

## Introduction

Herschel est le prochain grand projet spatial auquel le CEA participe tant du point de vue instrumental que scientifique. Pierre angulaire du programme d'exploration scientifique de l'Agence spatiale européenne (Esa), ce satellite sera lancé par une fusée Ariane 5 dans la deuxième moitié de 2008. C'est un télescope spatial de 3,5 mètres de diamètre, dédié à l'observation du rayonnement infrarouge lointain et submillimétrique (de 60 à 670 micromètres).

Il s'agit d'un domaine quasi inexploré du spectre électro-magnétique. En effet, l'opacité et l'émission atmosphériques ont empêché les observations à partir du sol dans la gamme 20 et 400 micromètres et les missions spatiales infrarouges qui ont précédé n'ont pas dépassé la longueur d'onde de 200 micromètres. De plus, Herschel va permettre un gain en sensibilité spectaculaire puisque sa surface collectrice est plus de 10 fois plus grande que celle de ses prédécesseurs.

Prévu pour une mission de trois ans, Herschel s'est fixé deux objectifs principaux liés à la question des origines de l'Univers :

- Dans le milieu proche, il sondera les nuages moléculaires, véritables « nurseries » de jeunes étoiles pour identifier les premiers stades de la formation stellaire et tenter d'expliquer pourquoi toutes les étoiles ne naissent pas avec la même masse.
- Dans l'univers lointain, il scrutera des champs profonds pour y relever les populations de galaxies à l'époque de leur formation, apportant ainsi des éléments cruciaux pour tenter d'établir un scénario d'évolution de l'Univers, du Big Bang à nos jours.



En quelques chiffres :

Miroir :	diamètre 3,5 mètres
Durée de vie :	3,5 ans
Masse au lancement :	3 300 Kg
Dimensions :	9m x 4m x 4m
Température du télescope :	70-90 K

Herschel comporte trois instruments :

- Hifi (Heterodyne Instrument for the Far-Infrared), un spectromètre de très haute résolution ;
- Pacs (Photodetector Array Camera and spectrometer) et Spire (Spectral and Photometric Imaging Receiver), deux caméras infrarouges.

Le CEA est fortement impliqué dans la réalisation de l'instrumentation, principalement dans la construction de la caméra Pacs, de ses détecteurs et de son électronique. Le CEA réalise aussi une large part de l'électronique de Spire et équipe les deux caméras de cryoréfrigérateurs.

## Enjeux scientifiques du télescope Herschel

D'un point de vue organisationnel, le satellite Herschel est un véritable observatoire qui, comme d'autres grands instruments au sol, fonctionnera sur appel à propositions et comité de sélection. À ce titre, l'éventail de ses objectifs scientifiques est large et évolutif.

Toutefois, Herschel a été conçu et se construit avec deux objectifs scientifiques majeurs :

- **étudier les mécanismes de formation des étoiles** et plus particulièrement comprendre pourquoi elles n'ont pas toutes la même masse et élucider le problème de l'origine de cette masse ;
- **étudier les premières phases de formation des galaxies** et comprendre la formation de notre univers.

### - Mécanismes de formation des étoiles

Si les étoiles n'ont pas toutes la même masse, il semble qu'il existe une courbe mathématique universelle, appelée « Fonction de masse initiale (FMI) », qui décrit la distribution des masses des étoiles à leur naissance. On la dit universelle, en ce sens qu'autant qu'on puisse la mesurer, elle se retrouve identique quelles que soient la zone de l'univers et la population d'étoiles que l'on observe, non seulement dans notre voisinage proche, mais aussi ailleurs dans la galaxie et dans d'autres galaxies. (Par analogie, c'est un peu comme si la courbe des poids de naissance des nouveaux-nés était identique quelles que soient la maternité, la ville, le pays, la zone du monde étudiée, sans que l'on sache pourquoi).

Aujourd'hui, les théories rendent relativement bien compte des mécanismes par lesquels les nuages de gaz interstellaire se contractent, s'effondrent sur eux-mêmes, et se fragmentent en embryons d'étoiles, que l'on appelle cœurs pré-stellaires. Elles nous permettent aussi de comprendre l'évolution de ces cœurs pré-stellaires vers l'étoile proprement dite. Cependant, aucune de ces théories ne nous permet de prédire la masse qu'aura l'étoile à sa naissance. Les scientifiques savent uniquement que cette masse est en fait déterminée dès le stade du cœur pré-stellaire. C'est donc les étapes qui mènent à ces cœurs qu'il leur faut étudier.

Or ces cœurs pré-stellaires sont des objets froids, de quelques dizaines de Kelvin. Leur émission est donc presque entièrement contenue dans la bande spectrale qui va de l'infrarouge lointain au sub-millimétrique (le maximum de leur émission se situe vers 200 $\mu$ m et couvre toute la bande qui s'étend de quelques dizaines de  $\mu$ m à quelques centaines de  $\mu$ m). C'est le domaine d'Herschel.

Son objectif est de faire une cartographie complète des nuages interstellaires de notre voisinage et recenser ainsi leur contenu complet en cœurs pré-stellaires. Cela sera possible grâce à la grande sensibilité des instruments d'imagerie et à la grande résolution spatiale offerte par le miroir de 3,5 mètres. La modélisation des observations Herschel permettra d'extraire des quantités physiques comme la température et la masse de ces objets et, par recoupements avec d'autres observations, d'avancer vers une élucidation de l'origine de la fonction de masse initiale.

## - Formation des galaxies

À une échelle complètement différente, Herschel va se tourner vers les confins de l'Univers pour y observer les premières phases de l'évolution des galaxies. L'objectif est de compléter la reconstitution de l'histoire de l'évolution de l'Univers, du Big Bang à nos jours afin de comprendre comment et de quoi est fait l'Univers. Cela revient à maîtriser le jeu des forces qui sous-tendent sa structure, ce qui permet de saisir son évolution future.

Les galaxies émettent dans tout le spectre des longueurs d'ondes, mais avec une répartition différente selon leur âge. Les plus jeunes émettent davantage dans l'infrarouge et les plus âgées dans le visible.

C'est pourquoi, aujourd'hui les chercheurs connaissent bien la période qui va du présent à environ 5 à 7 milliards d'années en arrière, période durant laquelle, l'Univers est peuplé de galaxies essentiellement visibles (celles qui peuplent les images spectaculaires du télescope Hubble), relativement semblables à la nôtre, en ce sens qu'elles ont déjà formé l'essentiel de leurs étoiles et « vivent » paisiblement.

Mais, au-delà de 7 milliards d'années, l'Univers se peuplait de galaxies nettement plus actives, beaucoup moins nombreuses et émettant l'essentiel de leur énergie dans l'infrarouge. Révélées par le satellite Iso (Infrared Space Observatory, lancé par l'Agence Spatiale Européenne en 1995), elles sont très vraisemblablement des systèmes de galaxies en interaction gravitationnelle, interaction favorisée par la plus grande densité de l'Univers à cette époque et connue pour provoquer des flambées de formation stellaire. Celles-ci se produisent au sein de gigantesques nuages de gaz et de poussières collectés lors des collisions galactiques et qui sont si denses qu'ils piègent le rayonnement des étoiles et le réémettent dans l'infrarouge.

Si Iso a su révéler les représentants les plus proches de ces galaxies infrarouges, c'est Herschel, avec son domaine spectral, qui pourra étudier les plus anciennes. Pour cela, Herschel réalisera une série de cartes très profondes dans différentes lignes de visées réparties judicieusement sur la sphère céleste de façon à éviter notre propre galaxie et à moyenniser les fluctuations statistiques dues à la non-uniformité de l'univers. En croisant ces observations avec des relevés complémentaires les chercheurs seront en mesure d'identifier précisément la nature des objets détectés ainsi que leur distance et pourront reconstituer la partie manquante de l'histoire de l'Univers.

Herschel devrait permettre de remonter 1 à 4 milliards d'années plus loin qu'auparavant vers les origines de l'Univers. L'apport pour les scientifiques sera énorme, car cette période était bien plus riche d'événements (au moins cinq fois plus) que les 7 milliards d'années suivantes déjà étudiées.

Charge ensuite aux modélisateurs et aux théoriciens de fournir une description de l'Univers qui soit compatible avec l'histoire observée.

## Les instruments d'Herschel

Dans le choix et la conception des instruments d'astronomie, deux caractéristiques entrent « en concurrence » et s'optimisent au détriment l'une de l'autre :

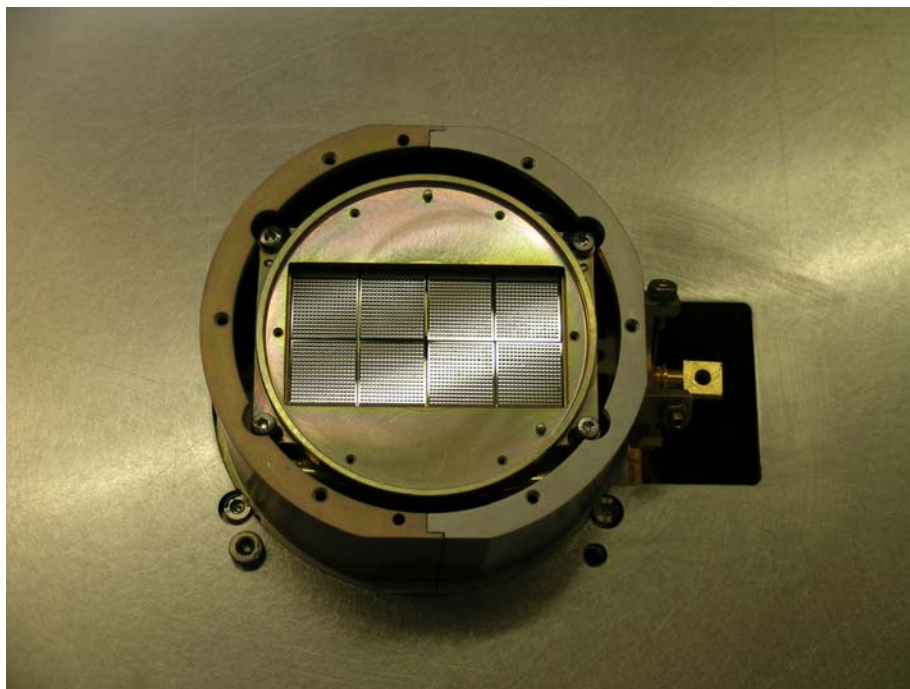
- la résolution spectrale qui fournit de bonnes informations sur les énergies des phénomènes mis en jeu ;
- la résolution spatiale qui permet d'obtenir de bonnes informations morphologiques des objets observés.

C'est pourquoi, Herschel, comme d'autres satellites tels que XMM ou Integral, emporte à son bord deux catégories complémentaires d'instruments afin de s'assurer de la meilleure combinaison instrumentale possible : Hifi est un instrument dédié à la spectroscopie alors que Pacs et Spire sont deux instruments d'imagerie. Ces derniers disposent toutefois d'une capacité de spectro-imagerie. Cette technique permet d'obtenir un spectre pour chaque point du plan focal de l'instrument. On dispose donc d'une information spectrale et spatiale sur l'objet observé. Évidemment, la résolution spectrale atteinte est nettement plus faible qu'avec un spectromètre, mais l'information spatiale est souvent nécessaire si l'on veut déchiffrer la nature des sources célestes.

### - Les deux caméras Spire et Pacs

Les instruments, Spire et Pacs ont donc fait porter l'accent sur la résolution spatiale et la sensibilité au détriment de la résolution spectrale. Ils sont conceptuellement similaires. Ils comportent tous les deux une voie d'imagerie, une caméra en quelque sorte, munie de trois filtres à large bande passante. Dans les deux cas, la détection est assurée par un plan focal constitué de bolomètres (représentant les pixels).

**La caméra de Pacs est révolutionnaire.** En effet, il s'agit du premier plan focal de bolomètres qui puisse véritablement prétendre au nom de caméra : **avec ses 2048 pixels, c'est même la plus grande caméra de bolomètres disponible actuellement.** Ici les bolomètres sont réalisés en série. Chaque pixel est gravé dans une plaque de silicium. Cette plaque est jointe à un circuit de lecture via des contacts en Indium, une technologie héritée d'Isocam, circuit qui permet aussi la réalisation d'une cavité quart d'onde sous chaque pixel, maximisant ainsi l'absorption du rayonnement. La séparation entre chaque pixel est de moins d' $1/10^{\text{ème}}$  de pixel, ce qui permet un échantillonnage complet du plan focal. De plus le circuit de lecture est multiplexé, on n'a besoin que d'une seule voie de lecture pour accéder aux signaux de 16 pixels différents.



Matrices de 2048 bolomètres, fabriquée par le CEA Leti pour équiper le plan focal de la voie 60-110  $\mu\text{m}$  de l'instrument Pacs d'Herschel. La réalisation de telles matrices est une première mondiale.

**Pour Spire**, il s'agit de bolomètres relativement classiques puisqu'on retrouve le même principe dans les instruments Scuba ou Mambo qui équipent des télescopes à Hawaii ou en Espagne. Ces bolomètres sont construits à l'unité puis assemblés dans le plan focal derrière une matrice de guides d'onde qui sert à fournir la sélection directionnelle du détecteur ainsi qu'à favoriser l'absorption du rayonnement. Ces guides d'onde sont relativement encombrants et interdisent de disposer les bolomètres de façon compacte dans le plan focal. Celui-ci est donc sous-échantillonné et des techniques d'observations spécifiques, coûteuses en temps et complexes à analyser, doivent être mises en place.

### - Le spectromètre Hifi de haute résolution

L'instrument Hifi est un spectromètre de très haute résolution spectrale, ce qui permet de détecter des raies très fines en les séparant de leurs voisines ou d'obtenir des informations très précises sur la vitesse de la source émettrice (par l'effet Doppler).

L'obtention de cette résolution spectrale très élevée s'obtient au détriment de la sensibilité et de la résolution spatiale de l'instrument (en fait de résolution spatiale, Hifi ne dispose que d'un seul « pixel »).

### Participation du CEA

Herschel est le fruit d'une collaboration internationale, essentiellement européenne via l'Esa, mais en partenariat avec la Nasa pour la réalisation de certains des détecteurs. Le CEA est un partenaire incontournable dans la réalisation des deux instruments Spire et Pacs :

- le CEA Léti (Grenoble) développe et fabrique les détecteurs de la caméra de Pacs,
- le service des basses températures du CEA (Grenoble) équipe les instruments Spire et Pacs de cryo-réfrigérateurs permettant d'amener les détecteurs à une température de 300 milliKelvin,
- le Dapnia construit la caméra de Pacs et son électronique, ainsi qu'une large part de l'électronique Spire,
- les équipes scientifiques du Service d'astrophysique (Dapnia) prennent une part active à la préparation scientifique et technique des instruments Spire et Pacs.

Aujourd'hui,

- Les tests des plans de vol intégrés dans la caméra ont eu lieu à Garching d'octobre 2006 à juin 2007 ;
- La livraison de la caméra à l'ESA a été effectuée le 3 juillet 2006 ;

En parallèle de ces réalisations, le CEA est un partenaire majeur des centres de contrôle de l'instrument (ICC pour Instrument Control Center). Ces structures, rassemblant des personnels de l'ensemble des consortia, ont pour but d'accompagner l'ensemble des phases de conception, réalisation et exploitation des instruments. Tout au long de ces phases, elles doivent collecter et organiser l'information qui permettra la meilleure exploitation de l'instrument. Pour cela, les ICC sont en charge de la caractérisation et de la calibration des différentes versions des instruments (modèles de qualification, de vol et de rechange). Les ICC ont aussi la charge de développer l'ensemble des outils nécessaires à l'exploitation dont, c'est le plus important, le système d'analyse interactive qui sera utilisé par tous les observateurs d'Herschel pour tirer des informations publiables des observations.

Du point de vue scientifique, la participation du CEA est rétribuée en temps d'observations garanti, réparti selon les trois axes suivants (voir aussi la partie science):

- relevé des nuages de formation stellaire proches et étude des sites de formation d'étoiles massives,
- propriétés du milieu interstellaire dans les galaxies proches ainsi que dans les galaxies naines peu évoluées chimiquement,
- population de galaxies distantes dans l'infrarouge lointain et structuration de l'Univers à grande échelle.