

JAMES WEBB SPACE TELESCOPE

# *Le Télescope spatial* de Nouvelle Génération

*Pour répondre aux questions actuelles de l'astrophysique, les instruments nouvelle génération doivent opérer dans l'infrarouge et avoir la meilleure résolution possible. Le JWST dont le lancement est prévu pour 2013 répond à ces exigences.*

**A**près presque 20 ans la mission qui avait été impartie au télescope spatial Hubble (HST) pour scruter l'Univers proche a été accomplie *summa cum laude*. À tel point que l'heure de sa retraite est loin d'avoir sonné ! Elle est au contraire sans cesse repoussée, comme l'indique le fait que la NASA a finalement décidé de lui redonner une nouvelle jeunesse (encadré 1).

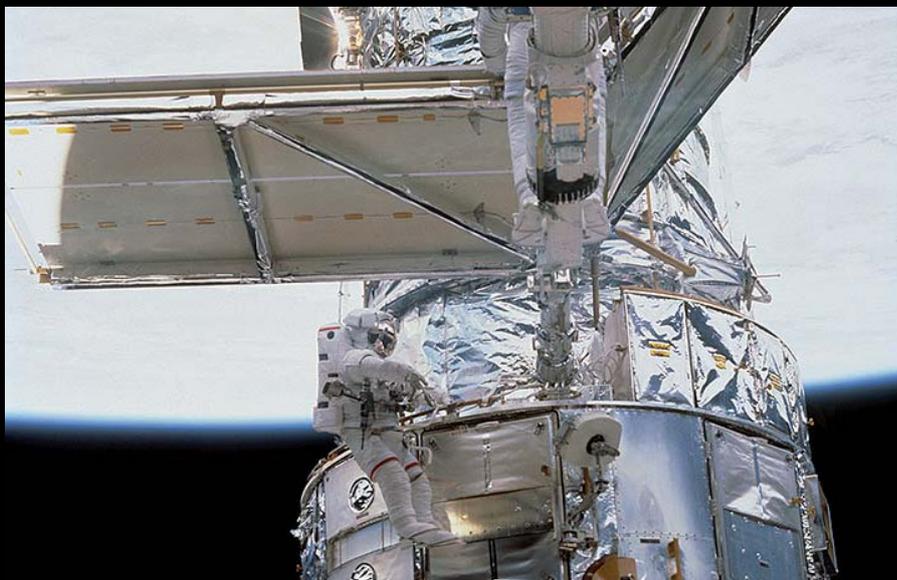
## Hubble, et après ?

Qu'ils soient professionnels, amateurs ou visiteurs d'Internet occasionnels, tous les lecteurs de *L'ASTRONOMIE* ont vu et admiré les images extraordinaires que le HST a produites, et qui leur ont fait "toucher du doigt" le contenu du ciel dans toute sa splendeur. Personne ne peut rester insensible à la beauté, parfois intrigante, des images de galaxies, nébuleuses, restes de supernovae et autres objets célestes, obtenues avec ce télescope et diffusées à profusion dans

tous les cercles astronomiques et sur Internet. Quant à dresser un bilan scientifique du HST, cela relèverait de la gageure et ne pourrait être exhaustif, tant la moisson a été riche, et ce, dans tous les domaines de l'astrophysique. Mais non seulement tous les télescopes vieillissent, encore que le HST reste toujours extrêmement performant, et le restera encore pour plusieurs années, mais à mesure que leurs utilisations nous aident à amplifier nos connaissances, elles suscitent en nous de nouvelles interrogations, auxquelles ils ne peuvent pas toujours répondre, faute d'avoir été conçus pour ce faire. La devise de l'astronome est simple : voir toujours plus loin, et toujours mieux.

### Les besoins instrumentaux pour les astronomes du futur

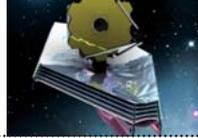
Ainsi, non seulement le HST, mais aussi Chandra, XMM-Newton, et Spitzer depuis l'espace, et les très grands télescopes actuels au



## 1. Maintenance spatiale de Hubble

Trois missions de maintenance ont assuré le succès du HST, et une quatrième est prévue pour le 28 août 2008. En décembre 1993, de nouveaux instruments étaient installés et le télescope recevait les "lunettes" qui corrigeaient le fort astigmatisme dont il était affecté (le système COSPAR) ; au cours de la seconde mission, en février 1997, des parties défectueuses étaient remplacées, et 2 nouveaux instruments étaient installés, le spectrographe-imageur STIS, et la caméra NICMOS qui étendait la couverture spectrale au proche infrarouge ; la troisième mission, préparée dans un temps record de 7 mois, permettait en décembre 1999 de "réveiller" le télescope, mis en sommeil après que le 4<sup>e</sup> gyroscope (sur un total de 6) eut cessé de fonctionner ;

cette mission, fut complétée par une autre, en mars 2002, au cours de laquelle la caméra ACS fut installée ; la quatrième mission sera lancée le 28 août 2008 et aura pour objectif d'installer la nouvelle caméra grand champ WFC3 et le spectrographe pour l'ultraviolet COS, de réparer le spectrographe STIS et la caméra ACS, de remplacer les 6 gyroscopes du télescope et la caméra de guidage fin FGS, de changer les batteries, et d'installer un mécanisme d'amarrage pour un éventuel rendez-vous ultérieur. Cette mission devrait être la dernière, et permettre au HST de rester extrêmement performant au moins jusqu'à ce que le JWST soit totalement opérationnel, et sans doute même quelques années après. ●

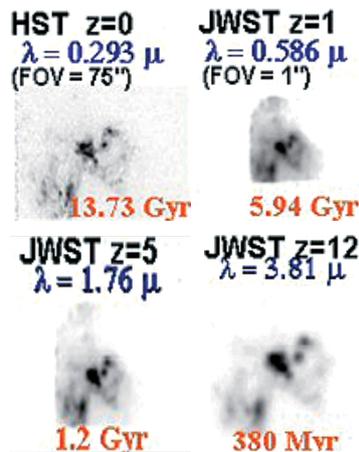


## 2. Pouvoir de résolution

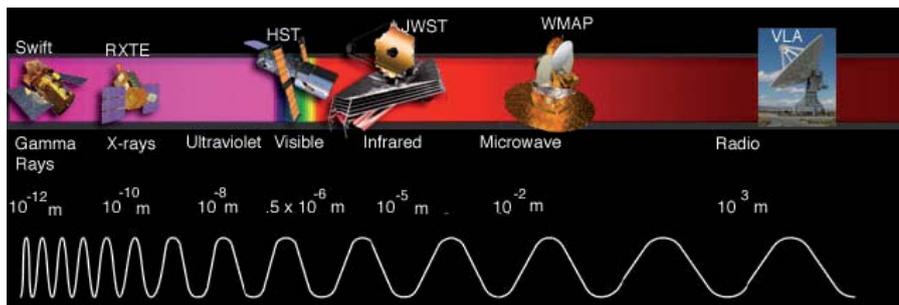
En optique, le pouvoir de résolution d'un système optique désigne sa capacité à distinguer des détails fins. Il est défini comme **la distance angulaire minimale entre deux éléments d'un objet qui permette d'en obtenir deux images séparées** (pouvoir séparateur) ; on dit alors que l'objet est résolu. Par exemple, si la Terre et le Soleil, séparés de 150 millions de kilomètres, étaient placés à 30 années de lumière de nous, ils nous apparaîtraient séparés d'un angle de l'ordre de 0,1 seconde d'angle : ce n'est pas beaucoup !

Le pouvoir de résolution de l'œil est d'environ une minute, soit de l'ordre de 100 km sur la surface de la Lune vue de la Terre, ou, plus proche de nous, un détail d'environ 1 mm pour un objet situé à 3 m de distance. En conditions réelles, les télescopes de 8 - 10 mètres comme le VLT de l'ESO atteignent un pouvoir de résolution de 0,1 seconde, soit 600 fois mieux que l'œil, ce qui permet, par exemple, de distinguer des détails d'environ 200 mètres sur la surface de la Lune. ●

sol, le géant VLT, les jumeaux Gemini, le couple Magellan, et les siamois Keck ont aiguisé la gourmandise des astrophysiciens, dont l'appétit est insatiable. En particulier, l'Univers local (1) ne leur suffit plus. Pour remonter à la création de l'Univers et ses premiers âges, il leur faut maintenant non seulement détecter des objets beaucoup plus lointains que ceux qui ont été observés par Hubble, mais aussi pouvoir étudier en détail ceux que Hubble et ses confrères ont pu "vaguement" observer. Mais voilà, voir plus loin dans l'Univers cela ne consiste pas seulement à utiliser un télescope plus puissant : il faut prendre en compte l'expansion de l'Univers, qui décale le spectre des objets lointains vers le rouge. En d'autres termes, si l'on plaçait les objets de l'Univers local, vus par Hubble en lumière ultraviolette et visible, à des distances dites "cosmologiques" (1), ils ne seraient "visibles" que dans la "lumière" émise à des longueurs d'onde qui correspondent au rouge lointain et à l'infrarouge (fig. 1 et 2). Par conséquent, pour pouvoir répondre aux questions laissées en suspens par son illustre prédécesseur, le prochain télescope



**2. Longueurs d'onde d'observation ( $\lambda$ ) selon la distance z (1).** Région de formation stellaire visible de l'Univers local dans l'ultraviolet avec le HST (coin supérieur gauche). Si la même région était située à de très grandes distances, (en remontant le temps de l'Univers), l'observation se ferait dans une longueur d'onde supérieure (simulation Windhorst *et al.*, 2006).



**1. Les longueurs d'onde dans l'infrarouge sont supérieures à celles dans le visible.** Bien que nous ne puissions voir la lumière infrarouge à l'œil nu, nous pouvons cependant l'appréhender comme source de chaleur. Le domaine infrarouge du spectre électromagnétique commence approximativement aux longueurs d'onde d'environ 0,9 micron ( $0,9 \cdot 10^{-6}$  m) et se termine à celles qui ont quelques centaines de microns ( $10^{-4}$  m).

spatial qu'il faudra construire ne devra pas être seulement un "Super-HST", mais il devra aussi être spécialement adapté pour « voir » de tels rayonnements.

Et l'astronomie ne se réduit pas à la cosmologie ! De nombreux thèmes demandent à être explorés plus en avant. Il en est un, par exemple, dans lequel l'apport du HST aura été minime, qui est celui de la recherche de planètes extrasolaires. Pendant longtemps, l'existence d'exoplanètes n'avait pu être prouvée par l'observation. La distance, mais aussi le manque de luminosité de ces objets célestes rendent leur détection très difficile. D'une part, une planète ne produit pas de lumière : elle ne fait que diffuser celle qu'elle reçoit de son étoile, ce qui est bien peu. D'autre part, la distance qui nous sépare de l'étoile est de loin bien plus importante que celle qui sépare la planète de son étoile : le pouvoir séparateur (encadré 2) de l'instrument de détection doit donc être très élevé pour pouvoir les distinguer. C'est pourquoi les (presque) 300 exoplanètes détectées à ce jour, principalement grâce aux observatoires au sol, l'ont été par des méthodes indirectes (transits, primaires et secondaires, vitesses radiales, astrométrie, microlentilles gravitationnelles). Des efforts énormes sont actuellement entrepris pour développer une technologie qui permette d'obtenir des images astronomiques à très haut contraste, grâce à laquelle il serait possible, soit d'observer directement les exoplanètes déjà découvertes, soit d'en détecter d'autres. Ceci ne pourra être réalisé qu'en améliorant les techniques d'optique adaptative, de la coronographie stellaire et du traitement d'image. Mais il est d'autre part un paramètre fondamental : c'est dans l'infrarouge que le contraste entre une étoile et sa planète est le moins élevé. En effet, une planète comme la Terre sera en moyenne cinq milliards de fois moins lumineuse qu'une étoile comme le Soleil en lumière visible, alors qu'elle ne le sera "que" sept millions de fois dans l'infrarouge moyen. Il est donc évident qu'un télescope de nouvelle génération qui serait conçu pour s'adonner à ce domaine de recherche doit non seulement être doté des nouvelles techniques mentionnées, mais de plus opérer dans l'infrarouge.

Si détecter des exoplanètes est déjà intéressant en soi, il reste à pouvoir les étudier, en déterminer les caractéristiques, scruter leur atmosphère et y rechercher des signatures de la Vie, puisqu'il faut bien l'admettre, au bout du compte, c'est là l'objectif ultime. Il faut pour cela augmenter considérablement la surface des télescopes actuellement disponibles.

Comprendre les mécanismes de formation d'une planète terrestre passe par l'observation des proto-étoiles enfouies au sein de nébuleuses et des poussières qui se condensent ultérieurement dans ce disque. De plus la dimension typique d'un disque protoplanétaire par rapport à sa distance est telle qu'elle nécessite une résolution angulaire très élevée.

Les exemples précédents, mais il y en a beaucoup d'autres, nous montrent clairement que s'il veut répondre aux questions brûlantes de l'astrophysique actuelle, un télescope de nouvelle génération doit opérer dans l'infrarouge (figures 2 et 3), et doit être doté d'une instrumentation qui délivre la meilleure résolution

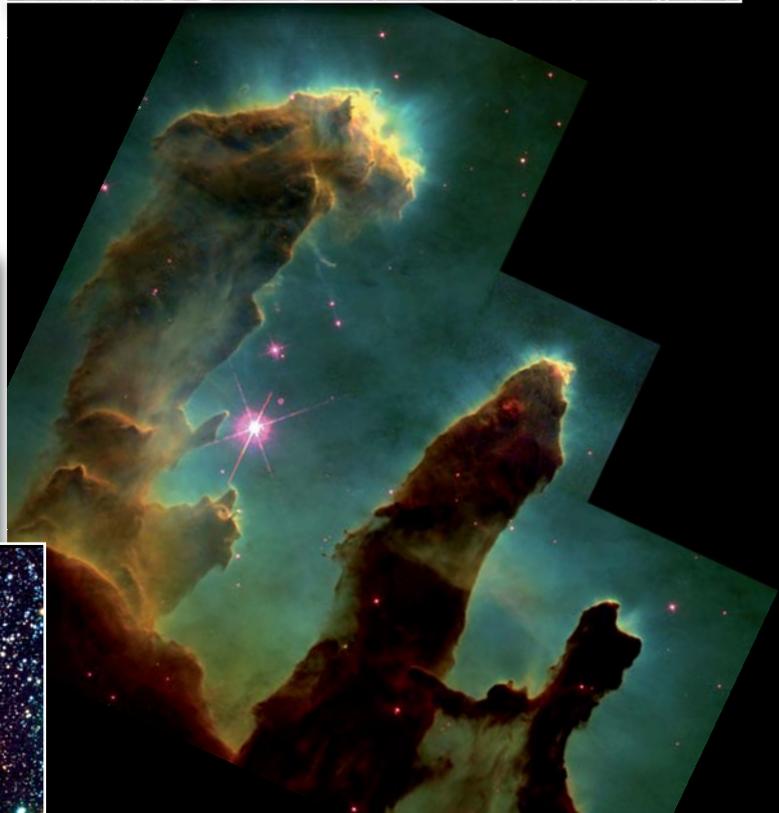
spatiale possible. L'atmosphère terrestre ne laissant passer qu'une infime partie du spectre infrarouge, et produisant d'autre part une scintillation et une agitation des images qui limitent fortement la résolution angulaire, ce télescope devra donc idéalement être placé dans l'espace. Ce qui d'ailleurs, je tiens à le souligner, ne remet aucunement en cause l'utilité d'un télescope gigantesque au sol, qui satisferait des nécessités différentes, et qui en serait donc, bien au contraire, un complément essentiel.

### Du NGST au JWST

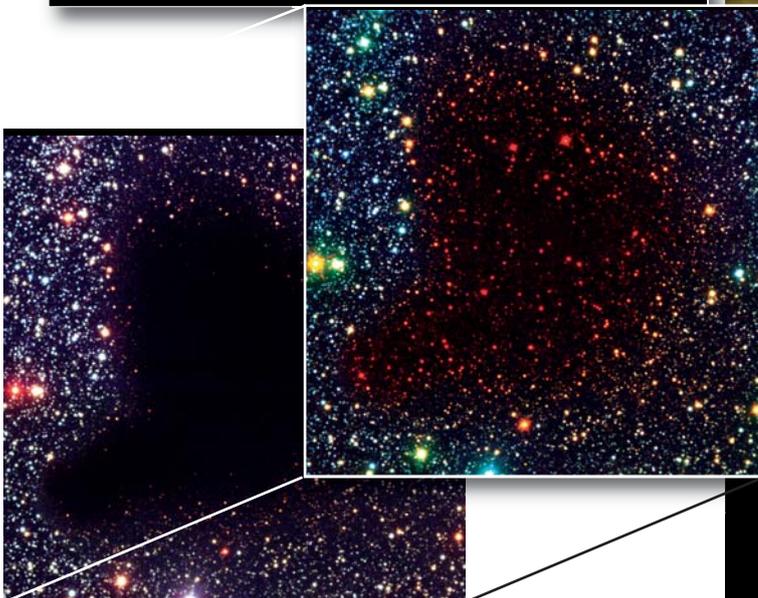
C'est en 1989 que Ricardo Giacconi (alors directeur du STScI, le centre des opérations du HST, à Baltimore, et futur Prix Nobel - 2002), réalisant qu'il fallait un minimum de 20 ans entre les premières études et la mise en orbite d'un projet spatial, suggérait la tenue d'un atelier qui préparerait l'après-HST, qui était alors prévu pour 2005. Cet atelier concluait que l'étude des galaxies à grandes distances ( $z=1$ , à l'époque) devrait constituer le premier objectif du successeur du HST, lequel devrait avoir un diamètre de 8 mètres et fonctionner dans l'infrarouge proche, en orbite haute ou sur la Lune. Ce télescope encore dans les limbes fut dès lors baptisé sous le nom de NGST (pour *New Generation Space Telescope*). Les années qui suivirent virent les astronomes de Baltimore et la NASA aux prises avec les problèmes de vision du HST, et les études sur le NGST furent momentanément délaissées.

Ce n'est qu'en 1993, après le succès de COSPAR (lire encadré 1) qui corrigeait spectaculairement l'astigmatisme du HST, que fut prise la décision de prolonger la durée de vie du HST jusqu'en 2010, et de reprendre les études de faisabilité d'un télescope de 4 mètres qui contribuerait au grand projet ORIGINS dont l'ambition est d'élucider les mécanismes de formation des galaxies, des étoiles et des planètes, et de l'apparition de la Vie. Plusieurs projets de télescopes de 4 m furent alors proposés, mais, en 1995, le directeur de la NASA, Dan Goldin, mettait la communauté astronomique en instance de penser "Plus vite, Meilleur et Moins Cher" (le fameux "Faster, Better, Cheaper") et lui demandait de présenter un projet de télescope de 8 m, mais à un coût inférieur pourtant à celui des télescopes précédents. C'est ainsi que, dès l'année suivante, plusieurs études envisageaient la réalisation de télescopes dont les miroirs de 8 m pourraient se déployer dans l'espace, dotés de grands parasols et placés en orbite haute, pour la

**3.** Nuage moléculaire Barnard 68 observé en lumière visible (à gauche) et dans le proche infrarouge (à droite). Le champ de ces images couvre  $4,9 \times 4,9$  minutes d'arc, ou  $0,5 \times 0,5$  année de lumière. Le nuage est complètement opaque dans la lumière visible, en raison des particules de poussières qui résident en son sein. L'image visible a été obtenue au VLT de l'ESO avec l'instrument FORS, et l'image en infrarouge a été obtenue avec le NTT de l'ESO et l'instrument SOFI. Ces images résultent de la combinaison d'images obtenues à travers 3 filtres (bleu, vert et rouge pour le visible ;  $1,25 \mu\text{m}$ , ici codé en bleu,  $1,66 \mu\text{m}$  codé en vert, et  $2,2 \mu\text{m}$  codé en rouge, pour l'image obtenue en infrarouge).



**4.** La nébuleuse de l'Aigle (Messier 16) (en bas) obtenue par le HST en 1995 en lumière visible et en infrarouge par le VLT (en haut). Ces énormes piliers de gaz et de poussières d'une hauteur d'une année de lumière sont sculptés et illuminés par des étoiles très massives et lumineuses appartenant à un jeune amas ouvert (NGC 6611), et souvent désignés sous le nom de "Piliers de la Création". Bien que la présence d'étoiles en formation nichant à l'intérieur de ces "Piliers" fût fortement suspectée, qui aurait soupçonné un tel foisonnement d'étoiles révélé dans la lumière infrarouge proche avec l'instrument ISAAC. Les étoiles brillantes et qui apparaissent rougies sont à peine nées, et celles plus faibles sont des étoiles "du champ" plus lointaines et sans relation physique avec la nébuleuse.

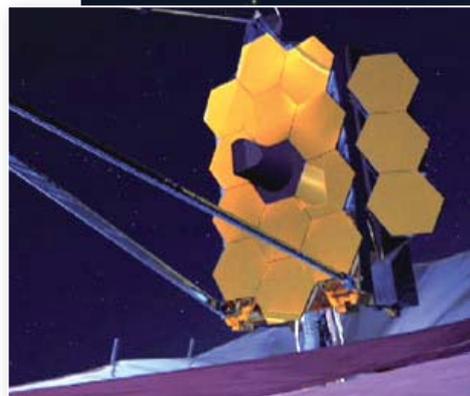




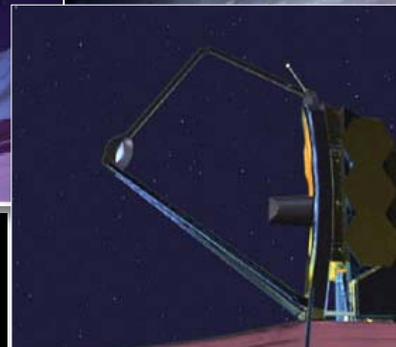
**5. Comparaison entre les miroirs du HST (à gauche) et du JWST qui sera plié pour tenir dans l'habitacle de la fusée Ariane.**

modeste somme d'environ 500 millions de dollars. Des simulations basées sur les données obtenues avec le HST démontraient que de tels diamètres étaient non seulement nécessaires mais aussi suffisants pour observer les galaxies les plus lointaines. La NASA décida alors de financer des études complémentaires : le NGST entra dans sa phase A, qui correspond à l'étude détaillée de la faisabilité d'un projet. En 1997, l'ESA et l'Agence spatiale canadienne (CSA) rejoignaient le projet. Durant les années 1997-2000, les grands objectifs scientifiques étaient définis : ils n'ont guère été modifiés depuis.

Parallèlement, apparaissaient les premières avancées technologiques requises pour la bonne réalisation du projet, en matière, par exemple, de miroirs ultralégers, d'optique adaptative, de détecteurs, voire d'actuateurs cryogéniques (2). Hélas, les estimations budgétaires excédaient de plusieurs centaines de mil-



**6. Vue d'artiste montrant le dépliage du miroir primaire ainsi que du tripode portant le miroir secondaire, et le déploiement dans l'espace du télescope.**



lions de dollars la somme qui pouvait être raisonnablement envisagée, et le miroir du NGST dut être réduit à un diamètre de 6 m en 2001. L'année suivante, le NGST entra dans sa phase B, qui est la définition finale du projet, et la NASA procédait à la répartition des tâches, en particulier en sélectionnant les équipes qui seraient chargées de la réalisation des différents instruments.

En septembre 2002, le NGST reçut le nom de télescope Spatial James Webb, et sera désormais connu sous le sigle de JWST. Au cours de l'été 2007, la NASA et l'ESA d'une part, et la NASA et la CSA d'autre part, signaient leurs protocoles d'accord respectifs, fixant les modalités de développement et d'opération du JWST. Le coût total du projet fut estimé, à l'époque, à 3,5 milliards de dollars. Le JWST devra fonctionner, contractuellement, pendant une durée minimum de 5 ans, mais les agences misent sur au moins 5 années de plus : un budget de fonctionnement de 1 milliard pour 10 ans d'opération a donc été provisionné. À titre de comparaison, le HST aura coûté 4,1 milliards, entre la première phase de son étude et son lancement, auxquels il convient d'ajouter 250 millions par année pour son fonctionnement.

### Bienvenue au James Webb !

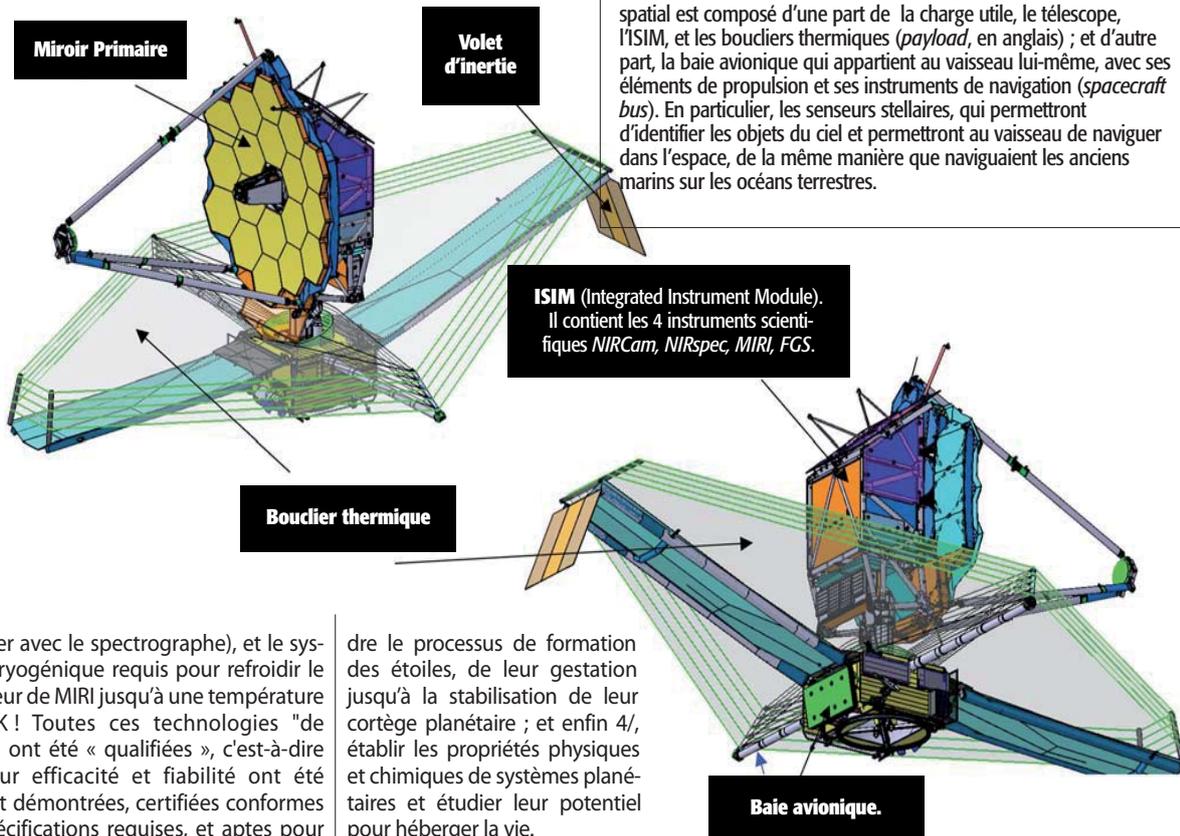
James Webb (1902-1992) fut le second administrateur général de la NASA et le principal artisan du programme Apollo qui, comme chacun s'en souvient, a connu son apogée avec l'alunissage de Neil Armstrong le 20 juillet 1969. C'est d'ailleurs la première fois que la NASA baptise un de ses véhicules spatiaux du nom d'une personne qui n'était pas un scientifique.

### Un miroir pliant protégé par un parasol

Le miroir du JWST aura un diamètre de 6,5 m. Or, si fabriquer un miroir de cette dimension ne pose plus de problème de nos jours, le placer en orbite est une toute autre histoire :

en effet, si le HST, qui n'a "qu'un" diamètre de 2,4 m, était mis à l'échelle du JWST, il serait beaucoup trop lourd pour pouvoir être placé dans l'espace ! De plus, aucune fusée n'est actuellement assez grande pour contenir un miroir monolithique de cette taille puisque le diamètre utile d'Ariane 5 ne dépasse pas 5 m. Le miroir du JWST sera donc composé de 18 segments hexagonaux de 1,315 m de côté, assemblés de telle manière que l'ensemble peut être plié et rentrer dans Ariane, puis déplié une fois libéré dans l'espace (fig. 5 et 6). C'est un peu la même chose, toutes proportions gardées, que de fabriquer un bateau à l'intérieur d'une bouteille ! D'autant plus que le parasol qui doit être utilisé comme bouclier thermique a les dimensions d'un court de tennis : bien entendu, lui aussi sera replié à l'intérieur d'Ariane, et commencera à se déployer 2 jours après le lancement. Cet écran solaire permettra au télescope d'atteindre passivement une température de 37 K (-266 °C), deux mois après le lancement. La température de fonctionnement de l'expérience infrarouge MIRI est encore plus basse (de 4 degrés seulement), mais à ce niveau cette différence est énorme, et pour y arriver, il faudra près de 3 mois supplémentaires ! Pour information, la température du HST varie énormément entre le jour et la nuit et peut atteindre des extrema de -85 °C et +60 °C.

De nombreuses innovations (et prouesses) techniques ont été nécessaires pour réaliser le JWST : ne serait-ce qu'en ce qui concerne la fabrication du miroir primaire, en particulier avec l'utilisation de béryllium pour qu'il soit ultra-léger, mais aussi pour le rendre pliable et, surtout, pour que sa forme puisse être ajustée, une fois les segments assemblés dans l'espace. Je citerai aussi les développements réalisés sur les détecteurs, qui doivent pouvoir enregistrer des signaux extrêmement faibles, le contrôle des micro-obturbateurs par des systèmes de micro-électromécanique (pour le positionnement des objets à



**7. Vues avant et arrière de l'ensemble du JWST.** Un vaisseau spatial est composé d'une part de la charge utile, le télescope, l'ISIM, et les boucliers thermiques (*payload*, en anglais) ; et d'autre part, la baie avionique qui appartient au vaisseau lui-même, avec ses éléments de propulsion et ses instruments de navigation (*spacecraft bus*). En particulier, les senseurs stellaires, qui permettront d'identifier les objets du ciel et permettront au vaisseau de naviguer dans l'espace, de la même manière que naviguaient les anciens marins sur les océans terrestres.

observer avec le spectrographe), et le système cryogénique requis pour refroidir le détecteur de MIRI jusqu'à une température de 7 K ! Toutes ces technologies "de pointe" ont été « qualifiées », c'est-à-dire que leur efficacité et fiabilité ont été dûment démontrées, certifiées conformes aux spécifications requises, et aptes pour leur utilisation dans l'espace, et ce, depuis janvier 2007.

### Les quatre "yeux" du JWST

La mission scientifique impartie au JWST a 4 composantes : 1/ rechercher les premières galaxies ou les premiers objets lumineux qui se sont formés après le Big-Bang, ce qui revient à observer des objets dont le décalage vers le rouge, *z*, est entre 15 et 30, c'est-à-dire dont la lumière a été émise lorsque l'Univers n'avait que de 1 à 2 % de son âge actuel ; 2/ déterminer comment les galaxies ont évolué, depuis l'époque où elles se sont formées jusqu'à aujourd'hui ; 3/ compren-

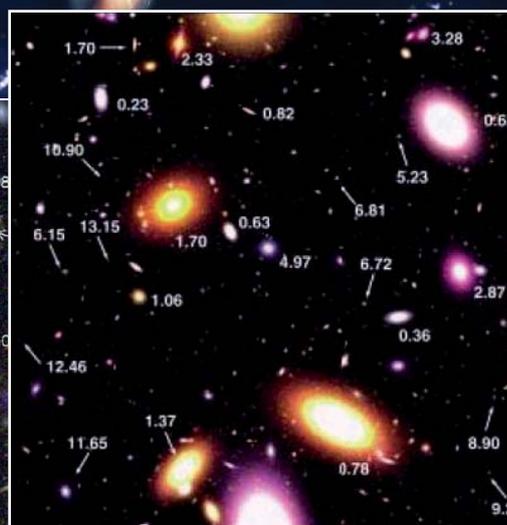
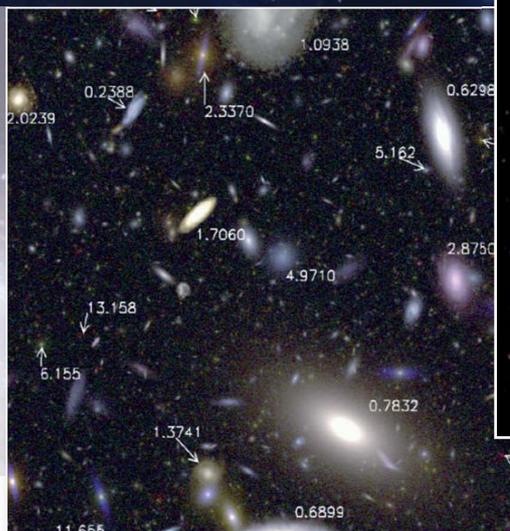
dre le processus de formation des étoiles, de leur gestation jusqu'à la stabilisation de leur cortège planétaire ; et enfin 4/, établir les propriétés physiques et chimiques de systèmes planétaires et étudier leur potentiel pour héberger la vie.

Pour remplir sa mission, le JWST sera doté de 4 instruments (fig. 7) qui opéreront à des longueurs d'onde allant de 0,6 à 28 microns, ce qui est imposé, comme nous l'avons vu, par la combinaison des décalages vers le rouge, de l'assombrissement par les poussières, et des températures intrinsèquement faibles des sources qui seront étudiées (fig. 8).

● **NIRCam (Near InfraRed Camera)** – sera le principal imageur dans la gamme de longueurs d'onde de 0,6 à 5 microns. Cet instrument est requis pour mener à bien un grand nombre des objectifs scienti-

fiques impartis au JWST, en particulier pour ceux qui ont trait à la détection des premières phases de la formation des étoiles et des galaxies. En effet, NIRCam permettra d'observer les premiers précurseurs des amas globulaires actuels, de déterminer des couleurs et d'étudier la morphologie des galaxies très lointaines, de détecter des supernovae très distantes et d'en construire leur courbe de lumière, de cartographier la matière noire grâce au phénomène de lentilles gravitationnelles, et d'étudier des populations d'étoiles dans les galaxies proches. La réalisation de

8. À gauche – Simulation d'un champ profond qui serait obtenu avec le JWST après 10 heures de pose montrant que la lumière d'une galaxie émise lorsque l'Univers n'était âgé que de 330 millions d'années ( $z=13,16$ ) serait détectée. À droite – La même simulation avec un télescope de diamètre identique localisé sur Terre : dû à l'énorme différence entre la luminosité des deux fonds de ciel, il faudrait environ 1000 heures d'exposition avec un télescope au sol pour atteindre un rapport signal sur bruit équivalent à celui qui est obtenu depuis l'espace. Le JWST sera capable de détecter plus de 10 000 objets à très grand décalage vers le rouge ( $z > 5$ ) dans un champ de  $4 \times 4$  minutes d'angle, après 10 heures de pose par filtre.



Les nombres indiqués sont les valeurs de  $z$ .

NIRCam est placée sous la responsabilité de l'Université d'Arizona, à Tucson (USA).

● **MIRI** – sera l'instrument de l'infrarouge moyen (*Mid-InfraRed Instrument*) : il est composé d'un spectrographe et d'un imageur qui opéreront entre 5 à 27 microns. La grande étendue du domaine spectral couvert par cet instrument (en fait, tout l'infrarouge thermique), combinée à la sensibilité exceptionnelle au rayonnement émis à ces longueurs d'onde d'un télescope de 6 m de diamètre refroidi naturellement, augure de nombreuses découvertes. Une résolution spatiale idéale (puisque seulement limitée par la diffraction du télescope) et la résolution modérée du spectrographe, sont des facteurs additionnels qui sans nul doute favoriseront l'éclosion de nombreux programmes

d'observation innovants. En particulier en ce qui concerne un des objectifs déclarés du JWST qui est d'étudier la formation et l'évolution des galaxies qui présentent un décalage vers le rouge supérieur à  $z = 5$ , mais aussi les mécanismes physiques qui régissent la formation des étoiles et planètes, l'étude des disques proto-planétaires, la nucléosynthèse des premiers éléments autres que l'hydrogène et l'hélium (que les astronomes appellent les éléments "lourds"), et la recherche des supports à l'apparition de la Vie. Le budget global de MIRI est partagé à parts égales entre la NASA qui fournira les détecteurs, et l'ESA, qui, comme nous le verrons plus loin, a confié la réalisation de l'instrument à un consortium de partenaires européens.

● **NIRSpec (Near InfraRed Spectrograph)** – sera le spectrographe pour le domaine 0,6 à 5 microns. Cet instrument sera indispensable à de nombreuses recherches : sur la formation des galaxies, sur la manière dont elles se regroupent pour former des amas, pour le calcul des abondances des éléments chimiques, pour la compréhension des mécanismes de formation d'étoiles et pour réaliser les mesures cinématiques afférentes, ainsi que pour l'étude des noyaux actifs de galaxies, des amas stellaires jeunes, et de la fonction initiale de masse (3). Les utilisateurs de NIRSpec auront la faculté d'observer des centaines d'objets différents simultanément dans un même champ de vue. C'est ce que les astronomes appellent le mode **MOS (Multi Objects Spectrograph)**. La sélection des objets s'effectuera



9. L'image UDF du HST (à gauche), qui est une combinaison des 3 couleurs indiquées, est ici transformée (en fonction des caractéristiques optiques du JWST et des performances de l'instrument NIRCAM) en celle qui sera obtenue dans l'infrarouge proche (à droite ; combinaison de 3 images obtenues aux longueurs d'onde indiquées). Pour obtenir un résultat similaire, il faudra un temps de pose dix fois moindre avec le JWST qu'avec le HST. (d'après Gardner *et al.*, 2006).

à l'aide d'une matrice adressable de micro-obturbateurs développée par le *Goddard Space Flight Center* aux USA. NIRSpec sera de plus équipé d'un mode de spectrographie à intégrale de champ qui délivrera des spectres de très hautes résolutions, spectrale et spatiale, sur un petit champ de vue, ainsi que d'un mode de spectrographie classique à longue fente. Dans le cadre de sa contribution au JWST, l'ESA a la responsabilité totale de NIRSpec, et en a confié la réalisation à l'industriel EADS Astrium, tandis que la NASA fournira les détecteurs, en plus des microsystèmes électromécaniques nécessaires à l'établissement des masques dynamiques des obturbateurs pour le mode MOS.

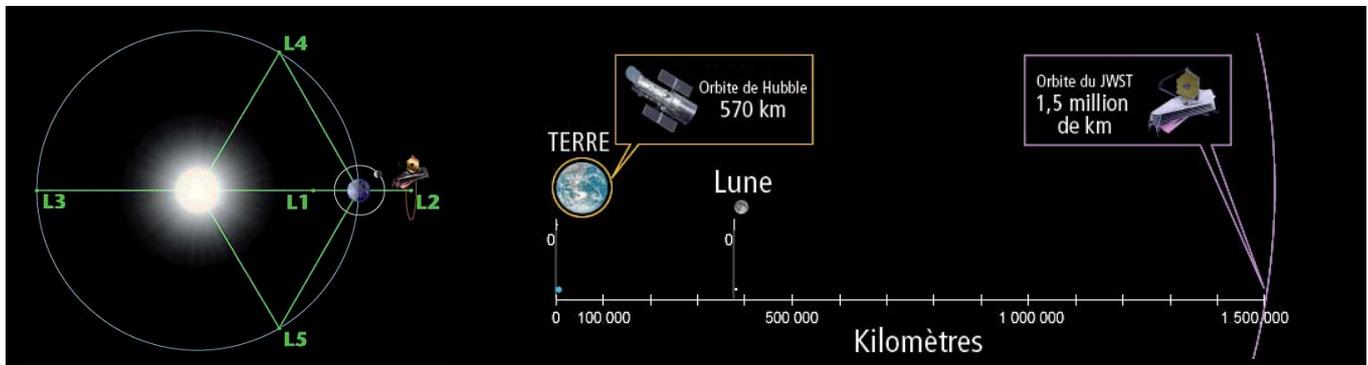
● **FGS-TFI (Fine Guiding Sensor – Turnable Filter Imager)** – est composé de 2 instruments : FGS sera le senseur de guidage fin du JWST. C'est un instrument critique qui localisera les étoiles avec une grande précision et gardera le télescope aligné correctement lorsqu'il fonctionnera. Le niveau de précision requis équivaut

Tout d'abord, nous le savons, les observations qui seront effectuées par le JWST le seront principalement dans des longueurs d'onde situées dans l'infrarouge, alors que le HST observe dans le domaine visible et ultraviolet (encore que le HST peut observer une petite portion du spectre infrarouge entre 0,8 et 2,5 microns). Ensuite, le JWST aura un miroir beaucoup plus grand que ne l'est celui du HST. Ces deux caractéristiques font que le JWST pourra sonder l'Univers beaucoup plus en arrière dans le temps que n'est capable de le faire le HST (fig. 9).

Une autre différence importante est qu'alors que le HST est en orbite proche autour de la Terre (à environ 570 kilomètres), le JWST devra être positionné beaucoup plus loin. Pour être plus froid. Ceci, non seulement parce que la température de fonctionnement des détecteurs infrarouge est très basse ( $-266^{\circ}\text{C}$ ), mais surtout parce que tous les objets (y compris les télescopes !) émettent un rayonnement dans un domaine de longueurs d'onde qui dépend de

d'équilibre à un troisième corps de masse négligeable, c'est-à-dire un point où toutes les forces de gravitation se compensent, ce qui fait que les positions relatives des trois corps restent fixes. Le point L2 reste à l'extérieur de l'orbite de la Terre tandis qu'elle effectue sa révolution autour du Soleil, et les trois corps sont alignés en permanence. Une telle orbite d'autre part garantit la continuité des observations, ce qui n'est pas le cas pour Hubble. Notons que le point L2 est une destination très recherchée, puisque le satellite WMAP y poursuit actuellement ses mesures, et que les télescopes des missions Planck et Herschel, qui seront lancés en début 2009, puis de Gaia, fin 2011, y seront aussi mis en orbite.

Il y d'autres avantages à positionner le JWST en L2 : non seulement l'accès y est direct, ce qui facilite énormément les problèmes de navigation, mais de plus, les forces gravitationnelles combinées de la Terre et du Soleil permettant à elles seules de maintenir le satellite en position,



**10. Les points de Lagrange dans le système Soleil-Terre, et comparaison des orbites du JWST, du HST, et de la Lune.** 59 jours après le lancement, la température du télescope aura déjà suffisamment baissé pour obtenir les premières images. JWST rejoindra son orbite finale en L2 50 jours plus tard, et 4 jours après débiteront les calibrages des instruments, à l'exception de MIRI dont la température d'opération ne sera atteinte que 3 mois plus tard.

à celui qu'il faudrait pour cibler un objet de la taille d'une pièce de vingt centimes d'euro à une distance de 1 000 km. TFI est une caméra éclectique d'utilisation générale, qui obtiendra des images à travers des filtres à bande passante étroite dont la longueur d'onde centrale, entre 1,5 et 5 microns, sera fixée par l'observateur. Bien que physiquement rattaché à FGS, TFI est complètement indépendant de la caméra de guidage et ne joue aucun rôle, ni dans l'acquisition et le centrage des objets, ni dans le pilotage fin du télescope. Il pourra être utilisé pour faire soit de l'imagerie directe, soit de la coronographie, et complète les autres instruments du JWST qui opèrent dans l'infrarouge proche, car il délivrera des images d'une qualité équivalente à celle obtenue avec NIRCam, à travers des filtres dont la résolution et la sensibilité sont comparables à celles de NIRSpec utilisé en mode basse résolution. Cet instrument est développé et financé par l'Agence spatiale Canadienne (CSA).

### Un télescope vraiment nouveau

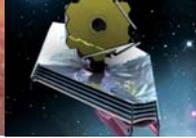
Il est d'usage de dire que le JWST est le successeur de Hubble. Est-ce vraiment légitime ? Il y a, bien sûr, des similitudes : les deux télescopes sont (ou seront) placés dans l'espace. Les deux ont pour objectif de parfaire nos connaissances des phénomènes astrophysiques, par exemple les mécanismes qui gouvernent la formation d'une étoile et de son système planétaire, ou la formation et l'évolution des galaxies. Mais il existe cependant des différences fondamentales entre le HST et le JWST.

leur température, et qu'aux températures qui nous sont familières (celles du HST, par exemple) ce domaine correspond à celui couvert par les instruments du JWST. Ainsi, pour éviter que le signal infrarouge extrêmement faible des objets distants que le JWST se propose d'observer ne soit noyé dans le rayonnement ambiant provenant du télescope et de l'instrument, ceux-ci doivent être maintenus à une température la plus basse possible. Ils émettront alors dans des longueurs d'onde supérieures à celles auxquelles seront effectuées les observations. C'est pourquoi le JWST sera équipé d'un grand écran qui bloquera la lumière du Soleil, de la Terre et de la Lune, qui sinon ne manqueraient pas de réchauffer le télescope, et par conséquent d'interférer avec les observations. Et pour masquer ces trois objets ensemble de la manière la plus simple, le plus facile est qu'ils soient vus par le télescope dans la même direction.

L'endroit le plus propice pour que cela soit, est ce que les mathématiciens appellent le "Second Point de Lagrange (L2)" du système Soleil-Terre (fig. 10) : un point de Lagrange, ou point de libration, est une position de l'espace où les champs de gravité de deux corps en orbite l'un autour de l'autre, et de masses substantielles, se combinent de manière à fournir un point

cela évitera d'avoir trop souvent recours à des fusées auxiliaires, comme c'est hélas le cas pour Hubble dont les gyroscopes sont mis à rude épreuve (et ont une durée de vie limitée !). D'autre part, comme nous l'avons vu, s'il était possible de lancer le HST avec la navette spatiale, cela ne l'est pas pour le JWST, qui devra utiliser la fusée européenne Ariane 5 ECA pour rejoindre son orbite. Et comme celle-ci est beaucoup plus éloignée de la Terre que ne l'est celle du HST, cela signifie en particulier qu'aucune mission de sauvetage ou d'entretien, comme celles qui ont assuré le succès du HST (lire encadré 1) ne pourra être envisagée. Ceci est une différence fondamentale entre les deux télescopes, et un lourd handicap pour le JWST. À tel point que la NASA a finalement décidé (le 24 mai 2007) d'étudier la possibilité que des missions robotisées puissent le cas échéant effectuer certaines tâches de réparation et de maintenance.

Enfin, une importante différence entre les deux observatoires spatiaux est que le JWST sera réellement un observatoire ouvert à la communauté internationale dans son ensemble, en particulier aux astronomes européens, à part égale avec leurs collègues américains, et ceci d'une manière plus formelle que dans le cas du HST. Il est donc à prévoir que les astronomes français



en récolteront un bénéfice encore plus important que celui qu'ils tirent actuellement du HST. En résumé, je préfère quant à moi étiqueter le JWST comme "Grand Télescope Infrarouge Spatial" plutôt que comme "successeur" du HST. Le Télescope de Hubble est, et restera unique. Il n'aura pas de successeur à proprement parlé, et le JWST en sera un grand frère plus jeune.

## Les compétences françaises et européennes

Que les lecteurs étrangers me pardonnent si je m'autorise ici une petite poussée d'orgueil national qui, pour être coupable sur la forme, n'en reste pas moins légitime puisqu'elle me semble justifiée sur le fond !

S'il est un domaine où les astronomes français excellent, c'est bien l'optique ! Je n'en veux pour preuve que le nombre d'entre eux qui ont été "débauchés" par des organisations internationales, des grands centres de recherche de par le monde, et même par l'industrie. Dans leur grande majorité ces experts proviennent de la remarquable école doctorale du DEA de l'université Paris VII et de l'université Paris XI, où Pierre Léna a su créer par son dynamisme et sa compétence une véritable "École française" qui fait l'envie de nos collègues étrangers. Cette "Ecole" se retrouve maintenant sur tout le territoire national, à Paris bien sûr, mais aussi en province : Lyon, Grenoble, Nice ou Marseille, pour ne citer que quelques uns des laboratoires très actifs dans ce domaine, qui s'étend de l'optique adaptative à l'interférométrie, en passant par la coronagraphie. Et en ce qui concerne le JWST, ce dernier volet est, nous l'avons vu, extrêmement important, car il en fait la spécificité française dans le JWST.

### 4QPM, le masque français

En effet, pour espérer pouvoir détecter une planète extrasolaire, ou pour observer un disque autour d'une étoile brillante, il est nécessaire "d'éteindre" l'étoile sans éteindre la planète. Une solution apparemment toute simple consisterait à placer un masque opaque au foyer du télescope, à la position de l'étoile, suffisamment petit pour que la lumière de la planète ne soit pas bloquée. En réalité si on ne prenait pas plus de précaution, cette technique n'apporterait pas un grand gain, et Bernard Lyot a montré en 1929 qu'il fallait également placer un diaphragme dans une image de la pupille. Le coronographe de Lyot fut par la suite converti en coronographe stellaire, ce qui permettait d'observer l'environnement immédiat des étoiles. Mais cette technique est très inefficace lorsqu'il s'agit de détecter des exoplanètes : en effet, non seulement le gain en dynamique est trop faible, c'est-à-dire que le résidu de l'image de l'étoile reste plus brillant que la planète à détecter, mais surtout le masque à utiliser est trop large, c'est-à-dire qu'il "déborde" sur la région où devrait se trouver les planètes que

l'on veut détecter. Des coronographes interférentiels, dont le principe repose sur la production d'interférences destructives sur l'axe optique, ont alors été introduits en 1996. Malgré certains avantages, dont le principal est qu'ils sont parfaitement achromatiques, ils ne sont pas exempts de problèmes qui les rendent finalement impropres à leur utilisation pour la coronographie stellaire. François Roddier a alors proposé, en 1997, un coronographe à masque de phase, dans lequel le masque de Lyot est remplacé par un masque transparent.

C'est en s'appuyant sur le principe développé par François Roddier que Daniel Rouan et ses collaborateurs de l'Observatoire de Paris ont introduit le **masque de phase à 4 quadrants** (connu maintenant comme "4QPM") : la technique qu'ils préconisent consiste à placer un masque de phase constitué de 4 pavés transparents juxtaposés (les quadrants), dont 2 opposés diagonalement sont légèrement plus épais que les 2 autres. La lumière d'une source dont l'image est exactement formée sur l'axe du masque est totalement rejetée en dehors de l'image de la pupille, et il suffit de disposer d'un diaphragme de Lyot pour la faire disparaître complètement. En dépit de son caractère chromatique par construction

(puisque l'épaisseur des marches est fixée par la longueur d'onde à laquelle sont effectuées les observations), les performances remarquables qu'atteignent de tels coronographes, comme l'a démontré Daniel Rouan et ses disciples avec le télescope franco-canadien d'Hawaï (CFHT) et le VLT de l'ESO, en font les meilleurs instruments dont nous disposons pour les observations de disques et d'exoplanètes avec un seul télescope. Et (comme vous l'avez certainement deviné !), des 4QPM fabriqués à l'Observatoire de Paris seront donc intégrés dans MIRIM, l'imageur de l'instrument MIRI.

© ESA, NASA

### La maîtrise des technologies spatiales

La maîtrise du Service d'astrophysique du CEA à Saclay (SAp) en matière d'instrumentation spatiale n'est plus à démontrer : les réussites parlent d'elles-mêmes ! Depuis les 3 compteurs Geiger emportés par une fusée DANIEL de l'ONERA, le 27 janvier 1959, jusqu'à la réalisation d'ISOCam, la première caméra infrarouge envoyée dans l'espace à bord du satellite européen ISO en 1995, qui permit la découverte de l'Univers froid et révéla les premiers sites de formation stellaire, ce service a participé à la plupart des programmes de recherche internationaux de l'ESA ou de la NASA.

**Rappel historique** – Je pourrais citer, pour mémoire : le détecteur qui enregistrait le premier rayon X d'origine cosmique, à bord d'un ballon stratosphérique en 1965 ; la première mesure précise de la rotation du pulsar du Crabe, en 1968, avec une fusée VERONIQUE ; la mesure des particules solaires autour de la Terre, la même année, avec les premiers satellites européens ESRO-2B et HEOS-1; la décou-

verte, en 1969, d'une émission de rayons gamma par les pulsars, grâce à une chambre à étincelle embarquée en ballon ; la première carte de notre Galaxie en rayons gamma avec COS-B en 1975 ; la détermination, avec HEAO-3, en 1979, de la composition des particules cosmiques qui sillonnent la Voie lactée ; la radiographie du cœur gamma de la Voie lactée avec le télescope SIGMA en 1989 ; la première mesure des paramètres du vent solaire et des particules cosmiques aux pôles du Soleil, avec l'instrument KET à bord de la sonde ULYSSE en 1990 ; et "l'écoute du Soleil" avec l'expérience GOLF, à bord de SOHO, en 1995.

L'activité du SAp en matière d'instrumentation spatiale s'est même décuplée dans les dernières années, avec une participation souvent fondamentale dans la réalisation technique et l'exploitation scientifique de toutes les missions spatiales européennes qui sont actuellement en cours : le spectrographe CIRS à bord de la sonde Cassini, qui mesure depuis juillet 2004 la température des anneaux avec une précision jamais atteinte ; les caméras électroniques utilisées par XMM-Newton, le premier observatoire spatial "géant" consacré aux rayons-X, et le plus gros satellite scientifique européen, lancé en décembre 1999 ; la caméra "gamma", au cœur d'un des télescopes d'Integral, l'observatoire de rayons gamma le plus sensible jamais envoyé dans l'espace (en octobre 2002) ; et finalement, une contribution essentielle dans PACS et SPIRE, deux des trois instruments qui équiperont le satellite infrarouge Herschel qui devrait être lancé en début 2009 (la caméra de PACS qui a été développée par le CEA-LETI à Grenoble, étant d'ailleurs la plus grande caméra au monde actuellement disponible).

### Une participation active dans MIRI & NIRSpec

La réalisation de MIRI, pour ce qui est de l'instrument proprement dit, incombe à l'ESA (la NASA fournissant les détecteurs et certains logiciels). Pour mener à bien cette tâche, l'ESA parait un consortium qui regroupe des laboratoires de 10 pays européens (Royaume-Uni, France, Belgique, Pays-Bas, Allemagne, Espagne, Suisse, Suède, Danemark et Irlande). Au sein de ce consortium, le CNES, en partenariat avec le CEA, assume la responsabilité de la réalisation de MIRIM, qui est l'imageur de l'instrument. C'est une énorme responsabilité car cet imageur contient, en particulier, les coronographes, dont la mission est fondamentale pour le JWST. La vocation du SAp n'étant pas de se charger uniquement de l'aspect technique d'un instrument, mais aussi de traduire dans les faits la synergie des ingénieurs et astrophysiciens pour en assurer une utilisation optimale (en intégrant à sa fabrication, le dépouillement des données, l'analyse scientifique, et la théorie), c'est tout naturellement que le CNES lui a confié non seulement la direction des aspects techniques du projet MIRIM, mais aussi celle des aspects scientifiques. D'autant plus que ce service peut se valoir, en plus de son expérience hors pair dans le domaine spatial, de celle acquise avec la réalisation des instruments TIMMI et VISIR de l'ESO qui opèrent dans le même domaine de longueurs d'onde que MIRI. La contribution française, sous la conduite et l'impulsion de Pierre-Olivier Lagage (chef du Service d'astrophysique), inclut également le Laboratoire

d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique (LESIA, Observatoire de Paris), l'Institut d'astrophysique spatiale (IAS, université de Paris-Sud & CNRS) et le Laboratoire d'astrophysique de Marseille (LAM, Observatoire astronomique de Marseille-Provence & CNRS).

D'autre part, le Centre de recherche en astrophysique de Lyon (CRAL) est impliqué dans la réalisation de NIRSpect depuis ses débuts. C'est d'ailleurs le seul laboratoire européen qui participe directement à ce projet, dans le cadre d'un contrat avec EADS-Astrium. Le CRAL est responsable du logiciel de simulation des performances de l'instrument, de sa caractérisation, et de son calibrage au sein de l'équipe d'ingénierie de l'industriel EADS-Space. Le CRAL fait aussi office d'agent de liaison entre l'industriel et l'équipe scientifique de l'ESA, et de consultant pour le développement des procédures d'acquisition des objets, et du logiciel de traitement et visualisation rapides des données de test et de calibrage de l'instrument.

### Le JWST, les planètes terrestres et le futur

Il est établi qu'un des objectifs principaux du JWST sera de détecter la présence de systèmes planétaires autour des étoiles les plus proches. De fait, grâce à ses coronographes, le JWST aura la capacité de détecter directement la lumière réfléchie des planètes géantes (similaires à Jupiter) en orbite autour des étoiles

abandonnée, puis reprise, et qui finalement attend toujours un financement, et surtout DARWIN, de l'ESA, qui est un projet beaucoup plus avancé consistant en une flottille de 4 (probablement 5) télescopes spatiaux de 3-4 mètres de diamètre, mais dont la date de lancement n'est pas non plus encore fixée : allons-nous vers une nouvelle collaboration entre la NASA et l'ESA ? Après l'expérience réussie de JWST, je suis quant à moi tout porté à le croire...

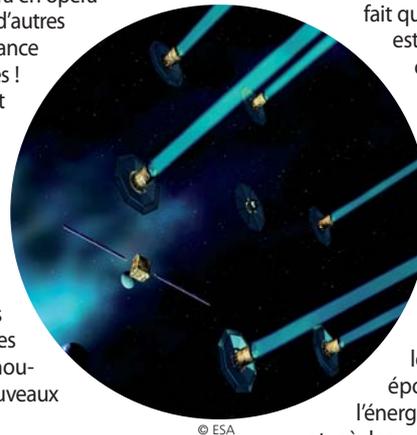
### Et l'énergie sombre ?

Mais nous sommes en droit de nous poser la question : les priorités actuelles le seront-elles toujours lorsque le JWST sera en opération ? N'y en aura-t-il pas d'autres alors ? L'astrophysique avance vite depuis quelques années ! Et puis, comme pour tout télescope qui marque une révolution dans les observations, le potentiel du JWST en matière de découvertes insoupçonnées est immense. Je n'ai pour ma part aucun doute que de nouveaux types d'objets seront dénichés, des mécanismes physiques nouveaux mis au jour, des nouveaux phénomènes démasqués.

Certains lecteurs ne manqueront pas d'être

l'Univers, et elles restent le meilleur outil pour en déterminer le moteur. Si l'on utilise les supernovae pour contraindre la nature de l'énergie sombre, un pas important à franchir est de pouvoir caractériser et calibrer toute dérive due à des effets d'évolution dans leurs propriétés intrinsèques. Et l'un de ces effets de l'évolution qui est extrêmement difficile à caractériser est la relation qui existe (ou pas ?) entre les propriétés de la supernova et ce que les astrophysiciens appellent la "métallicité" (ce mot qui n'existe pas en français indique la proportion, en quantité ou en masse, d'atomes plus lourds que l'hélium) de

l'étoile qui a explosé (j'insiste sur le fait que la métallicité pertinente est celle qui prévalait quand cette étoile s'est formée, et qu'il faut des milliards d'années entre l'époque de la formation de cette étoile et sa mort en supernova). Une excellente méthode pour calibrer l'effet recherché est d'étudier les supernovae excessivement lointaines ( $z > 2$ ), à une époque où les effets de l'énergie sombre sont très faibles, et où les variations des abondances



© ESA

## Dans le futur il faudra utiliser des techniques d'interférométrie spatiale en combinant plusieurs miroirs dans l'espace et percevoir ainsi des détails sur les planètes extrasolaires.

proches. Il permettra aussi de voir des planètes très jeunes en formation, lorsqu'elles sont encore chaudes, et d'observer le transit d'une planète devant son étoile.

Mais ne nous emballons pas : le JWST ne permettra pas de distinguer le moindre détail sur la surface des planètes qu'il observera. Dans le meilleur des cas, il ne verra d'ailleurs qu'une moucheture à côté d'une étoile brillante, et les seules "vraies" images de planètes qu'il nous délivrera seront celles de planètes géantes à des distances relativement grandes de leur étoile. Pour "voir" une planète similaire à la Terre, il faudra un télescope qui offre une résolution angulaire beaucoup plus élevée que celle du JWST, laquelle ne pourra vraisemblablement être obtenue que par interférométrie depuis l'espace. C'est l'objectif des missions TPF (Terrestrial Planet Finder) de la NASA, initialement prévue pour être lancée en 2020, puis

surpris ; les questions les plus brûlantes de l'astrophysique actuelle ont été évoquées et pas une seule fois l'énergie sombre... Que fera le JWST dans ce domaine ? Ils ont raison : un des plus grands défis que doivent relever la cosmologie et la physique actuelle est celui de déterminer la nature de l'énergie sombre qui semble avoir accéléré l'expansion de l'Univers à une époque située il y a entre 4 et 8 milliards d'années. Mais voilà : à l'époque où le JWST était à l'étude, l'existence de cette énergie sombre n'était pas même soupçonnée, puisqu'elle n'a été mise en évidence qu'en 1998. Mais je rassure les lecteurs inquiets : des nouvelles techniques ont été développées pour mesurer cette énergie sombre, et le JWST jouera un rôle dans leur mise en application. En effet, ce sont les observations de la luminosité des supernovae d'un type bien défini (Ia) qui ont fourni la première indication empirique de l'accélération de l'expansion de

cosmiques sont accentuées, donc plus facilement identifiables. Les effets dus à l'évolution sur les supernovae plus proches qui appartiennent à un univers dans lequel l'énergie sombre est importante ( $z = 1 - 1,5$ ), pourraient alors être interpolés à partir des observations réalisées dans l'univers local et celles à  $z = 2$ . Or, les simulations des performances de NIRCам indiquent, avec une incertitude de l'ordre de 50 %, que pour 2 champs observés pendant 3 heures, 3 supernovae au moins pouvaient être détectées, et qu'au moins une d'entre elles aura un décalage vers le rouge supérieur à 2. Le JWST sera donc, rassurons-nous, un excellent outil pour nous éclairer sur le mystère de l'énergie sombre.

Mais, je ne le répéterai jamais assez : « *Bien malin celui qui pourrait prédire les surprises que nous révélera le JWST !* »

**P. Bouchet** ●

(1) – L'expansion globale de l'Univers dilate les échelles de distances et aussi celle des longueurs d'onde, ce qui produit le décalage du spectre des objets lointains ou redshift cosmologique,  $z = \Delta\lambda / \lambda_0$ . Celui-ci est proportionnel à la vitesse  $V$  d'expansion de l'Univers  $z = V/c$  où  $c$  est la vitesse de la lumière. Pour les vitesses proches de celle de la lumière  $z = ((c + V) / (c - V))^{0.5} - 1$ . Les régions pour lesquelles  $z \ll 1$  ( $z = 1$  correspond à 4000 Mpc) font partie de l'Univers local et une distance est dite "cosmologique" lorsqu'elle correspond à un redshift  $z > 1$ .

(2) – De nombreux actuators de haute précision sont utilisés, par exemple, pour ajuster la position d'un détecteur, pour compenser une rotation d'image, et pour faire bouger des composants optiques comme les filtres, masques ou miroirs. La précision requise pour le positionnement peut atteindre 1 à 2 m pour des actuators linéaires, et une poignée de secondes d'arc pour les rotatifs. Ces actuators doivent être conçus spécialement pour pouvoir être opérés dans des conditions de température extrêmes (un coussinet en acier, par exemple, ne fonctionnera pas à des températures cryogéniques s'il est monté dans une enceinte en aluminium).

(3) – La fonction initiale de masse (*initial mass function*, abrégée en IMF en anglais) est la relation qui décrit la distribution des masses des étoiles pour une population d'étoiles nouvellement formées. Elle fournit le nombre d'étoiles de masse  $M$  par unité de masse.