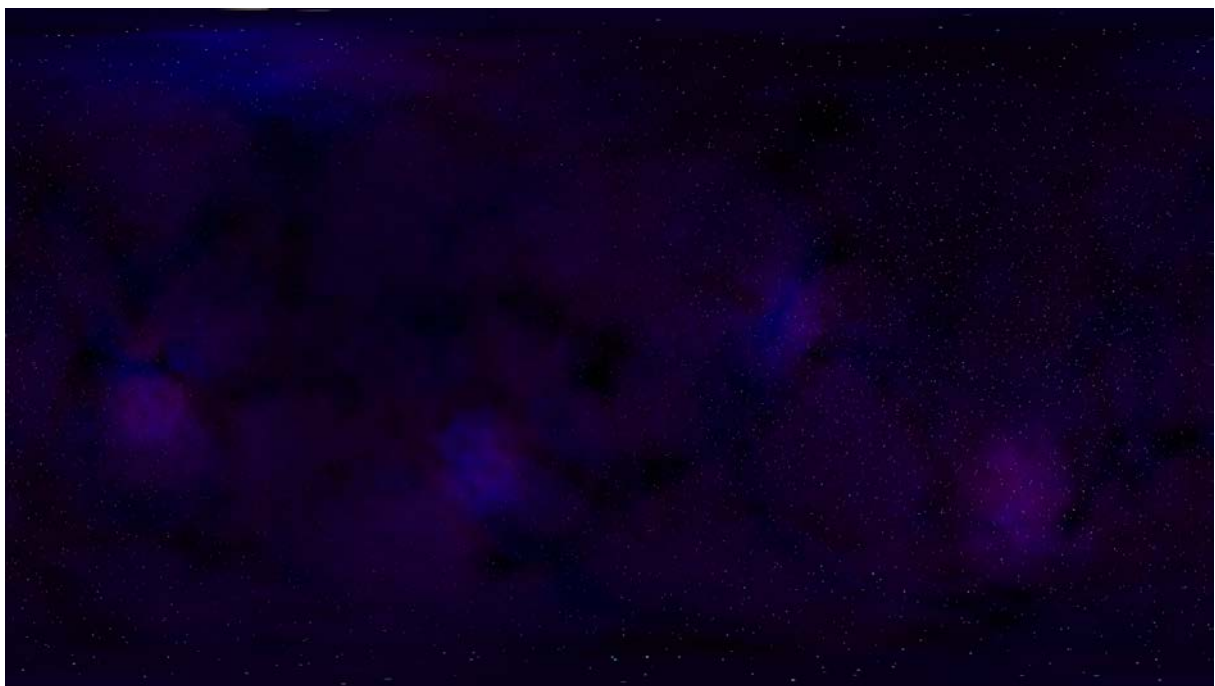


Illustration 35 - HDRI générée pour une voûte céleste à dominante bleue

Enfin, la mise en place est prête et on peut lancer le rendu. Mais avant, je vais créer un node *Wedge* dans le contexte *ROP* qui est le contexte de sortie d'Houdini. Ce node permet de rendre un node de rendu plusieurs fois tout en changeant ses paramètres en entrée pour modifier le résultat. On peut enregistrer les paramètres modifiés dans le nom pour mieux s'y retrouver afin de reproduire le meilleur résultat, pour une simulation par exemple. Dans mon cas je vais modifier le seed des étoiles, le nombre d'étoiles maximum, le motif ou *pattern* du noise de distribution des étoiles, la magnitude moyenne, le noise de la poussière stellaire ainsi que sa couleur. En lançant mes rendus 16K la nuit, je me réveillais le matin avec 4 à 5 HDRI de voûte céleste.

J'ai donc pu utiliser ces rendus pour avoir une texture d'environnement dans mon EXO-Tool.
Et ainsi terminer la construction de mon outil.

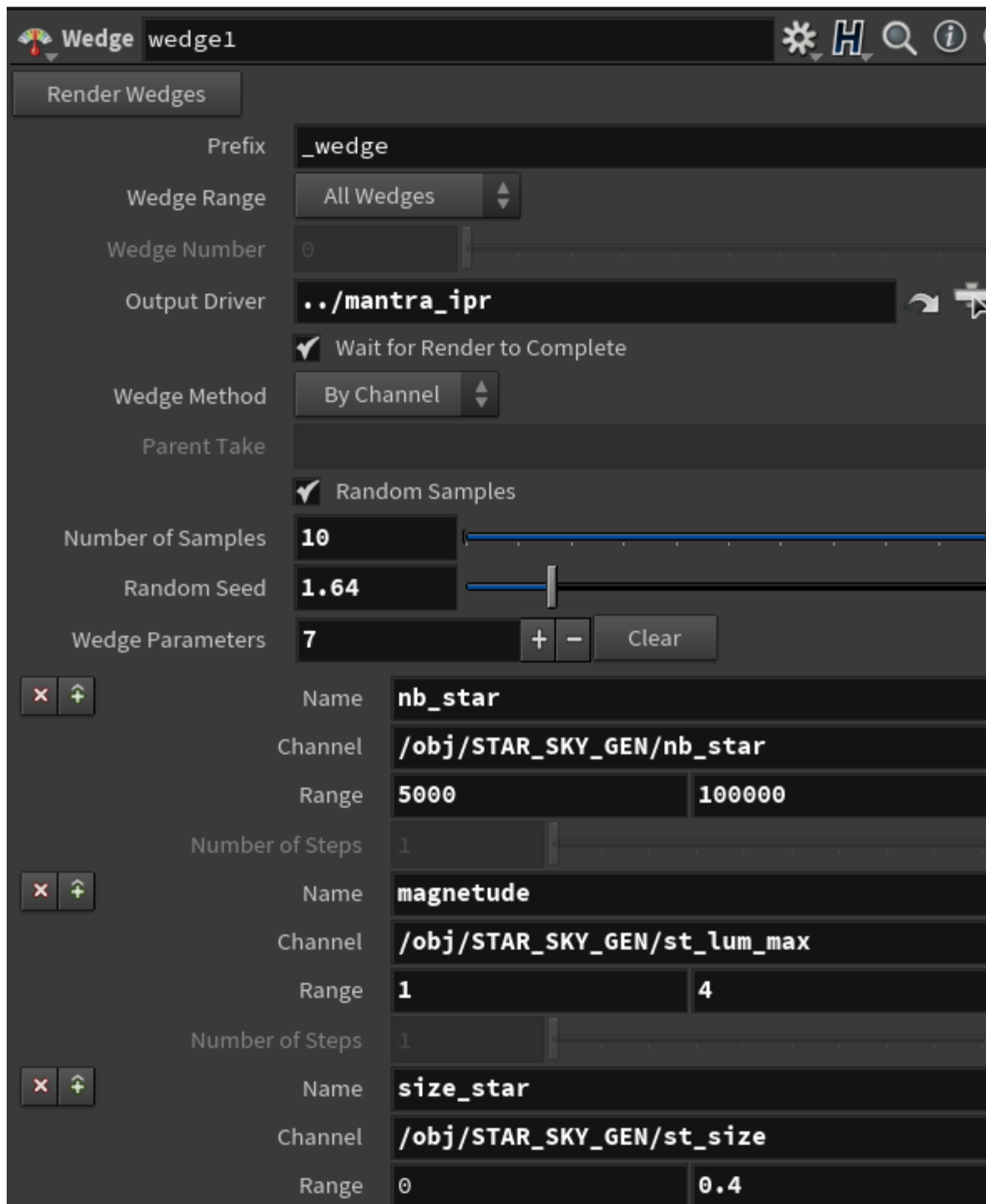


Illustration 36 – Node de Wedging d'Houdini pour la génération d'HDRI

On peut donc s’amuser à récupérer les données de la Terre pour la recréer, ou de HD 80 606b, mais je me suis aperçu que l’on a très vite envie d’utiliser les paramètres pour générer ses propres exoplanètes, même les plus improbables scientifiquement.

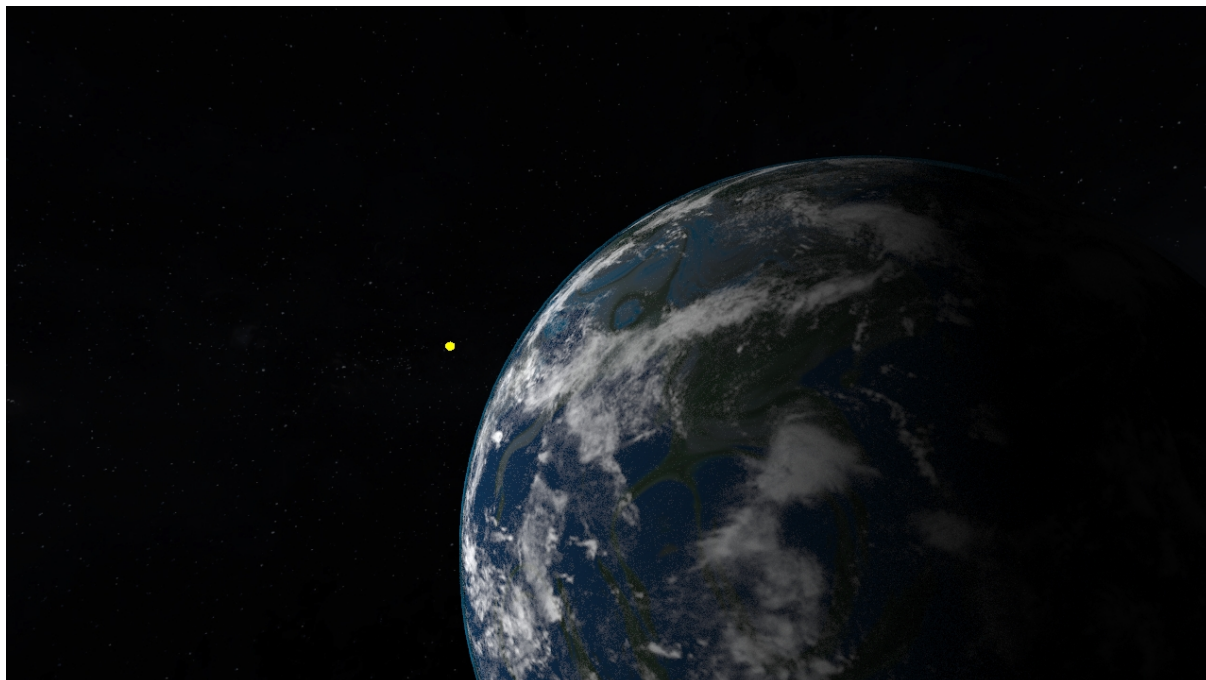


Illustration 37 - Rendu de Kepler 452b par l'EXO-Tool

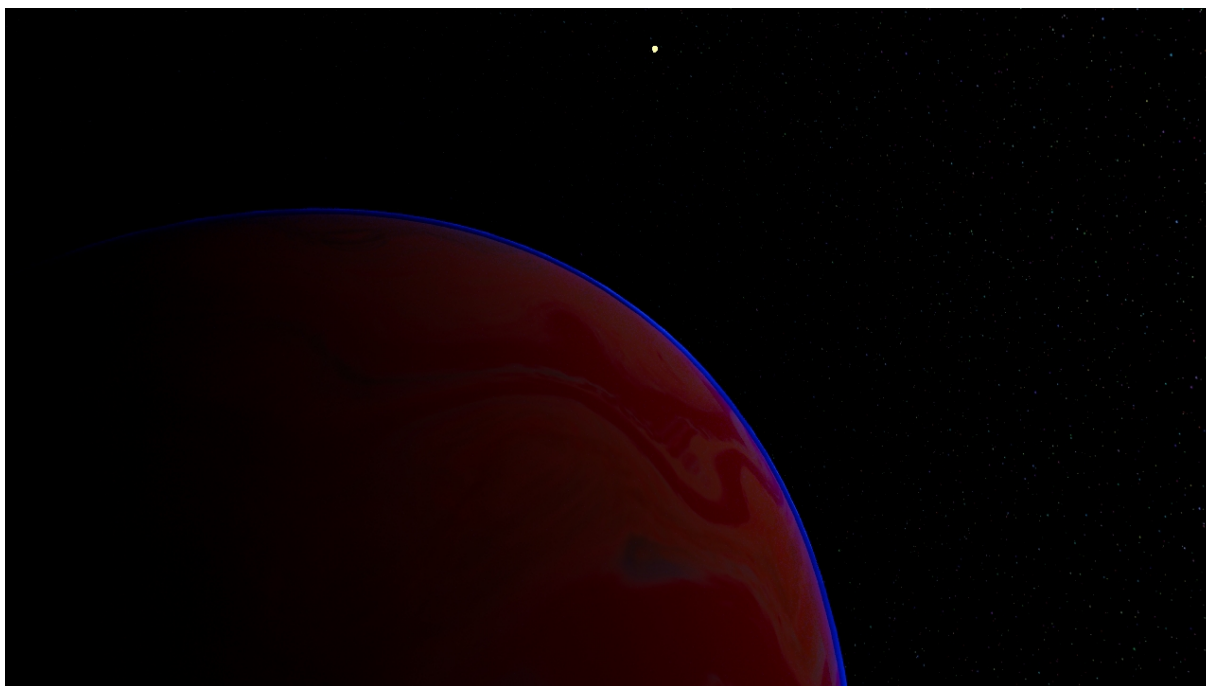


Illustration 38 - Rendu de HD 80606b par l'EXO-Tool

3. Étude de l'activité nucléaire du soleil

a) Décomposition de l'activité solaire et référence

C'est l'étoile la plus proche de nous, visible à l'œil nu la journée et pourtant c'est un danger mortel pour la pupille qui la regarde. Sans elle, nulle vie sur Terre, nulle nature et nul océan, ce serait la glace qui régnerait. Nous devons tout au Soleil et alors que nous l'observons et l'étudions depuis des siècles, nous ignorons tant de choses. Si bien que le 10 février 2020 à 5h03, l'Homme a envoyé le satellite d'observation *Solar Orbiter* afin d'étudier l'origine du vent solaire, du champ magnétique héliosphérique, des particules solaires énergétiques, des perturbations interplanétaires transitoires ainsi que le champ magnétique du Soleil.

Le soleil est une naine jaune séparée de la Terre de 149 597 870 km sur le demi grand axe, cette distance est la définition de l'unité astronomique. Même si on ne sait pas encore parfaitement l'expliquer, on sait que le champ magnétique du soleil varie selon la latitude de l'astre provoquant une rotation différentielle sur le gaz et le plasma qui le compose. Dû à la complexité de son champ magnétique, on constate parfois l'apparition de taches solaires. C'est ce magnétisme qui va être le principal responsable de l'activité solaire, il va y avoir un flux de particules issu de la couronne solaire en expansion, c'est le vent solaire et c'est ce phénomène qui est principalement observable. On constate deux types de vent solaire, ceux qui sont en surface et où le magnétisme va les entraîner en rotation et ceux qui vont accumuler l'énergie magnétique dans des zones de champs magnétiques intenses pour être éjectée et se libérer de l'attraction gravitationnelle, ce sont les éruptions solaires. Sur les photographies du soleil par la NASA on se rend compte que l'on peut décomposer les représentations du soleil en plusieurs couches. Tout d'abord la surface du soleil avec les taches solaires, puis les vents solaires en "surface" du soleil qui vont être perturbés par les rotations différentielles, vient ensuite la couche d'éruption solaire qui va s'extraire de la photosphère et enfin une irradiance globale dû à l'illumination du soleil.

Les photos de la NASA sont cependant passées par des filtres pour isoler des phénomènes solaires ou les mettre en évidence. Ces filtres peuvent faire varier la couleur du soleil entre l'orange, le rouge, le blanc ou même le vert ! Alors comment représenter cet astre en respectant son activité ? L'idée que j'adopte, c'est de représenter au mieux le phénomène de champ magnétique avec les connaissances actuelles que nous avons, qui sont encore très théoriques, et pour la couleur je me rapproche de la croyance populaire ainsi que de sa température de naine jaune, à savoir 6000 Kelvin. On va donc varier sur des couleurs oranges,

jaunes et blanches tel que l'homme pourrait le voir s'il avait la possibilité d'observer les nuances du Soleil sans se brûler la rétine.

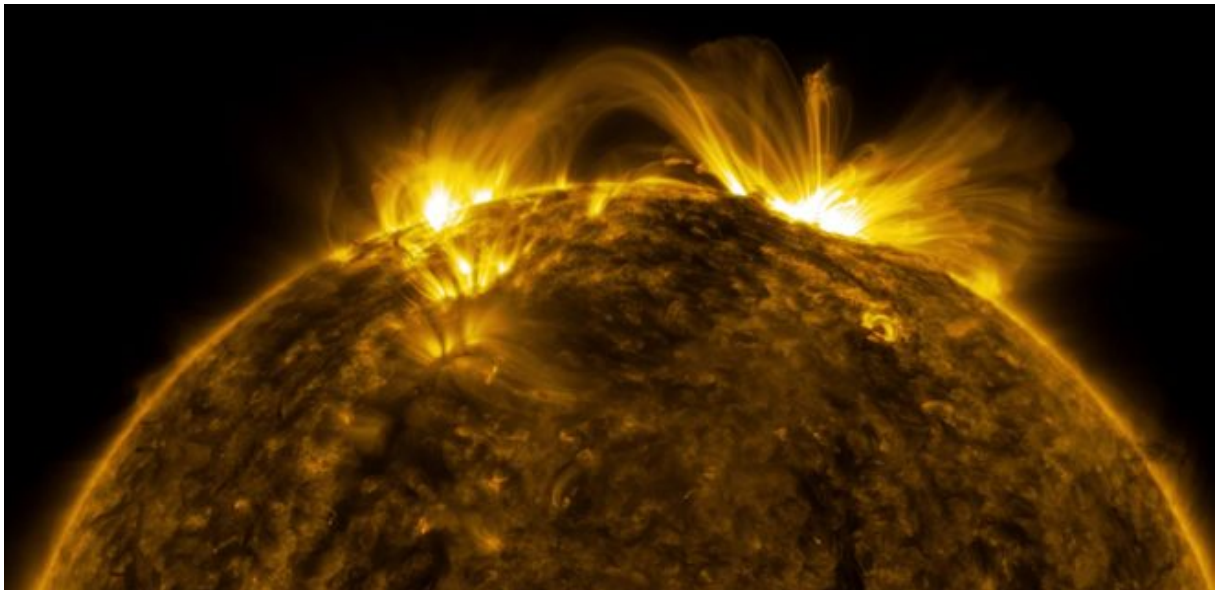


Illustration 39 - Éruption Solaire capturé par la sonde SDO (Solar Dynamics Observatory)

b) Création d'un effet de magnétisme sur Houdini

La majeure partie de notre Soleil numérique va être construit de particules pour simuler le vent solaire. Mais comme nous l'avons vu plus haut, c'est le champ magnétique qui va entraîner ces particules en mouvement. Je me suis donc inspiré des recherches d'Alessandro Pepe, un artiste VFX italien qui travaille depuis quelques temps chez Dreamworks. Il a donc proposé sur son blog une méthode pour créer un champ magnétique à partir d'un *vector field*. Les vector fields (champ de vecteur en français) sont contenus dans un volume. Un volume est composé de voxel, ce sont des pixels en trois dimensions qui sont définis par une coordonnée spatiale et une taille et qui peuvent contenir des informations. Il faut imaginer un cube coupé en 100 petits cubes de taille égale, chaque petit cube sait où il se trouve et mesure la même taille que son voisin. Mais ce petit cube peut retenir quelques informations (float, integer, boolean, vector). Ces informations complémentaires sont appelées des *fields*. Et donc, un *vector field* est un volume qui dispose d'un champ d'information complémentaire de vecteurs.

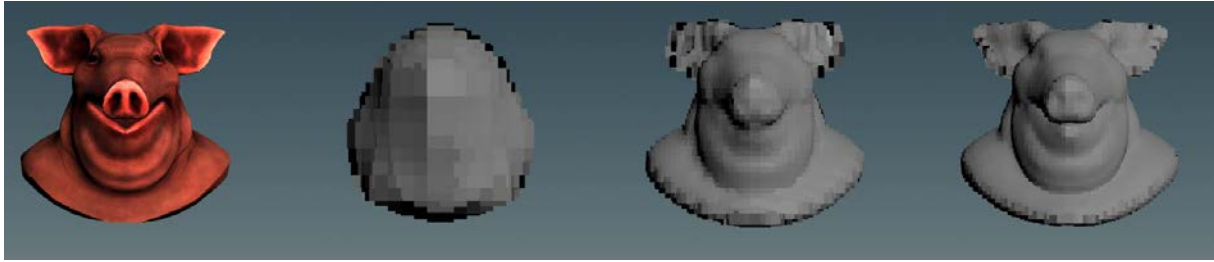


Illustration 40 - Géométrie 3D vers Voxel avec augmentation de subdivision

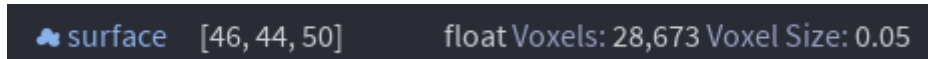


Illustration 41 - Information contenu dans le volume

La méthode d'Alessandro Pepe va donc permettre d'utiliser ce *champ vectoriel* pour stocker la direction en tout point dans l'espace volumétrique du champ magnétique. En physique, ces derniers sont caractérisés par une norme, une direction et un sens et se traduit par la présence d'une force agissant sur les charges électriques en mouvement. En d'autres mots, on va avoir des charges positives et négatives dans notre Soleil qui vont se déplacer au cours du temps. Ces charges, en s'éloignant et se rapprochant, vont créer des lignes de champ qui représente la force en tout point autour de ces charges.

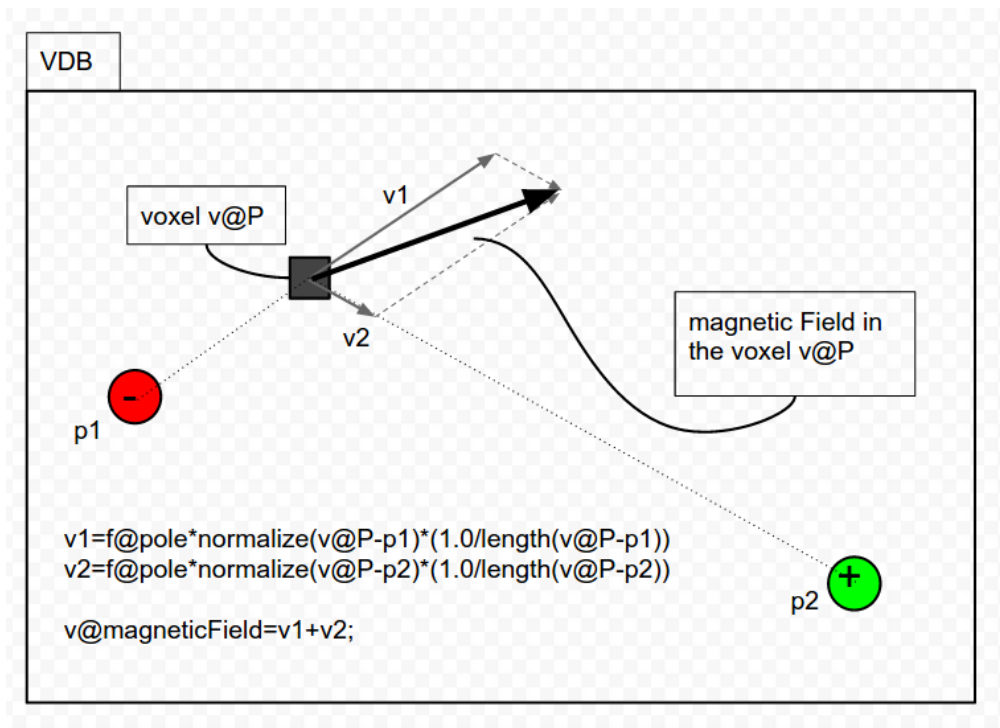


Illustration 42 - Force Magnétique du voxel en fonction des charges

Pour mon Soleil, la première étape va donc être de créer les points représentant les charges négatives et positives qui se déplacent sur le soleil assez lentement. Je vais donc *scatter* (générer) des points à la surface d'une sphère qui représente mon astre et récupérer un *Distance VDB* qui est un SDF (Signed Distance Field) qui stocke dans chaque voxel la distance à la surface, cette distance est négative si on est à l'intérieur du volume. Je vais ensuite animer ces points selon un noise pour leur donner une animation mais je vais le combiner avec un code VEX pour obliger mes particules à suivre la surface de la sphère. Pour cela je vais avoir besoin de deux fonctions : *volumesample* qui me permet de connaître en tout point l'information contenu par notre volume, ici notre float de distance à la surface la plus proche. J'aurai aussi besoin de l'inverse de *volumegradient*, je vais donc le *negate*. Le gradient pour un volume va avoir une valeur plus importante à mesure qu'on s'éloigne de la surface, c'est en quelque sorte la direction vers les entrailles du volume. En l'inversant je vais obtenir la direction vers la surface. Si je multiplie la direction (*volumegradient inversé*) avec la distance (*volumesample*) je vais donc obtenir le vecteur entre ma position et la surface la plus proche, en l'additionnant avec la position initiale on obtient une animation au cours du temps de points qui reste collés à la surface.

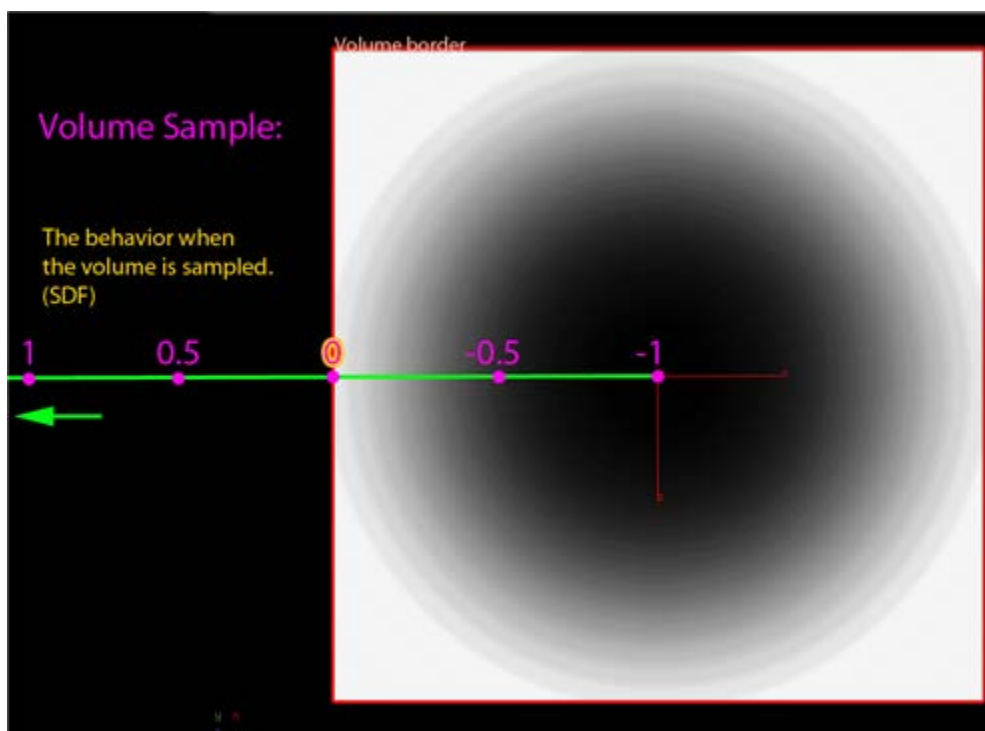


Illustration 43 - Démonstration du Signed Distance Field

Pour le champ magnétique, on va itérer sur chaque point pour leur donner un attribut @pole avec une chance sur deux d'être égal à -1 ou 1, donc d'avoir une charge négative ou positive. Ensuite on va initialiser un volume un peu plus grand que notre sphère afin de pouvoir permettre aux protubérances solaires de s'extraire du champ gravitationnel du Soleil. Ce sont ces éruptions qui sont responsables des aurores boréales sur Terre. Une fois que l'on a notre volume et nos points avec leur attribut de *pôle*, on a tout ce qu'il faut pour calculer notre champ magnétique. On va itérer sur chaque voxel, à chaque itération on va récupérer tous les points à une certaine distance grâce à la fonction *pcopen*. On va partir du principe que notre voxel peut être soumis à la force de chacun de ces points, et calculer la distance entre notre voxel et la position de chaque point puis calculer le vecteur directeur de notre voxel aux points. À partir de ces informations, on va pouvoir ajouter à chaque itération l'influence magnétique de chaque points grâce à cette formule :

$$Magnetisme = \frac{Charge * Direction}{Distance^2}.$$

Si on passe notre volume dans un node *Volume Trail* cela va nous permettre de visualiser nos lignes de champ et se rendre compte que l'on a un résultat cohérent avec la réalité physique.



Illustration 44 - Visualisation du champ magnétique sur Houdini

c) Petites et grosses explosions

Comme je le disais précédemment, je construis deux couches de vents solaires, donc deux couches de particules. La première couche est celle qui aura le plus grand nombre de particules puisque ce sont les petites explosions, en surface de l'astre lumineux. Celles-ci vont être retenues par la gravitation du soleil et ne vont pas s'échapper de l'orbite solaire. J'ai donc choisi une méthode différente du champ magnétique pour ces particules. Je reprends la méthode où j'impose à mes particules de suivre la surface de la sphère mais je rajoute beaucoup plus de particules pour éviter les trous et je diminue la fréquence du bruit pour avoir un mouvement avec une rotation différentielle selon la latitude du Soleil. Après cela j'ajoute un attribut de *pscale* pour définir une taille aux particules. Cette taille me sert pour l'utilisation du node *POP Grains* qui permet de créer des collisions entre les particules et éviter les interpénétrations. Ces collisions vont être calculées en fonction de leur taille, donc du *pscale*. Pour colorer ces particules, je me sers d'un bruit perlin qui ressemble beaucoup aux variations colorimétriques du Soleil sur les images de référence de la NASA mais j'ajoute en plus un deuxième bruit avec de grosses taches noires à quelques endroits pour créer des taches solaires.

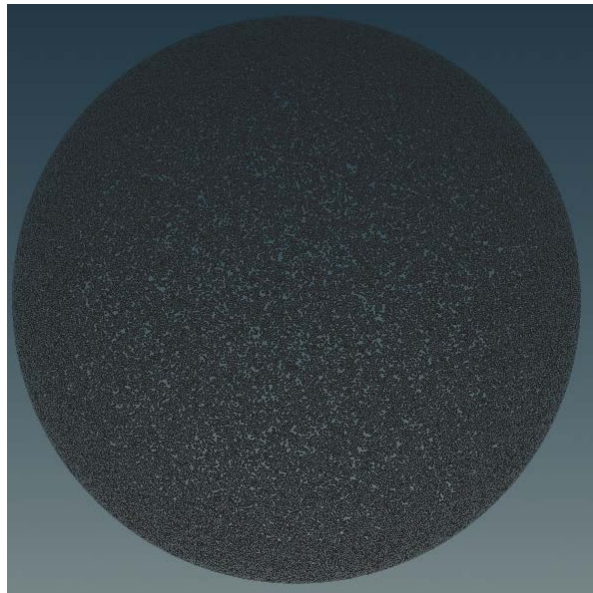


Illustration 45 - Génération de particules qui vont être simulée

Pour les grosses explosions, notre champ vectoriel de magnitude va se montrer très important. On récupère notre sphère initiale et avec un *attribute to volume* on prend notre champ magnétique pour le projeter sur notre sphère. On calcule ensuite la norme de notre

vecteur de magnitude pour obtenir les zones où la norme sera la plus élevée, et dans ces zones là on va générer des particules. Cette étape est juste là pour optimiser la simulation des éruptions solaires. Notre simulation va prendre les particules et les obliger à suivre le champ vectoriel pour se déplacer. Ce procédé de mise en mouvement de points selon un champ vectoriel s'appelle de l'advection de particule. Les simulations dans Houdini se font dans les opérateurs dynamiques, c'est dans ce contexte que l'on va trouver le node *POP Advect by volumes* qui va se servir du *vector field* du volume pour modifier leur position en fonction de ce champ. Nos protubérances vont se dessiner tranquillement au cours du temps. On va en profiter pour leur passer la vélocité finale à partir de ce vecteur afin d'avoir un motion blur correct au moment du rendu.

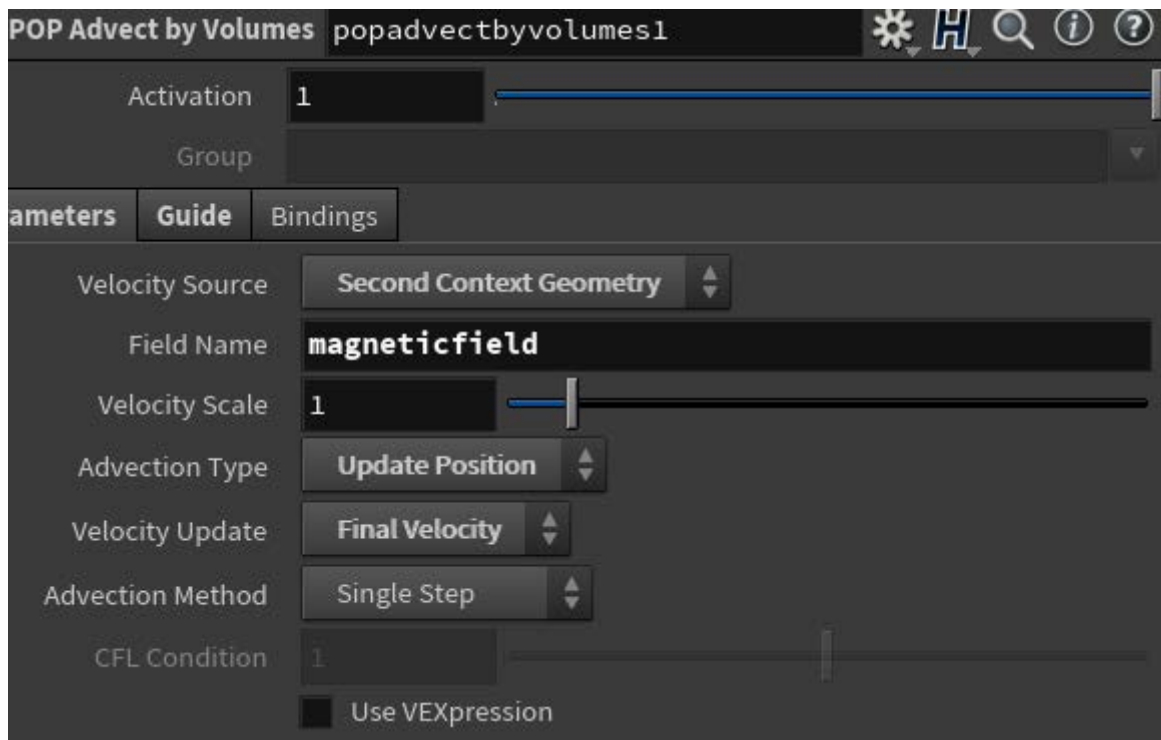


Illustration 46 - Node "Advect by Volumes"

d) Rendu et compositing

Le Soleil va naître principalement au compositing mais avant cela je dois préparer toutes mes passes de rendu qui seront utiles pour mon image finale. Je vais donc faire une passe pour mes petites explosions, une passe pour les éruptions solaires, une passe pour les taches solaires. Pour cette passe je calcule simplement ma sphère avec un shader constant et un noise travaillé pour ressembler aux références du Soleil. Enfin, j'ai sorti une dernière passe par rapport à un test que j'avais fait. Les étoiles consomment de l'hydrogène chaque seconde provoquant des

fusions thermonucléaires, j'avais donc essayé de reproduire ce phénomène avec des simulations utilisant le *Pyro Solver* qui va permettre de créer des réactions de combustion. J'ai tenté de recréer une sorte de réaction thermonucléaire du soleil en générant un cœur d'hydrogène et d'hélium. Ce dernier va absorber 99% de l'hydrogène et créer 1% de *burn* qui est un attribut *built-in* d'Houdini qui lui permet de générer du *heat* qui est le volume correspondant aux flammes dans le logiciel. Ce dernier champ va prendre en compte le champ magnétique et additionner sa vélocité au magnétisme. Au final cela marchait plutôt bien mais il me demandait beaucoup de voxel pour avoir un résultat assez précis et vraiment satisfaisant. Malheureusement je n'avais pas de machine adéquate pour effectuer cette simulation. Cependant j'ai tout de même rendu les images de ma simulation afin d'avoir de la matière et cela m'a servi au compositing pour créer l'irradiance globale du soleil.

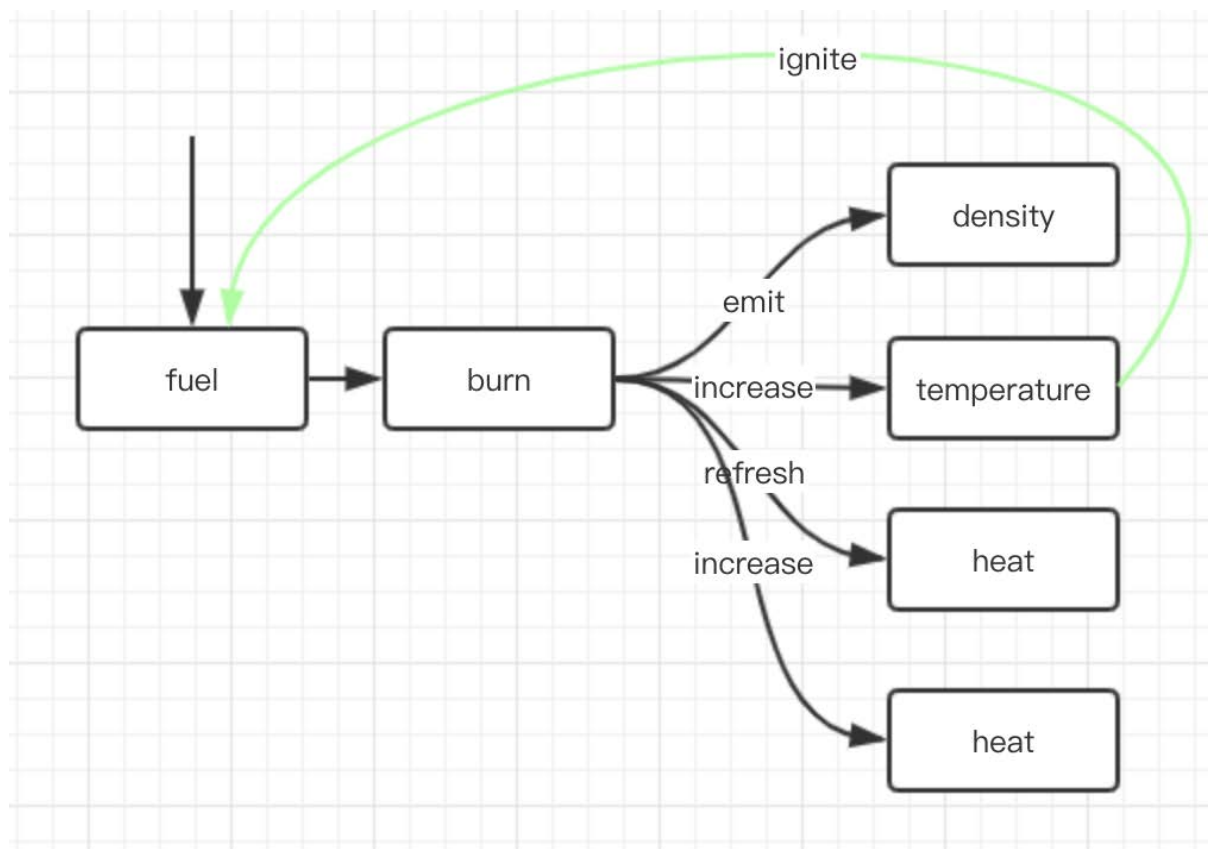


Illustration 47 - Logique de réaction du Pyrosolver sur Houdini

J'ai fais ensuite mon compositing sur Nuke , logiciel développé par The Foundry. Le compositing est l'étape où l'on va assembler toutes les sources qui composent une image et on va définir la manière dont elles s'agencent entre elles par le biais de calculs mathématiques entre les pixels des différentes sources. C'est à cette étape que je vais pouvoir retravailler les

couleurs de mes rendus, ajouter des effets optiques dû aux caméras ou à l'œil, c'est à cette étape que le résultat final va naître. Dans le cas du Soleil, j'ai notamment dû recréer un effet de chaleur, on le retrouve dans des endroits chauds. Cet effet optique va donner l'impression que l'horizon va se distordre là où il y a une forte chaleur.

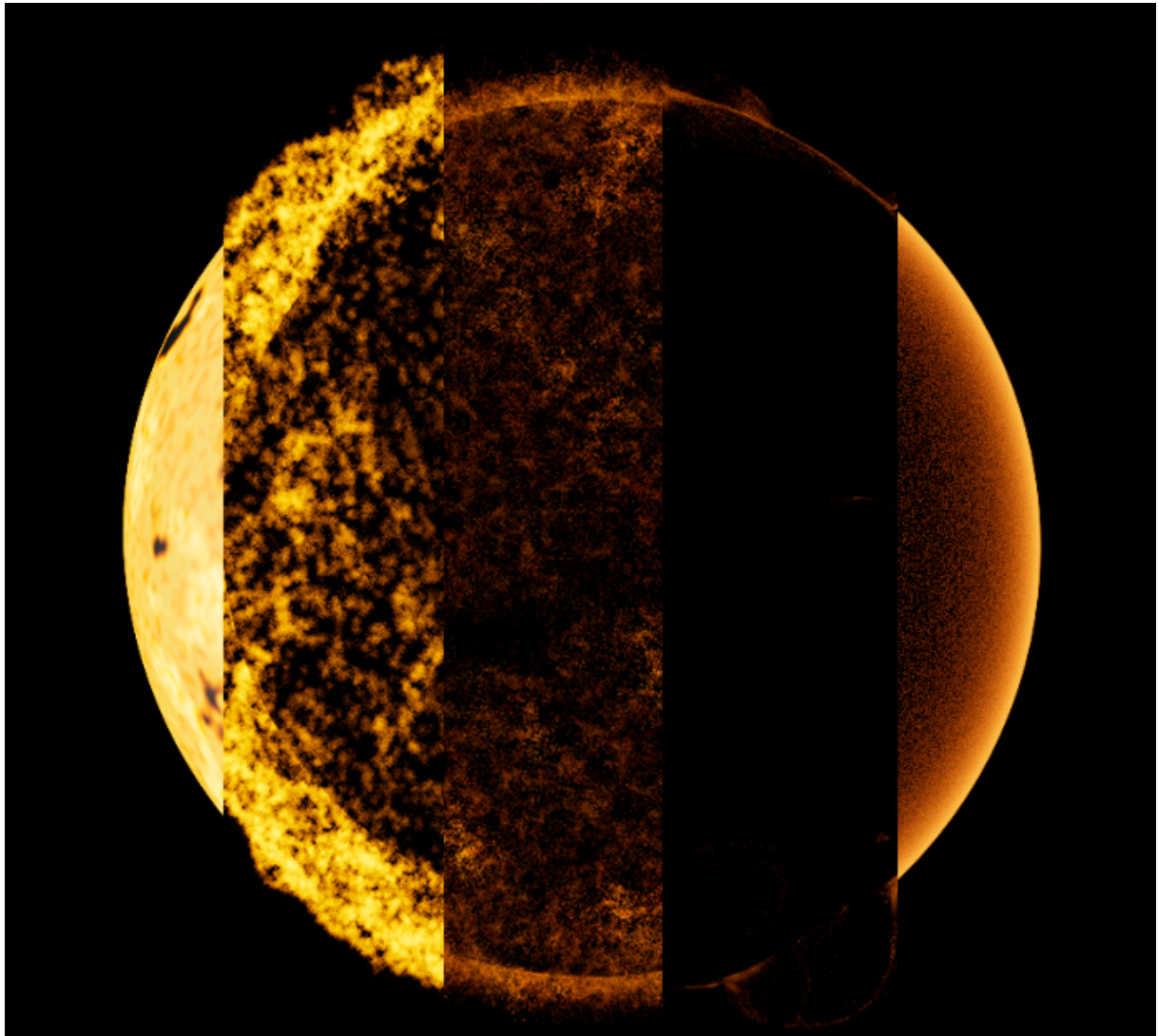


Illustration 48 - Passes de rendu du Soleil

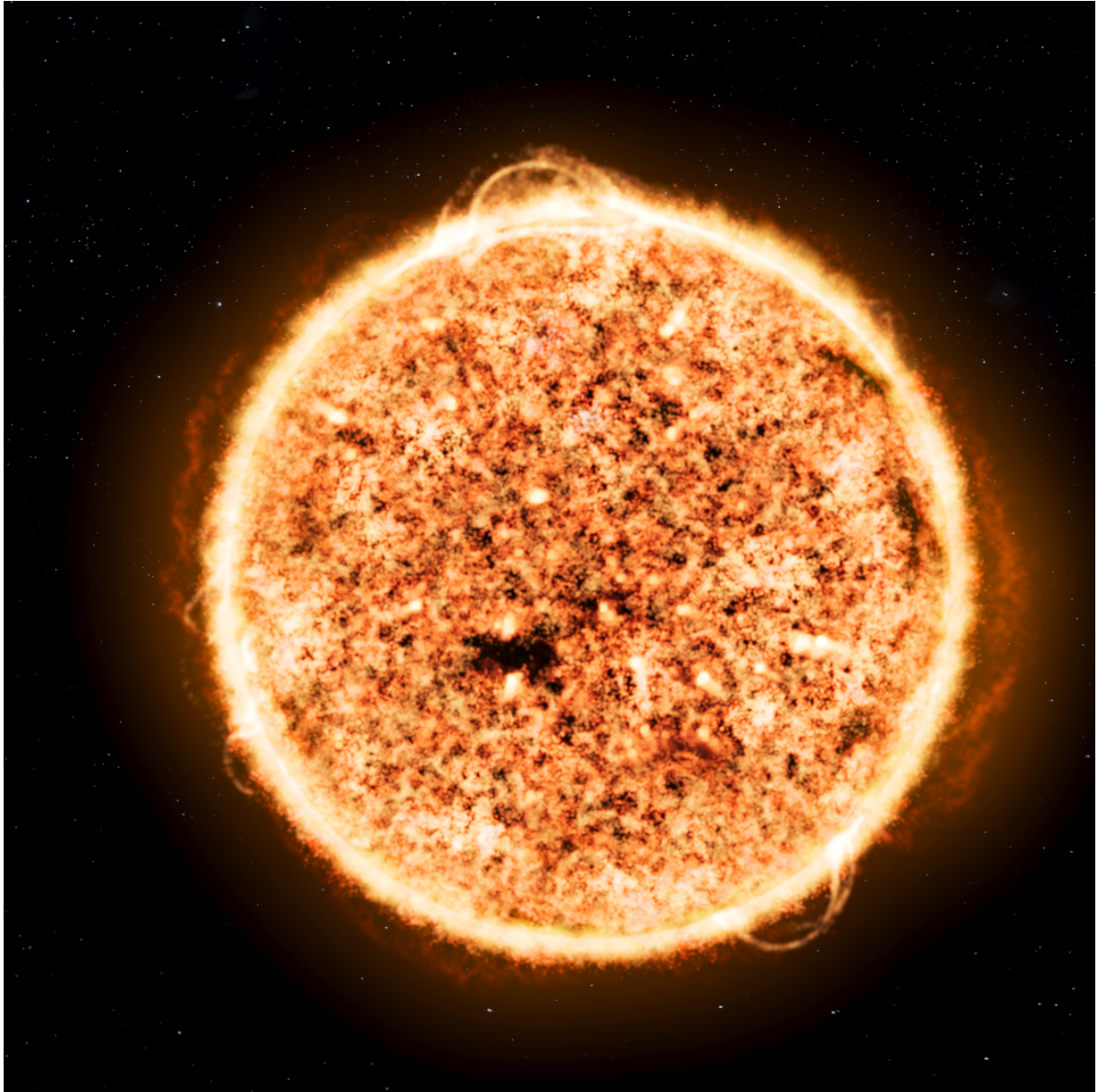


Illustration 49 - Résultat du Soleil après compositing

Voici le résultat final du Soleil après compositing. On retrouve les phénomènes astronomiques principaux qui le composent : les protubérances, les réactions thermonucléaires, les taches solaires et l'irradiance. J'ai tenté de me rapprocher de la couleur scientifique qu'elle pourrait avoir si notre rétine était capable de l'observer sans se brûler.

On a pu observer pendant notre expérience d'EXO-Tool et de récréation du Soleil, que la représentation d'un phénomène astronomique du point de vue d'un scientifique ne peut être 100% véridique dans tous les cas. La science étant elle-même un domaine où l'hypothèse joue un grand rôle, l'art scientifique se voit lui aussi sujet à interprétation, spéculation ou

vulgarisation dans certains cas. Il n'empêche que si l'on ne peut reproduire totalement fidèlement les événements astronomiques, il est tout de même très fortement intéressant d'exploiter les données scientifiques obtenues et de les appliquer aux images artistiques afin d'imaginer et de mieux comprendre la nature du phénomène observé. De la même façon qu'une photographie, un télescope spatial va devoir passer par un filtre pour isoler la partie qui l'intéresse. Un artiste astronomique qui adopte un point de vue scientifique doit cibler la partie véridique de son travail et la partie imagination.

Pourtant, certains artistes ont choisi de prendre le contrepied à la démarche scientifique et de s'approprier l'espace pour en faire une toile émotionnelle.

Une représentation subjective de l'univers

1. L'infiniment grand pour raconter des sentiments humains

a) Interprétation de l'univers par les peintres

Avec les spéculations sur la vie extra-terrestre de Lucien Rudaux, les artistes peintres ont commencé à s'approprier le cosmos et à rêver de ce que l'on peut y trouver. Déjà en 1889, un artiste apprend que les étoiles ne sont pas fixes dans le ciel, il décide d'interpréter leur mouvement sous la forme d'une spirale en s'inspirant des travaux sur les galaxies. Vincent Van Gogh va donc peindre sa *Nuit Étoilée* avec des astres tourbillonnants. Cette interprétation va marquer l'histoire du space art puisque l'artiste interprète les découvertes astronomiques pour créer de l'émotion et du mouvement dans son œuvre et s'éloigner de la réalité physique d'un ciel étoilé.



Illustration 50 - *La Nuit Étoilée*, Vincent Van Gogh, 1889

Quelques années plus tôt, en 1844, Grandville imaginait déjà un pont traversant les planètes pour illustrer le livre *Un autre monde*. Il raconte à travers cette illustration que l'âme pourrait traverser les planètes après la mort.

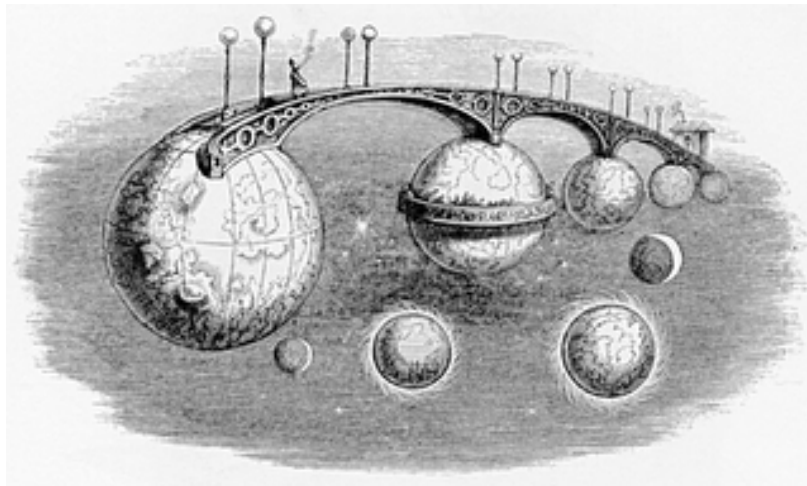


Illustration 51 - Un pont à travers l'espace, Grandville, 1844

Après l'invention de la photographie, de nouveaux courants picturaux vont émerger pour représenter le monde d'une nouvelle manière inaccessible à la photographie.

L'impressionnisme est un genre artistique qui tend à faire entrer les émotions du monde extérieur vers l'intérieur, en somme l'artiste peint son ressenti sur le monde. L'art astronomique est riche de visuels impressionnistes et parmi les plus cultes, on retrouve *Le Soleil* d'Edvard Munch qui montre à quel point l'astre lumineux est source de vie en illuminant la scène et en transcendant l'ensemble par son omniprésence.

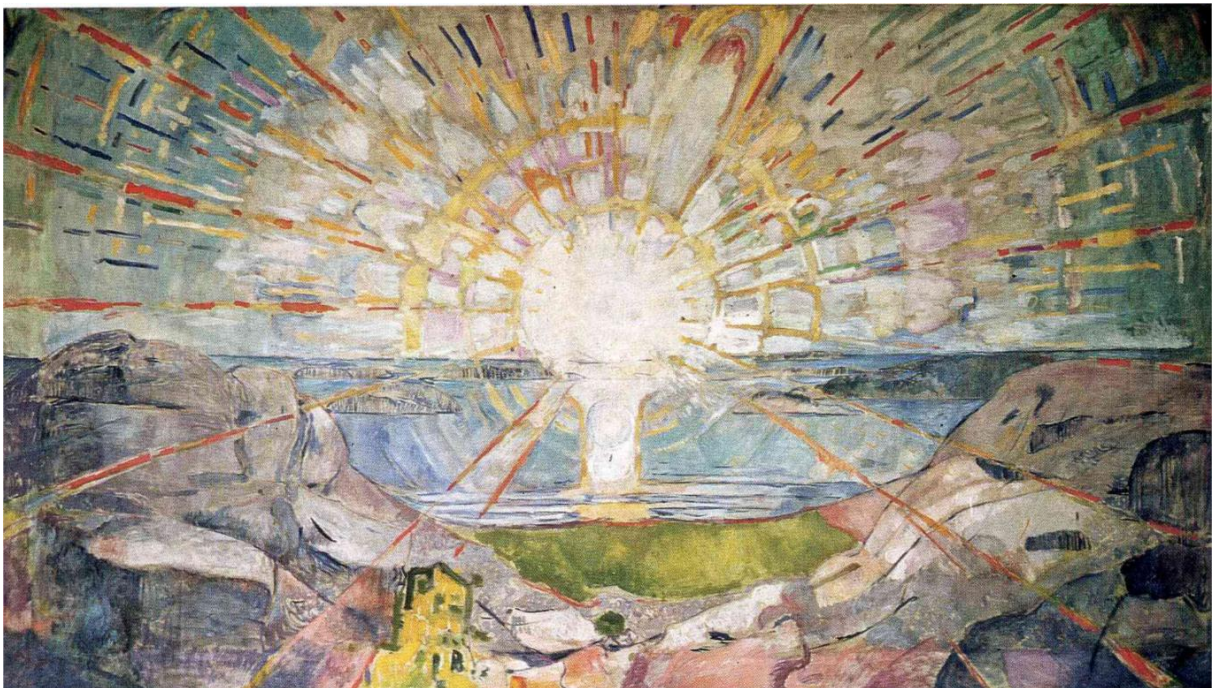


Illustration 52 - Le Soleil, Edvard Munch, 1911

Le futurisme est un genre qui cherche à représenter les éléments de la modernité en mouvement, Giacomo Balla va en 1914 peindre *Mercure passant devant le Soleil* où l'artiste interprète ce phénomène en cherchant à imager son passage dans la durée, donc en mouvement.



Illustration 53 - *Mercure passant devant le Soleil*, Giacomo Balla, 1914

En 1913, des années avant Star Wars, l'artiste allemand et expressionniste Wenzel peint l'hyper vitesse dans l'espace avec une vision fantaisiste de l'Univers où cohabitent des planètes connus et d'autres imaginées par l'artiste.

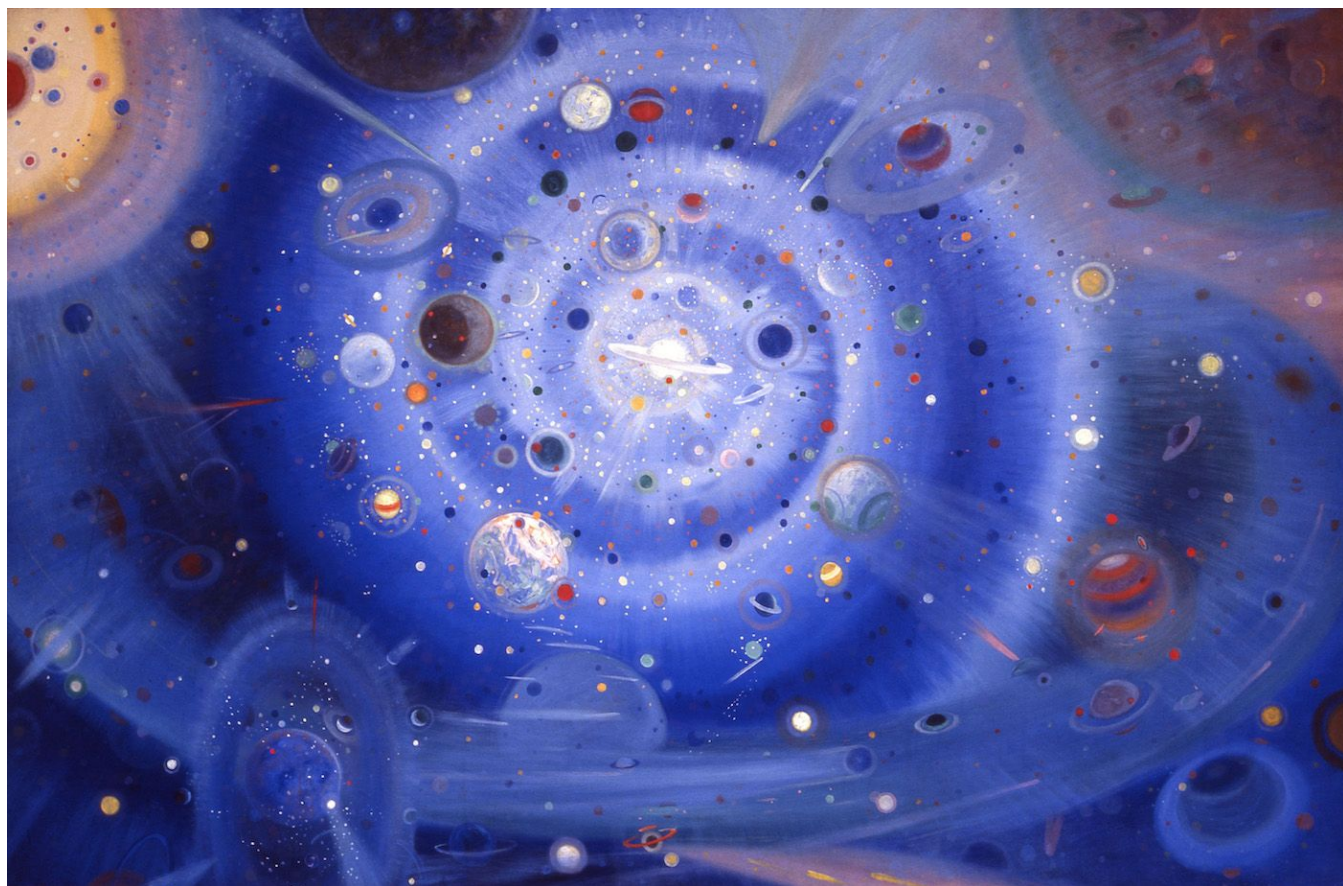


Illustration 54 - Firmament, Wenzel Hablik, 1913

Le surréalisme va ensuite, à la manière de Van Gogh, interpréter la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein qui, sommairement, définit que l'attraction gravitationnelle observée entre deux corps est due à une déformation de l'espace et du temps par ces corps. Et dans son tableau *La persistance de la mémoire* en 1931, Salvador Dali utilise le temps, ici des horloges, pour déformer l'espace.

Puis Ludek Pesek découvre les travaux de Lucien Rudaux à travers son livre *Sur les autres mondes* et développe un style de peinture classique et très précis pour mettre en image ses idées. Au début, l'artiste cherchant à dépeindre techniquement et véridiquement le monde cosmique, puis il va finir par préférer les interprétations visionnaires de l'espace et la poésie surréaliste. Ses dernières œuvres représenteront le voyage de la Terre à travers le cosmos.

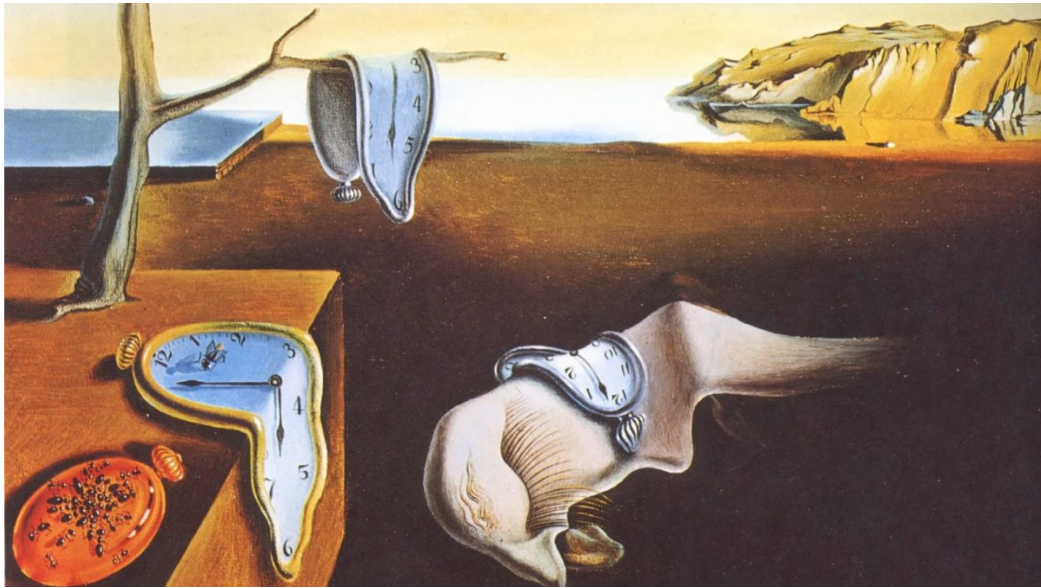


Illustration 55 - La persistance de la mémoire, Salvador Dali, 1931



Illustration 56 - Transformation, Ludek Pesek

Dans la même lignée, Ron Miller est un des plus grands space-artists et certainement un des plus productifs. Il a illustré plus de 50 livres sur l'astronomie et est l'auteur de *Art of Space*, la Bible du Space Art. Il est aussi responsable de la traduction et de l'illustration des œuvres de Jules Vernes et a produit des illustrations pour les films *Dune* et *Total Recall*. Beaucoup de ses visuels recherchent le réalisme astronomique mais on constate des œuvres où Ron Miller s'amuse à imaginer différemment la conception du monde, notamment dans sa série où il imagine des paysages terrestres avec des anneaux à l'image de Saturne.



Illustration 57 - *Rings from Guatemala*, Ron Miller

En 1969, Alan Bean fait partie de l'équipe d'astronaute sélectionnée pour la mission lunaire Apollo 12 et est la quatrième personne à marcher sur la Lune. C'est le deuxième artiste à aller dans l'espace après le russe Alexeï Leonov. Mais Alan Bean se consacre entièrement à l'art à partir de 1981. Il réalise plusieurs dessins de la Lune qui ont une particularité unique dans le milieu artistiques, la Lune est colorée avec de la poussière de Lune qu'il a ramené de son voyage.

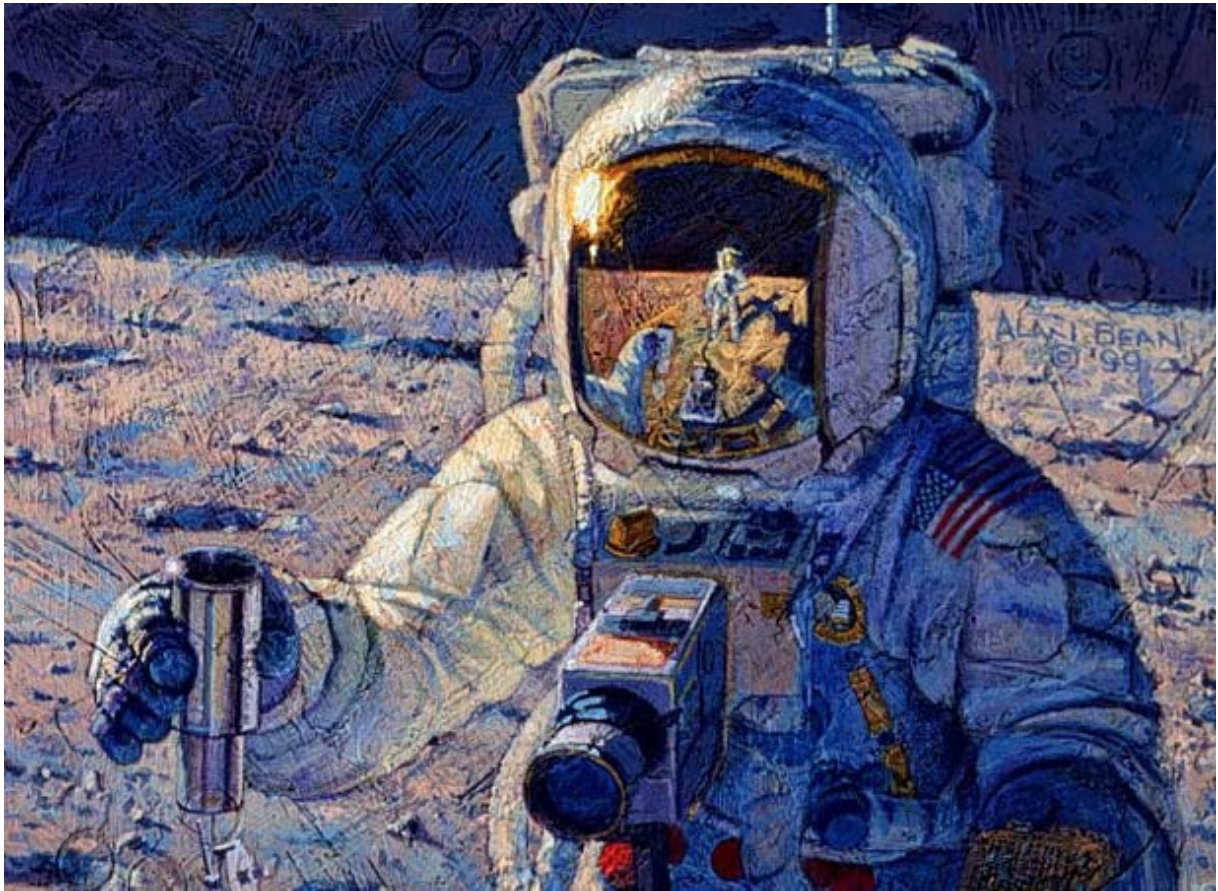


Illustration 58 - Œuvre d'Allan Bean réalisée à l'aide de poussière de Lune

Cette nouvelle génération d'artiste a su s'approprier l'espace et l'explorer à leur manière. C'est le cas de Lucy West, une artiste que j'admire personnellement, qui cherche constamment à comprendre un phénomène et voyage à chaque fois qu'elle peint une œuvre. Chacune de ses peintures tend à chercher la nature de l'astre ou de l'ensemble d'astres et à la magnifier. Son amour pour l'astronomie transparaît dans chacune de ses peintures. En plus de 40 ans, elle a su explorer diverses techniques et développer tout un panel de nature cosmique. Son œuvre *People of Pinnacle Point* est une des plus belles représentations de la Voie Lactée vue de la Terre.



Illustration 59 - *People of Pinnacle Point*, Lucy West, 2013

b) L'espace à la conquête de tous les arts

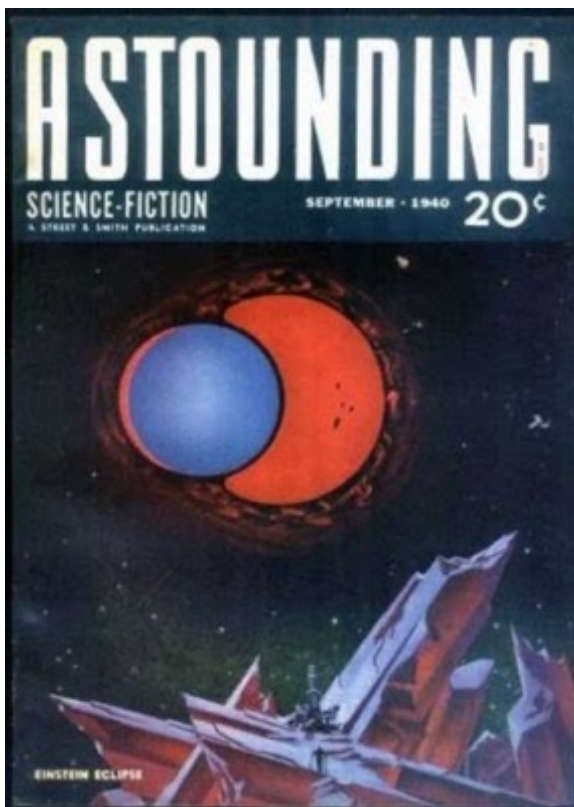


Illustration 60 - Couverture d'Hubert Rogers

Très longtemps, la peinture a été le seul médium pour représenter l'espace. Puis est arrivé la photographie au XXe siècle. En parallèle, dans les années 1930, d'autres supports artistiques comme les premiers magazines de science-fiction ont rendu l'art astronomique très populaire. Les artistes de ces couvertures se sont beaucoup inspirés des peintures d'Howard Russell Butler qui était réputé pour ses peintures d'éclipses solaires. D'autres artistes comme Charles et Hubert, se voulaient réalistes dans la représentation des couvertures de magazine. Ce dernier est le premier artiste à avoir représenté une lentille gravitationnelle, pour reproduire le phénomène

de déformation de la lumière à proximité d'un trou noir.



Illustration 61 -1er numéro d'Action Comics avec l'apparition de Superman

C'est d'ailleurs dans des bandes dessinées que l'on retrouve le premier héros originaire d'une planète lointaine : Krypton. Kal-L, aka Superman né en 1938, le héros qui va signer l'avènement des personnages extra-terrestres et des histoires interstellaires dans la bande dessinée. De l'autre côté du Pacifique, un autre genre émerge, le *manga*, l'équivalent de la bande dessinée au Japon, les personnages originaires d'autres planètes intriguent comme on peut le voir avec Sangoku, natif de la planète Vegeta et personnage phare du manga Dragon Ball. S'il ne fallait qu'une preuve que ces héros extra-terrestres passionnent, il suffit de regarder la popularité de ces personnages dans leur genre. Superman est le personnage le plus iconique du *Comics* (terme

utilisé pour désigner la bande dessinée aux États Unis) et Sangoku le plus iconique du *manga*. En France, le dessin animé Dragon Ball Z et la bande dessinée Superman ont eu un énorme succès et ont poussé les jeunes générations à s'intéresser à la culture américaine et japonaise.

La revue française *Metal Hurlant*, consacré à la musique hard rock a fait appel à de grands artistes comme Moebius pour illustrer leurs couvertures. Ils ont ensuite été rachetés par une production américaine et renommés *Heavy Metal*. Le métal est un genre qui se tournent parfois vers l'exobiologie et la science-fiction, Jimi Hendrix avouait lui-même être un grand fan de science-fiction et pour écrire *Purple Haze* il aurait puisé son inspiration dans le livre *Night of Light* de Philip José Farmer qui est un livre classique du registre science-fiction. Les plus grands groupes de métaux ont fait appel à l'art astronomique pour leur pochette d'album, comme Pink Floyd pour *Dark Side of the Moon*, Atoma pour *Skylight* ou encore le groupe suisse Darkspace en représentant l'espace dans ce qu'il a de plus mystérieux, effrayant et abominable en insistant sur le vide qui le définit. Des groupes comme Solstice ou Blood Incantation ont travaillé avec Bruce Pennington, un peintre anglais spécialisé dans les visuels

de science-fiction et de roman d'anticipation. Il a aussi travaillé pour les couvertures de l'écrivain très réputé Isaac Asimov, pilier de la science-fiction.



Illustration 62 - Pochette d'album de *Skylight* du groupe Atoma

L'exploration spatiale aura donc bien inspiré la culture musicale, et ceux, au-delà de l'aspect graphique des pochettes. Le musicien Mikael Jorgensen et l'historien de l'art James Merle Thomas se sont associés pour former le duo *Quindar* en l'honneur du son produit par les canaux de communication d'Apollo. Ils vont utiliser le son de vieux clips tournés hors de la Terre ou alors des sons enregistrés dans l'espace pour produire leurs musiques. Ils passeront par plusieurs genres du disco funk avec *Honeysuckle This Is Houston* jusqu'à l'électro ambient avec *Arabella & Anita*. L'espace va donc inspirer la musique qui va elle-même

entraîner les corps puisque les danseurs seront inspirés par l'espace pour mettre en scène leurs œuvres. Lors de sa conférence avec Guillaume Hébrard, Emmanuel Robin nous a fait découvrir des danseurs qui interprétaient le mouvement des planètes autour du soleil, tel un planétaire vivant. En 2017, la danseuse Sahar Dehghan met en scène le spectacle *Quantum Dance* sur les particules qui composent tous les corps du cosmos.

La sculpture est un art qui sera elle-même touchée par le space art. Barnett Newman dès 1946 crée une éclipse solaire sous une forme très abstraite en représentant des orbites et deux astres avec son œuvre *Pagan Void*. L'artiste verrier Josh Simpson quant à lui a capturé l'immensité de l'univers avec ses sculptures en verre où sont représentées les diverses planètes dont *Saturn*.



Illustration 63 - *Saturn*, Josh Simpson

c) L'univers vu à travers la caméra

S'il y a un bien un médium qui est riche d'art astronomique, c'est le cinéma. Film fantastique, science-fiction, space-opéra, tant de genres qui ont su s'inspirer du cosmos pour enrichir leur univers. Alors que le cinéma n'avait même pas une décennie, le prestidigitateur français Georges Méliès réalise le tout premier film sur le thème de l'astronomie avec *Le Voyage dans la Lune*. Une excursion cinématographique de 14 minutes qui, déjà, fantasme sur le monde

lunaire en y imaginant des champignons géants et des habitants. Étonnement, c'est un des rares films qui prend une immense liberté scientifique : les protagonistes n'ont pas de combinaisons spatiales, ils se font propulser dans la Lune avec un canon et cette dernière saigne.



Illustration 64 - Cave lunaire tirée du *Voyage dans la Lune* de Georges Méliès

À partir de 1950, le genre spatial du cinéma entre dans une période que l'on pourrait qualifier de plausibilité scientifique. On cherche à respecter au mieux la véracité scientifique du film mais en se permettant d'ajouter des éléments fictifs et d'anticipation. Ce mélange porte le nom de science-fiction, il présente au spectateur un univers qu'il juge réaliste puisque la réalité scientifique y est dépeinte. Dès lors que le spectateur approuve ce réalisme, la partie fictive va être acceptée, ou du moins envisagée comme une plausibilité. La partie fictive est souvent étroitement liée à un décalage espace-temps, c'est-à-dire que le film prend une autre temporalité et/ou un autre lieu pour raconter son histoire, permettant au spectateur d'envisager l'histoire. Cela peut se passer dans le futur comme *Star Trek* qui se déroule en 2387 ou dans le passé comme *Star Wars* qui se déroule il y a longtemps, très longtemps.

Le sujet de l'exobiologie, la représentation de la vie dans l'univers, est récurrent dans le genre de la science-fiction. L'extra-terrestre sera représenté de manière extrêmement varié et va débrider l'imagination des artistes qui vont l'interpréter sous tant de formes différentes. De l'être humain avec Superman, à la bête sauvage d'*Alien* en passant par l'humanoïde dans *E.T.* Ces diverses représentations montrent une variation de genres au sein même du genre de Science-Fiction, *E.T.* n'a jamais voulu nuire à l'homme, alors que l'inverse est vrai, en ce sens il se rapprocherait sans doute plus d'un drame. Là où *Alien* par sa mise en scène se rapproche nettement plus d'un film d'épouvante. Ainsi, le genre de la science-fiction au cinéma n'est souvent qu'un sous genre du film puisqu'il permet de définir uniquement le contexte spatio-temporel de l'œuvre audiovisuelle et non pas le scénario en lui-même.

Partant de ce constat, on s'aperçoit que les cinéastes ne représentent pas de la même manière le Cosmos dans un film d'aventure que dans un film d'horreur. Toujours dans *Alien*, l'espace est représenté sûrement de la manière la plus réaliste, et donc la plus inquiétante qu'il soit. C'est le noir total, à la manière du groupe de métal Darkspace, l'espace est représenté sous sa forme la plus inquiétante et angoissante qu'il soit, un néant à perte de vue sans nulle vie autour du vaisseau.

Quelques années plus tôt, en 1968 Stanley Kubrick nous offre *2001, l'Odyssée de l'espace*. La dimension de véracité scientifique du film est impressionnante, il s'associe avec la NASA pour réaliser ce film et créer un cosmos et des technologies astronomiques réalistes.



Illustration 65 - Alunissage dans *2001, l'Odyssée de l'espace* par Stanley Kubrick

Il faudra attendre la fin du XXe siècle pour obtenir les premiers visuels d'espace magnifié. Les réalisateurs vont prendre conscience que l'espace peut être utilisé comme une toile de

peinture vierge et qu'ajouter des couleurs est possible pour faire ressentir de nouvelles émotions au spectateur. Je pense personnellement que la variété chromatique de la représentation spatiale vient aussi des premières photographies de Hubble qui viennent montrer au public la diversité de l'espace et les premières interprétations en couleur des nébuleuses. Un des films qui dispose des couleurs les plus riches dans l'espace est sans aucun doute *Guardians of the Galaxy* de James Gunn en 2014. Dans ce film Marvel, aucun place au noir et au vide dans l'espace. On nous propose des visuels très colorés et un univers souvent lumineux. En 2016, Morten Tyldum réalise *Passengers*, un film qui se rapproche du registre de la comédie romantique et qui n'hésite pas à le montrer avec des scènes d'amour saupoudrées de nébuleuses roses. Ces interprétations de l'espace ne cherchent plus à représenter la véracité du cosmos, même s'il y a toujours des principes scientifiques cohérents, mais plutôt à s'approprier l'univers inconnu pour raconter des histoires et mettre le décor au service de l'histoire.

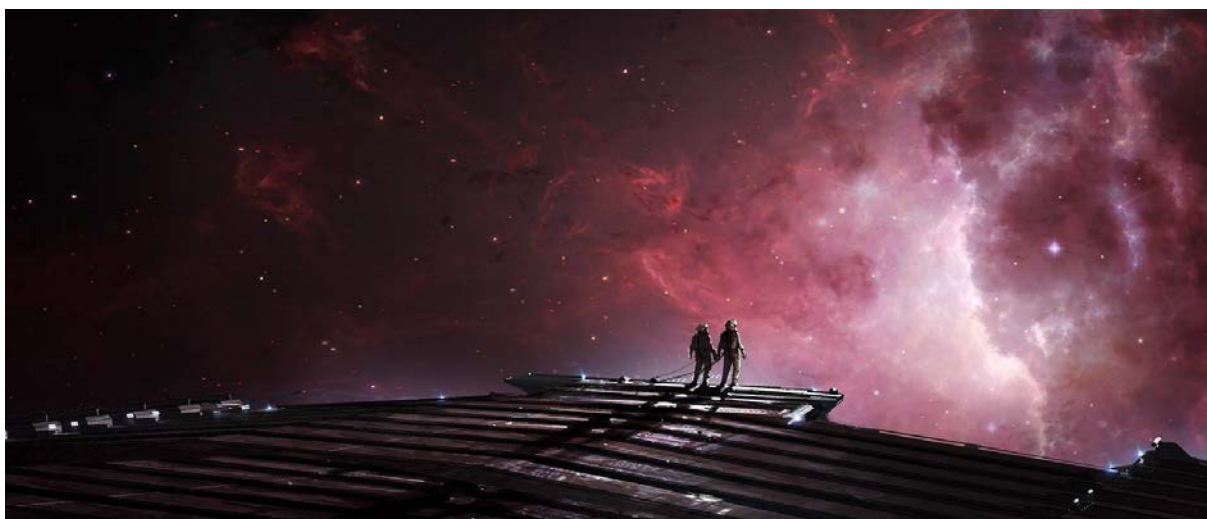


Illustration 66 - *Passengers* de Morten Tyldum

d) COSMOS, entretien avec Dominique Vidal

Mais alors, s'il y a bien un genre cinématographique qui doit respecter la véracité scientifique, c'est le documentaire scientifique. Il doit nous présenter des faits astronomiques et nous informer de la nature de ce qu'il y a au-dessus de nos têtes. Évidemment, on ne peut pas filmer dans l'espace et on fait appel à des entreprises d'effets visuels pour créer des paysages cosmiques et images scientifiques dont on a besoin pour illustrer une partie du documentaire. L'entreprise dans laquelle j'effectue mon alternance, BUF, s'est vue confier la création d'une grande partie des visuels spatiaux pour la série COSMOS présentée par Neil DeGrasse Tyson.

Cosmos est une série docu-fiction dans laquelle on embarque avec Neil à bord du vaisseau de l'imagination, vaisseau capable de changer de taille et de dépasser la vitesse de la lumière afin de nous faire découvrir les merveilles du Cosmos.

J'ai pu échanger avec Dominique Vidal, superviseur VFX chez BUF, à propos de la création de ces visuels et des contraintes scientifiques imposées par la production. Étonnamment, il m'a appris qu'il n'avait pas vraiment de *concept art*, ils avaient une grande liberté de proposition. Leur seule véritable contrainte était évidemment les éléments scénaristiques à respecter. Les rares retours de véracité scientifique se concentré principalement sur l'orientation de la voûte céleste de la Voie Lactée qui plaçait les étoiles au mauvais endroit. Il faut préciser aussi que BUF respectait tout de même les principes physiques des phénomènes astronomiques à représenter. Par exemple, Dominique a développé un shader de lentille gravitationnelle pour la séquence des trous noirs. Pour obtenir des rendus réalistes et de grandes qualités, les artistes ont privilégié l'utilisation de photographies astronomiques de télescopes spatiaux de grande résolution pour créer des textures ou pour le compositing. Ils utilisent aussi un principe de nébuleuse soustractive qui va est un nuage de poussière en contre-jour pour ajouter de la profondeur à l'image.



Illustration 67 - Plan de COSMOS utilisant la technique de volume soustractif

Cependant, pour le *sky field*, l'image de la voûte céleste en 360°, la définition n'était pas suffisante pour obtenir une image nette à l'étape de compositing. Dominique a donc développé un algorithme permettant de détecter la magnitude de l'image et de détecter les étoiles. À partir de là ces étoiles vont générer des points qui auront une magnitude correspondante à l'image de référence puis il rend ce nuage de points pour obtenir une image proche de l'initiale mais dans une résolution plus importante. Il a aussi créé un outil qui permet de créer des nuages en voxel à partir d'une image de nuages 2D permettant ainsi de créer des interactions entre des lumières et des volumes.

Le problème de l'échelle a été rencontré par les équipes d'artistes, la plupart du temps les objets célestes étaient placés à l'œil en fonction du plan. Seulement la passe du *sky field* était rendu sans aucune translation et uniquement de la rotation pour éviter un phénomène de parallaxe puisque ce phénomène n'est pas réaliste sur les objets lointains.

La parallaxe est un effet qui se crée lorsque l'observateur se déplace et change de point de vue, la perspective sera alors modifiée pour ce dernier. Pour les objets lointains, se déplacer de quelques mètres n'aura aucune incidence sur la perspective.

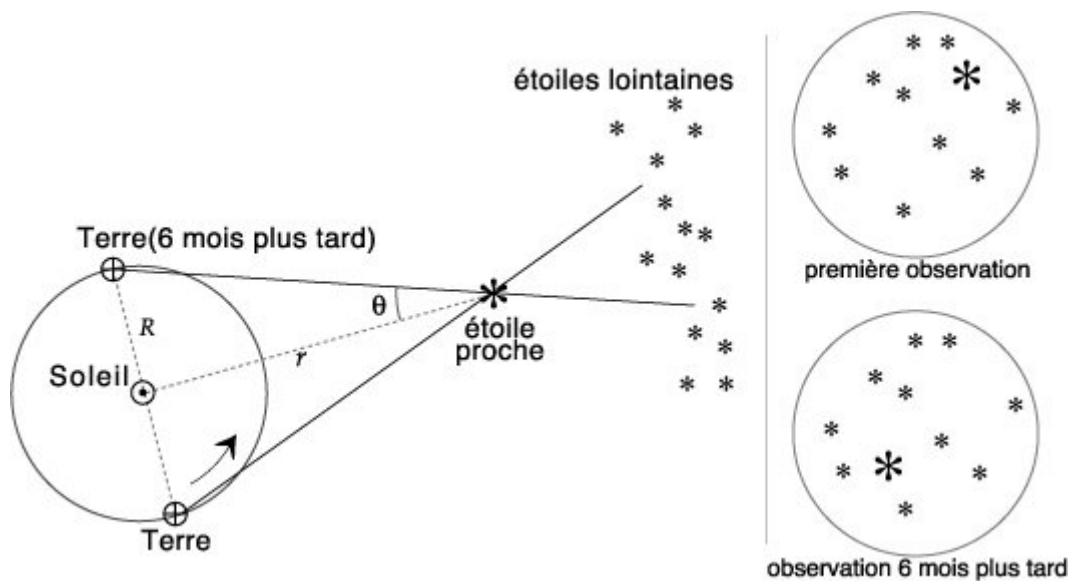


Illustration 68 - Explication de la parallaxe d'un point de vue astronomique

Au final, même la production d'un documentaire n'est pas à cheval sur la véracité scientifique des images d'illustrations. La production demandait même parfois à BUF d'accélérer le mouvement des planètes pour qu'elles paraissent en mouvement, quelque chose d'irréaliste pourtant. Je pense que cela dépend évidemment des productions, COSMOS est initialement un docu-fiction grâce au parti pris du vaisseau de l'imagination, mais c'est avant tout une

série de vulgarisation scientifique qui doit atteindre un très grand public au vu de son budget. Alors, si les paroles nous racontent des faits scientifiques, les images vont nous transporter et nous faire rêver d'un espace magnifique et accueillant. Et en soit, si l'on veut intéresser son spectateur et le passionner, l'image a toute son importance. Le public aurait-il été au rendez-vous si on avait présenté des ciex astronomiques noirs ?



Illustration 69 - La Voie Lactée dans COSMOS

e) WHIRL, danse, effets visuels et cosmos

Pendant mon alternance, j'ai eu la chance de me voir confier le projet de l'artiste Sahar Dehghan, danseuse originaire d'Iran qui a étudié la musique, le théâtre et la danse à Paris et qui a dansé pour divers spectacles à travers le monde (Etats-Unis, Turquie, Inde, Suisse, Angleterre...). Depuis quelques années, elle est à l'origine d'un projet triptyque qui mêle la science, l'art numérique et la danse. Le premier arc de sa création a pour protagoniste le microcosme, le monde du petit et même du très petit puisqu'il s'agit de traiter de la physique quantique. Le second arc s'intéresse au macrocosme, le monde du grand où il s'agit de traiter là de l'astronomie et des corps astraux. Et enfin le dernier arc traite de ce qu'il peut se passer dans un trou noir et s'interroge sur l'existence de monde parallèle et de multivers, dimensions parallèles à la nôtre.

Le premier arc a été présenté en 2017 avec le spectacle de danse *WHIRL Quantum* joué à San Francisco et qui déjà mêlé la danse, la physique quantique, les arts numériques avec du mapping vidéo et de la poésie persane.



Illustration 70 - Extrait de *WHIRL - Quantum Dance* de Sahar Dehghan

Pour le second arc sur le macrocosme, Sahar souhaite d'abord réaliser un film d'une dizaine de minutes comprenant des plans truqués qui raconteraiebt une analogie entre deux corps humains et deux corps célestes qui vont s'attirer et se repousser à la manière de l'attraction gravitationnelle pour au final entrer en collision et fusionner. Après ce film, elle souhaite chorégraphier un spectacle de danse sur ce thème avec du mapping vidéo à la manière de *Quantum Dance*. Ce petit film lui permettra de diffuser son projet à un large public et d'intéresser, intriguer, questionner et émerveiller les spectateurs sur cette histoire qui va hybrider plusieurs domaines artistiques.

Afin de réaliser ce film, Sahar a demandé à BUF de travailler sur quelques plans pour son teaser pour l'enrichir visuellement avec des plans truqués. Sous la supervision de Dominique Vidal, j'ai travaillé sur la création ces plans. L'objectif était de voir l'étape de création d'un trou noir, représenté par un premier danseur qui en tournant sur lui-même absorbe la matière

environnante, lumière comprise. Ce trou noir va ensuite se rapproche d'un autre danseur, un autre trou noir et les deux corps vont s'attirer et se repousser jusqu'à fusionner. À cette étape, leur disque d'accrétion va fusionner, et au centre du trou noir, les corps vont atteindre une fusion totale, sorte d'orgasme, qui est représentée par les jets du blazar, qui sommairement est une source d'émission de rayonnement de toutes les longueurs d'ondes (de radios à gammas).



Illustration 71 - Référence d'un Blazar

Pour réaliser ces plans, Dominique m'a expliqué le fonctionnement des outils développés pour Cosmos. Tout d'abord le plus important, le shader de lentille gravitationnelle. Ce genre de phénomène est produit par un corps céleste très massif qui a pour effet de dévier les rayons de lumières pour l'observateur qui reçoit cette lumière. Plus un corps céleste est lourd, plus la lumière va être attirée par ce corps et donc se déformer. Dans le cas d'un trou noir, objet astronomique extrêmement massif, une partie de la lumière n'a pas pu s'échapper du rayon de gravitation du trou noir et est donc totalement absorbée par le trou noir.

Pour réaliser cet effet, on crée une grille devant la caméra et on lui applique un shader script. BUF utilise un langage de programmation interne le BLAST, hérité du C, qui permet d'effectuer plusieurs opérations dans différents contextes du logiciel interne, la logique est très proche du VEX d'Houdini. On va donc coder un shader en BLAST qui va définir pour chaque rayon envoyé par la caméra, comment le shader va réagir à ce rayon. Puis on se sert de

chaque point de la plaque touché par les rayons pour renvoyer de nouveaux rayons dans la scène dans la même direction que le rayon initial. Ces nouveaux rayons ont une logique de raymarching, c'est-à-dire que le rayon envoyé a un pas d'évaluation. Chaque fois qu'il parcourt une certaine distance, on calcule sa distance au trou noir, on trouve le vecteur directeur entre la position évaluée et le trou noir et on définit la force d'attraction de cette manière :

$$F = \frac{Gravite}{Distance^2}$$

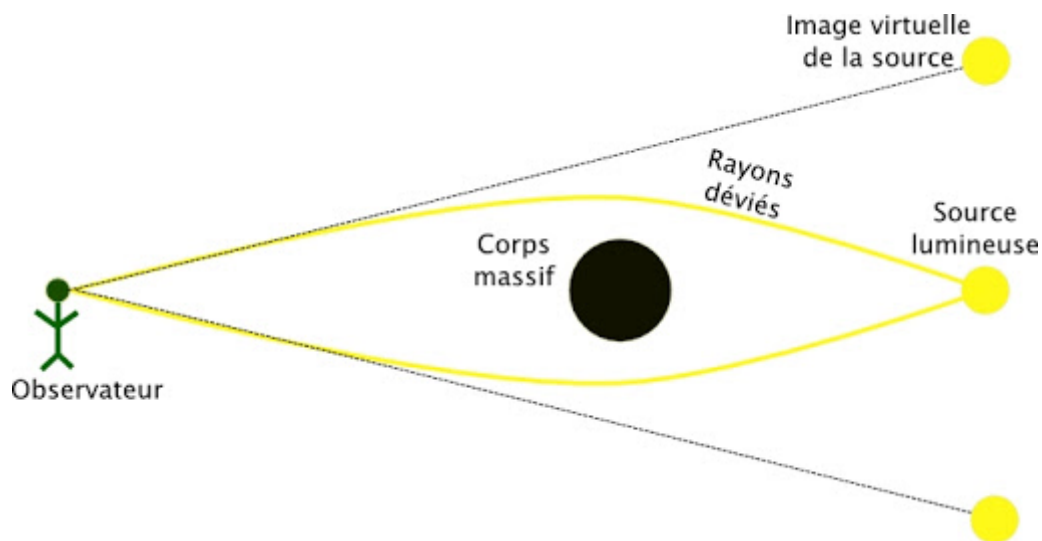


Illustration 72 - Explication du phénomène de Lentille Gravitationnelle

On définit un premier coefficient qui va venir pondérer l'attraction en fonction de distance minimale et maximale par rapport à l'échelle de la scène et un second coefficient pour optimiser le rendu. Si on est assez loin du trou noir, la distance entre deux pas sera plus élevée.

On calcule donc la direction normalisée en fonction de la force d'attraction, c'est-à-dire la direction du trou noir pondérée par le premier coefficient. C'est cette direction, multipliée au second coefficient d'optimisation, qui sera ensuite additionnée à la position évaluée pour définir la position du pas suivant.

Si entre la position actuelle et la position au prochain pas, on touche une géométrie alors on évalue la couleur et la transparence de cette géométrie au point d'intersection, sinon on passe au pas suivant.

De cette manière, l'effet de lentille gravitationnelle est recréé lors du rendu avec l'activation de cette plaque. J'ai cherché à reconstruire ce shader sur Houdini et durant mes recherches j'ai

découvert deux points notables. D'une part, il existe bien un contexte d'écriture de shader avec le VEX mais qui est bien moins accessible que la programmation VEX dans le contexte de géométrie. Lorsque l'on crée un shader VEX, on doit en réalité créer un digital asset défini en contexte VEX de type CVEX VOP. Le CVEX a la particularité d'être plus bas niveau et de ne pas avoir toutes les fonctions communes aux autres contextes. Elle sera donc plus rapide à exécuter et sera optimisée pour le rendu puisqu'il va être appelé par une procédure C++. Les variables des scripts shaders ne sont pas déclarées de la même manière que dans les autres contextes. Pour définir un paramètre, on va devoir utiliser un *#pragma*, qui servira à modifier directement le comportement du compilateur, et donc avec l'option *#pragma hint foo1* on communiquera au compilateur l'ordre suivant "Va récupérer la variable de l'asset qui porte le nom de foo1". En sortie de notre shader on a trois principales variables à retourner, **Cf** qui est la couleur de la surface, **Of** qui est l'opacité de la surface et **Af** qui est l'opacité du pixel.

```
for(int i = 0; i < step && qr1 > Gseuil1; i++){
    // calcul distance et gravite
    vector radius1 = tgl-0;
    qr1 = length(radius1);
    float gr1 = G1/qr1*qr1;
    vector grDir1 = normalize(radius1);

    // step prepa
    float coef = smooth(dmin, dmax, qr1);
    float delta = lerp(step_min, step_max, coef);

    // direction finale
    D = normalize(D+(gr1*grDir1*(1-coef)));
    //D = normalize(D);
    vector Cd;
    gather(0,D, "maxdist", delta, "Cf", Cd){
        Cf = Cd;
    }
    O += D*delta;
}
```

Illustration 73 - Boucle de raymarching pour le shader de lentille gravitationnelle

Le second point notable est l'existence des lens shader. Il est possible de ne pas passer par une grille avec le shader de raymarching mais de définir directement des shaders pour le comportement de la caméra. Pour chaque pixel de la caméra, cette dernière va envoyer un rayon partant d'une position 3D vers une direction. Il est possible de faire notre raymarching

sur ce shader de lentille et de définir à quelle position finale notre shader sera lancée. Le défaut de ce type de shader est qu'il ne permet pas de prendre en compte l'opacité d'une surface et donc si une surface est transparente le rayon va continuer de manière linéaire plutôt que d'être encore dévié par la gravité. J'ai donc choisi de prendre la technique de la plaque pour reproduire cet effet sur Houdini.

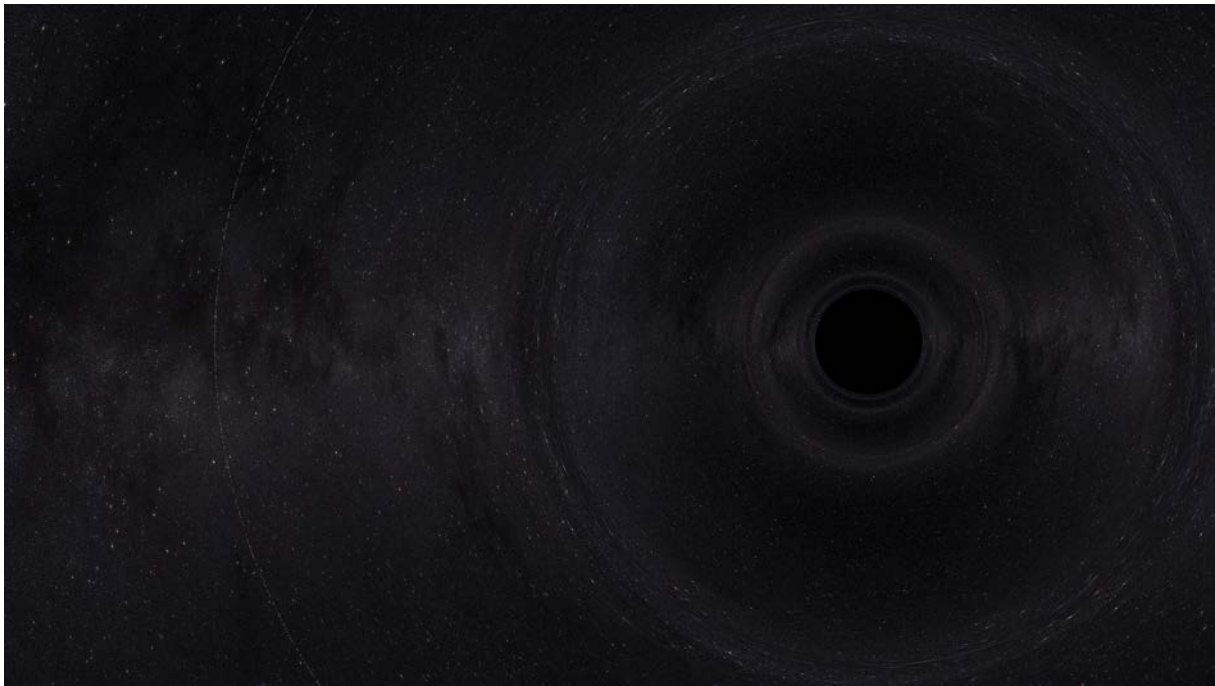


Illustration 74 - Création de l'effet de lentille gravitationnelle sur Houdini

Pour le disque d'accrétion, nous avons deux méthodes. Pour la première, nous avons pris un rayon minimal et maximal autour du trou noir et nous avons généré des particules autour. On transforme la position cartésienne des particules en coordonnée polaire pour les entraîner en rotation autour de l'axe central qui est le trou noir. La vitesse varie en fonction de la distance au centre, plus on est près, plus on va vite.

La seconde méthode consiste à utiliser un shader script sur un plan, on positionne ce plan pour que le trou noir soit en son centre puis on lui applique un bruit que l'on va projeter sur un cylindre. Plus on est proche du centre plus la texture de bruit va être déformée. De la même manière que les particules, on va trouver les coordonnées polaires et les entraîner en rotation en fonction du centre.

Après le disque d'accrétion, il a fallu préparer les jets de blazars. Pour cela on a généré des poils avec un bruit qui allait être propre à chaque poil et beaucoup plus lumineux à la racine

du poil, donc au centre du trou noir. Utiliser des poils pour créer des courbes animées est une méthode d'optimisation parfaite pour obtenir des images en quasi temps-réel.

Pour les personnages, on a choisi une représentation sous forme cristalline pour leurs donner une solidité tout en reflétant et en s'intégrant dans leur environnement. Cela nous a même permis de jouer avec l'incandescence du cristal qui va chauffer à mesure que le trou noir accélère. Il y a juste un plan où la réalisatrice voulait symboliser deux amas de galaxies qui scissionnent pour former deux amas différents et qui ont la forme des danseurs. Pour ce plan je disposais d'un délai très court, j'ai donc roto animé les danseurs, c'est-à-dire que j'ai reconstruit leur animation en 3D pour générer des particules dans ces meshes volumétriques pour créer les amas. Certains endroits sont plus denses pour qu'on ressente des galaxies. Deux couleurs dominant, le bleu et le jaune qui vont apporter une harmonie à la chorégraphie.

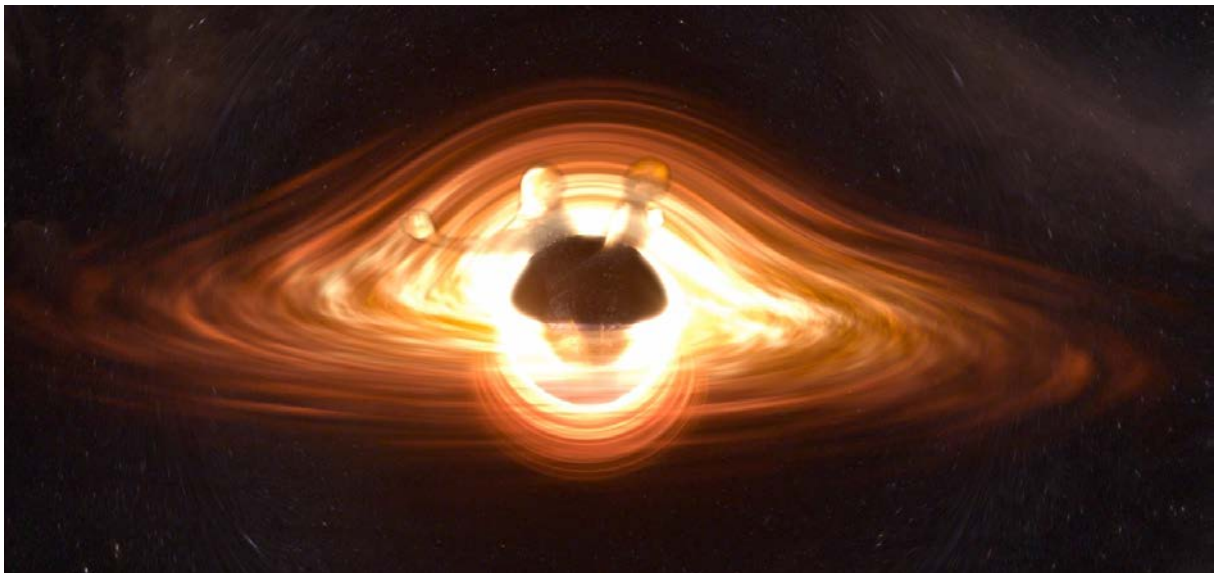


Illustration 75- Extrait du teaser avec les danseurs-trous noirs

Ce projet a été très instructif et extrêmement intéressant. Travailler sur ce sujet qui mêle art et astronomie a été une chance incroyable dans le cadre de mon mémoire. Totalement entre la vulgarisation scientifique et l'interprétation artistique, le film s'approprie le cosmos et lui est fidèle en même temps. La réalisatrice a été séduite par notre travail et je continue à travailler avec elle aujourd'hui pour la création du teaser.

2. Création d'un espace magnifié : Star Wars

a) ACES, un système de gestion de couleur indispensable

Je me suis associée avec plusieurs camarades pour réaliser un projet intensif sur le thème de Star Wars. Ce court film, m'a permis de travailler sur l'environnement, une partie des effets visuels, le rendu et le compositing. Étant donné que je me trouvais en bout de chaîne, j'ai demandé à mon équipe la mise en place de l'ACES dans notre pipeline de production.

ACES signifie *Academy Color Encoding System* créé par des professionnels de l'industrie pour répondre aux problèmes apportés par la technologie numérique dans le cinéma. Les sources d'images provenant d'une variété de caméras, ce système d'encodage doit contrôler la complexité de gestion de tous ces différents formats, l'encodage, la reproduction des couleurs et l'assemblage de toutes les images qui interviendront dans la production.

Lors de mon premier stage de Licence 3 en Art et Technologie de l'Image, j'étais TD Pipeline chez Mikros Image et j'avais dû m'occuper de l'intégration de Flame, qui est un logiciel de finishing et compositing, dans la chaîne de production de Mikros. Cela passe aussi par l'implémentation de l'ACES dans ce logiciel, j'avais donc été formé sur ce système d'encodage et j'étais au courant des atouts qu'il pouvait apporter à notre film.

L'ACES dispose d'un espace colorimétrique de référence *ACES2065-1* qui a un gamut de couleur extrêmement large, plus large que la vision humaine selon la norme CIE, c'est-à-dire qu'il a un ensemble de couleur reproductible très dense. Il est utilisé pour définir les coordonnées colorimétriques de la majorité des espaces colorimétriques proposés par l'ACES et est l'espace employé pour l'archivage afin de remasteriser un film. Le système d'encodage a donc un objectif d'être utile sur la durée.

D'autres espaces sont proposés par l'ACES, mais celui qui nous intéresse le plus dans notre cas est l'*ACESc* qui est l'espace linéaire utilisé pour les images de synthèses. Il va nous permettre, entre autre, de stocker une dynamique très grande pour avoir une amplitude de travail importante au compositing et dans le comportement de la lumière au rendu.

Cependant, les textures que l'on utilise pour le rendu ne seront pas forcément en *ACESc* et il faut les convertir avec une *Input Device Transform (IDT)* ou *Input Transform* qui est le processus qui va s'occuper de cette conversion. Ensuite, une fois que l'image finale est composée, on doit la sortir pour l'afficher sur un périphérique d'affichage. Cette étape de transformation de sortie est composée de deux étapes : *RRT* qui signifie *Reference Rendering Transform* et qui convertit l'espace colorimétrique informatique vers la colorimétrie référencée pour l'affichage. Il dispose cependant d'un gamut plus large et d'une plage

dynamique étendu afin d'afficher l'image sur n'importe quel type de périphérique même ceux qui n'existent pas encore. Cette transformation du rendu de référence vers le périphérique est appelé *ODT* soit *Output Device Transform* et c'est la seconde étape pour afficher l'image.

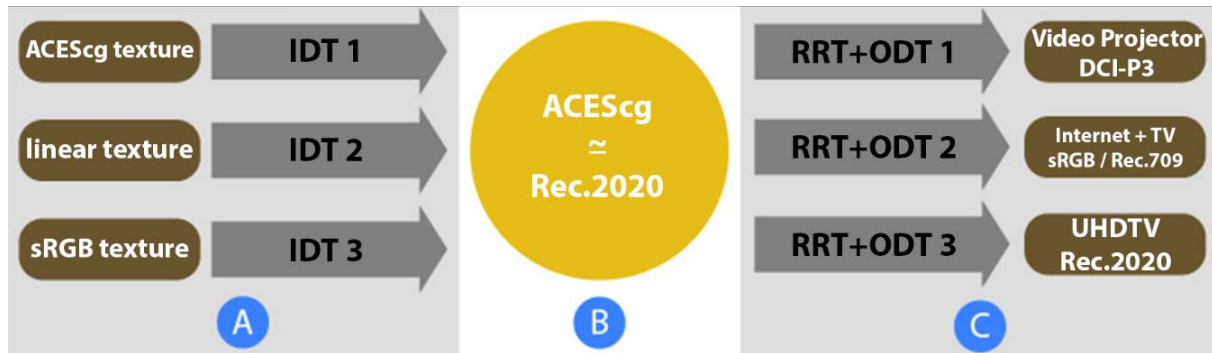


Illustration 76 - Explication des fonctions de transformation de l'ACES

L'ACES est donc notre point de départ pour sortir des images de qualités, puisque l'espace colorimétrique de travail est plus étendu et grâce à la logique d'encodage, l'image ne sera pas dégradée si on doit le lire sur un projecteur, une télévision ou un moniteur.

b) S'appropriier l'univers dans une licence universellement connue

Faire un projet sur une licence aussi connue que Star Wars c'est ambitieux et on nous l'a beaucoup reproché. Il y a les problèmes de droits, les bases de l'univers et des codes à respecter ainsi qu'un public beaucoup plus critique que si l'on avait choisi une histoire originale. Tout cela est vrai. Mais c'est aussi un challenge qui nous pousse à faire de notre mieux car on sait que notre travail sera ensuite comparé aux films. En tant que responsable de l'environnement spatial sur ce court métrage, mon désir était de prendre le contrepied de la licence en proposant une nouvelle manière de représenter l'espace. Je me suis appuyé sur mes recherches faites au premier semestre pour composer une scène spatiale qui sera en accord avec la situation du pilote que l'on suit. L'univers cosmique de Star Wars est souvent assez vide, les scènes les plus riches sont celles qui se situent à proximité de la thermosphère ou de l'exosphère des planètes. Mais on voit rarement des nébuleuses ou des amas d'étoiles comme un appareil photographique peut le produire. Ce n'est pas un tort, c'est une façon de représenter le cosmos, mais ce n'est pas celle qui m'intéressait.

Dès le premier plan, je choisis d'annoncer la couleur en présentant un ciel étoilé à la Star Wars, et dès le tilt (inclinaison de la caméra) d'entrée, je montre le fond spatial teinté par une

nébuleuse bleu et rouge pour afficher la dualité qui sera présente dans le film, le bien contre le mal.



Illustration 77 - Plan d'ouverture du projet intensif

L'environnement est le protagoniste dans notre projet puisque le X-WING échappe à ses poursuivants en utilisant un nuage de poussière, lié à la création d'une étoile, la stellogénèse. Comme on a pu le voir lors de la création de l'EXO-Tool, une étoile naît de la contraction gravitationnelle d'un nuage de gaz et de poussières qui se fragmente en plusieurs cœurs proto-stellaires. Ils vont se contracter en leur centre pour former une étoile alors qu'en périphérie un disque d'accrétion va se former. C'est ce phénomène là que j'ai voulu recréer puisqu'il permet de raconter la fuite de notre pilote. Mais aussi parce qu'une stellogénèse n'a quasiment jamais été représentée. Le challenge est double puisque je dois recréer un nuage de poussière qui respecte une réalité scientifique et qui doit raconter visuellement une histoire qui sert le propos du film.

c) Création de la stellogénèse

i. Références

Le nuage d'Orion, situé dans la constellation du même nom, est situé à environ 1600 années-lumière de la Terre et contient la nébuleuse d'Orion qui est une des régions de formations stellaires les plus actives. Les images de Hubble de cette nébuleuse sont donc de véritables mines d'or pour se procurer des références. On se rend compte qu'il y a quelque chose de chaotique dans la disposition de la nébuleuse. La densité du nuage est bien plus forte au cœur de l'étoile la plus lumineuse, preuve qu'elle est plus attractive que les jeunes étoiles à

proximité. La disposition du volume de la nébuleuse est vraiment l'information la plus importante dans ces images puisque la couleur est une interprétation de l'information spectrale et ne correspond pas vraiment à la couleur réelle du nuage. On sait aussi qu'Orion a donné naissance à plusieurs étoiles alors que dans notre projet, il y a véritablement une étoile dominante et quelques nouveaux cœurs en train de naître. Les jeunes étoiles ne vont pas encore dépasser la masse de l'étoile centrale, c'est donc elle qui est au cœur du nuage.



Illustration 78 - Nébuleuse d'Orion photographiée par Hubble

En effectuant des recherches, on estime qu'un disque d'accrétion se forme autour de l'étoile naissante. Parmi les vues d'artistes déjà réalisées sur ce sujet, ce disque est très souvent un cercle quasiment parfait, c'est une forme que l'on observe à une étape bien avancée de la formation stellaire. Mais puisqu'au début, les nuages de gaz et de poussières doivent être attirés, il y a forcément une phase à mi-chemin entre le chaos et le disque parfait. C'est cette étape qui m'intéresse, puisque l'attraction va être plus forte à proximité de l'étoile, elle sera forcément plus rapidement en forme de disque autour d'elle et plus chaotique à distance. Sachant qu'il y a tout de même quelques jeunes étoiles qui vont venir dévier le parcours du nuage, j'ai choisi de représenter la nébuleuse en forme de spirale. Le risque était qu'on l'identifie à une galaxie, mais il y a une différence de taille. Une stellogénèse n'est pas

composé d'autant d'étoiles qu'une galaxie. De plus, l'échelle est bien moindre et son aspect est principalement volumétrique.



Illustration 79 - Vue d'artiste d'une stellogénèse

ii. Différences VDB et Volume dans Houdini

Nous avons défini les volumes plus haut en expliquant qu'il s'agissait d'un cube découpé en de multiples sous-cubes appelés *voxels* qui peuvent stocker des informations. Ils peuvent contenir des informations de flottant, appelés *scalars fields*, qui seront utiles pour représenter de la fumée par exemple. Mais aussi des informations que l'on appelle *Sign Distance Field* qui seront positif ou négatif, et qui représente la distance à la surface, ce qui est plus utilisé pour les liquides par exemple. Dans les volumes standard d'Houdini, les *vector field* sont en réalité définis par trois *scalar field*.

Un VDB, *Volume Data Base*, utilise la bibliothèque open source *OpenVDB* pour représenter les volumes de manière bien plus optimisés. Les voxels qui ne contiennent pas d'information, c'est-à-dire les voxels qui sont égaux à ce qu'on appelle la *background value*, souvent égal à 0, ne prendront quasiment pas de mémoire. Pour la plupart des opérations on va donc préférer l'utilisation de VDB aux volumes qui seront plus rapides à exécuter. Malheureusement, les simulations ne fonctionnent pas encore sur les VDB mais on peut convertir les volumes en

sortie de simulation en VDB afin de les exporter dans d'autres logiciels. C'est notre cas puisque nous allons rendre le projet final sur Maya avec Redshift.

VOLUME	vel.x	[100, 100, 100]	Voxels: 1,000,000 Voxel Size: 0.009999999
	vel.y	[100, 100, 100]	Voxels: 1,000,000 Voxel Size: 0.009999999
	vel.z	[100, 100, 100]	Voxels: 1,000,000 Voxel Size: 0.009999999
VDB	vel	[101, 101, 101]	vec3s Voxels: 1,030,301 Voxel Size: 0.009999999

Illustration 80 - Différence de Vector Field entre Volume et VDB

iii. Création du vector field

Dans un premier temps, il faut recréer le champ d'attraction des étoiles dans l'espace. Pour cela je crée un volume en VDB d'une taille assez grande afin de contenir toute la simulation. Le node *vdbactivate* va définir mon cube de voxel à partir d'une référence et d'un VDB. Je crée ensuite un *vector field* qui porte le nom de *vel* puisque ce champ sert à conduire la vitesse.

On va ensuite évaluer la distance entre le voxel et les étoiles pour déterminer un coefficient d'attraction pour chaque étoile en fonction de cette distance et de la masse de l'étoile pour pondérer l'attraction par rapport à ce coefficient. Je calcule le produit vectoriel de notre vecteur de gravité et de notre vecteur d'axe vertical pour avoir la tangente. La direction finale est définie par le coefficient d'attraction. Si on est très proche de l'étoile, la direction finale aura plus de chance d'être égale au vecteur de gravité, si on est très loin on sera plus proche de la tangente. Je rajoute à cette direction un curl noise très léger afin d'apporter un peu de perturbation à la vitesse pour ne pas avoir un mouvement trop parfait, ce qui ne serait pas réaliste.

Pour visualiser si mon *vector field* a la forme attendu, le node *Volume Trail* est parfait. Il prend un nuage de points dans la première entrée et un *vector field* dans la seconde et va tenter de relier les points entre eux en fonction de la direction du voxel associée aux points.

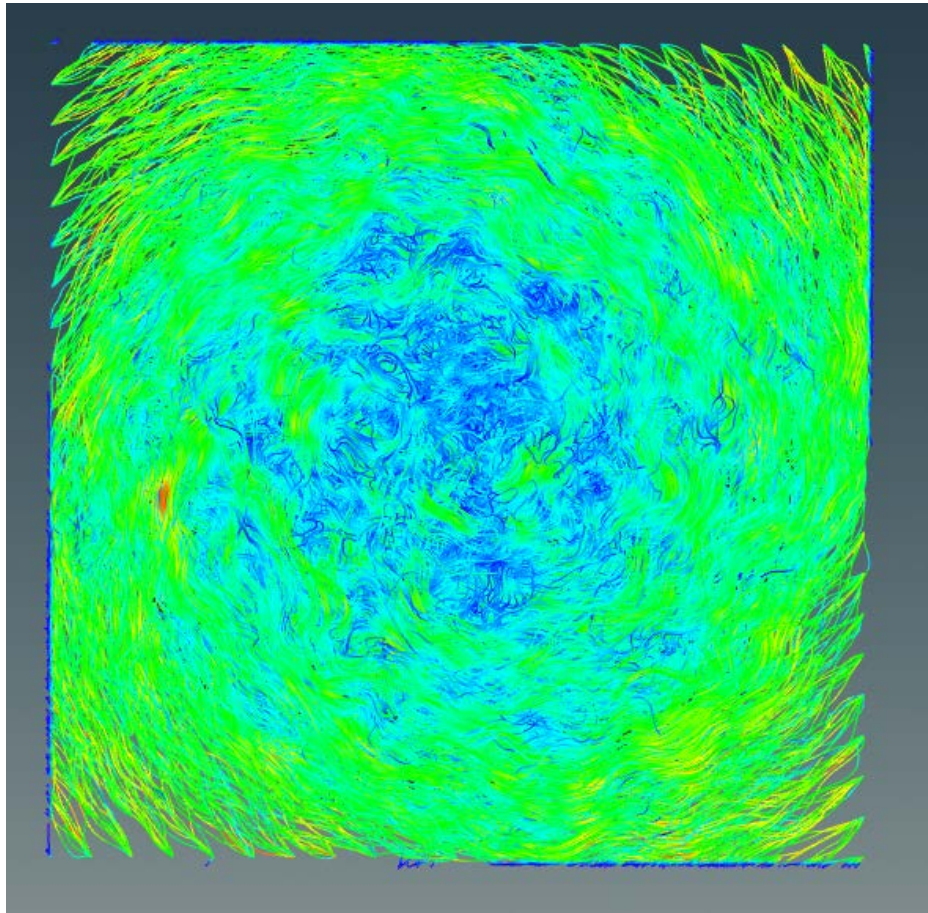


Illustration 81 - Vector field de vitesse vue du dessus

iv. Génération de la spirale

Je souhaitais partir d'un volume avec la forme d'une spirale. Grâce à la suite de fibonacci et le nombre d'or, aussi appelé la spirale d'or, j'ai défini le nombre total de points qui composent ma spirale. Pour chacun d'eux, j'ai calculé l'angle parcouru à chaque étape ainsi que sa distance parcourue par rapport au point d'origine (0,0,0). La formule pour calculer la distance est la suivante :

$$D = growth^{\theta * 2.0 / \pi}$$

Où *growth* est une variable définie par l'utilisateur, et *theta* est l'angle parcouru à chaque étape.

On va ensuite définir la position X de cette façon :

$$pos.x = \sin(\theta) * D$$

$$\text{Et Z de celle-ci : } pos.z = \cos(\theta) * D$$

Avec la fonction VEX *addpoint* on peut ajouter le point aux coordonnées définies.

Avant de transformer cette spirale en polygone, puis en volume, je vais d'abord lui attribuer un bruit sur son *pscale* afin de ne pas avoir un volume parfaitement uniforme. Enfin, je vais

générer un nuage de points à partir de ma courbe en polygone que j'aurai au préalable passé en volume afin d'avoir des points à l'intérieur de mon mesh. Ces points auront un attribut de *density* qui sera lui-même bruité. Ensuite j'applique le node *rasterize* pour transformer ces points en volume tout en conservant l'attribut de densité du point.

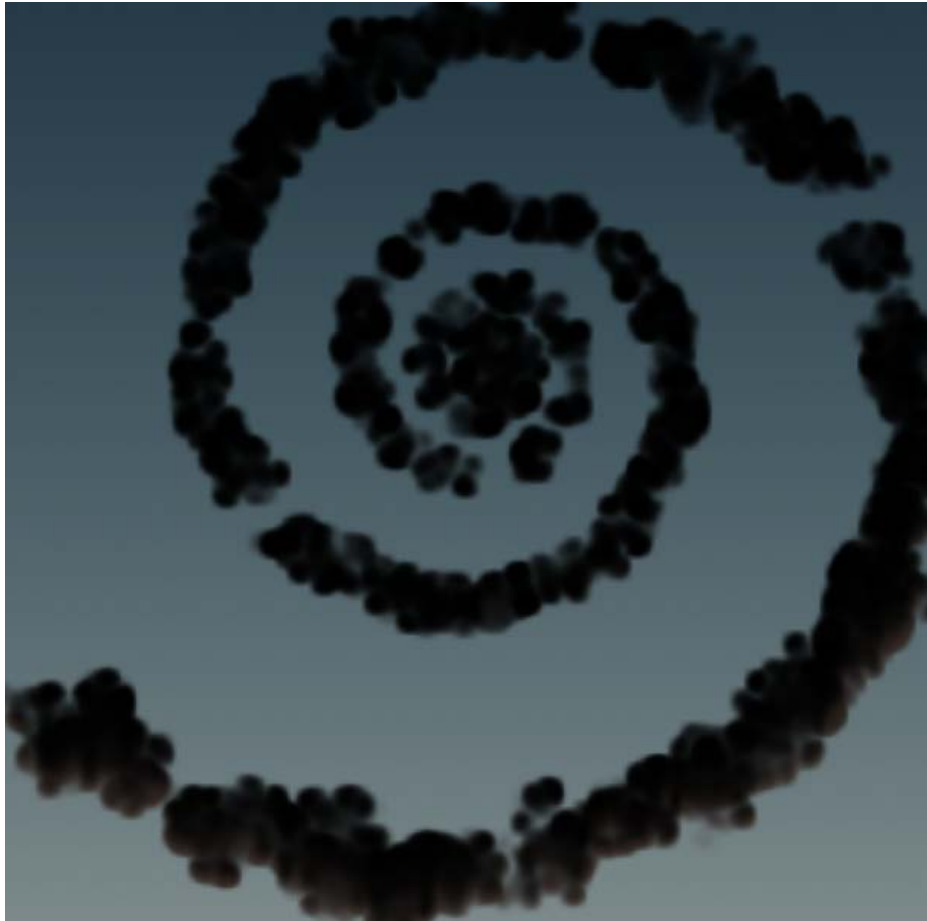


Illustration 82 - Génération de la spirale avant simulation vue du dessus

v. Dynamique et microsolvers

Houdini dispose de tout un contexte pour effectuer des simulations : le *DOP Network* ou le réseau d'opérateur dynamique en français. Pour une simulation de volume, on va avoir besoin d'une source pour la densité et la vitesse, d'un *Smoke Object*, c'est l'objet qui va être généré par la source. Ici on crée de la densité à la première image et cette densité va évoluer en fonction des *forces* qui seront définies par la vitesse et les micro-solvers. Les micro solvers permettent d'effectuer des petites opérations sur la simulation et, dans notre cas, vont directement influencer la vitesse. Si on a un micro solver, on a aussi un *solver* plus important. Dans cette simulation, c'est le *pyrosolver* qui est le node chargé de tout rassembler et de calculer à chaque image, l'évolution de notre fumée.

Il est intéressant de noter que le DOP Network n'est pas un réseau linéaire comme la majorité des contextes d'Houdini. Par exemple, les nodes de forces qui sont placés après le solver sont tout de même évalués par celui-ci.

Le pyrosolver dispose déjà de paramètres pour influencer la vitesse en son sein, cependant je préfère passer par des micro solvers qui permettent de mieux organiser et comprendre la manière dont le volume va se comporter.

Un micro solver que j'apprécie particulièrement est le *gas disturbance* qui permet d'ajouter du détail à la simulation en additionnant à la vitesse un bruit défini par le block size qui est lui-même à l'échelle de notre scène. Il est donc très facile de visualiser l'échelle de notre noise en liant ce paramètre de block size à l'échelle globale d'un cube. Je vais pouvoir le doser avec un *control field*. Ce paramètre permet de multiplier la force de la *disturbance* par le contenu de ce champ. J'utilise la norme de la vitesse afin d'avoir plus de *disturbance* quand il y a beaucoup de vitesse, et quasiment pas lorsqu'il n'y en a pas.

Le *smoke object* permet de définir le nombre total de subdivisions de ma grille 3D et donc de définir le nombre de voxels totaux de ma simulation. C'est là que l'on va contrôler la qualité finale.

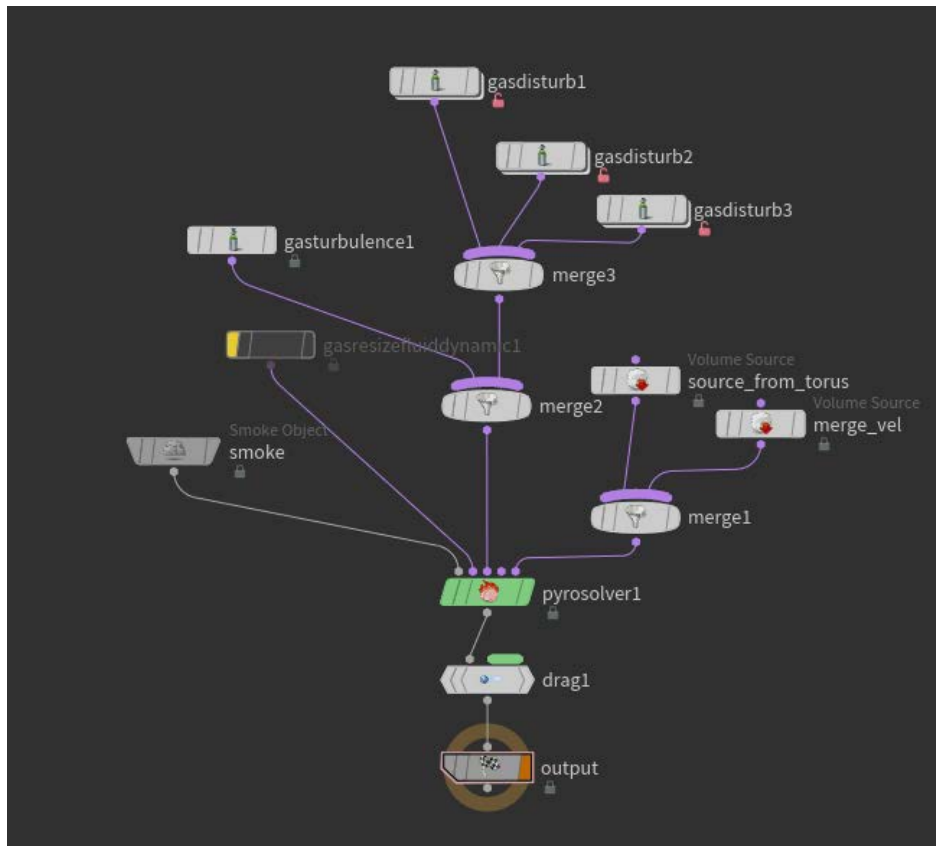


Illustration 83 - DOP Network de la stellogénèse

Étant donné que nous avions un temps limité pour la réalisation de ce projet, je ne pouvais pas me permettre de mettre trop de voxels. De plus, je suis limité par la puissance de mon ordinateur personnel donc c'est une étape où je dois savoir évaluer. J'ai choisi une subdivision de 600, ce qui me donne environ 200 millions de voxels. J'ai un résultat correct me permettant de ne pas bloquer mes ressources trop longtemps.



Illustration 84 - Stellogénèse dans le projet intensif

d) Réflexion soulevée et étude de la création volumétrique

Le découpage initial du film était assez ambitieux puisqu'il reposait sur deux séquences qui nous permettaient de comprendre l'enjeu de l'évasion du pilote. Conscient de l'importante charge de travail qui nous attendait, j'ai rapidement choisi de gagner du temps en utilisant au maximum le fruit de mes recherches du premier semestre. Malheureusement, nous n'avons pas eu le temps de réaliser la seconde séquence pour laquelle nous devions utiliser mon outil EXO-Tool pour générer une planète désertique. Pour cette séquence désertique, j'avais créé l'environnement avec les nouveaux outils de *Height Field* pour cette séquence désertique. Ce sont des outils qui permettent de modéliser des terrains grâce à des voxels. On va créer un modèle volumétrique de base pour définir une forme globale à notre terrain et ensuite on simule l'érosion pour que des centaines de détails réalistes viennent compléter notre modèle initial.



Illustration 85- Planète rocheuse créée sur Houdini, coupé au montage de notre intensif

J'ai cependant pu générer, avec un node de wedging sur Houdini, une cinquantaine d'HDRI 16K grâce à mon outil de Stars HDRI. MJ'ai obtenu des fonds étoilés de grandes qualités et cela a permis à mon équipe et moi-même de choisir celle qui serait la plus intéressante pour notre projet.

Ce projet a été très instructif pour comprendre la notion d'espace magnifié et l'expérimenter personnellement. Étant aussi responsable du lighting, j'ai choisi de représenter le cœur de la pouponnière d'étoiles dans des teintes plus chaudes puisque nous étions au centre du volume d'une très grande densité, c'est-à-dire que la lumière a beaucoup de mal à s'échapper de ce cœur. C'est pourquoi au début du court métrage, nous observons la stellogénèse d'un point de vue extérieur avec des teintes bleues foncés. Ce choix colorimétrique permet de rendre compte de toute la densité du volume. C'est un exemple où je me suis détaché de la réalité. Dans la véracité scientifique, un volume si dense ne devrait pas permettre à la lumière de s'échapper. Le volume serait majoritairement noir avec des touches de jaune là où la lumière traverse. Mais je trouvais personnellement cela moins intéressant visuellement et narrativement puisqu'on ne se rendrait pas forcément compte de la présence du volume sur le plan. En trichant sur la colorimétrie, on permet aux spectateurs et au pilote d'être attirés par cette nébuleuse et on la présente directement comme une destination.



Illustration 86 - Plan final au plus près de la stellogénèse

Cette séquence est très riche puisqu'elle présente trois sous-lieux différents de l'espace : Le vide intersidéral, l'intérieur du volume qui bloque la lumière et le cœur de la stellogénèse.

Conclusion

Explorer l'immensité du cosmos durant ma dernière année de Master à ATI a été une aventure extrêmement enrichissante, autant d'un point de vue artistique que scientifique. On observe bien que lorsque l'on s'intéresse au domaine de l'astronomie, la spéculation est encore une part importante de la compréhension du cosmos. Les photographies de Hubble elles-mêmes ne sauraient décrire véritablement ce que l'on voit à proximité de ces nébuleuses. Alors on tente au mieux de se rapprocher de la vérité grâce aux données des astrophysiciens. Mais toute création graphique du monde céleste est toujours passée par un filtre, que ça soit un objectif d'appareil photographique, la peinture ou l'imagination de l'artiste. Tenter de reproduire la réalité a un sens, l'artiste permet à son spectateur de visualiser et de comprendre un phénomène qui existe, mais en plus il lui permet de rêver en lui proposant son interprétation visuelle.

Le phénomène en lui-même est rarement triché. Méliès l'a fait pour son voyage dans la lune, mais il est indéniable que les objets célestes ont quelque chose de naturellement beau. Et réussir à comprendre mathématiquement ces phénomènes, c'est nous permettre de mieux les reproduire.

Les mathématiques jouent un rôle essentiel dans les recherches de mon mémoire. Lorsque je travaille sur une représentation de l'espace, je m'interroge sur l'origine du sujet que je souhaite interpréter visuellement afin de lui rendre sa beauté véritable.

Dans la démarche purement artistique, la compréhension est aussi le pilier fondateur de l'œuvre. Il permet à l'artiste de comprendre le phénomène céleste afin de mieux le représenter et de permettre au spectateur d'identifier ce dernier. Une fois la base du phénomène posée, l'artiste dispose d'une très grande liberté sur son œuvre. Plus on va limiter les éléments qui permettent au spectateur de comprendre un sujet, plus on va pouvoir aller dans des choix artistiques personnels et donc se rapprocher de l'abstraction. Mais il existe le cas où l'élément sur lequel on travaille n'a pas encore été compris. Le cœur du trou noir par exemple, que peut-il bien se passer dans ce puit de gravité ? C'est un domaine où les données astronomiques manquent et où les spéculations abondent. Là où il y a non compréhension, il y a liberté d'interprétation. Et ces hypothèses ne seront pas remises en question tant que la science n'aura pas démontré le phénomène dont il est question.

Ainsi, artistes et scientifiques collabore d'une étroite manière afin d'offrir à l'homme des rêves et de comprendre le monde qui l'entoure. Le voyage interstellaire ne sera certainement pas inventé pendant notre génération, en attendant, permettons aux artistes de nous faire voyager à travers les merveilles du cosmos, vers le connu et l'inconnu.

Bibliographie

CNES, *L'espace, lieu d'utopies*, Espace(s). Numéro 14. Édition Chemin de Fer, mars 2017.

Miller, Ron, et al. *The Art of Space: the History of Space Art, from the Earliest Visions to the Graphics of the Modern Era*. Zenith Press, 2014.

Miller, Ron. "The Archaeology of Space Art." *Leonardo*, vol. 29, no. 2, 1996, p. 139., doi:10.2307/1576350.

Reliefs "Galaxy", Reliefs Editions, novembre 2019.

Dufour Éric. *Le cinéma De Science-Fiction Histoire Et Philosophie*. A. Colin, 2011.

EDWARDS, OWEN. *EXPANDING UNIVERSE: Photographs from the Hubble Space Telescope*. TASCHEN, 2018.

Chiang, Doug. *Mechanika, Revised and Updated: Creating the Art of Space, Aliens, Robots and Sci-Fi*. F W Media, 2015.

Jammer, Max, and Albert Einstein. *Concepts of Space: the History of Theories of Space in Physics*. Dover Publications, 1993.

Peuquet, Donna J. *Representations of Space and Time*. Guilford Press, 2002.

Sagan, C. *Cosmos*. Random House, 1980.

Miller, Arthur I. *Empire of the Stars: Friendship, Obsession and Betrayal in the Quest for Black Holes*. Abacus, 2010.

Miller, Arthur I. "Aesthetics, Representation and Creativity in Art and Science." *Leonardo*, vol. 28, no. 3, 1995, p. 185., doi:10.2307/1576073.

Nazé Yaël. *Art Et Astronomie: Impressions célestes*. Omniscience, 2015.

Toriyama, Akira. *Dragon Ball*. Glénat, 1993.

Siegel, Jerry, and Joe Shuster. *Action Comics, No. 1: Reprint of the First Superman Feature*. National Periodical Publications, 1976.

Schaeffer, Christophe, and Richard Escot. *Dictionnaire Des Penseurs*. Honore Champion Editions, 2018.

Webographie

NASA : *Images*.

www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/index.html

“Les Constellations Bigarrées De Judy Schmidt.” *Cercle*

www.cerclemagazine.com/magazine/articles-magazine/les-constellations-bigarrees-de-judy-schmidt/.

“Artists Impression of the Free-Floating Planet CFBDSIR J214947.2-040308.9 - Exoplanet Exploration: Planets Beyond Our Solar System.” NASA, NASA

exoplanets.nasa.gov/resources/108/artists-impression-of-the-free-floating-planet-cfbdsir-j2149472-0403089/.

“Images.” *HubbleSite*

hubblesite.org/images/gallery.

“What Is Space Art?” *International Association of Astronomical Artists*,

iaaa.org/what-is-space-art/.

“Timeline, Early Space Art.” *Princeton University*, The Trustees of Princeton University,

artmuseum.princeton.edu/transient-effects/painter-sun/northern-lights-and-worlds-beyond/imagining-un-seeable-early-space-artists—timeline/timeline-early-space-art.

“Art Et Science : L'art Vu Par L'œil D'un Physicien, Jean-Marc...” *MyScienceWork*,

www.mysciencework.com/omniscience/art-et-science-l-art-vu-par-l-til-d-un-physicien-jean-marc-levy-leblond.

“Histoire De La Photographie D'astronomie Et Des Lanternes Magiques.” *Le Chronoscaphe*, 26 May 2019,

lechronoscaphe.com/vers-infini-et-au-dela/.

Chrisbrejon. “Chapter 1.5: Academy Color Encoding System (ACES).” *Chris Brejon*,

chrisbrejon.com/cg-cinematography/chapter-1-5-academy-color-encoding-system-aces/#academy-color-encoding-system-aces.

“Système De Codage Couleur Academy.” *HiSoUR Art Culture Histoire*, 11 Apr. 2019,

www.hisour.com/fr/academy-color-encoding-system-24306/.

“Tim Pyle.” *NASA Spitzer Space Telescope*,

www.spitzer.caltech.edu/mission/profile/82-Tim-Pyle.

Bégasse, Nicolas. "Dans Les Couloirs Des 'Vues D'artiste' De La Nasa." *20 Minutes, Information En Continu, Actualités, Politique, Sport...*, 20minutes, 10 Aug. 2015, www.20minutes.fr/sciences/1664907-20150810-planetes-soleils-galaxies-couloirs-vues-artiste-nasa.

Greicius, Tony. "The Art of Exoplanets." NASA, NASA, 8 June 2017, www.nasa.gov/feature/jpl/the-art-of-exoplanets.

Information@eso.org. "About the Production Team." *ESA/Hubble | ESA/Hubble*, www.spacetelescope.org/projects/anniversary/production_team/.

Alan Bean Art, Alan Bean Astronaut, Alan Bean Moonwalker, Alan Bean Paintings, www.alanbean.com/early_art.cfm.

"Extrasolar Planets I." *The Astronomical Illustration of Lynette Cook*, extrasolar.spaceart.org/extrasolar-planets.html.

"Lucy West Fine Art." *Lucy West Fine Art*, www.lucyweststudios.com/.

Le Point, magazine. "L'actualité Sciences Et Nature - Le Point." *Le Point.fr*, www.lepoint.fr/science/tout-ce-que-vous-devez-savoir-sur-les-exoplanetes-27-02-2013-1633444_25.php.

Mécanique Céleste, astronomia.fr/seminaires/annee1314/mecaniqueCeleste.php.

"How to Calculate the Expected Surface Temperature of a Planet." *Astronomy Stack Exchange*, astronomy.stackexchange.com/questions/10113/how-to-calculate-the-expected-surface-temperature-of-a-planet.

"L'étoile." *Odyssespace*, www.odyssespace.fr/etoiles.php.

Fxthinking. "How to Create a Magnetic Vector Field in Houdini - Tutorial." *How to Create a Magnetic Vector Field in Houdini - Tutorial*, 1 Jan. 1970, pepafx.blogspot.com/2015/08/how-to-create-magnetic-vector-field-in.html.

“Download VOTable: CSV: DAT Catalog.” *The Extrasolar Planet Encyclopaedia - Catalog Listing*
exoplanet.eu/catalog/

Filmographie

Georges Méliès, *Le voyage dans la lune*, 1902.
Irving Pichel, *Destination Moon*, 1950
Byron Haskin, *La guerre des mondes*, 1953.
Byron Haskin, *La conquête de l'espace*, 1955.
Stanley Kubrick, *2001, L'odyssée de l'espace*, 1968.
Andreï Tarkovski, *Solaris*, 1972.
George Lucas, *Star Wars*, 1977.
Robert Wise, *Star Trek*, 1979.
Ridley Scott, *Alien*, 1979.
Ron Howard, *Apollo 13*, 1995.
Paul W.S Anderson, *Event Horizon*, 1997.
Paul Verhoeven, *Starship Troopers*, 1998.
Michael Bay, *Armageddon*, 1998.
Steven Soderbergh, *Solaris*, 2002.
Danny Boyle, *Sunshine*, 2007.
Alfonso Cuarón, *Gravity*, 2013.
Zack Snyder, *Man of Steel*, 2013
Christopher Nolan, *Interstellar*, 2014.
James Gunn, *Les Gardiens de la Galaxy*, 2014.
Morten Tyldum, *Passengers*, 2016.
Luc Besson, *Valerian*, 2017.

Table des illustrations

Illustration 1 - Peinture rupestre représentant un objet céleste	10
Illustration 2 - Description visuelle de la cosmogonie indienne	12
Illustration 3 - Représentation du monde selon la Bible.....	14
Illustration 4 - Giordano Bruno rêvant de ce qu'il y a derrière les étoiles	16
Illustration 5 - Dessin de Galilée suite à son observation lunaire	18
Illustration 6 - Coupole étoilée du Mausolée de Galla Placidia.....	19
Illustration 7 - <i>L'adoration des Mages</i> , Giotto, 1303-1306	20
Illustration 8 - <i>L'annonce aux bergers</i> , Taddeo Gaddi, 1328-1330.....	21
Illustration 9 - <i>Le Déluge</i> , John Martin, 1834.....	22
Illustration 10 - La constellation de Persée du <i>Ciel Astronomique</i> , Giuliano Pesello, 1442.....	23
Illustration 11 - <i>L'astronomie</i> , Raphaël, 1508	24
Illustration 12- <i>La Fuite en Égypte</i> , Adam Elsheimer, 1609	25
Illustration 13 - Le système solaire, <i>Entretiens sur la pluralité du monde</i> , Bernard de Fontenelle, 1686.....	26
Illustration 14 – Representation 3D d'Eberhard Kindermann, 1744.....	27
Illustration 15 - <i>Philosophe faisant son exposé sur le planétaire</i> , Joseph Wright of Derby, 1766.....	28
Illustration 16 - Illustration de <i>From Earth to Moon</i> , Jules Verne, 1865	29
Illustration 17 - La Terre vue depuis la Lune de Scriven Bolton	30
Illustration 18 - <i>Saturne vue depuis Mimas</i> , Chesley Bonestell, 1943	31
Illustration 19 - Saturne vue depuis un de ses satellites, Lucien Rudaux	32
Illustration 20 - Dessin sur la spéculation de la vie extraterrestre, Lucien Rudaux.....	33
Illustration 21 - Nébuleuse d'Orion photographié en 1938 par le télescope Crossley	34
Illustration 22 - Galaxie M83 photographiée par Hubble et colorisée ensuite.....	36
Illustration 23 - Photographie du sol martien par le rover <i>Curiosity</i>	36
Illustration 24 - Vue d'artiste de 51 Pegasi b par Martin Kornmessernick	37
Illustration 25 - Interface nodale d'Houdini avec code VEX	40
Illustration 26 - Menu de l'EXO-Tool	42
Illustration 27 - Visualisation de l'excentricité par rapport à la Terre	43
Illustration 28 - Calcul de l'orbite en VEX.....	44
Illustration 29 - Visualisation de la loi des Aires.....	44
Illustration 30 - Orbite de HD 80606b avec l'EXO-Tool.....	45
Illustration 31 - <i>Kepler 452b</i> , Tim Pyle.....	46
Illustration 32 - Type spectral des étoiles.....	48
Illustration 33 - Code VEX pour orienter la lumière vers l'exoplanète	49
Illustration 34 - HDRI de la Voie Lactée	50
Illustration 35 - HDRI générée pour une voûte céleste à dominante bleue.....	52
Illustration 36 – Node de Wedging d'Houdini pour la génération d'HDRI.....	53
Illustration 37 - Rendu de Kepler 452b par l'EXO-Tool	54
Illustration 38 - Rendu de HD 80606b par l'EXO-Tool	54
Illustration 39 - Éruption Solaire capturé par la sonde SDO (Solar Dynamics Observatory).....	56
Illustration 40 - Géométrie 3D vers Voxel avec augmentation de subdivision.....	57
Illustration 41 - Information contenu dans le volume	57
Illustration 42 - Force Magnétique du voxel en fonction des charges.....	57
Illustration 43 - Démonstration du Signed Distance Field.....	58
Illustration 44 - Visualisation du champ magnétique sur Houdini.....	59
Illustration 45 - Génération de particules qui vont être simulée	60
Illustration 46 - Node "Advect by Volumes".....	61
Illustration 47 - Logique de réaction du Pyrosolver sur Houdini.....	62
Illustration 48 - Passes de rendu du Soleil.....	63
Illustration 49 - Résultat du Soleil après compositing.....	64

Illustration 50 - <i>La Nuit Étoilée</i> , Vincent Van Gogh, 1889	66
Illustration 51 - Un pont à travers l'espace, Grandville, 1844.....	67
Illustration 52 - Le Soleil, Edvard Munch, 1911	67
Illustration 53 - <i>Mercury passing in front of the Sun</i> , Giacomo Balla, 1914	68
Illustration 54 - Firmament, Wenzel Hablik, 1913	69
Illustration 55 - La persistance de la mémoire, Salvador Dali, 1931.....	70
Illustration 56 - Transformation, Ludek Pesek	70
Illustration 57 - <i>Rings from Guatemala</i> , Ron Miller	71
Illustration 58 - Œuvre d'Allan Bean réalisée à l'aide de poussière de Lune	72
Illustration 59 - <i>People of Pinnacle Point</i> , Lucy West, 2013	73
Illustration 60 - Couverture d'Hubert Rogers	73
Illustration 61 - 1er numéro d'Action Comics avec l'apparition de Superman.....	74
Illustration 62 - Pochette d'album de <i>Skylight</i> du groupe Atoma	75
Illustration 63 - <i>Saturn</i> , Josh Simpson	76
Illustration 64 - Cave lunaire tirée du <i>Voyage dans la Lune</i> de Georges Méliès	77
Illustration 65 - Alunissage dans 2001, <i>l'Odyssée de l'espace</i> par Stanley Kubrick.....	78
Illustration 66 - <i>Passengers</i> de Morten Tyldum	79
Illustration 67 - Plan de COSMOS utilisant la technique de volume soustractif	80
Illustration 68 - Explication de la parallaxe d'un point de vue astronomique	81
Illustration 69 - La Voie Lactée dans COSMOS	82
Illustration 70 - Extrait de <i>WHIRL - Quantum Dance</i> de Sahar Dehghan	83
Illustration 71 - Référence d'un Blazar.....	84
Illustration 72 - Explication du phénomène de Lentille Gravitationnelle.....	85
Illustration 73 - Boucle de raymarching pour le shader de lentille gravitationnelle.....	86
Illustration 74 - Création de l'effet de lentille gravitationnelle sur Houdini	87
Illustration 75- Extrait du teaser avec les danseurs-trous noirs.....	88
Illustration 76 - Explication des fonctions de transformation de l'ACES	90
Illustration 77 - Plan d'ouverture du projet intensif.....	91
Illustration 78 - Nébuleuse d'Orion photographiée par Hubble	92
Illustration 79 - Vue d'artiste d'une stellogénèse.....	93
Illustration 80 - Différence de Vector Field entre Volume et VDB	94
Illustration 81 - Vector field de vitesse vue du dessus.....	95
Illustration 82 - Génération de la spirale avant simulation vue du dessus	96
Illustration 83 - DOP Network de la stellogénèse.....	97
Illustration 84 - Stellogénèse dans le projet intensif	98
Illustration 85- Planète rocheuse créée sur Houdini, coupé au montage de notre intensif.....	99
Illustration 86 - Plan final au plus près de la stellogénèse.....	100