

ENS Louis-Lumière

La Cité du Cinéma - 20, rue Ampère BP 12 - 93213 La Plaine Saint-Denis

Tel. 33 (0) 1 84 67 00 01

www.ens-louis-lumiere.fr

Mémoire de master

Spécialité cinéma, promotion 2018-2021

Soutenance de juin 2021

Les images de l'Univers

Tom COGO

Ce mémoire est accompagné du travail préparatoire de la partie pratique intitulée : **Laniakea**

Directrice de mémoire : **Lucile DOMENACH** (Enseignante des sciences physiques)

Présidente du jury cinéma et coordinatrice des mémoires : Giusy PISANO (Professeure des Universités)

ENS Louis-Lumière

La Cité du Cinéma - 20, rue Ampère BP 12 - 93213 La Plaine Saint-Denis

Tel. 33 (0) 1 84 67 00 01

www.ens-louis-lumiere.fr

Mémoire de master

Spécialité cinéma, promotion 2018-2021

Soutenance de juin 2021

Les images de l'Univers

Tom COGO

Ce mémoire est accompagné du travail préparatoire de la partie pratique intitulée : *Laniakea*

Directrice de mémoire : **Lucile DOMENACH** (Enseignante de sciences physiques)

Présidente du jury cinéma et coordinatrice des mémoires : Giusy PISANO (Professeure des Universités)

REMERCIEMENTS

Lucile Domenach, Giusy Pisano,

François Lévrier, Elsa De Smet, Jean-Yves Le Poulain,

Christian Lurin, Jean-Paul Gandolfo, Jacint Roger,

Damien Brotto, Julien Mari, Kanye West, mes amis, ma famille

RÉSUMÉ

Ce mémoire porte sur les images de l'espace. Ces visuels sont omniprésents : dans les médias, au cinéma, sur les réseaux sociaux... La beauté de ces images en fait une source d'émerveillement universelle. Elles montrent ce que personne n'a jamais vu.

Comment ces images sont-elles fabriquées techniquement ? Dans quelle mesure sont-elles des objets scientifiques ? Des objets artistiques ?

Nous retracerons plus d'un demi-siècle d'imagerie spatiale pour décortiquer un vaste corpus visuel. Nous évoquerons les premières images prises au-delà de l'atmosphère terrestre, sur la Lune, puis plus loin dans le système solaire avec Mars, Vénus...

Ensuite, nous tenterons de comprendre les technologies mises en place pour capturer et transmettre les données brutes - qu'elles soient prises par l'humain lors des missions Apollo, par des sondes lors des missions d'exploration du système solaire comme Rosetta récemment, ou par des télescopes comme Hubble. Nous réfléchirons au traitement de ces données brutes dans le but d'obtenir une image, en évoquant les différents paramètres et contraintes qui entrent en jeu. Nous verrons comment ce processus conditionne l'esthétique de ces images.

Enfin, nous nous intéresserons à une démarche artistique proposant d'intégrer ces images sous la forme de séquences animées dans une narration cinématographique de fiction.

MOT-CLÉS

Images espace ; imagerie spatiale ; astronomie ; colorimétrie ; Angénieux ; optiques ; Hasselblad ; Apollo ; Rosetta ; CCD ; fausses-couleurs ; Hubble ; Fond Diffus Cosmologique ; cosmos ; Emerson ; Kodak ; Pulsion de voir ; infrarouge ; ultraviolet ; New Horizons ; Mars ; Venus ; Chury 67P ; NASA ; ESA ; Roscosmos ; Mariner ; Venera ; Voyager ; V2 ; sondes spatiales ; albedo ; imagerie scientifique ; ondes radio ; Cosmic Microwave Background ; Event Horizon Telescope ; APOD ; pretty picture ; esthétique

ABSTRACT

This essay is about space images. This imagery is seen everywhere : in the media, in cinema, on social networks... The beauty of these images makes for a universal source of wonder. They show things that no one ever witnessed.

How are these images made from a technical standpoint ? To what extent should they be considered scientific objects ? Artistic objects ?

We will reflect over more than half a century of space images to dissect this vast body of visual documents. We will talk about the first pictures taken above the atmosphere, on the Moon, and further away into the solar system : on Mars, Venus, Jupiter...

We will attempt to understand the technologies at stake to record and transmit data - whether they are taken by humans during the Apollo missions, by space probes during exploration missions of the solar system like Rosetta, or by telescopes such as Hubble. We will then study the processing of these data into the final images, and go over the many parameters and constraints that play a role in defining the aesthetics of the images.

Finally, we will look at an artistic approach that tries to think of ways to use these images as animated sequences in a cinematographic work of fiction.

KEY WORDS

Space images ; space imagery ; astronomy ; cosmology ; colorimetry ; Angénieux ; optics ; Hasselblad ; Apollo ; Rosetta ; CCD ; fake-colors ; Hubble ; Cosmic Microwave Background ; cosmos ; Emerson ; Kodak ; scopophilia ; scopic drive ; infrared ; ultraviolet ; Rosetta ; New Horizons ; Mars ; Venus ; Chury 67P ; NASA ; ESA ; Roscosmos ; Mariner ; Venera ; Voyager ; V2 ; space probes ; albedo ; scientific imagery ; radio waves ; Event Horizon Telescope ; APOD ; pretty picture ; aesthetics

SOMMAIRE

INTRODUCTION p.10

PREMIÈRE PARTIE - Des premières images aux missions Apollo p.15

CHAPITRE 1. Recontextualisation historique jusqu'à la seconde guerre mondiale p.16

De la fin du 19ème à la seconde guerre mondiale p.16

Les premières images prises dans l'espace : 1946 p.18

CHAPITRE 2. La Face cachée de la Lune et la Terre vue de l'espace p.21

Premières explorations lunaires p.21

La Terre depuis l'espace éloigné p.23

CHAPITRE 3. Images humaines de l'espace lors des missions Nasa "Apollo" p.24

Avant Apollo p.24

Hasselblad p.25

Apollo 11 p.26

La caméra Kodak Stereo Close Up p.28

Après Apollo 11 p.29

CHAPITRE 4. Les optiques Angénieux p.30

Entretien avec Jean-Yves Le Poulain p.30

Angénieux et l'imagerie spatiale p.32

DEUXIÈME PARTIE - Sonder l'Univers p.42

CHAPITRE 1. Images dans le système solaire p.43

Les premières images de Mars par la sonde Mariner 4 p.43

Les premières images de la surface de Vénus avec les sondes Venera p.44

Enjeu des prises de vues spatiales par des sondes éloignées de la Terre p.45

Transmission des données vers la Terre p.47

Latence dans les technologies p.47

CHAPITRE 2. L'acquisition des images p.48

Les capteurs CCD p.48

Niveaux de lumière et exposition p.49

L'albédo p.54

CHAPITRE 3. Traitement et interprétation des images p.60

Profondeur de codage p.60

Compression des données p.62

La luminosité p.62

Le contraste p.64

Des images réelles ? p.69

CHAPITRE 4. La colorimétrie p.71

La colorisation RVB p.71

Choix des filtres d'observation p.74

La couleur comme information scientifique p.75

Images en fausses-couleurs p.77

Questionnement des images colorées obtenues p.80

CHAPITRE 5. L'interprétation physique de l'image : Entretien avec François Lévrier p.83

TROISIÈME PARTIE - Réflexion sur la dimension esthétique des images spatiales p.91

CHAPITRE 1. Entretien avec Elsa De Smet sur la dimension esthétique des images spatiales p.92

CHAPITRE 2. Intégrer les images spatiales à une narration cinématographique p.100

Résumé p.100

Extrait du synopsis p.100

Extraits de scénario p.102

Intentionnalités p.103

Extraits de moodboard p.105

Réflexion autour des images spatiales insérées p.106

Travail du son p.109

Traitement de montage p.111

CHAPITRE 3. Carnet de bord pour une mise en pratique p.112

Échelles de pixels et résolution p.112

Où trouver les données brutes p.115

Images de la comète 67P p.117

Profondeur d'images p.122

Séquences animées - analyse spécifique p.123

Collaboration p.127

CONCLUSION p.129

Sources / Filmographie p.134

Table des illustrations p.139

INTRODUCTION

En 1836 l'auteur américain Ralph Waldo Emerson écrit dans un essai intitulé *La Nature* :

“Les anciens appelaient le monde « cosmos » : beauté. La constitution de toutes choses est telle, ou tel le pouvoir plastique de l'oeil humain, que les formes primaires, le ciel, la montagne, l'arbre, l'animal, nous procurent du plaisir en et pour elle-même ; un plaisir naissant de la ligne, de la couleur, du mouvement, de l'ordre lui-même.”¹

Les phénomènes liés à l'espace sont parmi les expériences de beauté les plus fascinantes et « universelles » dont nous pouvons faire l'expérience. Mais cette expérience se fait exclusivement par le biais d'images. Aucun être humain n'a pu faire l'expérience de s'approcher d'une comète, d'assister à la naissance d'une étoile ou de contempler une nébuleuse. Ces mondes sont rendus tangibles par des images. On sait qu'ils sont quelque part dans notre univers, mais ils restent totalement inaccessibles, mystérieux. Les images nous permettent d'explorer, d'imaginer ce qu'il y a au-delà du ciel, de l'atmosphère, du système solaire, de la galaxie...

Par l'espace, j'entends l'univers, le cosmos, les endroits de l'univers explorés par les missions spatiales, les sondes et les télescopes. Par images, je parle de tous documents visuels, fixes ou animés, qui représentent l'univers. Celles qui nous serviront de base dans notre réflexion proviennent principalement d'organismes comme la NASA ou l'ESA et sont issues de caméras embarquées par des astronautes (lors des missions Apollo), de sondes (Rosetta, New Horizons), ou de télescopes (Hubble, Planck).

« Les étoiles éveillent une certaine vénération, car bien que toujours présentes, elles demeurent inaccessibles ».²

Ces images sont partout.. A partir du portail en ligne de la NASA, elles sont diffusées sur les réseaux sociaux, intégrées dans des documentaires³, des reportages télévisuels, mélangées à d'autres images de fiction dans des docu-séries et des courts-métrages :

¹ Ralph Waldo Emerson, *La Nature*, 1836, Editions Allia 2019, p.19

² Ralph Waldo Emerson, *La Nature*, 1836, Editions Allia 2019, p.11

³ Par exemple :

L'homme n'est pas unique de Clément Morin (2019)

Cosmos : Une odyssée à travers l'univers de Ann Druyan (2104)

Les Mondes extraterrestres de Daniel M. Smith, Suzy Boyles, Tim Lambert, Nigel Paterson, Ben Wilson (2020)

Mission Control : Les Héros Méconnus des Missions Apollo de David Fairhead (2017)

The Last Man on the Moon de Mark Craig (2014)

NOVA: Black hole Apocalypse de Rushmore DeNooyer (2018)

La génération Mars de Michael Barnett (2017)

Death Dive to Saturn de Terri Randall (2017)

Bonus: Behind the curve de Daniel J. Clark (2018)

Dans l'ombre de la lune de David Sington (2007)

En direct de l'espace de Graeme Ferguson(1985)

« La bibliothèque d'images et de vidéos de la NASA permet aux utilisateurs de chercher, découvrir et télécharger dans une mine d'or de plus de 140 000 images, vidéos et fichiers audio collectés au cours des multiples missions de l'agence », écrit la NASA dans un communiqué publié le mardi 28 mars 2017. Téléchargeables selon différentes résolutions, les fichiers peuvent également être directement intégrés à d'autres sites web. « Les utilisateurs peuvent intégrer du contenu sur leurs propres sites et choisir différentes résolutions pour le téléchargement », est-il écrit. Chacun des fichiers proposés dans ce nouveau service est accompagné d'une légende expliquant le contexte, les conditions de prise de vue ou d'enregistrement. Afin de garantir un accès très rapide à n'importe quel fichier, et ce, depuis plusieurs milliers de postes différents, l'agence américaine utilise une technologie qu'elle a elle-même mise au point⁴.”

Le corpus des représentations visuelles de l'espace est protéiforme, hétérogène. Il y a des images prises depuis la Terre, d'autres depuis l'espace. Certaines sont prises par des sondes, d'autres par des télescopes. Il peut y avoir du noir et blanc, des images en couleurs, d'autres en fausses couleurs, certaines représentent le visible, d'autres sont des interprétations de données récoltées dans l'infrarouge, l'ultraviolet, les rayons X. Il y a des images issues de prises de vues optiques, d'autres sont des représentations de données numériques récoltées sans procédés optiques. Ces images montrent des objets de toutes les échelles, à toutes les distances, et dans toutes les temporalités.

Elles nourrissent l'imaginaire, sont mises à l'honneur quotidiennement sur les réseaux sociaux par exemple avec le hashtag #APOD (Astronomy Pic of the Day). Les images de Hubble montrant d'immenses nébuleuses colorées sont relayées mondialement, imprimées, utilisées en fond d'écran. Chaque découverte scientifique majeure en astrophysique est accompagnée d'un visuel, image « scientifique » qui devient outil de communication pour le grand public, comme récemment avec l'image d'un trou noir, ou celle très connue des piliers de la création. Elles influencent l'imagerie du cinéma de fiction depuis Méliès et Fritz Lang, en passant par Kubrick, jusqu'à Christopher Nolan, Damien Chazelle récemment⁵. Certains films intègrent parfois des images dont la première fonction est scientifique (dans *Tree of Life* ou *Voyage Of Time* de Terrence Malick).

Et cependant, le propos scientifique est bien souvent présent et cohabitant avec la fiction puisque tant Fritz Lang qu'Alfonso Cuarón ont fait appel aux astrophysiciens pour le rendre crédible. Ainsi, l'histoire et sa représentation dans le film *Interstellar* est à la fois imaginaire

⁴ Voir : <https://sciencepost.fr/nasa-met-ligne-nouvelle-bibliotheque-de-medias-libres-de-droits/>.

⁵ Par exemple :

Le Voyage dans la Lune, Georges Méliès (1902)

La femme sur la Lune, Fritz Lang (1929)

2001, l'odyssée de l'espace, Stanley Kubrick (1968)

Gravity, Alfonso Cuarón (2013)

Interstellar, Christopher Nolan (2014)

First Man, Damien Chazelle (2018)

Ad Astra, James Gray (2019)

et en même temps, d'une certaine cohérence scientifique, comme le souligne l'astrophysicien Roland Lehoucq :

« Dans la représentation du trou noir, le scientifique [l'astrophysicien Kip Thorn, ndlr] leur a donné toutes les billes pour que l'entreprise d'images numériques fasse du bon travail. Mais l'image finale du trou noir, avec son disque d'accrétion, comporte des *éléments justes et d'autres faux*. Nolan l'a dit explicitement : il a viré des éléments qui ne lui plaisaient pas. [...] L'important c'est que le module d'incrédulité ne soit pas trop durement secoué ».⁶

Alors, comment discerner le faux du vrai si même le regard du scientifique semble détecter du vrai dans ces images fictionnelles ? Surtout quand le traitement médiatique des différentes images est sensiblement le même, et tend à faire croire à une image presque « objective » car scientifique, avec en sous-entendu : *Voilà ce qu'on verrait si on y était*. On pourrait croire que c'est ce à quoi ressemble l'univers, que la seule barrière entre notre œil et ces visions est celle de la distance, et du temps. Mais qu'est-ce que nous montrent ces images ? Est-ce que c'est ce que l'œil humain verrait, à cet endroit de l'univers ? Sinon, est-ce que pour autant ces images sont « fausses »?

Ces images m'intéressent car de prime abord elles se situent au carrefour de plusieurs disciplines, aussi bien liées au monde de la science que de l'art. Elles sont d'une part scientifiques : elles représentent des phénomènes astronomiques/chimiques/physiques, sont prises par certains des appareils les plus abouties techniquement jamais créés par l'homme, et une fois interprétées, ces images sont une source d'informations, de données, d'études pour mieux comprendre le monde, l'espace et le temps.

Mais ces images ont aussi une portée artistique liée au regard suscitant, malgré leur scientificité, une émotion esthétique. Toute image a une dimension subjective, du moment que l'être humain intervient dans ce processus, que ce soit au niveau de la prise de vue ou du traitement, dans la représentation, les couleurs, le format, la lecture de ces images. Dans ces images, regards scientifiques et artistiques se mêlent. La frontière entre ces mondes est poreuse et on peut se demander s'il est pertinent de les dissocier, tant ils se nourrissent mutuellement. Mon étude visera à réfléchir à cette question, décortiquer la manière de faire et de penser ces images pour proposer des clés d'appréhension afin de construire une narration cinématographique autour d'elles. Il s'agira notamment de s'interroger sur leur fabrication technique et leur valeur esthétique depuis les débuts de l'exploration spatiale jusqu'à nos jours pour répondre à la question :

Comment les contraintes scientifiques et techniques de la conception de ces images participent-elles à leur esthétique (colorimétrie, lumière, géométrie, cadrage, netteté, imperfections, temporalité...)?

⁶ Roland Lehoucq, « Interstellar : enquête sur un trou noir », La Recherche, dossiers 16, décembre 2015 - janvier 2016

Dans un premier temps, j'effectuerai une étude historique pour comprendre dans les grandes lignes les différentes périodes techniques et esthétiques que l'imagerie spatiale a traversées. Nous commencerons cette réflexion aux débuts de la photographie et du cinéma, à la fin du 19ème et au début du 20ème siècle, afin de comprendre à quoi ressemblaient les technologies primitives de l'imagerie spatiale.

Tout au long de cette étude, je montrerai l'influence qu'ont eue les avancées techniques et industrielles de la seconde guerre mondiale sur l'exploration spatiale. Cela m'amènera à parler des premières images de la Lune par des sondes, puis par des humains avec les missions Apollo. Cela me permettra de me pencher sur les appareils de prises de vues, optiques, capteurs, caméras, qui ont permis de documenter ces voyages. Je parlerai aussi de l'implication d'Angénieux, afin de comprendre le rapport qu'il peut y avoir entre les instruments utilisés pour l'exploration spatiale et ceux utilisés pour le cinéma au même moment. Jean-Yves Le Poulain, Product Line Manager chez Angénieux, apportera son expertise.

Dans un second temps, prolongeant l'historique, j'évoquerai les images provenant de l'espace plus lointain, obtenues pas des appareils de prises de vues utilisés pour sonder l'Univers, loin de la portée de l'Homme. Je me pencherai sur certaines missions qui ont ramené les premières images de Mars, Vénus ou Jupiter, en tentant de comprendre comment cela a pu arriver, et où en est l'imagerie spatiale aujourd'hui, au 21ème siècle.

Je pourrai alors m'intéresser à certaines images de manière plus précise, comme celles du télescope Hubble ou de la sonde Rosetta. Je réfléchirai à la chaîne de fabrication de ces images, depuis la prise de vue sur le support photosensible, selon qu'elles soient issues du domaine visible ou pas. Je me poserai aussi la question de l'exposition du capteur, véritable enjeu compte tenu de la quantité de lumière dans l'espace, pour ensuite me pencher sur le traitement des données brutes. Je caractériserai plusieurs paramètres de ces images spatiales, tels que le contraste, l'échantillonnage, la résolution, la luminosité, et la couleur. Je verrai les différentes possibilités qui existent pour traiter les données brutes, et les différentes esthétiques que ces possibilités conditionnent.

Je discuterai avec François Lévrier, chercheur en astrophysique et maître de conférences à l'Ecole Normale Supérieure, qui pourra m'éclairer sur le processus de traitement de certaines images du milieu interstellaire, notamment en décortiquant une image du Fond Diffus Cosmologique qu'il a participé à créer. Cela m'aura amené à parler de la dimension « réelle » de ces images. Représentent-elles des images scientifiques « objectives » ? Dans quelle mesure sont-elles le fruit d'interprétations subjectives ?

Dans une troisième partie, je réfléchirai à la portée esthétique et artistique de ces images. Je verrai les étapes d'interprétation de ces images en amateur : où trouver les données brutes ? Quels sont certains des problèmes récurrents que l'on peut rencontrer ? Jusque-là, j'aurai

surtout parlé d'images fixes. Dans cette partie, je traiterai principalement de séquences animées, l'objectif étant de les intégrer à une fiction cinématographique. Ces séquences sont largement relayées par les médias, je les analyserai pour comprendre ce qu'elles racontent. Je m'entretiendrai avec Elsa De Smet, docteure en histoire de l'art, dont l'objet d'étude actuel porte sur les représentations visuelles de l'espace. Elle me donnera des clés d'analyse pour réfléchir à la dimension « vraie » de ces images, et les resituer dans leur contexte, dans l'histoire de l'art et du regard.

Enfin, toutes ces recherches m'auront amené à mieux comprendre ces images, à les situer dans leur contexte, en prenant en compte leur mode de fabrication. Ainsi, je proposerai une démarche artistique visant à employer ces images à des fins esthétiques. Il s'agit de la mise en pratique de mes recherches. Je vous présenterai le travail préparatoire d'un court-métrage de fiction construit autour d'images de la comète Chury par la sonde Rosetta. Je me demanderai comment elles peuvent être intégrées dans une narration de cinéma fictionnelle. Dans quels buts esthétiques ? Narratifs ? Cela m'amènera vers des représentations de l'espace qui ne sont pas toujours conformes à la représentation hollywoodienne. J'aimerais utiliser notamment des images prises par la sonde Rosetta aux abords de la comète Chury en 2015. Comment exploiter ces images dans un langage cinématographique, en les intégrant, par exemple, dans un travail de montage et de sons ?

PREMIÈRE PARTIE
DES PREMIÈRES IMAGES AUX MISSIONS
APOLLO



Fig. 1 : Première image prise dans l'espace, 1946
IMAGE: US Army/NASA/White Sands Missile/Applied Physics Laboratory

CHAPITRE 1. RECONTEXTUALISATION HISTORIQUE JUSQU'À LA SECONDE GUERRE MONDIALE

Dans un premier temps, je vais revenir sur quelques étapes du chemin parcouru pour arriver à obtenir des images de notre univers. Commençons par quelques grandes dates clés.

De la fin du 19^{ème} à la Seconde Guerre mondiale

La volonté pour l'humain de capturer des images dans l'espace prend ses racines très tôt dans l'histoire de la photographie. Dès 1858, Gaspard Félix Tournachon obtient les premières photos aériennes en plaçant un appareil sur un ballon captif, plus de 300 mètres au-dessus de Paris. Dans la continuité de cette démarche, on peut également citer Arthur Batut en 1889 qui prend des photographies aériennes à l'aide d'un cerf-volant, à Labruguière, en France. En 1903, la « Bavarian Pigeon Corps » utilise des pigeons pour transmettre des messages et prendre des photographies aériennes.

Au fil des années, la prise de vue prend de la hauteur. En 1906, Albert Maul utilise une fusée propulsée à l'air comprimé et prend une photographie aérienne d'une hauteur d'environ 800 mètres avant que la caméra soit éjectée et retourne sur le sol à l'aide d'un parachute. Deux ans plus tard, en 1908, un vol en avion piloté par Wilbur Wright et LP Bonvillain permet d'acquérir les premières photographies prises depuis un avion, tandis que l'année suivante en Italie ce sont les premières images en mouvement qui sont capturées dans les airs.⁷

Comme dans bien des domaines technologiques, les ressources mobilisées pour la guerre permettent de grandes avancées. La Première Guerre mondiale a développé l'intérêt porté à l'utilisation de la photographie aérienne, notamment d'un point de vue stratégique, mais cet intérêt s'est estompé avec la fin de la guerre. C'est avec la Seconde Guerre mondiale que la prise de vue aérienne et spatiale a pu prendre tout son essor.

L'Allemagne nazie développe le missile balistique V2, et en lance plusieurs milliers d'exemplaires entre 1944 et 1945 contre les populations civiles principalement au Royaume-Uni et en Belgique. Lancé verticalement, ce missile peut atteindre 206 000 mètres d'altitude. Sur cette période, rien qu'à Londres, on estime que ce missile a fait plus de 2700 morts. En tant qu'arme, cette invention fut considérée comme un échec, car pas assez « efficace » et rentable.

Le V2 a été développé par les ingénieurs de l'Allemagne nazie amenés notamment par Werner Von Braun. L'une des technologies parmi les plus importantes d'un point de vue historique développées pour le V2 était le système de guidage automatique, indépendant des commandes au sol. La destination était programmée dans l'ordinateur analogique de bord, et

⁷ <http://www.geog.ucsb.edu/~jeff/115a/remotesensinghistory.html>

une fois la fusée en vol les gyroscopes pouvaient suivre la position de la fusée dans l'espace et ajuster la trajectoire à l'aide des ailerons pour maintenir le cap sur la cible désirée.

Lorsque la guerre prend fin, les Américains, les Soviétiques et les Anglais se battent pour mettre la main sur les technologies du V2 dans le cadre de l'Opération Paperclip. Ne désirant pas travailler pour le compte de Staline, Von Braun prend la décision de se rendre auprès des Américains, tandis que les Russes mettent la main sur les usines et terrains d'essais du V2. Mais les Américains savent qu'avoir dans leurs rangs l'homme derrière cette technologie est bien plus important que d'avoir les ressources matérielles.

Les V2 sont alors démontés et analysés pour en comprendre le fonctionnement, et tenter de le lancer dans la partie supérieure de l'atmosphère. En travaillant pour les États-Unis, Von Braum se voit donner l'opportunité de poursuivre ses rêves de vol spatial. Il commença à travailler sur le missile Redstone, un dérivé direct du V2. Le premier astronaute américain, Alan Shepard, fut lancé dans l'espace en 1961 sur une version du missile Redstone.

Il est donc assez évident d'établir un lien direct entre les fusées V2, construites par des travailleurs esclaves de l'Allemagne nazie et lancées depuis l'Europe occupée, et les premières images de l'espace.

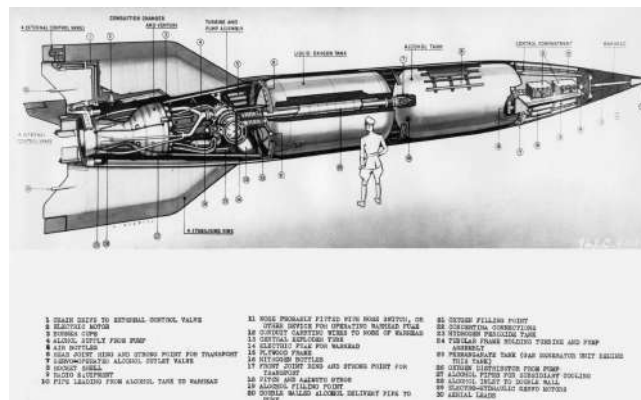


Fig. 2 Plans du V2
 IMAGE : US AIR FORCE PHOTO

Les premières images prises dans l'espace : 1946

En 1946, un an seulement après la fin de la guerre, les innovations technologiques nées de ce conflit avaient accéléré l'exploration scientifique et spatiale. C'était bientôt le début de la guerre froide, et de la course à l'exploration spatiale.

⁸C'est à White Sands au Nouveau-Mexique que les Américains effectuent des essais pour envoyer des fusées V-2 à 100 kilomètres au-dessus de la Terre.

Deux membres du laboratoire de physique appliquée John Hopkins – J. Allen Hynek et Clyde Holliday- se disent alors qu'une caméra envoyée à cette altitude pourrait capturer des images non seulement remarquables, mais également pertinentes scientifiquement.

Holliday modifia une caméra 35 mm « De Vry » pour lui permettre de supporter le choc des impacts au lancement et à l'atterrissage. Il conçut un magasin de pellicule spécifique, renforcé avec des parois en acier épaisses de 2,5cm pour protéger la pellicule. Au lieu du moteur à ressort basique de la caméra, il utilisa un moteur électrique 24 volts initialement prévu pour l'ordinateur de bord d'un bombardier B-29. L'entièreté de la caméra fut ensuite placée dans une boîte en duralium de 9,5mm laissant dépasser seulement l'optique. La pellicule utilisée était la Eastman Super XX, exposée 4 images par seconde. Le diaphragme fut fixé à 5.6, et la vitesse d'obturation était de 1/50ème.



Fig. 3 Clyde Holliday et sa caméra
IMAGE : NASA

Ainsi, le 24 octobre 1946, une fusée V-2 équipée de la caméra spéciale de Holliday transperçait le ciel du Nouveau-Mexique. Après quelques minutes, le carburant était épuisé, la fusée retombait sur Terre, entraînant la caméra dans une chute libre à environ 150 mètres par seconde.

Il fallut attendre le lendemain pour que la caméra soit récupérée. L'optique et la batterie étaient fracassées, mais le magasin de pellicule renforcé avait survécu.

⁸ <https://www.airspacemag.com/space/the-first-photo-from-space-13721411/#>

Les images granuleuses noir et blanc qui se trouvaient à l'intérieur, les premières jamais prises de notre planète depuis l'espace, firent sensation : nous n'avions jamais vu notre monde d'aussi haut. Les images donnaient à voir la courbure de la Terre, les épais nuages au-dessus de l'Ouest américain.

À propos de ces images, Holliday écrira dans *National Geographic*⁹ :

« Les résultats de ces tests nous font entrevoir une époque où les caméras pourront être montées sur des missiles guidés pour espionner les territoires ennemis en temps de guerre, cartographier les régions inaccessibles de notre planète en temps de paix, et même photographier les formations nuageuses, les tempêtes et phénomènes météorologiques de tout un continent en quelques heures. ».



*Fig. 4 & 5 White Sands Missile Range
IMAGES : Applied Physics Laboratory*

Nous avons donc vu comment les inventions militaires liées à la Seconde Guerre mondiale (le missile V-2) ont permis de grandes avancées dans le domaine de l'exploration spatiale, permettant notamment de développer les premières fusées. Des appareils de prises de vues étaient ensuite attachés à ces fusées. Dès 1946, ce dispositif permit de ramener des images de la Terre depuis une altitude jamais atteinte auparavant. Avec le début de la guerre froide, ces technologies furent utilisées dans des satellites-espions. Ces satellites utilisaient de la pellicule, car c'était à l'époque le film qui offrait la plus grande qualité possible, contrairement, par exemple, aux images transférées électroniquement vers la Terre qui n'étaient pas d'assez bonne résolution pour permettre la reconnaissance des territoires ennemis. Ces satellites-espions étaient en orbite à seulement quelques centaines de kilomètres

⁹ *The National Geographic Magazine*, Volume 98, Numéro 4 (October, 1950)

au-dessus de la Terre, donc ils pouvaient simplement « lâcher » le magasin de pellicule vers la Terre et ainsi récupérer les images capturées.

CHAPITRE 2. LA FACE CACHÉE DE LA LUNE ET LA TERRE VUE DE L'ESPACE

Mais lorsque les premières sondes furent envoyées vers la lune, Mars, ou Vénus, “lâcher” les magasins de pellicule et espérer les récupérer sur Terre n'était pas une option viable. Il fallait trouver un autre moyen pour récupérer les données prises par des sondes éloignées.

Premières explorations lunaires

À la fin des années 50, une part importante de l'exploration spatiale réside dans l'étude de la Lune, notamment en prévision du premier vol habité vers celle-ci par les Américains. Mais avant ce célèbre mois de juillet 1969, ce sont les Russes qui mènent l'exploration spatiale.

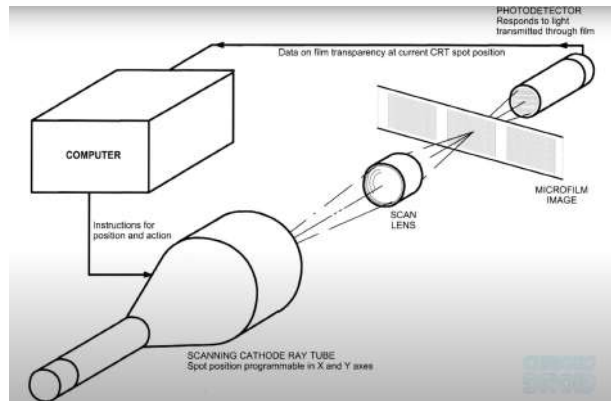
En 1959, le 4 octobre, la sonde Luna 3, destinée à photographier la face cachée de la Lune, est envoyée. Elle transmet les images avec succès 3 jours plus tard, le 7 octobre. Luna 12 entrera en orbite lunaire le 25 octobre 1966 et transmettra des images vidéos de la Lune entre le 27 octobre 1966 et le 19 janvier 1967.

Ces images furent capturées avec de la pellicule. Cette pellicule fut adaptée aux conditions extrêmes, notamment à la température, et aux radiations. Pour se procurer cette pellicule, les Russes avaient abattu des ballons de surveillance américains du « Projet Genetrix » qui passaient au-dessus de l'Union soviétique.

La caméra utilisée pour la mission Luna 3 était composée d'un système à deux optiques 200mm qui permettait un grand angle afin de capturer l'entièreté de la lune en une seule image, et un 500mm pour de gros plans de régions lunaires. Ici, le terme de gros plan reste relatif, puisque les images prises par Luna 3 furent capturées depuis une distance d'environ 65 000 km.

La caméra était fixée au corps de l'engin Luna 3, qui était ainsi le premier engin à pouvoir se mouvoir sur trois axes et ainsi se positionner de manière optimale pour la prise de vue.

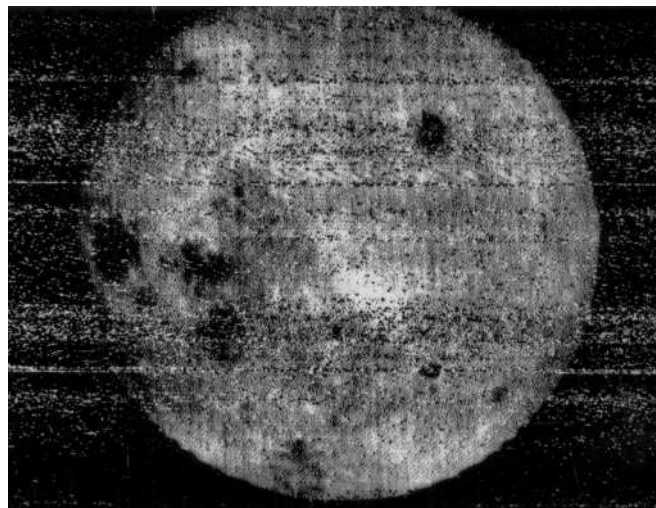
Les négatifs furent ensuite développés, fixés et séchés à l'intérieur même de l'engin, puis scannés électroniquement avec une résolution de 1000 lignes par images. Le scan était effectué avec un scanner à tête mobile qui projetait un faisceau lumineux au travers du film, et la lumière était ensuite reçue par tube vidicon. Ce tube recevait donc pour un point donné une certaine quantité de lumière selon la densité du film, et pouvait ainsi obtenir un signal électronique caractérisant l'image. Ce signal était ensuite retransmis vers la Terre.



*Fig. 6 Procédé de conversion des images négatives en signal analogique pour une transmission vers la Terre
 IMAEG : NASA*

Une fois sur Terre, l'image était diffusée sur une télévision à balayage lent. Cette image était ensuite elle-même photographiée ; et c'est cette photographie-là qui fut diffusée au monde entier. Il est ainsi évident de comprendre la faible qualité de cette première image obtenue par Luna 3 : le processus pour traiter et obtenir cette image était composé d'une grande quantité d'étapes successives, chacune dégradant significativement la qualité de l'image.

Même si la qualité n'était pas optimale, et l'image un peu floue, elle permit quand même de voir pour la première fois le « dark side of the moon », et pour les scientifiques de se rendre compte par exemple que cette face-là était bien plus claire, bien moins jonchée de cratères. Depuis, de nombreuses missions ont permis d'avoir une meilleure vision de la face cachée de la lune : des images à hautes résolutions, des données liées à l'altitude ou à la densité du sol.



*Fig. 7 Première image de la face cachée de la Lune par Luna 3
 IMAGE : NASA*

La Terre depuis l'espace éloigné¹⁰

La première image de la Terre depuis une distance supérieure à celle de l'orbite basse de la Terre a été obtenue par Explorer 6, également en 1959, à une distance de 27000 km. L'idée de ces images était de tester un processus entièrement électronique de scan afin de mesurer la couverture nuageuse de certaines régions. Un exemple d'image obtenue nous montre des nuages au-dessus du Pacifique (ci-dessous à gauche). À peine 13 ans plus tard, en 1972, l'équipage de Apollo 17 en route vers la Lune capturait le fameux cliché « Blue Marble » avec l'aide d'un 70mm Hasselblad équipé d'une optique 80mm (ci-dessous à droite).



*Fig. 8 (à gauche) La Terre par Explorer 6 & Fig. 9 (à droite) le fameux cliché Blue Marble
IMAGES : NASA*

Il devenait alors évident, en confrontant les technologies de prises de vues des sondes et celles utilisées par les astronautes proches de la Terre, qu'il fallait améliorer les technologies de prises de vues qui équiperaient les sondes envoyées à des dizaines ou centaines de millions de kilomètres de la Terre pour espérer obtenir des images de meilleure qualité que les meilleurs télescopes terrestres.

Intéressons-nous à ces images “humaines” de l'espace.

¹⁰ <https://time.com/4058041/most-iconic-space-photos/>

CHAPITRE 3. IMAGES HUMAINES DE L'ESPACE – EXEMPLE DES MISSIONS NASA « APOLLO »

Avant Apollo

Au commencement des programmes spatiaux, la majorité des gens considèrent la photographie spatiale simplement comme une sous-division de la photographie industrielle. Il y avait des photographies de vaisseaux, lancements, et d'astronautes en entraînement, mais toutes ces images étaient prises au sol.

Quand John Glenn fut le premier américain mis en orbite, l'idée qu'il puisse amener une caméra avec lui n'était pas une priorité. On l'équipa simplement d'une caméra 35mm Ansco Autoset, de Minolta, qui fut achetée dans une droguerie locale et modifiée en hâte pour pouvoir être utilisée par l'astronaute dans sa combinaison pressurisée. Tout cela était vu comme une expérimentation. À cause du peu de connaissance que nous avions vis-à-vis de l'apesanteur, les questions principales étaient de savoir si ces conditions si particulières allaient empêcher un homme de voir, respirer, manger, avaler... pour cette raison, la photographie spatiale était considérée comme un bonus amusant.

Les attentes concernant les premières photographies spatiales étaient donc faibles, et à cela vint s'ajouter l'inquiétude diplomatique que la prise de photographies depuis l'orbite terrestre d'autres nations puisse être considérée comme un acte mal intentionné, ou de déclaration de guerre/d'espionnage. Malgré cela, la photographie spatiale s'est rapidement développée. Les satellites météorologiques permettaient des prédictions fiables, sauvant ainsi des vies et de l'argent. Dans la première décennie du programme spatial, les satellites en orbite autour de la Terre étaient utilisés pour la gestion des ressources terrestres et à des fins cartographiques. Peu à peu, les satellites remplacèrent les avions U-2 dans leurs missions de récoltes de données.

Quasiment 100000 photographies furent prises par les appareils de la NASA (sondes lunaires, Surveyor, Lunar Orbiter) afin de cartographier les points d'atterrissage d'Apollo. Ranger 7¹¹ ramena la première photographie de la lune en 1964, par une transmission radio permettant l'envoi en 15 minutes de 4308 images, tandis que l'appareil plongeait vers la surface lunaire, avant de subir un crash qui entraîna sa destruction. Puis les sondes Surveyor parvinrent à alunir. À partir de 1966, les sondes commencèrent leur exploration du sol lunaire, en creusant, analysant, et transmettant des images prises « à hauteur d'hommes » de ce que les astronautes verraient une fois sur la Lune. Les « Lunar Orbiters » cartographient méthodiquement une grande partie de la surface lunaire pour déterminer le point d'atterrissage optimal pour un vaisseau habité par l'homme. Ces appareils étaient équipés de

¹¹ <https://www.nasa.gov/feature/55-years-ago-ranger-7-photographs-the-moon/>

laboratoires de développement de films complètement automatisés. Une fois développés, les films étaient scannés afin de les transmettre vers la Terre en transmission radio¹².

Hasselblad

Lors des missions humaines vers Mercure en 1962 et 1963, des caméras Hasselblad 550C format médium, furent utilisées telles qu'elles, sans modification particulière. Ces caméras se sont rapidement imposées comme des piliers de cette période de l'exploration spatiale. Elles furent par exemple utilisées durant les vols Gemini en 1965 et 1966. En plus de leurs excellentes propriétés mécaniques et optiques (des optiques Zeiss), ces caméras étaient faciles d'utilisation, et le film était préchargé dans des magasins qui pouvaient facilement être interchangeables en milieu de bobine si les conditions de lumières changeaient. On peut noter que lors de la seconde mission Gemini, l'astronaute Ed White marqua l'histoire de la photographie spatiale en prenant la première image d'un vaisseau spatial en vol, lors d'une sortie extra véhiculaire. Il utilisa pour cela une caméra Zeiss Contarex 35mm embarquée sur son pistolet de manœuvre à air comprimé.¹³

Deux missions habitées, Apollo 8 et 10, orbitèrent la Lune avant l'alunissage d'Apollo 11. Avec Apollo 8, des êtres humains virent pour la première fois de leurs propres yeux la Terre dans son entièreté, une sphère bleue flottant dans l'espace. La vision de ce lever de Terre au-dessus de l'horizon lunaire, et les nouvelles images de la Terre qui s'en suivirent, sont en partie créditées pour avoir éveillé les consciences sur des questions écologiques.

Sur cette mission (Apollo 8), des caméras Hasselblad EL electric furent utilisées pour la première fois. Le moteur électrique de ces caméras automatisait le processus de prise de vues. Les astronautes n'avaient plus qu'à gérer la distance, l'ouverture de l'objectif, et la vitesse d'obturation : une fois que le déclencheur était enclenché, la caméra exposait et enroutait le film, et mettait en tension l'obturateur. L'équipement emporté comprenait 2 Hasselblad EL, équipées d'un objectif Planar f2.8/80mm et d'un objectif telephoto Sonnar f5.6/250mm avec 7 magasins de film 70mm. L'intégralité des surfaces de ces équipements (caméra, pellicule, magasins, optiques) fut traitée pour avoir une surface anodisée noire afin d'éliminer les reflets. Les caméras étaient aussi équipées de larges verrous afin de verrouiller le magasin, et les réglages optiques (distance, ouverture). Ainsi l'utilisation de ses caméras par des astronautes en tenue et gantés fut facilitée. Les caméras n'avaient pas de visée à miroir réflex, mais une visée toute simple avec un anneau assistant le cadrage.

Chaque magasin de film permettait d'obtenir 160 images en couleurs, et 200 en noir et blanc sur un film spécifique. La NASA commanda à KODAK de nouvelles pellicules fines avec des émulsions spéciales. Sur Apollo 8, 3 magasins furent chargés avec un film Kodak Panatomic-X (à grain fin, 80 ASA, N&B large et perforé 70mm), 2 avec un film Kodak Ektachrome SO-168, 1 avec du film Kodak Ektachrome SO-121, et un avec un film

¹² <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/lunar/lunarorb.html>

¹³ <https://casualphotophile.com/2019/05/10/ed-white-space-walk-camera-used/>

hypersensible Kodak 2845 (16000 ASA). Avec cela, 1100 images (couleurs, N&B, et filtrées) furent obtenues lors de la mission Apollo 8¹⁴.

En plus des caméras Hasselblad, Apollo 8 emporta une caméra de télévision noire et blanc, une caméra de cinéma 16mm, des posemètres, plusieurs filtres et accessoires de caméras.

Apollo 11

Pour cette mission, un lot complet d'équipement caméra fut embarqué. On comptait : deux caméras cinéma pellicule 16mm Maurer, une caméra de télévision en couleur dans l'orbiteur Columbia, et une caméra télévision noir et blanc à l'extérieur du module lunaire pour transmettre vers la Terre les images des premiers pas de Neil Armstrong sur la lune. Une caméra stéréo Kodak « gros plan » fut utilisée pour filmer le sol lunaire quasiment en macroscopie (à seulement quelques centimètres). 3 caméras Hasselblad 500EL furent également emportées.

Deux de ces caméras Hasselblad étaient identiques à celles embarquées sur Apollo 8 & 10. Lors de l'alunissage, un Hasselblad fut laissé à bord de Columbia pour rester en orbite lunaire. Les 2 autres furent prises à bord d'Eagle, le module lunaire, vers la surface lunaire¹⁵.

La « Data Camera » (c'est-à-dire la caméra servant à récolter des données) utilisée sur la surface lunaire durant Apollo 11 (et sur les missions lunaires suivantes) était une Hasselblad 500EL avec quelques modifications supplémentaires. Une plaque en verre transparent sur laquelle était gravée un réseau de croix était placée entre le corps caméra et le magasin, directement devant le plan film. Cette plaque est gravée de croix pour former une grille, et l'intersection de ces croix était calibrée précisément avec une tolérance de l'ordre de 0.002mm. Ces croix étaient présentes sur chaque image de film exposée. À l'aide de ce marquage (voir photo ci-dessous), il est possible de calibrer des données liées à la distance et à la hauteur des images prises depuis le sol lunaire ou l'espace. L'utilisation de tels marquages n'était pas nouvelle ni spécifique aux programmes spatiaux ; c'était une pratique déjà employée dans les photographies scientifiques grand format, et dans les photographies aériennes bien avant l'alunissage. Cela était prévu pour compenser les distorsions que pouvaient subir les photographies négatives de grande taille lors de l'exposition ou de l'impression.

¹⁴ NASA : *Apollo Lunar Surface Journals*, Gary H. Kitmacher, Author, Steve Garber, NASA History Web Curator

¹⁵ NASA : *Apollo Lunar Surface Journals*, Gary H. Kitmacher, Author, Steve Garber, NASA History Web Curator



*Fig. 10 La surface lunaire
IMAGE : NASA*

Dans des conditions terrestres « classiques », lorsque le film est rembobiné dans la caméra, de l'électricité est générée à sa surface. Cette électricité est dispersée par les bords en métal et les rouleaux, qui guident le film, et par l'humidité de l'air ambiant. Sur la surface lunaire, à l'inverse, le film est guidé par les bords légèrement relevés de la plaque Réseau gravée avec les grilles de marquage. Le verre n'étant pas un bon conducteur, et en l'absence d'air ambiant, la charge électrique accumulée entre le verre et le film pouvait devenir telle qu'elle provoquait des étincelles entre la plaque et le film. Pour éviter l'accumulation d'électricité statique, le côté de la plaque en verre faisant face au film fut recouvert d'une couche fine de conducteur, avec de l'argent déposé sur les bords de cette couche. La charge électrique était donc dirigée vers les parties métalliques du corps caméra par contact.

La surface externe des « data camera » 500EL fut peinte en argentée (plus clair que le noir initial) pour aider à maintenir une température interne plus uniforme dans l'appareil malgré les températures violentes qu'il allait subir (chaleur ou froid extrême en l'espace de quelques heures) sur la surface lunaire. Les lubrifiants et graisses utilisés d'habitude dans les mécanismes de la caméra devaient être éliminés, ou remplacés, car des graisses conventionnelles se seraient sublimées dans le vide, et auraient aussi pu condenser sur la surface des optiques, de la plaque Réseau, ou du film.

À la surface lunaire, deux magasins de pellicule furent prévus pour la data camera Hasselblad 500EL. Sur la mission, 33 bobines de pellicule, du même type que celles utilisées lors des précédentes missions, furent embarquées. Le film était chargé avant le vol, et plusieurs plans tests déjà exposés. Lorsque les pellicules furent développées après la mission, les plans tests étaient coupés (isolés), et développés en premier. Ils étaient ensuite comparés à des chartes de couleurs précises pour s'assurer qu'il n'y aurait pas de défaut dans le développement du reste du film, et obtenir des couleurs les plus justes possibles.

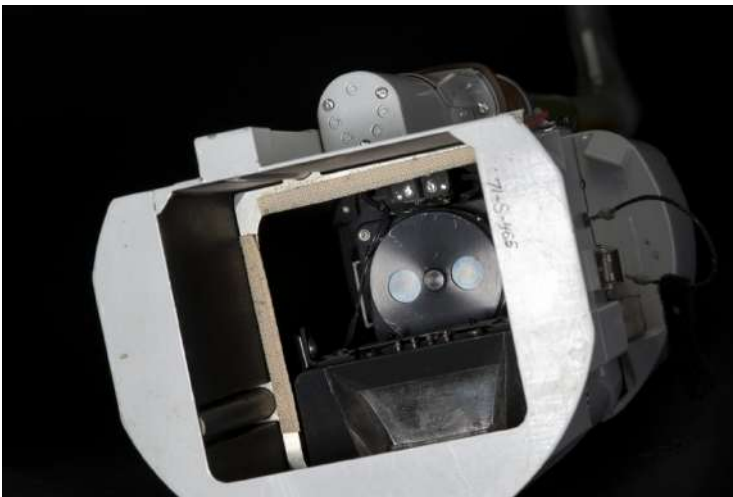
Chaque magasin de film était également peint d'une couche argentée, comme le corps caméra (évoqué précédemment). Ils étaient tous équipés d'un anneau de sécurité, duquel partait une corde pour permettre à toute la caméra d'être abaissée depuis la cabine du module lunaire vers la surface du sol, et d'être réceptionnée par Neil Armstrong, à l'aide d'un système type « corde

à linge » (selon les mots de la NASA). Les magasins de films, une fois exposés, étaient remontés depuis la surface grâce à ce même système. La caméra et l'optique, en revanche, furent abandonnées et reposent encore à ce jour à la base de la Tranquillité sur la surface lunaire¹⁶.

La caméra « Kodak Stereo Close-Up » et Apollo 11

7 mois avant la mission Apollo 11, une nouvelle caméra fut commandée par la NASA¹⁷. Elle sera utilisée par l'équipage pour capturer des images en gros plan « stéréo » (c'est-à-dire que la caméra était équipée d'un système à deux objectifs côte à côte) du sol lunaire et des pierres qui le jonchaient. La caméra avait une vitesse d'obturation de 1/100ème de seconde, et une ouverture à f/22.6. La pellicule était située à environ 25 centimètres de la surface lunaire, et la quantité de lumière nécessaire était fournie par un flash électronique.

Cette caméra était pensée pour une ergonomie et une facilité de prise en main par les astronautes dans leurs épaisses combinaisons pressurisées. La caméra était posée sur le sol, et l'astronaute n'avait plus qu'à appuyer sur une gâchette sur une longue poignée pour exposer les images. Chaque exposition donnait deux images côte à côte de la même portion de surface lunaire. La surface de sol lunaire photographiée mesurait environ 8cm par 8cm. La surface exposée sur le film correspondait à une zone de 2,5cm carrés. La technologie stéréo pouvait permettre, avec le lecteur associé, de visualiser des images quasi-3D de la surface lunaire.



*Fig. 11 & 12 La caméra Kodak Stéréo Close-Up
IMAGES : NASA*

¹⁶ <https://www.space.com/15864-nasa-apollo-11-moon-landing-photos/3.html>

¹⁷ https://an.rsl.wustl.edu/apollo/data/a11/stationLM/csp/docs/csp_psr.pdf

Après Apollo 11

Il y eut cinq alunissages supplémentaires après Apollo 11¹⁸. Sur chacun de ces cinq vols, l'équipement de prises de vues était similaire à celui d'Apollo 11. Sur Apollo 15, fut ajouté au Hasselblad embarqué à la surface lunaire une optique télescopique 250mm.

L'entraînement des astronautes pour la photographie lunaire

Les astronautes des missions Apollo suivirent d'intenses entraînements en prévision de leur exploration lunaire. Durant les nombreuses années précédant les missions lunaires, des entraînements scientifiques et photographiques étaient prévus. Les astronautes étaient encouragés à prendre des caméras d'entraînements lors de leurs voyages pour se familiariser avec leurs manipulations, et augmenter leur technique photographique. Ils suivirent des cours et tutoriels sur l'équipement et comment l'utiliser, ainsi que sur les objectifs scientifiques que cela représentait. L'équipage se rendit par exemple sur des sites géologiques dans le Nevada, l'Arizona, ou Hawaii, pour simuler leur mission, complètement en tenu (avec des sacs de prélèvement d'échantillons, des checklists, des sacs à dos, des marteaux pour prélever de la roche) et utilisant des Hasselblad EL similaires à celles qu'ils auraient sur la Lune.

Globalement, l'utilisation de la caméra était automatisée, donc la partie la plus cruciale de l'entraînement résidait dans le pointage de la caméra qui était attachée à la poitrine des astronautes, au panneau système du contrôle environnemental. Ainsi, pour viser et cadrer, l'astronaute devait orienter son corps (l'appareil n'était pas tenu à bout de bras). Les images prises lors de ces exercices d'entraînements étaient ensuite développées et rendues à l'équipage, qui étudiaient les images obtenues.

Pour répondre aux exigences des scientifiques, les outils pour les prises de vues vont évoluer afin de s'adapter aux conditions extrêmes de vue spatiale et faire face aux problèmes de température, de luminosité, de résolution des détails, des espaces colorimétriques ou fréquences, entre autres. Un fabricant portera sa contribution en matière d'optique : Angénieux.

18

<https://airandspace.si.edu/exhibitions/apollo-to-the-moon/online/later-missions/#:~:text=After%20Apollo%2011%2C%20NASA%20sent,17%2C%20occurred%20in%20December%201972>

CHAPITRE 4. LES OPTIQUES ANGÉNIEUX

La notoriété acquise par la marque Angénieux outre-Atlantique, sa maîtrise de l'ouverture à F/0,95, ses travaux pour la télévision menés avec le fabricant américain de caméras RCA dès 1958 expliquent les raisons qui amènent la NASA à sélectionner les objectifs de cette petite entreprise française. Le 31 juillet 1964, une optique à focale fixe Angénieux embarquée à bord de la sonde spatiale Ranger 7 prend les premières images à bout portant de la lune. Le 21 juillet 1969, les optiques Angénieux sont à bord de la mission Apollo 11 et participent à l'événement télévisuel resté le plus marquant de tous les temps : le premier pas de l'homme sur la Lune. La contribution de Angénieux à la conquête spatiale américaine fait définitivement entrer la marque dans l'histoire. ¹⁹

²⁰Jean-Yves Le Poulain (Directeur de la Photographie et actuellement Product Line Manager chez Angénieux-Thalès) rappelle les contraintes de vues dans l'espace²¹ :

« On ne recherche pas d'esthétique particulière pour ce type d'image. Ce qui intéresse surtout les scientifiques est de ramener les infos les plus justes et précises possibles dans des conditions extrêmes et particulières comme des espaces colorimétriques ou fréquences particulières qui ne sont pas celles de la prise de vue classique. Il est par exemple important d'avoir de la résolution pour les détails.

En se penchant sur l'histoire de Angénieux, on comprend pourquoi ce n'est pas un objectif de type cinéma qui a été utilisé dans l'espace, car cela nous amène à des problématiques liées à la température, aux spectres... Ces objectifs doivent être corrigés pour les conditions de prises de vues spatiales, en utilisant des traitements multicouches particuliers, s'ajoutent à cela des problèmes d'encombrement bien sûr puisque le gramme coûte très cher lorsqu'on envoie du matériel dans l'espace. Il y a aussi des problèmes de température avec ce qu'on appelle la thermalisation pour travailler dans des conditions extrêmes de -80 à +100 degrés Celsius... On peut avoir à faire face à des besoins de luminosité particuliers, donc on a développé pour les missions Ranger un des premiers objectifs à 0,95 dans l'idée d'avoir des objectifs les plus lumineux possibles. Rentrent également en jeu des contraintes de résolution puisque ces images vont être décortiquées. Angénieux a aussi été impliqué récemment dans la mission Persévérance sur Mars avec le développement de laser à fortes puissances qui sont combinés avec des caméras confectionnées par Thales ou la NASA. Sur cette mission tout est télécommandé, allant parfois jusqu'à intégrer l'intelligence

¹⁹ Cette partie consacrée à Angénieux se base principalement sur des extraits du livre *Angénieux et le cinéma : De la lumière à l'image*, Silvana Editoriale (2019) auquel Jean-Yves Le Poulain a participé

²⁰ Certaines informations de cette partie ont été complétées grâce aux articles suivants : <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/space/magazine/apollo-11-mission-destination-moon-angenieux> & <https://www.afcinema.com/Remember-50-years-ago-A-famous-lens-made-by-Angenieux.html> & <https://mediakwest.com/angenieux/>

²¹ Témoignages extraits d'un entretien avec Jean-Yves Le Poulain le 10 mai 2021

artificielle dans certains zooms pour donner une autonomie à l'appareil et pallier la distance Mars - Terre. Tout est motorisé et géré par des ordinateurs, on n'est donc plus dans des gammes « cinéma ».

Le milieu de l'espace est très spécifique, et les objectifs qu'on y développe sont différents des objectifs cinéma du fait des nombreuses contraintes de ce milieu (température, vibratoire...). Il s'agit aussi de développements extrêmement chers.

Quelle expérience en avez-vous tirée pour le cinéma ?

Certainement un savoir faire mécanique et optique - qui reste moins « rigoureux » que dans les conditions spatiales extrêmes. Par exemple, parlons de la thermalisation²². Dans l'espace on est à -80 +100, mais sur Terre pour des objectifs cinéma on est à -20 +40. C'est-à-dire que les systèmes de compensation permettront de garder le tirage de l'objectif et d'avoir des performances quasi équivalentes. Cette thermalisation est clairement issue des recherches à l'époque sur Mercury et a été appliquée depuis les années 50. Aujourd'hui dans le cinéma, dès qu'on a des conditions un peu extrêmes, les objectifs choisis sont des objectifs Angénieux.

Les traitements multicouches développés pour des objectifs spatiaux ont aussi apporté à Angénieux un savoir-faire pour les objectifs cinéma. Cela nous amène à un contrôle plus fin sur le nombre de couches et le travail par fréquences. On est dans des zones spectrales beaucoup plus larges dans l'espace, on monte à plus de 1500 nanomètres, puisqu'on a des outillages comme des lasers qui eux vont travailler dans une zone spectrale hors du visible bien déterminée, donc il faut bien que l'objectif puisse recevoir l'information.

On peut être amenés à développer des objectifs hors espace dont la technologie prend en compte des domaines hors du visible comme l'infrarouge ou l'ultraviolet. Mais il s'agit rarement d'objectifs cinéma, plutôt des outils liés à la vision nocturne, à l'amplification de lumière. C'est un développement parallèle, trop spécifique pour être appliqué au cinéma, où on reste dans le visible.

Il n'y a pas relation absolue, directe entre les objectifs spatiaux et cinéma. Cela se traduit plutôt par des retours d'expérience, un savoir-faire et une expertise extrême qui sont bénéfiques, des retombées indirectes – mais le développement d'objectifs cinéma est bien plus « simple ».

Les recherches sur les matériaux, la température, les verres sont tellement poussées dans le domaine spatial qu'elles servent, même indirectement, dans le domaine cinématographique. Sur Terre il n'y aurait pas besoin de développer des produits pour des conditions aussi extrêmes, il n'y aurait pas de raison de le faire et cela coûterait très cher, pour une application inutile sur Terre. Les objectifs spatiaux ont des verres et des traitements multicouches si particuliers, une mécanique qui prend en compte des

²² Procédé qui permet d'intégrer dans le design de l'objectif des variations des verres et de la mécanique pour que les résultats restent constants malgré les variations de température.

conditions vibratoires extrêmes : tout cela participe au coût de ces objectifs. On en tire tout de même une expérience et un savoir-faire pour les objectifs cinéma. »

Angénieux et l'imagerie spatiale

Pour Angénieux tout commence avec le programme Ranger. Ce programme, lancé par les États-Unis entre 1961 et 1965, prévoit une série de neuf missions préparatoires au programme Apollo. Son objectif : obtenir les premières images à bout portant de la surface de la Lune et donner des informations topographiques de première importance, utiles pour les projets Surveillance et Apollo. Les sondes Ranger sont conçues pour prendre des images de la surface de la Lune et les transmettre à la Terre jusqu'à la destruction lors de leur impact avec la surface lunaire. Une série d'incidents conduit à l'échec des six premiers vols. La Sonde 7 est lancée le 28 juillet 1964, elle est équipée de six caméras de télévision RCA Astro électronique (division du fabricant américain de caméras RCA).



*Fig. 13 Objectif 25mm f/0,95 embarqué à bord de Ranger 7
IMAGE : Matthew Leeg*

Pour équiper ces caméras, la NASA a besoin d'objectifs grand angle très ouverts pour obtenir des images de bonne qualité lorsque la sonde approche de la Lune à grande vitesse.

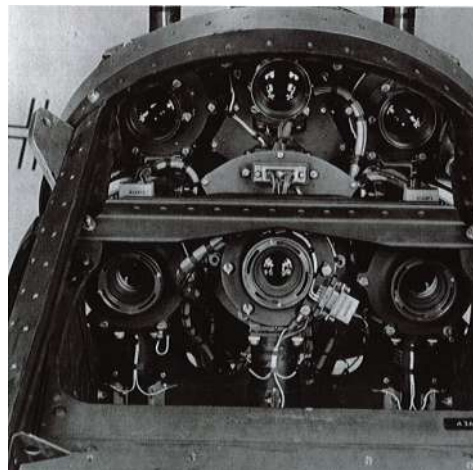


Fig. 14 Trois des six caméras embarquées à bord de Ranger 7 (partie inférieure de l'image) sont équipées de l'optique 25mm f/0,95 d'Angénieux. Les trois du haut sont équipées d'une optique 76mm f2 Super-Baltar B&L déjà utilisée sur Ranger 6

IMAGE : RCA

L'objectif 25 mm d'Angénieux d'ouverture F/0,95 est retenu. Il équipe trois des six caméras RCA embarquées. Avant de s'écraser sur la Lune le 31 juillet 1964, les caméras et optiques de Roger 7 parviennent à envoyer plus de 4300 clichés à la station terrestre. Le signal reçu est très perturbé par les émissions électromagnétiques du soleil. La NASA va numériser ces clichés et les traiter à l'aide d'un puissant ordinateur pour améliorer leur qualité. Cette opération représente une première dans le traitement numérique des images. Les images ainsi obtenues ont une résolution 1000 fois supérieure à celle prise par les télescopes terrestres et révèlent des informations capitales pour les missions qui vont suivre. Les optiques Angénieux sont à nouveau sélectionnées pour les missions Roger 8 et 9 qui atteignent aussi leurs objectifs. Elles ont participé à tous les succès du programme Ranger.

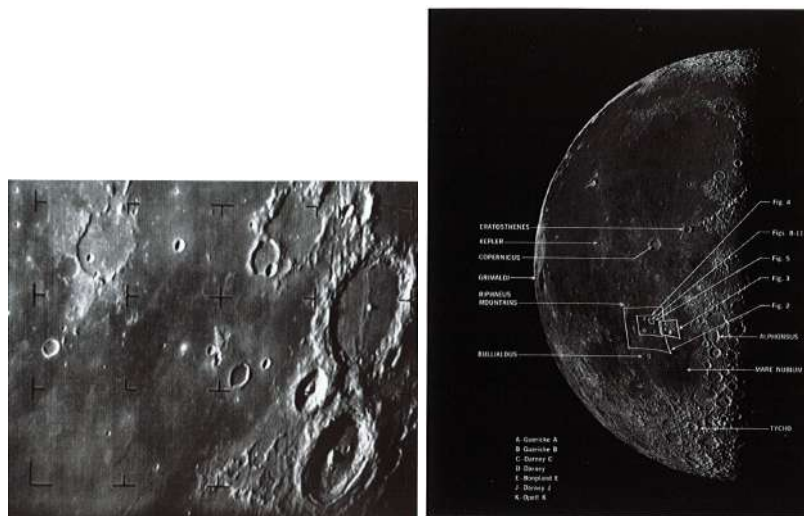


Fig. 15 & 16 Les premières images de la Lune prises par les optiques Angénieux 25mm le 31 juillet 1964
 IMAGE : NASA

Lorsque le programme Mercury s'achève en 1963, des aspects importants du vol spatial nécessaires pour mener à bien les vols lunaires ne sont toujours pas maîtrisés. Les dirigeants de la NASA lancent alors le programme Gemini bien avant la mise au point du vaisseau très sophistiqué de la mission lunaire. Une douzaine de capsules sont lancées entre avril 1964 et novembre 1966. Ce programme intermédiaire doit remplir trois objectifs : maîtriser les techniques de localisation, manœuvre et rendez-vous spatial, acquérir la maîtrise du travail dans l'espace en cours de sortie extravéhiculaire, étudier les conséquences de la pesanteur sur la physiologie humaine au cours du vol de longue durée. Dans ces capsules, sont embarquées des caméras 16 mm Maurer pour filmer le comportement de l'équipage en apesanteur et en situation de pilotage. Les objectifs 25 mm F/0,95 18 mm F/2 et 75 mm F/2,5 Angénieux font partie des équipements sélectionnés pour cette caméra. L'objectif 25 mm filmiera notamment l'éclipse solaire observée depuis la capsule Gemini 19. À l'issue du programme Gemini, les États-Unis ont rattrapé le retard sur l'URSS.

Premier équipement Angénieux sélectionné par la NASA, l'objectif fixe grand angle et ultra lumineux 25 mm F/0,95 est présent dès 1964 sur les missions Ranger 7, 8 et 9, les trois missions abouties du programme Ranger. Ces objectifs rapportent, le 31 juillet 1964, les

premières photos de la lune. Les missions Gemini, lancées après 1964, embarquent des caméras Maurer 16 mm équipées des optiques fixes de 18 mm F/2 25 mm F/0,95 75 mm F/2,5. Ces optiques continueront à équiper les caméras Maurer sur les missions Apollo 7, 8, 9, 10 et 11 qui renvoie au monde les images de Neil Armstrong posant le premier pas de l'homme sur la Lune.



*Fig. 17 Zoom Angénieux NASA 6x12,5 n°1002
IMAGE : NASA*

Le zoom cinéma 6x d'Angénieux est adapté pour les missions de la NASA. Le $6 \times 12,5$ est l'équipement choisi pour la caméra tube RCA noir et blanc sur Apollo un en 1967. Cet objectif équipera également la caméra couleur RCA des véhicules lunaires sur les missions Apollo 15 16 et 17 : le zoom 6×25 et l'objectif d'Angénieux le plus souvent sélectionné par la NASA. Il a participé à un très grand nombre de missions Apollo. Il est à bord du module de commande des missions Apollo 10/11/12/13/14/15/16 et 17 ainsi que du module lunaire des missions Apollo 12 13 et 14.

Sur les missions suivantes, les retransmissions sur le sol lunaire se font à partir du Rover lunaire. Il est aussi présent sur la rampe de lancement de la fusée Saturne V sur Apollo 13. Le 6×25 est encore présent sur les caméras Westinghouse embarquées sur le Skylab, la première station spatiale américaine lancée en mai 1973. Il est aussi partie prenante du projet Apollo Soyouz en 1975. Les premiers 6×25 sont en réalité des $6 \times 12,5$ doté d'un multiplicateur 2x. Ces objectifs ont des bagues de zoom gravées de 12,5 à 75. Entre 1969 et 1970, pour répondre aux besoins de la NASA, Jacques Debize redessine l'arrière du 6x pour en faire un 6×25 plus court afin de limiter le risque de choc avec le casque des astronautes. Cette nouvelle version sort en juillet 1970.



*Fig. 18 Zoom Angénieux NASA 6x25 B n°1266082
IMAGE : Angénieux*



*Fig. 19 Caméra film 16mm Maurer et optique fixe Angénieux 75mm f/2,5
IMAGE : NASA*

Les bagues de zoom sont alors gravées de 25 à 150. Pour répondre aux conditions de vie propres à l'environnement spatial, Angénieux a su élaborer un principe de lubrification de la mécanique, la graisse usuelle dégazant dans le vide et vaporisant sur les verres.

De nouveaux traitements optiques ont été développés contre le rayonnement solaire. Au début des années 1980, Angénieux conçoit un 3×8 , puis 10 ans plus tard un $15 \times 8,5$ pour les caméras RCA embarquées sur les navettes spatiales américaines entre 1981 et 2011. Le 3×8 est placé à l'intérieur de l'habitacle des navettes, il est aussi utilisé pour retransmettre en direct les expériences du Space lab. Le $15 \times 8,3$ équipe les caméras noir et blanc intensifiées de la soute. Après l'explosion de Columbia en 2003, une de ces caméras est placée sur le bras canadien destiné à inspecter les huiles thermiques en mission. Ce bras est aujourd'hui utilisé sur l'ISS, la station spatiale internationale. En 2005 encore, Angénieux est sollicité pour la réalisation de quatre objectifs fixes 150mm destinés à la Mission Dawn de la NASA chargée de l'exploration de Vesta et Cérès, entre Mars et Jupiter. La mission Dawn a pris fin le 1er novembre 2018²³.

Le choix des équipements de prise d'image : un enjeu stratégique de communication

Dès 1961, la NASA lance pour ses missions Apollo un appel d'offres aux fabricants de caméras de télévision pour permettre aux téléspectateurs du monde entier de suivre en direct l'exploit des astronautes américains. Les contraintes pour ces caméras sont nombreuses. La NASA souhaite une caméra de petite taille, fiable dans l'environnement lunaire, peu consommatrice d'énergie et facilement opérable par les astronautes. RCA conçoit une petite caméra portable noir et blanc appelée Block 1 pour le module de commande et choisit, pour Apollo 1, d'équiper cette caméra d'un kit de deux optiques : une optique grand-angle à focale fixe fournie par Taylor Hobson pour les images de l'intérieur du module (phase de décollage et phase de vol) et un zoom Angénieux $6 \times 12,5$ équipé d'une lunette pour montrer soit l'activité de l'équipage à l'intérieur du module soit à l'extérieur à travers le hublot.

Après l'incendie au sol d'Apollo 1, la NASA se concentre sur la fiabilité du projet, la retransmission d'images télévisées devenant secondaire voir problématique du fait du poids

²³ <https://blog.angenieux.com/apollo-11-mission-destination-moon-for-ang%C3%A9nieux->

supplémentaire à embarquer. Les missions habitées reprennent avec Apollo 7. Les caméras noir et blanc RCA et Maurer sont sélectionnées pour les missions Apollo 7, 8 et 9. Sur ces missions, la caméra RCA est simplifiée (Block 2). Elle n'est plus équipée que de focales fixes des optiques américaines Fair Child et Argus Optics. Les caméras Maurer sont placées à bord du module de commande. Elles sont équipées des optiques fixes françaises 18, 25 mm ou 75 mm Angénieux. L'aventure spatiale continue pour la marque.

Les images couleur arrivent sur Apollo 10, le fabricant Westinghouse va intégrer le projet lunaire de la NASA et remplacer RCA. Westinghouse a en effet développé une nouvelle caméra couleur utilisant un seul tube SEC - Secondary Electron Conduction, développé à l'origine pour l'armée américaine. Ce tube est plus sensible que celui des caméras précédentes et permet de prolonger les retransmissions d'images télévisées du matin au soir lunaires et d'avoir une meilleure vision dans les zones d'ombre autour du module lunaire. Cette caméra est équipée d'une roue à filtre placée devant le tube permettant de sélectionner les couleurs rouge, vert et bleu. Ce système appelé Field Sequential avait été développé par la chaîne de télévision américaine CBS dans les années 40. Il permet d'avoir une caméra plus compacte et moins consommatrice d'énergie que les caméras couleur traditionnelles à 3 tubes.

Un problème demeure : le signal TV doit être recomposé pour être compatible avec le signal NTSC utilisé pour les transmissions de la télévision américaine. La NASA va alors utiliser un système de double enregistreur/lecteur magnétique couplés entre eux, l'un écrivant sur la bande magnétique à partir du signal provenant de la caméra, l'autre le lisant et le convertissant au format NTSC de la télévision couleur américaine. Pour faciliter l'usage de cette caméra, Westinghouse l'équipe d'un moniteur portable et d'un zoom Angénieux de rapport six fois (6×25 , f/4,4) adapté du zoom cinéma 16 mm. Cette adaptation est nécessaire pour couvrir la zone sensible du tube de 25 mm de diagonale. Les premiers essais de la caméra couleur Westinghouse équipée d'un zoom Angénieux 6×25 sur Apollo 10 ans en mai 1969 sont un succès. L'équipement fournit les premières images filmées en couleurs de l'équipage et de la lune.

Pour Apollo 11, la NASA décide cependant de tourner en direct les premiers pas de l'homme sur la Lune depuis le module lunaire avec une caméra Westinghouse noir et blanc équipée d'optique Fairchild pour limiter les risques de problème de transmission. La caméra couleur équipée du 6×25 reste dans le module de commande et prend en direct des images en couleur des astronautes Neil Armstrong et Buzz Aldrin dans leur voyage vers et depuis la lune. Une caméra Mauer 16 mm équipée d'une optique Angénieux 75 mm est également à bord du module de commande prenant depuis un hublot des images de la manœuvre de séparation et démarrage du module lunaire.

Sur Apollo 12, la caméra couleur Westinghouse est cette fois embarquée à bord du module lunaire. Pour résister à l'environnement le zoom 6×25 et la caméra sont revêtues d'une autre couleur que le blanc, et les pièces plastiques sont remplacées par des pièces en aluminium. La caméra est d'abord placée dans le compartiment de stockage d'équipements sur le côté du module lunaire permettant ainsi de filmer la descente des astronautes de l'échelle avant d'être

posée sur le sol lunaire. Au moment de déployer la caméra, Charles Conrad va la pointer accidentellement face au soleil endommageant le tube et la rendant inutilisable pour la suite de la mission.

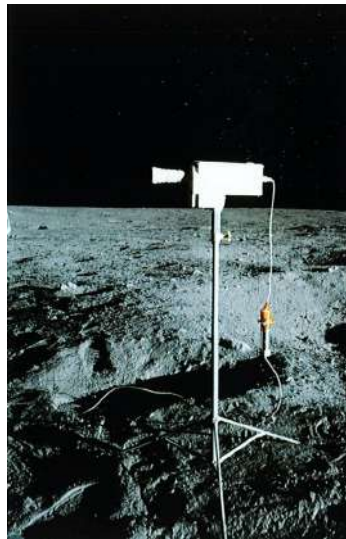


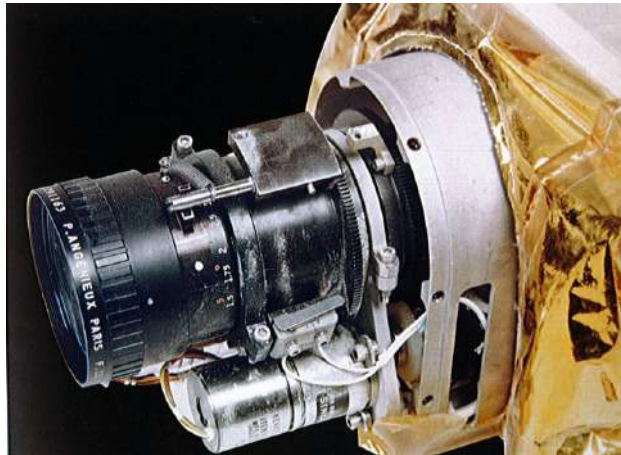
Fig. 20 La caméra Westinghouse équipée d'un zoom 6x25 Angénieux, protégée dans un caisson aluminium, est placée sur le côté du module lunaire et permet de filmer la sortie de Charles Conrad du module lunaire. Elle est ensuite déplacée sur le sol lunaire.

IMAGE : NASA

Après cet incident, Westinghouse améliore la caméra lunaire d'Apollo 13 en intégrant des interrupteurs permettant de déconnecter le tube lorsque la caméra est en marche et en ajoutant un bouchon sur l'objectif de cette caméra. Cela permet de tourner de belles images en direct du voyage de la lune. Malheureusement une panne oblige le module à rebrousser chemin avant d'atteindre son objectif. Pour Apollo 13, la NASA va également placer une caméra couleur Westinghouse toujours équipée du zoom 6×25 Angénieux sur le haut du pas de tir de la fusée Saturne V afin de filmer de près son décollage en direct. La caméra est installée dans un caisson de protection limitant l'échauffement lors du lancement. Après l'échec d'Apollo 13, la mission Apollo 14 est un succès et atteint la lune. Le zoom 6×25 Angénieux équipe une caméra Westinghouse installée dans le module lunaire. La première retransmission en couleur d'images des astronautes en activité sur le sol lunaire à proximité du module a lieu. Cet équipement de captation restera inchangé sur les missions Apollo suivantes.

Afin d'explorer plus en détail la Lune, la NASA conçoit un petit véhicule tout-terrain permettant aux astronautes de s'éloigner de la capsule lunaire. Ce véhicule, appelé Rover, est utilisé sur les missions Apollo 15, 16 et 17. RCA revient sur le programme Apollo en fournissant la caméra Ground Command Television Assembly du Rover. C'est encore le zoom Angénieux $6 \times 12,5$ muni d'un doubleur de focale qui va équiper cette caméra. Celui-ci est motorisé et contrôlé à distance depuis la Terre. Les téléspectateurs du monde entier peuvent suivre une nouvelle fois en direct les différentes expéditions des astronautes sur le

sol lunaire. À la fin de chaque mission, le Rover est laissé sur la Lune à quelques centaines de mètres du module lunaire pour retransmettre en direct son décollage.



*Fig. 21 Le zoom 6x12,5 intégré au système de prise de vues du Rover lunaire
IMAGE : NASA*

« En 1970 la NASA, dont le directeur est Monsieur Van Braun, décide de réaliser le programme Skylab. Ce dernier consiste à satelliser autour de la Terre un laboratoire spatial qui doit recevoir trois équipages de trois hommes sur une durée totale de neuf mois. Devant l'importance de cette mission, la NASA décide de vendre les droits de retransmission à des chaînes de télévision. Comme précédemment la NASA s'adresse à Angénieux pour étudier un Angénieux Zoom destiné à équiper Skylab. Les spécifications définies par la NASA sont drastiques : vibrations, chocs mécaniques, chocs thermiques, températures de - 80 °C à + 100 °C, consommation, etc. Malgré ces exigences, Angénieux relève le défi. Devant l'impact financier de cette retransmission, la NASA décide d'envoyer à Saint-Héand Monsieur Bauknecht sur la responsabilité immédiate de Monsieur Von Braun pour vérifier les capacités des Ets Angénieux à respecter les spécifications. C'est avec un grand honneur que nous avons reçu sa visite à St Heand en octobre 1972. »²⁴

Angénieux au cœur des projets Skylab et Apollo-Soyouz.

Faute de budget, les trois missions Apollo 18 19 et 20 sont annulées. L'aventure lunaire de la NASA prend fin. Mais les six missions abouties d'Apollo rapporteront de la lune plus de 300 kg d'échantillons de roche et de poussière. La durée totale du séjour des astronautes américains sur la Lune s'élèvera à 300 heures. Une fois les missions Apollo terminées, les caméras couleur Westinghouse équipées de zoom 6 × 25 Angénieux sont embarquées sur le projet Skylab. Skylab (Sky Laboratory) est la première station spatiale lancée par la NASA. Elle est mise en orbite le 14 mai 1973. Et en 1974, une autre caméra est équipée d'un 6 × 25 Angénieux motorisé, monté sur le bras articulé situé à l'extérieur de la station qui peut être

²⁴ Citation de René Michalet, ingénieur chez Angénieux, dans le livre *Angénieux et le cinéma : de la lumière à l'image* (2019), p.146

actionné à distance depuis l'intérieur de la station. Elle fournit les images des astronautes lors de leur sortie dans l'espace. La station Skylab, endommagée lors de son lancement, se désintègre en rentrant dans l'atmosphère le 11 juillet 1979.

Les zooms Angénieux 6 × 25 sur une caméra Westinghouse seront encore utilisés sur le projet Apollo - Soyouz en 1975. Apollo - Soyouz est la première mission spatiale conjointe entre l'Union soviétique et les États-Unis après qu'ils se soient affrontés pendant la guerre froide dans la course à la Lune.

Bernard Angénieux en témoigne :

« Pour la mission Soyouz, j'étais à une exposition à Moscou et on m'a demandé si Angénieux pouvait fournir assez rapidement un objectif dont on avait donné les caractéristiques. Il fallait téléphoner à l'usine tout de suite, l'affaire s'est faite et lorsqu'elle a été conclue je leur ai demandé pourquoi une telle urgence. Ils m'ont répondu "écoutez c'est pour l'arrimage de Apollo et de Soyouz. Le vaisseau Soyouz aura cet objectif à bord. Le vaisseau Apollo américain de son côté avait aussi un objectif Angénieux. Nos objectifs se sont retrouvés dans l'espace »²⁵

Les zooms 3 × 8,2 et 15 × 8,5 équipent la navette spatiale américaine

Au début des années 1980, le climat entre URSS et les États-Unis s'apaise. Le président Richard Nixon et le Congrès américain refusent de prolonger l'effort financier consenti pour le programme Apollo. La NASA plaide pour un programme spatial habité ambitieux, mais doit se contenter du projet de navette spatiale, un engin réutilisable dont l'objectif est de baisser fortement le coût des mises en orbite. Son développement plus long que prévu va se prolonger jusqu'au début de la décennie suivante. Columbia, première des six navettes spatiales, effectue son premier vol le 12 avril 1981. Suite au succès des retransmissions télévisées sur Apollo puis sur Skylab, la télévision s'invite naturellement sur le projet de navette spatiale. C'est avec RCA que la NASA choisit cette fois de travailler. Pour RCA, Angénieux va concevoir un zoom grand-angle 3 × 8,2 couvrant un champ image de 16 mm de diagonale. Cet objectif est équipé d'un système "Iris large dynamic" afin d'éviter les surexpositions du tube de la caméra liées au passage du soleil dans le champ de l'optique. Angénieux fournit en total une vingtaine de ces objectifs. Ils vont équiper les caméras couleur CTVC placées dans le compartiment où séjourne l'équipage.

Ils sont aussi montés sur les caméras vidéo présentes dans le laboratoire Spacelab de l'ESA embarqué dans les navettes spatiales. Sur Terre, chacun peut ainsi suivre les expériences réalisées par les astronautes en apesanteur. Vers la fin des années 1980, les caméras à tubes sont remplacées par des caméras avec capteur CCD qui seront alors équipées d'objectifs concurrents. En 1990 la NASA décide d'améliorer la qualité et la sensibilité des caméras noir et blanc placées dans la soute. Ces caméras, appelées ITVC (Intensified Television Camera), sont développées par GE Astro, nouveau nom de RCA Astro Electronics.

²⁵ Citation de Bernard Angénieux, dans le livre *Angénieux et le cinéma : de la lumière à l'image* (2019), p.149

Elles peuvent fournir une image dans un environnement à bas niveau de lumière (jusqu'à 0,03 lux), car elles sont équipées d'un système intensificateur optique (système à fibre optique placé devant le CCD). Angénieux est à nouveau sollicité pour développer un Zoom adapté au capteur de ses nouvelles caméras et propose un Zoom 15 × 8,5 réalisé à partir d'un 15 × 6 pour le cinéma 8 mm. Les lentilles de cet objectif ont un traitement spécifique pouvant laisser passer le proche infrarouge. Les premiers 15 × 8,5 sont utilisés sur la navette Columbia lancée le 20 juin 1996. Le nombre de caméras ITVC varie suivant les missions. Il y avait en général au minimum une caméra ITVC à chacun des quatre coins de la soute. Après l'explosion en vol de la navette Columbia en février 2003, la NASA conçoit un bras équipé d'une tête d'analyses caméra ITVC + zoom Angénieux + système d'analyse au laser permettant d'inspecter l'étui de protection thermique de la navette une fois dans l'espace. Lors de la dernière mission de la navette spatiale américaine, ce bras est transféré sur l'ISS où il est encore utilisé pour des opérations de maintenance. Entre avril 1981 et juillet 2011, la navette spatiale américaine a effectué 135 vols.

2018 : Angénieux est à bord de la sonde spatiale Dawn.

Dawn est la neuvième mission du programme Discovery de la NASA. Ce programme lancé dès le début des années 90 a pour objectif l'étude de l'astéroïde Vesta et de la planète naine Cérès. Ces deux protoplanètes, témoins de la genèse du système solaire situées dans la ceinture d'astéroïdes entre Mars et Jupiter, ont des caractéristiques qui n'ont pratiquement pas changé depuis leur formation il y a 4,6 milliards d'années. Lancée en septembre 2007, la sonde Dawn a survolé Mars en février 2009 et Vesta en juillet 2011, qu'elle a étudiée pendant un an, puis Cérès en février 2015.

Ces photographies sont le résultat des optiques fixes 150 mm Angénieux fournies en 2005 à la société allemande Kayser Threde pour le compte de l'institut Max Planck qui a la charge du sous-ensemble supérieur "Framing Camera" de la sonde. Ces objectifs, quatre en totalité dont deux sont destinés à intégrer le système, les deux autres servant en phase de test de préparation, ont dû répondre à un cahier des charges très exigeant : résister pendant plus de 10 ans à des conditions thermiques extrêmes allant de -50 °C jusqu'à +40 °C, aux radiations solaires, aux conditions spatiales du vide, aux vibrations lors du décollage notamment. Les objectifs Angénieux, grâce aux procédés d'athermalisation, peuvent assurer une parfaite netteté d'image, quelles que soient les conditions de température. Des verres spécifiques spécialement traités ont été utilisés contre les rayons gamma. Le corps de ces objectifs conçus en titane assure la meilleure résistance aux vibrations.

Les objectifs Angénieux ont ainsi pu délivrer au monde de nouveaux détails inattendus de cette petite planète qui intéresse au plus haut point. Les chercheurs de la NASA supposent qu'elle abrite de la glace dans son sous-sol ainsi que des molécules organiques, les conditions idéales pour préserver les traces de vie. Les réserves d'hydrazine du système de propulsion électrique de la sonde s'étant épuisées, la mission Dawn a pris officiellement fin le 1er novembre 2018. Après une odyssée de onze années dans l'espace, la sonde devrait rester des décennies en orbite autour de Cérès.



*Fig. 22 Les images prises par la sonde spatiale Dawn mettent en évidence deux étranges points brillants à la surface de Cérès. Image prise le 25 juin 2015
IMAGE : NASA/JPL/CALTECH/UCLA/MPS/DLR/IDA*

L'activité spéciale de Angénieux ne se limite cependant pas à la NASA. En février 1986 est mis sur orbite le satellite d'observation terrestre développé par le Centre National d'Etudes Spatiales CNES SPOT 1 pour lequel Angénieux réalise le système de séparateur de faisceau (composants optiques utilisés pour séparer la lumière incidente en deux faisceaux distincts selon un rapport déterminé, ou pour rassembler deux faisceaux distincts en un seul). Angénieux fournit tous les systèmes de séparateur de faisceau des satellites Spot 1 à Spot 5. Spot 5 restera en activité jusqu'en 2015. Les images prises par les satellites Spot donnent des informations particulièrement utiles à l'agriculture et à la cartographie. En parallèle des programmes Spot 4 et Spot 5, la technologie Angénieux est également présente sur les quatre satellites de reconnaissance français des programmes Helios 1 et Hélios 2 lancés respectivement en 1995 et 1999, et en 2004 et 2009. En 2018 les deux satellites Helios sont encore opérationnels.

Dans cette première partie, j'ai vu comment les techniques et technologies pour obtenir des images de l'espace ont évolué et comment cette évolution s'est traduite dans le rendu de ces images grâce notamment à l'apport des optiques Angénieux. Les évolutions scientifiques de la deuxième partie du 20ème siècle ont permis de dépasser les limites de l'exploration spatiale, avec l'apparition de sondes notamment, ayant pour but d'explorer le système solaire et au-delà. Avec ces nouvelles technologies apparaissent de nouvelles esthétiques d'image spatiales.

Dans la deuxième partie, je vais me consacrer aux prises de vue spatiales par les sondes pour arriver aux images récentes de l'espace.

DEUXIÈME PARTIE. SONDER L'UNIVERS.

CHAPITRE 1. IMAGES DANS LE SYSTÈME SOLAIRE

Les premières images de Mars par la sonde Mariner 4

En 1964, Mariner 4 était la première sonde à effectuer un vol rapproché de Mars et à en capturer de gros plans. Contrairement à Luna 3, pour capturer les images de la surface martienne, Mariner 4 utilisait une technologie analogique appelée « slow scan vidicon tv tube ». Le signal analogique sortant de ce tube était ensuite converti au format numérique puis stocké sur un enregistreur à bande magnétique, c'est-à-dire l'ancêtre de nos disques durs actuels. Une fois les prises de vues effectuées, elles étaient rejouées à partir de l'enregistreur et envoyées sur Terre pour être traitées au JPL (Jet Propulsion Laboratory)²⁶.

En 1964, le traitement de ces images était un très long processus (plusieurs heures). Mais il fallait pouvoir sortir des images rapidement pour la presse – et les scientifiques voulaient prouver que l'opération était un succès, notamment après les échecs techniques de la mission précédente Mariner 3. Un membre de la NASA, Richard Dick Grumm, décida alors d'interpréter lui-même les données obtenues : à l'aide de crayons, il prit l'initiative de colorier des bandes de données qui s'affichaient sur le moniteur pendant le traitement. Ils peignaient différentes nuances de gris (densité) en fonction des chiffres affichés – et donc du niveau d'intensité de l'image (en fait, il peint à l'aide de crayons colorés pastels puisqu'il n'avait rien d'autre sous la main – la proximité avec la vraie couleur de Mars était un pur hasard dû au fait qu'il utilisa des crayons ocres, il souhaitait seulement avoir le plus de nuances possibles). Une sorte de « peinture aux numéros » qui d'une certaine manière, était la première « image » d'une autre planète depuis l'espace. L'esthétique de cette première image martienne a été conditionnée par la nécessité de communiquer rapidement les informations obtenues au grand public.



Fig. 23 & 24 Premier traitement colorimétrique d'une image de Mars, à la main
IMAGE : NASA / JPL LABORATORY

²⁶ https://d2pn8kiwq2w21t.cloudfront.net/documents/mariner_tgiyorI.pdf (pris sur le site du JPL de la NASA)

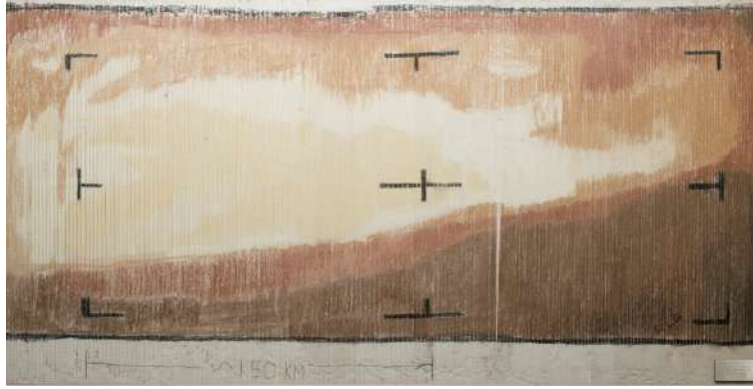
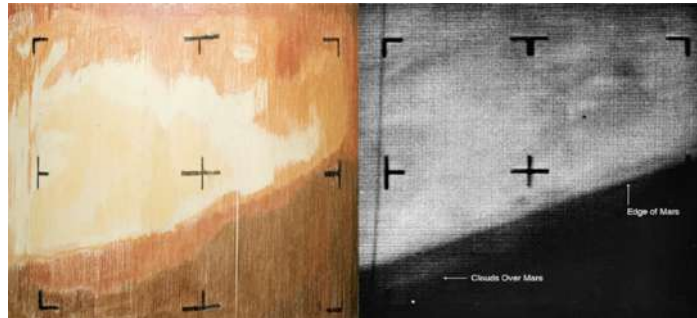


Fig. 25 IMAGE : NASA / JPL LABORATORY

Sur cette image, qui fut la première diffusée à la télévision, on voit le bord de la planète rouge. La partie foncée en bas est l'espace, la partie plus claire est la planète, et la bande orange entre les deux montre les nuages au-dessus de la surface de Mars.



Comparaison du traitement de l'image à la main (à gauche) et par l'ordinateur (à droite)

Fig. 26 IMAGE : NASA / JPL LABORATORY

Sur cette image, on peut voir à gauche l'interprétation en dessins des données par Richard Grumm, et à droite l'image finale, très similaire.

Les premières images de la surface de Vénus avec les sondes Venera

En 1975, les Soviétiques deviennent les premiers à photographier avec succès la surface d'une autre planète, Vénus, lors de la mission Verena ²⁷. Lors de son orbite, Vénus est plus proche de la Terre que Mars. Pour cela, et pour pallier aux restrictions budgétaires et aux problèmes de navigations qu'ils rencontraient, les Soviétiques décidèrent de faire de Vénus leur priorité. Et parvenir à se poser sur la surface de Vénus était un vrai défi, bien plus difficile que de se poser sur Mars, notamment à cause de la pression atmosphérique (90 fois plus grande que celle de la Terre, et une température de 485°)²⁸.

²⁷ http://mentallandscape.com/V_Cameras.htm#Venera9

http://mentallandscape.com/V_Lavochkin2.htm

http://mentallandscape.com/C_CatalogVenus.htm

²⁸ <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1975-050D>

De l'espace, la surface de Vénus est complètement obstruée par une épaisse couche de nuages. Arrivée à destination, la sonde se divise en deux parties, l'une reste en orbite (orbiteur) et l'autre descend se poser sur la surface prendre des images (atterrisseur). Ainsi, une fois l'atmosphère traversée et l'atterrisseur posé sur le sol, les images capturées permirent d'y voir plus clair. Ces images donnent à voir une luminosité proche de celle d'un jour d'été légèrement couvert sur Terre, avec une bonne visibilité, peu de poussière dans l'atmosphère, et de la roche jonchant le sol.

Pour renvoyer les images sur Terre, l'atterrisseur utilisa la partie de l'engin restée en orbite (qui avait transporté l'atterrisseur) comme relai. C'était d'ailleurs le premier appareil à orbiter Vénus. L'atterrisseur avait deux caméras pouvant filmer à 180 degrés, ce qui aurait pu permettre une prise de vue à 360 degrés, mais le cache d'une des deux optiques ne s'est pas détaché comme prévu à l'atterrissage... Les caméras étaient des appareils photographiques qui scannent l'environnement de Vénus se reflétant sur des miroirs mobiles. Chaque caméra disposait d'un capteur de 500 par 128 pixels (soit environ 65000 pixels).

L'atterrisseur survécut 53 minutes aux conditions de la surface de Vénus, et la communication des données fut de toute façon interrompue prématurément, car l'orbiteur avait bougé hors du champ de communication avec l'atterrisseur.

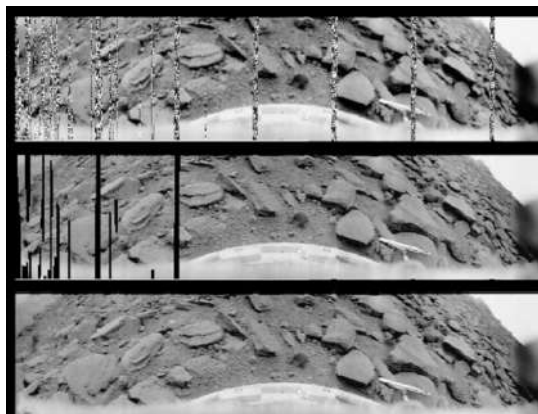


Fig. 27 IMAGE : MISSION VENERA / ROSCOSMOS

Enjeux des prises de vues spatiales par des sondes éloignées de la Terre

Comme on l'a vu, prendre des images d'une planète située à des centaines de millions ou milliards de kilomètres de la Terre pose quelques problèmes. Par exemple, il faut prendre en compte la faible quantité de lumière du soleil en certains points de l'univers. Il y a à peu près 1000 fois moins de quantité de lumière du soleil au niveau de Pluton qu'ici sur Terre. En guise de comparaison, lorsque le soleil est à son apogée dans le ciel de Pluton (comme à midi sur Terre), la quantité de lumière moyenne qui éclaire cette planète est comparée à ce que la NASA appelle le « Pluto Time » sur Terre : un moment de type crépuscule ou aube, où les phares d'une voiture doivent être allumés.

Il est encore plus difficile de capturer des images d'un astéroïde, puisque ce sont souvent des corps noirs comme du charbon, qui voyagent à une grande vitesse dans l'espace peu éclairé.

Par conséquent, il faut que les images soient exposées suffisamment longtemps pour être lisibles. Mais se pose ensuite le problème de la vitesse de déplacement de l'objet filmé. Par exemple, la sonde New Horizons, qui étudie et photographie Pluton depuis 2015, voyage à 16,2 km/s, environ 60000 km/h, ce qui créerait du flou de mouvement si la caméra n'était pas capable de tracker avec une immense précision l'objet filmé. À cela s'ajoute la difficulté de commander à distance une sonde si éloignée de la Terre, puisqu'un signal radio envoyé de la Terre met environ 4h30 à atteindre cette sonde, en voyageant pourtant à la vitesse de la lumière. Tout doit donc être pré-programmé et réglé à la seconde près, pour gérer correctement les réglages de position, vitesse, et exposition de la caméra sans avoir de flou de mouvement, et en ayant bel et bien l'objet dans le viseur. Tout ce processus est automatisé, et il faut attendre plusieurs jours avant de savoir si une image a été capturée avec succès ou non.

Il faut aussi prendre en compte les radiations présentes dans cet environnement, à la fois les rayons cosmiques de l'espace lointain, mais aussi les champs magnétiques autour des planètes.

Prenons l'exemple de Jupiter. Autour de cette immense planète, il y a des zones où l'intensité des radiations est très élevée – 10000 fois plus qu'autour de la Terre, dans la zone appelée la ceinture Van Allen par la NASA. Cela est dû notamment aux émissions volcaniques de ses anneaux et de sa lune Io.

Il faut donc adapter les caméras, notamment les composants électroniques, des appareils envoyés près de Jupiter.

C'est le cas pour l'orbiteur Juno Jupiter, actuellement en orbite autour de Jupiter, plus près de cette immense planète que n'importe quel autre appareil jamais conçu. Les caméras équipées sur cet engin ont été conçues avec un corps caméra endurci et protégeant des radiations, le tout étant ensuite inclus dans un coffre fait de parois en titane de 25mm d'épaisseur, permettant de réduire les radiations de 800 fois²⁹. Elles sont équipées d'un capteur CCD Kodak KAI-2020 monochrome avec une définition de 1600 par 1200 pixels, lui-même modifié et intégré dans un boîtier permettant d'encaisser les radiations malgré la durée prolongée de la mission.

Il y a deux caméras sur cette sonde, qui sont des versions modifiées des caméras à tube vidicon à balayage lent utilisées sur les missions Mariner précédemment évoquées. La première caméra possède un objectif « 200mm grand angle » d'assez basse résolution avec un diaphragme ouvrant à f3, tandis que l'autre est équipée d'une optique 1500mm « petit angle de champ » à plus haute résolution, ouvrant à f8.5. Une fois numérisées, la définition des images obtenues est de seulement 800 pixels par 800 pixels.

²⁹ <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-s-juno-spacecraft-to-risk-jupiter-s-fireworks-for-science>

Transmission des données vers la Terre

Sur la mission Voyager, les caméras pouvaient prendre jusqu'à 1800 clichés par jour, bien plus que ce que la sonde pouvait renvoyer sur Terre. Les données étaient donc stockées sur une bande magnétique (comme pour Mariner). Les données numériques étaient ensuite envoyées sur Terre à environ 7.2 kilobits par seconde (en étant au niveau de Jupiter). Chaque image pesant environ 5,2 mégabits de données, et ne pouvant être compressée que d'une manière très basique, le transfert d'une seule image pouvait prendre jusqu'à environ 12 minutes. Il fallait également compter une certaine quantité de données supplémentaires qui était envoyées au cas où il y aurait besoin de corrections à cause de pertes. Pour une journée de prises de vues, il fallait six jours de transfert de données vers la Terre. Quand Voyager s'éloignait de la Terre, vers les dernières planètes de notre système solaire, la bande-passante pour le transfert des données avait chuté à 160 bits par seconde, il fallait alors 9h pour une seule image, et 1,8 an pour 1800 images.

Même sur des engins spatiaux plus récents, le taux de transferts de données reste très faible par rapport à nos habitudes terrestres. Pour New Horizon (2015), depuis Pluton, le taux de transfert était de 2 kilobits par seconde (0,125 kilobytes³⁰). C'est pourquoi il faut environ un an pour récupérer toutes les données des images prises de Ultima Thule en décembre 2018.

Latence dans les technologies

Si ces engins à plusieurs milliards de dollars n'utilisent pas les dernières technologies de capteurs à plusieurs mégapixels, c'est parce que le critère principal retenu pour les technologies de prises de vue spatiales est la fiabilité avant tout. Les technologies utilisées ont fait leurs preuves, même si elles sont vieilles de plus d'une décennie. Une fois ces technologies sélectionnées, il faut compter plusieurs années pour construire et lancer les sondes. Par exemple, au lancement de New Horizon en 2006, les équipements de prise de vues dataient déjà d'environ 15 ans, et il fallait compter encore 9 ans avant que la sonde approche Pluton. Mais cette coutume de faire confiance aux technologies les plus fiables a fait ses preuves, si l'on prend pour exemple Voyager 1 & 2 qui sont toujours en fonctionnement depuis quasiment 50 ans. Intéressons-nous aux spécificités techniques de ces images spatiales.

³⁰ 1000 bytes, avec 1 byte communément associé à 8 bits

CHAPITRE 2. L'ACQUISITION DES IMAGES

Les capteurs CCD

Penchons-nous sur le fonctionnement des caméras numériques utilisées dans les télescopes. Toutes les caméras numériques fonctionnent à partir du même principe physique : l'effet photoélectrique. Un photon (particule de lumière) vient frapper une surface composée de silicium. L'atome de silicium est composé d'un noyau de protons et de neutrons et d'électrons tout autour. Lorsque le photon assez énergétique entre en contact avec l'atome de silicium, il peut être absorbé et transmettre à l'atome une énergie qui permet aux électrons de s'échapper. En mesurant la charge « sortante », on peut mesurer la quantité de photons qui a frappé la surface photosensible et ainsi obtenir une donnée sur la quantité de lumière incidente. En astronomie, les premières images étaient donc capturées sur des plaques contenant du silicium. Mais ces technologies limitaient l'usage scientifique des clichés puisque leur lecture était peu précise : mesurer le niveau de luminosité d'un objet ne pouvait se faire que relativement, par rapport aux autres objets présents sur l'image. Au milieu du 19e, les ingénieurs de la communauté scientifique mirent au point un détecteur numérique : le capteur CCD (pour Charged Coupled Devices)³¹.



Fig. 28 & 29 Willard Boyle & George E. Smith, ingénieurs ayant développé le CCD

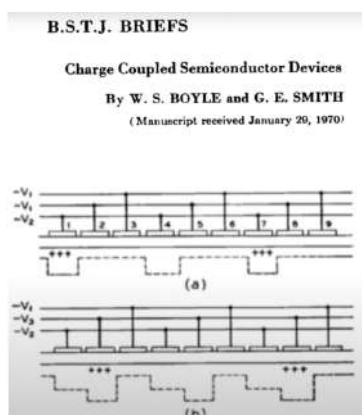


Fig. 30 Premier brevet pour le CCD

³¹ J.B. Williams, *The Electronics Revolution: Inventing the Future*, Springer, 25 mai 2017, p. 245.

Aujourd'hui, les caméras de prises de vues spatiales (télescopes) sont toujours équipées en CCD. En revanche, les caméras cinéma ont tendance à s'équiper de capteurs CMOS. Cela s'explique notamment par le faible coût de fabrication du CMOS et sa facilité d'industrialisation. Pour les caméras spatiales, il n'y a pas de notion d'industrialisation. De plus, la rapidité dans le transfert des données d'un capteur CMOS entraîne du bruit. Cela serait impossible à appliquer dans le spatial, où la lisibilité des images à des fins scientifiques est un critère majeur, et les données sont sacralisées. La technologie des capteurs CCD permet donc de traiter les pixels un par un, et ainsi de diminuer le bruit de l'image et d'augmenter la sensibilité de chaque pixel. L'image possède en revanche un temps important de traitement des données, mais l'instantanéité du rendu n'est pas recherchée. Contrairement aux caméras trichromes ou aux caméras numériques où les capteurs fonctionnent avec des matrices de Bayer, il est préférable, pour des raisons économiques et pratiques, que les télescopes possèdent un seul capteur, devant lequel sont placés des filtres qui permettent d'enregistrer différentes longueurs d'onde.

Une des phases du traitement de l'image consiste également à la nettoyer, pour enlever les sources de bruits du détecteur ou du télescope, ou des flares de lumière. Cela permet d'obtenir des images « réduites » (c'est-à-dire réduites de leur forme brute à une forme nettoyée). C'est après cette phase que les trois images noir et blanc correspondant aux lumières Rouge, Vert, et Bleu, sont teintées puis additionnées afin d'obtenir l'image colorée finale. Ces couleurs sont bien réelles, mais les sujets/objets filmés sont si loin et leur lueur si faible que nos yeux ne seraient jamais assez sensibles pour les détecter.

Niveau de lumière et exposition

Comment une caméra peut-elle obtenir une image correcte de Pluton (ou Saturne, Uranus, Mars, etc ...) quand les objets filmés sont si loin du soleil ? Si les comètes sont sombres, pourquoi ont-elles l'air blanches comme de la neige sur les images de l'espace ?

Les niveaux de lumière sur Terre sont variables. Pour qualifier ces niveaux scientifiquement on utilise les « lux ». 1 lux représente le niveau de luminosité d'1 bougie placée à 1 mètre de l'œil humain. Pour des environnements types qui nous sont familiers, on établit³² :

Lumière du soleil en direct	100 000 lux
Lumière du soleil un jour dégagé en indirect	10 000 lux
Jour couvert	1 000 lux
Crépuscule	10 lux
Pleine lune	0.1 lux
Nuit clair sans lune	0.001 lux

³² <https://www.tobelight.fr/blog-luminotherapie/info-unite-mesure-lumiere-lux/>

L'œil humain peut voir correctement pour des niveaux de luminosité allant de 10 à 10000 lux, et peut également voir à des niveaux de lumières bien plus faibles, mais sans couleurs.

Dans les environnements artificiels, c'est-à-dire même en intérieur, nous voyons une grande dynamique d'illumination. Une fenêtre ensoleillée avoisine les 1000 lux, les bureaux ou les supermarchés sont généralement éclairés entre 200 et 500 lux, les lieux de vie en intérieurs entre 20 et 50 lux ; les bars, cinémas, salles de spectacles entre 1 et 4 lux. Pour les mégapoles, le niveau d'éclairage recommandé pour les éclairages dans la rue la nuit est entre 3 et 30 lux.

En ayant ces repères en tête, de combien sont les niveaux d'éclairage sur les autres planètes ? La quantité de lumière provenant du soleil dépend bien sûr de la distance à laquelle on se trouve de cette étoile. Elle est proportionnelle au carré inverse de la distance (selon la loi du carré inverse de la distance). Mars se situe 1,5 fois plus loin du soleil que la Terre, donc la quantité de lumière perçue sur Mars par rapport à celle sur la Terre est de $1/(1,5^2)$ c'est-à-dire environ deux fois moins. Cela ne poserait pas vraiment de problèmes pour nos yeux, qui s'adaptent facilement à cette différence.

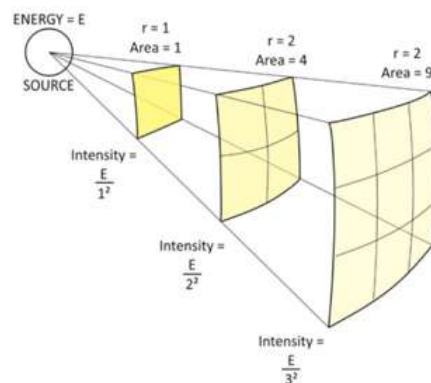
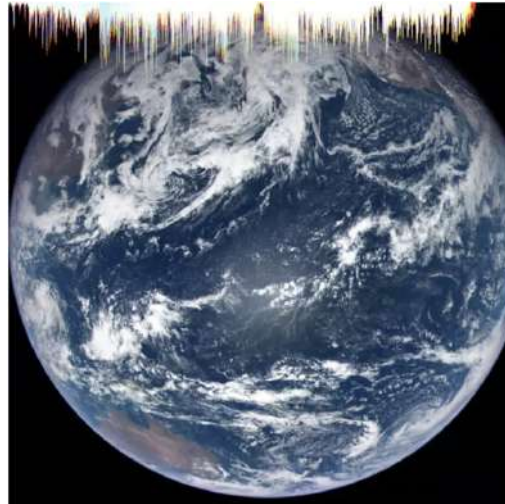


Fig. 31 Illustration du principe de la loi du carré inverse de la distance, pour calculer la quantité de lumière qui parvient d'une source à une surface sensible

Pluton se situe 30 fois plus loin du soleil que la Terre. L'illumination solaire correspond donc à environ 1/100 de celle de la Terre. L'illumination moyenne correspond à celle d'un crépuscule sur Terre. Ainsi, l'œil humain y verrait quand même relativement bien.

La plupart des caméras spatiales ont une ouverture F fixe. Cela est principalement dû à des contraintes ergonomiques permettant de simplifier l'appareil, d'autant qu'elles n'ont pas réellement besoin d'une ouverture variable. Ainsi, les scientifiques prédisent les quantités de lumière que la caméra rencontrera au cours de sa mission, et conçoivent les instruments afin qu'ils aient une ouverture fixe appropriée à la dynamique lumineuse des cibles qui seront rencontrées. Ceci représente un défi dans le cas où le vaisseau sera amené à rencontrer une grande variété de luminosité dans les cibles photographiées. On privilégie dans ces cas-là une cible « scientifique », qui est prioritaire, quitte à ce que les images « bonus » prises lors de la mission soient amoindries en qualité. La sonde OSIRIS-REx, équipée de la caméra MapCam

a été pensée pour étudier les couleurs de l'astéroïde Bennu (globalement très sombre). Elle ne peut pas photographier la Terre sans être dépassée par la lumière brillante se réfléchissant des nuages blancs, provoquant les artefacts que l'on peut voir sur la partie supérieure de l'image ci-dessous³³ :

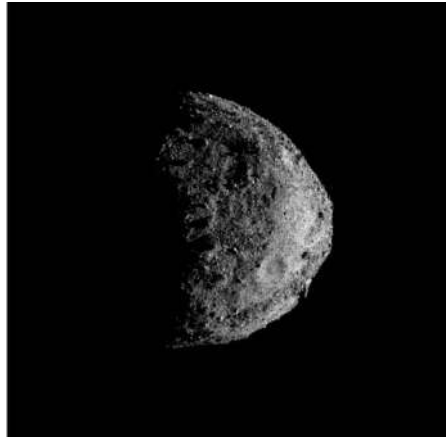


*Fig. 32 La Terre par la MapCam d'Osirix Rex, avec artefact
IMAGE : NASA / GSFC / UA / BJÖRN JONSSON*

La sonde OSIRIS-REx, avec sa caméra MAPCAM, a survolé la Terre le 22 septembre 2017, capturant cette image de l'océan Pacifique. Le soleil se situe directement derrière le vaisseau, et l'on peut voir une zone brillante au milieu de l'image de la réflexion du soleil dans l'eau. Cette image est une composite à partir de trois photos, par des filtres infrarouges, verts et bleus, avec un temps d'exposition de 1,5 millisecondes. L'utilisation d'un filtre rouge fait que les endroits qui devraient apparaître vert (les continents) apparaissent rouge. Les artefacts en haut de l'image sont causés par le temps d'exposition trop élevé pour une planète si brillante, qui cause la saturation du capteur.

Les images de la MAPCAM de l'astéroïde Bennu, qui en est la cible principale, sont correctes. Ci-dessus, une image de la face sud de Bennu prise le 17 décembre 2018. Elle a été prise par la MAPCAM d'OSIRIS REx lors d'une mission de reconnaissance. Cette image a un temps d'exposition de 9,3 millisecondes, et a été prise à une distance de 12 km lorsque le vaisseau s'éloignait de l'astéroïde.

³³ https://www.asteroidmission.org/ega_1ms_mapcam_color_corrected/



*Fig. 33 L'astéroïde Bennu par la MapCam d'Osirix Rex
IMAGE : NASA / GSFC / UA*

Pour augmenter la quantité de lumière capturée, l'ouverture du diaphragme (contrairement au cinéma), n'est pas le paramètre privilégié. On joue plutôt sur le temps d'exposition de l'image. Comme sur Terre, les temps d'exposition peuvent se mesurer en millisecondes, secondes ou minutes pour les cibles de plus faibles luminances. Selon les appareils, on trouve aussi bien des caméras à exposition automatique que des caméras à exposition manuelle déterminée par l'équipe qui contrôle l'engin spatial.

Il faut construire les caméras spatiales en fonction des quantités de lumière qu'elles seront amenées à rencontrer. Une caméra pensée pour les quantités de lumière que l'on trouve sur Jupiter ne conviendra pas si elle se trouve plus loin dans le Système solaire, par exemple au niveau de Neptune ou Uranus. Ainsi, les images de Voyager 2 de ces planètes sont de faible qualité. On peut aussi évoquer l'exemple de New Horizons, qui était calibrée pour de longs temps d'exposition³⁴. Ainsi, lorsqu'elle a volé au niveau de Jupiter, la majorité de ses images étaient surexposées, car même réglée sur ses temps d'exposition les plus courts, le capteur se retrouve submergé.



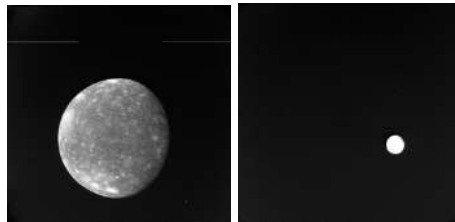
*Fig. 34 À gauche, image surexposée d'Hyperion par Cassini / IMAGE : NASA/JPL/SSI
Fig. 35 À droite image sous-exposée de Puck par Voyager / IMAGE : NASA / JPL*

³⁴

<https://www.spaceflightinsider.com/missions/solar-system/new-horizons-lorri-captures-details-on-ultima-thules-surface/> et <https://arxiv.org/pdf/0709.4278.pdf>

Adapter la caméra (en termes de temps d'exposition principalement) à l'objet filmé permet d'obtenir des images avec un écart dans la valeur des pixels qui est la même qu'il s'agisse de Pluton ou Jupiter, bien que le niveau de lumière de ces deux planètes soit largement différent.

Le niveau d'éclairement perçu n'est pas le seul paramètre à prendre en compte dans l'exposition correcte d'une image spatiale. Comparons ces images :



*Fig. 36 & 37 Callisto et Io par Voyager
IMAGE : Voyager, NASA*

Ces images ont été prises par Voyager avec le même temps d'exposition, mais il s'agit de différentes cibles. On remarque que la deuxième image (Io, satellite de Jupiter) est surexposée, tandis que la première (Callisto, satellite de Jupiter) ne l'est pas, bien qu'ils se situent à la même distance du soleil et que l'image a été faite avec la même exposition³⁵.

Objet	Eclairement	Temps d'exposition
Callisto (Jupiter)	3700 lux	960 ms
Io (Jupiter)	3700 lux	960 ms

Quelques autres images références :



*Fig. 38 1ère image : Titania (Uranus) à 280 lux et 1440 ms
Fig. 39 2ème image : Europa (Jupiter) à 3700 lux et 120 ms*

³⁵ https://nssdc.gsfc.nasa.gov/imgcat/html/object_page/vg2_p21740.html et <https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA00379>

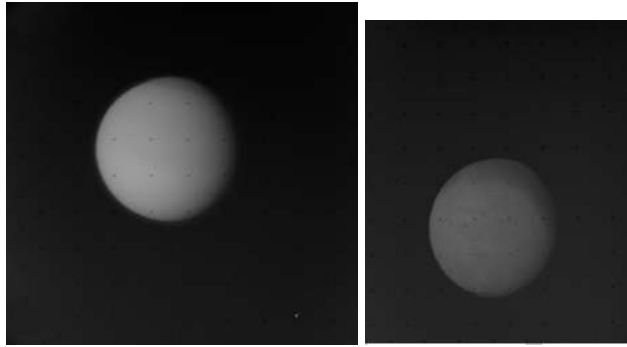


Fig. 40 3ème image : Titan (Saturne) à 1100 lux et 1920 ms

Fig. 41 4ème image : Triton (Neptune) à 100 lux et 960 ms

IMAGE : Voyager, NASA

L'albédo

Un autre paramètre à prendre à compte est le facteur de réflectance de la surface des corps photographiés (l'Albédo) : on sait que de la neige fraîchement tombée reflète 100% de la lumière visible qui l'éclaire, tandis que l'asphalte n'en reflète que quelques %. La matière artificielle la plus noire, le Vantablack, reflète moins de 1% de la lumière qui l'éclaire. Sur les images spatiales, la Terre a un albédo moyen de 30%. Celui de la lune est bien plus faible, entre 8 et 15%. Pour observer ce contraste, il est nécessaire de capturer la Terre et la Lune sur une seule image.



Fig. 42 La Terre et la Lune

IMAGE : Chang'e (orbiteur chinois)

Même avec un albédo faible, un objet noir sur un fond noir peut apparaître blanc dans une image. C'est le cas du noyau de la comète Churyumov-Gerasimenko.

Si les scientifiques veulent connaître l'albédo d'un objet photographié à partir d'une image, ils ont la possibilité de passer l'image dans un processeur qui transforme la valeur des données

en « facteur de radiance », où la valeur de chaque pixel est proportionnelle au ratio de la lumière reçue par rapport à la lumière renvoyée.

Dans la lignée de ces questions sur l'exposition et la lumière des images spatiales, on peut se demander pourquoi il n'y a quasiment jamais d'étoiles sur les images de l'espace ? En réalité, les étoiles sont bien présentes sur les images de l'espace. Elles sont juste trop faibles en luminosité pour apparaître. On choisit d'exposer pour une cible particulière, et la luminance de cette cible est quasi systématiquement bien au-delà de celles des étoiles. C'est comme pour la photographie terrestre : faire apparaître des étoiles dans une image nécessite de très longues pauses, allant jusqu'à plusieurs minutes.



Fig. 43 Les photographies d'Apollo étaient exposées pour la surface de la lune, très lumineuse, et les tenues blanches des astronautes. Les temps d'exposition étaient bien trop courts pour détecter les étoiles dans le ciel

IMAGE : NASA

Les caméras spatiales offrent un grand choix de latitude d'exposition. La caméra LORRI de la sonde New Horizon peut prendre des images avec des temps d'exposition allant de 1 milliseconde à 30 secondes³⁶. Les temps d'exposition les plus courts permettent de capturer des images de Jupiter, bien plus proche du soleil et donc lumineuse que Pluton. Les temps d'exposition les plus longs étaient réservés aux cibles les plus faibles, dans la ceinture de Kuiper (zone du système solaire au-delà de Neptune) par exemple.

Ainsi, tout simplement, à la question comment les caméras font-elles pour capturer des images aussi loin du Soleil où la lumière est bien moins importante, la réponse est qu'on choisit, pour ces zones de l'univers, des caméras sensibles, avec des temps d'expositions plus longs. Les images ramenées par Voyager 2 aux abords de Neptune illustrent bien ce qui se passe lorsque l'on envoie une caméra trop peu sensible. Conçue pour Jupiter et Saturne, la caméra a eu du mal à s'adapter dans les ténèbres aux alentours de Neptune.

³⁶ <https://reves-d-espace.com/new-horizons-bientot-sur-sa-destination-ultime/>

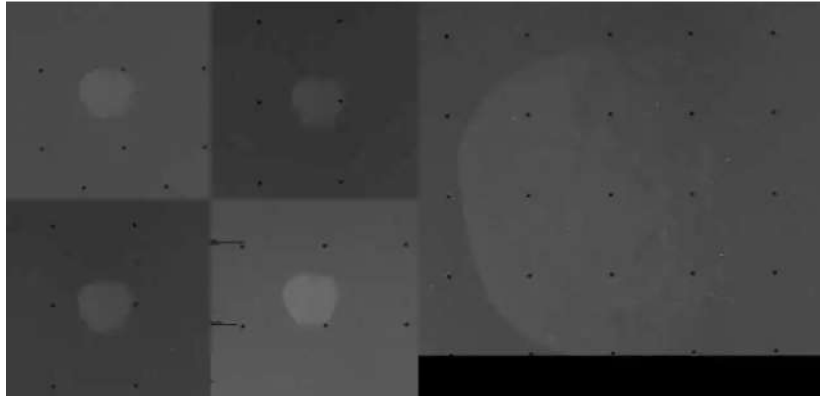


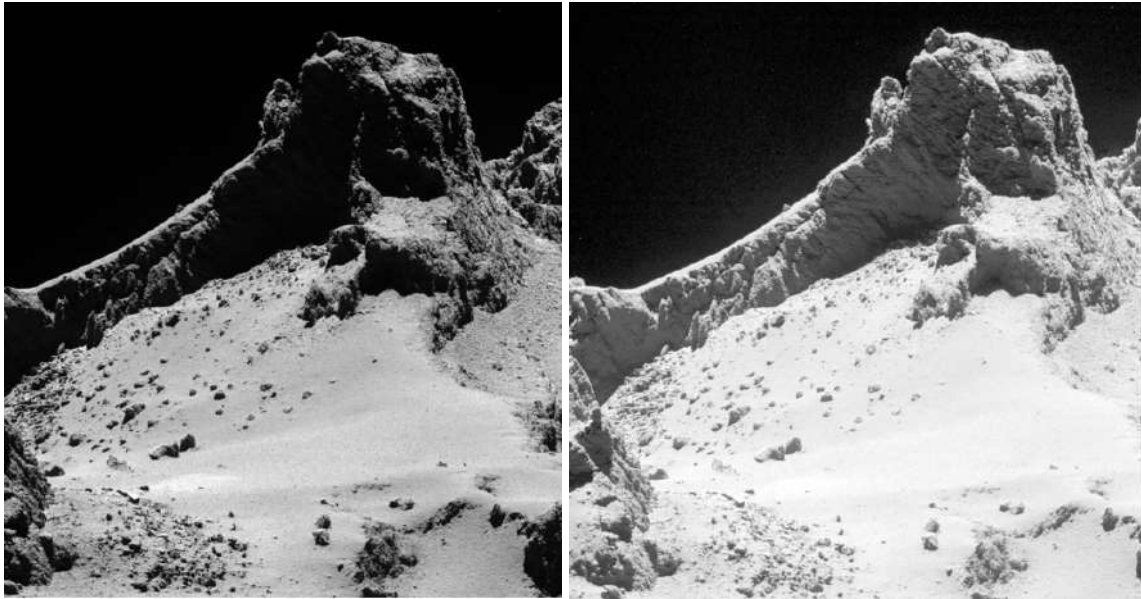
Fig. 44 Montage des images les plus “réussies” par Voyager 2 de la lune de Neptune, Proteus. La caméra a eu des difficultés à récolter assez de lumière au niveau d’Uranus et Neptune, en particulier sur des cibles comme ici des petites lunes sombres. L’image en haut à gauche prise au travers d’un filtre “clear” a été exposée 3,84 secondes. Les 3 autres petites images ont été prises par des filtres colorés (violet en haut à droite, vert en dessous, et bleu en bas à gauche). Elles ont nécessité un temps d’exposition de 15,36 secondes. Le problème que cela pose sur ces images est qu’elles sont légèrement floues car le vaisseau a bougé durant la pose. L’image de droite, prise à travers un filtre “clear”, a été exposée 1,92 secondes. Elle n’est pas floue, mais les niveaux de lumière sont si faibles qu’aucun détail n’est discernable

IMAGE : NASA, JPL

Les caméras spatiales ont une étendue utile bien plus grande que celle de la plupart des caméras « amatrices » sur le marché. Il n'est pas toujours évident d'apprécier la quantité de détails se trouvant dans les parties sombres des images spatiales, car nos moniteurs ne peuvent que rarement afficher de tels rapports de contraste. Dans le traitement des images, jouer avec les paramètres de luminosité et de contraste permet souvent de révéler des détails cachés dans les ombres, qui peuvent s'avérer intéressants d'un point de vue scientifique. Comparons ces deux rendus d'une image par la caméra OSIRIS sur la sonde Rosetta de la comète Churyumov-Gerasimenko. Les deux rendus sont faits à partir des mêmes données – le paramètre qui a été modifié au moment du traitement est le niveau de luminosité des pixels les plus faibles³⁷.

Des détails sont révélés dans les zones d'ombres éclairées indirectement. Ici, on voit que les falaises situées sur la « tête » de la comète possèdent deux fractures croisées.

³⁷ <https://www.mps.mpg.de/1979623/OSIRIS>



*Fig. 45 & 46 La surface de Rosetta par OSIRIS, mêmes données, 2 traitements différents
 IMAGE : ESA / Rosetta / DLR / MPS for OSIRIS Team MPS / UPD / LAM / IAA / SSO / INTA
 / UPM / DASP / ID / Emily Lakdawalla*

Prenons comme exemple des images capturées par la sonde New Horizons pour explorer les réglages d'exposition qui ont une influence sur la visibilité des étoiles dans une image spatiale. La caméra équipée sur New Horizons est le modèle LORRI. Elle possède une ouverture fixe, une étendue utile élevée, et une variété de paramètres d'exposition. Voici l'exemple d'une image de Io, lune de Jupiter, prise avec 4 millisecondes d'exposition. La lune est bien exposée, aucune étoile n'est visible.



Fig. 47 Io par la caméra LORRI de New Horizons, 4 millisecondes d'exposition, prise le 26 février 2007 à une distance de 2,865 millions de kilomètres / IMAGE : NASA, JHUAPL, SwRI

Quelques secondes plus tard, LORRI prit une autre image de Io, avec un temps d'exposition bien plus long, à savoir 75 millisecondes. Io est largement surexposée. Cette surexposition cause un effet sur le capteur CCD appelé « readout smear », la bande horizontale sur l'image ci-dessous. Cela se produit lorsqu'un pixel reçoit une charge trop importante et sature, il va

alors “déborder” et répartir la charge superflue sur les pixels de la même colonne. Si l'éblouissement se fait sur les lignes horizontales, on parlera de “blooming”.

Pourquoi prendre une telle image ? En observant le disque de Io, on se rend compte que la surexposition permet de mettre en évidence 3 panaches volcaniques en éruption depuis la surface. Ces paramètres d'exposition permettent même d'observer les détails de ces panaches. En revanche, malgré un temps d'exposition pratiquement 20 fois supérieur à l'image précédente, aucune étoile n'est visible (le point à droite de l'image semble être la trace d'un rayon cosmique).

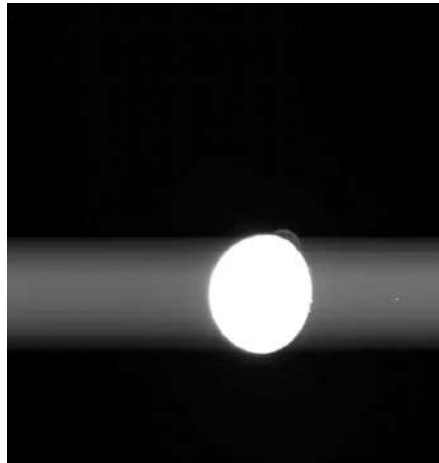


Fig. 48 Io par New Horizons, temps d'exposition de 75 millisecondes. La lumière du soleil sur la surface de la planète a fait saturer le capteur CCD de la caméra LORRI, causant l'artefact horizontal sur l'image. Cette image permet tout de même de révéler la présence de panaches en forme de parapluie à la surface de Io

IMAGE : NASA, JHUAPL, SwRI

Ce lien permet de visualiser une animation faite à partir d'autres images de Io par New Horizons :

https://planetary.s3.amazonaws.com/web/assets/pictures/nh_io_eclipse_aligned-on-stars.gif
(IMAGE : NASA/ JHUAPL / SwRI / Emily Lakdawalla).

Cette séquence montre des images prises deux jours après. Io avait orbité autour de Jupiter et était passée dans son ombre. La lumière du soleil n'éclaire pas sa surface. On peut voir Io briller dans le noir, éclairée par des panaches volcaniques. On constate également un certain nombre d'artefacts de caméra causés par des lumières parasites. La sonde reçoit directement dans l'optique de la lumière se reflétant de Jupiter, causant des flares et relevant le niveau lumineux de l'arrière-plan - à cela s'ajoutent les micro-points blancs dus aux particules énergétiques qui frappent le capteur, particules très nombreuses au niveau de Jupiter.

Pour obtenir cette image avec les brillances des volcans à la surface de Io, il a fallu un temps d'exposition de 8 secondes. Avec ce temps d'exposition, quelques étoiles sont visibles dans l'arrière-plan. La présence de ces étoiles a servi de repères de tracking pour aligner les images

et obtenir cette animation, dans laquelle les étoiles sont fixes tandis que Io est en mouvement et que New Horizons ajuste sa visée. Cette animation est composée de 28 images, chaque image est exposée 8 secondes.

New Horizons utilise une seconde technique - en plus de la longue exposition - pour faire apparaître les éléments de faible luminance dans ces images d'éclipse. Les données sont regroupées, c'est-à-dire qu'une moyenne est faite des pixels par groupe de 4. L'image obtenue est donc composée de seulement 256 pixels au lieu de 1024. Sacrifier la résolution permet cependant de rendre la caméra plus sensible, et moins sujette au bruit. Grouper (« binning » en anglais) permet aussi d'éviter que les images deviennent floues lorsque le vaisseau bouge pendant les longues expositions.

Lorsque New Horizons s'approcha de Pluton, des étoiles étaient encore visibles dans les expositions les plus longues. On peut voir cela dans cette animation³⁸. Les étoiles ont été utilisées pour aligner les images (tracking) et l'animation met en valeur les rotations respectives de Pluton et Charon³⁹.

Cela m'emmène à développer le traitement et l'interprétation des données captées.

³⁸ https://planetary.s3.amazonaws.com/web/assets/pictures/20150825_anim2.gif (IMAGE : NASA / JHUAPL / SwRI / Matthew Earl (c'est l'amateur qui les a traités))

³⁹ <https://www.planetary.org/space-images/new-horizons-opnav-aligned>

CHAPITRE 3. TRAITEMENT ET INTERPRÉTATION DES IMAGES.

Profondeur de codage

Les images de l'espace sont traitées et interprétées, comme toutes images numériques, à partir de données en bits derrière chaque pixel. Mais la valeur scientifique de ces images rajoute quelques subtilités à leur interprétation. Parmi les choses à prendre en compte, on note par exemple l'orientation de l'image. Ces images représentent des « données » et sont donc sacralisées : on ne peut pas se permettre, par exemple, de les orienter autrement que verticalement ou horizontalement, car cela déformerait les pixels. La plupart du temps, dans un souci de lisibilité, la photo est orientée de telle sorte que la source de lumière (le soleil) se retrouve en haut de l'image.

Voici l'exemple d'une image 8-bits de Japet (satellite de Saturne), comparée à des rendues en 2-bit et 1-bit. Avec une faible profondeur de codage, les frontières entre les différentes zones de gris sont nettes. On parle d'images "postérisées".

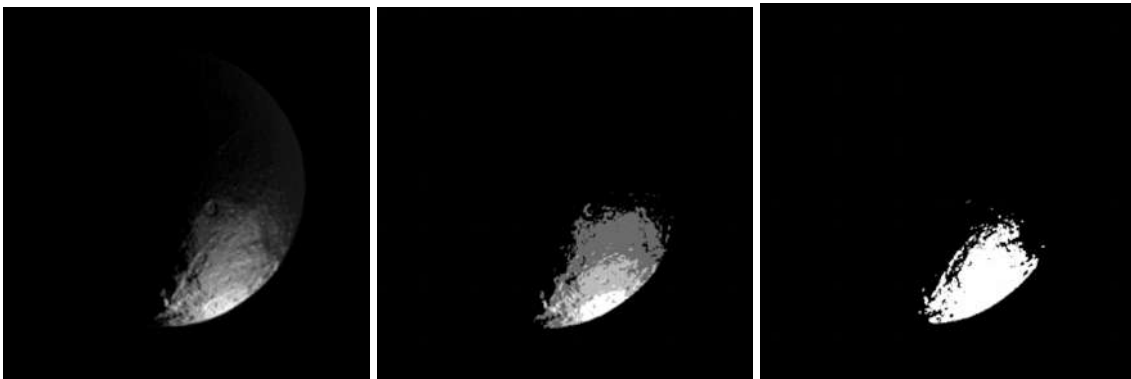


Image en 8-bit

Image en 2-bit

Image en 1-bit

Fig. 49, 50, 51

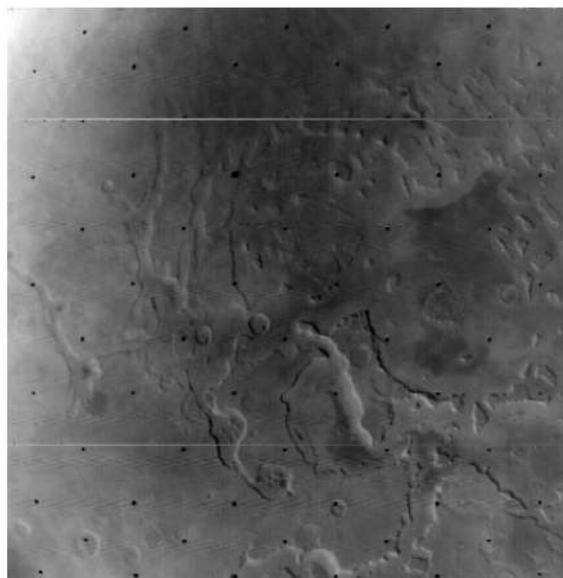
L'image ci-dessous, également en 1-bit, mais a été corrigée avec un système de tramage⁴⁰. Le rendu esthétique est convenable, car proche du rendu 8-bit. En revanche, scientifiquement, le fait de tramer l'image ne conserve pas la valeur des pixels et n'est donc pas une opération viable.



Fig. 50 Image en 1 bit, tramée

Les logiciels des ordinateurs terrestres conservent les images en morceaux 8 bits. Les images en nuances de gris que l'on rencontre dans le traitement d'images spatiales sont en multiples de 8, c'est-à-dire 8, 16 ou 32 bits. Si les données scientifiques parviennent sur Terre en 6 bits, elles sont conservées en 8 bits (idem pour une image en 12 bits qui sera conservée en 16 bits).

Pour la plupart des caméras spatiales, 256 valeurs possibles par pixels (codage sur 8 bits) sont suffisantes pour enregistrer les différentes valeurs lumineuses captées par les pixels. Les images en 8 bits sont donc courantes dans l'imagerie spatiale. Certaines caméras enregistrent des données en 6, 7, 10, 12 bits par pixel. La caméra de Mariner 9, sonde spatiale envoyée sur Mars dans les années 70, conservait les données en 8 bits.



*Fig. 51 A gauche : image de Mariner 9
IMAGE : NASA / JPL*

⁴⁰ La tramage consiste en l'ajout d'un bruit aléatoire pour masquer les erreurs de quantification.

Dans le traitement des images spatiales, se pose ensuite la question de la représentation des valeurs de pixels, avec l'histogramme. Une représentation logarithmique des valeurs de pixels aura tendance à compresser les parties lumineuses de l'image, comme les étoiles, et à mettre en évidence les parties les plus sombres, comme les nébuleuses. Un affichage logarithmique de l'étendue des valeurs de pixels aura pour effet de réduire le contraste de l'image, réduisant l'étendue utile. L'outil favorisé dans le traitement d'images spatiales pour gérer le contraste et la luminosité des images est l'étirement de l'histogramme (histogram stretching).

Compression des données

Transmettre des données conduit à recevoir un signal radio faible, synonyme d'une connexion très lente. Il est courant pour les données d'images des sondes d'être compressées à bord de la sonde avant d'être envoyées sur Terre, où elles seront ensuite décompressées. Certaines images sont initialement échantillonnées puis codées sur 10 ou 12 bits : on obtient des valeurs de pixels allant jusqu'à 1024 ou 4096. Puis, à partir de ces informations, on peut procéder ensuite à un ajustement automatique des niveaux et convertir l'image à un codage sur 8 bits pour transmettre ces données compressées. Sur Terre, l'opération inverse est effectuée pour retrouver un codage sur 12 bits. Cela peut entraîner quelques pertes dans les détails mais c'est dérisoire, et cela permet de faciliter la transmission des données. Il est aussi possible d'identifier seulement la partie de l'image intéressante et d'envoyer uniquement cette « subframe » sur Terre. Certaines données sont donc jetées, mais cela permet d'envoyer plus d'informations dans la transmission vers la Terre.

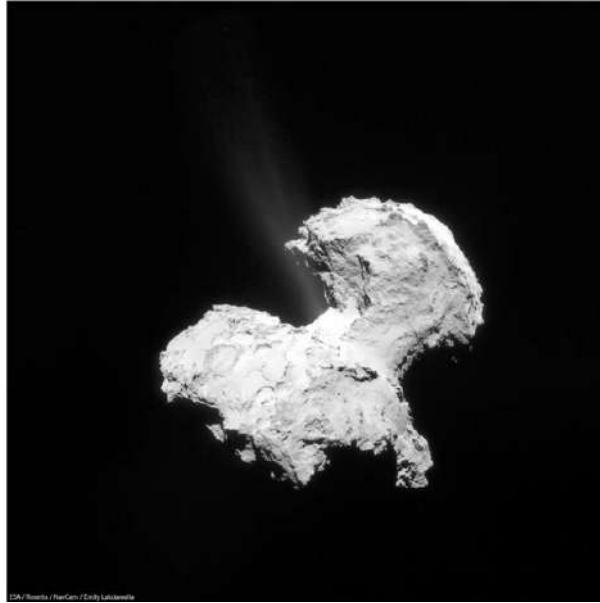
La luminosité

Je vais voir comment la modification des paramètres d'une seule image peut « révéler » de précieuses données scientifiques : à partir d'une même image brute, les choix de traitement donneront différentes images interprétées.

Ce fut par exemple le cas pour des images de CHURYUMOV-GERASIMENKO prises par la NavCam⁴¹.

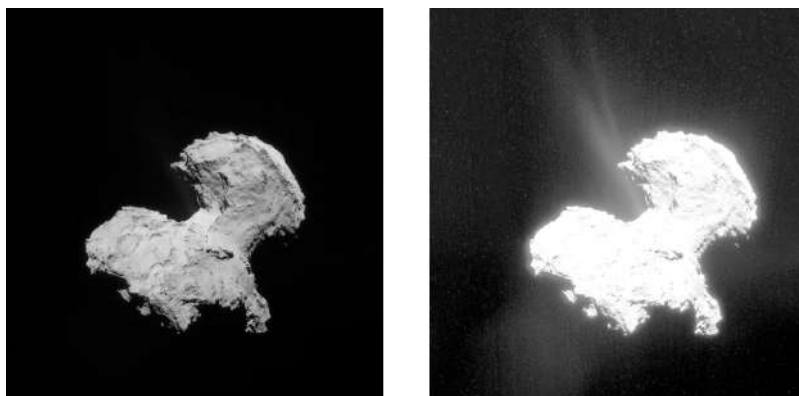
L'ESA a mis en ligne les données brutes d'images de la comète. Leur interprétation (processing) a permis de révéler la présence d'éléments autour du noyau comme la « chevelure » ou la « queue ». Ce sont des phénomènes propres aux comètes, liés au fait que certaines parties de celles-ci connaissent une sublimation lorsque la comète se réchauffe en passant près du soleil lors de son orbite elliptique, créant une enveloppe nébuleuse (la chevelure).

⁴¹ <https://blogs.esa.int/rosetta/> et <https://www.planetary.org/articles/p24?listauthor=emily-lakdawalla>



*Fig. 52 LES JETS DE LA COMÈTE CHURY par la NAVCAM LE 2 SEPT 2014
IMAGE : ESA / ROSETTA / NAVCAM / EMILY LAKDAWALLA*

En réalité, cette image est une image composite à partir de 4 fichiers (grâce à des outils comme Microsoft Image Composite Editor). Pour les scientifiques (et les « *amateurs image processors* »), les images de comètes représentent un défi de taille. En phase angulaire basse, autrement dit lorsque le soleil se situe derrière la sonde (et donc la caméra) et que la comète est éclairée frontalement, le noyau est bien plus lumineux que la queue et la chevelure. Avec des réglages standards de contraste et de luminosité (ceux utilisés pour la plupart des objets spatiaux) les « jets » (qui composent la queue) seraient invisibles. Pour obtenir une image qui montre à la fois le noyau et l'enveloppe nébuleuse, il faut les traiter séparément, pour ensuite intégrer une version de la chevelure boostée en luminosité. Dans la *fig. 54*, la personne qui a traité l'image s'est concentrée sur deux jets en particulier. Comparons deux des images initiales :



*Fig. 53 & 54 La comète Chury par la NavCam de Rosetta. Augmenter la luminosité révèle des jets.
IMAGES : ESA / ROSETTA / NAVCAM / E.LAKDAWALLA*

Nous avons ici les deux extrêmes, puisque la deuxième version nous montre ce qu'il se passe lorsque l'on force les paramètres de luminosité. Cela permet de révéler deux jets importants

au niveau du « cou » de la comète. Mais on constate également deux autres régions de brillance proches du noyau. Il y a une zone large et diffuse en bas à gauche de la comète. Elle semble « légitime », c'est-à-dire qu'elle montre a priori une vraie zone de jets. En revanche, il est difficile de déterminer si la seconde zone, plus étroite, sur la droite du cou de la comète, permet de déduire la présence de jets à cet endroit-là ou s'il s'agit simplement d'un artefact lors du traitement, notamment parce que cette zone s'étend sur l'image d'après.

Le contraste

Pour parler du contraste des images spatiales, prenons un cas concret en exemple. Quatre fois par an, la mission Cassini de la NASA, qui a pour but l'exploration des environs de Saturne par une sonde, rend publique ses données scientifiques, notamment toutes les images brutes capturées.

Prenons cette image⁴² :



Fig. 55 Enceladus, image finale

On y voit le croissant d'une lune de glace de Saturne. Au niveau de la frontière entre le jour et la nuit (cette zone est appelée « terminator » en anglais), les rayons de lumière donnent à voir quelques impacts de cratères. En arrière-plan, on remarque la présence de la majorité du système d'anneaux de Saturne. Ils sont partiellement obscurcis par l'ombre de Saturne. Cette lune est un des quatre mondes de l'univers où nous avons observé une activité géologique interne. On voit un geyser : il s'agit d'Enceladus,. Le geyser est fait d'une sorte de mousse provenant des mers ou océans internes à Enceladus, expulsés dans le vide près de Saturne.

⁴² Crédits image pour toutes celles utilisées dans cette sous-partie sur le contraste : NASA / JPL-Caltech / SSI / Emily Lakdawalla

Initialement, après avoir téléchargé cette image et l'avoir ouvert dans Photoshop pour la traiter, voilà ce à quoi elle ressemble.



Fig. 56 Image originale

L'image est très sombre. La première chose à faire est d'augmenter la luminosité et le contraste. C'est-à-dire que l'on multiplie chaque pixel de l'image par une constante. Toute l'image devient plus lumineuse, cela ne pose pas de problème tant qu'on ne pousse pas la valeur des pixels au maximum. Les données scientifiques originelles sont conservées.



Fig. 57 Augmentation des paramètres de luminosité et de contraste

Si l'on étire le contraste de manière excessive, voilà ce qu'on obtient :



Fig. 58 Étirement à l'excès du contraste entraînant la mise en évidence d'un artefact de banding

On remarque que cela a endommagé certains détails de l'image brute, notamment en saturant la partie éclairée de la surface qui est devenue complètement blanche. Les artefacts, notamment les rayons cosmiques qui ont frappé le capteur sont également bien plus visibles. Enfin, l'opération a rendu visible le banding horizontal, qui était déjà présent dans les données brutes mais à un plus faible niveau. Cela est notamment dû aux interférences avec d'autres appareils électroniques de la sonde. En revanche, avoir augmenté le contraste permet de mettre en évidence la présence de geysers, et du contour du globe d'Enceladus. Le fait que ces éléments soient présents dans les données brutes de l'image est notamment lié à son codage en 16 bits. Le fait de coder les images spatiales dans une valeur supérieure à 12 bits (on choisira un multiple de 8, donc 16 bits généralement), permet de traiter plus de 4000 nuances de gris et donc d'avoir les informations comme la présence des geysers ou la silhouette du globe. L'information est bien présente, comment peut-on représenter cela dans l'image ? Il est possible de modifier le contraste d'une manière non-linéaire, afin de faire apparaître des détails dans les valeurs les plus faibles comme dans les plus fortes. Mais dans ce cas, les valeurs associées aux geysers étaient trop faibles, et les rendre apparentes effaçait les détails dans les hautes lumières, comme dans le croissant illuminé et dans les anneaux, tout en accentuant le banding horizontal.

Face aux problèmes posés par le contraste d'une telle image, il faut traiter les différents éléments séparément. D'une part, pour les problèmes liés au banding, une technique dans le traitement de l'image est de sélectionner une partie de l'image qui ne contient aucune autre information que les bandes (pas de lunes, de corps stellaires, etc...) et de soustraire les valeurs associées à ces pixels à la photo originale. Cela permet de supprimer le banding. On sélectionne un morceau « vertical » du banding horizontal pour ensuite créer un cache qui ne contient que le banding. On peut ensuite fusionner les deux images et ne faire apparaître que la différence.

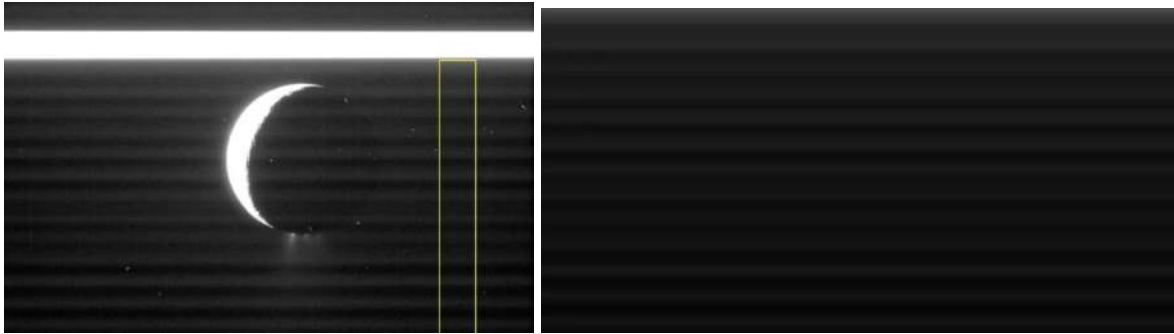


Fig. 59 & 60 Isoler le banding et en faire une couche qui sera ensuite soustraite

Mais cela peut avoir pour conséquence d'effacer la face nocturne d'Enceladus sur le fond noir de l'image. En effet, les valeurs de pixels de l'image initiale révèlent que l'arrière-plan est moins sombre que la face nocturne d'Enceladus. En soustrayant les valeurs du banding, la valeur des pixels de la face nocturne d'Enceladus ont été ramenés à zéro. Il y a donc une perte d'information sur le sujet principal de l'image. Il faut donc s'assurer que les valeurs du banding qui vont être soustraites n'effacent pas d'autres parties de l'image.

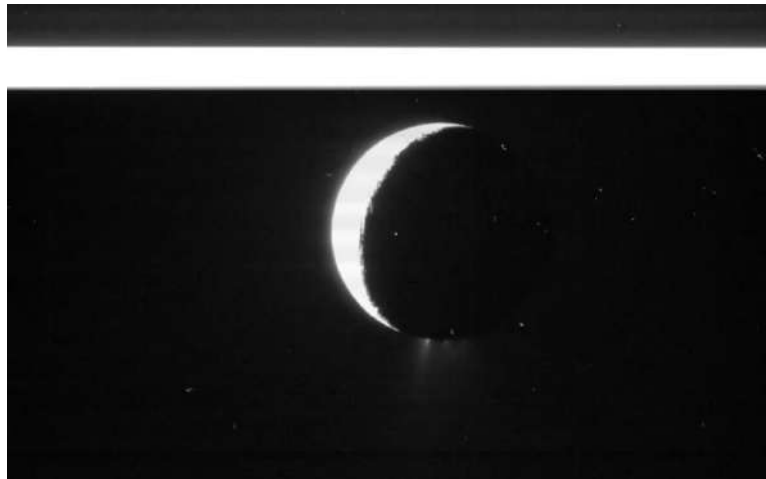


Fig. 61 Image contrastée, mais avec soustraction du banding. Cela permet une image "propre" qui met quand même en évidence le geyser et la silhouette de Enceladus. En revanche, il y a perte d'informations dans les zones les plus lumineuses comme les anneaux ou le croissant éclairé.

Une possibilité pour faire apparaître sur une seule image différentes données scientifiques (le croissant éclairé, les geysers, l'arrière-plan sombre) est de créer une image composite. On peut par exemple sélectionner la zone de l'image contenant les geysers, et augmenter le contraste de manière ciblée.



Fig. 62 Image composite, qui permet de mettre en évidence tous les phénomènes présents. Votre moniteur ne le permet peut-être pas, mais notez que l'intégration des geysers est ici grossière, on remarque encore la découpe.

Mais cette étape nécessite des manipulations « esthétiques » et subjectives, puisqu'il faut rendre l'intégration des geysers "fluides". Cela fait passer le statut de l'image, déjà ambiguë pour les manipulations précédentes, de scientifique à artistique. Il en va de même pour le camouflage des artefacts liés aux rayons cosmiques.



Fig. 63 Image finale, avec des manipulations esthétiques et subjectives, qui permettent de mettre en évidence tous les phénomènes présents dans les données brutes, et rendus visibles par la manipulation du contraste.

Des images « réelles » ?

Dans le traitement d'images spatiales, la plupart des choix sont faits de manière subjective, et les valeurs des pixels peuvent parfois être modifiées. Dans le contexte de ces manipulations, comment considérer ces images ? Sont-elles “fausses” ?

Plusieurs conventions « pratiques » définissent les manipulations admises pour une image. Prenons l'exemple du photojournalisme. En 2014, 20% des images soumises au concours World Press Photo ont été disqualifiées pour manipulation excessive. À l'époque, les seules consignes étaient de dire que toutes les manipulations possibles dans la chambre noire d'un laboratoire sont également autorisées dans un logiciel de retouche numérique. Après le scandale de 2014, la World Press Photo organisa une commission, « L'intégrité de l'image, une étude des pratiques actuelles et des standards tolérés relatifs aux manipulations d'images fixes dans le photojournalisme et la photographie documentaire ». Cette commission a permis de définir les manipulations excessives comme « les changements matériels résultant de l'ajout ou de la soustraction de contenu ». D'autres ajustements, tels que le recadrage partiel, la technique du « dodge & burn », les modifications de ton, l'ajustement des couleurs, la conversion en nuances de gris, sont tolérés⁴³.

Pour ce qui est de l'intégrité des images scientifiques, les conventions divergent de celles établies dans le photojournalisme. Concrètement, les manipulations tolérées pour une image se basent sur un des piliers de la méthode scientifique : la répétabilité. Si la personne qui traite l'image est capable d'établir un algorithme, une recette, qui reproduira exactement le même résultat pour une image donnée à chaque fois, et si cet algorithme peut être communiqué à quelqu'un d'autre lui permettant d'obtenir les mêmes résultats, alors il s'agit bien d'un traitement « scientifique » d'une image. S'il y a des modifications non décrites, arbitraires ou non documentées de la valeur des pixels, alors il s'agit de « digital painting ».

Par exemple, dans le contexte du traitement scientifique d'une image, sont acceptés :

- la multiplication de tous les pixels d'une image par une valeur
- l'ajout d'une valeur constante à tous les pixels d'une image
- le recadrage d'une image (sélectionner une sous-partie des pixels)
- sous-échantillonner une image en utilisant la valeur moyenne des pixels adjacents
- étirer l'histogramme en définissant tous les pixels se situant en dessous de 10 comme noir, tous ceux au-dessus de 100 comme blanc, et en effectuant un étirement linéaire entre ces valeurs.
- effectuer une correction géométrique sur l'image (telles que le « warping » pour corriger les distorsions de caméra, ou redéfinir l'image selon une projection commune).
- effectuer une « mosaïque » (assembler comme un puzzle 2 images géométriquement corrigées ensemble), sans pour autant fusionner les limites (les laisser apparentes)

⁴³

https://www.worldpressphoto.org/getmedia/43578992-5421-4e4c-a826-3b993b0b3f3c/Integrity-of-the-Image_2014-Campbell-report.pdf

- appliquer un flou gaussien à une image

À l'inverse, parmi les manipulations inacceptables qui relèvent davantage du « digital painting », on compte :

- utiliser l'outil « Pinceau » sur une image
- utiliser un outil comme le pinceau pour corriger un défaut d'image
- sélectionner une partie d'une image pour l'étirer différemment du reste de l'image
- effectuer une mosaïque (assembler comme un puzzle deux images) et fusionner les limites/bords de manière invisible

Pour l'utilisation d'un outil comme le pinceau, sa manipulation ne permet pas de répéter l'action précisément. Les données sont modifiées, « améliorées » subjectivement. Scientifiquement, on parle de « fabrication de données ».

Ainsi, les images traitées scientifiquement peuvent être considérées comme « photojournalistes », mais certaines manipulations sont acceptées en sciences, mais pas en journalisme, et vice versa. Les scientifiques auront pour intérêt de mettre en valeur les variations d'une scène ou d'un phénomène en le rendant plus évident que dans la version « brute » de l'image. Pour cela, ils peuvent par exemple augmenter les réglages de contraste ou ajuster des couleurs de manière extrême. De plus, l'utilisation de caméras multispectrales sensibles à des domaines hors du visible comme l'infrarouge ou l'ultraviolet est fréquente. Or, il est impossible de rendre ces images selon la vision qu'aurait l'œil humain de ces phénomènes, puisqu'on ne perçoit pas ces domaines de longueurs d'onde. Pour autant, elles ne sont pas moins « réelles » que les images prises dans le visible. D'un autre côté, des manipulations comme la modification sur une partie de l'image de la teinte ou des ombres, l'équivalent dans les chambres noires des techniques du « dodging and burning », sont acceptées en photojournalisme, mais proscrites en imagerie scientifique.

La plupart du temps, lorsque le grand public se demande si une image est « réelle », cela revient à se demander « Est-ce que je verrai la même chose avec mes yeux ? ». La plupart du temps – mais pas toujours, la pratique photojournalistique tend vers cela. En imagerie scientifique, en revanche, ce n'est pratiquement jamais le cas. Les appareils de prise de vue spatiale comme les sondes ou les télescopes peuvent prendre des photos avec de longs temps d'exposition, et différentes longueurs d'onde, qui rendent l'invisible visible. Les images de nébuleuses multicolores ou les visions de ce qui se situe au-delà des épais nuages de Titan sont impossibles à percevoir pour l'œil humain. Pour autant les données capturées sont bien réelles, et les traiter de manière scientifique signifie que ce processus de traitement doit être transparent et honnête, notamment pour ce qui est du nettoyage des défauts d'une image contenus dans les données brutes.

Dans ce traitement des données à des fins scientifiques, la colorimétrie occupe une place particulièrement importante. Aussi, j'en traite dans le chapitre suivant, entièrement consacré au traitement colorimétrique des images spatiales.

CHAPITRE 4. LA COLORIMÉTRIE

La colorisation RVB

Même si les images que l'on voit des missions Voyager sont en couleurs, les images initiales envoyées par la sonde sont en noir et blanc, de par le fonctionnement des capteurs photosensibles. Pour reconstituer les couleurs, une roue contrôlable équipée de 8 filtres colorés tourne devant le capteur et donne des images aux nuances de gris différentes selon le filtre utilisé. Ainsi, pour une image colorée, on assemble trois images monochromes, chacune étant prise au travers d'un filtre différent, généralement R, V ou B. Ces trois images (RVB) sont assemblées sur Terre et permettent d'obtenir l'image colorée : on parle de colorisation RVB. On emploie alors les techniques classiques déjà utilisées au début du 20e siècle pour les premières photographies couleur par exemple avec ce portrait de Alim Khan en 1911.



Fig. 64 L'image noir et blanc avec un filtre laissant passer la longueur d'onde du rouge. A droite celle du bleu. La robe bleue est quasiment blanche, puisque le filtre bleu laisse passer toute la lumière de cette longueur d'onde.



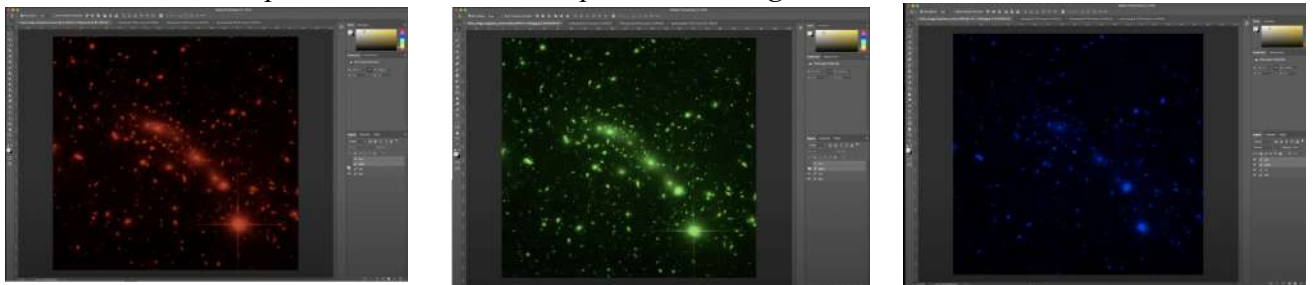
Fig. 65 En teintant les 3 négatifs puis en les combinant, on obtient l'image couleur.



Fig. 66 Trois images étaient prises pour obtenir le portrait en couleur. Chaque image laissait passer uniquement la lumière d'une longueur d'onde, rouge, vert ou bleu.

Par exemple, dans le cas des images prises par le télescope Hubble⁴⁴, nous avons l'habitude de voir des images aux couleurs vives. Mais la fonction première du télescope est de mesurer la luminance des objets dans l'espace. Des photons émis par ces objets sont récupérés sur un capteur photosensible. De par le fonctionnement de ces capteurs, les images obtenues sont en noir et blanc : par exemple pour un capteur dans le domaine du visible, il est impossible de distinguer si les électrons ont été libérés par effet photoélectrique à partir d'une radiation bleue ou d'une radiation rouge. Les images optiques sont généralement capturées par des caméras multi-spectacles et les couleurs sont reconstituées dans un second temps, comme pour le portrait d'Alim Khan (aujourd'hui, ce processus se fait grâce à des outils numériques comme Photoshop).

Captures d'écran Photoshop, couches rouge, verte, bleue :



Capture d'écran Photoshop, résultat final avec les trois couches superposées :

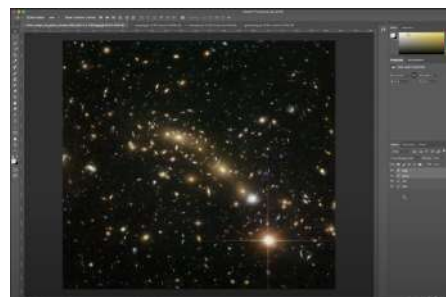


Fig. 67, 68, 69, 70

⁴⁴ <https://www.space.com/8059-truth-photos-hubble-space-telescope-sees.html>
<https://press.uchicago.edu/ucp/books/book/distributed/C/bo22276742.html>
https://esahubble.org/projects/fits_liberator/improc/

Dans le cas d'un capteur fonctionnant dans le visible, l'idée est de représenter un objet tel que nos yeux humains le verraient s'ils étaient aussi puissants qu'un télescope comme Hubble : en effet, nos yeux sont eux-mêmes composés de trois types de cônes chacun ayant un maximum de sensibilité à des longueurs d'onde différentes se rapprochant du rouge, du vert et du bleu. Dans l'exemple ci-dessous, la première image la combinaison du rouge et du vert qui fait apparaître du jaune, puis l'ajout du bleu amène le cyan et le magenta et donne l'image finale représentant en entier le spectre du visible.

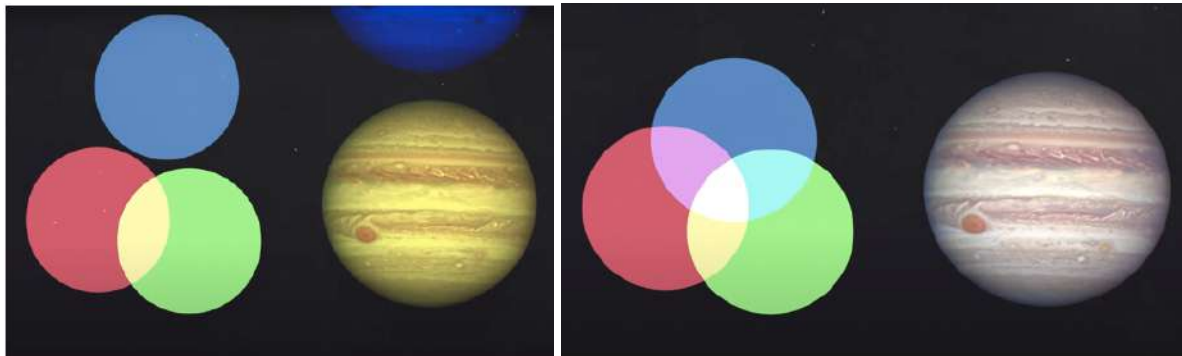


Fig. 71 : la combinaison des images filtrées et colorisées en vert et rouge fait apparaître l'image à la teinte jaune

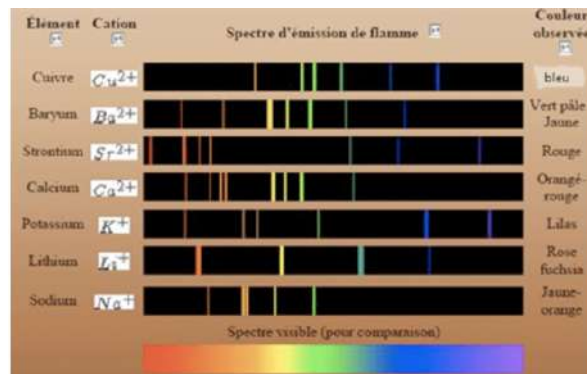
Fig. 72 : la combinaison de l'image jaune précédemment obtenue, combinée à l'image bleu donne l'image RVB finale

Mais pour les images de l'espace, à vocation scientifique, la colorisation RVB selon la vision humaine n'est pas toujours l'option privilégiée, puisqu'on peut choisir d'utiliser des fausses couleurs, attribuées à des éléments spécifiques de l'image, pour mettre en valeur des phénomènes physiques ou chimiques (voir ci-après). D'ailleurs, contrairement à la photographie traditionnelle, les filtres colorés ne sont pas forcément des filtres RVB. Si le principe de colorisation RVB pour obtenir l'image finale est le même, les filtres utilisés sont pensés différemment : tout dépend de ce qu'on veut observer.

Choix des filtres d'observation.

Pour capturer des images avec une chance de distinguer différents types de gaz dans la matière complexe de nuages de gaz interstellaires, il faudra adapter les filtres utilisés pour la prise de vue.

En effet, la nature des éléments chimiques présents dans un gaz peut être identifiée par les raies d'émission, situées à des longueurs d'onde précises, caractéristiques de chaque élément chimique.



Un gaz possède des raies d'émission spécifiques

Fig. 73 : <http://tpe-feu-d-artifice.e-monsite.com/pages/i-les-couleurs.html>

Par exemple, la lumière du cœur des étoiles excite les électrons du gaz d'hydrogène alentour. En se désexcitant, l'hydrogène ionisé émet une radiation caractéristique à 656,28 nm. Ainsi, un filtre H-Alpha permettra d'enregistrer cette émission et donc de cartographier l'hydrogène autour des étoiles étudiées. Cependant, un filtre pourra enregistrer d'autres composants en fonction de sa bande passante : plus un filtre est sélectif, moins sa bande passante est large. Il existe des filtres H-Alpha de par exemple 35nm, 13nm, 12nm, 7nm ou 3nm de bande passante. Ainsi, plus la bande passante d'un filtre est étroite, plus il aura la capacité d'enregistrer les émissions d'un gaz en particulier et donc de distinguer/identifier les gaz présents.

Un filtre H-Alpha centré sur 656,28 nm et de 7 nm de bande passante couvre la bande du spectre électromagnétique d'approximativement 650 nm à 661 nm. La raie d'émission à 656,28 nm, caractéristique de l'hydrogène ionisé, est couverte. Par contre la raie d'émission de l'azote ionisé à 658,4 nm est comprise dans cette bande passante. Ainsi, les images enregistrées avec un tel filtre, dénommé H-Alpha, comprendront en pratique les émissions de l'hydrogène ionisé, mais aussi celle de l'azote ionisé. Pour n'enregistrer plus précisément que les émissions de l'hydrogène ionisé, il faudra utiliser un filtre plus étroit. En pratique, on prendra un filtre de 3 nm de bande passante. Avec une telle bande passante, la sélectivité des enregistrements est plus importante et la majorité des émissions de l'azote ionisé sont rejetées par le filtre. Inversement, si on veut enregistrer les émissions de l'azote ionisé centrées à 658,4 nm il faudra également choisir un filtre de 3 nm centré sur 658,4 nm.

Ainsi en filtrant la lumière à l'aide d'un filtre étroit donné, on peut observer la présence d'un élément précis. Une utilisation commune de cette technique de "narrowband filtering"⁴⁵ consiste à isoler la lumière provenant de l'hydrogène, du soufre et de l'oxygène. Il s'agit de trois éléments particuliers car ils sont des composants clés des étoiles.

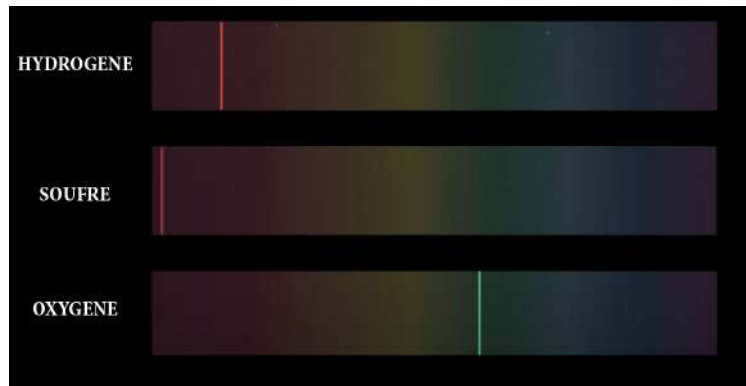


Fig. 74

A partir du spectre d'émission de l'hydrogène, du soufre et de l'oxygène, on sélectionne des raies dans des domaines qui permettent de distinguer les éléments

La couleur comme information scientifique.

De la même façon qu'on associe un élément chimique à un filtre de bande étroite lors de la prise de vue, on peut associer une couleur à un élément chimique lors du traitement colorimétrique des images.

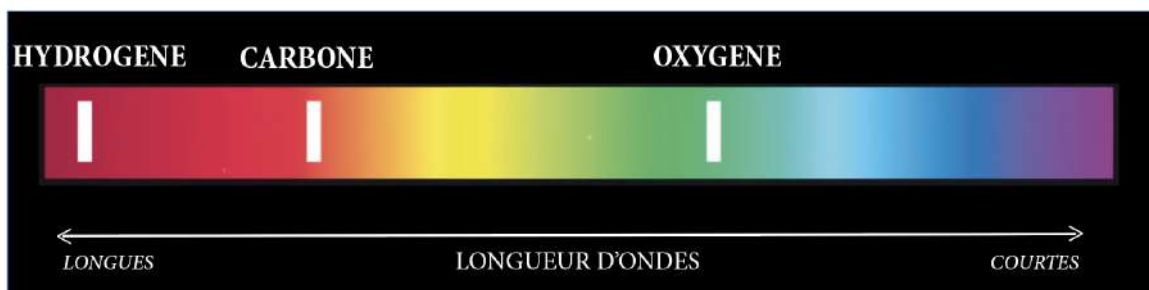


Fig. 75

A chaque élément chimique, on peut associer la couleur du filtre utilisée pour le distinguer lors de la prise de vue.

⁴⁵ <https://www.atik-cameras.com/news/beginners-guide-to-narrow-band-imaging/> & <https://astrobackyard.com/narrowband-imaging/>



Fig. 76

Coloration de quelques gaz en accord avec leurs raies d'émission caractéristiques.

IMAGE : NASA ESA HST

Ainsi, la couleur a une fonction informative : les différentes teintes permettent de cartographier les gaz présents dans des zones de l'Univers. Les images résultantes ont des zones de couleurs aux frontières très nettes, en accord avec la sélectivité des filtres à bande étroite utilisés pour isoler des transitions atomiques spécifiques,

Voici ci-dessous une image construite à partir de filtres "narrowband" :



Fig. 77 Nébuleuse en "narrowband"

IMAGE : ESA / HUBBLE

Ici, il ne s'agit pas d'une image à « couleurs réelles » comme dans les exemples évoqués précédemment lors de la colorisation RVB de l'image de Jupiter. Il s'agit plutôt d'une sorte de « carte couleur. » En effet, les couleurs que nous percevons pour le soufre et l'hydrogène se rapprochent du rouge, tandis que l'oxygène se rapproche du vert/cyan. Si l'on venait à colorer l'image en combinant ces 3 filtres, on obtiendrait une image dont la teinte dominante est rouge, et qui, bien que « réaliste », n'est que peu lisible scientifiquement.

Images en fausses couleurs.

On effectue alors couramment le choix de « décaler » les longueurs d'onde correspondantes à des gaz dans la représentation finale de l'image est aussi lié à des soucis de lisibilité scientifique. En effet, comme on peut le voir sur l'illustration Fig. 77, des gaz comme le Soufre ou l'Hydrogène dégagent une longueur d'onde relativement proche, dans les tons rougeâtres. Lors de la superposition, cela rendrait compliqué de distinguer les deux. Ainsi, on préfère associer à chaque élément une longueur d'onde bien distincte (rouge, vert, bleu) tout en conservant l'ordre chromatique, ce qui permet une meilleure compréhension des phénomènes physiques en jeu. Par exemple, même si l'hydrogène est plutôt rouge, on préfère généralement l'associer au vert pour le différencier du soufre. C'est une des raisons qui rend ces images si spectaculaires : l'utilisation de couleurs variées permet des rendus d'images très détaillés et multicolores.

Ce principe est illustré par exemple avec l'une des images les plus connues de Hubble, celle des Piliers de la Création.



Fig.. 78

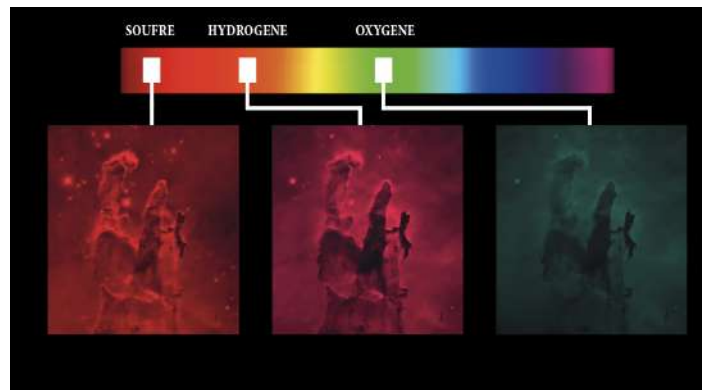


Fig. 79



Fig. 80

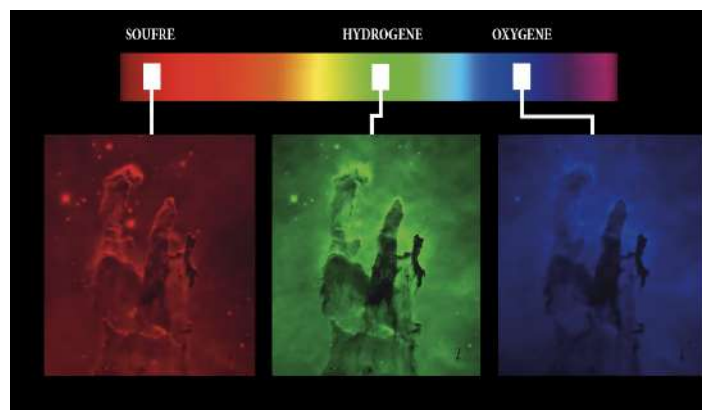


Fig. 81

Les Piliers de la Création - où sont formées les étoiles.

IMAGE : HUBBLE, NASA



*Fig. 82 Les Piliers de la création avec une colorimétrie dans laquelle les couleurs associées à chaque gaz sont “réalistes”
IMAGE : HUBBLE, NASA*

Ainsi, pour obtenir une image « multicolore », sans teinte dominante, mais plutôt « équilibrée » sur le spectre, qui permet par exemple de séparer visuellement le soufre de l'hydrogène, les scientifiques préfèrent assigner aux éléments les couleurs rouge vert et bleu, de manière plutôt arbitraire, mais de telle manière à conserver leurs places relatives dans le spectre. Dans la fig. 86, on associe donc le bleu à l'oxygène, puisqu'il est la longueur d'onde la plus basse des trois éléments. La longueur d'onde de l'hydrogène sur le spectre se situe « au milieu » des deux autres éléments, donc on y associe le vert – bien qu'il soit rouge, sa longueur d'onde est plus proche du vert que celle du soufre. Pour le soufre, dont la longueur d'onde est la plus élevée, on associe le rouge . Cela nous permet d'obtenir une image à partir de 3 canaux RVB – qui est l'image la plus communément partagée, et qui permet de « cartographier » le processus par lequel notre système solaire s'est peut-être formé.

Capter des données dans l'infrarouge, les UV et rayons X permet d'accéder à des informations complémentaires à celles obtenues dans le visible. Elles doivent être réinterprétées en lumière visible. Quel que soit le domaine de longueurs d'onde capté, les basses fréquences se voient assigner le rouge, les moyennes le vert et les hautes le bleu. On est alors amené à traiter les valeurs numériques obtenues avec 3 filtres à bande étroite dans l'infrarouge et/ou l'UV et/ou rayons X pour une colorisation RVB.

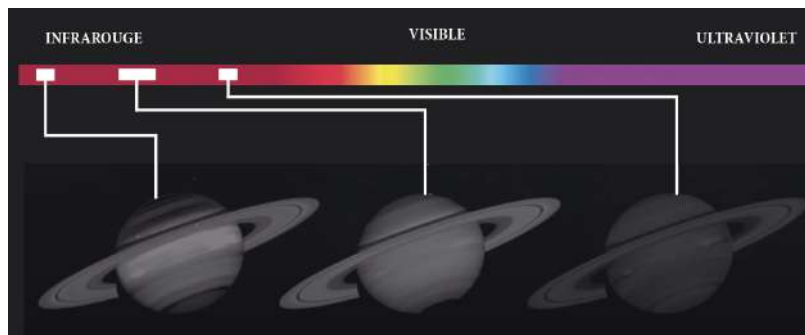


Fig. 83 L'image est capturée en 3 canaux dans l'infrarouge

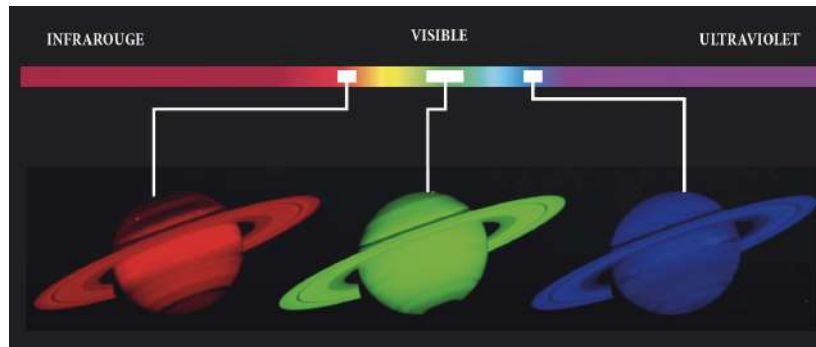


Fig. 84 Ces 3 canaux sont reportés dans le visible en conservant leur ordre chromatique

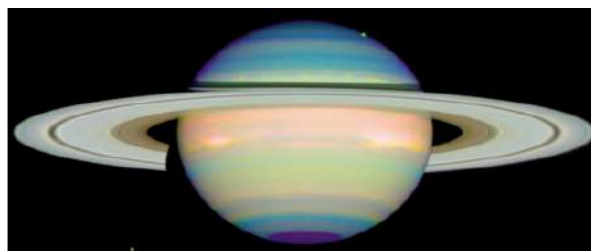


Fig. 85 La combinaison des 3 canaux permet d'obtenir une image infrarouge, ici Saturne

IMAGE : ESA

Ainsi, généralement, une image infrarouge n'est pas représentée en nuances de rouges, mais plutôt par tout un spectre arc-en-ciel de couleur, traduisant dans les bleus les zones « froides » et en rouge/blanc les zones « chaudes ».

Autre exemple : la spécificité de télescope comme Hubble réside également dans le fait qu'il peut capturer des images hors du spectre du visible, par exemple en infrarouge ou en ultraviolet.



Fig. 86 Les Piliers de la création en infrarouge

IMAGE : HUBBLE, NASA

La colorisation RVB des données dans l'infrarouge permet une nouvelle vision des piliers de la création (Fig. 89). En effet, contrairement à la lumière visible, la lumière infrarouge

traverse le gaz et la poussière que l'on voit sur les clichés en lumière visible, révélant les étoiles brillantes et les bébés étoiles⁴⁶ qui se forment dans cet endroit de l'univers.

Cette technique n'est pas simplement limitée à un domaine de longueurs d'onde. Par exemple, dans le cadre de l'observation d'une galaxie sur tout le spectre, il est possible pour une image spatiale de combiner une image infrarouge, une image optique (visible), et une image x-ray. Ces 3 images seraient associées au vert, rouge et bleu, et on obtiendrait alors une image composite. Ci-dessous, la lumière infrarouge capturée par le télescope Spitzer est montrée en rouge, la lumière visible du télescope Hubble est montrée en vert, et la lumière de rayons X du télescope Chandra est montrée en violet/bleu.



*Fig. 87 Messier 101, image composite
IMAGE : NASA, Spitzer, Chandra*

Questionnement des images colorées obtenues

Par l'exemple de la colorimétrie, on peut être amené à se demander si les couleurs sont « réelles ». Sur ces images, les couleurs servent en quelque sorte de légende, et elles représentent des données qui sont, elles, bien réelles. Les couleurs, déterminantes dans l'esthétique de ces images, ont ici une vraie signification scientifique.

Dans l'image ci-dessous, ou dans les exemples cités précédemment, les couleurs peuvent notamment servir à cartographier la présence de gaz et leurs interactions à plusieurs milliers d'années lumières – renseignant ainsi sur la formation d'étoiles et de galaxies dans le temps. Nos yeux humains ne percevraient pas ces objets comme cela, avec ces couleurs. Pour autant, ces couleurs « irréelles » nous montrent quelque chose de bien réel et présent dans notre univers.

⁴⁶ D'autant que les gaz qui s'accumulent juste avant la formation de l'étoile sont à une température très basse : ils émettent dans l'infrarouge. Donc l'observation dans l'infrarouge permet d'observer ces fortes densités de gaz à basse température et donc d'en déduire la formation d'une étoile en cours.

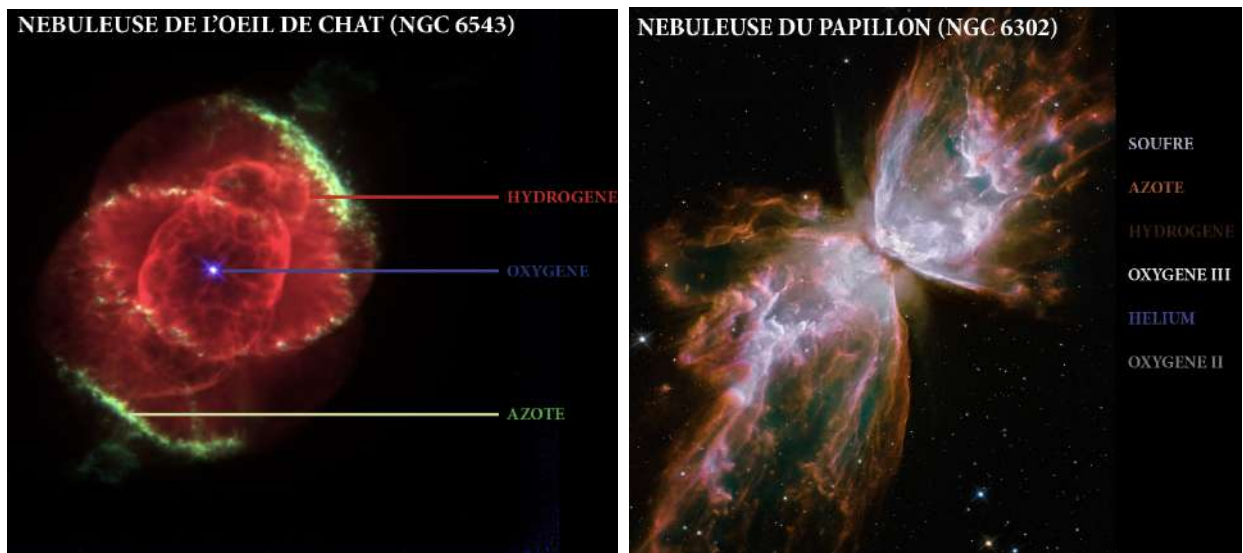
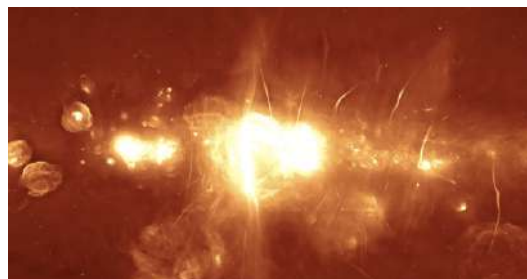
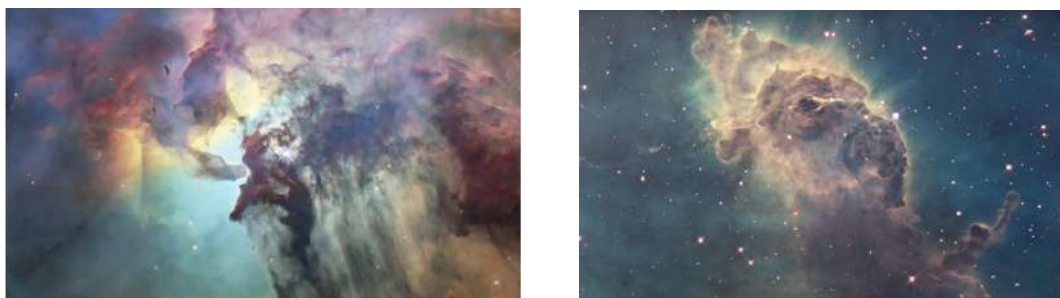


Fig. 88 & 89

L'utilisation de la couleur permet donc de représenter une grande dynamique de données, à la fois des détails fins et des éléments visibles. Cette dynamique pourrait se perdre si l'on restait à des images en nuances de gris (comme par exemple sur l'image ci-dessous où l'utilisation de couleurs allant de l'orange au blanc permet de signifier l'intensité du signal radio en différents endroits de l'univers).



*Fig. 90 Le centre de la Voie Lactée en ondes radios
IMAGE : MeerKAT Telescope*



*Fig. 91 Nébuleuses par Hubble
IMAGES : Hubble / NASA*

Enfin, pour terminer cette présentation des caractéristiques des vues de l'espace et de leur traitement, l'entretien avec François Lévrier (enseignant-chercheur en astrophysique) nous

permet d'échanger concrètement sur les différentes techniques mises en œuvre et sur la relation entre traitement scientifique et interprétation d'une image spatiale.

CHAPITRE 5. L'INTERPRÉTATION PHYSIQUE DE L'IMAGE OBSERVÉE : ENTRETIEN AVEC FRANÇOIS LEVRIER

(réalisé le 20 mai 2021)

Pouvez-vous vous présenter ?

Je suis François Lévrier, enseignant-chercheur en physique et astrophysique. Je suis maître de conférences à l'Ecole Normale Supérieure, où j'interviens environ 200h par an devant les étudiants. Le reste du temps, je me consacre à la recherche. J'ai un parcours classique de ce qu'on peut appeler la « voie royale », avec une CPGE puis j'ai intégré l'école Normale Sup et ensuite j'ai fait une thèse de doctorat, suivie de périodes de recherche au sein de l'ENS et d'Oxford. Depuis 2008, je suis chercheur en ce qui concerne le milieu interstellaire c'est-à-dire les zones entre les étoiles, où se forment les étoiles. Contrairement à ce qu'on pourrait croire, cet espace n'est pas vide du tout (même s'il est plus vide que le meilleur vide terrestre), mais rempli de plusieurs éléments dont des particules gazeuses, des particules solides comme des poussières, des particules atomiques de haute énergie les rayons cosmiques et un champ magnétique, des rayonnements... tout cela est agité par des mouvements turbulents, soumis à la gravité des étoiles et de la galaxie... C'est très complexe et s'y recourent beaucoup de phénomènes physiques. Même si ce milieu ne représente qu'1% de la masse de la galaxie, c'est un vrai système complexe. C'est l'écosystème de la galaxie, là où se forment les étoiles, lieu de naissance et cimetière des étoiles, le cirque de la matière interstellaire.

Dans votre métier, quelles sont les images de l'espace auxquelles vous êtes confronté ? Pouvez-vous détailler les différences entre les types d'images que vous traitez ?

Je travaille avec plusieurs types d'images, issues pas que du visible, mais de tout le spectre électromagnétique allant des très basses fréquences aux fréquences radio).

Je peux être amené à travailler avec des images optiques, par exemple avec des raies dans le visible pour détecter des gaz ionisés et déduire les zones de formation d'étoiles. Dans le visible on a la lumière des étoiles, et dans le milieu interstellaire ce que l'on voit plus précisément est l'extinction de la lumière des étoiles au travers de nuages sombres de poussières qui absorbent la lumière des étoiles en arrière-plan. C'est comme ça que se manifeste la lumière des étoiles dans ce milieu. Dans le visible on a aussi des raies spectrales d'émissions comme l'hydrogène, dans les nébuleuses comme Orion qui a une couleur rouge, liée à l'émission de photons qui transitent d'un niveau électronique à un autre, car le rayonnement ionisant ionise l'hydrogène amenant à l'émission d'un photon de couleur rouge raie H Alpha.

Je suis également amené à travailler dans d'autres domaines du spectre électromagnétique, comme en radio où l'on a différentes sortes d'émission. Par exemple, on a l'émission

thermique des poussières. Les poussières sont chauffées par la lumière des étoiles, ce corps chaud - comme tous les corps chauds - se met à émettre de la chaleur et donc un rayonnement, à 1 mm de longueur d'onde, dans l'infrarouge. On peut aussi capturer un rayonnement issu de la rencontre de charges électriques (interactions de Coulomb) déviées. Certaines raies sont également associées à la rotation des molécules, on les situe à des fréquences d'environ 100 à 200 GHz.

À l'autre bout du spectre, dans les très hautes énergies, on peut voir des rayons gammas associés à une interaction de rayons cosmiques, avec des particules atomiques de très hautes énergies, qui interagissent avec des particules d'énergies raisonnables et se désintègrent pour fournir des rayons gammas.

Tout cela donne des cartes en 2D (puisque l'on n'a pas accès à la donnée associée à la profondeur), mais la troisième dimension utilisée est la vitesse : on peut ainsi remonter à la dynamique lumineuse avec l'effet Doppler, reconstruire des mouvements. En radio, à basse fréquence, on emploie un système dit hétérodyne où on mélange le signal reçu (une onde électromagnétique) avec le signal parfaitement sinusoïdal d'un oscillateur local : ce mélange se traduit en sortie par un signal en plus basse fréquence, représentant la différence entre les deux signaux d'entrée. Si la fréquence du signal reçu varie, on voit cet écart dans l'écart du signal mélangé : l'écart relatif est beaucoup plus grand puisque l'on est à plus basse fréquence, permettant de le rendre plus significatif.

Dès la “prise de vue”, différentes techniques sont mises en œuvre selon le type d'image recherché ?

Dans le visible et en UV, on utilise les capteurs CCD. On ne mesure pas une élévation de température, mais une quantité de charges liée à la quantité de photons, ensuite comptés par le système de transfert de charges quand ces charges sont amenées vers un circuit de lecture. L'astronomie professionnelle et amateur a beaucoup bénéficié du développement de la CCD et ils y sont arrivés avant le grand public.

En radio on utilise notamment des bolomètres (détecteurs à large bande, récupérant tout le spectre électromagnétique en une seule fois). Ce sont des plaques chauffées par l'absorption d'un photon : on mesure l'échauffement.

On fait aussi de la détection hétérodyne, comme évoqué précédemment, on mélange le signal reçu avec une onde qu'on maîtrise pour retirer une onde qui est la fréquence différence entre les deux. C'est la base des spectromètres.

On peut aussi utiliser d'autres méthodes (rayon x ou gamma), on compte les photons par un détecteur. La quantité d'énergie dans les hautes fréquences se mesure en “nombre de coups” avec des capteurs spécifiques.

Personnellement, mon domaine n'est pas lié à la prise de vue : j'interviens en aval, dans l'interprétation physique de l'image observée. J'ai participé à la construction de certaines

cartes de Planck, mais mon application primordiale se fait dans l'interprétation physique de ces cartes.

Dans les détecteurs, on reçoit l'ensemble du signal qui arrive d'une certaine direction. Prenons l'exemple de Planck : il tourne sur lui-même et scanne une direction à chaque instant, décrivant de grands cercles sur le ciel. Au cours du temps, il tourne sur lui-même et en orbite autour du soleil. Au fur à mesure, l'orbite (1 tour par minute) se décale. En 6 mois il avait couvert l'ensemble du ciel. Il a pu faire 5 relevés complets du ciel lors de sa mission. Les mesures brutes sont une série temporelle : à tel instant j'ai observé tel signal. Il faut faire du « mapmaking » en prenant ces séries temporelles, on sait à quel instant le satellite à pointer dans quelle direction, permettant d'établir une image qui est une carte de l'ensemble du ciel.

Mais on ne connaît pas la provenance de la lumière reçue, les fréquences étant superposées. Pour faire de la science selon qu'on observe les galaxies ou le CMB⁴⁷, on sépare ces signaux. C'est une série d'algorithmes qui séparent les composantes de l'image, les émissions galactiques et cosmologiques n'ont pas la même dépendance en fréquence, on peut arriver à éliminer l'une et garder l'autre. Par exemple, dans le traitement des données et l'interprétation physique des observations (Planck) en mesurant le CMB (émissions de grains de poussière de la galaxie), il fallait nettoyer le signal des poussières pour accéder au signal primordial.

Comment un scientifique traite et interprète une image spatiale ?

Il y a des tas de manières de représenter la même image. On peut par exemple utiliser une échelle linéaire, ou logarithmique, ou encore plus spécifique selon les besoins scientifiques.

Initialement, on dispose de chiffres. Ce sont des données numériques, qui nous disent : “dans telle direction l'intensité du signal est de tant”. Il y a ensuite un choix concernant la manière de représenter ça. Sur une échelle linéaire ? Avec l'intensité de la luminosité du pixel proportionnelle à l'intensité du signal mesuré ? Sur une échelle logarithmique, davantage intéressante si les dynamiques sont grandes ? Cela peut permettre de ne pas écrêter les éléments très intenses, et d'aller voir les éléments les plus faibles qui peuvent contenir des données intéressantes.

Le travail hors du visible se fait sur des cartes créées à partir de données d'observation. Comme évoqué précédemment, il y a tout un art de mapmaking à partir de ces données, on établit des *timeline* (suites temporelles) de photons traduits de manière numérique après un passage de l'analogique au numérique. Par exemple, dans le satellite Planck, les détecteurs sont des bolomètres. Planck reçoit un flux de photon, s'ensuit un échauffement qui donne un signal analogique, converti en un signal numérique qui est reçu sur Terre : une suite de chiffres. Puis ces séries sont combinées par des gens qui développent des algorithmes pour construire les cartes du ciel.

⁴⁷ Cosmic Microwave Background, c'est-à-dire la Fond Diffus Cosmologique : rayonnement électromagnétique très homogène observé dans toutes les directions du ciel et dont le pic d'émission est situé dans le domaine des micro-ondes

Nous avons souvent recours à des projections qui permettent de représenter la sphère céleste en 2D. Là-dedans, on va chercher des zones spécifiques, selon le phénomène étudié : les gaz de Supernovae, des zones à hautes densités, des structures très complexes...

Les images ont une structure mathématique, qui traduit la complexité des phénomènes physiques en jeu.

Le prochain satellite d'observation qui sera lancé après Planck et Hubble est JWST en oct 2021. Il travaille en optique et infrarouge proche. Selon les missions, on a différentes philosophies, et donc différentes technologies sont employées : ce ne sont pas les mêmes technologies que Planck – lui faisait un *survey*, relevé complet du ciel ou que Hubble qui pointait dans une direction, et qui était un vrai laboratoire. Néanmoins, ces différents outils sont complémentaires : pour certaines questions on regarde les données infrarouges de Planck et les données dans le visible de Hubble, pour comparer les différents processus sur une même région du ciel.

Quelles sont les images « optiques » à partir desquelles vous travaillez le plus/qui vous ont le plus marqué ?

Je travaille surtout dans l'IF lointain et dans le domaine radio. Dans le visible, je dirai que les images de Hubble sont parmi les plus iconiques. Par exemple dans la nébuleuse de l'aigle avec les piliers de gaz et de poussières. Plus près de nous et plus récemment, les photos prises par la mission Rosetta de la comète Chury sont magnifiques. Bien sûr, ce ne sont pas les mêmes échelles ou les mêmes objets. Cela reste iconique. En dehors du visible, on a eu récemment l'observation directe d'un trou noir avec le radiotélescope, l'observation directe de l'image du disque de gaz extrêmement chauffé en train de spiraler dans le trou noir, construite à partir de différents signaux radio. Ces images parlent aussi au grand public.

Dans la phase de traitement des données d'une image spatiale, quel est le rôle/la responsabilité du scientifique ?

Dans un premier temps, l'enjeu est d'enlever les erreurs systématiques instrumentales (par exemple dans le cas où un rayon cosmique a tapé dans le détecteur, il faut l'enlever sinon ça fausse tout le reste).

Il y a un enjeu "esthétique" ensuite dans la représentation des données : choisir l'échelle (log ou linéaire), la charte de couleurs. Pour Planck il y avait des consignes pour choisir telle ou telle table de couleurs pour souligner l'identité des papiers Planck, une charte graphique en quelque sorte. Les chiffres de l'ESA sont d'une couleur et pas d'une autre. Cela a des objectifs plutôt liés à la relation publique, que l'on distingue des objectifs scientifiques.

Il s'agit de pouvoir identifier le travail de collaboration en vue de la communication avec d'autres scientifiques. La table de couleurs peut aussi être choisie pour mettre en valeur des phénomènes physiques précis, en travaillant en fausses couleurs notamment. Si l'image est manipulée par zones il faut que ce soit clair, assumé. En astro les cartes doivent représenter les données de manière honnête, rigoureuse scientifiquement. On peut imaginer faire un

insert ou un zoom sur une région donnée en changeant la table de couleur pour faire ressortir quelque chose. Il y a un véritable enjeu de transparence, une notion d'intégrité : ces figures ont un objectif qui est de soutenir l'argumentaire scientifique.

Quand on sort un résultat, il y a toujours un communiqué de presse. Ils sont vus et revus par les cellules de com' et on fait en sorte que les désirs de publicité et de *flashy* n'aillent pas au détriment de la communication scientifique. Cela passe par des aller-retour entre « On aimerait montrer ça » du côté communication et « Cela changerait le sens de ce qu'on montre » du côté scientifique.

Quelles sont les différentes temporalités associées à ces images ? Pourquoi la plupart des représentations de phénomènes spatiaux se font par le biais d'images fixes ?

La majorité des objets sur lesquels on travaille sont immobiles à l'échelle d'une vie humaine. Il y a quelques phénomènes rapides dans le temps qui font l'objet d'études dynamiques, comme l'évolution d'une enveloppe d'étoile très âgée, avec des vents stellaires. On peut voir l'évolution de cette enveloppe dans le temps. Sur des échelles de temps très longues 5-10-15 ans, on peut commencer à voir des différences. Il y a aussi des phénomènes comme les Supernovae, les sursauts rapides, qui sont des phénomènes dynamiques sur des échelles courtes, nécessitant des études avec plusieurs expositions. On observe par exemple la décroissance lumineuse au cours du temps d'une Supernovae. Il s'agit là d'observations essentiellement optiques. Mais l'intérêt est de confronter les différentes longueurs d'onde. On sait que ça va injecter une grande quantité d'énergie et de matière dans l'environnement des étoiles, cela crée un déséquilibre, qui doit être traçable. On combine alors optique et radio.

Dans le système solaire, on peut avoir des dimensions temporelles écourtées, c'est aussi le cas des supernovae, des rayons gammas, l'astronomie des phénomènes transitoires. Pour comprendre ces phénomènes scientifiquement, il faut pouvoir couvrir une bonne partie du ciel très souvent, car il s'agit de phénomènes ponctuels très rapides, il faut avoir des instruments qui permettent de couvrir le ciel dans son entièreté.

En tant que scientifique, quel est votre rôle de communication au grand public ?

Cela fait partie du rôle du scientifique dans la cité (au sens grec) de dire pourquoi on est payé par l'état (rires), pourquoi on le fait ? Pourquoi c'est intéressant ? Pourquoi ça peut augmenter notre connaissance du monde ? En plus de la recherche et de l'enseignement.

Que pensez-vous de la mise en orbite des satellites Starlink et de ce que cela provoque sur l'observation du ciel ?

Je partage l'avis de mes collègues concernant les constellations de satellites comme Starlink, qui sont pour certains assez virulents notamment sur Twitter, sur le fait que ces constellations ruinent l'observation du ciel comme l'astrophotographie, notamment en perturbant les systèmes de détection automatique de ce genre d'évènement transitoires, les faisant se déclencher sans qu'il y ait d'intérêts ; même si on a des techniques de nettoyage d'une image, comme le destripping, elles sont limitées quand il s'agit de nombreux satellites.

On est face à un choix : le profit commercial d'un côté, et la recherche de notre place dans l'univers de l'autre, si je veux utiliser de gros mots. Je me place résolument du côté des sociétés astronomiques internationales qui condamnent la multiplication de ces satellites.

Pourquoi ces images sont-elles importantes pour vous ?

Et bien, par exemple, à chaque fois qu'on envoie une nouvelle sonde sur un objet du système solaire, on découvre un Nouveau Monde. C'était le cas de New Horizons récemment qui est allé jusqu'à Pluton. Avant cela, pour n'importe qui, Pluton était une sorte de bulle floue sur une image vue depuis la Terre, sans résolution. New Horizons passe à proximité et révèle un monde complexe, avec différentes textures de surface, différentes couleurs qui amènent un émerveillement. Quand Rosetta est arrivée sur Chury on était loin d'imaginer cette forme biscornue qu'elle pouvait avoir, c'était inattendu, on s'attendait à autre chose sans forme si particulière. Dans les images marquantes, il y a celle du trou noir, et hors image on a eu la détection des premières ondes gravitationnelles ; on peut aussi citer les images de l'observatoire Herschel lancé en même temps que Planck en 2009. Il avait une très bonne résolution angulaire et sensibilité, nous permettant de faire un bond dans la compréhension des structures interstellaires par exemple avec la présence de filaments, mais aussi des connaissances sur la naissance des étoiles. Ces images sont iconiques, pour moi en tout cas.

Y a-t-il une image en particulier qui vous a marqué dans votre carrière ? Pouvez-vous nous expliquer en quoi elle vous a marqué, mais aussi ce qui se cache derrière d'un point de vue scientifique ?

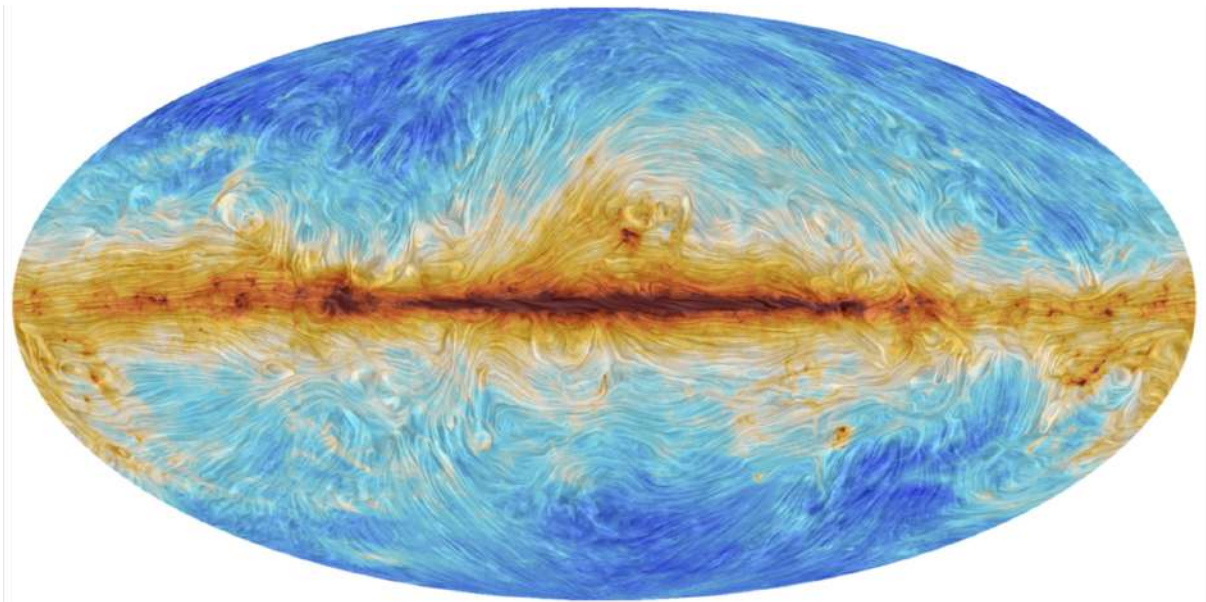


Fig. 92

Cette image représente l'ensemble du ciel, c'est une projection particulière de la sphère céleste appelée *Projection de Mollweide*. Elle détecte ce qu'on voit : horizontalement c'est le plan de notre galaxie. Ça recouvre tout le ciel donc ce qui est à l'extrême gauche et à l'extrême droite c'est la même chose. Le haut de l'image est le pôle nord galactique, la

direction perpendiculaire au plan de la galaxie vers le nord en quelque sorte, idem en bas de l'image avec le sud galactique. Cela pose le cadre de l'image. Qu'est-ce qu'il y a dedans ? En échelle de couleurs on a l'intensité de l'émission thermique des poussières, chauffées par le rayonnement des étoiles, entre 10 et 20 degrés (au-dessus) du 0 absolue. Y en a beaucoup plus quand on regarde dans le plan galactique, car c'est comme si on était au milieu d'un vinyle et qu'on regardait parallèlement au vinyle, on verrait la matière s'accumuler dans cette direction. Il y en a plus dans cette direction que dans les autres, appelées....

Par-dessus, on a une sorte d'effet drappé qui représente l'orientation du champ magnétique de la galaxie, obtenu par les mesures de polarisation. Cela crée un effet assez "Van Gogh-ien" de l'image. Cette image est importante pour moi parce que j'ai contribué à la fabriquer et à l'analyser. Cela représente un peu les 10 dernières années de mon travail. Il y a une importance scientifique, professionnelle, je la trouve simplement magnifique pour ses qualités esthétiques, le rappel à Van Gogh.

Est-ce que cette image est réelle ? On ne le verrait pas avec nos yeux, on le verrait presque si on pouvait être sensible à ces fréquences, mais l'image en couleur est déduite d'observations à différentes fréquences. On n'observerait pas cet effet de drapées, qui est un effet esthétique pour représenter une info scientifique.

L'information scientifique est dans le fait qu'à tel endroit il y a la polarisation à telle direction et donc on peut en déduire une info sur l'orientation du champ magnétique, mais scientifiquement on aura besoin de chiffres (tant de degrés depuis le nord dans le sens des aiguilles d'une montre). On est dans l'exemple où une amélioration esthétique de l'image entraîne une dégradation scientifique.

Quel est l'avenir des images spatiales ? Que pouvons-nous espérer voir de notre univers dans les prochains siècles ?

La futurologie est une science inexacte... mais on peut s'y essayer !

Clairement il va y avoir un développement de nouvelles façons de visualiser les données. Par exemple, le satellite Gaia a mesuré les positions et distances de nombreuses étoiles de la Galaxie, du coup on peut facilement imaginer une immersion dans un système de VR, ou une projection holographique qui permettrait de voyager d'un système stellaire à l'autre avec un geste de la main "à la Minority Report".

L'exploration de la dimension de profondeur commence aussi à être possible pour les nuages de poussière du voisinage solaire, on pourrait imaginer ce même genre d'immersion. C'est déjà fait, d'ailleurs :

https://www.eso.org/public/videos/orion_journey_vr/

Dans un genre annexe, il y a aussi des visualisations à l'aide d'impressions 3D :

https://chandra.harvard.edu/deadstar/images/3d_print_cards_Crab.pdf

Pour ce qui est de savoir ce que l'avenir nous réserve en termes de découvertes scientifiques, c'est encore plus hasardeux, mais certains des objectifs actuels portent sur la détection de deux signaux de l'Univers jeune :

- Un signal de polarisation du fond diffus cosmologique, très faible, qu'on appelle les "modes B". Ils signeraient la présence d'ondes gravitationnelles dans l'Univers très primordial (seulement 10^{-35} seconde après le Big Bang) et fourniraient des informations sur la physique à très (très) haute énergie.

- Un signal (beaucoup) plus tardif marquant la formation des premières étoiles et galaxies, dont le rayonnement ionise peu à peu tout l'Univers, c'est ce qu'on appelle la réionisation.

Voir cette simulation d'un cube d'Univers, par exemple :

<https://www.youtube.com/watch?v=dgXfTx2e2MA>⁴⁸”

Cet entretien avec François Levrier concernant l'interprétation physique de l'image observée par des échelles linéaires ou logarithmiques et par ce qu'il définit « l'art du mapmaking », témoigne de la complexité des images de l'espace dont certaines « parlent aussi au grand public », car la représentation des données a également un enjeu esthétique en fonction du choix du type d'échelle et de la charte de couleurs. Le partage et la communication des conclusions déduites par l'observation requièrent parfois des « ajustements » tels que le choix d'une table de couleurs *fausse* pour attirer – zoomer- l'attention sur un phénomène physique. Néanmoins, François Levrier en signale les limites. Ainsi, l'une des images qu'il garde en mémoire – celle de la sphère céleste qu'il trouve esthétiquement magnifique avec son effet Van Gogh-nien tout en possédant une valeur scientifique – est à la fois vraie et fausse étant donné qu'une « amélioration esthétique de l'image entraîne une dégradation scientifique ».

C'est sur cet aspect, malgré tout, de la portée esthétique de ces images que nous allons nous intéresser dans la partie qui suit afin de réfléchir à la place qu'elles peuvent jouer dans une narration cinématographique. Pour cela, les images fixes dont il a été question jusqu'à là, doivent être pensées en séquences animées, pouvant se rapprocher de vidéos montrant l'espace évoluer en mouvement dans le temps. Cette réappropriation des images scientifiques fixes constitue la première étape - la préparation – en vue de la réalisation d'une fiction.

⁴⁸ Les liens et références ont été fournis par François Levrier.

TROISIÈME PARTIE.
RÉFLEXION SUR LA DIMENSION
ESTHÉTIQUE DES IMAGES SPATIALES

CHAPITRE 1. ENTRETIEN AVEC ELSA DE SMET SUR LA DIMENSION ESTHÉTIQUE DES IMAGES SPATIALES

(réalisé le 26 mai 2021)

Docteure en histoire de l'art depuis 2016, Elsa De Smet poursuit une investigation de l'histoire de l'astronomie par le biais des images produites à des fins de popularisation. Voir l'Espace – Astronomie et science populaire illustrée (1840–1969), ouvrage tiré de sa thèse, est paru aux Presses universitaires de Strasbourg dans la collection « Cultures visuelles ».

Peux-tu te présenter ? Quel est ton rapport aux images spatiales ?

Je suis historienne de l'art, donc mon étude des images spatiales se fait par cet angle-là, par l'histoire des images. J'ai fait une thèse de doctorat, qui est devenue le livre « Voir l'espace ». Je me demande comment s'est construit le regard qu'on a eu au fur à mesure du 20^{ème} siècle sur l'espace, comment on a construit des manières de voir des mondes que personne n'avait jamais vu et comment ça a infusé les Pulp Magazines, le cinéma, la télévision, les supports de vulgarisation. Le prisme de l'histoire de l'art permet de rattacher ces images à leur conception formelle : qu'est-ce qu'on reprend comme manière de représenter les choses ? Quels sont les canons de représentation qui se mettent en place ?

Quel a été ton parcours depuis ta thèse ?

Après ma thèse j'ai travaillé notamment à La Fémis sur le projet Exoplanète avec un groupe d'étudiants en décor et image qui font un très court-métrage où il s'agit de représenter une exoplanète qu'on ne connaît qu'en théorie. Tout le propos de l'exercice est de concevoir une visualisation en immersion de cette planète dont on a des données partielles. On travaille avec l'Observatoire de Paris, et j'interviens dans un cours sur l'histoire du regard et de la construction visuelle de l'espace.

Je travaille depuis 3 ans sur les images récentes, depuis les années 90, sur les exoplanètes, pour essayer de comprendre comment elles sont faites. J'avais fait une semaine d'observation à l'observatoire européen en Allemagne où j'ai pu discuter avec des illustrateurs sur les normes, les règles : pourquoi on utilise telles couleurs, pourquoi on reprend toujours des canons paysagers, des motifs récurrents. J'ai beaucoup travaillé sur des paysages.

Quel est le rôle de ces images ?

Il y a des processus comme les vues d'artistes, sur lesquelles je travaille beaucoup, qui permettent de montrer et d'appréhender des choses que personne n'a vu. Cela va de pair avec l'idée que les recherches spatiales sont liées à des institutions publiques donc la communication, notamment visuelle, est très importante. L'idée de visualiser permet d'émettre à la portée de tous, d'avoir un biais collectif qui permet d'appréhender cette connaissance par un moyen autre que la lecture ou la théorie. On a tendance à dire qu'une image est plus facile à lire. Les images permettent de synthétiser les connaissances, de faire des hypothèses qu'on donne à voir, avec l'importance que ça a dans les sciences de montrer,

de voir, de donner le pouvoir aux images de faire apparaître des choses que sans elles on ne verrait pas. Il y a toute cette mythologie autour des images de Hubble avec les couleurs par exemple.

Par rapport à ça, mes recherches pour ce mémoire m'ont amené à me demander ce qu'est une image réelle ?

C'est la grande question. Et c'est là où il faut prendre en compte le prisme par lequel on regarde ces images. En tant qu'historienne de l'art, dans le dialogue avec les scientifiques, je suis souvent heurtée à leur définition d'une image « vraie », de nature « réelle », ce qui n'a parfois pas de sens pour moi. Il y a un écart énorme entre ce qu'un spécialiste de l'image astronomique considère *vrai* et ce que nous on peut considérer comme vrai.

Pour eux, il y a des protocoles de nettoyage d'images par exemple, et il est compliqué de comprendre ce qui détermine qu'une image est réelle, et ce qui l'oriente vers une interprétation « subjective ». Mais toute l'imagerie spatiale joue de ça : ce mythe de l'image vraie. Cela participe du pouvoir d'une image qui permettrait de faire apparaître des choses qu'on ne verrait pas : l'écart entre visible et invisible, réel et artificiel. Ces images ne sont pour nous que des artefacts, des artifices et en même temps ce sont les visualisations à un moment donné de l'histoire les plus plausibles d'un événement. Il y a contrainte technique, savoir scientifique, et moyens visuels, et entre ces trois paramètres arrive une image. Si on regarde les images de Hubble par exemple, elles ont été actualisées. Pour « Les Piliers de la création », image très connue, on a une image prise en 1995 et réactualisée en 2015.

Mais alors c'est quoi la vraie image ? En fait, c'est le point de rencontre entre les savoirs scientifiques, les moyens technologiques, les moyens visuels et les moyens de traitement de l'image. Ça veut pas dire que toute image est relative, mais ça veut dire que ce ne sont des vérités que situées. C'est ça qui est intéressant. Pourtant lorsqu'elles apparaissent dans la presse elles vont être naturalisées comme des vérités. Par exemple avec l'image récente du trou noir : on nous dit « Voilà, c'est ça un trou noir. » Mais en fait dans 10 ans on aura perfectionné les moyens techniques, visuels et les connaissances qu'on a sur cet objet céleste donc l'image va être réactualisée également. C'est intéressant de se demander ce qu'est l'image vraie quand on parle de non-visible, de choses dont personne ne peut faire l'expérience directe. En même temps c'est ce qui fait que l'espace, et l'infiniment grand, est un cas limite d'expérience visuelle. Ce qui rapproche ces images de l'art c'est qu'en art, le travail d'un artiste peut aussi être une manière d'appréhender le monde en faisant une proposition qui sera à l'intersection entre sa sensibilité, l'histoire de l'art, ses moyens techniques, son savoir-faire... C'est la même histoire en fait. Comment rendre sensible quelque chose (soit dans la tête d'un artiste soit dans les connaissances scientifiques) qui sinon n'existe pas ? Comment matérialiser une idée ou une connaissance ?

Tu dialogues directement avec les gens qui créent ces images.

Oui. Il y a aussi dans ces images une dimension qui relève de codes, de langages codés que seuls les connaisseurs peuvent décrypter. En même temps, la plupart des gens qui font ces

images et travaillent sur ces choses invisibles sont aussi eux-mêmes nourris d'une culture visuelle (Occidentale pour certains). Lorsque je travaillais avec des gens de l'observatoire de Paris, ils me disaient « Quand on a commencé à chercher les exoplanètes on a cherché l'étoile double parce qu'on était tous des fans de Star Wars ». Tout est inscrit dans cet imaginaire-là. C'est admis par les illustratrices de l'ESO également, qui me disent « On ne peut pas faire comme si notre esthétique n'était pas nourrie par des dizaines d'années de lecture de SF, de cinéma... ». C'est inévitable.

Il faut arriver à comprendre que ces images sont situées dans l'histoire de la connaissance, mais aussi dans l'histoire du regard. Donc quand on est dans un moment du 20ème siècle, dans un moment « futuriste » alors ces images sont aussi visuellement teintées de cet esprit futuriste. Quand on passe à quelque chose de plus « américaines années 50 » alors l'esthétique diffère parce qu'on bascule aussi dans un monde visuel qui diffère et que les images que produit une société sont aussi le résultat de ce qu'elle voit et ce qu'elle a comme bagages visuels.

La grande erreur que l'on peut faire est de croire que les images sont quelque chose de facile à lire : ce n'est pas le cas, toute image est située, et est comme un texte, le résultat d'un encodage. Il n'y a pas d'image « immédiate », ce n'est pas parce qu'on les voit qu'on peut les décrypter. Comme pour un mot, ce n'est pas parce qu'on déchiffre une lettre qu'on en déchiffre le sens. C'est là tout l'intérêt de se confronter à ces images : c'est un cas limite pour ces questions de l'écart entre ce que produisent les savants et ce que peuvent appréhender les non savants. Ces images naviguent, et servent en même temps à communiquer, faire l'état de choses, accompagner les présentations d'astrophysique.

Qu'est-ce que « la pulsion de voir » dont tu parles dans tes recherches ?

Cette notion est dans la continuité de la pulsion scopique, développée par Freud : la pulsion de concentrer quelque chose en un objet pour pouvoir le maîtriser, cerner quelque chose, le faire objet pour pouvoir l'appréhender. Jonathan Crary a travaillé dans son livre « Techniques de l'observateur » sur l'idée que le passage entre le 19 et le 20ème siècle est un moment où se débloque ce régime scopique. Dans l'introduction de mon livre, je prends l'exemple d'une image d'un paysage pris depuis la Lune où l'on voit la Terre. Cette image a quelque chose de caricatural : c'est à la fois quelque chose de subjectif, par tout un tas d'effet plastique (cadrage notamment) c'est comme si le spectateur était sur place, « C'est comme si vous y étiez » - et en même temps on nous dit que c'est une image « objective » puisque c'est une vue qui est faite par tout un ensemble d'appareils techniquement aboutis et qui nous présentent une vision des choses « telles qu'elles sont ». Des points de vue subjectifs et objectifs se mélangent. Ces images rassemblent un indicateur de vues collectives (comme l'histoire de l'espace a beaucoup fait : voilà l'image du trou noir, voilà l'image de la bille bleue, voilà l'image de la Terre depuis la lune...), mais qui en même temps sont toutes construites par des manières de voir qui ont été décortiquées par l'histoire de l'art. Cela comprend tout un ensemble de canons de la représentation qui viennent depuis la Renaissance, les paysages du 19ème siècle par exemple.

Mon travail est donc aussi de comprendre les outils plastiques par lesquels on construit ces images. On se rend compte que ce sont toujours les mêmes images, les mêmes manières de représenter les choses. La pulsion de voir est liée au fait qu'on a atteint un degré de rapport à l'image tel que voir est, depuis la fin du 19^{ème} siècle, un moyen par lequel on apprend : voir et savoirs sont liés. Comme on vit dans une société où le savoir doit être partagé, savoir et partager les connaissances/avoir le pouvoir de connaître passe la plupart du temps par l'image.

Il y a une surenchère qui se met en place puisqu'on développe des outils de plus en plus perfectionnés pour atteindre des qualités de capture et d'enregistrement. Avoir une image de quelque chose marque une véritable étape. Dans les sciences des choses invisibles, on joue beaucoup sur l'apparition presque miraculeuse de l'icône « trou noir » « comète » « exoplanète », quelque chose qui relève presque de la foi. Voir permet d'atteindre une nouvelle étape. Donc on a construit un rapport au savoir et à la société globale par lequel on a besoin de voir pour mettre en magasin cette connaissance, la légitimer, la partager.

L'exemple du trou noir est intéressant pour cela. C'est un projet visuel fou, qui crée un rassemblement de 8 télescopes quasiment du diamètre de la Terre, 4 équipes qui travaillent à produire 1 image. Bien sûr cela permet de rassembler des milliards de données, mais ça montre quand même la force, le pouvoir accordé dans les sciences à l'image comme accès au savoir, comme balise. Tout le 20^{ème} siècle a renforcé cette idée, voir est savoir, et il y a un challenge de perfectionnement d'outils.

Ces images s'inscrivent aussi dans l'histoire de l'importance médiatique des sciences, dans l'histoire de l'industrie qui fabrique ces technologies et instruments. En discutant avec les gens qui travaillent sur cette image de manière théorique sur les connaissances du trou noir, elle est présentée comme un moyen supplémentaire, un levier pour comprendre d'où nous venons, où nous allons et qui nous sommes. Cela passe par l'image !

Quelles sont les images qui t'ont le plus touchée ?

Parmi les images qui m'ont fait le plus fortement réagir ce sont celles du 19^{ème} siècle, où j'ai été très surprise de voir à quel point les images reviennent, et qu'il peut y avoir deux siècles d'écart entre des images qui sont sensiblement les mêmes (et j'en parle dans le livre). La répétition de certaines images est marquante. Une image qui se reproduit beaucoup, et qui va être dans le cinéma, qui tente de rendre compte de la réalité de ce que l'on sait, c'est celle de la Terre depuis la Lune. C'est une image sensationnelle à chaque fois qu'elle est diffusée, et qui est tout le temps la même, et qui représente « ce qu'on verrait si on y était », même s'il n'y a qu'une poignée de personnes qui ont réellement vu *approximativement* cela. L'image du trou noir aussi est fascinante pour tout ce qu'elle a englobé derrière, comme évoqué précédemment.

Des recherches en psychologie parlent de l'effet que cela produit chez les astronautes qui ont pu voir la Terre dans sa globalité, selon le terme « overview effect ».

Tout à fait. C'est très intéressant. Dans son livre *La Terre vue d'en haut*, Sebastian Vincent Grevsmühl raconte l'histoire de ces images-là. Il parle du fait par exemple que les premières images de la Terre étaient verticales. On les a publiés à l'horizontale pour faire paysage, pour faire cet « overview effect » et reprendre ces canons de l'histoire de la représentation qui disent « Si je sais comment me positionner dans cette image je peux l'appréhender ». C'est tout ça l'histoire du paysage. « Si je sais où me situer je sais où je suis, je peux regarder autour de moi ».

Clairement. D'ailleurs, la première étape dans le traitement des images spatiales est d'identifier la source de lumière (généralement le soleil), et d'orienter l'image de telle sorte que cette source soit en haut.

Bien sûr. Il faut faire de ces endroits des endroits que l'on peut regarder. Les images de Hubble jouent sur quelque chose de très romantique. C'est développer un espace visuel qui nous fait croire que c'est ce qu'on verrait si on y était. Et c'est ça l'histoire de l'image spatiale, dans le fond. Les images qui ne rentrent pas dans cette catégorie-là n'ont pas la même place ni médiatique ni communicationnelle, et sont utilisées pour autre chose (de la modélisation, des utilisations scientifiques internes...). Mais les images dont nous parlons ici ont ce postulat, depuis le milieu du 19ème siècle. C'est ça aussi le régime scopique : si tu étais sur place, voilà ce que tes yeux pourraient voir.

Alors que ce n'est pratiquement jamais le cas : aucune de ces images ne correspondent à ce que l'œil humain verrait, puisque même les images issues du visible sont des images avec des temps d'exposition longs, voire même des composites de plusieurs images...

C'est ça. Pour autant ça ne veut pas dire que ces images sont trompeuses, ça ne veut pas dire « Tout est trafiqué », c'est aussi là-dedans qu'il ne faut pas tomber. Mais il faut être conscient que ce sont des constructions visuelles très complexes dans leur nature. Dans son livre *Picturing the cosmos*, Elisabeth Kessler, une historienne de l'art, parle d'images de Hubble et emploie le terme « sublime astronomique », désignant cette manière de construire dans l'histoire le romantisme spatial. C'est une dimension dont sont très conscientes les institutions qui produisent ces images, en les mettant en ligne sur les réseaux sociaux notamment selon différents formats. Elles sont faites pour être partagées et créer un « album d'images belles », avec un travail sur la « pretty picture », la « belle image ». Dans cela il y a une dimension sensationnelle.

Que penses-tu de l'avenir des images spatiales ?

C'est un sujet sur lequel je réfléchis. C'est très compliqué. Je pense qu'un vrai problème se pose. Un des obstacles les plus grands dans mon travail vient quand je dois parler avec les scientifiques de leurs images. Souvent mes questions sont incomprises ; ils ne comprennent pas pourquoi je questionne ces images. Je leur explique que si je me demande « Pourquoi en

1920 on a telles images et en 1970 telles images et en 2010 telles autres ? » c'est parce que je pense que l'historien des images peut permettre d'avoir une pensée réflexive pour penser les images de demain. Pour l'instant il n'y a pas beaucoup de réflexivité, on a tendance à perpétuer des modèles très classiques : pour les paysages (quand on parle de planètes) on est dans un registre type 19ème, pour les vues en profondeur un peu plus verticales les références sont plutôt cinématographiques avec les grands films des années 70 sur le sujet... Ces images ne sont pas vraiment questionnées, les gens qui les font ont surtout l'impression d'être au service des contenus scientifiques et n'ont pas toujours conscience qu'ils sont nourris de corpus visuels. Des chartes graphiques sont mises en place pour visualiser ces connaissances, mais ces chartes elles-mêmes ne sont pas vraiment interrogées.

Ces images sont extrêmement nourries par les rhétoriques qui vont derrière. Si on nous parle de conquête spatiale, avec Mars notamment, ce sont des images qui sont habitées, par le robot qui se balade, en paysage, avec en sous-entendu « Voilà ce que vous verrez quand vous y serez ». C'est pareil pour les exoplanètes. Sur des missions comme Rosetta, le régime est plus « science-fiction ». C'est des images dictées par les récits qui les accompagnent. Ces récits sont politiques, industriels, scientifiques, médiatiques. C'est ce qui les rend fascinantes, car elles sont le carrefour de toutes ces questions-là. Donc je ne sais pas ce que seront les images de demain mais je suis bien curieuse de voir. J'aimerais bien travailler avec des gens qui fabriquent ces images et trouver un interlocuteur pour les questionner. C'est un peu ce que fait Peter Galison dans ses documentaires notamment sur l'image du trou noir. Il se demande quelle est l'image qui va être construite, sachant qu'on partait de rien puisqu'on n'avait aucune représentation d'un trou noir. A la fin le résultat reste un objet céleste rond, bien centré, au milieu de l'image, avec des contrastes qui permettent de situer les formes, le moins obstrué et le moins flou possible.

Ce qui est intéressant c'est qu'avant que l'image du trou noir soit faite par la réunion de ces 8 télescopes, l'image la plus pertinente et précise d'un trou noir qui existait est celle qui avait été faite pour le film *Interstellar*, parce que Christopher Nolan avait consulté Kip Thorne, prix Nobel de physique spécialiste dans les trous noirs et leur visualisation. A l'époque (2013/14) il n'y avait pas les moyens mis en place pour faire cette image. C'est donc les moyens mis dans *Interstellar* par l'industrie cinématographique qui avaient permis de faire une image du trou noir basée sur des hypothèses scientifiques extrêmement précises en bénéficiant du conseil d'un spécialiste. En 2014, cela nous donne une image très cinématographique. En 2019 quand l'image apparaît elle est tout sauf cinématographique, est même détournée sur internet. Elle est presque « décevante » par rapport aux images du trou noir vues dans *Interstellar*. Pour le film, l'image était extrêmement plausible scientifiquement. Mais les données qui ont permis de faire le trou noir dans *Interstellar* sont théoriques, alors que les données qui ont permis de faire l'image du trou noir en 2019 sont des compilations de données d'observations.

L'industrie cinématographique dans l'histoire a permis parfois de montrer des choses que les moyens scientifiques ne permettaient pas. Il y a toute une histoire du conseiller scientifique dans les films qui s'intéressent à l'espace (récemment Aurélien Barrau sur *High Life* de Claire

Denis). A l'époque où l'astronautique n'existait pas, il y avait quand même des gens qui avaient développé l'idée de la fusée sans qu'elle soit acceptée par les académies : c'est Fritz Lang qui fait *La femme sur la lune* (1929) et donne les premiers moyens aux scientifiques de construire une maquette de fusée, qui sera ensuite la V2. Donc le cinéma a joué un rôle, tout en nourrissant des manières de voir. Il y a donc des vases communicants, avec tous les films qui cherchent à être plausibles scientifiquement et emploient des conseillers scientifiques, ils produisent des images qui ensuite vont nourrir les scientifiques qui vont les voir. Ce va-et-vient est compliqué à cerner. Il faut le prendre en compte : ces images-là sont toujours dans une part de négociation, de dynamique entre science et culture visuelle. Le dosage entre les deux est très fin.

Comment faire une image juste scientifiquement, mais « un peu sexy », c'est leur travail quotidien. Le dosage dépend de la nature même de l'image. Celle du trou noir était si importante scientifiquement et médiatiquement que sa manipulation était limitée, elle devait acter quelque chose, et elle est faite par des gens qui sont techniquement habilités à produire ces images. Ce n'est pas le cas des vues d'artistes, où ce sont des illustrateurs qui prennent des données scientifiques pour faire des hypothèses visuelles. Dès qu'il y a des données, le régime visuel change, et les images sont tout de même largement traitées. Elles ont toutes des statues et natures différentes. Elles sont une vérité à un moment donné qui doit être située et associée au savoir qui l'accompagne. Elles vont avec les connaissances et ne doivent pas être isolées. C'est souvent ce qui se produit avec l'esthétique et le régime médiatique, qui les prend pour des « belles images ».

Cet entretien avec Elsa De Smet a à la fois réconforté mes hypothèses sur la nature complexe et la porosité des images de l'espace entre objets scientifiques et objets esthétiques, et ouvert d'autres pistes plus générales sur la relation et les écarts entre visible et invisible et d'autres termes : entre le réel, sa représentation par une image et son interprétation variable selon non seulement le point de vue (« Il y a un écart énorme entre ce qu'un spécialiste de l'image astronomique considère *vrai* et ce que nous on peut considérer comme vrai »), mais également le moment où elle est observée, avec notre expérience du regard lui-même conditionné par un savoir à un moment donné de l'Histoire. Ainsi, si les premières images de la Terre étaient verticales, c'est sous l'influence des canons esthétiques de la représentation du paysage qu'elles ont fini par être représentées en horizontal.

Le « sublime astronomique »⁴⁹ puise dans les savoirs et les images qui façonnent notre imagination, elle-même alimentant l'intuition chère aux scientifiques. Les astronomes eux-mêmes peuvent ne pas être toujours pleinement conscients de la force avec laquelle les images collectives de notre culture visuelle façonnent leur pensée scientifique. C'est ainsi que certaines images de Hubble reprennent les canons des peintures de paysage⁵⁰ et vice-versa

⁴⁹ Elizabeth A. Kessler, *Picturing the Cosmos : Hubble Space Telescope Images and the Astronomical Sublime*, University of Minnesota Press, 2012.

⁵⁰ Fenella Saunders, « Imaginer le cosmos », <https://www.americanscientist.org/article/picturing-the-cosmos>

que les images cinématographiques de l'espace construites à l'aide de conseillers scientifiques vont finir par nourrir ces derniers. D'où la frontière nuancée entre Art et Science.

Dans le chapitre suivant, je propose une démarche artistique qui emploie ces images dans une narration de fiction cinématographique.

CHAPITRE 2. INTÉGRER LES IMAGES SPATIALES À UNE NARRATION CINÉMATOGRAPHIQUE.

J'ai développé un projet de court-métrage de fiction dans lequel des images de l'espace seront intégrées. Plus précisément, je compte intégrer des images de la comète Chury 67P issues des missions de l'ESA en 2015/2016 avec la sonde Rosetta/Philae.

Pour des raisons liées à la pandémie, je n'ai pas pu produire et tourner ce court-métrage dans le cadre de ma PPM. Je compte le réaliser l'année prochaine. Je vous présente donc le travail préparatoire dont ce projet a fait l'objet ces derniers mois.

Le projet s'intitule *Laniakea*. Merci de ne rien partager.

Résumé

Depuis Paris, Yanice, sa sœur Aya et leur ami Maelo voient une comète traverser le ciel. Fascinés par le spectacle, ils n'ont qu'une idée en tête : partir à l'aventure pour découvrir l'endroit où la comète s'est écrasée. Commence alors un voyage mystique qui va les mener par-delà forêts, lacs et montagnes, jusqu'à leur destination : Laniakea.

Extrait du synopsis

Une comète traverse l'espace, un feu crépitant à sa surface. Du fin fond de l'univers, une voix mystérieuse résonne dans l'immensité. La surface rocheuse de l'astéroïde défile à toute vitesse...

Yanice (24 ans) et ses amis skatent à fond sur le Boulevard Stalingrad. Ils poussent, sautent, dérapent et slaloment entre les voitures et les passants, inarrêtables. Soudain, la comète traverse le ciel ; Yanice s'arrête pour contempler ce spectacle incroyable. Au même moment, Maelo (21 ans), son ami, fixe un carré de ciel par le velux de sa chambre, absorbé lui aussi par la vision de la comète ; tout comme Aya (21 ans), la petite sœur de Yanice, qui observe ce spectacle depuis un arrêt de bus.

Plus tard, sur une petite place près de la Villette, Yanice contemple encore la trace laissée par la comète. Il échange avec ses amis sur cet évènement mystérieux, puis repart en skate, déambulant librement dans les rues de Paris. Il fait quelques courses dans une épicerie puis flâne dans les rues du 19ème sous un soleil couchant.

Maelo est toujours enfermé dans sa chambre. Inspiré par l'objet céleste, il dessine et compose de la musique. Il se penche à sa fenêtre pour enregistrer des sons de la ville.

De son côté, Aya traverse la ville en bus pour se rendre à son cours de boxe à Belleville. Elle se défoule, s'applique à effectuer les enchaînements dictés par son entraîneur. Non loin, de jeunes asiatiques déguisés en dragon préparent une cérémonie. Aya, plongée dans son

entraînement, parvient à atteindre un état de concentration totale. Non loin, le dragon prend vie. Dans un étrange corps à corps, Aya semble entrer en connexion avec la créature.

Le soir venu, Yanice raconte le passage de la comète à son père. Il est partagé entre le besoin de rester auprès de lui et l'envie de découvrir l'endroit où elle a atterri. Son père, bienveillant, semble déjà connaître le destin qui attend son fils ; il l'invite à lâcher prise et à partir à l'aventure. Plus tard, Yanice est allongé dans sa chambre et contemple son plafond, qui s'est métamorphosé en voie lactée. Aya le rejoint ; elle souhaite partir avec lui. Maelo les appelle ; il se joint également à l'exploration.

Le lendemain matin, Yanice, Aya et Maelo se retrouvent pour leur départ, équipés pour l'expédition. Sur leur chemin, ils croisent Rize, personnage lunaire et excentrique qui les met sur la voie ; le petit groupe se dirige vers un tunnel caché au creux de la ville, et s'y engouffre...

S'ensuit une immersion au cœur d'images et de sons étranges. Ils ressortent de l'autre côté du tunnel dans une forêt luxuriante et mystérieuse. Après un temps d'hésitation, Maelo initie le mouvement. Ils quittent le chemin en remontant le cours d'une rivière. Aya observe les oiseaux et les nuages dans le ciel. Yanice ramasse des fleurs et commence à composer un bouquet. Ils se perdent dans la brume de cette forêt dense et sauvage où la mousse a recouvert les arbres et où des lianes créent un épais labyrinthe. Ils retrouvent la rivière, escaladent quelques rochers puis s'arrêtent sur la rive. Aya plonge ses mains dans l'eau et s'en passe sur le visage. Maelo et Yanice boivent et se rafraîchissent à leur tour. Ils reprennent leur route.

Ils arrivent à une clairière et jouent avec l'écho. Le jour décline peu à peu. En allant chercher du bois pour la nuit, ils atteignent la lisière d'une forêt de conifères sombre et terrifiante, de laquelle émanent des bruits étranges et des silhouettes inquiétantes.

Autour d'un feu, dans le calme d'une nuit étoilée, ils contemplent le ciel en discutant ; Maelo partage ses expériences, évoque ses craintes. Le lendemain, continuant de remonter le cours de la rivière, ils quittent la forêt pour atteindre une vallée. Ils gagnent peu à peu en altitude jusqu'à arriver sur la cime d'une montagne. Derrière eux, le vide et le ciel, immenses. Ils s'assoient sur un rocher et contemplent les alentours. Depuis ses jumelles, Aya décrit une scène étrange : un astronaute sort de sa capsule, grimpe une montagne, se jette dans le vide et réapparaît sous la forme d'un dragon. Le coucher de soleil peint des traînées roses orangées dans le ciel.

Ils retrouvent la rivière dans une immense vallée proche des sommets ; le ciel semble tout proche. Tout en haut, au creux du sommet de la montagne, sur le toit du monde, ils arrivent à un lac au bout de leur chemin. Après un moment d'hésitation, ils se résignent à plonger. Au fond du lac, ils retrouvent une forêt et s'enfoncent dans la densité de ses arbres, jusqu'à se perdre. Ils ne parlent plus, avancent concentrés, dans une sorte de transe.

Ils atteignent finalement une clairière. En son centre, un immense feu autour duquel sont rassemblés les êtres de l'Univers. Calmement, l'un d'entre eux les invite à continuer leur

chemin : les trois amis s'approchent du feu, puis s'y engouffrent. Yanice, Aya et Maelo flottent dans un immense paysage quelque part dans l'univers, sous la forme d'êtres de lumière.

Extraits de scénario

1) Utilisation de ces images dans le Prologue.

PROLOGUE

Ecran noir. Des sons de textures charnelles très proches et intimes se transforment peu à peu en un feu crépitant. Des images aux tons mauves et oranges apparaissent. Quelques notes de musique douces et enveloppantes résonnent. Une comète voyage dans l'espace. On distingue le paysage rocailleux à sa surface.

2) Utilisation de ces images dans l'Entracte.

15.

TRANSITION/ENTRACTE

(Note de mise-en-scène : Le passage dans le tunnel représente une expérience à la fois pour les personnages et pour le spectateur. L'expérience dans le tunnel est hypnotique et douce. La séquence dure un peu moins d'une minute.)

On voyage dans le tunnel.

L'obscurité du tunnel a complètement rempli l'image. Un très court « silence ». On entend venir de loin une longue note aigüe et des bruits métalliques. Les fenêtres carrées et colorées d'un train traversent le cadre à toute vitesse.

Ces couleurs se succèdent et leur accumulation crée un monochrome rouge. Un "rumble" sonore se crée à partir de sons pouvant être à la fois interstellaires ou sous-marins, et rappelant ceux entendus dans le prologue.

Peu à peu, les lignes de main de Marlo émanent du fond de ce monochrome en surimpression. Le monochrome évolue vers le mauve, et on voit les lignes de l'intérieur de l'oreille de Kimchi. Le monochrome évolue vers le jaune et on voit en surimpression les cheveux de Kima puis des textures rocheuses.

Les monochromes glissent peu à peu vers une image blanche aveuglante qui envahit l'écran.

Des notes aigües douces émergent de courts silences puis s'accélérent, se saccadent, avant de s'atténuer et de créer un écho qui rebondit sur des parois très proches...

De cette intense lumière blanche se découpent trois silhouettes qui avancent.

3) Utilisation de ces images dans les derniers instants du film.

FADE TO WHITE:

34. UN ENDROIT DE L'UNIVERS AU DELA DU FEU, JOUR

Marlo, Kima & Kimchi sont sous la forme d'êtres de lumière (on distingue leur silhouette, mais ils renvoient toute la lumière). Ils évoluent dans un grand paysage universel, qui pourrait être la surface d'une comète, de Jupiter, ou de la Terre. Plusieurs ambiances sonores se mélangent, peu discernables, des ambiances à la fois urbaines et naturelles. Les douces notes de carillons reviennent, et résonnent tranquillement. Ils ont atteint un état autre : ils sont partout, tout le temps, des êtres de lumière flottant librement dans l'espace.

La caméra avance avec eux, les dépasse et se perd dans la texture du ciel...

Intentionnalités

« Laniakea signifie “Paradis incommensurable” ou “Horizon céleste immense” en Hawaïen. C’est le nom qui a été donné en 2014 à l’amas de galaxies dont fait partie la Voie Lactée, et donc la Terre. Ce terme évoque en moi quelque chose de l’ordre du fantastique : c’est à la fois une notion vertigineuse par les dimensions infinies des échelles cosmiques, mais aussi très tangible puisque c’est l’univers de la Terre et donc de nos vies, notre vaisseau de tous les jours. Cela résume bien le caractère incroyable de l’essence même de nos existences.

Laniakea est un voyage cosmique et philosophique. Cela passe par la mise en parallèle du passage d’une comète, colorée et démesurée, avec nos parcours de vie, qui peuvent sembler insignifiants en comparaison. Mais comme pour cette comète, les personnages épousent une trajectoire à laquelle ils ne peuvent se dérober ; ils répondent à l’appel de l’univers. Partie visible de l’iceberg, cet objet céleste fait échos à cet immense bouillon cosmique présent au-dessus de nos têtes, mais dont nous n’avons presque jamais conscience. Sa venue sur Terre permet de nous resituer dans notre Univers, Laniakea.

À l’image de la calligraphie japonaise, le trajet du film est comme un geste, une ligne esquissée. Le sens de ce trajet est moins à chercher dans ses causes ou sa résolution, que dans le mouvement qu’il dessine. C’est un voyage initiatique qui ne se fait pas dans la douleur, mais dans l’apaisement, sans antagoniste ou motivation autre que la quête de soi.

Je souhaite raconter une histoire faite d’idées simples, mais signifiantes en travaillant sur le symbolisme tout en préservant un style naïf assumé. En cela, je suis inspiré par la structure des contes traditionnels ou des livres pour enfants. Cela se manifeste dans le prologue à travers le message délivré par un mystérieux conteur superposé aux images de la comète, qui marquera l’esprit du spectateur durant toute l’histoire. Puis, avec la rencontre des personnages excentriques de la ville qui mettent nos personnages sur la voie. Tout au long du film, l’utilisation de textures sonores et visuelles rappelant la comète servira d’échos, de mise en contexte de l’histoire. La jonction des deux parties du film, dans le tunnel, est bien évidemment une influence assumée d’Alice au pays des merveilles. Cette transition poétique et symbolique permet de faire l’économie d’une logique narrative qui alourdirait le récit. Enfin, cette intention culmine durant la dernière partie. L’espace se déconstruit, les personnages traversent des paysages naturels millénaires, la continuité entre ces décors est

mouvante, abstraite. Cet ultime voyage universel et organique s'articule autour des quatre éléments : tous proches du ciel, Aya, Maelo et Yanice plongent au fond d'un lac pour y trouver une immense clairière avec un feu en son centre. Ils dépassent ce feu pour se transformer en êtres de lumière naviguant dans L'Univers : ils ont (re)trouvé leur enfant intérieur.

Dès l'introduction, nous mettrons l'accent sur des échelles radicalement différentes. Qu'est ce qui pourrait bien lier ces images cosmiques et cette voix venue des confins de l'univers au jeune Yanice skatant à toute vitesse sur le bitume d'une grande avenue ? D'emblée, nous jouerons sur cette tension pour créer une sensation d'éclatement, renforcée par le dispositif choral de la première partie passant alternativement d'un personnage à l'autre. En même temps, nous souhaitons créer chez le spectateur la sensation d'une harmonie latente où tout a vocation à converger. Cette intuition est partagée par nos personnages principaux : ils sont rassemblés par une pulsion, la volonté de partir à la découverte de la comète. Des éléments "étranges" viennent faire ressentir cette présence planant au-dessus des trois jeunes. C'est dans ces moments qu'interviendront les mystérieuses images de la comète.

La seconde partie nous permet d'aller plus loin dans cette notion de convergence. Ici, le fantastique se substitue à l'étrange pour mieux traduire en image l'idée d'interconnexion, que tout est dans tout. La nature autour d'eux prend vie, la forêt sombre semble observer nos personnages, un coquillage se transforme en scarabée dans le creux d'une main, la contemplation du soleil couchant fait rentrer nos personnages dans un profond état d'apaisement... Les lois de la physique disparaissent, il n'y plus de continuité géographique entre les séquences. L'évolution du récit est seulement matérialisée par la montée en altitude, les paysages deviennent de plus en plus sauvages, cosmiques. Les personnages se taisent et se concentrent : ils se préparent instinctivement à l'aboutissement de leur périple. Jusqu'à l'approche du lac, nous travaillerons le son et à l'image pour créer une ambiance hypnotique et laisser préfigurer l'issue du voyage : les plans se feront de plus en plus fixes et larges, les personnages se perdront dans l'immensité des paysages. Il y aura de moins en moins de dialogues, jusqu'au dénouement métaphysique : ils feront désormais corps avec la totalité de l'univers.

La musicalité du film sera également travaillée grâce au sound design. Le thème principal du film est issu de la comète. Il sera tout d'abord entendu au début du récit, lors de son passage au-dessus de la ville, puis sera décliné sous plusieurs formes : le dragon, l'esprit de la forêt, le plafond de Yanice se transformant en cosmos, la vie mystérieuse de la nature. Toutes ces tonalités trouvent leur résolution dans la scène du feu à la fin du film. »

Extraits de moodboard

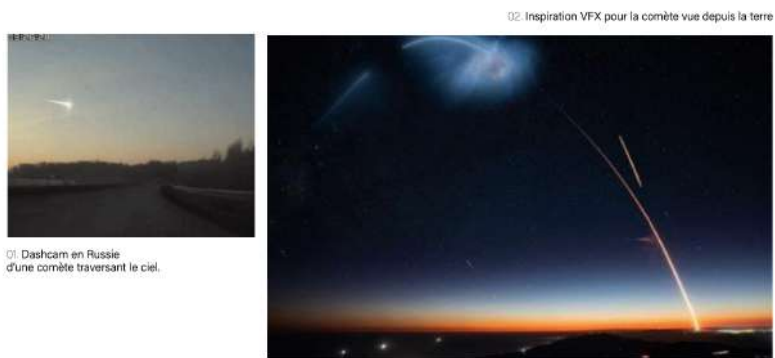
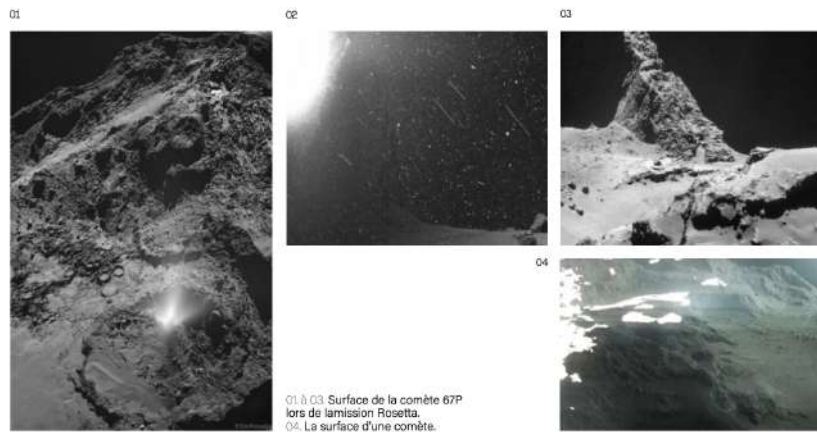


Fig. 93, 94, 95

Réflexion autour des images spatiales insérées.

Comment intégrer ces images dans un film ? Quels schémas narratifs peuvent être pensés autour ces visuels ? Comment utiliser leur portée esthétique ?

L'utilisation des images spatiales sous la forme de séquences brèves, parfois proches du flash (Prologue et Entracte), peut hypothétiquement faire ressentir la présence de l'Univers qui est autour et dans les personnages, et qui les guide dans leur quête. C'est en tout cas la démarche que j'entreprends, même si en l'état elle peut nécessiter de l'imagination, je crois que ces images et ces sons peuvent évoquer de telles idées comme par exemple la notion de « poussières d'étoiles », suggérant que tout dans l'univers est composé de la même matière, issue des étoiles.

Ce sera une autre représentation de l'espace, loin de l'idée que l'on s'en fait dans certains longs-métrages qui représentent l'espace par des images très lisibles, propres, colorées. Ici, il s'agira justement de tirer profit du mystère de ces images : bien souvent, on ne sait pas ce qu'elles représentent, les notions d'échelles, de temporalité, d'orientation sont brouillées. Cette ambiguïté ouvre la porte à l'interprétation et l'imagination quant à la nature de ce qui nous est montré. Est-ce la surface d'une comète, les profondeurs de l'océan ? Est-ce un objet de la taille d'une planète, ou une image capturée à l'échelle microscopique ?

Ce mystère sera un levier d'immersion pour le spectateur. On peut imaginer jouer avec cela de manière graduelle. Dans un premier temps, seules des images très rapprochées de textures abstraites seront utilisées. Une fois que la comète est vue par les personnages, on peut la présenter avec des plans plus larges qui font ressentir l'immensité spatiale. Ce type d'image peut revenir sous la forme de flash à d'autres moments du film, intervenant par exemple de manière rythmique : ces images peuvent être montées pour représenter d'une part une immense comète traversant avec apaisement le calme du cosmos, et d'autre part une immense comète, terrifiante cette fois, qui traverse à toute vitesse le cosmos glacial. Ce jeu-là peut amener une tension narrative intéressante.

Au montage, cela passe très concrètement par des raccords dans l'axe parmi les plus drastiques que l'on peut imaginer : un personnage voit une comète traverser le ciel / raccord « dans l'axe » / plan sur la comète. Ou encore lorsque des personnages contemplant le soleil se couchant et que le contrechamp donne à voir la surface du soleil en très gros plan prise lors de récentes missions de la NASA. De ce symbolisme naïf peut se créer des émotions « vertigineuse », une sensation de « tout » comme l'Overview Effect mentionné dans l'entretien avec Elsa De Smet. Ces images encadrent la narration type « conte », en revenant périodiquement, dans le prologue, dans l'entracte, et enfin dans l'épilogue. Je pense que l'âme de ces images, dans les proportions, les textures, le contraste, les imperfections pourra cependant faire ressentir qu'il s'agit de « vraies images », dans le sens qu'elles ne sont pas des simulations VFX, mais qu'elles ont bien été capturées par un procédé optique – et les rendent ainsi d'autant plus intrigantes – surtout que ces images sont récentes, et n'ont pas, à ma connaissance, été utilisées dans un cinéma de fiction jusque-là.

Si l'on prend pour exemple le corpus d'images de la comète Chury 67P, on constate qu'il existe, au sein même de ce corpus, une grande variété d'images : des plans très larges donnant à voir la comète dans son ensemble entourée du noir de l'espace, des très gros plans de la surface de la comète donnant à voir des textures grises abstraites, rappelant dans l'imaginaire collectif des images du monde microscopique, des plans intermédiaires laissant deviner d'immenses montagnes, ou encore des plans abstraits illisibles remplis d'artefacts. En jouant sur ces différentes valeurs de plans, on peut maintenir le mystère quant à ce que le spectateur voit, mystère renforcé par le travail sonore qui accompagnera ces images. Ce jeu d'échelle sera un parti pris du film. Par exemple, lorsque les personnages se promènent dans la forêt, ils observeront des petits mondes dans la mousse des arbres, dont le traitement visuel et sonore pourra être rapproché des images spatiales.



Fig. 96 Tests de plan macro/microscopiques, à associer aux images spatiales. IMAGE : Romain Rampillon (ancien de Louis-Lumière promo 2017 et directeur de la photographie du futur projet Laniakea)



Fig. 97 Tests de plan macro/microscopiques, à associer aux images spatiales IMAGE : Romain Rampillon (ancien de Louis-Lumière promo 2017 et directeur de la photographie du futur projet Laniakea)

Plusieurs types de rapports entre les personnages et les images spatiales seront explorés. Par exemple, nous filmerons une scène où le personnage de Yanice est couché sur son lit et contemple le cosmos sur le plafond de sa chambre. Pour cela, aux VFX, nous intégrerons à la place du plafond (sur lequel, au tournage, nous aurons mis des repères) une texture de cosmos. Cette texture sera faite à partir de nébuleuses de Hubble combinées à des textures obtenues en studio, notamment en filmant des liquides colorées dans l'eau en très gros plan.

Le film culminera dans les instants finaux en montrant les personnages évoluant dans ces paysages, après les avoir seulement contemplés avant cela (indirectement, par le montage). L'intégration de ces personnages se fait en partie par le son (intégrer leurs paroles et leurs bruitages dans ces environnements). Cela passe aussi par l'intégration visuelle. Pour créer ces images, plusieurs options s'offrent à nous. On peut imaginer filmer les comédiens sur fond vert, et ensuite utiliser les images de Rosetta comme pelure du fond vert. Si l'effet obtenu n'est pas convaincant, on peut imaginer filmer la pelure du fond vert séparément. Pour cela, notre démarche pourrait consister à filmer un paysage terrestre (en montagne, dans le désert) en utilisant des filtres, et par un travail de texture et de contraste en post-production, raccorder ce paysage aux régimes d'images issues de la mission Rosetta. Ainsi, on pourrait obtenir, comme évoqué dans le scénario, un « *grand paysage universel qui pourrait être la surface d'une comète, de Jupiter, ou de la Terre* », et explorer par le langage cinématographique des idées difficilement exprimables autrement.

Ci-dessous quelques tests. En 1, image prise sur Terre, dans le sud de la France, d'un paysage rocailleux. En 2, la même image, sur laquelle j'ai modifié quelques paramètres de saturation, contraste... pour raccorder avec les images prises par Rosetta de la comète Chury 67P. Le résultat est satisfaisant. On pourra imaginer incruster des personnages là-dessus, en utilisant le paysage terrestre retouché comme pelure d'un fond vert par exemple.



Fig. 99 Image initiale, prise sur Terre dans le sud de la France. Fig. 100 Image retouchée, pour raccorder avec les textures d'images de Chury 67P

Travail du son

Dans ce projet, le travail du son entendu sur les images spatiales sera primordial. Le son pourra décupler les possibilités imaginatives de ces images, et permettre l'immersion du spectateur. Ce travail, associé à celui du montage, permettra notamment de pallier les limites techniques des images (cadence d'image, fluidité des mouvements). Le son pourra véritablement donner corps à ces images, les incarner. Pour cela, il y a plusieurs pistes de réflexion. La représentation sonore de l'espace à partir d'ondes enregistrées dans l'espace (dans la continuité d'une démarche « documentaire » entreprise en montrant de « vraies » images de l'espace) est une possibilité. L'ESA a mis en ligne des fichiers sonores de plusieurs minutes des ondes radios enregistrées par la sonde Rosetta et convertis en ondes sonores. C'est intitulé « Le chant de la comète », car le résultat obtenu est très musical. C'est une manière de faire entendre quelque chose qui pourrait se rapprocher d'un son « in » ; bien que, comme pour les images, ce n'est pas réellement « ce qu'on entendrait si on y était ».

Mais pour explorer d'autres possibilités esthétiques offertes par ces images, il est aussi intéressant de voir quels autres types de sons on peut y juxtaposer. Par exemple, l'utilisation

de sons issus des profondeurs marines ou du monde microscopique terrestre peut jouer sur le sens de ces images, comme un effet Kulechov qui brouillerait les pistes quant à la nature de ce que le spectateur voit : en utilisant par exemple des sons intimes, très proches à la limite de l'ASMR, des textures évoquant des micro-mondes, sur un corps céleste aux dimensions gigantesques. Faire entendre des sons associés dans l'imaginaire collectif à des textures terrestres (éléments naturels, minéraux...) peut également permettre de recontextualiser notre existence dans un Univers bien plus vaste que celui que nous percevons au quotidien. Dans ce film, c'est notamment à cela que sert l'utilisation de ce régime d'image. On peut donc y associer un thème musical, comme évoqué dans la note d'intention. Dans les premiers instants du film, on développe un langage sonore (notes, instruments, accords) associé à ces visuels de comète, qui reviendront dans le film pour infuser des moments étranges dans une narration « réaliste », en ville par exemple.

En effet, si j'ai surtout évoqué dans ces recherches les questions liées aux représentations visuelles de l'espace, un sujet d'étude tout aussi passionnant porterait sur les représentations sonores de l'espace. De prime abord, il est admis qu'il n'y a pas de sons dans le vide spatial. Mais comme pour les couleurs des images spatiales, qui sont souvent des interprétations de données n'appartenant pas aux visibles, des ondes peuvent être captées dans l'espace et convertit en ondes sonores, bien que nous n'entendrions rien si nous y étions. Ces ondes peuvent permettre de modéliser des phénomènes spatiaux, et permettent d'entendre le chant d'une comète, ou la rotation et collision de deux trous noirs. De ces données sonores peuvent être interprétées tout un tas de données scientifiques. Par exemple, l'enregistrement en 2015 des ondes gravitationnelles, prédites par Einstein un siècle auparavant, est considéré comme une découverte scientifique majeure de ces dernières décennies. Leur écoute est à la fois un objet scientifique précieux notamment pour la compréhension des trous noirs, mais également une expérience sensorielle et esthétique fascinante, musicale.

« Si vous flottiez à proximité de deux trous noirs entrant en collision. Pendant qu'ils orbitent, ils font vibrer l'espace-temps, comme des baguettes sur une batterie. Des ondes gravitationnelles sont émises, elles étirent et compressent l'espace. Cette vibration est sonore, on l'entendrait bien qu'il s'agisse du vide spatial. Les ondes gravitationnelles sont comme des ondes sonores de l'espace-temps. L'enregistrement de ces ondes était la première expérience directe de l'existence des trous noirs, qui n'étaient auparavant observés que selon l'influence qu'ils avaient sur l'environnement autour d'eux. Le signal avait traversé plus d'1 milliard d'années, avant d'être enregistré par l'homme. Les ondes émises par le système formaient des deux trous noirs en collision et en rotation, nous donnent des informations sur leur mouvement, leur dynamique. On peut entendre le son devenir plus calme lorsque le système est en rotation d'une manière qui éloigne les ondes gravitationnelles de la Terre, et devenir plus fort lorsqu'elles se dirigent vers la Terre... puis les ondes deviennent de plus en plus fortes et rapides jusqu'à la fusion des deux trous noirs. Puis tout redevient calme, lorsque les deux trous noirs ont fusionné et n'en forment plus qu'un seul. Il y a un plaisir humain dans le fait d'être capable de faire l'expérience viscérale de tels enregistrements. »⁵¹

⁵¹ Citation issue du documentaire Black Holes : The Edge of all We know de Peter Galison (2020)

Traitement de montage

La réflexion esthétique et artistique quant à l'intégration de ces images spatiales documentaires dans une narration de fiction cinématographique se fait aussi par le travail de montage, prolongement de l'écriture scénaristique. Comme évoqué dans le synopsis, je ferai une fiction où ces images viennent encadrer le récit, comme des points d'ancrage qui donnent une profondeur et un contexte aux actions humaines filmées. Je pense que cela naîtra du travail de juxtaposition, en créant des liens dans l'imaginaire du spectateur : la vitesse de la comète mise en parallèle avec le bitume d'une grande ville qui défile, les paysages rocaillieux colorés d'une montagne face aux roches désaturées de la comète. Cela crée un dialogue d'échelles, entre celles des personnages (et du spectateur) et celles de l'Univers dans lequel se déroule l'histoire (Laniakea).

Cela se rapproche d'une certaine manière de la démarche narrative de Jason Reitman dans son film de 2014, *Men, Women & Children*, bien que lui utilise des images VFX. C'est une démarche que l'on retrouve aussi beaucoup dans le travail récent de Terrence Malick pour *Tree of Life* (fiction) en 2010 ou *Voyage of Time* (documentaire) en 2017. Il réutilise des images, principalement de Hubble, qu'il met en parallèle avec une narration « terrestre » et « humaine » basée notamment sur des sensations très fines de touché, de mouvements, de lumière. Un aspect que l'on trouve dans ces films de Terrence Malick qui m'intéresse particulièrement est le développement d'un langage visuel basé sur une multitude de formats d'images drastiquement différents. Un instant nous voyons d'immenses images de Hubble, tandis que le plan d'après est filmé avec des caméras « amateurs », avec des textures saturées, des faibles dynamiques, et des basses résolutions, comme par exemple la « toy camera » japonaise Harinezumi, ou des GoPro. Ce contraste vertigineux participe, dans mon ressenti en tout cas, à cette sensation de tout, de l'Univers englobant l'histoire racontée, que l'on tente de capturer par une mosaïque de perceptions.

Plus spécifiquement, les images que je compte utiliser sont celles de la comète Chury 67P prises lors de la mission Rosetta par la NAVCAM en 2015. Elles m'intéressent pour plusieurs raisons. Elles montrent la comète Chury sous tous les angles, et cela me sert de ressort narratif puisque mon histoire s'articule autour d'une comète. Ce sont des images récentes, qui n'ont pas été surexploitées dans les médias. Les données brutes sont publiques et nombreuses, permettant d'obtenir plusieurs minutes de matière. La résolution des images est parmi les meilleures des images issues de sondes. Leur aspect me permet de proposer une représentation de l'espace originale, loin de la représentation hollywoodienne. Je peux exploiter les textures rocheuses en nuances de gris, et de nombreux artefacts et imperfections marquent ces images, les rendant parfois illisibles, et d'autant plus mystérieuse.

CHAPITRE 3. CARNET POUR UNE MISE EN PRATIQUE

Échelles de pixels et résolution

Le problème de la taille des images est particulièrement présent si l'on veut créer des séquences animées et les monter avec des images terrestres, dans un contexte cinématographique par exemple. Beaucoup de caméras spatiales ont des capteurs de très petite taille. Voici quelques points de références :

<i>Caméra</i>	<i>Largeur du capteur (en pixels)</i>
Voyager ISS WAC*	800
Voyager ISS NAC*	800
Cassini ISS WAC*	1024
Cassini ISS NAC*	1024
New Horizons LORRI	1024
Rosetta NavCam	1024
Rosetta OSIRIS WAC*	2048
Rosetta OSIRIS NAC*	2048

(NAC = Narrow-Angle Camera ; WAC = Wide-Angle Camera).

Il est plus simple pour les caméras spatiales d'avoir deux optiques, l'une avec un angle de champ réduit et l'autre avec un angle de champ large, plutôt qu'une optique zoom, car l'utilisation d'un zoom dans l'espace serait plus risquée mécaniquement. Les deux caméras restent les mêmes en termes de capteurs et d'électroniques. Cela permet aussi d'avoir une caméra en back-up si l'autre venait à s'arrêter de fonctionner). Pour obtenir une image plus grande malgré la petite taille des capteurs (pour l'imprimer ou la manipuler), il y a plusieurs possibilités. L'une d'elles serait de prendre plusieurs images, d'utiliser les points de repère pour créer une mosaïque, comme montré ci-dessous.



Fig. 101 Différentes images d'un croissant de Callisto prises par Voyager 1



*Fig. 102 Mosaïque à partir des différentes images ci-contre
IMAGE : NASA/JPL/EMILY LAKDAWALLA*

En revanche, les données permettant de créer des mosaïques sont rares car ce sont des opérations de prises de vues coûteuses en temps et en données pour la sonde, ce qui rend ce processus peu rentable pour les scientifiques.

Une autre option serait le « upsampling », sur-échantillonnage, qui consiste à créer des nouvelles données artificielles, interpolées à partir des données existantes. Ce processus peut se faire sur Photoshop ou GIMP, pour une image fixe par exemple en calculant la valeur moyenne d'un groupe de pixels. Ce processus doit être assumé et déclaré.

Pour obtenir des images avec une résolution spatiale constante (1 pixel représente toujours la même échelle dans l'image), il faut que la caméra soit systématiquement à la même distance de sa cible. La plupart des missions de cartographie comme Landsat, Lunar ou le Mars Reconnaissance Orbiters voyagent toujours à la même distance de leur cible. Les vaisseaux d'approche comme Voyagers ou New Horizons ou Cassini s'approchent de leur cible, puis s'en éloignent peu à peu, entraînant de grandes variations dans la résolution spatiale des images. Une donnée qui rentre alors en jeu est la résolution angulaire des optiques utilisées. C'est une donnée nécessaire dans l'exploitation de ces images si l'on veut par exemple estimer l'échelle de ce que l'on voit, et comparer la taille de différents objets spatiaux. Chaque caméra, selon la focale utilisée, a un angle de champ délimité par la taille du capteur. Chaque pixel de la caméra voit une partie de l'angle de champ, qui est divisé par le nombre de pixels du capteur⁵².

<i>Caméra</i>	<i>Largeur du capteur (pixels)</i>	<i>Angle de champ (degrés)</i>	<i>Résolution angulaire (microradian)⁵³</i>
Voyager ISS WAC	800	3.17	69.12
Voyager ISS NAC	800	0.424	9.25
Cassini ISS WAC	1024	3.5	60

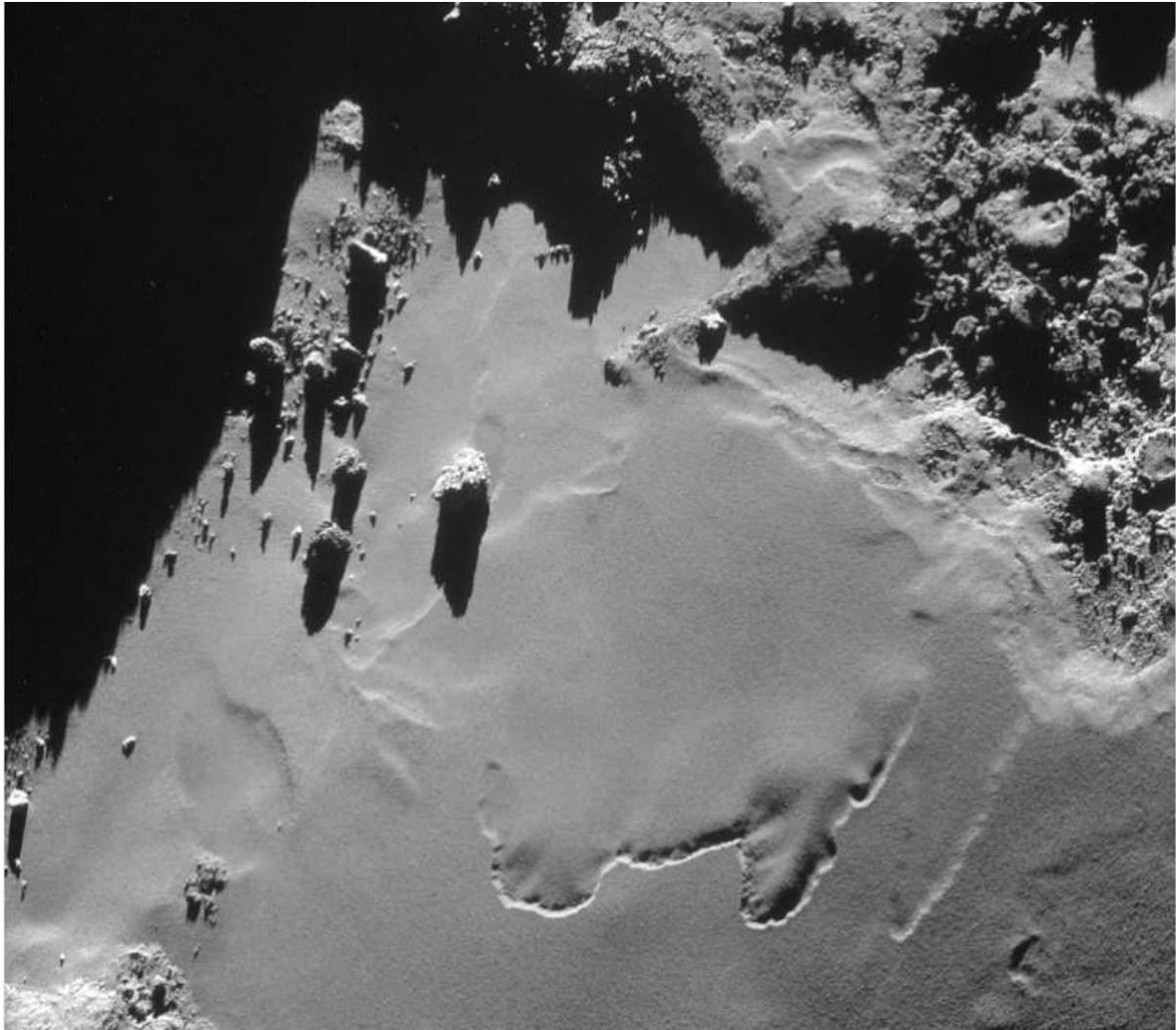
⁵² <https://www.bhphotovideo.com/explora/photography/features/cameras-on-32-interplanetary-spacecraft>

⁵³ Pour obtenir la résolution angulaire, il faut diviser l'angle de champ (en degrés) par la largeur du capteur (en pixels). Ensuite, il faut multiplier le résultat obtenu par $106 \times \pi 180$ pour convertir en micro-radian.

Cassini ISS NAC	1024	0.35	6
New Horizons LORRI	1024	0.29	4.94
Rosetta NavCam	1024	5	82
Rosetta OSIRIS WAC	2048	11.85	101
Rosetta OSIRIS NAC	2048	2.18	18.6

À partir d'une certaine distance de la cible, on peut calculer l'échelle d'un pixel d'une image en kilomètres en multipliant la distance entre la caméra et la cible (en millions de kilomètres) par la résolution angulaire en micro-radians (1 millionème de radians). Si une lune se trouve à 1 million de kilomètres de Cassini, chaque pixel d'une image prise par la NAC à cette distance couvre une zone de 6 kilomètres de largeur, et chaque pixel de la WAC couvre une zone de 60 kilomètres de large.

Une autre manière d'envisager la résolution est de se demander quel est le plus petit élément de l'image que je peux distinguer ? Par exemple, quel est le plus petit cratère que je peux observer sur la surface d'une planète ? Ainsi, une image avec une échelle de pixel (comme expliqué précédemment) de 5 mètres par pixels ne permettra pas de détecter la présence de cratères de moins de 5 mètres de diamètre. Pour discerner la présence d'un cratère, il faut qu'il "s'étale" sur au moins 3 pixels par exemple, c'est-à-dire que le plus petit cratère que l'on pourrait repérer ferait alors 15 mètres de diamètre.



*Fig. 103 Noyau de la comète 67P. Image prise le 18 octobre 2014 par la NavCam à près de 7,9 km de la surface (résolution de 67cm/pixel environ : champ de 690m de côté: pose de 6s)
ESA / ROSETTA / NAVCAM*

Où trouver les données brutes pour traiter des images spatiales et créer des séquences animées ?⁵⁴

La plupart du temps dans l'imagerie spatiale, les milliers de données d'une mission sont rendues publiques par les organismes (ESA, NASA), et sont traitées par des « *amateur image processors* » comme Bill Green. Chacun traite ces données selon sa méthode, et peut proposer sa représentation d'un phénomène spatial. Il arrive que ces images révèlent des découvertes scientifiques, ou soient utilisées dans les médias. Dans ces cas-là, seront créditées à la fois l'institution qui a récolté ces données, et la personne qui les a interprétées.

Il peut s'agir d'**images légendées**, pour lesquelles les ingénieurs traitent des données et écrivent des légendes détaillées pour préparer une sortie de presse par exemple. Ces données

⁵⁴ <https://solarsystem.nasa.gov/news/273/where-to-find-mission-raw-images/>

sont faciles d'accès et d'utilisation, mais elles ont déjà été triées et ne représentent qu'une faible portion des images brutes existantes.

En effet, chaque agence spatiale, centre spatial, université ou autre institution impliquées dans la recherche spatiale possède un bureau d'information publique responsable de rendre compte au grand public des informations sur ses recherches. Les images sont une grande partie de cette narration. Il est de leur devoir d'éduquer le public sur l'importance des missions. Parmi les institutions dont il est question, on peut citer le JPL, la NASA, l'ESA...

Les missions s'engagent à rendre toutes les **données scientifiques d'archives** publiques, avec les informations et métadonnées nécessaires à leur interprétation, à partir de l'expiration d'une période de propriété privée pouvant aller de 3 à 12 mois. L'accès à ces données ne se fait pas toujours facilement, mais ce sont les données disponibles avec la meilleure qualité. Pour cette catégorie de données, on peut citer le moteur de recherche OPUS, une base de données de la NASA.

Les autres agences spatiales (ESA en Europe, en Chine, en Inde) partagent leurs données sur leurs sites respectifs. Les données des missions russes sont plus rares.

Les données peuvent aussi être publiées sous la forme d'un **upload d'images brutes**, de manière automatique directement depuis le vaisseau, au format JPEG ou PNG. Elles sont faciles d'accès et d'utilisation mais ont une qualité assez faible, ne sont pas documentées et n'ont que peu de métadonnées.

Ces missions rendent les données publiques quelques heures après les avoir reçues du vaisseau spatial. Elles sont légèrement pré-contrastées et codées sur 8 bits puis sauvegardées en JPEG. Ainsi elles n'ont que peu d'applications scientifiques mais servent surtout à la communication avec le grand public. A partir de ces images, on peut notamment développer des outils pour les afficher dans des environnements VR sur un mobile, par exemple. Parmi les missions que l'on peut citer, il y a les missions martiennes (InSight, Curiosity), les données de la JunoCam, Cassini, New Horizons, les missions solaires, quelques images de la Terre, et la NavCam de Rosetta, dont nous allons reparler dans le chapitre suivant.

Une fois ces données récupérées, elles peuvent être visualisées selon leurs formats sur des logiciels comme Gimp ou Photoshop (qui permettent aussi de les traiter), ou encore sur NASAView, IMG2PNG, ou bien sur des outils de visualisation spécifiques à des missions comme Mariner, Venera, ou Viking Image Browsers.

Images de la comète 67P par la NAVCAM de la sonde Rosetta

En 2014, la sonde Rosetta avec à son bord la NAVCAM (Navigation Caméra) s'approche à 100 km de la comète Chury. Elles renvoient sur Terre des images montrant sous toutes les facettes cette comète. Les images donnent à voir une surface complexe, faite de falaises, de vallées, de constructions rocheuses et de cratères.

La NAVCAM prend des images en noir et blanc, et la surface de la comète est montrée avec une grande dynamique entre des zones très sombres et d'autres très éclairées, selon les conditions d'éclairage et les caractéristiques de la surface. Nous allons voir comment ces images sont prises et traitées pour montrer une grande variété dans les caractéristiques de la surface de la comète.

La faible quantité de lumière qui parvient jusqu'à la comète est compensée par des temps d'exposition longs. Il faut calculer le temps d'exposition pour qu'il annule le bruit naturel du capteur, sans qu'il soit trop long pour ne pas saturer une partie du capteur. Pour NAVCAM, il fallait que les parties les plus lumineuses de la comète soient entre 75 et 85% du niveau de saturation du capteur, ce qui signifiait un temps d'exposition de 6 secondes.

Une fois l'image capturée et envoyée sur Terre, elle est traitée pour enlever les artefacts dus aux bruits électroniques. On procède ensuite à une retouche des données selon la luminosité de l'image. Par défaut, les parties les plus sombres de l'image seront noires, donc à 0%, tandis que les parties les plus lumineuses se situeront entre 75 et 85% (si 100% représente le blanc). Les ajustements de luminosité et de contraste sont pensés pour rendre visible tous les éléments de l'image, ce qui fait que les parties les plus lumineuses de la comète deviennent blanches.

Cette manipulation, bien que standard, fait que l'image ne donne pas une impression « réaliste » de la comète, puisque les parties apparaissent blanches sur l'image sont en réalité très sombres. Cette ajustement de la sensibilité et de la perception des intensités lumineuses est un phénomène optique bien connu et fréquent, y compris pour l'œil et le cerveau humain. Cela s'appelle l'effet « anchoring », c'est la raison pour laquelle la lune apparaît blanche voire brillante sur le ciel sombre, bien que la surface de la lune soit une nuance de gris sombre, avec un albédo de 12%.

Pour se rendre compte de combien la surface de la comète 67P est sombre, il faut la comparer avec d'autres objets du système solaire aux albédos variés.

Le montage (par l'ESA) ci-dessous permet de comparer 67P avec la Lune, la Terre, et Enceladus, lune de Saturne. La luminosité des objets dans l'image est proportionnelle à leur albédo moyen. 5% pour 67P, 12% pour la lune, 31% (note de bas de page : l'albédo terrestre de 31% est une moyenne, sachant que les déserts ont un albédo de 40%, les nuages fins se situent entre 30 et 50%, les nuages épais entre 60 et 90%, et les océans entre 7 et 10%). Par souci de simplicité, un albédo de 100% a été associé à la partie la plus lumineuse de

Enceladus, le corps le plus réfléchissant du système solaire, puisque sa surface est faite de glace :



*Fig. 104 Montage comparatif des albédos de différents corps du système solaire
IMAGES : NASA/JPL/SPACE Science Institute (Enceladus); ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS
Team MPS/UPD/LAM/IAA/RSSD/INTA/UMP/DASP/IDA et Gordan Ugarkovich (Terre);
Robert Vanderbei, Princeton University (Lune); ESA/Rosetta/NavCam (67P/C-G)*

Bien sûr, cette expérience a des limites scientifiques, et sert simplement à donner une idée. Dans les faits, l'albédo dans l'image d'un objet dépend de tout un tas de facteurs, et l'oeil humain n'a pas une réponse linéaire aux différents niveaux de lumière. Mais la comparaison permet de se rendre compte de combien 67P est sombre, et de la diversité du niveau lumineux des différents corps du système solaire. Les corps ne sont pas à échelle⁵⁵.

Voici un exemple de manipulation du contraste. Il s'agit de la même image brute (fig 107 et 108), avec seulement les paramètres de contraste et luminosité qui ont été modifiés. L'image est une composite de 4 images. Sur la première image, le contraste a été étiré, de sorte que la pixel plus sombre soit noir, et le plus lumineux soit blanc. Sur la deuxième image, les intensités ont été paramétrées de sorte que la luminosité moyenne des régions les plus lumineuses se situe autour de 4% (pour correspondre au facteur de réflectance de cette comète).

⁵⁵ Un autre calcul qui permet de comprendre : Éclairement*albedo = luminance / Terre: 100,000 lm/m² x 0.31 = 31,000 lm/m² / Lune: 100,000 lm/m² x 0.12 = 12,000 lm/m² / Comète 67P: 10,000 lm/m² x 0.04 = 400 lm/m².

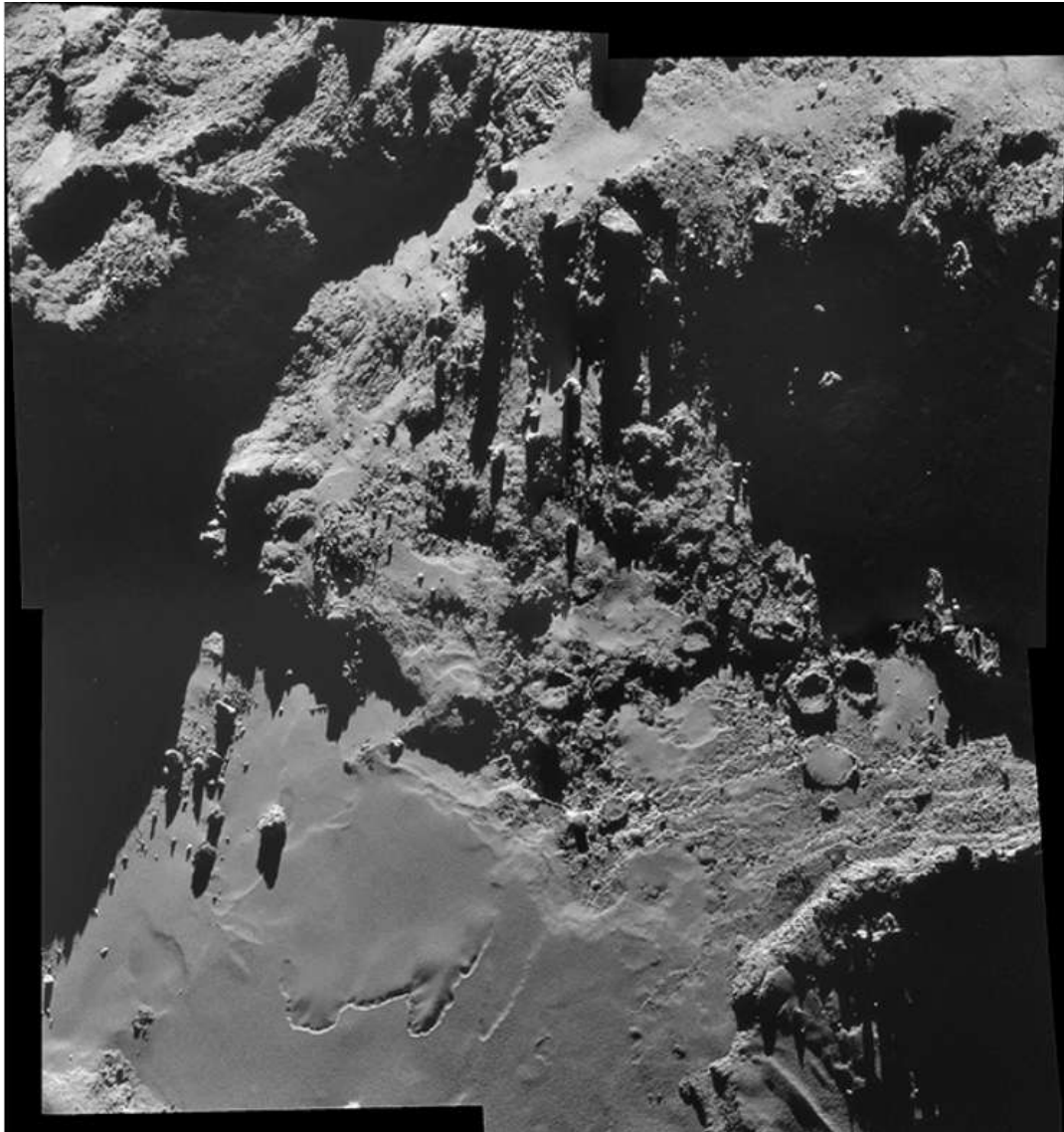


Fig. 105 Chury par la NavCam avec augmentation du contraste



Fig. 106 Chury par la NavCam avec manipulation du contraste pour rendre compte de son faible albédo

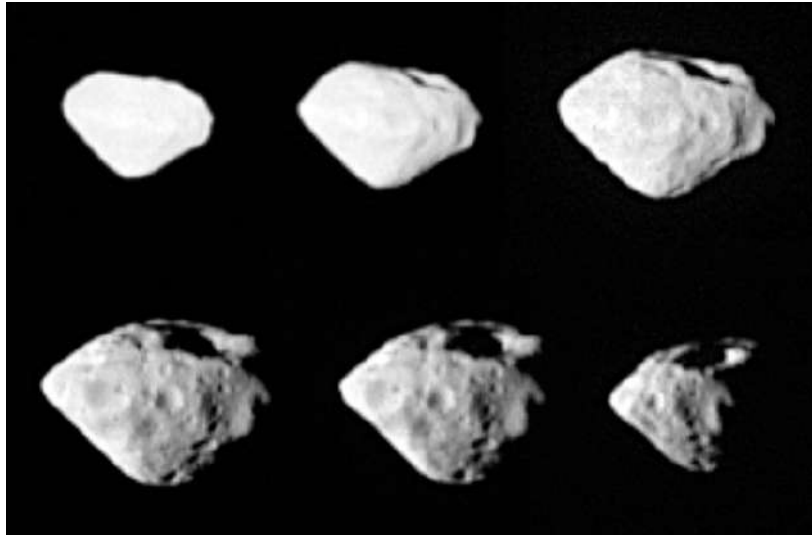
IMAGES : ESA/Rosetta/NavCam



*Fig. 107 Noyau de la comète 67P. Assemblage de 4 images prises le 18 octobre 2014 par la NavCam à près de 7,9 km de la surface (résolution de 67 cm/pixel environ)
IMAGE : ESA / ROSETTA / NACAM / GUILLAUME CANNAT*

Une autre caractéristique des images de la comète 67P par la NAVCAM est les ombres très marquées et profondes. Cela est dû au fait qu'il n'y a qu'une source de lumière, et qu'elle est très distante : le Soleil. La comète n'est pas entourée d'atmosphère, donc rien ne peut diffuser la lumière, contrairement à la Terre. La forme irrégulière de la surface peut faire que des parties sombres se trouvent éclairées sur certaines images : selon l'orientation de la comète, il peut y avoir un phénomène de réflexion. La lumière réagit aussi différemment selon les différentes compositions de la surface, certaines régions étant à « à nues » car actives, d'autres recouvertes d'une épaisse poussière. La composition de la surface de Rosetta peut être étudiée par les scientifiques grâce à la combinaison d'imageries à différentes fréquences : ultraviolet, visible, infrarouge, millimétriques, ainsi que par d'autres procédés de diagnostic en télédétection (remote sensing).

Un autre facteur à prendre en compte qui détermine l'aspect de Chury dans les images de Rosetta est l'angle entre la lumière incidente du soleil qui vient éclairer la comète, et la lumière qui se réfléchit de la comète et qui est mesurée par Rosetta. Les scientifiques parlent de l'angle de phase. Lorsque cet angle est large, la sonde voit de larges ombres portées sur la surface, car la lumière arrive avec une forte angulation, tandis que quand l'angle de phase est faible, peu d'ombres sont visibles.



*Fig. 108 Montage de l'astéroïde Steins sous différents angles
IMAGE : ESA 2008 MPS for OSIRIS Team
MPS/UPD/LAM/IAA/RSSD/INTA/UPM/DASP/IDA*

C'est un montage de l'astéroïde Steins, fait d'images prises par Rosetta en 2008. Dans la première image (en haut à gauche) l'astéroïde était devant Rosetta, et le soleil derrière la sonde, éclairant l'astéroïde de manière frontale. L'angle de phase était de zéro. Se produit alors un phénomène astronomique appelé « l'effet d'opposition », lorsque l'albédo d'un astre augmente fortement car il est observé sous un angle de phase proche de zéro degré, c'est-à-dire lorsqu'il passe près de son point d'opposition au Soleil par rapport à l'observateur. L'astéroïde est très lumineux, et n'a quasiment aucune ombre à sa surface. Cet effet, découvert par Thomas Gehrels en 1956, se produit particulièrement sur les corps qui n'ont pas d'atmosphère mais sont recouverts de poussières. C'est le cas de notre Lune, d'astéroïdes ou de comètes, lorsque l'angle de phase se rapproche de zéro. Avec l'effet d'opposition, depuis l'observateur, les ombres ne sont plus visibles, elles sont « cachées » derrière des objets, (roches, particules de poussières). Un effet similaire peut se produire lorsque les particules de poussières sont de la même taille que la longueur d'ondes de la lumière mesurée. Ces particules peuvent alors se comporter comme des petits rétro-rélecteurs, qui se traduit par une forte augmentation du niveau de lumière mesuré avec un angle de phase nul.

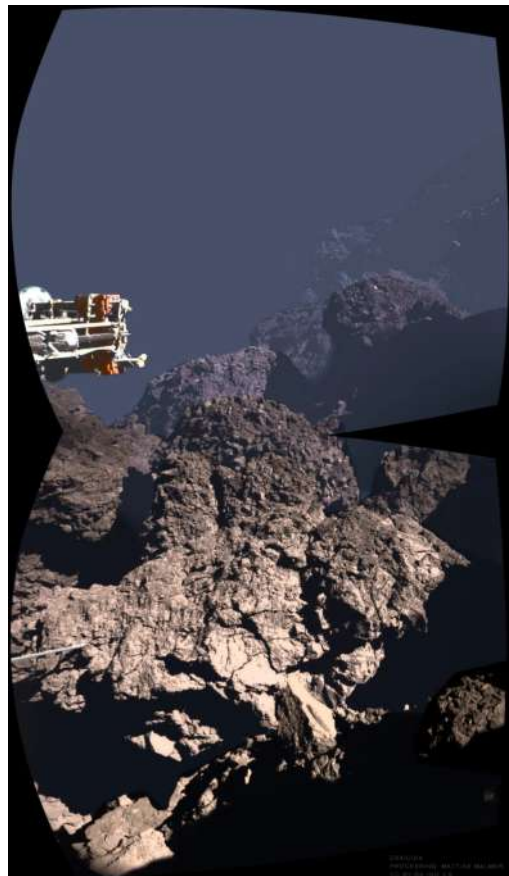
Dans les images suivantes, la sonde se déplace et l'angle de phase augmente : la luminosité globale de l'astéroïde est plus faible, mais la quantité d'ombres plus importante, révélant les aspérités de sa surface.

Ainsi, lorsque Rosetta se déplace autour de la comète 67P, les images capturées permettent d'observer différentes régions avec une grande variété de phases angulaires, et de mettre en évidence la complexité de la forme de cette comète et la variété de ces paysages. Bien que ce soit un objet très sombre, l'observation des différences, mêmes subtiles, dans la lumière réfléchie permet d'apprendre beaucoup sur la structure et la composition de sa surface.

Profondeur d'images

Les images de Rosetta peuvent être difficiles à lire. Sur Terre, la présence d'atmosphère permet de rendre compte, par les nuances de lumière et les effets optiques, de la profondeur dans un paysage. Tous les éléments sur 67P ont un fort contraste, et les aspérités de la surface donnent une apparence presque fractale aux images.

Pour aider la perception de profondeur, il est possible de « tricher » dans le traitement de l'image. On peut intégrer des « indicateurs de profondeur » par exemple, ainsi que simuler la diffusion lumineuse de l'atmosphère en colorisant l'image de telle sorte qu'on intègre des teintes bleutées et une diminution du contraste proportionnellement à la profondeur dans l'image⁵⁶.



*Fig. 109 Surface de Chury par Philae, colorisée et avec indicateurs de profondeur
IMAGE : ESA / Rosetta / Philae / CIVA / Mattias Malmer*

⁵⁶ <https://www.planetary.org/articles/comet67p-depth-cues>

Séquences animées - analyse spécifique.

Les premières séquences animées de l'espace que j'ai vues se présentent sous la forme de GIF de quelques secondes, constitués d'enchaînements d'images fixes pour créer une fluidité (avec la persistance rétinienne qui se fait à partir de 12 images/seconde environ).

Il y a une séquence en particulier qui m'a marqué lorsqu'elle a été publiée sur internet il y a quelques années. C'est un GIF de quelques secondes posté sur twitter par Jacint Roger (@landru79) en 2018. Il montre la surface de la comète Chury 67P prise par la caméra Osiris lors de la mission Rosetta en juin 2016.⁵⁷Après avoir été partagée, cette séquence de quelques secondes a rapidement *buzzée* dans les médias, faisant le tour du monde.

Dans ma démarche de vouloir comprendre ces images et construire une narration à partir et autour d'elles, j'ai voulu comprendre ce que ce GIF nous montrait. Bien que relayés dans des médias à l'international, très peu de ces médias tentaient de le déconstruire. On retrouve cette notion dont parlait Elsa De Smet : c'est un paysage de science-fiction que l'on voit dans un flux Twitter qui laisse à penser que les échelles ou la temporalité de ce qui est montré est « *ce qu'on verrait si on y était* ». On pourrait juxtaposer ce plan à un paysage rocailleux sur Terre et des liens seraient rapidement tissés entre ces deux endroits de l'Univers. Mais l'analyse de cette séquence permet de comprendre ce que l'on voit, et de nuancer le fait que c'est « *ce qu'on verrait si on y était* ». Les sites *livescience* et *Le Monde* donnent des clés de compréhension.⁵⁸

Ce gif est composé de 33 images. Elles ont été prises le 1er juin 2016, trois mois environ avant la fin de la mission Rosetta, lorsque la sonde circulait encore à 11400 m d'altitude de la comète. Les images ont été prises par Rosetta à une distance d'environ 13 km de la comète. On peut voir des étoiles dans l'arrière-plan, des flocons de glace et de poussière devant l'objectif.

Nous n'avons aucune notion d'échelle. Les « collines » visibles sur la gauche du cadre mesurent plusieurs centaines de mètres de haut. Le langage visuel de ces images est dur à décrypter : est-ce qu'il s'agit de l'échelle humaine ? De l'infiniment grand ? De l'infiniment petit ? Sur d'autres images fixes ou séquences de cette même mission, des effets d'ombres projetées et de proportions optiques peuvent presque faire penser que nous sommes face à une petite maquette.

Le traitement de Jacint Roger joue un rôle important : si l'on repart des données initiales, on constate que l'image est à l'horizontale. La rotation permet de situer le « ciel » en haut, le « sol » en bas avec les formations rocheuses qui s'élèvent « à la verticale ». Ces notions sont

⁵⁷ <https://twitter.com/landru79/status/988490703075463168?s=20>

⁵⁸ <https://www.livescience.com/62394-comet-snow-rosetta-twitter.html> & <https://www.lemonde.fr/blog/autourduciel/tag/rosetta/>.

bien sûr relatives. Le travail de luminosité et de contraste du traitement permet de révéler la comète, tout en conservant des étoiles dans l'arrière-plan.

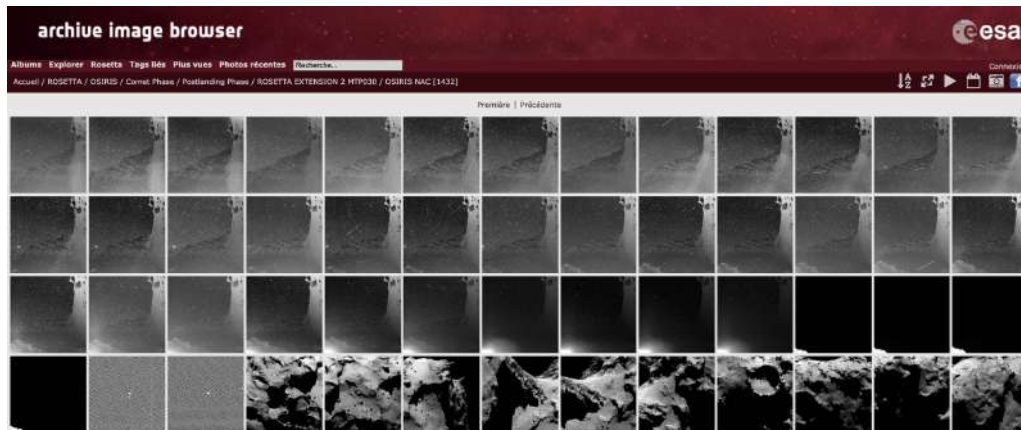


Fig. 110 Capture d'écran du site de l'ESA sur lequel on trouve les données brutes qui ont permis de créer cette séquence

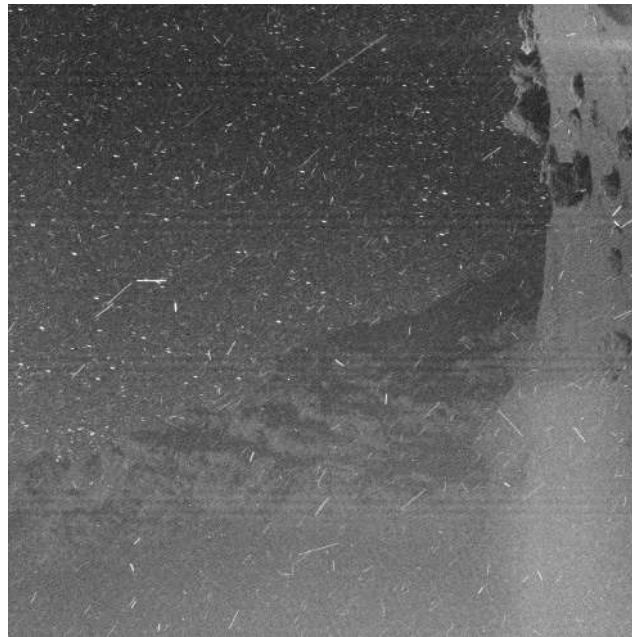


Fig. 111 Exemple d'image brute de cette séquence. On constate qu'elle a été nettoyée (les artefacts du capteur CCD faisaient apparaître des traits), retournée à 90° et contrastée, entre autres / IMAGE : Rosetta, NAVCAM, ESA

En termes de temporalité, l'enchaînement en 2 secondes de 33 d'images permet de créer un effet de fluidité (puisque le phénomène de persistance rétinienne se produit environ à partir de 12 images/seconde, et que nous sommes ici à un peu plus de 16 images/secondes) qui laisse à penser que le temps perçu est le même que le temps filmé. Or, la durée réelle qui s'est écoulée entre la prise de vue de la première image et la prise de vue de la dernière image qui composent cette séquence est de 25 minutes. Dans les métadonnées, on voit en effet que la première image a été prise à 17h00min04s environ, et la dernière image à 17h 25min 17 secondes. D'ailleurs, cela permet d'exposer longuement chaque image et d'obtenir une image bien contrastée, ainsi que de faire apparaître en fond des étoiles. Chaque image a été exposée

12,5 secondes, compte tenu du peu de lumière puisque la scène se déroule à 467 millions de kilomètres du Soleil : « *en fait, comme Rosetta survolait alors apparemment le côté nocturne du noyau, l'éclairage ne provient même pas directement de notre étoile, mais du reflet de l'éclat solaire sur le halo de poussières et de particules de glaces qui l'entouraient encore, une sorte de lumière cendrée cométaire* » précise livescience.

L'impression d'être dans une tempête de neige est liée à la longue pose, aux mouvements de la comète et de la sonde qui bouge entre les différents clichés. Ces poussières se situent quelque part entre la sonde et la comète, mais la très longue focale écrase les perspectives et donne l'illusion que la tempête se déroule sur la comète.

Comparons une séquence obtenue à partir des mêmes données, mais traitées légèrement différemment, de sorte que les étoiles en arrière-plan soient trackées/stabilisées, c'est-à-dire qu'elles restent fixes dans l'image. On voit que cela change toute notre perception de la scène. Ce qui semblait être un point fixe pris dans une tempête de neige ou de poussières cosmiques se révèle être une comète en mouvement traversant l'espace sombre et étoilé à toute vitesse.⁵⁹

La version stabilisée de la séquence permet de mettre en évidence la présence d'étoiles en arrière-plan, que l'on pourrait confondre dans la séquence initiale avec de simples poussières. Mark McCaughrean, conseiller scientifique à l'ESA, a utilisé le site astrometry.net pour identifier les étoiles visibles en arrière-plan. Il en a déduit qu'elles appartiennent à la constellation du Grand Chien, et a également identifié l'amas stellaire NGC 2362, sur les premières images.

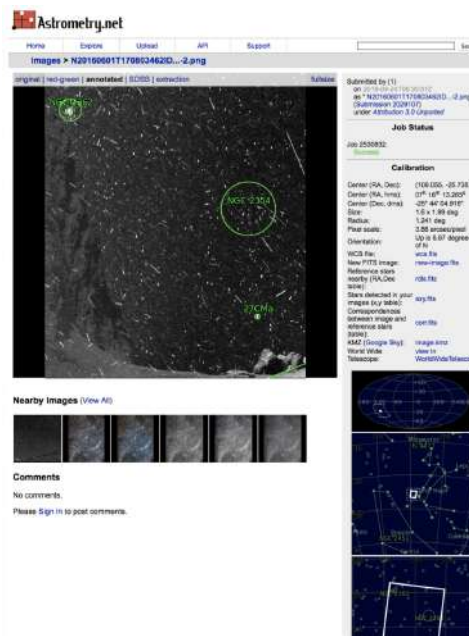


Fig. 112 Capture d'écran du site Astrometry identifiant les étoiles dans l'image
IMAGE : Astrometry.net

⁵⁹ https://www.youtube.com/watch?v=gSzFmFLg_5Y

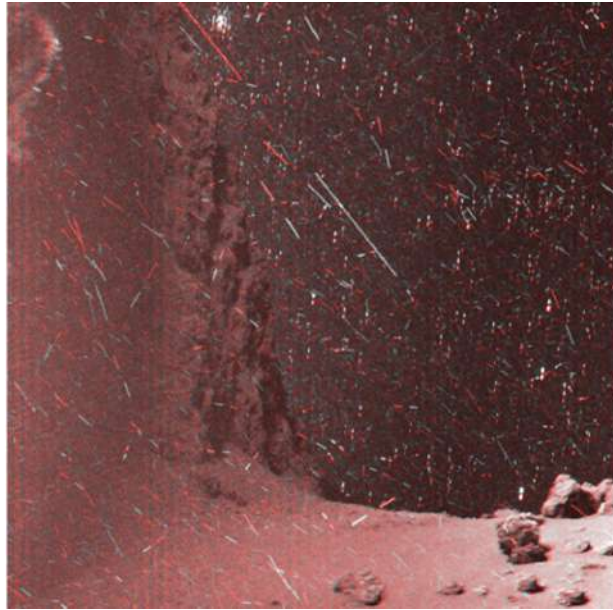
Guillaume Cannat, auteur scientifique pour Le Monde⁶⁰, apporte également un certain nombre de précisions :

« J'ai pu lire sur certains sites que nombre des petits traits que l'on voit sur les images de l'animation seraient des traces laissées sur le capteur CCD de la caméra de Rosetta par des rayons cosmiques, ces particules de haute énergie qui circulent dans le milieu interplanétaire et interstellaire. Il n'est pas possible d'exclure que certaines petites traînées ont effectivement été engendrées par des rayons cosmiques, mais cela n'est pas le cas d'une très large majorité.

En étudiant les images de l'animation l'une après l'autre, on peut en effet remarquer que la plupart des traces, sinon toutes, se prolongent d'une image à la suivante, ce qui serait impossible dans le cas d'une trace laissée par un rayon cosmique qui est un phénomène extrêmement bref. Encore une fois, si l'on étudie la séquence de prises de vues de la caméra NAC-OSIRIS, on constate que chaque image est posée plus de douze secondes, qu'il s'écoule près de dix secondes entre deux images consécutives et qu'il y a une pose de plus de quatre-vingt-dix secondes toutes les quatre images. Deux images consécutives couvrent donc au minimum une période d'une trentaine de secondes et il est très peu probable qu'un rayon cosmique dure suffisamment longtemps pour laisser sa marque sur les deux.

Au final, ce que nous montre cette animation n'est pas une tempête de neige au sens terrestre, mais c'est bien le mouvement apparent des particules de glace et des poussières appartenant au halo qui entoure encore le noyau de la comète Tchoury quelques mois après son passage au plus près du Soleil ; c'est une sorte de tempête de neige spatiale et c'est tout aussi spectaculaire de pouvoir assister à un tel spectacle céleste ! »

⁶⁰ <https://www.lemonde.fr/blog/autourduciel/2018/04/28/une-fausse-tempete-de-neige-sur-la-comete-tchoury/>



*Fig. 113 Superposition de deux images prises à quelques secondes d'intervalle, dont une est colorisée en rouge, afin de mettre en évidence que les traces ne sont pas des rayons cosmiques
IMAGE : ESA, Rosetta, MPS for OSIRIS TEAM MPS, LAM, UPD, IAA, SSO, INTA, UPM, DASP, IDA*

A propos de l'image ci-dessus, Guillaume Cannat explique : “En colorisant l'une des images de l'animation et en la plaquant sur l'image suivante, on voit très que nombre des traces visibles se prolongent sur les deux, prouvant qu'il s'agit bien de poussières ou de particules de glace en mouvement, et non de défauts engendrés sur le capteur de la caméra de Rosetta par de fugaces rayons cosmiques.”

Les possibilités offertes par la manipulation de ces données sont multiples et il est fascinant de voir le pouvoir d'immersion qu'elles ont une fois traitées. En rajoutant le paramètre de la durée, et donc du mouvement, ces paysages deviennent tangibles, on a l'impression d'en faire l'expérience « humaine ».

Collaboration

Le processus de traitement est très long et laborieux, il faut parfois traiter chaque image individuellement, et obtenir une séquence fluide de quelques secondes nécessite de nombreuses heures de travail. Dans le cadre de ma PPM, je n'ai pas pu trouver le temps d'apprendre à maîtriser les outils qui permettent de créer ces séquences. Ce travail se fera dans un second temps, mais il était important pour moi de profiter du mémoire pour comprendre théoriquement ces images avant d'en interpréter moi-même.

En revanche, j'ai pu discuter et rentrer en contact avec Jacint Roger, qui a interprété la séquence décortiquée précédemment. Nous allons collaborer dans le cadre de mon court-métrage de fiction. Il fournira ces images, comme un artiste spécialisé qui viendrait jouer d'un instrument dans une composition. Nous pourrions dialoguer avec d'une part mes contraintes (résolution, temps, ratio, fluidité, couleurs et nature des objets montrés) et d'autre

part ses envies (pouvoir traiter des séquences plus longues et cinématographiques, les assembler, et les accompagner d'un travail sonore que ne permet pas le format GIF). Cela lui permettra aussi de proposer de nouvelles images de l'espace peu représentées dans l'art. De plus, une œuvre comme un film représente une diffusion bien plus libre que les contraintes imposées par twitter (format muet du GIF, limité à 15MB soit 4 secondes en durée et avec une résolution limitée, tandis que des caméras comme la « Narrow Osiris Cam » prennent des images allant jusqu'à 4096x4096 pixels).

Il a traité un certain nombre de séquences “cinématographiques” qu'il rend publiques quotidiennement sur son compte twitter. Il se spécialise dans certaines missions spécifiques, notamment autour des comètes comme la mission Rosetta, et partage quelques images fixes, joue parfois avec la couleur et la 3D stéréoscopique. Mais son travail est principalement relayé médiatiquement lorsqu'il s'agit de séquences animées (GIF). C'est un hobby qui l'occupe à plein temps, et il est même crédité pour des découvertes scientifiques obtenues à partir de l'analyse de ces images.

Dans nos échanges via *Telegram*, et malgré la barrière de la langue, Jacint Roger (de Barcelone), me raconte (*traduit de l'anglais et de l'espagnol*) :

« L'astronomie est mon hobby depuis l'enfance, sans que j'en fasse moi-même la pratique initialement... Il y a 6 ans, en 2015, j'ai décidé d'arrêter de jouer aux jeux vidéos et de faire autre chose avec mon temps libre et mon ordinateur... Je postais mon travail sur des forums principalement, et sur un compte wordpress. De manière complètement autodidacte, sur les 2 années suivantes j'ai appris à traiter des images spatiales. J'avais quelques notions grâce à mes études de designer graphique, mais je ne maîtrisais pas trop l'informatique. A chaque fois que je travaille, je passe un bon moment. Et bien sûr, c'est toujours super de faire de vraies découvertes scientifiques, comme la lune de Churimov⁶¹. »

Une référence majeure dans la collaboration avec Jacint Roger est le court-métrage « the comet » sorti sur Vimeo en 2018 par Christian Stangl (<https://vimeo.com/347565673>). Il a effectué ce travail d'interprétation des données rapportées par la mission Rosetta, pour obtenir des séquences cinématographiques. Le travail du montage et du son permet de faire oublier que l'on est face à une suite d'images fixes rassemblées. Pour effectuer une maquette, j'ai remonté quelques-unes de ces images (en le créditant), et en retravaillant succinctement le son.

⁶¹ Jacint Roger a découvert, il y a 2 ans que la comète Chury a des petites lunes de manière temporaires. Il a fait cette découverte en analysant des images prises par Rosetta lorsque le vaisseau se situait à plus de 400 km de la comète. La « Churymoon », un débris de 4 mètres de diamètre, a orbité pendant de longues périodes autour de la comète, à environ 3 km de celle-ci.

CONCLUSION

Ce travail de recherche constitue une base qui tente de poser des repères ou des balises. De là, on pourrait consacrer des travaux de recherches largement approfondis pour des éléments que je n'ai pu évoquer que brièvement ici : chaque mission spatiale a ses spécificités techniques et esthétiques, chaque régime d'image (celles d'Hubble, de sondes, de télescopes terrestres, les images prises par l'humain...) et chaque paramètre de ces images (lumière, contraste, transmission des données, colorimétrie et traitement) pourraient faire l'objet de recherches spécifiques plus précises.

On pourrait, en amateur, explorer davantage le traitement des images brutes (données publiques) en expérimentant avec Photoshop et After Effects. Je pensais pouvoir le faire dans le cadre de mon mémoire, mais j'avais sous-estimé le travail à faire en amont pour comprendre ces images. Obtenir, à partir des images brutes fixes, une séquence d'images traitées pour un rendu cinématographique est une activité qui nécessite beaucoup de temps et d'attention, puisqu'il faut trouver les données brutes pouvant former des séquences et ensuite traiter les images une par une. Je n'envisageais pas de me lancer dans la manipulation de ces images sans les recherches préalables qui m'ont permis de mieux les cerner. Cette déconstruction me permet d'affiner ma démarche. Comme évoqué dans la dernière partie, je compte creuser cette piste et travailler avec des gens qui maîtrisent l'*amateur image processing* afin de pouvoir m'inspirer et manipuler ces images comme matière cinématographique.

Étant donné que mes recherches ont porté sur un sujet que je ne maîtrisais pas, notamment d'un point de vue scientifique, j'ai préféré avoir une approche synthétique et globale afin de dégrossir ce corpus, de situer une esthétique d'imagerie spatiale par rapport à une autre. Comme évoqué en introduction, c'est un corpus protéiforme et hétérogène qui peut être inclus dans les termes « représentation visuelle de l'espace ». Ces différentes familles d'images se complètent, certaines technologies ou esthétiques sont transversales, d'autres exclusives à des missions ou outils.

C'était aussi ma démarche, de traiter ce sujet scientifique avec le recul de mon regard naïf d'étudiant en audiovisuel. Ma porte d'entrée dans ce monde se fait par l'image, puisque j'ai étudié les mêmes outils (optiques, capteurs, traitement du signal...) et paramètres (contraste, couleur, luminosité...) dans un autre contexte. Mon regard, ni exclusivement scientifique, ni exclusivement artistique, m'aura permis de croiser différentes disciplines qui m'intéressent, et de réfléchir à ce qui me passionne personnellement dans ces images, à savoir leur aspect esthétique, ce qu'elles peuvent raconter et faire ressentir.

Il n'est pas toujours simple de trouver des informations sur certaines missions spécifiques. Les documentations historiques de certaines agences spatiales, comme le Roscosmos en Russie, sont compliquées à trouver sur internet. Des informations sont cachées, disséminées, contradictoires, voire même confidentielles. Cela s'est illustré par exemple en discutant avec Christian Lurin : il a travaillé pour Kodak pendant quasiment 20 ans, mais parce qu'il n'a pas

la nationalité américaine, il n'avait pas accès aux informations liées à l'implication de Kodak dans les domaines militaires et spatiaux. Trouver des informations sur les spécificités des émulsions envoyées au-delà de l'atmosphère est donc un vrai défi. Pour certains outils, les données sont parfois publiées sous la forme d'articles déjà très synthétisés. Rentrer dans le détail, nuancer les recherches n'est pas simple. Par exemple, les seules informations techniques approfondies que j'ai pu trouver concernant les optiques d'Angénieux envoyées dans l'espace se trouvent dans le livre *Angénieux et le cinéma, de la lumière à l'image* qui est faite par Angénieux, à des fins promotionnelles. Pour mes recherches, la quantité d'informations trouvées dans ce livre était suffisante, mais ne m'a pas réellement permis de nuancer ou de comparer avec d'autres constructeurs. Cela est dû bien sûr au fait que les outils développés pour la prise de vue spatiale le sont par des entreprises dont l'activité principale est militaire, et donc confidentielle. Le fait que ces images soient le fruit d'implications industrielles et politiques complique parfois l'analyse critique de leur esthétique, conditionnée en partie par des démarches économiques.

Cette dimension est à prendre en compte et à étudier dès lors qu'on se penche sur les questions liées à l'exploration spatiale. Des sommes astronomiques sont mises en jeu, d'autant que l'exploration spatiale tend à se privatiser, et l'espace devient une source de capitalisation. Pouvoir porter un regard critique, ou au moins être conscient de cela est nécessaire. Cela peut passer par la déconstruction des images comme outils de communication. C'est un aspect qui pourrait être largement creusé, néanmoins mon questionnement portait essentiellement sur la l'ambiguïté des images scientifiques de l'espace et par là même leur emploi fictionnel.

Qu'est-ce qu'une "vraie" image scientifique ?

Au terme de ce mémoire, cette question reste ouverte. Dans ma perception de ces images, je constate un paradoxe, puisque je suis parfois tenté de les considérer comme des images « naturelles » qui captent des phénomènes de la nature comme on pourrait le faire sur Terre. Pourtant, je sais maintenant que ces images, qui s'appuient effectivement sur des données scientifiques issues de phénomènes naturels, font l'objet de nombreuses interprétations et sont sujettes à des sensibilités humaines. J'ai pu constater l'émotion esthétique que ces images éveillent dans les propos du scientifique François Levrier lorsqu'il m'a confié ses impressions sur l'une des images scientifiques qui ont marqué sa carrière : la sphère céleste appelée Projection de Mollweide, une image vraie, mais dont l'effet esthétique peut fausser la vérité scientifique.

C'est ce qui révèle l'entretien avec Elsa De Smet. Comme elle l'explique, ces images sont des constructions, des représentations, elles ne sont des vérités que situées dans les narrations qui les accompagnent. Ces narrations sont historiques, politiques, industrielles, militaires, économiques, entre autres. Elle explique que ces images sont nourries dans leur fabrication et leur promotion d'un corpus visuel qui s'inscrit dans des questions liées à l'histoire de l'art, du regard et de l'anthropologie. Ces images sont le témoin de la pulsion de voir, de la place de l'image dans le savoir. Elles sont au croisement de contraintes techniques, de savoirs

scientifiques et de moyens visuels, et elles appartiennent à un moment précis de l'histoire. Elsa soulève la nécessité de déconstruire les images, de ne pas les considérer comme faciles à lire. Cela pose la question de la vérité dans ces images. Qu'est-ce qu'une image vraie ? Qu'ont-elles d'artistique ? De scientifique ?

« Voir c'est croire, c'est le sens le plus puissant et crédible que l'on possède. On a besoin de voir les choses. On a envie de voir les choses. »⁶²

Le fait de pouvoir mieux comprendre les implications techniques et scientifiques de ces images a rapidement soulevé la question du réel, de l'objectivité ou de la subjectivité de ces images. L'image obtenue par les scientifiques de la NASA en coloriant les données numériques de la surface de Mars est-elle moins vraie que celle du Fond Diffus Cosmologique ? Il faut être conscient que ces images sont des interprétations, des constructions.

« Si l'on prend une photo avec une caméra classique sur Terre, on croit que cette image représente la réalité, car on a vu le sujet avec nos propres yeux et on se dit « Ah oui, cela correspond ». Mais lorsqu'on prend une image d'un trou noir, nous n'avons pas de point de référence, on ne sait pas si l'image générée représente ce à quoi le trou noir ressemble. Comment peut-on évaluer ce qu'est la vraie image ? »

Une image est-elle vraie parce qu'elle est proche de ce que l'œil humain verrait ? Ces images donnent à voir des phénomènes physiques, mais ces représentations vont au-delà, voire sont même indépendantes des expériences sensibles que nous pourrions faire de ces phénomènes. En cela, l'imagerie spatiale a presque quelque chose de métaphysique.

« C'est une grande question dans la philosophie des sciences : si ce qui nous intéresse sont des phénomènes tels qu'ils peuvent être observés et détectés, comment peut-on, de manière factuelle, développer nos connaissances de phénomènes non-observables. »⁶³

Cette subjectivité est valable dans la conception comme dans la lecture de ces images spatiales. Bien souvent, elles montrent des formes abstraites. Le concept de *paréidolie* (phénomène psychologique, impliquant un stimulus (visuel ou auditif) vague et indéterminé, plus ou moins perçu comme reconnaissable) peut entrer en jeu. Pour reprendre l'exemple de l'image du trou noir, des scènes filmées dans le documentaire *Trous noirs : Aux confins du savoir* de Peter Galison (2021) montrent que l'équipe qui a interprété les données pour obtenir l'image était en fait composée de 4 groupes d'une dizaine de personnes, qui avaient interdiction de se voir et de partager leur résultat, pour minimiser les biais, mêmes subconscients, que cela pourrait entraîner.

Le jeu d'influence risque d'être d'autant conséquent et subconscient lorsqu'il s'agit d'images dont l'expérience directe est limitée à une poignée d'astronautes et pourtant largement diffusées, voire recrées. Nous avons constaté les connexions entre cinéma et images de

⁶² Citation issue du documentaire *Black Holes : The Edge of All We Know* de Peter Galison (2020)

⁶³ Citations issues du documentaire *Black Holes : The Edge of All We Know* de Peter Galison (2020)

l'espace. Ce sont des vases communicant, qui se nourrissent perpétuellement, comme l'entretien avec Elsa De Smet a permis de le souligner : « avec tous les films qui cherchent à être plausibles scientifiquement et emploient des conseillers scientifiques, ils produisent des images qui ensuite vont nourrir les scientifiques qui vont les voir (...) L'industrie cinématographique dans l'histoire a permis parfois de montrer des choses que les moyens scientifiques ne permettaient pas. ». Les technologies cinématographiques servent à prendre des images dans l'espace, avec des équipements dont les adaptations et améliorations bénéficieront en retour à l'industrie du film. Les images spatiales « scientifiques » obtenues inspirent et infusent le cinéma, mais elles sont tout autant influencées par des décennies d'imagerie spatiale « cinématographique », qui forment un corpus visuel ayant nourri le public, dans lequel se trouvent les scientifiques en charge du traitement des images. Cela permet de voir à quel point art et sciences se côtoient, et à quel point la séparation et le cloisonnement des disciplines est un modèle limité.

L'importance d'avoir une approche ambivalente et nuancée de ces images, entre déconstruction critique et expérience viscérale

Pour autant, le fait de déconstruire ces images n'a rien enlevé à l'expérience viscérale qu'elles me procurent. Il est important de faire ce travail de déconstruction, de savoir ce qu'on regarde. Même en les étudiant et en les déconstruisant, elles restent des objets esthétiques mystérieux, leur posture ambivalente demeure complexe à déchiffrer. Dans cette appréciation, cela me fait penser au concept de *negative capability* dont parle le poète John Keats au début du 19^{ème} siècle : « *Quand l'être humain est capable d'être dans les incertitudes, mystères, doutes, sans aucune recherche des faits et de la raison.*⁶⁴ » C'est-à-dire la capacité de l'humain à poursuivre une vision de beauté artistique même lorsqu'elle amène une confusion intellectuelle et une incertitude, en opposition à la préférence d'une certitude intellectuelle sur une beauté artistique.

En déconstruisant la séquence du paysage de la comète traitée par Jacint Roger, on comprend mieux comment le cadre, l'échelle et le temps ont été manipulés, mais cela n'enlève en rien à la dimension spectaculaire de ce paysage situé à 511 millions de km de la Terre.

Elles sont une source de beauté, de fascination, d'émerveillement. Elles provoquent des réflexions, de l'apaisement, une prise de recul sur notre place et notre appartenance à un Univers plus vaste que celui dont nous faisons l'expérience au quotidien. Cela se retrouve dans la dimension iconique de ces images, et dans l'*overview effect* auxquelles elles participent. Que ce soit dans leur conception, leur interprétation, ou leur lecture, elles portent en elles quelque chose de profondément humain, une curiosité, une envie d'explorer. Malgré leur aura mystérieuse et nébuleuse, leur forme abstraite, elles touchent une grande majorité des gens, sans différence d'âge ou de trajectoire de vie. Cette imagerie représente un aspect fédérateur d'une expérience humaine englobante : le projet de l'Event Horizon Telescope, pour obtenir l'image du trou noir, est un exemple de plusieurs pays et de centaines de gens

⁶⁴ *The Letters of John Keats*, ed. by H E Rollins, 2 vols (Cambridge: Cambridge University Press, 1958), i, pp. 193-4

travaillant de manière coordonnée et pacifique dans le seul but de produire une image, d'embellir une vision, de proposer une expérience.

Je rapproche cela de ce que dit Emerson, dans *La Nature* : « Pour l'âme, le monde existe donc dans le but de satisfaire son désir de beauté. Ce point, je lui donne le nom de cause finale. Nulle raison ne peut être cherchée ou avancée pour savoir pourquoi l'âme recherche la beauté. La beauté, dans son sens le plus large et le plus profond, est une expression de l'univers. »

SOURCES

Entretiens réalisé par moi-même

Entretien avec Jean-Yves Le Poulain le 10 mai 2021

Entretien avec François Levrier réalisé le 20 mai 2021

Entretien avec Elsa De Smet réalisé le 26 mai 2021

Ouvrages et articles

Ralph Waldo Emerson, *La Nature*, Munroe, 1836

Angénieux et le cinéma : de la lumière à l'image, Collectif, 2019

J.B. Williams, *The Electronics Revolution: Inventing the Future*, Springer, 25 mai 2017

Roland Lehoucq, « Interstellar : enquête sur un trou noir », *La Recherche*, dossiers 16, décembre 2015 - janvier 2016

Elizabeth A. Kessler, *Picturing the Cosmos : Hubble Space Telescope Images and the Astronomical Sublime*, University of Minnesota Press, 2012.

Fenella Saunders, « Imaginer le cosmos », <https://www.americanscientist.org/article/picturing-the-cosmos>

The National Geographic Magazine, Volume 98, Numéro 4 (October, 1950)

NASA : Apollo Lunar Surface Journals, Gary H. Kitmacher, Author, Steve Garber, NASA History Web Curator

Articles : site internet, musées, revues

<https://sciencepost.fr/nasa-met-ligne-nouvelle-bibliotheque-de-medias-libres-de-droits/>

<https://time.com/4058041/most-iconic-space-photos/https://www.airspacemag.com/space/the-first-photo-from-space-13721411/#>

<https://www.nasa.gov/feature/55-years-ago-ranger-7-photographs-the-moon/>

<https://www.space.com/15864-nasa-apollo-11-moon-landing-photos/3.html>

https://an.rsl.wustl.edu/apollo/data/a11/stationLM/csp/docs/csp_psr.pdf

<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/lunar/lunarorb.html>

<https://airandspace.si.edu/exhibitions/apollo-to-the-moon/online/later-missions/#:~:text=After%20Apollo%2011%2C%20NASA%20sent,17%2C%20occurred%20in%20December%201972>

<https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/space/magazine/apollo-11-mission-destination-moon-ingenieur>

<https://www.afcinema.com/Remember-50-years-ago-A-famous-lens-made-by-Ingénieur>

<https://mediakwest.com/ingenieur/>

http://mentallandscape.com/V_Cameras.htm#Venera9

http://mentallandscape.com/V_Lavochkin2.htm

http://mentallandscape.com/C_CatalogVenus.htm

<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1975-050D>

<https://blog.ingenieur.com/apollo-11-mission-destination-moon-for-ingenieur->

https://d2pn8kiwq2w21t.cloudfront.net/documents/mariner_tgiyorI.pdf (pris sur le site du JPL de la NASA)

<https://www.nasa.gov/press-release/nasa-s-juno-spacecraft-to-risk-jupiter-s-fireworks-for-science>

<https://casualphotophile.com/2019/05/10/ed-white-space-walk-camera-used/>

<https://sciencepost.fr/nasa-met-ligne-nouvelle-bibliotheque-de-medias-libres-de-droits/>

<https://time.com/4058041/most-iconic-space-photos/https://www.airspacemag.com/space/the-first-photo-from-space-13721411/#>

<https://www.nasa.gov/feature/55-years-ago-ranger-7-photographs-the-moon/>

<https://www.space.com/15864-nasa-apollo-11-moon-landing-photos/3.html>

https://an.rsl.wustl.edu/apollo/data/a11/stationLM/csp/docs/csp_psr.pdf

<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/lunar/lunarorb.html>

<https://airandspace.si.edu/exhibitions/apollo-to-the-moon/online/later-missions/#:~:text=After%20Apollo%2011%2C%20NASA%20sent,17%2C%20occurred%20in%20December%201972>

<https://www.imagesco.com/nuclear-science/geiger-counter/experiment-4.html>

https://www.asteroidmission.org/ega_1ms_mapcam_color_corrected/

<https://www.tobelight.fr/blog-luminotherapie/info-unite-mesure-lumiere-lux/>

<https://www.spaceflightinsider.com/missions/solar-system/new-horizons-lorri-captures-details-on-ultima-thules-surface/> et <https://arxiv.org/pdf/0709.4278.pdf>

https://nssdc.gsfc.nasa.gov/imgcat/html/object_page/vg2_p21740.html

<https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA00379>

<https://reves-d-espace.com/new-horizons-bientot-sur-sa-destination-ultime/>

<https://www.mps.mpg.de/1979623/OSIRIS>

https://planetary.s3.amazonaws.com/web/assets/pictures/20150825_anim2.gif

<https://www.planetary.org/space-images/new-horizons-opnav-aligned>

<https://blogs.esa.int/rosetta/>

<https://www.planetary.org/articles/p24?listauthor=emily-lakdawalla>

https://www.worldpressphoto.org/getmedia/43578992-5421-4e4c-a826-3b993b0b3f3c/Integrity-of-the-Image_2014-Campbell-report.pdf

<https://www.space.com/8059-truth-photos-hubble-space-telescope-sees.html>

<https://press.uchicago.edu/ucp/books/book/distributed/C/bo22276742.html>

https://esahubble.org/projects/fits_liberator/improc/

<https://www.atik-cameras.com/news/beginners-guide-to-narrow-band-imaging/>

<https://astrobackyard.com/narrowband-imaging/>

<https://www.planetary.org/articles/comet67p-depth-cues>

<https://twitter.com/landru79/status/988490703075463168?s=20>

<https://www.livescience.com/62394-comet-snow-rosetta-twitter.html>

https://www.youtube.com/watch?v=gszFmFLg_5Y

<https://www.lemonde.fr/blog/autourduciel/2018/04/28/une-fausse-tempete-de-neige-sur-la-co-mete-tchoury/>

<https://www.lemonde.fr/blog/autourduciel/tag/rosetta/>

<https://lessaisons.fr/livre/1001317-art-press-2-44-revue-artpress-art-press>

FILMOGRAPHIE

Trou noir : aux confins du savoir, Peter Galison, 2020

The Comet, Christian Stangl, 2018 (*court-métrage*)

High Life, Claire Denis, 2018

Voyage of Time, Terrence Malick, 2018

Interstellar, Christopher Nolan, 2014

Tree Of Life, Terrence Malick, 2010

Star Wars, Georges Lucas, 1977

La femme sur la lune, Fritz Lanz, 1929

Voyage sur la Lune, Georges Méliès, 1902

TABLE DES ILLUSTRATIONS

<i>Figure</i>	<i>Nom</i>	<i>Source</i>
1	Première image prise dans l'espace, 1946	US Army, NASA, White Sands Missile, Applied Physics Laboratory
2	Plans du V2	US AIR FORCE PHOTO
3	Clyde Holliday et sa caméra	NASA
4	Premières images au-delà de l'atmosphère	White Sands Missile Range / Applied Physics Laboratory
5	Premières images au-delà de l'atmosphère	White Sands Missile Range / Applied Physics Laboratory
6	Schéma de la conversion des images négatives en signal analogique pour la transmission vers la Terre à bord de la sonde Luna 3	NASA
7	Première image de la face sombre de la Lune	NASA
8	Image de la Terre au-delà de l'orbite basse par Explorer 6	NASA
9	Blue Marble	NASA
10	Surface de la Lune	NASA
11	La caméra Kodak Stéréo Close-Up dans son armature pour une ergonomie optimale	NASA
12	La caméra Kodak Stéréo Close-Up dans son armature pour une ergonomie optimale	NASA
13	Objectif 25mm	Matthew Leeg
14	Caméras de Ranger 7	RCA
15	Premières images de la Lune par des optiques Angénieux	NASA
16	Premières images de la Lune par des optiques Angénieux	NASA
17	Zoom Angénieux n°1002	NASA
18	Zoom Angénieux n°1266082	Angénieux
19	Caméra Maurer	NASA

<i>Fig.</i>	<i>Nom</i>	<i>Source</i>
20	Caméra Westinghouse	NASA
21	Zoom 6x12,5 du Rover lunaire	NASA
22	Surface de la Lune par Dawn	NASA / JPL / CALTECH / UCLA / MPS / DLR / IDA
23	Données coloriées pour visualiser les images de Mars par Mariner 4	NASA / JPL LABORATORY
24	Données coloriées pour visualiser les images de Mars par Mariner 4	NASA / JPL LABORATORY
25	Données coloriées pour visualiser les images de Mars par Mariner 4	NASA / JPL LABORATORY
26	Données coloriées pour visualiser les images de Mars par Mariner 4	NASA / JPL LABORATORY
27	Images de la surface de Vénus	Mission Venera / Roscosmos
28	Willard Boyle	Nobelfoundation
29	George E Smith	Nobelfoundation
30	Brevet pour le CCD	Google Patents
31	Loi du carré inverse de la distance	John Iovine pour images.co (https://www.imagesco.com/nuclear-science/geiger-counter/experiment-4.html)
32	Image de la Terre par la MAPCAM d'Osiris Rex	NASA / GSFC / UA / BJÖRN JONSSON
33	Image de Bennu par la MAPCAM d'Osiris Rex	NASA / GSFC / UA
34	Image surexposée d'Hypérion par Cassini	NASA / JPL / SSI
35	Image sous-exposée de Puck par Voyager	NASA / JPL
36	Callisto	NASA / Voyager
37	Io	NASA / Voyager
38	Titania	NASA / Voyager
39	Europa	NASA / Voyager
40	Titan	NASA / Voyager

41	Triton	NASA / Voyager
----	--------	----------------

<i>Fig.</i>	<i>Nom</i>	<i>Source</i>
42	La Terre et la Lune	Chang'e
43	Surface de la Lune 2	NASA
44	Montage d'images de Proteus par Voyager 2	NASA / JPL
45	Surface de Rosetta 1	ESA / Rosetta / DLR / MPS for OSIRIS TEAM MPS / UPD / LAM / IAA / SSO / INTA / UPM / DASP / ID / E. LAKDAWALLA
46	Surface de Rosetta 2	ESA / Rosetta / DLR / MPS for OSIRIS TEAM MPS / UPD / LAM / IAA / SSO / INTA / UPM / DASP / ID / E. LAKDAWALLA
47	Io par New Horizons	NASA / JHUAPL / SwRI
48	Io par New Horizons, surexposée	NASA / JHUAPL / SwRI
49	Japet en 8 bit	NASA / JPL / SSI
50	Japet en 2 bit	NASA / JPL / SSI
51	Japet en 1 bit	NASA / JPL / SSI
52	Japet en 1 bit tramée	NASA / JPL / SSI
53	Surface de Mars par Mariner 9	NASA / JPL
54	Image de Deep Impact	NASA / JPL / CALTECH / UMD / E. LAKDAWALLA
55	Chury par la NavCam	ESA / ROSETTA / NAVCAM / EMILY LAKDWALLA
56	Chury par la NavCam 2	ESA / ROSETTA / NAVCAM / E.LAKDAWALLA
57	Chury par la NavCam 3	ESA / ROSETTA / NAVCAM / E. LAKDAWALLA

58	Exemple du contraste avec Enceladus 1	NASA / JPL CALTECH / SSI / E.LAKDAWALLA
----	---------------------------------------	---

<i>Fig.</i>	<i>Nom</i>	<i>Source</i>
59	Exemple du contraste avec Enceladus 2	NASA / JPL CALTECH / SSI / E.LAKDAWALLA
60	Exemple du contraste avec Enceladus 3	NASA / JPL CALTECH / SSI / E.LAKDAWALLA
61	Exemple du contraste avec Enceladus 4	NASA / JPL CALTECH / SSI / E.LAKDAWALLA
62	Exemple du contraste avec Enceladus 5	NASA / JPL CALTECH / SSI / E.LAKDAWALLA
63	Exemple du contraste avec Enceladus 6	NASA / JPL CALTECH / SSI / E.LAKDAWALLA
64	Exemple du contraste avec Enceladus 7	NASA / JPL CALTECH / SSI / E.LAKDAWALLA
65	Exemple du contraste avec Enceladus 8	NASA / JPL CALTECH / SSI / E.LAKDAWALLA
66	Exemple du contraste avec Enceladus 9	NASA / JPL CALTECH / SSI / E.LAKDAWALLA
67	Exemple RVB Portrait Alim Khan 1	Library of Congress
68	Exemple RVB Portrait Alim Khan 2	Library of Congress
69	Exemple RVB Portrait Alim Khan 3	Library of Congress
70	Capture d'écran Photoshop R	Capture d'écran Photoshop
71	Capture d'écran Photoshop V	Capture d'écran Photoshop
72	Capture d'écran Photoshop B	Capture d'écran Photoshop
73	Capture d'écran Photoshop RVB	Capture d'écran Photoshop
74	Images de Jupiter filtrées	Vox
75	Images de Jupiter filtrées	Vox
76	Spectre d'émissions de flamme	tpe-feu-d-artifice.e-monsite.com/pages/i-les-couleurs.html

<i>Figure</i>	<i>Nom</i>	<i>Source</i>
77	Spectre d'émission de 3 éléments	moi (Tom) à partir d'un schéma de Vox
78	Association d'une couleur à un élément	Tom
79	Coloration de gaz	NASA ESA HST VOXX
80	Nébuleuse en Narrowband	ESA / HUBBLE
81	Les Piliers de la Création	NASA / HUBBLE / WIKIPEDIA
82	Schéma colorimétrie PdC 1	Tom (à partir d'un schéma de Vox)
83	Les Piliers de la Création	NASA / HUBBLE / WIKIPEDIA
84	Schéma colorimétrie PdC 2	Tom (à partir d'un schéma de Vox)
85	Piliers de la création en colorimétrie "réaliste"	HUBBLE / NASA
86	Schéma Infrarouge 1	Tom (à partir d'un schéma de Vox)
87	Schéma Infrarouge 2	Tom (à partir d'un schéma de Vox)
88	Saturne en infrarouge	Saturne
89	PdC en infrarouge	HUBBLE / NASA
90	Messier 101	NASA / Spitzer / Chandra
91	Schémas Couleurs Gaz 1	Tom (à partir d'un schéma de Vox)
92	Schémas Couleur Gaz 2	Tom (à partir d'un schéma de Vox)
93	Le centre de la voie lactée en Ondes Radios	MeerKAT Telescope
94	Nébuleuses	Hubble / NASA
95	Fond Diffus Cosmologique	ESA / PLANCK / François Lévrier

<i>Fig.</i>	<i>Nom</i>	<i>Source</i>
96	Extraits Moodboard Laniakea1 1	Tom
97	Extraits Moodboard Laniakea1 2	Tom
98	Extraits Moodboard Laniakea1 3	Tom
99	Tests Plan Macros Forêt de Bondy 1	Romain Rampillon
100	Tests Plan Macros Forêt de Bondy 2	Romain Rampillon
101	Photo Alet-Les-Bains 1	Jeanne Pornin
102	Photo Alet-Les-Bains version 67P	Tom
103	Callisto par Voyager 1	NASA / JPL / E. LAKDWALLA
104	Composite de Callisto par Voyager 1	NASA / JPL / E. LAKDAWALLA
105	Image 67P 1	ESA / ROSETTA / NAVCAM
106	Montage comparatif des albedos de plusieurs corps du système solaire (Selon les moniteurs, il se peut que l'image de 67P, située en bas à droite du montage, ne soit que peu visible.)	NASA/JPL/SSI ESA/ROSETTA / MPS FOR OSIRIS TEAM MPS / UPD / LAM / IAA / RSSD / INTA / UMP / DASP / IDA et Gordan Ugarkovich Robert Vanderbei / Princeton University ESA / ROSETTA / NAVCAM
107	Image 67P 2 Albedo 1	ESA / ROSETTA / NAVCAM
108	Image 67P 3 Albedo 2	ESA / ROSETTA / NAVCAM
109	Image 67P 4 Assemblage	ESA / ROSETTA / NAVACM / G CANNAT
110	Montage Steins	ESA / OSIRIS TEAM / MPS / UPD / LAM / IAA / RSSD / INTA / UPM / DASP / IDA

111	IMAGE 67P 5 Profondeur	ESA / ROSETTA / PHILAE / CIVA / MALMER
112	Capture d'écran données brutes	Site de l'ESA
113	Image 67P BRUTE	ESA / ROSETTA / NAVCAM
114	Capture d'écran Astrometry.net	Site Astrometry.net / Le Monde / Guillaume Cannat
115	Montage couleur 67P	Guillaume Cannat / ESA / ROSETTA / MPS FOR OSIRIS TEAM / LAM / UPD / IAA / SSO / INTA / UPM / DASP / IDA