



Petit déjeuner de presse

3 février 2006

« 40 ans d'astrophysique spatiale au CEA »





SOMMAIRE

- ❖ *Introduction* *p.4*

- ❖ *Herschel* *p.5*

- ❖ *James Web Space Telescope, JWST* *p.15*

- ❖ *Nouveaux détecteurs pour la détection de rayons X et gamma à température ambiante* *p.19*



INTERVENANTS

- ❖ ***Pierre-Olivier Lagage, Chef du Service d'astrophysique du CEA***

- ❖ ***Marc Sauvage, Service d'astrophysique du CEA***

- ❖ ***Olivier Limousin, Service d'astrophysique du CEA***

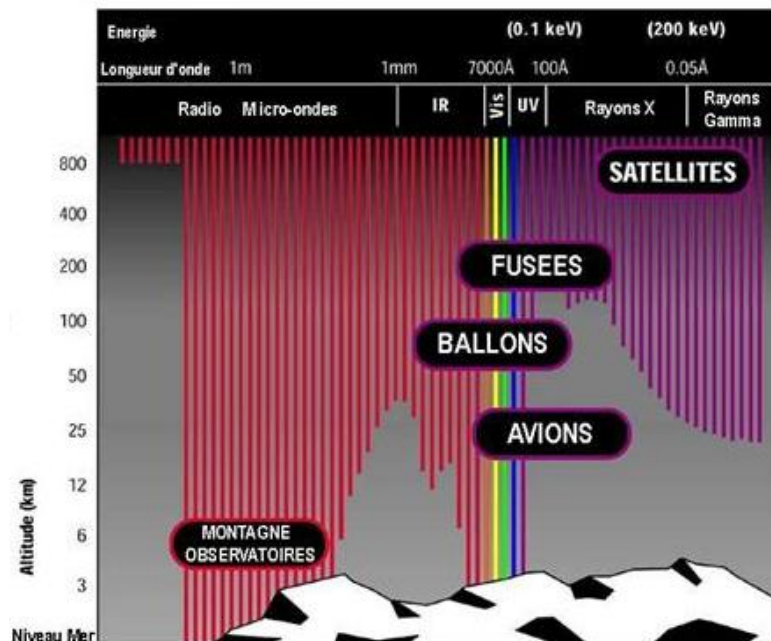
Depuis quarante ans, le CEA est présent dans presque tous les grands projets d'astrophysique spatiale. Il participe aussi à quelques grandes expériences au sol complémentaires des missions spatiales.

Le CEA est impliqué à tous les stades de ces projets :

- il est une force de proposition à la fois scientifique et technique dans la définition et la conception des instruments ;
- il contribue à leur réalisation, avec une expertise particulière dans le domaine des détecteurs, mais aussi de la cryogénie et de l'électronique ;
- il participe à l'exploitation scientifique des expériences et publie régulièrement ses résultats dans les meilleures revues internationales.

En partenariat avec le Cnes, le CEA a participé à presque toutes les missions d'astronomie de l'Esa (Agence spatiale européenne), dans un contexte de collaborations internationales.

L'astrophysique au CEA a commencé dans les années soixante à partir d'activités concentrées sur les hautes énergies et la physique spatiale. Très rapidement, l'interprétation des phénomènes à haute énergie dans l'Univers a nécessité des observations dans d'autres domaines de longueurs d'onde, ondes radio, infrarouge et visible ainsi que le développement de modèles théoriques. L'ensemble du domaine des longueurs d'onde est extrêmement vaste et s'étend depuis les ondes radio (longueurs d'onde de l'ordre du kilomètre) jusqu'au domaine des rayons gamma (longueurs d'onde de l'ordre du milliardième de millimètre). Des ondes radio aux rayons gamma, il s'agit du même phénomène physique d'électromagnétisme. Les seules choses qui diffèrent, en fonction de la longueur d'onde, sont les conditions physiques (par exemple la température) du milieu responsable de l'émission. L'utilisation coordonnée d'instruments complémentaires permet aujourd'hui de mieux connaître les objets en sondant leurs différentes « facettes » par des observations à différentes longueurs d'onde. C'est l'avènement du spatial qui a permis cette approche multi-longueurs d'onde.



Pénétration du rayonnement dans l'atmosphère en fonction de la longueur d'onde

Le CEA, un acteur majeur des recherches en astrophysique

Le CEA, à travers le **service d'astrophysique (SAp) du Dapnia¹**, est l'un des acteurs français majeurs dans la quête de la compréhension de l'Univers. La pluridisciplinarité du CEA permet aux astrophysiciens de collaborer avec d'autres laboratoires (par exemple avec le CEA Leti (Laboratoire d'électronique et de technologies de l'information) à Grenoble pour les développements technologiques ou d'avoir accès aux gros calculateurs du CEA.

Le SAp participe à la **conception**, la **fabrication** et aux **tests** d'instruments aux performances ambitieuses, qui poussent les développements technologiques. Le SAp est aussi un **utilisateur** de ces instruments (et d'autres) et les observations conduites profitent à ses recherches en astrophysique, qui se font la plupart du temps en collaboration étroite avec d'autres laboratoires français et étrangers.

Le SAp est un service de 150 personnes (dont une quinzaine d'enseignants chercheurs de l'université de Paris VII et de chercheurs CNRS réunis au sein d'une UMR), travaillant pour moitié dans l'instrumentation et pour moitié dans l'observation et l'interprétation des résultats. Les services techniques du Dapnia¹ apportent une contribution importante aux projets du SAp. Plus d'une centaine de publications paraissent chaque année dont 2 à 3 dans les prestigieuses revues Nature et Science (10 en 2005).

En 2006 le CEA participe à l'exploitation scientifique de 7 instruments

Quatre missions spatiales :

- Le satellite d'observation des rayons gamma **Intégral** (2002-au-delà de 2010) pour étudier, avec une netteté inégalée, les sources de rayonnements extrêmes de l'Univers, comme les explosions d'étoiles, les étoiles à neutrons ou encore les trous noirs.



L'observatoire **XMM-Newton** (1999-au-delà de 2010), télescope spatial de l'Agence Spatiale Européenne (Esa) lancé en 1999 et destiné à observer, dans le ciel, les émissions de rayonnement X des plasmas chauds, que l'on trouve par exemple dans les vestiges de Supernovae ou les amas de galaxies.

- La sonde **Cassini** (2004-au-delà de 2008) avec à son bord l'instrument Cirs destinée à l'étude des anneaux de Saturne.

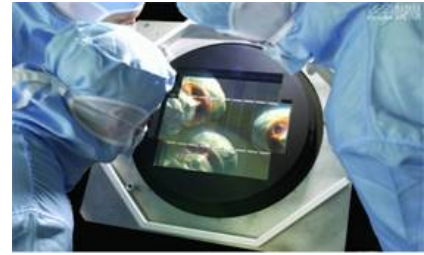


- Le satellite **Soho** (1995-2008) et l'instrument Golf, pour l'étude de la structure interne du soleil par sismologie.

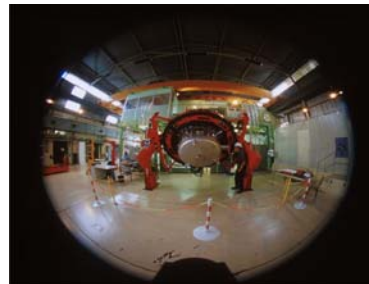
¹ Au Dapnia (laboratoire de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers) de la DSM (Direction des Sciences de la Matière)

Trois missions au sol :

- **MegaCam (2003-au-delà de 2009)**, la caméra d'imagerie astronomique à grand champ dans le domaine spectral visible, installée sur le télescope Canada-France-Hawaii (CFHT), dédiée à la cartographie de grandes régions du ciel avec une très grande sensibilité, pour étudier notamment le côté obscur de l'Univers (énergie noire, matière noire). C'est la plus grande caméra au monde d'observation de la lumière visible.



- L'instrument **Visir** (2004- au-delà de 2009) installé au Chili au foyer d'un des 4 télescopes géants du VLT (Very Large Telescope), pour observer la lumière infrarouge émise par les astres et étudier, entre autres, les disques protoplanétaires dans lesquels se forment les planètes.



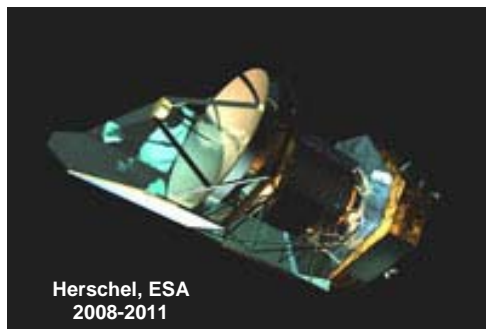
- Le détecteur **Hess** (High Energy Stereoscopic System), (2004- au-delà de 2009) installé en Namibie, est un système de quatre télescopes de 13 mètres de diamètre, et le plus sensible au monde des détecteurs de rayons gamma de très haute énergie (rayonnement un milliard de fois plus énergétique que les rayons X). Ce détecteur permet d'étudier notamment les sites d'accélération des rayons cosmiques.



En 2006 le CEA participe à la réalisation de 3 projets :

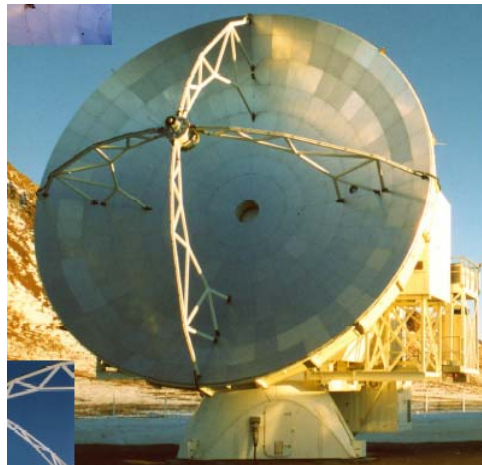
Deux expériences spatiales :

Le télescope spatial Herschel dédié à l'observation du rayonnement infrarouge lointain de l'Univers et le télescope James Web Space Telescope (JWST), télescope spatial de grande taille travaillant dans l'infrarouge et successeur du Hubble Space Telescope (HST). Les enjeux scientifiques et les technologies de ces télescopes sont détaillés dans les deux fiches suivantes de ce dossier.



Une expérience au sol :

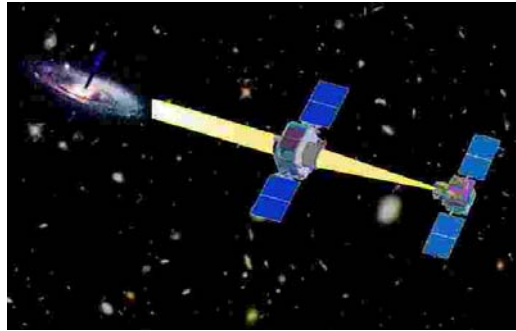
La caméra Artemis, travaillant dans le sub-millimétrique. Cette caméra devrait être installée sur l'antenne Apex, une antenne de 12 mètres déployée dans le désert d'Atacama au Chili. Cette expérience, basée sur l'avance technologique acquise, dans le cadre Herschel, pour l'imagerie dans l'infrarouge lointain, permettra d'observer avec une plus grande netteté les sources découvertes avec le satellite Herschel.



En 2006 le CEA travaille sur les concepts de 4 instruments proposés au Cnes

Le CEA est force de proposition pour des projets en phase d'étude :

- **Symbol-X** est un télescope haute-énergie de nouvelle génération s'appuyant sur une toute nouvelle technologie de vol en formation de deux satellites. Il étudiera les phénomènes les plus énergétiques de l'Univers, comme l'environnement des trous noirs.



- **Eclairs** est un satellite sino-français dédié à l'observation des sursauts gamma.

- **Dynamics** est un micro-satellite dédié à l'observation du cœur du Soleil et de sa dynamique.

- **Dune** vise à embarquer une technologie de type Megacam dans l'espace, afin d'étudier énergie noire et matière noire.

Symbol-X et Eclair reposent sur la forte expertise du CEA dans le domaine des détecteurs « CdTe » pouvant fonctionner à température ambiante. Les recherches menées au CEA sur ces détecteurs et leurs applications font l'objet de la dernière fiche de ce dossier.

HERSCHEL

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 entre août 2007 et février 2008. Il s'agit d'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 :

- A une échelle 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.
- A une échelle plus lointaine, 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 μ m et couvre toute la bande qui s'étend de quelques dizaines de μ m à quelques centaines de μ 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 :

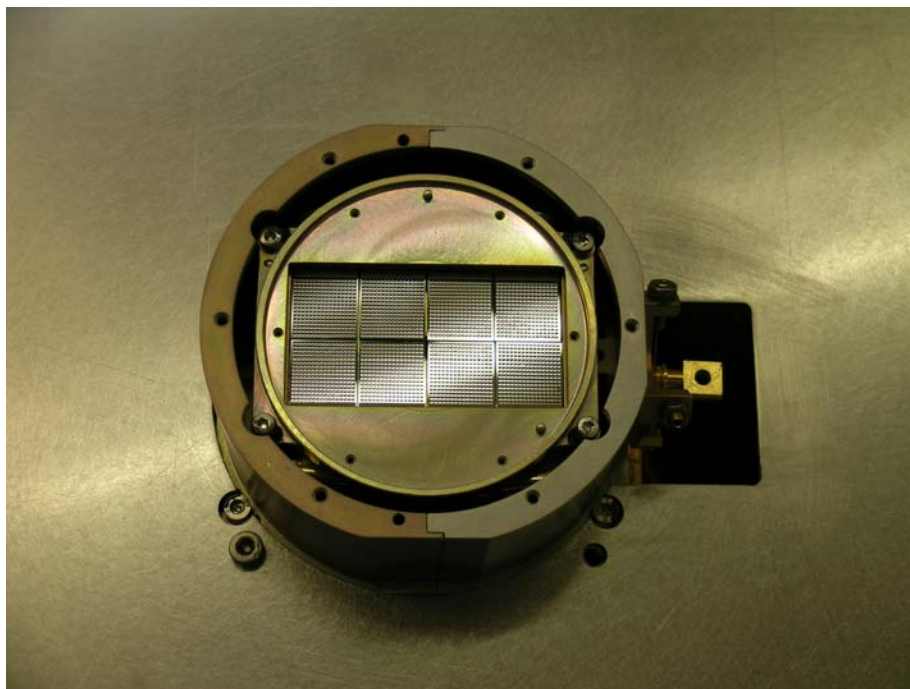
- la résolution spectrale qui fournit de bonnes informations sur les énergies des phénomènes mis en jeu ;
- la résolution spatiale qui permet d'obtenir de bonnes informations morphologiques des objets observés.

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 μm 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 en janvier ;
- La livraison de la caméra à l'ESA est prévue pour le printemps 2006 ;
- Les tests de l'instrument intégré à Garching auront lieu au printemps/été 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.

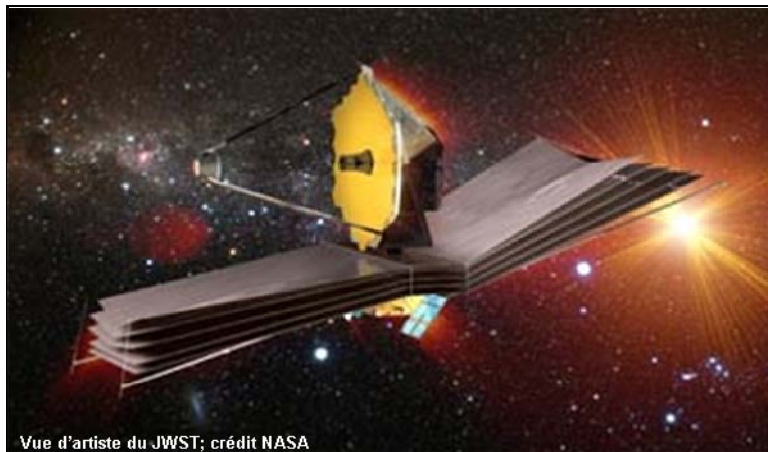
Du point de vue scientifique, la participation du CEA est rétribuée en temps d'observations garanti, réparti selon les trois axes suivants (voir aussi la partie science):

- 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.

Introduction

Le JWST (James Web Space Telescope) est le successeur du HST (Hubble Space Telescope). C'est un programme de la NASA avec une participation de l'Europe à hauteur de 20%, à travers l'Agence spatiale européenne (ESA). Le lancement est prévu mi-2013. Avec un diamètre de 6,5 mètres, le JWST sera alors le plus grand télescope dans l'espace. Il sera dédié à l'observation du rayonnement infrarouge proche et moyen (de 1 à 30 micromètres).

Il s'agit de la deuxième génération de télescope infrarouge. Avec une surface collectrice 100 fois plus grande que celle de la première génération de télescopes (Iras, Iso, Spitzer), et proche de celle des grands télescopes actuellement au sol (VLT, Keck...), le JWST permettra de sonder l'univers très jeune. Il devrait détecter notamment les premières lueurs d'étoiles, les premiers trous noirs et quasars... et étudier la période de ré-ionisation de l'Univers.



Vue d'artiste du JWST; crédit NASA

En quelques chiffres

Diamètre du miroir	6,5 m
Durée de vie	5-10 ans
Masse au lancement :	6 000 kg
Température du télescope :	< 50 K

Le JWST sera équipé de 3 instruments :

- Une caméra pour l'infrarouge proche (1-5 micromètres) : Nircam, conçue et réalisée aux Etats-Unis ;
- Un spectromètre pour l'infrarouge proche : Nirspec, conçu et réalisé par l'industrie européenne sous responsabilité et financement Esa ;
- Un spectro imageur pour l'infrarouge moyen (5-28 micromètres): MIRI (Mid-Infrared Instrument), conçu et réalisé en collaboration entre les Etats-Unis (JPL-Nasa) et l'Esa, à travers les laboratoires spatiaux européens (financement par les agences nationales européennes).

La mission fournira des observations pendant un minimum de 5 ans ; les consommables ont été dimensionnés pour une durée de vie de 10 ans.

Le CEA et fortement impliqué dans l'instrument Miri ; il porte la responsabilité scientifique et technique de la partie française de cet instrument vis-à-vis du Cnes.

Enjeux scientifiques

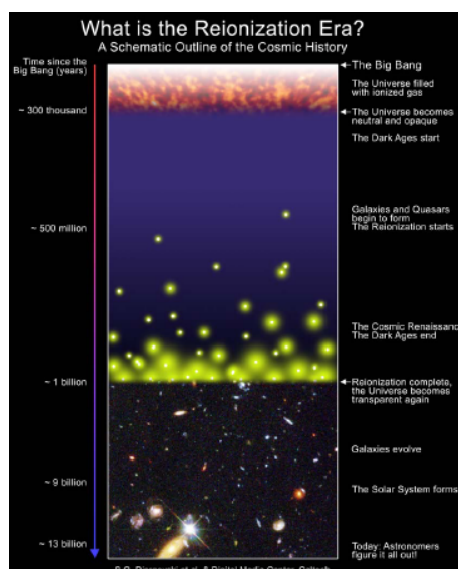
Comme le HST, le JWST est un observatoire qui fonctionnera sur appel à propositions et comités de sélection. À ce titre, l'éventail de ses objectifs scientifiques est large et évolutif.

Toutefois, le JWST a été conçu et construit autour d'un objectif scientifique majeur : **étudier les premières étapes de la « structuration de l'Univers » : les premières lueurs dans l'Univers et la ré-ionisation**

Après le big bang, l'Univers est en expansion et se refroidit. Vers 300 000 ans, l'Univers est suffisamment froid (3000°) pour qu'il y ait recombinaison des électrons et des ions pour former des atomes ; l'Univers devient transparent. Nous avons une bonne connaissance de l'Univers à cet âge grâce aux observations du fond diffus cosmologique. Ces observations ont mis en évidence d'infimes inhomogénéités, à partir desquels l'univers va se structurer, essentiellement sous l'effet de la gravité. On connaît aussi raisonnablement bien l'évolution « récente » de l'univers, entre 7 milliards d'années et 13,7 milliards d'années, (l'âge actuel de l'univers), grâce notamment à des cartographies de larges portions du ciel en visible et en infrarouge.

Cependant, on connaît très mal l'évolution de l'univers entre quelques centaines de milliers d'années et 7 milliards d'années. Les projets comme Herschel vont pouvoir nous dévoiler l'évolution de l'univers dans la tranche d'âge quelques milliards d'années-7 milliards d'années. Par contre, **il faudra attendre le JWST pour connaître ce qui s'est passé au cours des premiers milliards d'années.**

Cette période est très riche, c'est le moment où l'Univers sort de « l'âge sombre » en créant les premiers objets « lumineux » qui vont l'éclairer et le ré-ioniser (voir figure ci-dessous). Les scénarii d'évolution de l'Univers prévoient que les premiers objets à se former sont des étoiles très massives, qui très vite engendrent des trous noirs ; ces trous noirs accrètent de la matière et forment des mini galaxies actives ; dans certains scénarii les trous noirs se forment directement à partir d'effondrements gravitationnels...



Les questions ouvertes qui pourront être abordées par le JWST sont donc :

Quand les premières sources lumineuses sont-elles apparues et quelle est leur nature ?

Quand la re-ionisation a-t-elle eu lieu ? S'est-elle fait en un ou plusieurs épisodes ?

JWST et l'instrument MIRI

Les chercheurs du CEA ont choisi de travailler sur la caméra du spectro-imageur MIRI qui est optimisé pour les observations dans l'infrarouge moyen (5-27 microns).

En effet, l'instrument Miri se situe dans la droite ligne de l'activité infrarouge du Service d'astrophysique du Dapnia qui a travaillé sur la caméra Isocam du satellite Iso et l'instrument Visir installé au VLT. Le Service d'astrophysique du Dapnia a participé aux pré-études de Miri dès 1999. L'instrument Miri combinera l'avantage d'Isocam, instrument dans l'espace et donc possédant une très bonne sensibilité, et de Visir, instrument sur un grand télescope et donc possédant une très bonne résolution angulaire.

Miri est destiné à des observations dans l'infrarouge thermique, longueur d'onde de 5 à 27 microns. Pour répondre aux enjeux scientifiques, il permet 4 modes d'observations : **imagerie, coronographie, spectroscopie à basse résolution et spectroscopie en "champ intégral"**. Les trois premiers sont abrités par l'imageur, dont la conception est proche de celle de Visir.

La plus grande spécificité de l'instrument est le mode coronographique qui permet d'« éteindre » une étoile afin de sonder plus facilement (sans être « ébloui ») ses alentours proches, et ainsi tester la présence de planètes, de compagnons, de disques de poussières... Ce mode nécessite la réalisation de composants spécifiques (optiques et mécaniques), introuvables dans l'industrie, qui, une fois conçus au Lesia de l'observatoire de Paris-Meudon, sont fabriqués par des équipes du CEA (Drecam, Département de Recherche sur l'Etat Condensé, les Atomes et les Molécules).

Collaborations et participation du CEA à l'instrument Miri

MIRI fait l'objet d'une collaboration Europe/Etats-Unis sur la base d'un partenariat 50-50. La participation européenne est un consortium de 10 pays : Royaume-Uni, France, Belgique, Pays-Bas, Allemagne, Espagne, Suisse, Suède, Danemark, Irlande (par ordre d'importance décroissante des contributions financières). C'est le Royaume-Uni qui conduit le consortium européen.

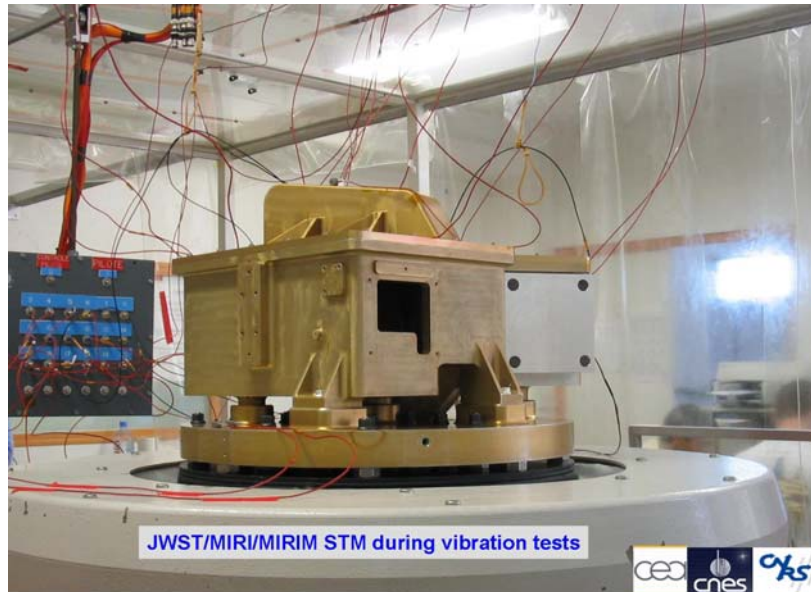
Au niveau français, quatre laboratoires spatiaux sont impliqués : le Dapnia pour le CEA et trois laboratoires du CNRS. Le CEA travaille en partenariat avec le Cnes, 50-50 en coût consolidé. Le Cnes est responsable de la partie française vis-à-vis de l'Esa.

C'est le service d'astrophysique du Dapnia qui a la responsabilité scientifique et technique de la partie française de l'instrument vis-à-vis du consortium européen. Il coordonne l'activité des services techniques du Dapnia impliqués dans le projet ainsi que des 3 autres laboratoires spatiaux français impliqués :

Les missions du Dapnia sont les suivantes:

- management global de la partie française du projet ;
- conception optique ;
- conception et réalisation de la structure mécanique ;
- conception et réalisation de la roue à filtres ;
- spécifications des miroirs (fabriqués en Belgique) ;
- conception et réalisation du système de détection en infra-rouge moyen pour les tests de caractérisation de l'imageur à 7°K au CEA ;
- responsabilité système du simulateur de télescope ;
- assemblage, intégration et tests de l'instrument et des moyens de tests associés ;
- suivi des performances scientifiques au Royaume-Uni et en vol ;

- mise en place d'un centre d'expertise instrumental et traitement des données au niveau français, voire européen ;
- exploitation scientifique des données.



Un instrument spatial est généralement construit à partir d'une succession de modèles : un modèle d'ingénierie, un modèle de qualification, un modèle de vol et un modèle de rechange. La photo ci-dessus représente le premier modèle de l'imageur de MIRI, prêt à être testé en vibration pour vérifier qu'il résistera bien aux fortes vibrations lors du décollage.

Dates importantes :

- 1999 – 2000 : pré-études ;
- 2001 – 2002 : études de phase A (faisabilité) du module optique ;
- Juin 2002 : réaffirmation de la priorité du JWST par l'Esa ;
- Mai 2003 : début de la phase B (études détaillées) ;
- Février 2004 : acceptation définitive du projet par le Cnes ;
- Septembre 2004 : revue des études préliminaires ;
- Avril 2006 : revue des études détaillées ;
- 2005 – 2008 : réalisation, intégration et tests en France du modèle de vol ;
- 2008 : intégration et tests de l'instrument complet en Angleterre ;
- 2010 : livraison aux USA ;
- 2013 : lancement du JWST ;
- 2013-2018 : phase E (opérations scientifiques)

Perspectives

La participation à la réalisation de l'instrument Miri permettra au CEA de bien connaître l'instrument et de bénéficier de temps garanti d'observation (900 heures par instrument). Le CEA occupera ainsi une place privilégiée pour tirer profit scientifiquement de cet équipement phare de l'astrophysique des années après 2013. Compte tenu du large gain en sensibilité que Miri apportera (plus de 100), cet instrument a un fort potentiel de découvertes, avec notamment la possibilité de permettre la première image en infrarouge thermique d'une exoplanète géante. Par ailleurs, ce projet permettra au CEA de garder sa compétence technique dans le domaine de l'infrarouge moyen, domaine qui continuera à être important pour l'astronomie, avec notamment les projets de détection d'exoplanètes « habitables »², comme le projet Darwin de l'Esa.

² Exoplanètes de masses voisines de celle de la terre et sur lesquelles l'eau peut être sous forme liquide

Nouveaux détecteurs pour la détection de rayons X et gamma à température ambiante

Le système de détection des rayons gamma : l'apport du Tellure de Cadmium (CdTe)

Pour étudier les astres dans le domaine des hautes énergies, les astronomes ont besoin de caméras. Elles sont en charge de **réaliser les images (capacité d'imagerie)** des sources célestes émettant à haute énergie (quelques keV à quelques MeV), mais également de **mesurer avec précision l'énergie (performance spectrale)** de chaque photon émis par la source et intercepté dans l'instrument. Une caméra gamma est constituée de pixels, lesquels sont des chaînes de spectro-imagerie dans lesquelles chaque photon est mesuré individuellement.

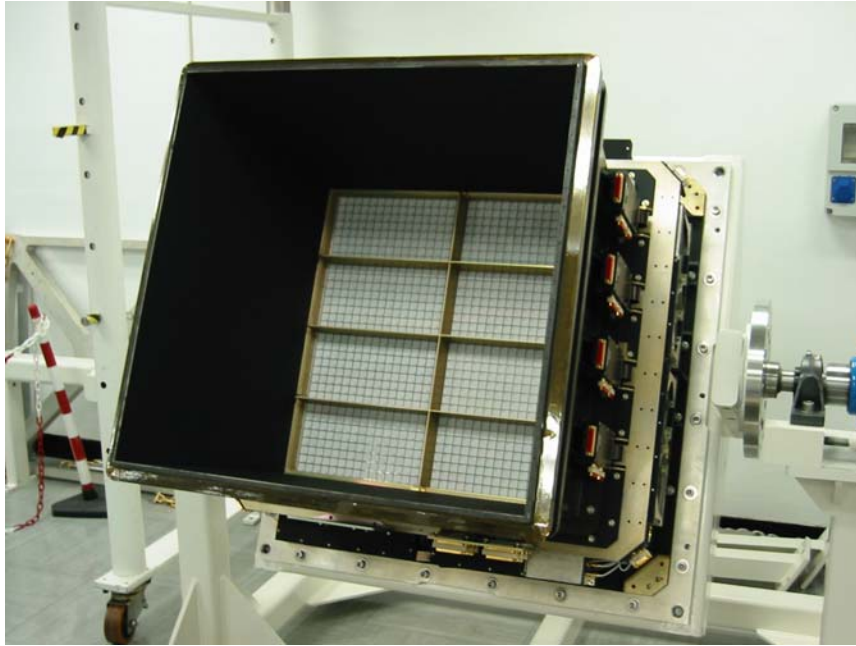
Le tellure de cadmium (CdTe et CdZnTe) sont des matériaux reconnus pour être potentiellement d'excellents détecteurs de rayons gamma et présentent des avantages par rapport aux détecteurs à base de germanium Ge utilisés habituellement :

- Le CdTe et le CdZnTe fonctionnent à **des températures proches de l'ambiante** (typiquement entre -20°C et $+20^{\circ}\text{C}$). Le germanium fonctionne à une température d'environ -200°C et nécessite un environnement cryogénique lourd, compliquant la mise au point de détecteurs destinés à être envoyés dans l'espace.
- Le CdTe est constitué d'atomes lourds (numéro atomique moyen Z élevé ~ 50) et a une densité importante (~ 6), supérieurs à ceux du germanium ($Z = 32$ et densité 5,3). Ces paramètres font du CdTe un matériau efficace pour la détection des photons gamma. **Il permet la réalisation d'ensembles de détection très compacts, ce qui signifie des instruments légers et sensibles.**

Des cristaux de CdTe et de CdZnTe sont utilisés pour des applications variées de spectro-imagerie des rayons gamma, tant dans le domaine de l'astrophysique que de l'imagerie médicale, de la surveillance de matières dangereuses ou encore dans le domaine de la physique nucléaire.

A l'origine, la camera gamma Ibis/Isgrl du satellite Intégral

Deux grandes cameras gamma à base de cristaux de CdTe ou de CdZnTe sont actuellement en orbite. L'une équipe le satellite américain de détection des sursauts gamma Swift mis en orbite basse en novembre 2004. L'autre est la camera gamma Ibis/Isgrl à bord du satellite Intégral de l'Esa (Agence Spatiale Européenne) lancé le 17 octobre 2002. Le développement au CEA de cet imageur pour une application astrophysique haute énergie, a permis de démontrer qu'il est possible d'utiliser avec une grande fiabilité une très grande quantité de cristaux de CdTe.



Unité de détection gamma du télescope Ibis du satellite *Intégral*:
Au premier plan, en blanc, la caméra Isgri à base de 16 384 cristaux de CdTe, actuellement en opération en orbite.

Chaque cristal individuel est utilisé comme un pixel d'une caméra gamma : 16 cristaux constituent un bloc « polycell », 128 de ces blocs sont rassemblés dans chacun des 8 modules d'ISGRI. Cette construction modulaire de l'instrument présente notamment un grand intérêt pour la robustesse et la fiabilité exigées pour une application spatiale : une éventuelle panne reste « compartimentée ».

Améliorer encore les systèmes de détection à base de CdTe

Les chercheurs étudient et mettent au point des solutions techniques pour améliorer les performances spectrales des systèmes de détection et atteindre les performances ultimes de ce type de matériaux, proches de celles des meilleurs détecteurs en germanium refroidis.

Les efforts portent sur l'amélioration de la fabrication des cristaux, la cristallogénèse. La qualité cristallographique (homogénéité) des détecteurs limite la taille des cristaux. Il est intéressant de fabriquer de gros cristaux d'une part pour augmenter le rendement de production et donc diminuer le coût de fabrication, et d'autre part pour pouvoir fabriquer des détecteurs plus épais que quelques millimètres pour être capable de détecter des photons gamma de plus haute énergie (plus le cristal est épais, plus on a de chance d'intercepter et mesurer des photons gamma de haute énergie, lesquels sont très pénétrants). Enfin, la fabrication reproductible de cristaux est nécessaire pour leur usage en nombre dans un spectro-imageur de grande taille.

Bien que le CdTe soit généralement limité par les difficultés liées à sa croissance cristallographique d'une part et par ses propriétés électriques, il est possible de pousser plus avant l'étude et l'emploi de ce type de détecteurs afin d'augmenter leurs performances spectrales (qualité cristallographique, type et géométrie des électrodes, électronique associée et filtrage, ...) et leur résolution spatiale.

Ainsi, pour augmenter la résolution spatiale, il faut soit disposer de cristaux très petits difficiles à manipuler en pratique, soit dessiner les pixels sur l'électrode d'un plus gros cristal.

On peut ainsi fabriquer sur une face d'un cristal un motif de plusieurs petites électrodes individuelles et juxtaposées.

L'objectif scientifique est de progresser simultanément sur tous ces points. Les recherches sont axées sur l'amélioration conjointe des performances spectrales, de la résolution spatiale et l'efficacité de détection à haute énergie (région du MeV). Pour ce faire, le CEA étudie les détecteurs en les caractérisant, les modélisant et les testant, en développant spécifiquement des moyens électroniques miniatures de lecture, en étudiant la technologie pour les intégrer dans des systèmes plus vastes, susceptibles de **constituer de véritables gamma caméras spatiales, fiables, consommant peu d'énergie et tolérantes aux radiations.**

Les développements en cours ... et quelques résultats

Les travaux sur le CdTe entamés en 1992 au Dapnia ont conduit à la réalisation d'ISGRI. Depuis, une nouvelle action de recherche et développement sur les détecteurs à base de CdTe est en cours au Dapnia et a démarré en 2003 avec le soutien du CNES. Des résultats très prometteurs qui ouvrent de nouvelles perspectives pour les expériences futures dans le domaine de l'astronomie des hautes énergies ont été obtenus.

En particulier, une série de circuits microélectroniques (IDeF-X pour Imaging Detector Front-end) a vu le jour et nous a permis de démontrer notre capacité, moyennant l'emploi de détecteurs CdTe pixélisés adaptés, à atteindre des performances spectrales excellentes sans que le senseur ne soit refroidi. Un refroidissement modéré a amélioré également les résultats.

Les chercheurs ont réalisé des avancées **en améliorant d'un facteur 5 la résolution spectrale**, c'est-à-dire la précision de mesure de l'énergie des photons qui interagissent dans le détecteur. **Le seuil de détection, c'est-à-dire l'énergie minimale des photons enregistrés par le détecteur, a également été amélioré en passant de 12 keV pour ISGRI à moins de 2 keV pour les nouveaux prototypes.** Ce dernier point est essentiel dans la mesure où il permet aux astronomes gamma d'étudier avec le même instrument les sources dans le domaine des rayons X, domaine où les photons sont bien plus abondants qu'à plus haute énergie : dans le cas particulier de recherche des sursauts gamma par exemple, détecter les photons de basse énergie augmente d'une manière significative les chances de détection et accroît les chances d'observer les sursauts les plus lointains.

Perspectives d'utilisation des détecteurs et de leur électronique dans de nouvelles missions spatiales

Forts de ces résultats, les scientifiques du Dapnia ont pu proposer de nouvelles expériences scientifiques pouvant être équipées de ces nouveaux détecteurs. On compte parmi les propositions deux télescopes :

Le télescope ECLAIRS à bord du satellite sino-français SVOM (Space based multi-band Variable Object Monitor) est dédié à l'observation des sursauts gamma dans la bande d'énergie 4 keV - 300 keV et pourra probablement voir les premières explosions d'étoiles, lorsque l'Univers avait moins d'un milliard d'années. Cette mission, actuellement en phase A (étude de faisabilité) au Cnes et au CEA, est prévue à l'horizon 2010. Outre le Dapnia du CEA, elle implique de nombreux laboratoires : le CESR à Toulouse, l'APC et l'IAP à Paris et le MIT à Boston. L'instrument, placé en orbite basse, doit pouvoir détecter et localiser les sursauts gamma, en mesurer le spectre dans les bandes des photons X et gamma, alerter en temps réel la communauté scientifique de l'apparition d'un sursaut et en fournir les coordonnées. En effet, ces objets célestes très brillants sont fugaces (de quelques

secondes à quelques minutes). Une analyse multi longueurs d'ondes, employant par exemple des télescopes basés au sol ou d'autres télescopes spatiaux, impose que le télescope ECLAIRs fournisse l'alerte et transmette en moins d'une minute la position du sursaut sur la voûte céleste avec une précision de l'ordre de 10 minutes d'arc.

Pour détecter les sursauts gamma, le télescope ECLAIRs sera composé d'une ouverture à masque codée associée à une caméra gamma d'environ 1000 cm² de CdTe capable de mesurer les photons à partir de 4 keV. Nos détecteurs sont parfaitement adaptés à la situation et sont aujourd'hui proposés pour cette expérience.

Par ailleurs, ces détecteurs pixélisés sont également bien adaptés à la mesure des photons gamma émis par les trous noirs et autres objets compacts qui pourront être mesurés avec une précision, une sensibilité et une résolution angulaire jamais égalées dans ce domaine d'énergie (quelques keV à 80 keV) par **la mission de vol en formation SIMBOL-X**. Cette mission principalement franco-italienne, à l'initiative du Cnes et sur proposition du CEA, est actuellement en phase A. Elle implique également d'autres laboratoires dont notamment l'observatoire de Brera Milan et le MPE Munich.

La mission sera un observatoire mettant en service deux satellites asservis et volant en formation. Le premier satellite comporte une optique à rayons X de haute énergie à incidence rasante. Les photons des sources pointées seront focalisés à une trentaine de mètres au foyer du télescope, sur le plan détecteur, équipé entre autres de CdTe, positionné sur le second satellite de la formation.

La mission sera propulsée sur une orbite fortement excentrique vers 2013.

En plus de leur utilisation à des fins astrophysiques, les détecteurs CdTe pourraient s'avérer très intéressants pour la surveillance de l'environnement ou du respect des traités internationaux : Tice, traité d'interdiction complète des essais nucléaires et TNP, traité de non prolifération