

LE TELESCOPE SPATIAL HUBBLE

Philippe BERNASCOLLE

Mars 1997

SOMMAIRE

Sommaire	1
Introduction	2
Le télescope spatial Hubble	3
Les instruments scientifiques	4
Wide Field and Planetary Camera	4
Faint Object Camera	6
Goddard High Resolution Spectrograph	7
Faint Object Spectrograph	8
High Speed Photometer	8
Fine Guidance Sensors	9
Les vibrations	10
L'aberration de sphéricité	10
Les gyroscopes	11
Le traitement numérique des images	12
La réparation	13
Wide Field and Planetary Camera N° 2	13
Corrective Optics STAR	13
La mission STS 61	14
Les nouveaux instruments scientifiques	17
Space Telescope Imaging Spectrograph	17
Near IR Camera & Multi Object Spectrometer	17
La mission STS 82	18
Conclusion	20
Bibliographie	21

Introduction

La scène se situe à Cap Canaveral en Floride, nous sommes en avril 1990. Le télescope spatial Hubble (HST) l'un des plus beaux instruments scientifiques jamais envoyé dans l'espace, attend cet instant depuis quatre ans, conservé dans la plus grande et la plus chère salle blanche¹ du monde.

Le télescope, gros comme une remorque de camion, est arrivé en avion, enfermé dans un conteneur spécial, de l'usine Lockheed en Californie. Il y a là une foule de techniciens qui travaillent à sa préparation, avant sa mise en orbite par la navette spatiale. Le HST représente un chargement très particulier : c'est le satellite civil le plus lourd jamais lancé par une navette spatiale. La fabrication de ce télescope associe les USA et l'Europe via son agence spatiale l'ESA, la contribution du vieux continent est la réalisation des panneaux solaires et de l'une des deux caméras embarquées.

L'idée de mettre en orbite autour de la Terre un télescope astronomique n'est pas neuve. En effet, en 1923 l'allemand Herman Oberth y pense déjà. Mais c'est l'étude de l'américain Lyman Spitzer, en 1946 c'est à dire plus de 10 ans avant le premier satellite, qui va confirmer la faisabilité d'un tel projet.

Un télescope en orbite c'est un télescope parfait. L'atmosphère terrestre avec ses caprices météorologiques, sa transparence variable en fonction des longueurs d'onde², et surtout son agitation permanente³ qui brouille les plus petits détails, est éliminée du problème.

Un astronome disait que la plus mauvaise partie de son télescope, c'était l'atmosphère terrestre.

C'est en 1977 que la NASA lance le projet du télescope spatial, le lancement est prévu pour 1983. Ce projet est l'aboutissement d'un rêve des astronomes, un gros télescope avec une bonne instrumentation utilisable par l'ensemble de la communauté scientifique.

¹ Une salle blanche est un local propre où la température et l'humidité sont contrôlées, la quantité de poussière dans l'air est limitée au maximum. Le personnel qui travaille dans ce genre de laboratoire porte une tenue antistatique spéciale.

² La couche d'ozone par exemple filtre les rayons ultraviolets, pour le bien être des espèces vivantes.

³ C'est ce que l'on appelle la turbulence atmosphérique. Cela limite le pouvoir de résolution des télescopes terrestres.

Le télescope spatial

Le télescope spatial, le plus gros satellite civil, est un cylindre de 4,3 mètres de diamètre et de 13,3 mètres de longueur, il pèse 11,6 tonnes et rentre juste dans la soute de la navette spatiale.

Le télescope cassegrain⁴ fait 2,4 mètres de diamètre et 58 mètres de focale.

L'alimentation électrique est assurée par deux panneaux solaires⁵, fabriqués par l'agence spatiale européenne (l'ESA). L'orbite du HST est telle que la moitié du temps le télescope est à l'ombre de la Terre, des batteries assurent l'alimentation électrique pendant ces périodes.

Le pointage du télescope est un point délicat, sa mise au point a pris plus de temps que prévu, c'est la principale cause du retard de ce programme, le lancement est alors reporté en 1986 à la place de 1983. Le principe du pointage du télescope repose sur des roues à inertie⁶ et des gyroscopes⁷ de mesure des déplacements, la précision atteinte par ce système est de 0,005 secondes d'arc.

Au foyer de ce télescope huit instruments scientifiques assurent la réalisation des différentes mesures.

⁴ La combinaison optique de ce télescope s'appelle Ritchey Chrétien, c'est un dérivé du cassegrain classique.

⁵ Ces panneaux sont souples, ils sont déroulés au moment du largage par la navette spatiale. Ils font 12 mètres de long sur 2,8 mètres de large.

⁶ Le fait de faire varier la vitesse de rotation de ces roues induit une rotation en sens inverse du HST. Trois roues de ce type sont nécessaires pour pointer le télescope, il y en a quatre à bord.

⁷ Trois gyroscopes sont nécessaires pour mesurer la position du HST, il y en a six à bord.

Les instruments scientifiques

Le télescope spatial peut réaliser l'ensemble des études scientifiques classiques de l'astronomie grâce aux huit instruments installés au foyer du télescope. L'imagerie avec ses deux caméras électroniques, la spectroscopie avec les deux spectrographes, la photométrie avec le photomètre rapide et finalement l'astrométrie avec les trois détecteurs de guidage fin.

Wide Field and Planetary Camera (WFPC)

La WFPC (prononcez wiff-pic) est un appareil photographique électronique qui peut fonctionner suivant deux modes, le mode à grand champ (Wide Field) et le mode petit champ ou planétaire (Planetary Camera). C'est l'instrument du télescope spatial qui a le plus grand champ de vue, sa sensibilité couvre le spectre électromagnétique⁸ depuis l'ultraviolet jusqu'à l'infrarouge proche. La WFPC est l'instrument qui produit le plus de données à bord de Hubble, c'est le JPL (Jet Propulsion Laboratory) qui a construit cet instrument pour la NASA.

Dans le mode de fonctionnement à grand champ, la WFPC a un champ de vue sur le ciel de 2,6 minutes d'arc⁹ de côté, cela représente à peine un dixième du diamètre de la pleine Lune. La focale résultante du télescope est alors de 31 mètres, ce qui donne une ouverture de F/12,9¹⁰. Ce champ est beaucoup plus petit que celui des caméras à grand champ des observatoires terrestres, qui peut atteindre 5° de large, c'est à dire 13 000 fois plus de surface de ciel photographiée par cliché. Ce mode permet aux astronomes de voir des amas d'étoiles ou de galaxies sur la même image, sa résolution est de 0,1 secondes d'arc¹¹.

Le mode planétaire a un champ de vue plus petit pour obtenir une meilleure résolution. La focale résultante du télescope est alors de 68 mètres, soit une ouverture de F/28,3. Ce champ, 1,1 minutes d'arc, est tel que cette caméra peut

⁸ Le spectre électromagnétique représente toute les longueurs d'onde de la "lumière". La partie visible n'est qu'un tout petit domaine du spectre. Chaque région du spectre est caractérisée par sa longueur d'onde :

Rayons gamma	moins de 0,00001 μm
Rayons X	0,00001 à 0,01 μm
Ultraviolet	0,01 à 0,4 μm
Visible	0,4 à 0,8 μm
Infrarouge	0,8 à 100 μm
Micro-onde	0,1 à 100 mm
Radio	100 mm à 10 km et plus

⁹ C'est une unité de mesure d'angle. Un degré d'arc égale 60 minutes d'arc (symbole : ') une minute égale 60 secondes d'arc (symbole : ").

¹⁰ C'est la même notion que l'ouverture d'un objectif d'appareil photo, c'est la valeur du diaphragme.

¹¹ Une seconde d'arc est équivalente à la taille d'une pièce de 5 centimes vue depuis une distance de 3 km.

photographier le disque complet de la planète Jupiter, la résolution est équivalente à celle obtenue par les sondes Voyager quand elles étaient encore à 5 jours de vol du point de leur trajectoire le plus proche de la planète. La caméra planétaire a une résolution de 0,043 secondes d'arc.

Chacun de ces deux modes de fonctionnement utilise quatre matrices CCD¹² de 800 X 800 pixels¹³. Ces détecteurs électroniques sont extrêmement sensibles, ils sont capables d'enregistrer 70% de la lumière incidente¹⁴. Les matrices CCD sont sensibles à une grande gamme de longueur d'onde depuis $\lambda = 0,115 \mu\text{m}$ (ultraviolet) jusqu'à $\lambda = 1,100 \mu\text{m}$ (proche infrarouge). L'axe optique de la WFPC passe par un système à quatre miroirs en forme de pyramide qui envoie le faisceau lumineux vers les quatre matrices CCD. Une roue porte filtre à 48 positions permet de photographier dans des bandes spectrales plus ou moins larges et même de mesurer le taux de polarisation¹⁵ de la lumière incidente.

La WFPC peut, avec une pose d'une heure, atteindre la magnitude¹⁶ 26. Elle pourrait facilement détecter la lumière d'une lampe de poche placée sur la Lune.

¹² CCD : Charge-Coupled Device. C'est une matrice de détecteurs électroniques sensibles à la lumière.

¹³ C'est un point élémentaire d'une image, ou d'un détecteur multiple. Chaque grain d'argent dans l'émulsion photographique est un pixel. La taille et le nombre de pixels dans une image donneront la quantité de détails visible sur cette image.

¹⁴ le meilleur film photographique n'utilise que 3 ou 4% du flux lumineux.

¹⁵ La polarisation de la lumière correspond à une orientation particulière du champ électromagnétique

¹⁶ C'est une unité de mesure de l'intensité lumineuse d'une étoile. Les valeurs les plus petites indiquent un objet brillant, une étoile de magnitude 1 est plus brillante qu'une autre de magnitude 2. Chaque saut d'une magnitude correspond à une intensité lumineuse 2,5 fois plus petite, cinq magnitudes de différence correspondent à un facteur 100 en intensité lumineuse. L'oeil humain voit les étoiles jusqu'à la magnitude 6, une étoile de magnitude 26 est donc 90 millions de fois moins brillante.

Faint Object Camera (FOC)

Comme son nom l'indique cette caméra est faite pour détecter les objets les moins lumineux de l'univers. Développé et construite par Dornier en Allemagne et Matra Espace en France, la FOC représente l'une des contributions de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) au projet du télescope spatial. Cet instrument complète la WFPC pour observer avec une grande résolution, et donc un petit champ, les plus faibles objets célestes.

La FOC utilise comme détecteur des intensificateurs d'images. Ces dispositifs optoélectroniques amplifient plus de 100 000 fois le flux de lumière incident. Ceci permet à cette caméra de voir des objets de magnitude 27. La magnitude limite de cet instrument dépend du temps d'intégration¹⁷ utilisé. Cette caméra est si sensible qu'une étoile de magnitude 21 située dans le champ photographié doit être atténuée avec des filtres, sinon la caméra sature.

La caméra à objets faibles offre deux ouvertures différentes F/48 et F/96 avec plusieurs filtres, on peut aussi utiliser une sorte de coronographe, deux petits doigts peuvent occulter une source brillante (une étoile) afin de pouvoir détecter un objet faible très proche (une planète). Par exemple, la FOC permet de voir une étoile faible à une seconde d'arc seulement de la pleine Lune. La résolution maximale de cette caméra sur le plus petit champ est de 0,01 secondes d'arc. Le domaine de sensibilité s'étend de $\lambda = 0,115 \mu\text{m}$ à $\lambda = 0,650 \mu\text{m}$.

¹⁷ Le temps d'intégration est l'équivalent du temps de pose en photographie.

Goddard High Resolution Spectrograph (GHRS)

Un spectrographe est un appareil qui décompose la lumière fournie par le télescope, afin de mesurer l'intensité lumineuse pour chaque longueur d'onde (chaque couleur de la lumière). Le résultat est le spectre de l'objet étudié. Un spectre permet d'obtenir énormément d'informations sur l'astre observé¹⁸ : sa composition chimique, sa température, et même l'intensité d'un éventuel champ magnétique.

Le GHRS est le seul instrument à bord uniquement dédié à l'étude du spectre ultraviolet. Sur Terre la lumière ultraviolette est absorbée par la couche d'ozone, on doit donc faire ces mesures hors de l'atmosphère¹⁹. Le GHRS est le spectrographe ultraviolet le plus puissant jamais réalisé, c'est le Goddard Space Flight Center qui a conçu cet appareil fabriqué ensuite par la compagnie Ball Aerospace Systems Group.

Ce spectrographe travaille dans le domaine des longueurs d'onde comprises entre $\lambda = 0,105 \mu\text{m}$ et $\lambda = 0,320 \mu\text{m}$, il utilise des détecteurs appelés digicon²⁰ qui peuvent compter simultanément les photons sur 512 voies différentes. Pour obtenir une mesure précise des longueurs d'onde le GHRS a besoin d'une source de comparaison. Des lampes U.V. spéciales dans l'instrument permettent cette calibration. Le GHRS comprend aussi une sorte de posemètre automatique qui détermine le temps de pose pour un objet donné.

La résolution spectrale est très élevée, c'est à dire qu'il est capable de séparer de très faibles différences de couleurs dans la lumière incidente. Par exemple, le GHRS est capable de voir deux raies spectrales dans la bande autour de $0,200 \mu\text{m}$ séparées de seulement $0,000002 \mu\text{m}$ ²¹.

¹⁸ Voir sur ce sujet la conférence de G. Meuriot sur les instruments de l'astronomie.

¹⁹ Les mesures dans l'ultraviolet sont donc réalisées à bord d'avions, de ballons stratosphériques ou de satellites.

²⁰ Dispositif optoélectronique très sensible qui permet de compter les photons.

²¹ Une telle résolution est équivalente à une mesure au μm près d'une longueur de 10 cm, soit un pour 100 000.

Faint Object Spectrograph (FOS)

Comme pour les deux caméras du HST (la WFPC et la FOC), nous pouvons dire que les deux spectrographes sont complémentaires. Comme le GHRS le FOS décompose la lumière incidente pour analyser chacune de ses couleurs. Le FOS est dédié à l'étude des objets faiblement lumineux, sa bande spectrale d'analyse est plus large que celle du GHRS.

Le FOS utilise deux voies de mesure, une voie "bleu" pour les courtes longueurs d'onde (0,115 à 0,550 μm) et une voie "rouge" pour les grandes (0,170 à 0,850 μm). Chaque voie utilise son propre détecteur digicon. Une roue porte filtres sur le chemin optique permet de sélectionner certaines bandes de longueurs d'onde. Le FOS a été construit par la société Martin Marietta Corporation, il peut détecter des objets de magnitude 24 en une heure de pose.

High Speed Photometer (HSP)

Le HSP est un photomètre²² rapide, utilisé pour mesurer très précisément l'intensité lumineuse des étoiles. C'est l'instrument le moins complexe de ceux embarqués sur le HST. Il peut mesurer des variations très rapides d'éclat, la lumière des étoiles étant mesurée 100 000 fois par seconde.

Le HSP, construit par des chercheurs de l'université du Wisconsin, utilise cinq détecteurs électroniques. Deux voies travaillent sur la bande ultraviolette comprise entre 0,120 et 0,300 μm de longueur d'onde, deux voies mesurent la lumière entre 0,160 et 0,650 μm , la cinquième détecte le proche infrarouge.

²² Littéralement "lumière - mètre" c'est un instrument qui mesure l'intensité de la lumière dans différentes bandes de longueurs d'ondes.

Fine Guidance Sensors (FGS)

Le système de pointage fin du télescope spatial est indispensable pour utiliser les instruments scientifiques. En effet, ce système est capable de maintenir le télescope précisément pointé vers un objet céleste pendant plus de 24 heures. Les détecteurs de guidage fin peuvent se verrouiller sur une étoile et mesurer son déplacement apparent avec une précision de 0,0028 secondes d'arc. Le HST possède trois FGS ; deux sont absolument nécessaires pour le guidage, le troisième peut être utilisé pour faire de l'astrométrie²³. Cette fonction est la dernière mesure scientifique que peuvent réaliser les instruments embarqués sur le HST.

Ces instruments fonctionnent par paire pour guider le télescope. D'abord le premier capteur trouve une étoile guide dans le catalogue d'étoiles mémorisé dans l'ordinateur. Une fois que le premier FGS s'est verrouillé sur cette étoile, le second trouve et accroche²⁴ une seconde étoile. Deux étoiles sont nécessaires car il faut stabiliser le télescope sur son axe de roulis. Le champ utile des FGS n'est que de 60 minutes d'arc carré. Le nombre d'étoiles guides doit donc être très grand pour compenser le petit champ des capteurs de guidage.

Le catalogue d'étoiles guides utilisé pour le pointage du télescope spatial est issu de huit années de travail de la part d'un groupe de chercheurs du HST Science Institute. Il faut environ 100 étoiles guides par degré carré pour s'assurer qu'au moins 2 étoiles sont visibles avec les capteurs de guidage fin. Le catalogue d'étoiles le plus complet disponible au démarrage du projet du HST n'en contenait que 6.

Le HST Guide Star Catalog contient les localisations précises de 16 819 291 étoiles et objets célestes. Ce catalogue comprend des objets jusqu'à la magnitude 15, il sert de référence pour le guidage du HST en proposant environ 35 étoiles guides pour chaque observation. Ce catalogue, le GSC mais aussi depuis peu le catalogue Hipparcos²⁵ qui contient 114 488 étoiles, est disponible sous forme de cédérom (CD-ROM) pour ordinateur personnel.

Une fois que deux FGS sont accrochés sur leurs étoiles guides, le troisième peut faire des mesures de positions relatives, comme avec Hipparcos on peut mesurer la parallaxe des étoiles et donc leur distance²⁶.

Ces capteurs, construit par Perkin-Elmer, sont capables de détecter des étoiles de magnitude 16.

²³ L'astrométrie est un des volets de l'astronomie, c'est l'art de mesurer le plus précisément possible la position des étoiles.

²⁴ Le mot accrocher à ici le même sens que pour un radar, il s'agit de détecter et de suivre tout les déplacements de l'étoile par rapport au télescope.

²⁵ Voir sur ce sujet ma conférence sur le mesurage des distances dans l'univers.

²⁶ Idem.

Les vibrations

Très vite après le lancement du HST, en avril 1990, les techniciens de la NASA se rendent compte que le télescope spatial vibre. En fait, c'est à chaque passage de l'interface jour/nuit, toutes les 45 minutes, que le télescope se met à vibrer pendant environ 5 minutes. Cette vibration provient des panneaux solaires qui se dilatent en fonction de la température.

Ce problème supprime la possibilité de faire des poses supérieures à environ 40 minutes, c'est une catastrophe, impossible de faire les poses de 24 heures prévues à l'origine.

Pour obtenir les résultats scientifiques espérés, il faut changer ces panneaux.

L'aberration de sphéricité

Deux mois après le lancement du HST, la NASA annonce que le télescope souffre d'un défaut optique qui l'empêche de réaliser des images nettes, et de réaliser complètement le programme scientifique.

Avant de devenir parfaitement opérationnel, une série de tests et de vérifications est réalisée au cours des semaines qui suivent la mise en orbite. Ces tests, prévus pour durer plusieurs mois, comprennent l'activation du système de contrôle et de pointage fin du télescope et l'alignement des miroirs²⁷. Le test de mise au point, utilisé pour trouver le meilleur alignement des miroirs, est sans doute le plus délicat. Les miroirs sont d'abord défocalisés puis déplacés en enregistrant des images d'une étoile avec l'une des caméras du HST. Plusieurs tests de ce type ont été réalisés les 23 et 24 juin 1990. Le résultat est complètement inattendu. Les scientifiques n'arrivent pas à trouver la position du miroir secondaire qui focalise parfaitement la lumière provenant de l'étoile. L'observation de cette image floue montre la présence d'une aberration bien connue : l'aberration de sphéricité causée par un miroir mal taillé²⁸. Hubble est calculé pour focaliser la lumière d'une étoile sur une très petite surface, un point. Mais cette aberration optique étale l'image des étoiles sur une grande surface, en formant un halo de lumière autour du point central. Ce défaut se voit sur chaque instrument du HST, c'est donc bien l'un des deux miroirs du télescope qui est en cause. On sait qu'un défaut du miroir secondaire produit de la coma, des tests sont donc entrepris pour analyser le secondaire. Ces tests montrent que ce miroir

²⁷ L'alignement des deux miroir d'un télescope s'appelle la colimation, sur le HST la mise au point de l'image se fait par déplacement du miroir secondaire.

²⁸ A ce stade des essais on ne sait pas encore quel est l'élément optique qui introduit cette aberration de sphéricité. Le système optique du télescope spatial est tel que par exemple le nombre total de miroirs dans la caméra WFPC est de 28 !

est bon, il est donc clair que le défaut optique provient du primaire et uniquement de lui.

C'est le 26 juin que la direction de la NASA a reçu la mauvaise nouvelle, le miroir principal de Hubble, le miroir le mieux taillé au monde, n'avait pas la bonne forme.

La taille d'un miroir de télescope comprend plusieurs cycles d'usinages et de polissages d'un disque de verre. Chaque nouveau passage affine la forme laissée par le précédent. Ce processus est guidé par des tests optiques qui montrent le chemin qu'il reste à parcourir pour atteindre la forme théorique du miroir. Une fois cette forme atteinte, le miroir est recouvert d'une fine couche d'aluminium réfléchissante.

La taille, les tests, et le traitement du miroir du HST ont été réalisés par un sous-traitant de la NASA la société Perkin Elmer Corporation Laboratory.

La méthode de contrôle de la surface d'un miroir consiste à comparer les performances optiques du miroir avec celle d'un appareil de test. Cet appareil de test, le "null corrector" doit avoir les propriétés optiques du miroir théorique. Cet appareil comprend une lentille et deux miroirs.

Tout au long du processus de polissage du miroir ce correcteur est supposé bon, ce n'est hélas pas le cas²⁹. Évidemment à la fin du polissage du miroir la mesure est parfaite mais la forme obtenue est fautive. La NASA pense avoir le meilleur miroir jamais taillé³⁰, en fait l'erreur sur la forme, 2 µm au bord, est énorme.

Les gyroscopes

Le télescope spatial Hubble a besoin de trois gyroscopes pour connaître sa position. Six gyroscopes sont installés sur le HST, pour obtenir une redondance³¹ des équipements. Or en novembre 1990 le gyroscope N° 4 tombe en panne, en mai 1991 c'est au tour du N° 6 et enfin le N° 1 lâche en octobre 1992, trois gyroscopes hors service en trois ans. A ce rythme là le télescope spatial est inutilisable pour le printemps 1993.

Il faut réaliser une mission d'entretien du télescope, pour changer les gyroscopes le plus rapidement possible.

²⁹ On est ici dans la situation d'un bricoleur qui doit couper une planche de 80 cm. Mais qui dispose sans le savoir d'un mètre à ruban faux, gradué de 0 à 100 cm et qui fait seulement 98 cm de longueur !

³⁰ Le télescope spatial pour travailler dans l'ultraviolet a besoin d'un miroir dont le plus petit défaut représente une fraction de la longueur d'onde ici $\lambda = 0,100 \mu\text{m}$. Ce miroir est taillé à $\lambda / 64$ crête crête pour le visible soit un défaut de $0,008 \mu\text{m}$ maximum. L'erreur sur la forme qui représente $2 \mu\text{m}$ au bord fait que ce miroir n'est en fait qu'à 4λ .

³¹ La redondance est classique sur un satellite, en cas de panne un équipement de réserve prend la place de l'élément défectueux. Cette technique, coûteuse mais efficace, augmente considérablement la durée de vie d'un satellite ou d'une sonde.

Le traitement numérique des images

Avec le problème du miroir les images enregistrées par le HST sont floues. Mais la NASA et les scientifiques veulent utiliser au mieux ce merveilleux télescope, l'informatique va leur venir en aide.

Théoriquement, et sans entrer dans les détails mathématiques, on peut dire que si l'on connaît parfaitement le défaut optique du télescope, l'image (floue) enregistrée peut être reconstruite³², ou rendue nette.

Mais dans la réalité ce n'est pas si simple, d'abord le bruit de l'image n'est pas connu³³, ensuite la détectivité de la caméra est diminuée par l'étalement³⁴ de la tâche image.

Ce que l'on peut dire ici, c'est que les chercheurs ont utilisé toutes les techniques de reconstruction connues. Nous pouvons citer :

- la transformée de Fourier,
- les ondelettes,
- le filtrage inverse,
- le filtre de Wiener,
- Van Citter,
- Richardson Lucy,
- la déconvolution aveugle,
- le maximum d'entropie.

Ces techniques marchent assez bien mais une image nette c'est mieux !

³² On dit aussi que l'on déconvolue l'image.

³³ La reconstruction d'une image bruitée va donner des artefacts dans le résultat, par exemple des étoiles qui n'existent pas peuvent apparaître.

³⁴ Si l'image d'une étoile est étalée l'éclairement du détecteur est diminué, la détectivité aussi.

La réparation

Tous les télescopes du monde ont besoin de nouveaux instruments scientifiques fabriqués avec les dernières innovations technologiques. La NASA a donc prévu pour les astronautes de la navette spatiale la possibilité d'entretenir le HST en orbite. Ces missions sont prévues tout les trois ans environ.

WFPC # 2

Les scientifiques travaillaient déjà sur la nouvelle caméra, avant que le HST ne soit lancé. Après la détection de l'aberration du miroir principal, l'équipe de la WFPC 2 modifie le dessin de l'optique afin de pouvoir corriger ce défaut. Le surcoût³⁵ de ces modifications est compensé par une diminution du nombre de matrices CCD. Il n'y a plus que trois CCD sur la voie à grand champ et un seul pour le petit champ. Les nouvelles matrices CCD sont deux fois plus sensible à la lumière que les précédentes.

Cette nouvelle caméra donne enfin des images nettes.

Corrective Optics STAR (COSTAR)

Les autres instruments scientifiques souffrent aussi du défaut du miroir.

La décision est prise de remplacer le photomètre par un système de correction optique, le COSTAR. Le Space Telescope Axial Replacement (STAR) est une structure grande comme une cabine téléphonique qui a exactement la taille des instruments. Le système de correction est grand comme une boîte à chaussures³⁶. Le COSTAR c'est 10 petits miroirs³⁷, 12 moteurs de réglage, 4 bras mobiles, 290 kg au total et surtout 250 millions de Francs.

Le COSTAR corrige l'aberration de sphéricité pour les deux spectrographes et la caméra à objets faibles. Les capteurs de guidage fin ne sont pas corrigés.

Les coûts de développement de cette correction optique vont être répercutés sur les instruments de la deuxième génération, le STIS et le NICMOS sont reportés à la mission de 1997.

³⁵ Les miroirs de corrections doivent être mobiles, les moteurs de réglages coûtent cher.

³⁶ La partie utile du COSTAR (le CO) occupe le volume d'une boîte à chaussures, mais pour des raisons d'interfaces mécaniques dans le HST le STAR est gros comme une cabine téléphonique.

³⁷ Ces miroirs font entre 12 et 25 mm de diamètre.

La mission STS 61

Cette mission de la navette spatiale est d'une importance capitale pour l'image de marque de la NASA. En effet, deux échecs du programme spatial américain ont ébranlé la confiance du congrès mais aussi celle du peuple (c'est lui qui paye les taxes). Ces deux "catastrophes" sont l'accident de Challenger en 1986, et l'aberration de sphéricité dont souffre le miroir du télescope spatial en 1990. Le congrès américain a voté des crédits pour construire une nouvelle navette³⁸ mais refuse de sortir un centime de plus pour le HST. La NASA a donc financé la réparation de Hubble sur son budget annuel déjà voté.

Le télescope spatial est construit de telle manière que la réparation ou l'échange de certaines pièces soit possible dans l'espace. C'est la première mission de maintenance du HST, ces missions sont prévues tout les trois ans environ. L'objectif prioritaire de STS 61 est de changer les gyroscopes en panne et les panneaux solaires qui vibrent. Cinq sorties de 6 heures sont prévues pour effectuer l'ensemble des réparations.

La navette Endeavour décolle en décembre 1993 pour cette mission de 11 jours, l'équipage était composé de :

- Dick Covey, commandant ;
- Ken Bowersox, pilote ;
- Tom Akers, spécialiste de mission ;
- Jeffrey Hoffman, spécialiste de mission ;
- Story Musgrave, spécialiste de mission ;
- Claude Nicolier (ESA), spécialiste de mission (pilote du bras) ;
- Kathy Thornton, spécialiste de mission ;

la charge utile embarquée était la "Hubble Repair Mission".

Une fois le HST arrimé dans la soute, les sorties pour réaliser les réparations peuvent commencer. La première journée est consacrée au remplacement de 4 des 6 gyroscopes de Hubble, du magnétomètre, et à la préparation de l'importante sortie du lendemain. La seconde sortie est entièrement consacrée au changement des deux panneaux solaires. L'un des deux anciens panneaux ne peut pas être enroulé, les astronautes décident donc de le "jeter" dans l'espace car ils ne peuvent pas le ranger dans la soute pour le ramener sur Terre. Le montage des nouveaux panneaux se fait sans problème. La troisième sortie des astronautes est utilisée pour remplacer la WFPC 1 par la N° 2 dont l'optique est corrigée de l'aberration de sphéricité du miroir de Hubble. Le GHRS est aussi réparé au cours de cette sortie.

³⁸ C'est Endeavour, la dernière navette construite est la plus légère et la plus performante, c'est elle qui peut effectuer les missions les plus longues. C'est en toute logique que Endeavour est choisie pour faire cette mission de sauvetage de Hubble.

A ce niveau de la réparation de Hubble, la NASA estime que son objectif est atteint. Le minimum vital pour le HST est enfin réalisé, plus de soucis de gyroscopes et de vibrations³⁹. Les images sont enfin nettes, ceci est très important car la caméra donne les seuls résultats scientifiques "médiatisables". Le serveur internet de la NASA diffuse ces images quasiment en temps réel.

La quatrième sortie est mise à profit pour remplacer le HSP par le fameux COSTAR, et effectuer quelques réparations sur l'électronique de contrôle des gyroscopes. C'est l'intervention la plus médiatisée par les journalistes, alors que l'on savait que les principaux problèmes étaient déjà réparés. La cinquième et dernière sortie est utilisée pour changer différents systèmes électriques ou informatiques.

Ce n'est que le 13 janvier 1994 que la NASA confirmera que le télescope est réparé et que le défaut du miroir n'est plus qu'un mauvais souvenir.

Cette mission est un succès extraordinaire, la presse la compare avec la mission Apollo 11, celle du premier homme sur la Lune !

L'image de la page suivante en est l'exemple, c'est la photo de l'étoile Mayall-Cannon 18 entourée d'une nébuleuse planétaire dans la constellation de la mouche. Photographie : Raghvendra Sahai et J.T. Trauger du JPL, NASA, et l'équipe de la WFPC 2.

³⁹ Ces vibrations des panneaux toutes les 45 minutes empêche le HST de réaliser les poses longues nécessaires pour analyser les objets les plus faibles.

Les nouveaux instruments scientifiques

Deux nouveaux instruments sont réalisés pour améliorer les performances scientifiques du télescope spatial. Cette deuxième génération d'instrument utilise les techniques les plus modernes, les performances de ces nouveaux détecteurs dépassent donc largement celles des précédents. C'est Ball Aerospace and Technologies Corporation qui fabrique ces deux instruments.

La correction du défaut optique du télescope spatial est directement intégrée dans ces nouveaux appareils. Le COSTAR n'est donc pas utilisé pour ces instruments.

Space Telescope Imaging Spectrograph (STIS)

Les performances de ce nouveau spectrographe dépassent largement celles réunies du GHRS et du FOS. C'est un spectro-imageur, il mesure le spectre de chaque point de l'image. Il utilise des matrices de détecteur, CCD pour le visible et MAMA⁴⁰ pour l'ultraviolet, à la place des anciennes barrettes⁴¹.

Near IR Camera & Multi Object Spectrometer (NICMOS)

Cette nouvelle caméra est le premier instrument qui fonctionne dans le proche infrarouge⁴². Ce changement de « philosophie »⁴³ pour Hubble vient du fait qu'à cause du décalage vers le rouge des galaxies lointaines⁴⁴, la lumière qui nous arrive est très « rougie ». Le refroidissement des détecteurs est assuré par un bloc d'azote solide qui s'évapore doucement, la durée de vie prévisible est de cinq ans. C'est aussi un appareil capable de mesurer le spectre de plusieurs objets en même temps.

C'est très probablement ce nouvel instrument qui va donner les prochains coups de théâtre astronomiques.

⁴⁰ Multi Anode Micro-Channel Arrays, c'est une matrice de détecteurs ultraviolet de nouvelle génération.

⁴¹ Une barrette est un alignement de détecteurs, il n'y a qu'une seule dimension de mesure. La matrice comprend deux dimensions, elle réalise une image.

⁴² Cette caméra analyse la lumière jusqu'à $\lambda = 2,5 \mu\text{m}$.

⁴³ Hubble a l'origine est un instrument conçu surtout pour observer dans l'ultraviolet, car ce rayonnement ne traverse pas l'atmosphère terrestre.

⁴⁴ La loi de Hubble (cette fois c'est l'homme et pas le télescope) prédit que le décalage vers le rouge de la lumière d'une galaxie est proportionnel à sa distance. Avec des décalages mesurés de 5 la raie de l'hydrogène H α ($\lambda = 0,656 \mu\text{m}$) apparaît à une longueur d'onde de $3,28 \mu\text{m}$.

La mission STS 82

Cette mission de la navette spatiale est la seconde d'une série de missions d'entretien planifiées pour le télescope spatial. Les travaux prévus au cours de ce vol vont significativement augmenter les performances des instruments scientifiques embarqués au foyer du télescope, mais aussi permettre au télescope de fonctionner parfaitement jusqu'à la prochaine mission prévue pour 1999.

Le départ de la navette Discovery a eu lieu le 11 février 1997, l'équipage était composé de :

Kenneth Bowersox, commandant ;
Scott Horowitz, pilote ;
Mark Lee, spécialiste de mission ;
Steven Hawley, spécialiste de mission (pilote du bras) ;
Gregory Harbaugh, spécialiste de mission ;
Steven Smith, spécialiste de mission ;
Joseph Tanner, spécialiste de mission ;

la charge utile embarquée dans la soute était la "Hubble Servicing Mission 2".

Cette mission s'est terminée le 21 février 1997, après un vol de 9 jours 23 heures et des poussières ; soit 149 orbites.

La capture du HST par le bras télémanipulateur de la navette est réalisée le 13 février par Steven Hawley⁴⁵, la mission d'entretien peut alors commencer. Les caméras embarquées sur Discovery vont photographier le télescope sous toutes les coutures pour détecter un éventuel défaut, en effet la NASA se fait du souci sur l'état des panneaux solaires⁴⁶, mais c'est l'isolation thermique du HST que l'on découvre déchirée par endroits.

La première sortie a pour objectif d'installer le STIS et le NICMOS dans le télescope en lieu et place des anciens spectrographes GHRS et FOS, cette sortie dure environ 3 heures et se passe bien. Une petite frayeur tout de même au début, au moment de vider le sas de sortie de la navette, un courant d'air vient faire bouger un des deux panneaux solaires. La procédure d'utilisation du sas de la navette sera donc modifiée pour éviter de les endommager.

Au cours de la deuxième sortie un nouveau détecteur de guidage fin (corrigé de l'aberration de sphéricité) et un enregistreur magnétique à bande vont être installés. La troisième sortie voit la mise en place d'un nouveau module de mémoire

⁴⁵ C'est déjà lui qui pilotait le bras de la navette en avril 1990 pour le lancement du télescope spatial Hubble.

⁴⁶ Ils resteront déroulés durant toute la mission. En effet, le risque de les toucher avec le bras pendant les manipulations est estimé par la NASA inférieur à celui qui serait pris pour les enrouler au début et les dérouler en fin de mission.

informatique et d'une nouvelle interface électronique. La quatrième permet aux astronautes de remplacer un boîtier de contrôle de la position des panneaux solaires, et d'une partie de l'isolation thermique des magnétomètres. Ce défaut d'isolation était connu depuis la mission de décembre 1993.

Une cinquième sortie, non prévue celle là, sera réalisée pour réparer les défauts que l'on vient de découvrir dans l'isolation thermique du télescope. Cette isolation est constituée de 15 couches de capton aluminé⁴⁷. Une telle réparation non prévue se fait avec les moyens du bord, morceaux d'isolation récupérés, velcro et finalement comme tout le monde avec des bouts de ficelle.

L'orbite de Hubble est aussi remontée⁴⁸ au cours de la mission avec les moteurs de contrôle d'attitude de la navette. Cette procédure est imposée par le fait que les panneaux solaires sont restés ouverts, une impulsion avec les moteurs principaux qui développent 400 kg de poussée les aurait inévitablement endommagés. En revanche, les petits moteurs avec seulement 10 kg de poussée sont utilisables. Deux longues poussées de 20 et 32 minutes ont permis de remonter l'orbite du HST d'environ 14,5 km pour arriver à une altitude de 621 km.

Le télescope spatial est relâché avec le bras télémanipulateur par l'astronaute Steven Hawley le vendredi 19 février 1997, prêt pour effectuer environ 15 000 tours de la Terre avant que la navette Columbia en 1999 ne vienne une nouvelle fois le rejoindre.

Finalement, cette mission au cours de laquelle 2 043 kg de matériel ont été remplacés, 150 connecteurs manoeuvrés, 1,1 mètre carré de couverture isolante changés avec environ 200 outils différents, est un succès.

⁴⁷ Le capton est une matière "plastique" avec des propriétés très particulières, sa mise au point date de la conquête de la Lune, c'est une des nombreuses retombées du programme Apollo. Cette isolation thermique ressemble beaucoup à un empilement de 15 couches de couverture de survie

⁴⁸ L'orbite d'un satellite "s'use", l'altitude diminue d'autant plus vite que l'orbite est basse. Nous entrons dans une phase où le cycle solaire approche de son maximum, l'atmosphère de la Terre va se dilater et le freinage des satellites va donc augmenter. Cette correction d'orbite est donc indispensable pour le bon fonctionnement à venir du HST.

Conclusion

Le télescope spatial est le satellite de tous les superlatifs, c'est le meilleur, c'est le plus cher, c'est aujourd'hui un ambassadeur pour la NASA mais c'était hier une catastrophe pour l'image de marque de cette grande administration américaine.

Le télescope spatial est aujourd'hui le meilleur, il donne des résultats scientifiques d'une importance capitale pour la connaissance de notre univers. Sa contribution à la recherche astronomique sera historique.

C'est le plus cher, en comptant le dépassement du budget initial et la mission STS 61 de réparation, l'addition s'élève à 11 milliards de Francs. Par comparaison le télescope Keck, installé sur le Mauna Kea à Hawaii, dont le miroir segmenté fait 10 mètres de diamètre, ne coûte que 500 millions de Francs.

Évidemment les débuts ont été difficiles, l'erreur sur la forme du miroir primaire a terni l'image de la NASA, et ce au plus mauvais moment, l'accident de Challenger était encore dans toutes les mémoires. Mais la mission de décembre 1993 associée aux résultats de la nouvelle caméra ont redoré le blason de la NASA. La presse a même comparé cette mission à Apollo 11.

Les chercheurs de la NASA travaillent aujourd'hui sur un nouveau projet. Un nouveau télescope spatial beaucoup plus performant et surtout infiniment moins cher.

BIBLIOGRAPHIE

- ◆ **NASA**
Compte rendu de la mission STS 82.
<http://www.ksc.nasa.gov>, mars 1997
- ◆ **Steven A. HAWLEY**
Hubble revisited.
Sky & Telescope, février 1997
- ◆ **William HARWOOD**
Une troisième vie pour Hubble.
Ciel et Espace N°321 février 1997
- ◆ **Simon GOODWIN**
L'univers vu par Hubble, le nouveau visage du cosmos.
Robert LAFFONT, Paris 1996
- ◆ **Philippe BERNASCOLLE**
Le mesurage des distances dans l'univers.
AAAOV Conférence, novembre 1995
- ◆ **Hans-Martin ADORF**
Hubble space telescope image restoration in its fourth year.
Inverse Problem, 11, pages 639 - 653, 1995
- ◆ **Gilles MEURIOT**
Les instruments de l'astronomie.
AAAOV Conférence, mars 1995
- ◆ **I. C. BUSKO**
Photometric properties of HST restored images.
Publication of the ASP, 106, pages 1310 - 1321, décembre 1994
- ◆ **Jean Michel BRUNEAU & Pierre MATHIEU**
Image restoration using biorthogonal wavelet transforms.
Optical Engineering, Vol. 33 N° 7, pages 2378 - 2383, juillet 1994
- ◆ **Richard T. FIENBERG**
Hubble's image restored.
Sky & Telescope, avril 1994
- ◆ **Scott HILDRETH**
The Hubble Space Telescope, repair mission.
The Astronomical Society of the Pacific, 1994

- ◆ **Richard T. FIENBERG**
Hubble's road to recovery.
Sky & Telescope, novembre 1993

- ◆ **Jeffrey A. HOFFMAN**
How we'll fix the Hubble Space Telescope.
Sky & Telescope, novembre 1993

- ◆ **Robert A. GONSALVES & Peter NISENSEN**
HST image processing : an overview of algorithms.
SPIE, Vol. 1567, pages 294 - 307, 1991

- ◆ **Richard L. WHITE & Robert J. HANISCH**
HST image processing : how does it work and what are the problems ?
SPIE, Vol. 1567, pages 308 - 316, 1991

- ◆ **Judith G. COHEN**
Test of the photometric accuracy of image restoration using
the maximum entropy algorithm.
The Astronomical Journal, **101** (2), pages 734 - 737; février 1991

- ◆ **Janet DOUGHTY**
The Hubble Space Telescope.
The Astronomical Society of the Pacific, 1990

- ◆ **ASTRONOMIE**
L'encyclopédie Atlas du ciel.
Éditions **ATLAS**, 1984