

L'INSTRUMENTATION SPATIALE à l'IAS

L'astrophysique moderne, de par la nécessité d'élargir le spectre électromagnétique pour l'observation des « objets » astronomiques et la possibilité d'envoyer des sondes *in situ* pour étudier les différents corps du Système Solaire, ne peut se passer de l'accès à l'espace. L'Institut d'Astrophysique Spatiale conçoit, réalise et étalonne de nombreux instruments scientifiques, embarqués sur ces satellites et sondes spatiales.



QUELQUES MISSIONS à forte participation IAS

L'Institut d'Astrophysique Spatiale

Les équipes scientifiques et techniques de l'IAS conçoivent des instruments pour les grandes missions spatiales d'astrophysique et d'exploration du Système Solaire.

Elles en supervisent la réalisation, en valident les performances, puis, une fois la mission lancée, assurent les opérations scientifiques, la mise en forme et l'analyse scientifique des données obtenues, qu'elles archivent pour la communauté nationale et internationale.

L'IAS travaille en étroite collaboration avec d'autres laboratoires spatiaux, en France et à l'étranger.

→ Unité Mixte de Recherche, CNRS (INSU) et Université Paris Sud XI

→ fort soutien budgétaire du CNES sur les projets spatiaux

→ 160 personnels de recherche au 1^{er} janvier 2009

3 ÉQUIPES SCIENTIFIQUES + 1

- Physique solaire et stellaire
- Matière Interstellaire et Cosmologie
- Physique du système solaire et des systèmes planétaires
- Équipe transverse : astrochimie et origines



42 chercheurs et enseignants-chercheurs
(20 CNRS, 16 université, 6 astronomes-adjoints)
16 post-doctorants, 26 doctorants

LES SERVICES TECHNIQUES

5 SERVICES :

- Administration et logistique
- Informatique
- Mécanique et thermique
- Électronique
- Optique

2 MOYENS D'INTÉRÊT NATIONAL :

- Station d'étalonnage
- IDOC : opérations scientifiques, mise en forme et archivage des données spatiales

Laboratoires : astrochimie, matière noire, submillimétrique



77 ingénieurs, techniciens et administratifs
(60 CNRS, 2 université, 15 CDD)

INSTRUMENTATION SCIENTIFIQUE

les grandes étapes

Pour étudier l'Univers proche ou lointain, nos instruments sont embarqués à bord de sondes, d'observatoires spatiaux ou de ballons. La conception, la réalisation et l'utilisation de ces instruments se décompose en grandes étapes.

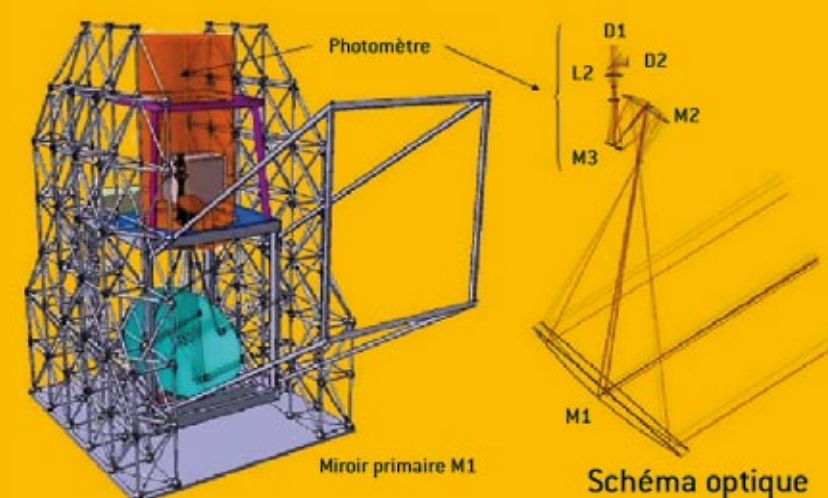
1 CONCEPTION ASSISTÉE PAR ORDINATEUR

Le concept instrumental est défini à partir des performances requises et de l'environnement dans lequel l'instrument doit opérer.

Cette étape débouche sur un dossier scientifique et technique décrivant l'instrument.



LA MODÉLISATION DE L'INSTRUMENT LYOT (SMESSE)



LE SCHÉMA OPTIQUE DU PHOTOMÈTRE PILOT

2 RÉALISATION de l'instrument



← L'INSTRUMENT CIVA-M/I (ROSETTA)

L'INSTRUMENT HeCOR (FUSÉE HERSCHEL) ↓



← PLATINE BOLOMÈTRE DE L'EXPÉRIENCE HFI (PLANCK)

Le plus souvent, les éléments d'optique, mécaniques, thermiques, sont fabriqués par des industriels.

Ils sont montés dans un premier temps pour réaliser une maquette et dans un deuxième temps, pour construire le modèle de vol qui sera lancé dans l'espace.

3 ESSAIS OU TESTS de l'instrument

Jusqu'à la fin de la fabrication, de nombreux tests (qualification/validation) sont exécutés sur les différents modèles. Ces tests demandent des moyens lourds pour contrôler les performances de l'instrument, le tester en environnement représentatif que

ce soit dans le lanceur (vibrations au décollage) ou dans l'espace (rayonnement, vide, compatibilité électromagnétique, température).

CAMPAGNE DE TEST EN SALLE PROPRE AVEC LA CUVE NEPTUNE →



INSTRUMENTATION SCIENTIFIQUE

les grandes étapes [suite]

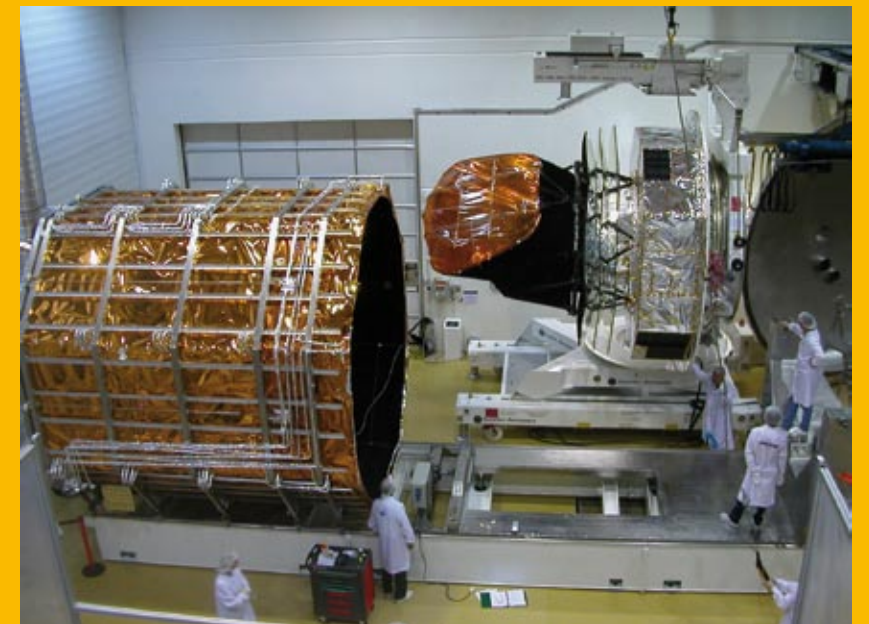
4 ÉTALONNAGE de l'instrument

Cette étape a pour objectif une parfaite connaissance de l'instrument qui permettra d'extraire les informations utiles des observations.

Au sol, cela consiste à enregistrer les réponses de l'instrument à des

sources lumineuses étalons.

En vol, les étalonnages permettront de suivre l'évolution des performances de l'instrument, par l'utilisation d'étalons embarqués ou par l'observation d'objets astronomiques stables.



ÉTALONNAGE DE PLANCK/HFI

5 LANCEMENT puis VOL



LE TIR D'UNE ARIANE 5



VUE D'ARTISTE DE SOHO



VUE D'ARTISTE D'UN DES ORBITEURS (MPO) DE LA MISSION BEPI-COLOMBO

Le satellite est mis en orbite ou à poste par un lanceur.

Durant cette phase non-opérationnelle pour l'instrument, des exercices ou contrôles sont effectués en vue de s'assurer du bon fonctionnement de ce dernier.

6 L'OBSERVATION

C'est la finalité de l'instrument d'un point de vue technique.

Cette phase permet de contrôler et de piloter l'instrument ainsi que de recevoir les données. Il s'agit de données techniques de contrôle de l'instrument puis des données scientifiques relatives aux objets observés.

Ces données scientifiques concernent de nombreux objets tels que l'atmosphère solaire, le fond diffus cosmologique, les roches martiennes, les comètes...

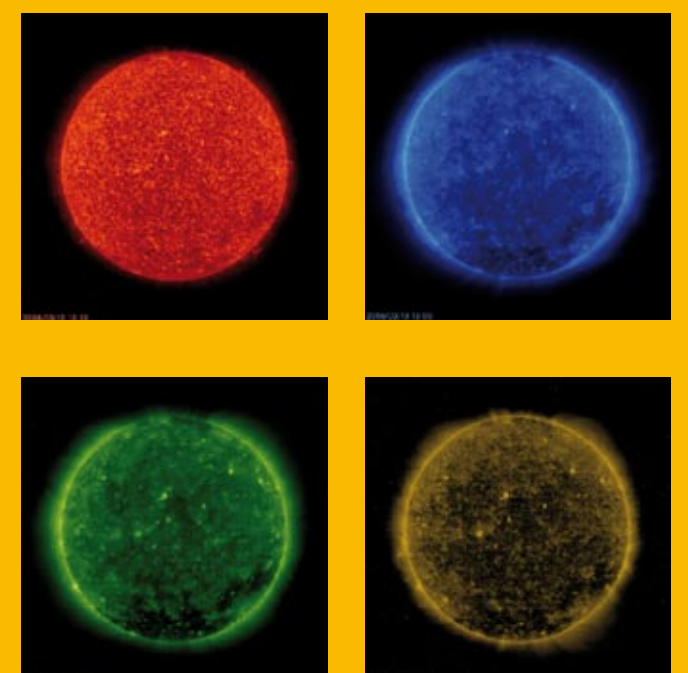
7 ANALYSE DES DONNÉES ACQUISES

Cette analyse se fait soit en temps réel, soit avec un décalage temporel. On procède ensuite à l'interprétation de ces données.

Les données brutes sont «réduites» pour passer aux données scientifiques.

À partir de ces données scientifiques, on met en évidence la nouveauté des résultats obtenus, on les compare avec les prédictions de modèles, on propose de nouveaux modèles.

C'est cette étape du traitement des données qui permet aux scientifiques d'avancer dans la compréhension de l'univers qui nous entoure.



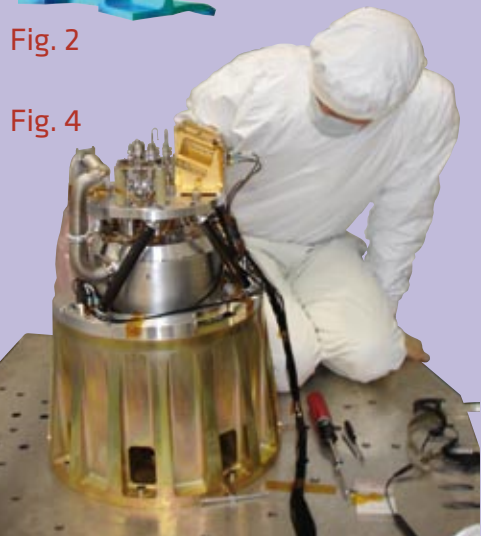
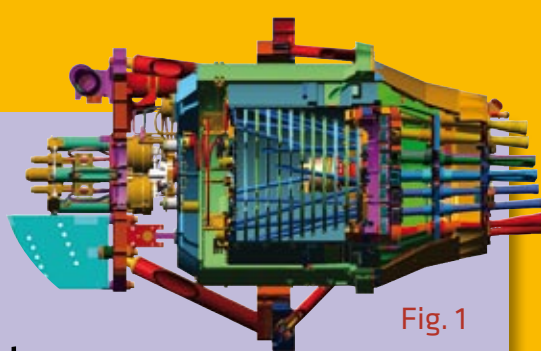
IMAGES DU SOLEIL DE L'INSTRUMENT EIT (SOHO) à différentes longueurs d'onde (304/171/195/284 Angströms)

LES MÉTIERS techniques dans un laboratoire spatial

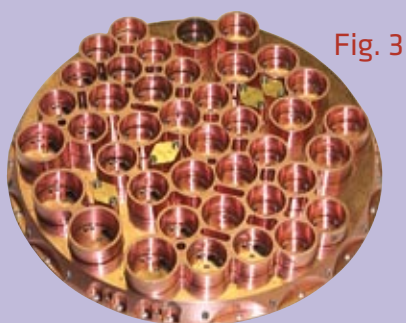
La réalisation d'un instrument spatial nécessite de réunir des compétences dans de nombreux domaines au cours de chaque phase du projet...

1 MÉCANIQUE

Les mécaniciens conçoivent chaque pièce et tout l'instrument en CAO 3D (fig. 1), le leitmotiv est la masse. L'ingénieur en calcul des structures (fig. 2) vérifie par simulation que les pièces résisteront aux vibrations du lanceur (Ariane, Soyouz...).



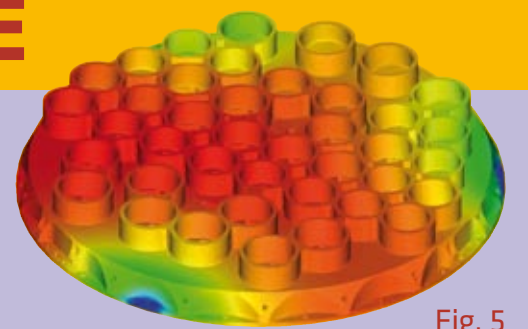
L'usinage des pièces est sous-traité (fig. 3).



L'instrument assemblé est finalement testé sur un pot vibrant (fig. 4).

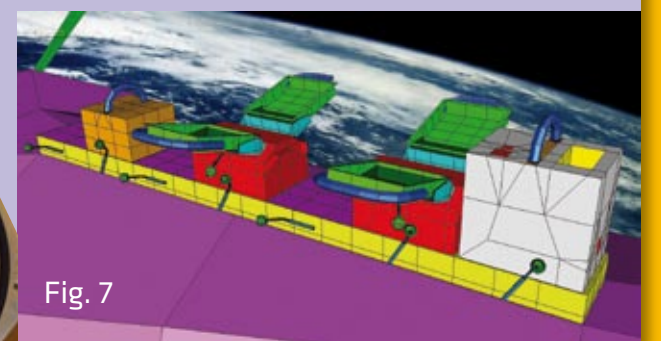
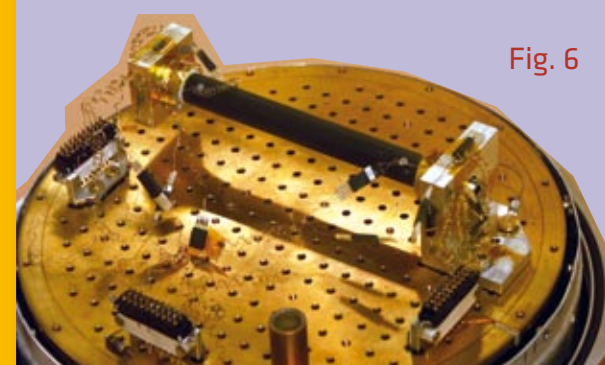
2 THERMIQUE

Les thermiciens évaluent les gradients de températures (fig. 5) attendus en effectuant des simulations.



Ils mesurent les performances des sous-systèmes (fig. 6) et de l'instrument (vide thermique).

Ils définissent le contrôle thermique de l'instrument et élaborent un modèle complet afin d'évaluer ses performances en orbite (fig. 7).



3 MANAGEMENT

Pour chaque instrument, une équipe projet regroupant toutes les disciplines impliquées est formée. Le chef de projet est responsable du développement de l'instrument en

respectant le calendrier et le budget définis par les agences (CNES, ESA, NASA...). L'ingénieur système et les architectes de chaque discipline font les choix

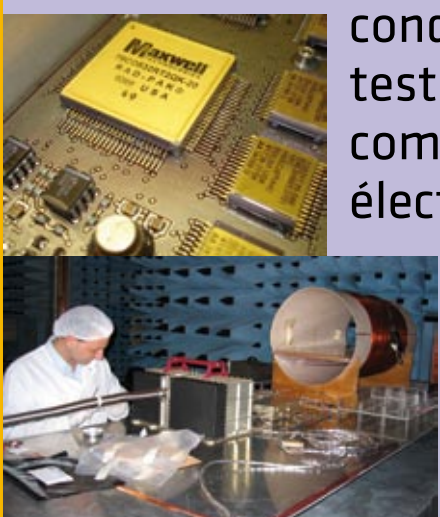
techniques adéquats. L'objectif commun est la définition d'un instrument dont les spécifications permettront d'atteindre les objectifs scientifiques.

4 ÉLECTRONIQUE

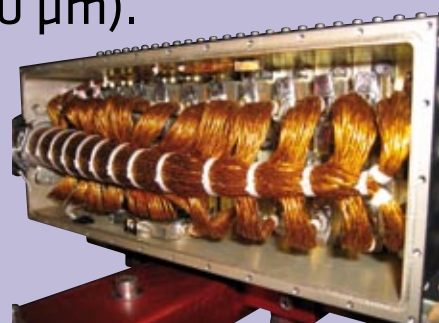
Les électroniciens conçoivent les cartes avec des logiciels de simulation électronique (fig. 8).



Ils utilisent des composants (fig. 9) résistants aux radiations présentes dans l'espace. Ils conduisent des tests comme la compatibilité électromagnétique (fig. 10).

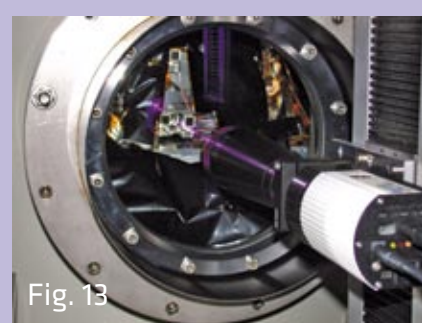
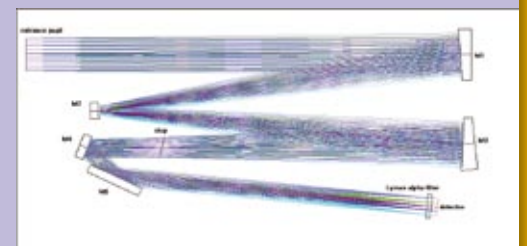


Le câblage requiert une grande dextérité, les connecteurs étant miniaturisés et certains fils (fig. 11) de très faible diamètre (100 µm).



5 OPTIQUE

Les opticiens définissent, simulent (fig. 12) et optimisent le schéma optique. Ils font en général réaliser les optiques par des industriels.



Ils conduisent des tests (fig. 13) afin de contrôler les performances de leurs sous-ensembles (fig. 14), puis de l'instrument complet. Ils définissent les procédures d'alignements optiques appliquées lors de l'intégration de l'instrument sur le satellite.

LES MÉTIERS techniques dans un laboratoire spatial [suite]

6 INTÉGRATION

Techniciens et ingénieurs intègrent (fig. 15) à l'IAS tous les sous-systèmes qui constituent l'instrument.

Ils maîtrisent les différentes techniques d'assemblage et notamment les collages structuraux.



Fig. 15

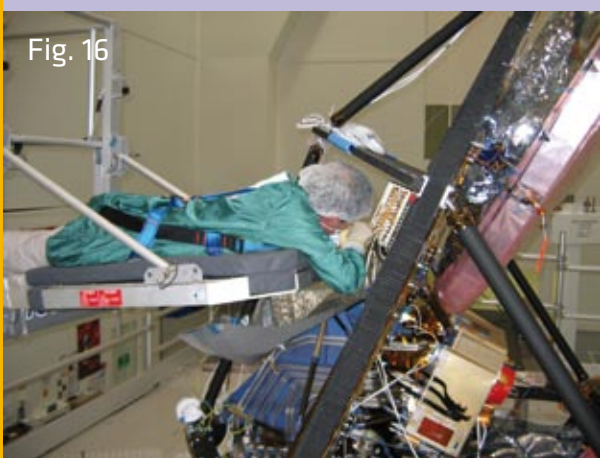


Fig. 16

Ils effectuent les réglages du positionnement des composants optiques. Leur travail s'achève par l'intégration sur le satellite

(fig. 16).

7 TESTS, ÉTALONNAGE

Avant d'être livrés pour intégration sur le satellite, les instruments sont testés et étalonnés (fig. 17) à la Station d'Étalonnage de l'IAS.

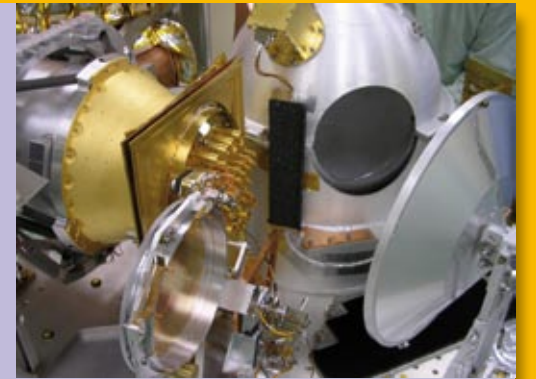


Fig. 17



Fig. 18

Les métiers impliqués sont nombreux : techniques du vide, cryogénie (fig. 18), mesures physiques, pilotage des moyens de test (fig. 19).



Fig. 19

Ces tests nécessitent un travail en salle propre et pour certains essais se déroulent 24h/24h.

8 ADMINISTRATION

Ses personnels interviennent pour les achats publics, la gestion du personnel, des contrats et de

la documentation associée aux projets. Ils ont aussi en charge l'organisation de réunions et de

colloques, ainsi que la gestion des déplacements en France et à l'étranger.

9 INFORMATIQUE

Outre l'infrastructure générale du laboratoire (fig. 20), et les outils informatiques utilisés au quotidien, les informaticiens développent des outils spécifiques : pilotage des tests, logiciel de bord, télécommandes et télémessures (fig. 21 et 22), traitement et mise à disposition des données à la communauté scientifique.



Fig. 20

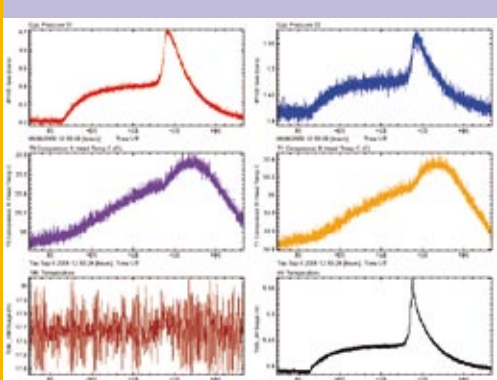


Fig. 21 Fig. 22



10 ASSURANCE PRODUIT

Les ingénieurs qualité interviennent sur : les aspects sûreté de fonctionnement, la qualité des composants et des matériaux, les procédés de sélection et de qualification, la gestion des non conformités.

De nombreuses vérifications sont effectuées, par exemple la propreté en utilisant une lampe UV (fig. 23).

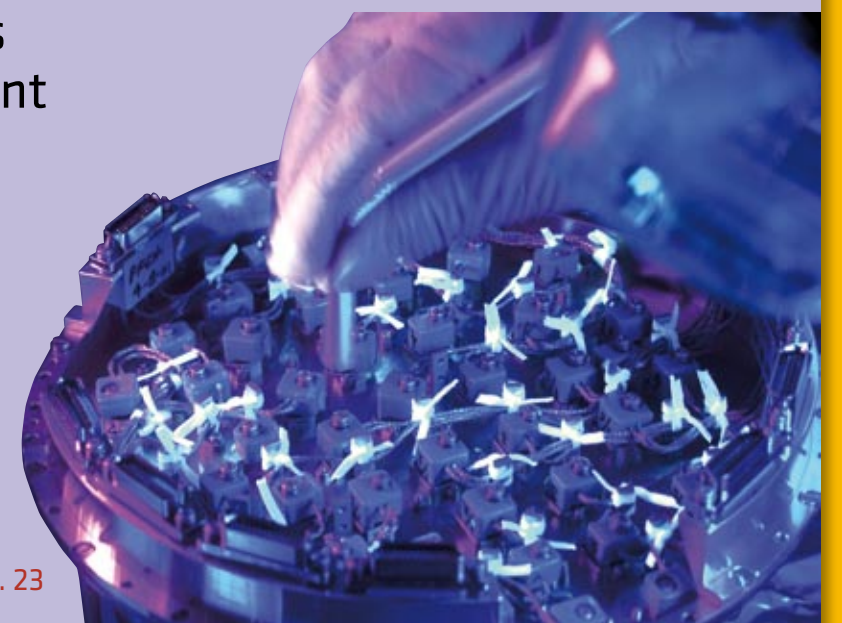


Fig. 23

IDOC IAS Data and Operation center

Une équipe composée d'une dizaine d'ingénieurs et techniciens assure des missions de :

- Contrôle des instruments spatiaux
- Sécurisation et haute disponibilité des données
- Mise à disposition lisible et efficace des données satellitaires
- Diffusion du savoir-faire scientifique

Ces missions sont à destination de l'ensemble de la communauté astrophysique.

INFRASTRUCTURES ET MOYENS

• Infrastructure physique

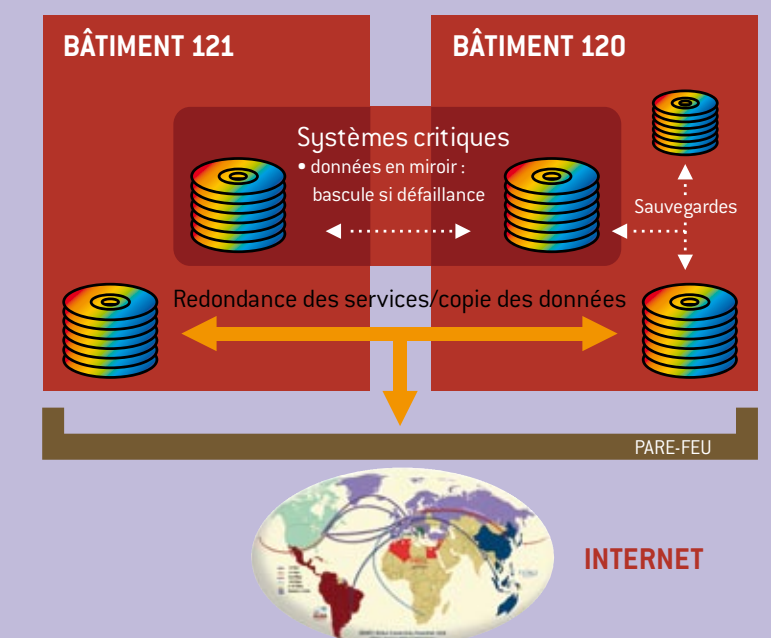
Réseau très haut débit (fibre optique), Répartition des services sur 2 bâtiments.

• Contrôle et interventions

Surveillance des systèmes critiques, Alertes sur incidents (par mail et SMS).

• Distribution des données

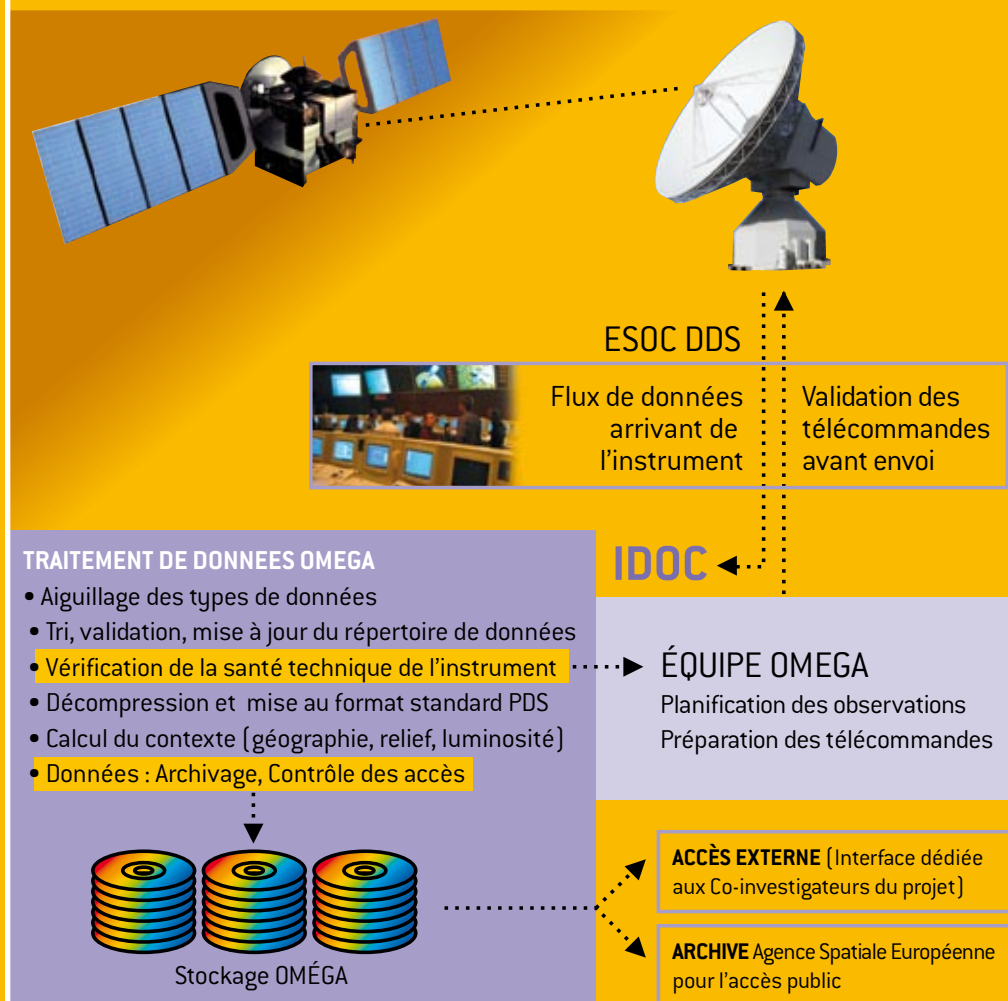
150 To de disques (environ 30 000 DVDs), Redondance des données.



EXEMPLES D'OPÉRATIONS SATELLITAIRES

MISSION MEX/OMEGA

(en orbite autour de mars depuis fin 2003) ↓

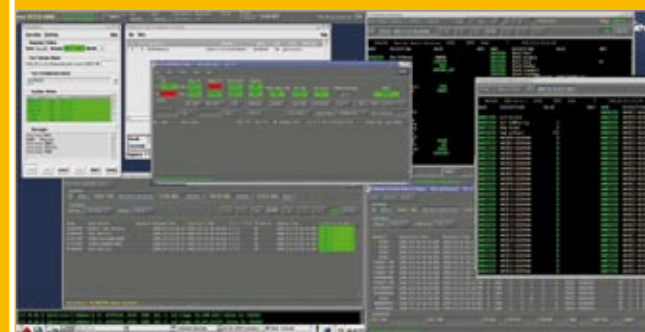


MISSION PLANCK

(Positionnement au point de Lagrange L2 en 2009)



↑ SALLE DE CONTRÔLE DES OPÉRATIONS PLANCK



↑ ÉCRANS DE CONTRÔLE DE L'INSTRUMENT HFI SUR PLANCK

MISSION CoRoT

INTERFACE MISSION CoRoT →
(en orbite terrestre depuis fin 2006)



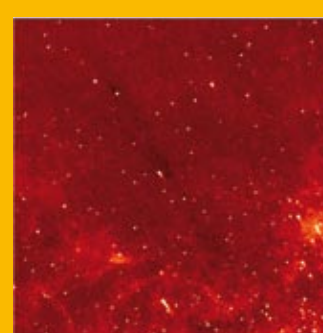
EXEMPLES DE TRAITEMENT DE DONNÉES



↑ OUTILS DE VISUALISATION DE L'ENVIRONNEMENT SOLAIRE



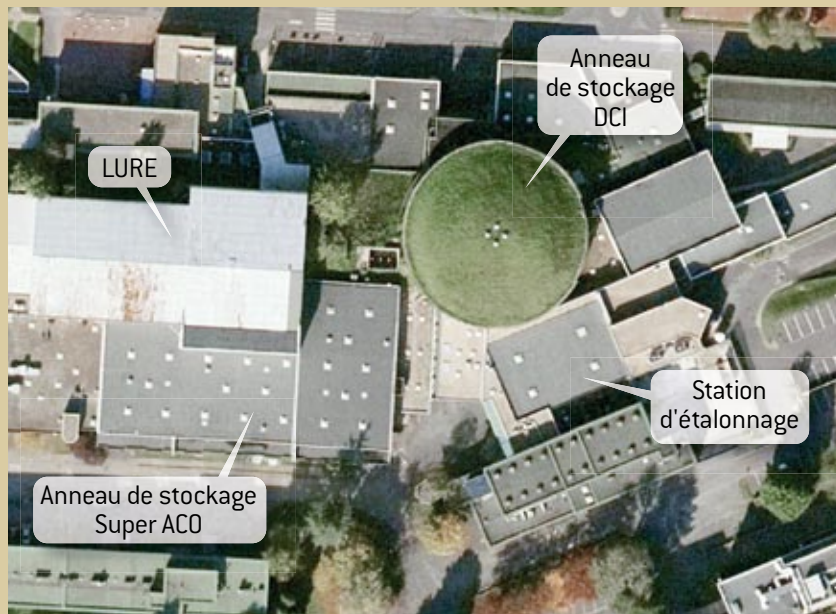
↑ RETRAITEMENT DE LA CARTOGRAPHIE INFRAROUGE DU CIEL (AVANT, APRÈS)



↑ SYNTHÈSE DE DONNÉES : GÉOLOGIE MARTIENNE

HISTORIQUE de la station d'étalonnage (1989-2003)

Une facilité nationale accessible à l'ensemble de la communauté scientifique, permettant de tester en environnement spatial et d'étalonner des instruments ou des équipements spatiaux.

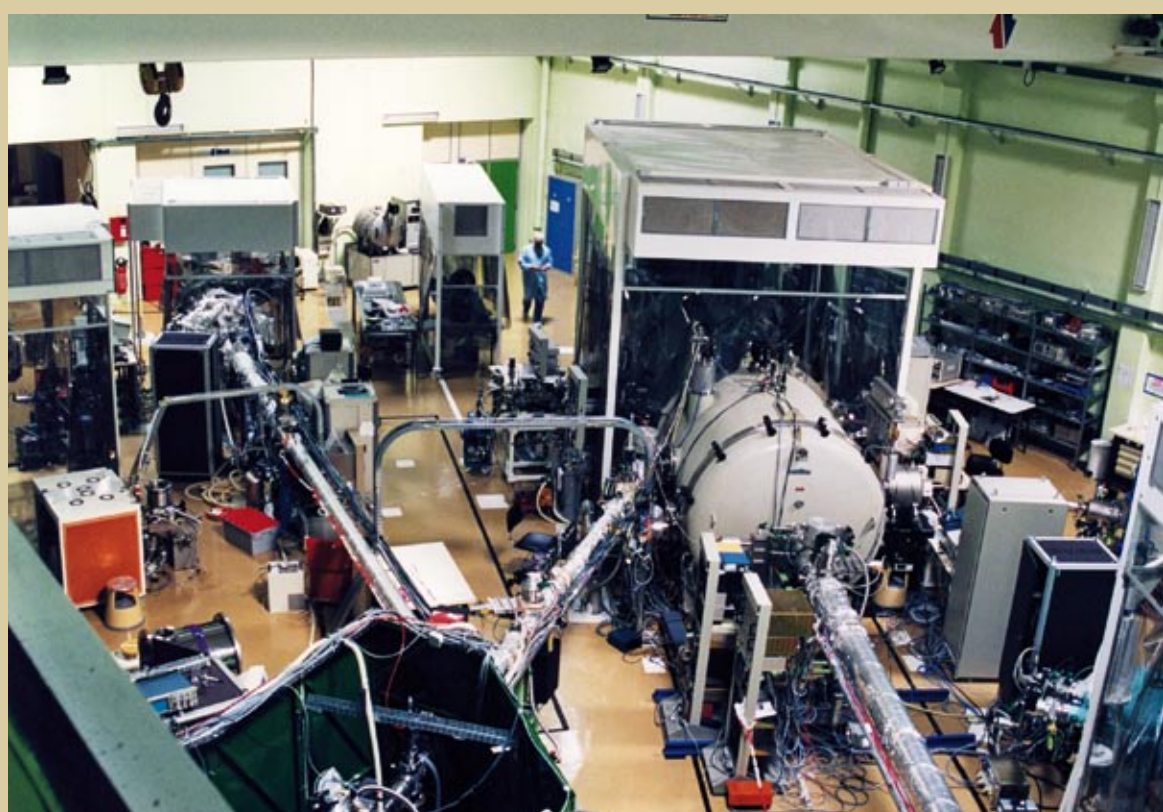
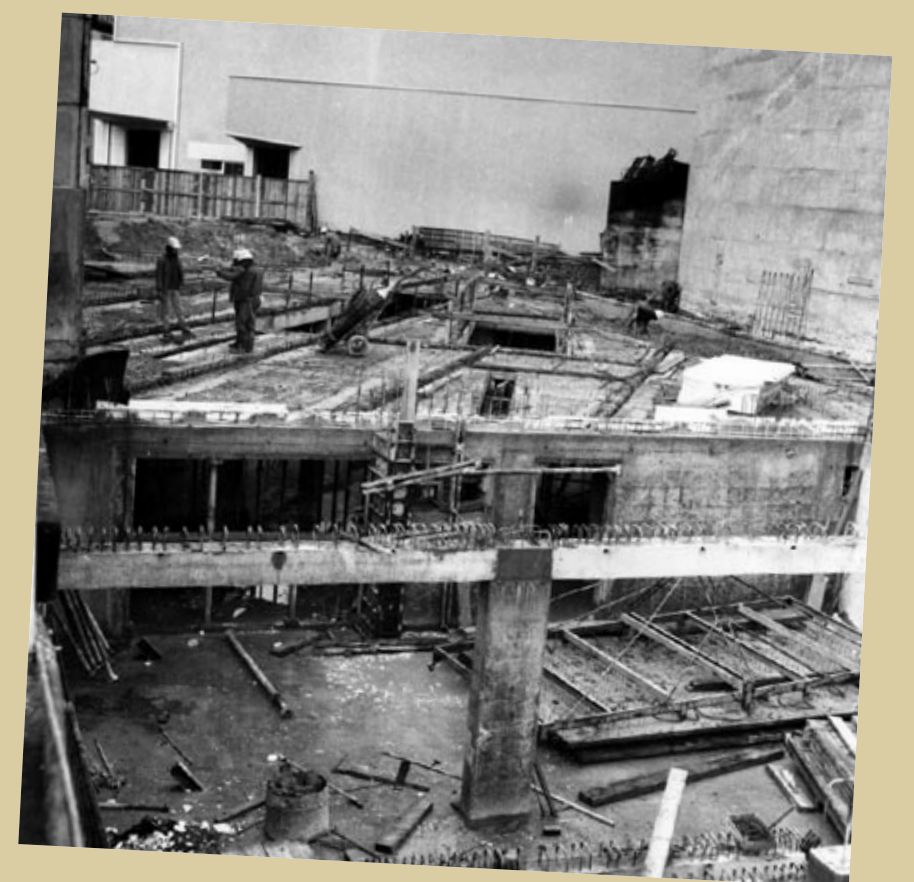


Entre 1984 et 1986, le LPSP (Laboratoire de Physique Stellaire et Planétaire) et d'autres laboratoires de la région parisienne ont étudié le projet de mise en place d'un Institut d'astrophysique spatiale et d'une station d'étalonnage sur le campus de l'université de Paris Sud à Orsay.

La construction de la station s'est effectuée entre 1987 et 1989. Les simulateurs spatiaux et les lignes de lumière transportant le rayonnement synchrotron ont été installés entre 1990 et 1991. Le site d'implantation de la station d'étalonnage a été choisi à proximité du site du LURE (Laboratoire pour l'Utilisation du Rayonnement Électromagnétique) afin d'utiliser le rayonnement synchrotron (rayonnement émis par des électrons tournant dans un anneau de stockage).

La station d'étalonnage de l'IAS a pour vocation de rassembler dans un même bâtiment des salles propres et un ensemble de moyens lourds (cuves à vide atteignant des températures

extrêmes) permettant l'intégration et l'étalonnage au sol des instruments devant être embarqués.



← IMPLANTATION DES LIGNES DE LUMIÈRE SYNCHROTRON ISSUES DU LURE pour les étalonnages dans les simulateurs JUPITER et NEPTUNE.

La station d'étalonnage est composée d'un hall de mesures de 450 m² et des salles d'intégration et de tests de 230 m².

Elle regroupe un ensemble de moyens d'étalonnage ou de tests simulant l'environnement thermique et du vide ainsi qu'un moyen d'essai aux vibrations. La station possède un ensemble de simulateurs spatiaux de volumes variés.

XUV

Ces équipements ont permis de réaliser l'étalonnage de plusieurs instruments spatiaux utilisant les lignes de lumière dans le domaine des X et de l'ultraviolet, jusqu'à la fermeture du LURE à la fin de 2003,

- EIT, SUMMER de la sonde solaire SOHO,
- EPIC (1997/1998) embarqué sur le satellite XMM de l'ESA
- SPICAM pour la mission MARS EXPRESS de l'ESA
- SECCHI pour la mission STEREO de la NASA

VISIBLE IR

et dans le domaine du visible ou de l'infrarouge avec des sources développées spécialement :

- ISOCAM (1992/1993) embarqué sur le satellite ISO de l'ESA
- SCARAB mission CNES pour l'étude de l'atmosphère
- GOLF de la mission solaire SOHO de l'ESA
- COMET/ESEF de la mission EUROMIR 95 de l'ESA
- COMET de la mission PERSEUS du CNES
- COSAC, CONSERT, VIRTIS et CIVA pour le satellite ROSETTA
- VIRTIS et OMEGA pour la mission MARS EXPRESS de l'ESA
- VIRTIS pour la mission VENUS EXPRESS de l'ESA
- La caméra COROCAM de la mission COROT du CNES

La Station d'étalonnage en 2009

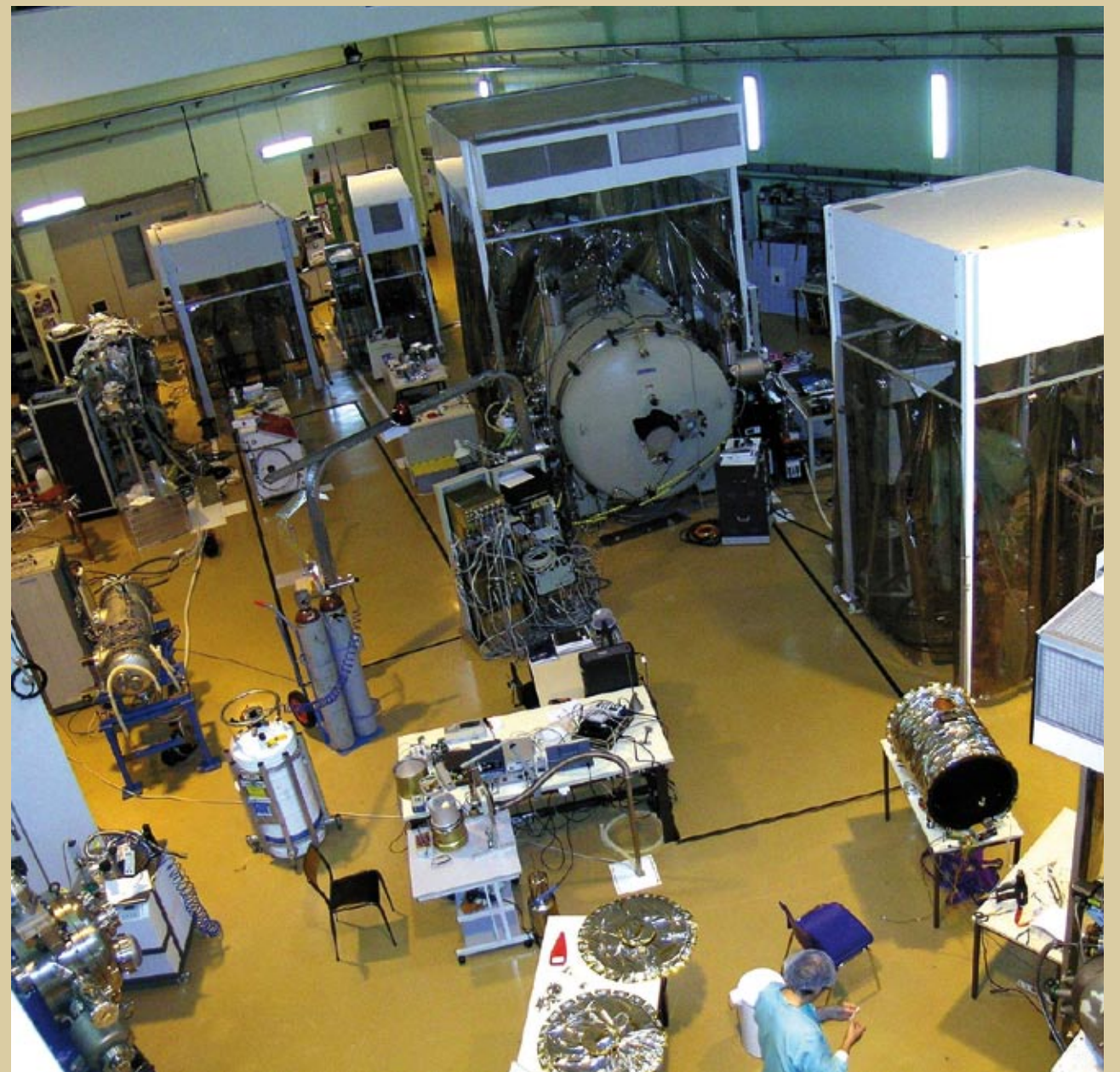
LES ACTIVITÉS ET LES MISSIONS DE LA STATION D'ÉTALONNAGE

- Étalonnage des instruments spatiaux
- Tests d'environnement des sous-systèmes et des instruments
 - Cyclage thermique sous vide
 - Vibrations et chocs
 - Vide thermique (tests fonctionnels ou validation)
 - Étuvage sous vide
- Intégration et assemblage des instruments en salle propre
- Activités de R&D



← INTÉGRATION DE
L'INSTRUMENT HFI DU
SATELLITE PLANCK
DANS LE CRYOSTAT
SATURNE

→ HALL DE LA STATION
D'ÉTALONNAGE AVEC LA
GRANDE CUVE JUPITER
(dimensions : diamètre
2m x 7 m de longueur)



2009 2012 PLATEFORME DE TESTS POUR L'INSTRUMENTATION SPATIALE (Projet cofinancé par la Région Ile de France, le CNES et l'INSU)

SIMULATEUR SPATIAL JUPITER

La nouvelle facilité « JUPITER » permettra de développer une capacité de tests environnementaux et d'étalonnage de grande dimension répondant aux normes des nouveaux projets.



SIMULATEUR SPATIAL NEPTUNE

Le simulateur spatial Neptune permet à la communauté française de physique solaire, l'accès à une ligne de lumière complète travaillant dans les



domaines UV et extrême UV. Cette ligne comportera une source à décharge, un spectro-monochromateur travaillant de 10 à 150 nm, un réflectomètre pour installer les composants à tester et la cuve d'étalonnage Neptune. Cette cuve va se doter de systèmes de pompage propre, un ensemble de mesures (température, pression, propreté), un système cryogénique et des automates assurant les contrôle/commande et la sécurité de l'ensemble de la ligne.

LE NOUVEAU CENTRE DE MESURES PHYSIQUES ET MÉCANIQUES (HALL H10)

1. Création d'une salle propre permettant de mener des tests mécaniques sur des instruments de grandes dimensions et installation d'un banc de vibration de grande capacité (30 kN).

2. Installer en salle propre un système de mesure des propriétés mécaniques des instruments spatiaux, comme le centre de gravité et les moments d'inertie.

3. Création d'une salle permettant de manipuler des instruments dans des environnements stériles sans contamination biologique pour les futures missions d'exploration du sol martien.

LES MOYENS de la Station d'étalonnage

La station d'étalonnage de l'IAS regroupe un ensemble de simulateurs spatiaux et un moyen d'essai en vibration qui permettent de faire subir aux instruments les étalonnages et les tests d'environnement.

Parmi toutes les étapes qui jalonnent le développement d'un instrument spatial, la phase d'étalonnage est absolument essentielle. C'est la dernière opération avant la livraison de l'instrument aux agences spatiales.

L'instrument est placé dans un simulateur spatial qui reproduit les conditions d'environnement rencontrées dans l'espace (vide, température).

Il est soumis à des rayonnements connus et adaptés (en longueur d'onde et intensité) à son domaine de fonctionnement, simulant ainsi les observations astrophysiques qu'il sera amené à faire dans l'espace.

Les signaux collectés sont enregistrés et analysés.

La Station dispose également de plusieurs salles blanches situées au fond du Hall Cazès :

- la salle des marbres pour les R&D et intégration optique
- la salle de nettoyage
- la salle d'intégration
- le cryostat Saturne

→ SIMULATEUR SPATIAL SATURNE

Ce simulateur spatial constitué d'un cryostat cylindrique est dédié à l'étalonnage des instruments spatiaux observant dans l'infrarouge millimétrique.



← LA SALLE DE VIBRATION

Les tests en vibration sont indispensables pour s'assurer que l'instrument supportera les contraintes du lancement, ou de l'atterrissage pour certaines missions d'exploration du système solaire. Le vibreur est donc destiné à soumettre les instruments à des vibrations sinusoïdales, aléatoires ou à des chocs.

LE HALL DE MESURES (HALL CAZES) comprenant les simulateurs spatiaux

Les simulateurs sont équipés de façon à faire varier sous vide la température des éléments à tester entre +80°C et -195°C (température de l'azote liquide).



↑ CAMPAGNE D'ÉTALONNAGE DE L'INSTRUMENT OMEGA de la mission MARS EXPRESS de l'ESA dans le simulateur JUPITER



↑ CUVE JUPITER
diamètre 2m axe horizontal



→ CUVE NEPTUNE
diamètre 1m axe horizontal



↑ CUVE VÉNUS
diamètre 1m axe vertical



↑ LA CUVE SUN
dédiée au nettoyage par étuvage sous vide jusqu'à 200°C des composants ou sous-système



→ LA CUVE URANUS
diamètre 1m axe vertical



→ CUVE MERCURE
diamètre 0,8m axe horizontal

COMET Collecte en Orbite de Matière Extraterrestre

L'expérience COMET est une expérience dédiée à la collecte de poussières cométaires en orbite terrestre.

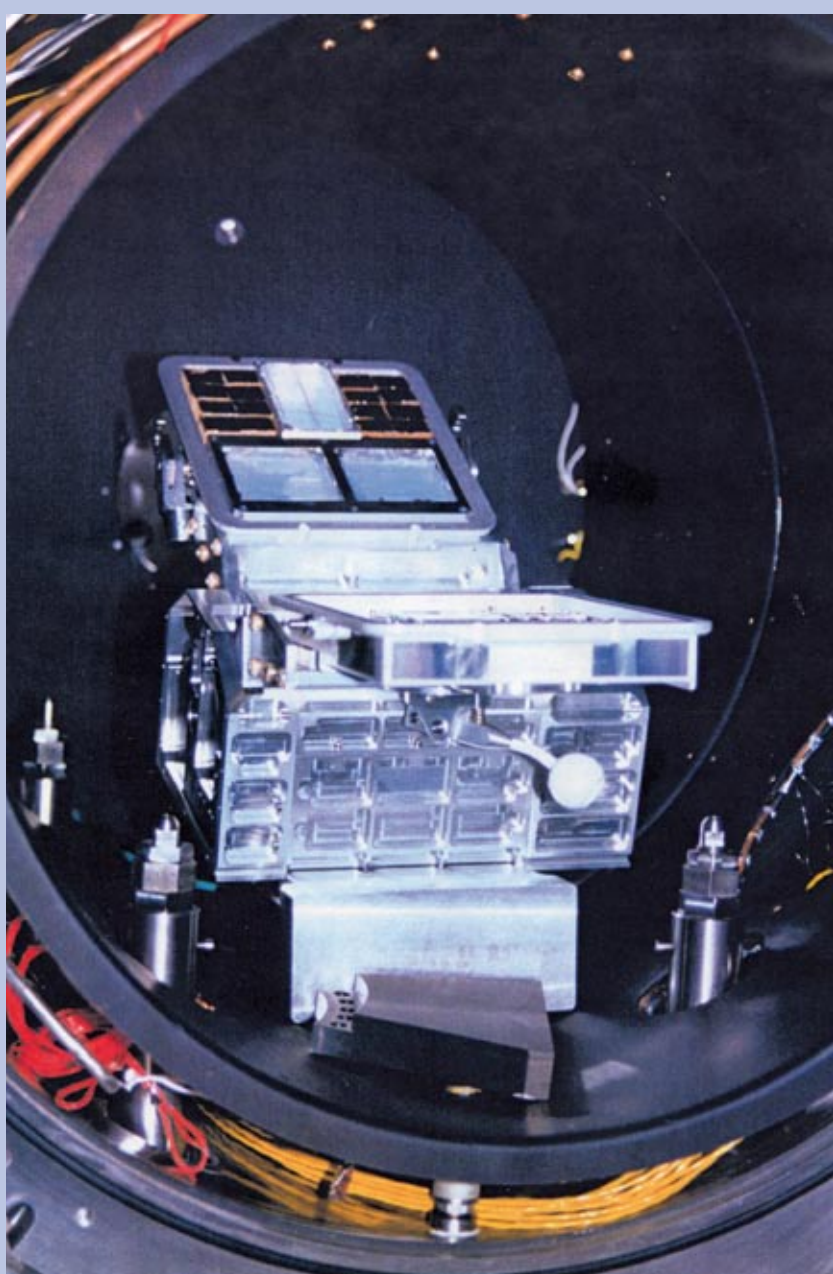
Les collecteurs sont installés à l'extérieur du véhicule, et ouverts pendant les périodes où la Terre traverse des essaims météoritiques. À la fin d'une période

d'observation, les collecteurs sont récupérés et redescendus sur Terre, en vue d'effectuer en laboratoire la caractérisation chimique des grains collectés.

UNE PREMIÈRE EXPÉRIENCE ESEF/COMET

a été réalisée dans le cadre de la mission EUROMIR 95 de l'Agence Spatiale Européenne (ESA). L'expérience a été installée en octobre 1995 par l'astronaute allemand Thomas Reiter et le cosmonaute russe Sergei Avdeev. Elle a permis l'exposition durant l'essaim des Orionides (lié à la comète de Halley) en octobre 1995, de 2 boîtiers collecteurs et un retour sur Terre lors de la fin de mission en mars 1996.

↓ **QUALIFICATION EN VIDE THERMIQUE DE COMET** dans le simulateur spatial Mercure de la Station d'Étalonnage de l'IAS



↓ **INSTALLATION DE ESEF/COMET PAR THOMAS REITER** lors de la sortie extra véhiculaire (EVA)



↑ **COMET EST UNE EXPÉRIENCE QUI A ÉTÉ INSTALLÉE À L'EXTÉRIEUR DE LA STATION ORBITALE RUSSE MIR** sur le module SPEKTR et sur le module KWANT 2 pour que les cosmonautes ou astronautes, lors de sorties extravéhiculaire (EVA), puissent installer ou récupérer (après collectes) les boîtiers collecteurs

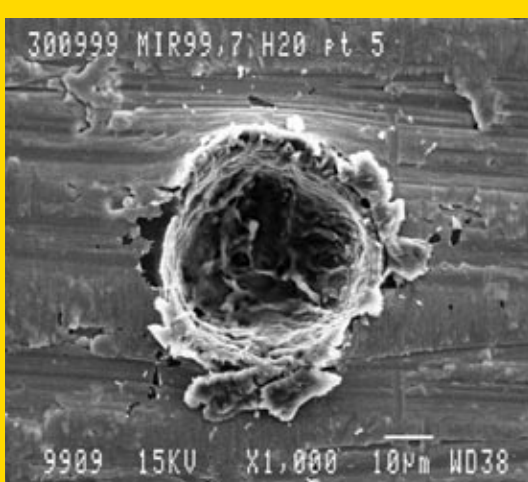
← **MISSION EUROMIR 95** Sergei Avdeev et Thomas Reiter lors de la sortie extra véhiculaire (EVA)

UNE SECONDE EXPÉRIENCE DANS LE CADRE DE LA MISSION PERSEUS DU CNES

installée par les cosmonautes russes G. Padalka et S. Avdeiev a permis de collecter des grains de l'essaim des Léonides, liés à la comète Temple-Tuttle, en novembre 1998. La cassette a été récupérée par J.-P. Haigueré lors de la sortie EVA en avril 1999.



← **LES COLLECTEURS À BASE DE FEUILLES MÉTALLIQUES, DE MOUSSES ET D'AÉROGELS DE L'INSTRUMENT COMET** pour la mission franco-russe Perseus du CNES en 1999



← **UN EXEMPLE DE CRATÈRE OBSERVÉ SUR UNE CIBLE MÉTALLIQUE DE LA CAMPAGNE COMET 99**

Ce cratère s'est vraisemblablement formé lors de l'impact d'un grain extraterrestre sur le collecteur à quelques km/s. À l'aide de simulations en laboratoire, on est en mesure d'affirmer que la particule incidente mesurait de 2 à 3 μm de diamètre. La

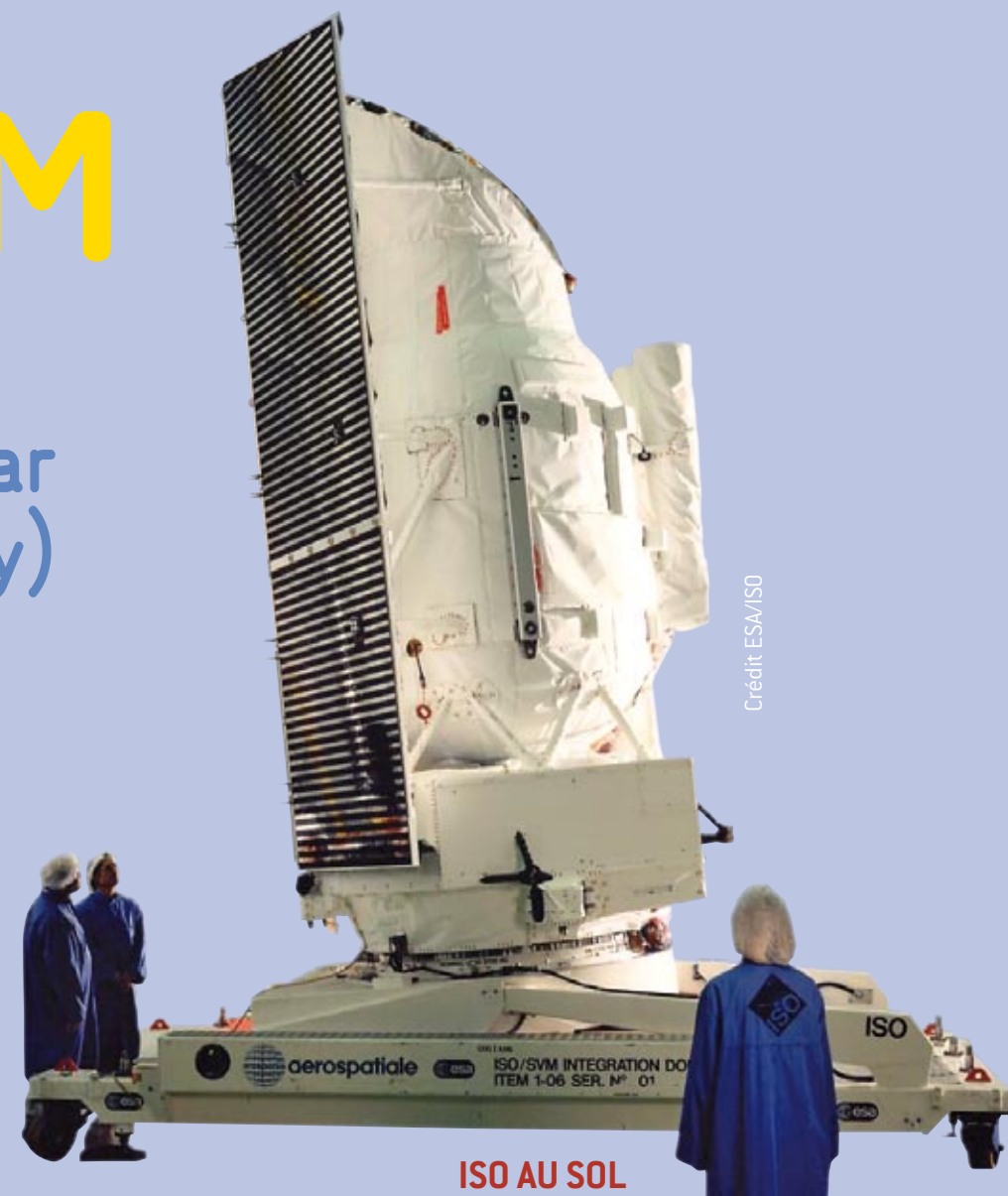
zone fondue dans le cratère est constituée à la fois de matériaux provenant de la cible (or-nickel) et de résidu fondu de la particule incidente; son analyse aux rayons X indique la présence d'éléments potentiellement extraterrestres en proportion chondritique (Mg, Si, Fe).

La caméra **ISOCAM**

ISOCAM est un des 4 instruments embarqués par le satellite ISO (Infrared Spacecraft Observatory) de l'Agence Spatiale Européenne.

Développée sous la responsabilité du Sap/CEA, ISOCAM a été étalonnée dans les installations de l'IAS. Le satellite ISO a été lancé en novembre 1995 par une fusée Ariane 4 avec à bord 2000 litres d'hélium superfluide pour refroidir les instruments jusqu'à $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$, et a fonctionné 29 mois.

Pour la première fois, les astronomes ont eu à leur disposition un observatoire fonctionnant dans le domaine infrarouge, inaccessible depuis le sol à cause de l'atmosphère terrestre.



Credit ESA/ISO

ISO AU SOL

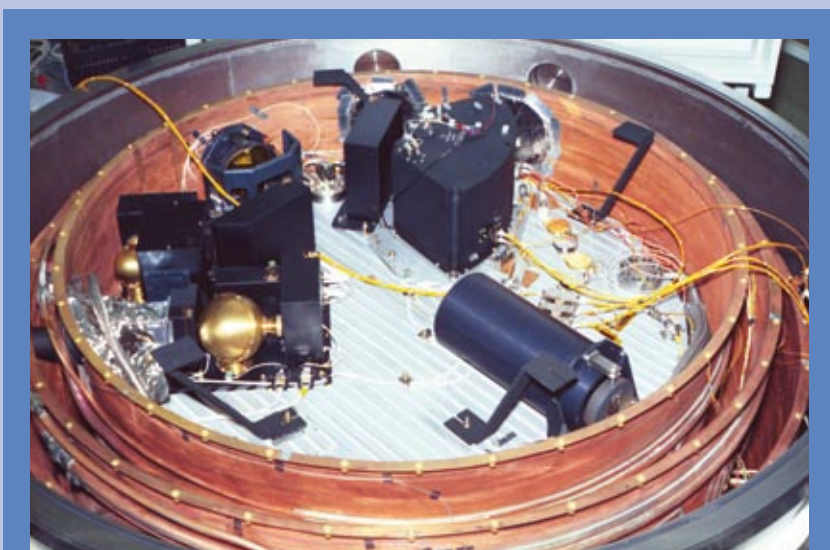


Credit ESA/ISO, Alan Abergel et al.

LE NUAGE MOLÉCULAIRE RHO OPHIUCHI,

situé à environ 400 années lumière de la Terre. Il y a seulement quelques centaines de milliers d'années se sont formées de nombreuses jeunes étoiles découvertes par ISOCAM (5-18 microns). Dans le domaine visible, ce nuage dense est uniformément noir car la lumière visible ne peut ni y pénétrer ni s'en échapper. Les jeunes étoiles apparaissent comme des points lumineux. Les variations

de "couleur" infrarouge résultent de variations de température et de l'évolution physico-chimique de la matière interstellaire à l'intérieur du nuage dense. Les nuages qui apparaissent sombres dans l'infrarouge sont des régions très denses à l'intérieur desquelles de nouvelles étoiles sont en cours de formation.



ISOCAM À LA STATION D'ÉTALONNAGE

En collaboration avec l'IPN (Institut de Physique Nucléaire), l'IAS a développé un simulateur cryogénique permettant de placer les instruments dans les conditions de vol (températures jusqu'à 2 K, vide, sources de rayonnement simulant des objets astrophysiques...).

ISOCAM a été testé et étalonné durant plusieurs mois dans ce simulateur avant livraison en 1993 à l'Agence Spatiale Européenne (ESA).

Ainsi, les équipes techniques et les astrophysiciens avaient une connaissance approfondie des performances de l'instrument avant le lancement.

LA NÉBULEUSE DE LA TÊTE DE CHEVAL EN VISIBLE ET EN INFRAROUGE

Orion B est un nuage moléculaire situé à une distance de 1500 années-lumière et siège d'une intense activité de formation stellaire. Dans l'image visible (Fig. 1), les régions les plus sombres résultent de structures denses qui absorbent le rayonnement émis par les étoiles. La tête de Cheval ressort à l'avant du nuage moléculaire : c'est un nuage dense en train de se faire éroder par le rayonnement ionisant émis par l'étoile très brillante σ -Orionis, située à droite.

Image ISO (Fig. 2) : Dans l'infrarouge, le nuage sombre est brillant car illuminé à grande échelle. Les points lumineux sont de jeunes étoiles enfouies. La tête de cheval n'est plus visible comme un nuage sombre : on ne voit que sa « crête » due à l'émission des poussières fortement illuminées par l'étoile σ -Orionis.

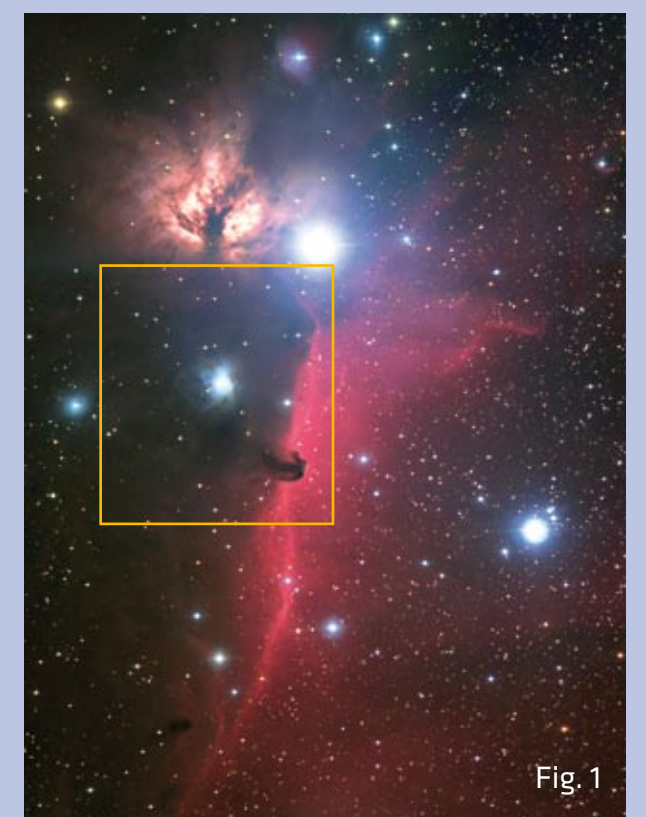


Fig. 1

Credit Ryan Stenberg & Family, Adam Block, NOAA, AURA, NSF



Fig. 2

Credit ESA/ISO, Alan Abergel et al.



Credit ESA/ISO, P. Cox et al.

LA NÉBULEUSE DE L'HÉLICE OBSERVÉE PAR ISOCAM autour de 7 microns.

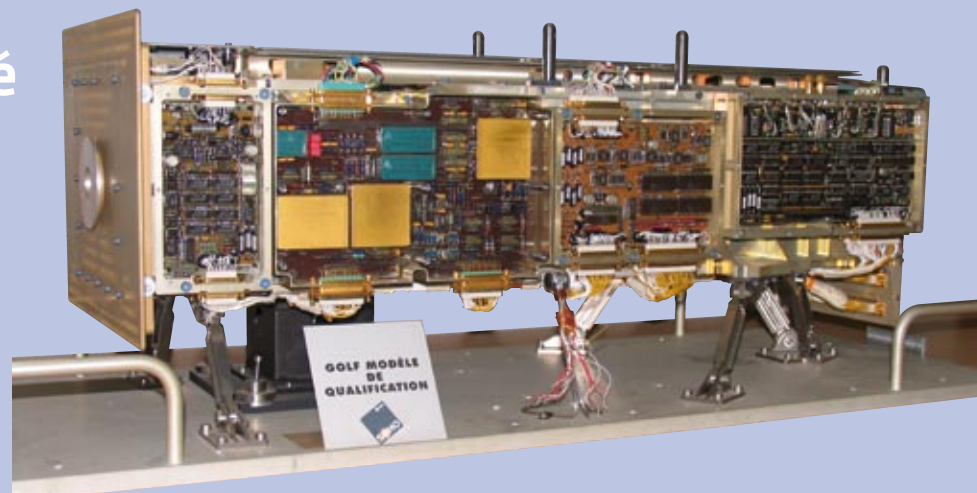
C'est la fin de la vie d'une étoile qui a éjecté l'essentiel de sa masse. Les observations spectroscopiques d'ISOCAM ont montré que l'émission infrarouge provient principalement de l'hydrogène moléculaire H_2 .

SOHO

le soleil à portée de vue

L'observatoire spatial solaire SOHO (SOlar and Heliospheric Observatory) construit par l'agence spatiale européenne (ESA) a été lancé le 2 décembre 1995 par l'agence spatiale américaine (NASA). Il observe depuis lors notre étoile en quasi-continuité, grâce à sa position privilégiée autour du point de Lagrange L1 entre la Terre et le Soleil.

Trois des douze instruments embarqués à bord de SOHO ont été développés, en totalité ou en partie, à l'Institut d'Astrophysique Spatiale, en collaboration avec le CNES : GOLF, EIT et SUMER.



← MODÈLE DU SPECTROMÈTRE À RÉSONANCE GOLF (Global Oscillations at Low Frequencies),

qui mesure les infimes déplacements de la surface du Soleil, induits par le passage d'ondes acoustiques. Le cœur de l'instrument (en avant-plan), est une cellule de verre remplie de sodium longue de 2 cm, qui fournit une référence atomique.

Les variations du signal renseignent sur les propriétés vibratoires du Soleil et ainsi sur les conditions physiques de l'intérieur solaire.

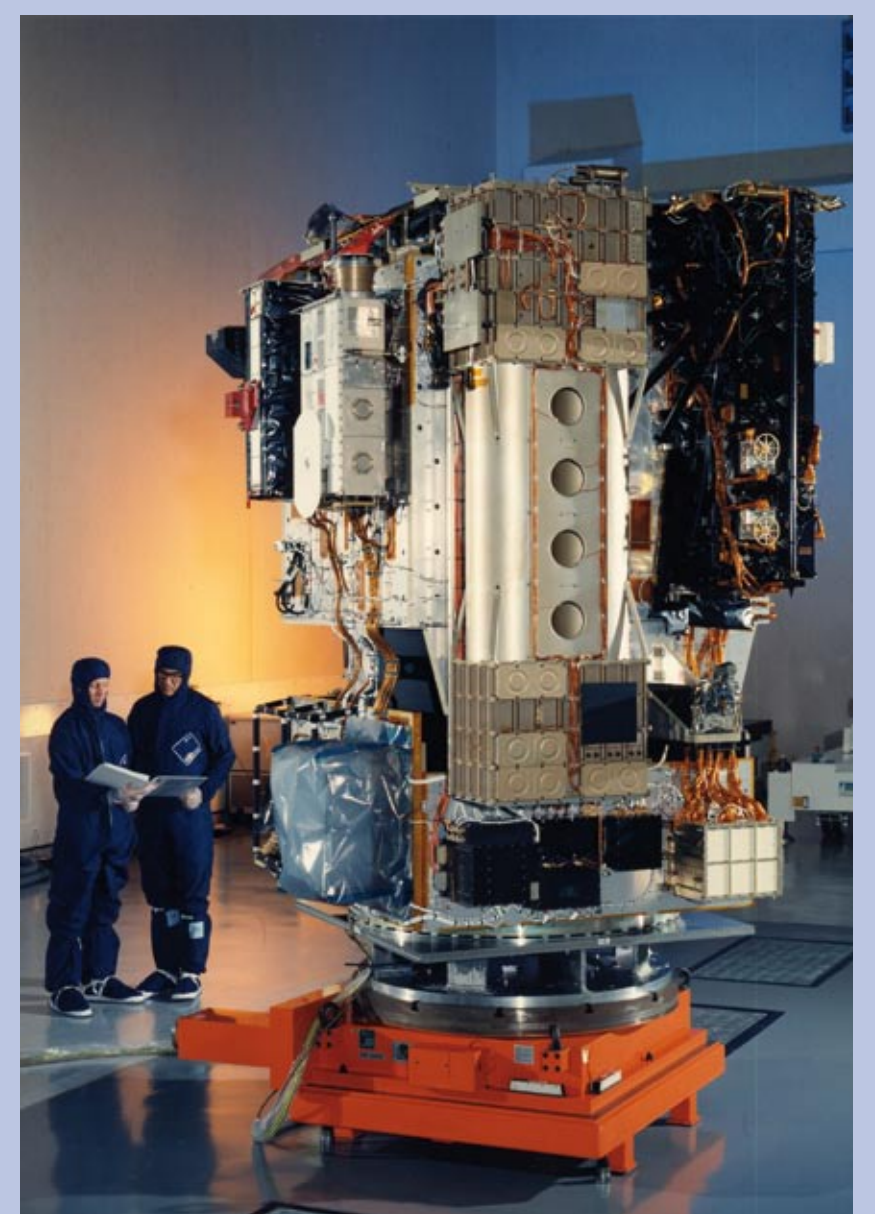
Cette technique d'Héliosismologie a permis de valider le modèle standard du Soleil, et contribué à résoudre le problème fondamental de la masse des neutrinos.

LA ROTATION INÉGALE DU SOLEIL

Si à la surface, les régions équatoriales tournent plus vite que les régions polaires, cette rotation différentielle s'amenuise avec la profondeur, pour finalement ne plus dépendre du tout de la latitude. Environ 200 000 kilomètres en dessous de la surface, le Soleil, gazeux, tourne donc comme un corps solide.

SONDE SOHO EN COURS D'INTÉGRATION →

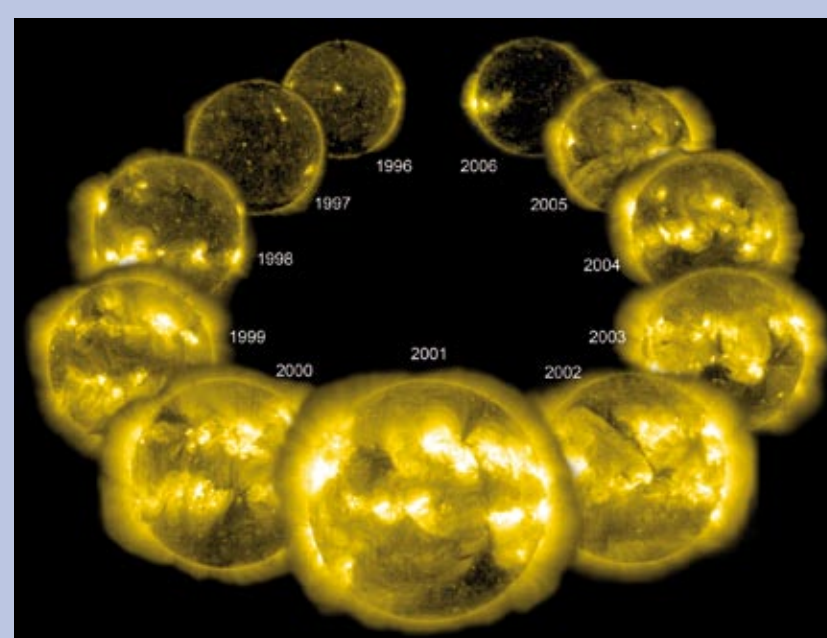
Le plus gros des instruments est le spectromètre ultraviolet SUMER (Solar Ultraviolet Measurements of Emitted Radiation) qui a notamment permis de localiser la source du vent solaire et de mesurer la température des trous coronaux d'où s'échappe le vent solaire.



PRÈS DE QUINZE ANS D'OBSERVATIONS CUMULÉES...

Les observations de SOHO couvrent maintenant plus d'un cycle magnétique, et nourrissent une exceptionnelle bibliothèque de données. Le Centre de données MEDOC de l'IAS est à la disposition des physiciens solaires européens pour planifier et analyser leurs observations. Il abrite l'archive européenne de SOHO.

L'aventure SOHO devrait se poursuivre encore pendant plusieurs années, ce qui témoigne de l'excellente santé de nos « vieux » instruments !



↑ L'ACTIVITÉ MAGNÉTIQUE DU SOLEIL au cours d'un cycle de 11 ans

Ces images ont été prises par l'imageur EIT (Extreme ultraviolet Imaging Telescope) à la longueur d'onde de 28,4 nm (extrême ultraviolet).

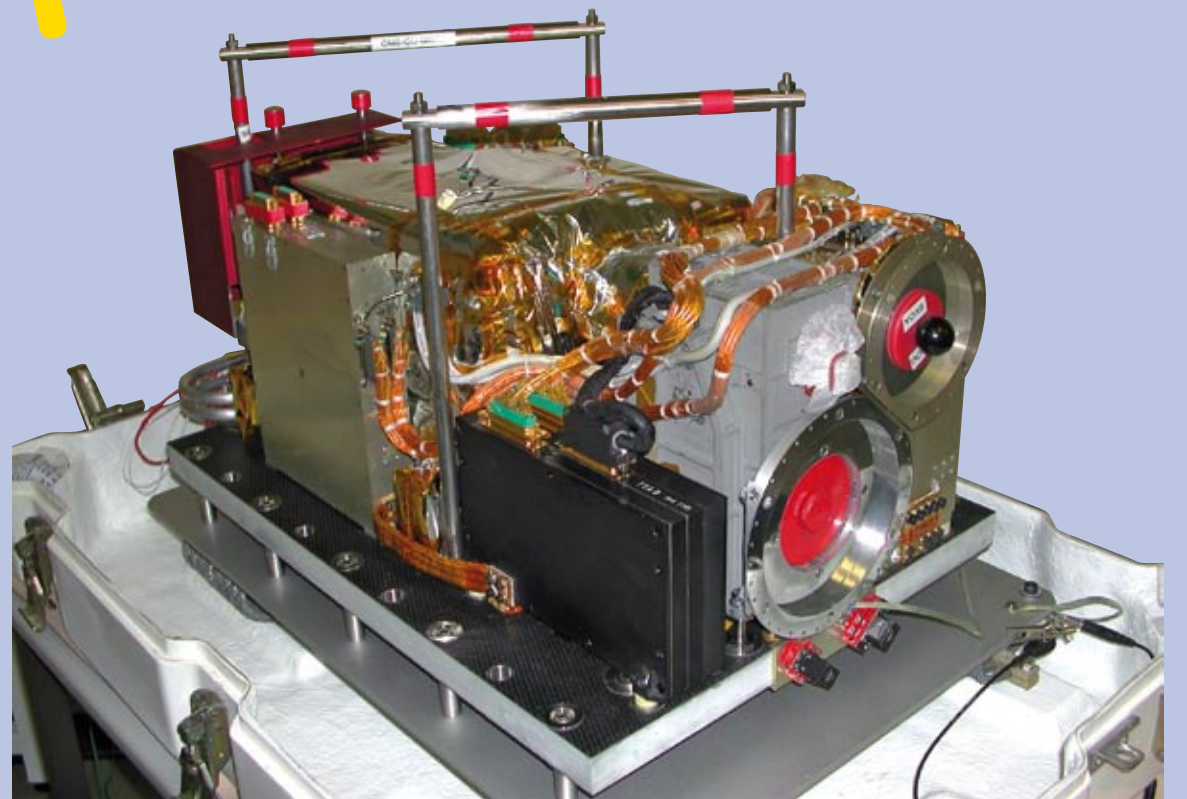
Les manifestations magnétiques solaires que sont les éruptions produisent des flux de particules qui perturbent le système terrestre (aurores boréales

mais aussi ruptures de réseaux électriques, etc.) et mettent en danger les astronautes en sortie.

La faculté d'EIT de détecter 24 heures sur 24 le démarrage d'éruptions joue donc un rôle d'alerte performant.

Une aventure parfois longue et risquée **OMEGA ET CIVA**

Le développement d'un instrument spatial est toujours une aventure, qui s'étend habituellement sur plus de 6 ans entre les premières études et le lancement. Dans certains cas cette aventure peut-être bien plus longue et mouvementée.



L'INSTRUMENT OMEGA, DÉVELOPPÉ EN COLLABORATION AVEC LE CNES, EN TEST À L'IAS



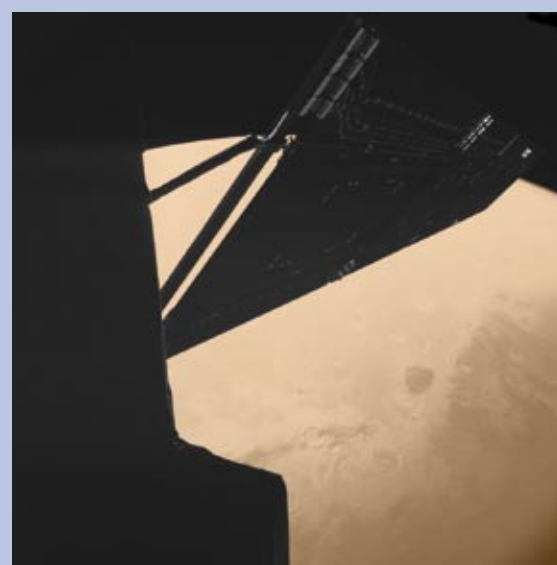
LE LANCEMENT DE MARS EXPRESS

Deux modèles de l'instrument **OMEGA** ont été réalisés pour le programme soviétique d'exploration martienne, **Mars 1992**. Malheureusement, le 1^{er} modèle a été détruit en 1996 avec le lanceur avant de quitter la Terre.

Le 2^e modèle, amélioré, a été lancé avec la mission Mars Express de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) en juin 2003. Arrivé fin 2003 en orbite

autour de Mars, il fournit depuis des informations de première importance sur la planète rouge.

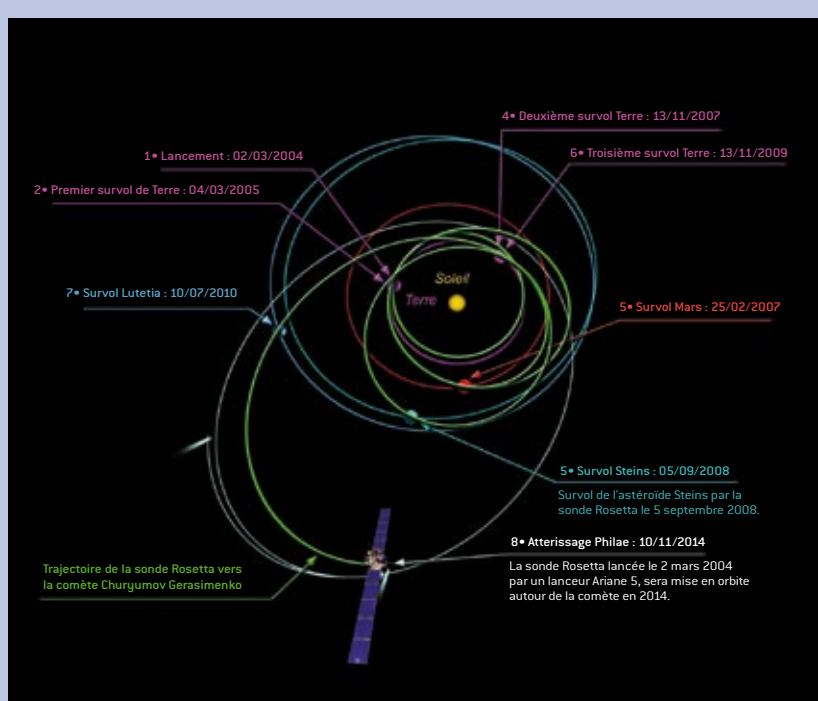
OMEGA est un spectromètre opérant dans le visible et dans le proche infrarouge permettant d'étudier la composition minéralogique (argiles, silicates, oxydes de fer, etc.) de la surface de Mars et certains aspects de son atmosphère.



MARS OBSERVÉE PAR ROSETTA/CIVA, dont on voit les panneaux solaires



VUE D'ARTISTE DE PHILAE SUR LA COMÈTE



Pour la mission **Rosetta** de l'ESA, l'IAS a développé une série d'instruments, appelée CIVA et embarquée sur l'atterrisseur cométaire **Philae**.

Lancée en 2004, il faudra 10 ans de voyage, dont 3 ans en hibernation

très loin du Soleil, pour la rencontre avec une comète à la fin de l'année 2014, et le dépôt du module Philae sur un sol dont la température est inférieure à -100 °C.

CIVA est composée de sept caméras dont une stéréoscopique pour

réaliser des images panoramiques dans le visible et de deux microscopes infrarouge et visible pour mesurer les bandes d'absorption d'échantillons du sol (glaces, matières organiques et silicates).

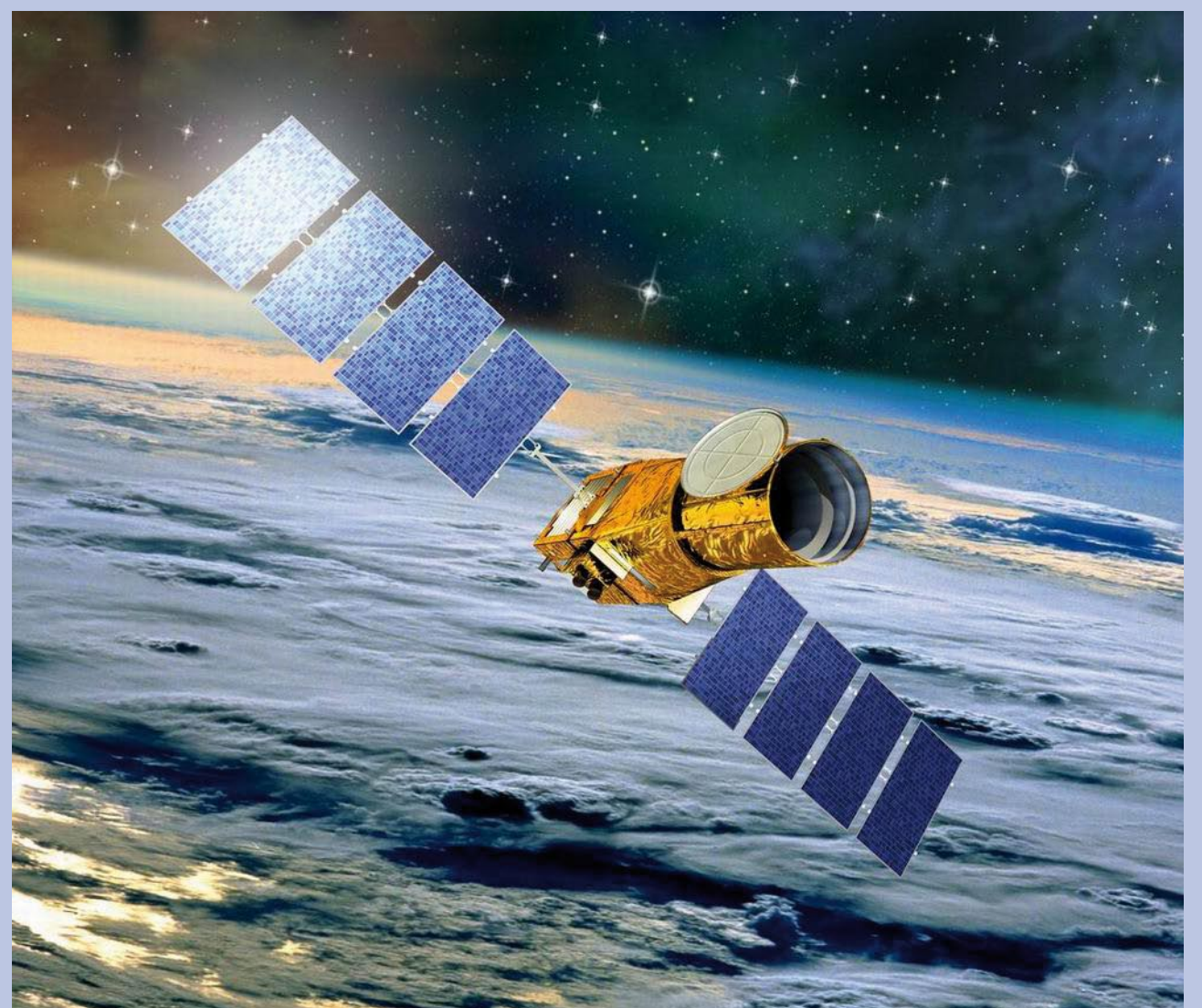
La mission CoRoT

Satellite du CNES, la mission CoRoT (Convection, Rotation et Transits) intègre une caméra permettant de mesurer simultanément avec une très grande précision, les variations de luminosité de plusieurs milliers d'étoiles.

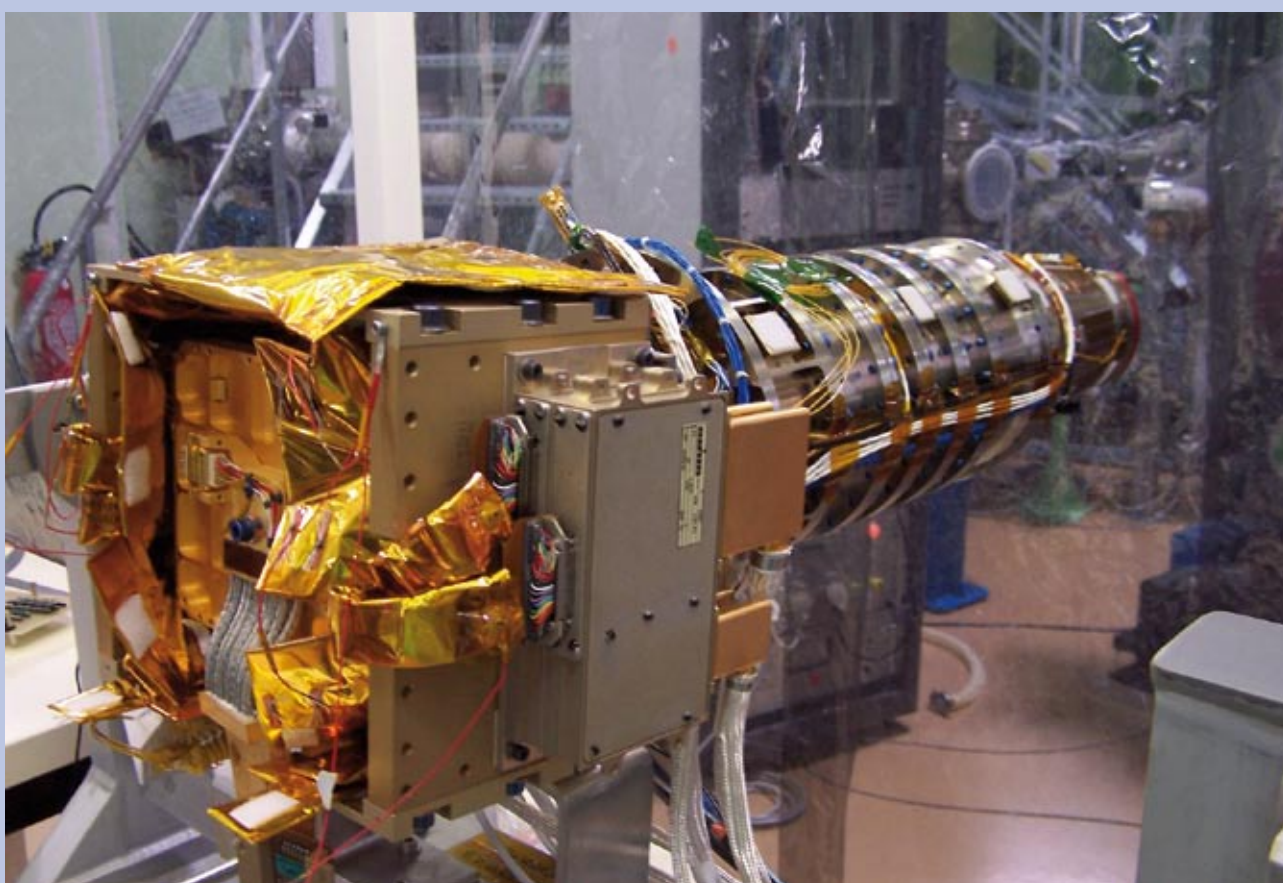
Les objectifs sont d'une part d'observer les pulsations de ces étoiles pour en déduire leur structure interne et d'autre part, de détecter des planètes grâce aux micro-éclipses provoquées par le passage de la planète devant l'étoile observée.

CoRoT a été placé sur une orbite polaire à 900 km d'altitude, le 27 décembre 2006 par une fusée Soyuz lancée depuis le cosmodrome de Baïkonour.

L'observatoire est constitué d'un télescope hors d'axe de 27 cm de diamètre auquel est couplée la caméra CoRoTCAM. La stabilité photométrique de CoRoT est telle que, placé en haut des Champs-Élysées, il détecterait une ampoule grillée parmi la multitude d'ampoules qui composent les illuminations de Noël.



VUE D'ARTISTE DE LA MISSION CoRoT



Entre autres opérations, l'étalonnage de CoRoTCAM à l'IAS a comporté une phase de réglage en position de l'objectif chargé de reformer l'image du télescope sur le plan des détecteurs.

Pour cela, il a été nécessaire de fixer la caméra sur un support orientable, de manière à couvrir tout le champ de l'instrument. Ces mesures ont nécessité le développement d'une instrumentation dédiée pour simuler les sources stellaires.

On voit ici CoRoTCAM à son entrée dans le simulateur d'environnement spatial de l'IAS.

← CoRoTCAM SUR SON SUPPORT lors de l'étalonnage à l'IAS

PREMIÈRES PLANÈTES DÉCOUVERTES PAR CoRoT

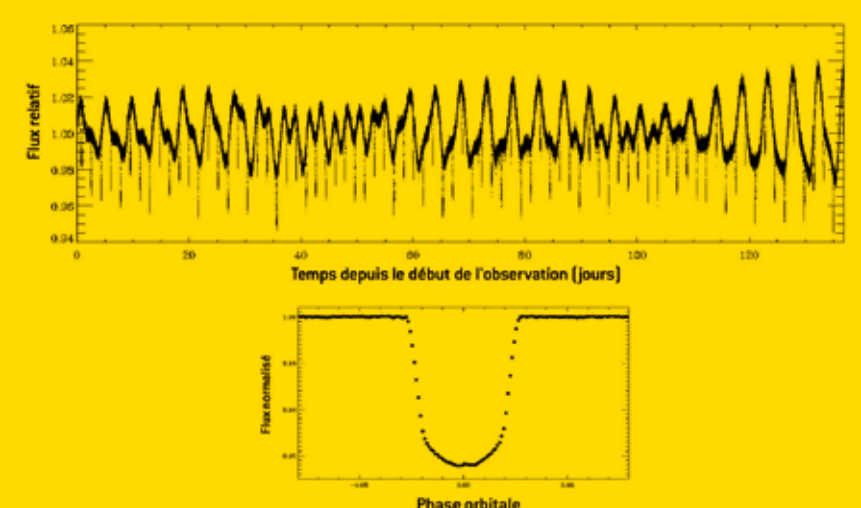
Cette étoile possède au moins une planète dont le transit a été détecté par CoRoT.

La courbe du haut représente les variations de luminosité de l'étoile pendant plus de 135 jours.

On distingue bien les variations de luminosité de grande amplitude interprétées comme les passages successifs de taches stellaires, ainsi que les petites baisses abruptes dues à la micro-éclipse provoquée par le passage de la planète.

La courbe du bas est une moyenne de tous les transits observés.

La planète, dont la taille est estimée à environ 1,5 fois le diamètre de Jupiter et la masse 3,3 fois la masse de Jupiter tourne autour de son étoile en 1,75 jour environ, ce qui la place à seulement 4,5 millions de km du centre de son étoile. Cette exoplanète appartient à la catégorie d'objets appelés « jupiters chauds ».



↑ COURBE DE LUMIÈRE DE CoRoT-EXO-2

À la conquête de **MERCURE**

Mercure est la planète la plus proche du Soleil et la plus petite des planètes telluriques du Système Solaire. Son diamètre est de 4880 km et sa distance moyenne au Soleil d'environ 58 millions de kilomètres.

Mercure demeure peu connue. La sonde de la NASA, Messenger, est la deuxième à la rejoindre après la sonde américaine Mariner 10 au milieu des années 70.

En 2020, deux satellites de l'ESA nommés BepiColombo, en continueront l'exploration.

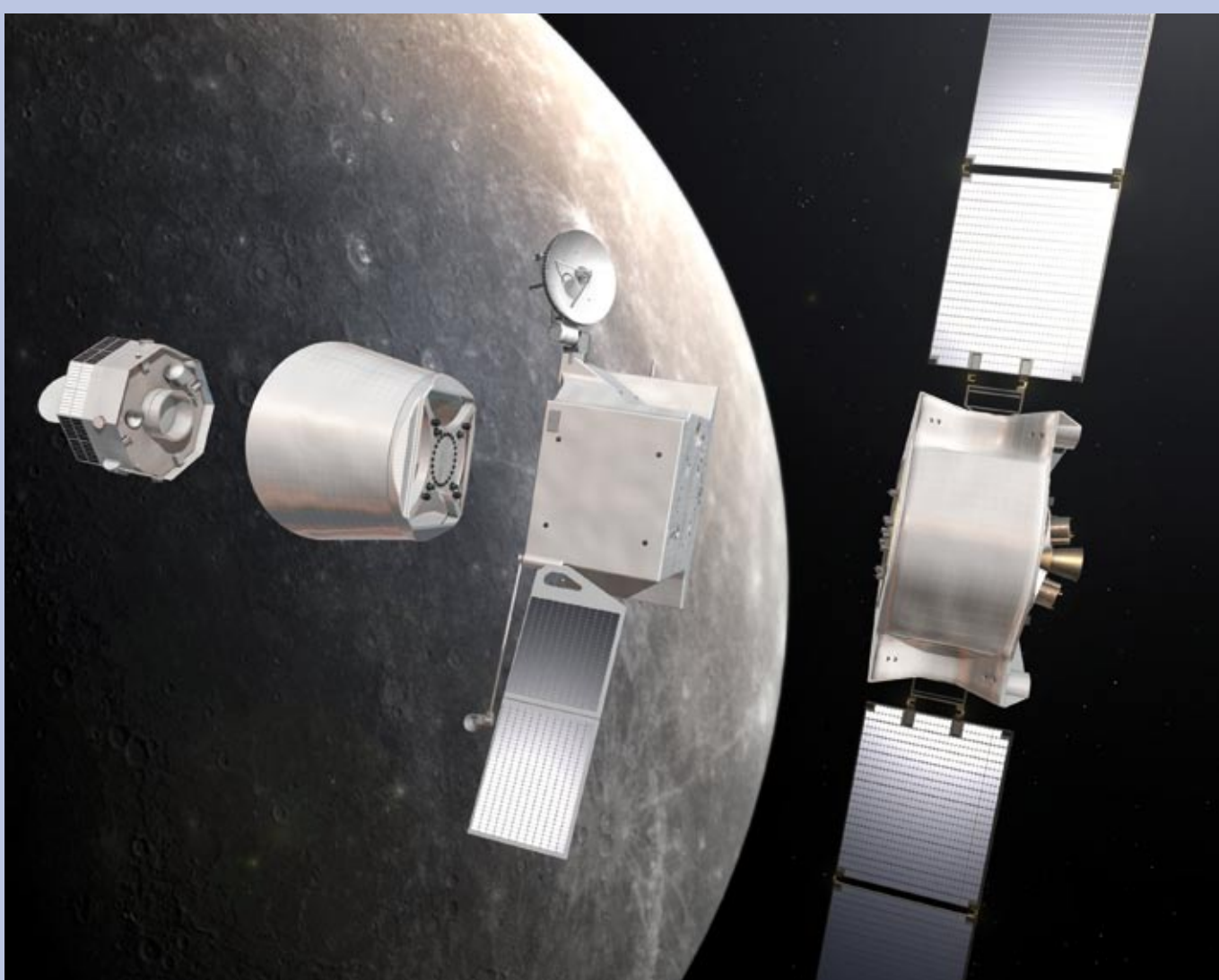
L'exploration spatiale de Mercure connaît un renouveau avec les missions NASA/Messenger (en cours) et ESA/BepiColombo (lancement en 2014, arrivée à Mercure en 2020).

De nombreuses questions sont posées concernant la formation puis la différenciation de cette planète. En effet, ces questions sont directement liées à la structure et à la dynamique de la nébuleuse solaire primordiale au sein de laquelle se sont formés tous les objets du Système Solaire.



MERCURE RESSEMBLE À LA LUNE,

on y trouve des régions montagneuses et de grands bassins criblés de cratères, l'absence d'atmosphère empêchant l'érosion de traces très anciennes.



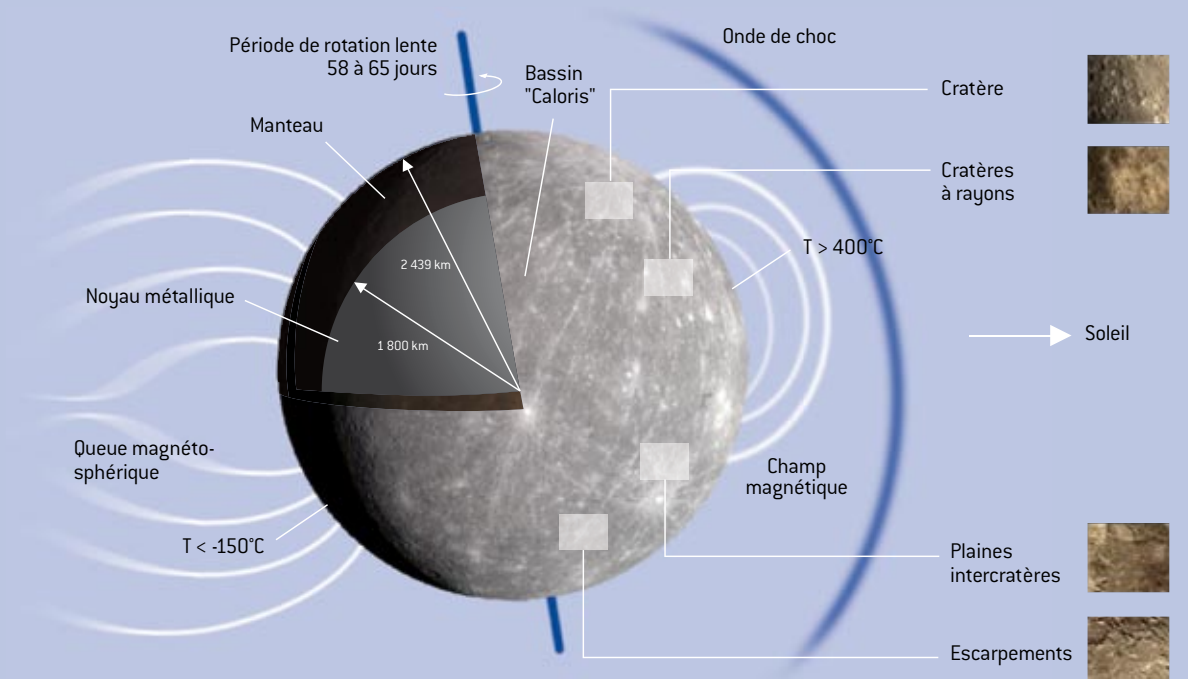
LES QUATRE PRINCIPAUX MODULES DE LA SONDE BEPICOLOMBO

Cette sonde est composée, de droite à gauche, d'un véhicule de transport, d'un module de protection des satellites pendant le voyage vers Mercure, d'un satellite européen d'observation et d'un satellite japonais d'étude de l'environnement de la planète.

L'INSTRUMENT D'IMAGERIE SIMBIO-SYS À BORD DU SATELLITE EUROPÉEN MPO DE BEPICOLOMBO →

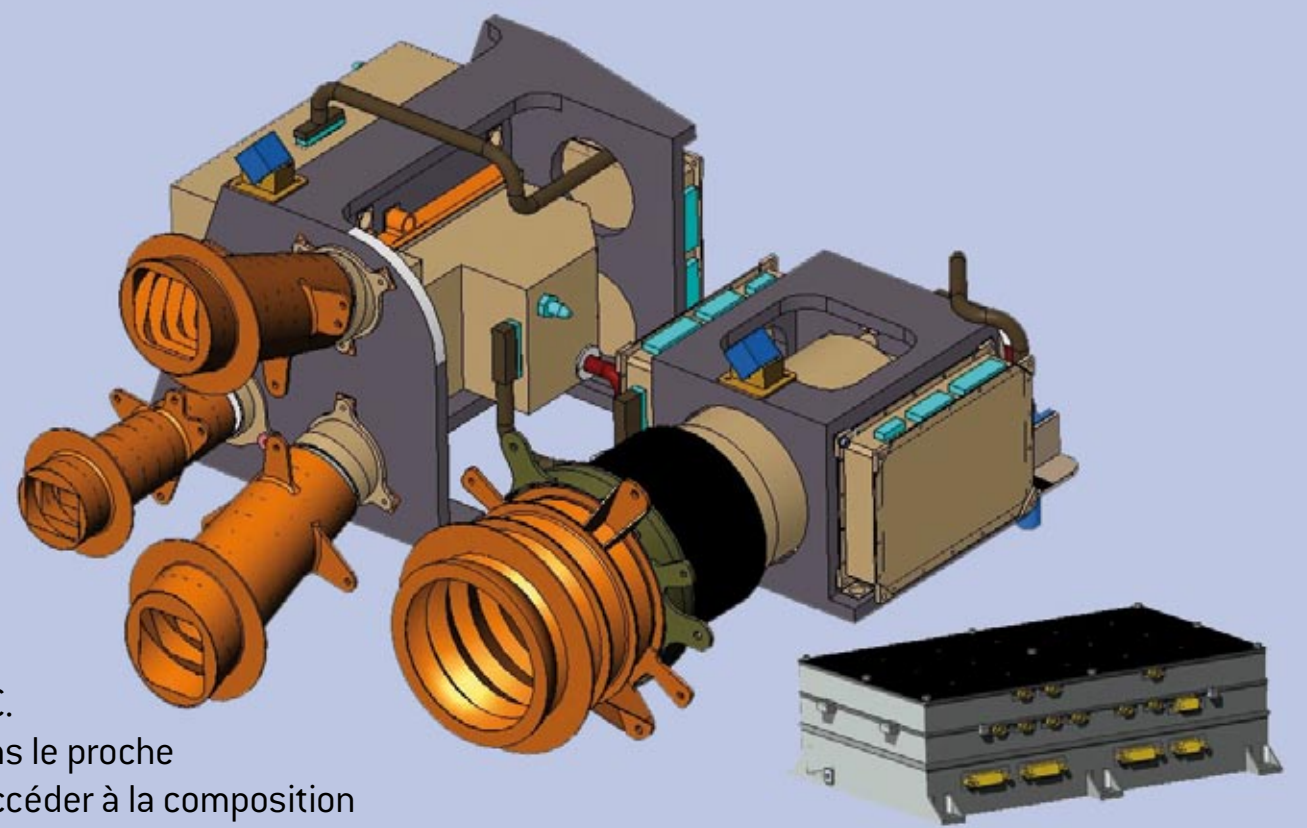
L'instrument SIMBIO-SYS est composé d'une électronique centrale de traitement des données à bord, de caméras visibles Stéréo permettant d'observer des détails de 50 mètres avec la caméra STC et jusqu'à

5 mètres pour la caméra HRIC. Un spectromètre imageur dans le proche infrarouge VIH1 permettra d'accéder à la composition minéralogique de la surface de la planète.



↑ LA MISSION ESA/BEPILOMBO PERMETTRA D'ÉtudIER LE CHAMP MAGNÉTIQUE, LA SURFACE ET LA STRUCTURE INTERNE DE LA PLANÈTE

Une partie des instruments qui observeront la surface est en cours de fabrication à l'IAS.



ÉTALONNAGE de l'instrument Planck/HFI

Planck est une mission de l'Agence Spatiale Européenne lancée en 2009.

L'instrument HFI, réalisé sous maîtrise d'œuvre de l'IAS, avec la collaboration du CNES, mesurera le rayonnement émis après le Big Bang et ses avant-plans galactiques et extragalactiques.

Il donnera accès à l'étude de la formation de l'univers, des galaxies et des étoiles.

↓ LE SATELLITE PLANCK À KOUROU
avant le lancement



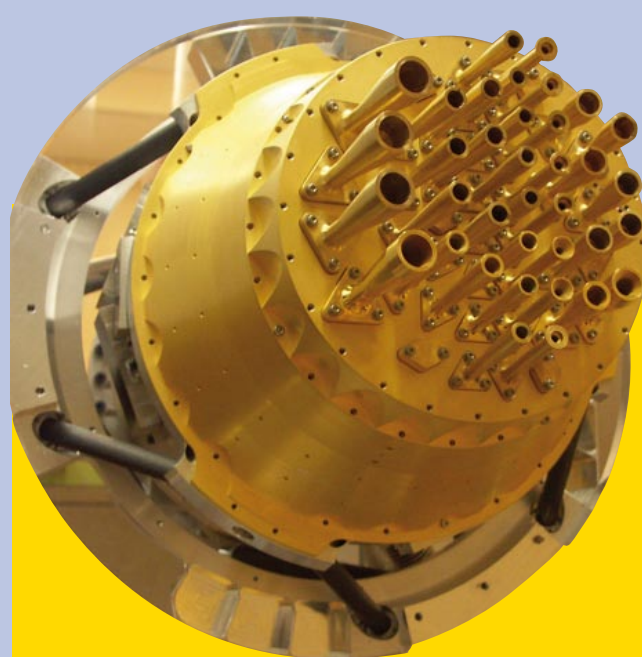
↑ UN SYSTÈME OPTIQUE REFROIDI À 2K (-271,15 °C)

reproduit l'environnement et le ciel attendus pour l'instrument à bord du satellite Planck en orbite.



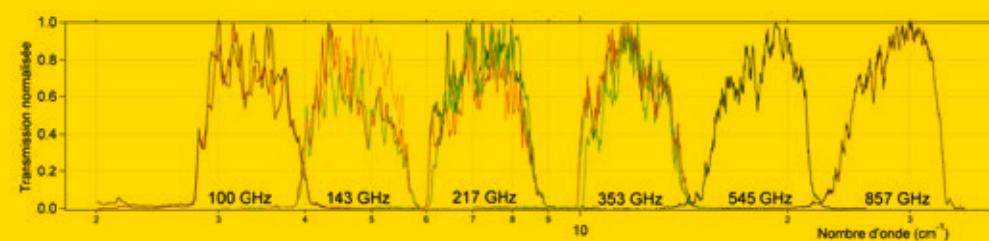
← L'INSTRUMENT HFI

à été étalonné dans le cryostat Saturne de la station d'étalonnage de l'IAS de 2005 à 2007.



L'INSTRUMENT FERA LA CARTOGRAPHIE DU CIEL

dans 6 bandes de fréquences de 100 GHz à 850 GHz réparties sur 52 détecteurs bolométriques refroidis à 0,1 K. Ces bandes ont été mesurées avec précision lors des étalonnages.



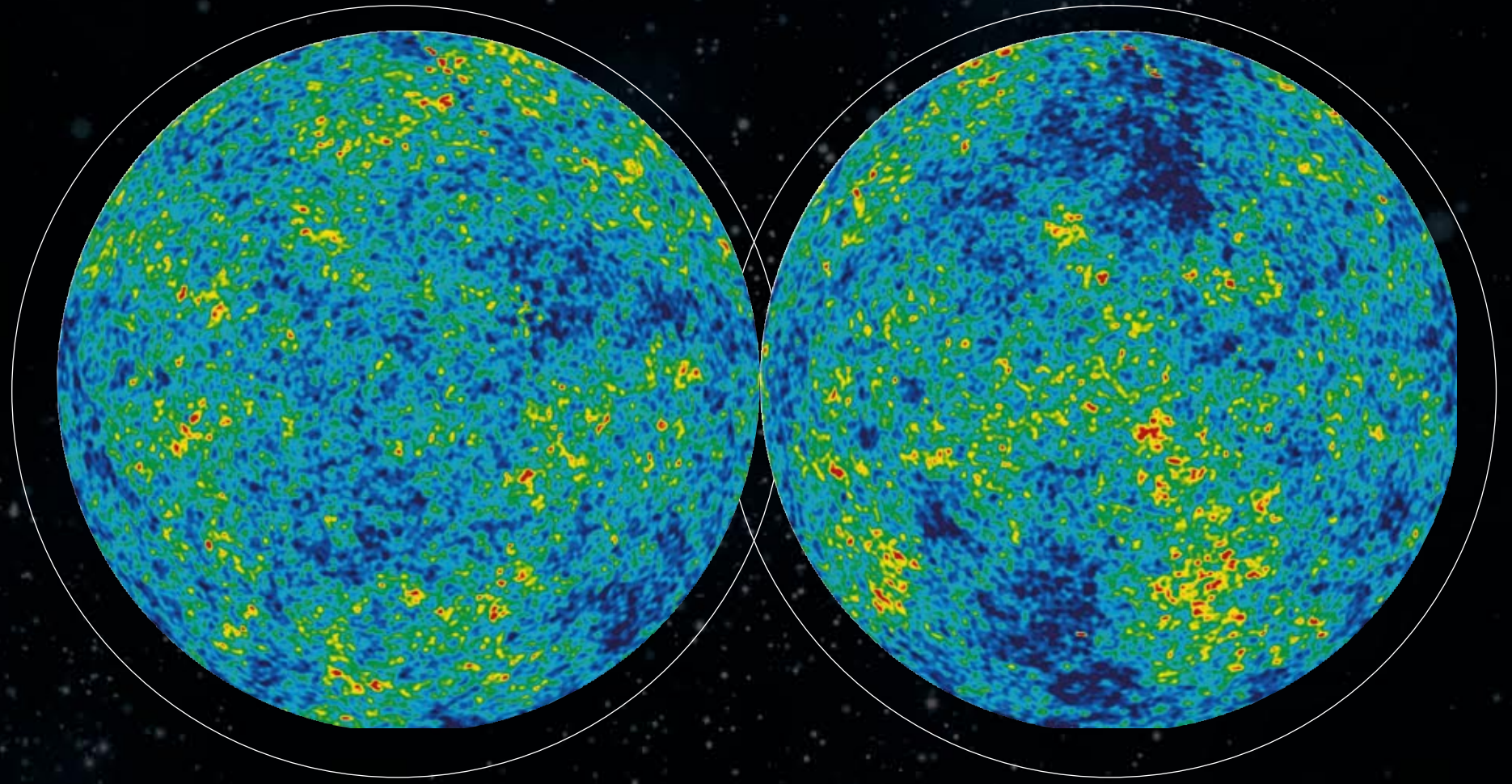
LE LANCEMENT DE PLANCK →

est prévu en avril 2009 par une fusée Ariane 5 ECA, conjointement avec le satellite Herschel.



Cosmologie et galaxies

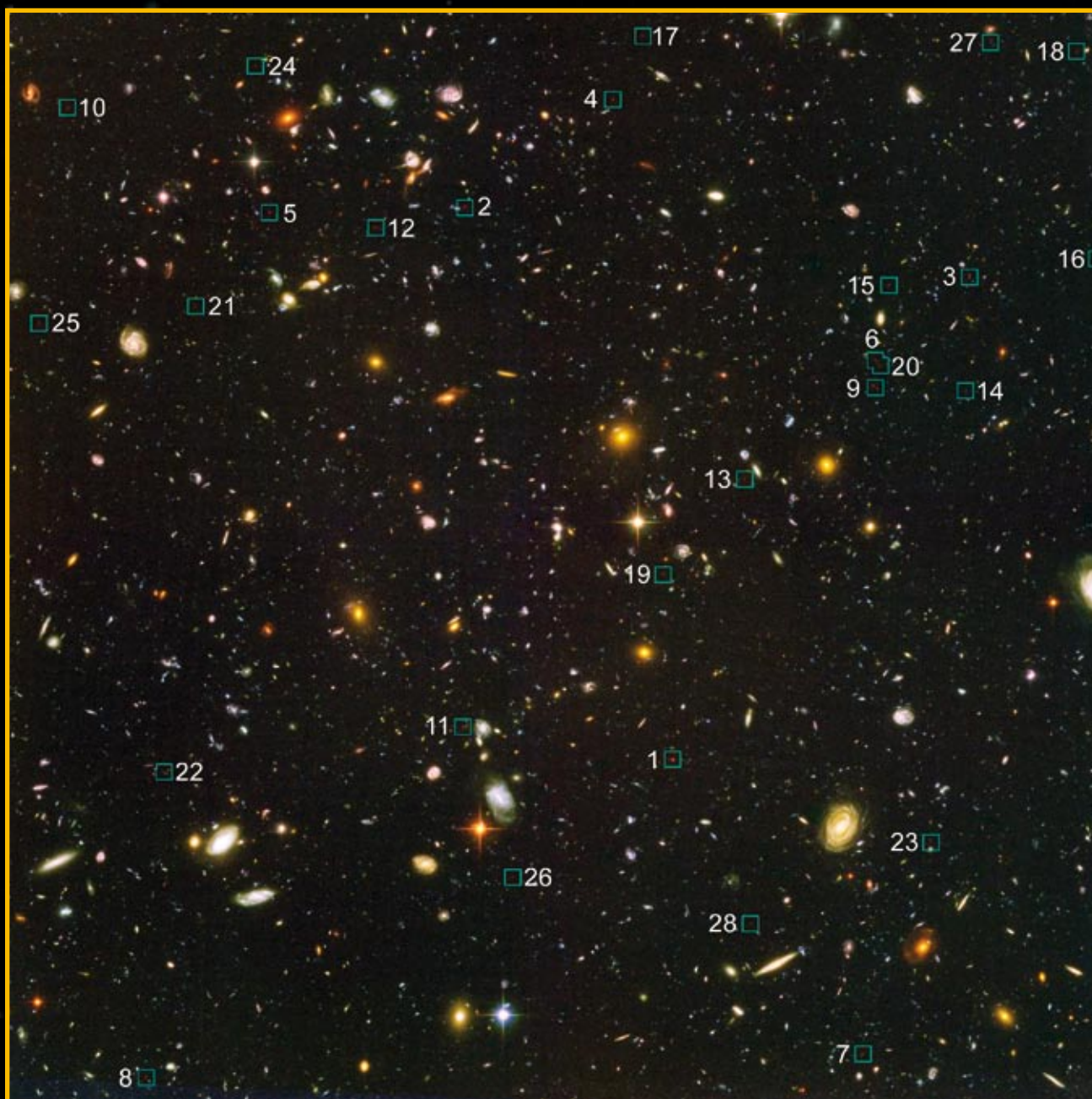
L'un des thèmes de recherche de l'Institut d'Astrophysique Spatiale concerne l'Univers dans son ensemble, sa structure et son évolution: il s'agit de la cosmologie.



↑ LE FOND DIFFUS COSMOLOGIQUE,

ici observé par le satellite WMAP en 2007 et bientôt observé par le satellite européen Planck. Les deux hémisphères galactiques sont représentés. Les fluctuations d'intensité observées, représentées par de fausses couleurs, témoignent des conditions physiques régnant dans l'univers il y a environ 13,7 milliards d'années !

Afin de comprendre l'histoire de l'univers, les chercheurs étudient la lumière fossile de l'univers, appelée le fond cosmologique, les amas de galaxies, et les galaxies. Ils développent également des modèles et conçoivent de nouveaux télescopes spatiaux.



↑ UN CHAMP DE GALAXIES TRÈS LOINTAINES,

observé par le télescope spatial Hubble. C'est un exemple d'image utilisée pour mesurer les propriétés statistiques des galaxies, comme leur répartition sur le ciel, leur masse ou leur taux de formation d'étoiles. La distance spatiale

de ces galaxies est aussi une distance temporelle: voir loin signifie aussi voir dans le passé, et ainsi observer la naissance des galaxies et suivre leur évolution.



↑ GALAXIES EN COLLISION DANS UN AMAS,

observées dans l'infrarouge par le satellite Spitzer. L'analyse d'une telle image est utilisée pour comprendre certains mécanismes physiques, par exemple le refroidissement du gaz dans

les galaxies, ou la formation de certaines molécules comme H_2 , une molécule difficile à observer mais très abondante dans ces galaxies.

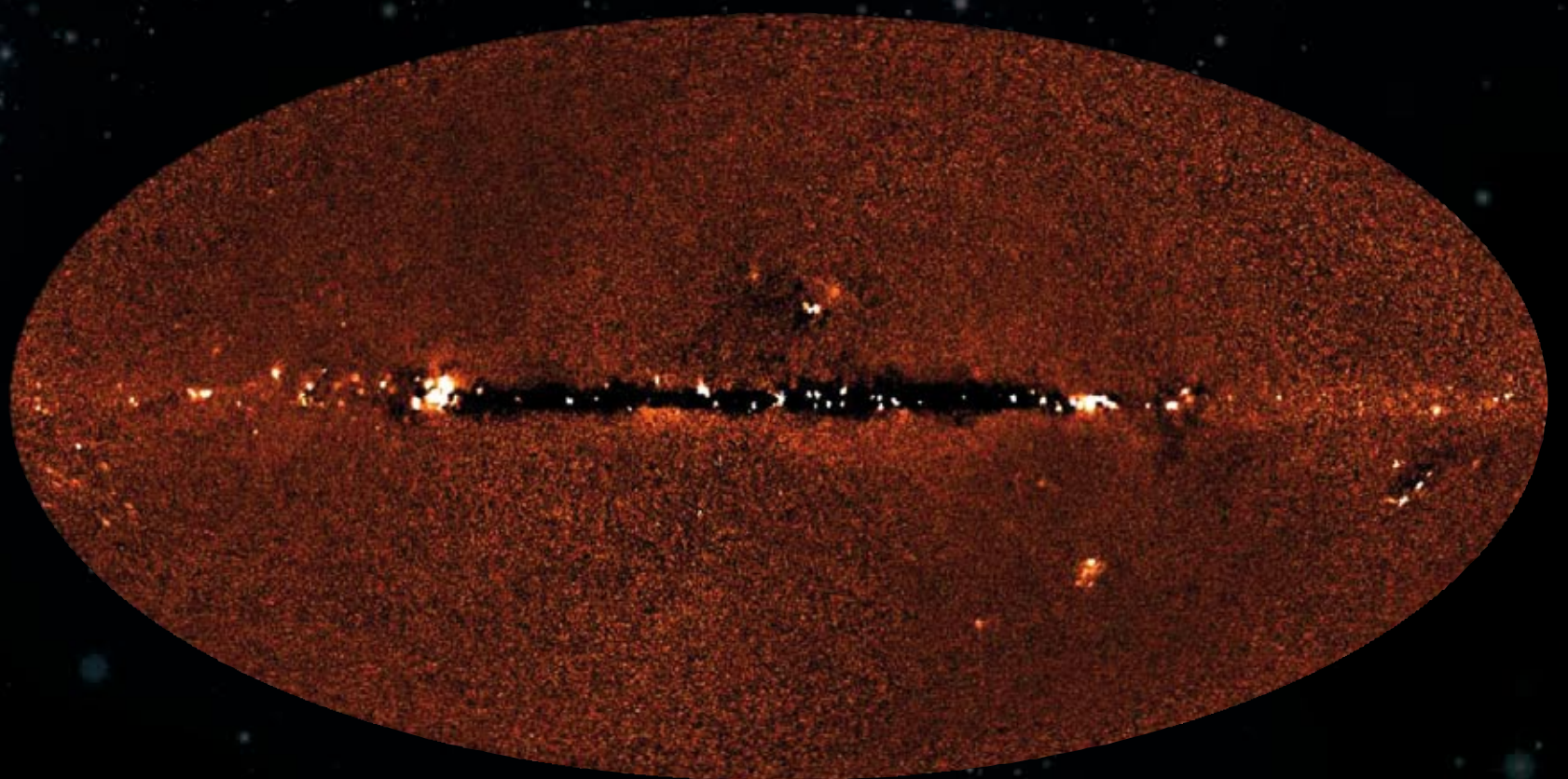
Les galaxies infrarouges et le fond diffus extragalactique

La formation et l'évolution des galaxies ne sont pas encore comprises en détail. De nombreuses observations, menées pour mieux comprendre les processus physiques mis en jeu, ont permis la découverte du rayonnement fossile des galaxies: le fond diffus extragalactique infrarouge.

L'intensité et la structure du fond diffus extragalactique infrarouge résultent de l'histoire de la production d'énergie dans l'univers, depuis l'époque de la recombinaison (il y a environ 13,7 milliards d'années).

Nous avons récemment découvert que ce fond diffus extragalactique a pour principale origine l'émission de galaxies particulières: les **galaxies infrarouges**. Celles-ci ont la propriété d'émettre l'essentiel de leur énergie en infrarouge.

Afin de comprendre la formation des galaxies, notre équipe étudie les galaxies infrarouges et le fond diffus extragalactique infrarouge, en menant des **observations** depuis l'espace et en développant des **modèles**.



M. Hauser (ST ScI) et NASA

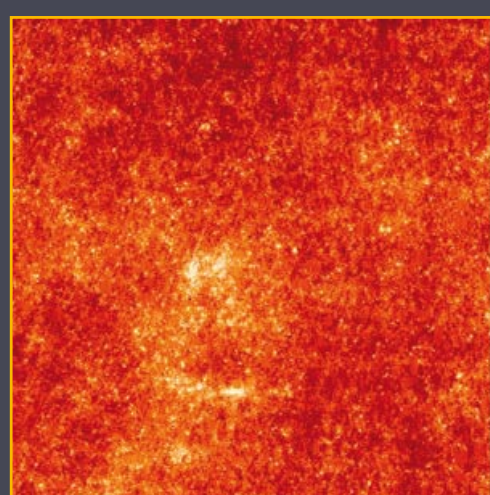
↑ LE FOND DIFFUS INFRAROUGE SUR TOUT LE CIEL,

tel qu'observé par le satellite américain COBE.

Le rayonnement est de même intensité dans toutes les directions. La zone horizontale représente l'émission de notre galaxie, la Voie Lactée, dont les nombreuses étoiles et poussières interstellaires ne permettent pas l'observation du fond diffus infrarouge.

↓ ÉVOLUTION DE L'UNIVERS,

et lien entre fond cosmologique, fond diffus extragalactique infrarouge, et galaxies. La période du Big-Bang (à gauche) est suivie, lors du refroidissement lié à l'expansion de l'univers, à une période d'âge sombre, puis à une période de formation d'étoiles et à la formation simultanée des galaxies. À droite, l'univers actuel, très grand et très vide en raison du phénomène de l'expansion.



Lagache et al./NASA/Spitzer/NASA/JPL/Caltech

PORTION DE CIEL EN INFRAROUGE LOINTAIN

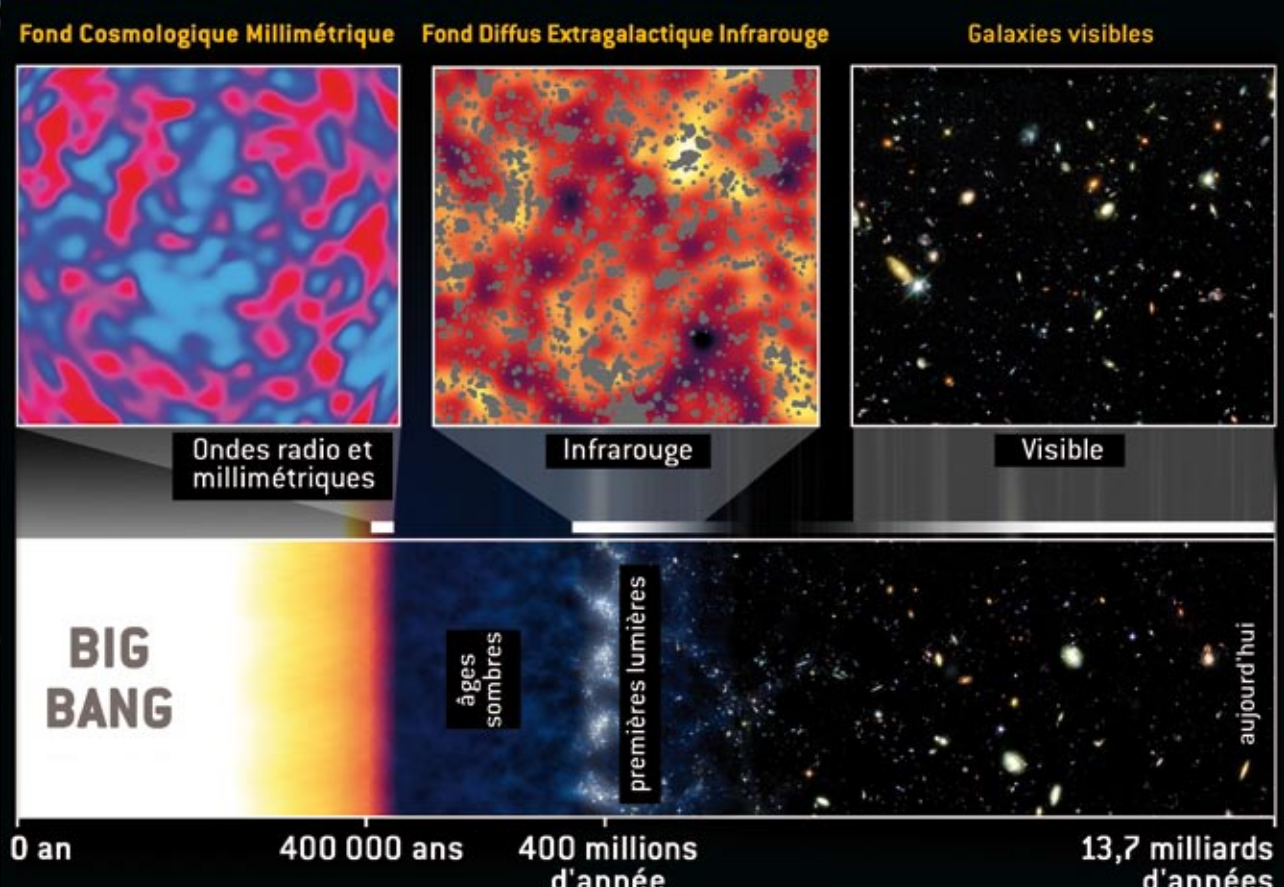
(à 160 micromètres de longueur d'onde par le satellite Spitzer, et couvrant l'équivalent de 40 pleines Lune). Les galaxies brillantes ont été soustraites de l'image, pour ne laisser apparaître que les fluctuations du fond diffus extragalactique infrarouge à petite échelle. À grande échelle, les fluctuations d'intensité lumineuse sont causées par les nuages de poussières dans notre Galaxie.



Crédit: NASA/JPL-Caltech/C. Engelbracht (University of Arizona)

EXEMPLE DE GALAXIE INFRAROUGE

observée par le satellite américain Spitzer. Le bleu représente l'émission observée à 3,6 micromètres de longueur d'onde, le vert à 4,5 et le rouge à 8 micromètres.



H. Dale, d'après Kashlinsky/NASA

Les ballons stratosphériques

Pourquoi des instruments embarqués sous ballons stratosphériques ?

L'atmosphère terrestre est responsable d'absorptions et d'émissions présentant des fluctuations intenses. Pour s'affranchir de ces effets, notamment dans le domaine d'observation de 100 μm à 3 mm (de l'infrarouge aux ondes radio), l'instrumentation astronomique doit opérer au-dessus de l'atmosphère. Pour ce faire, l'IAS conçoit et réalise, en collaboration avec le CNES, des expériences embarquables sous ballons stratosphériques (permettant d'atteindre une altitude de 40 km).



LA NACELLE ET LE TÉLESCOPE

PRONAOS

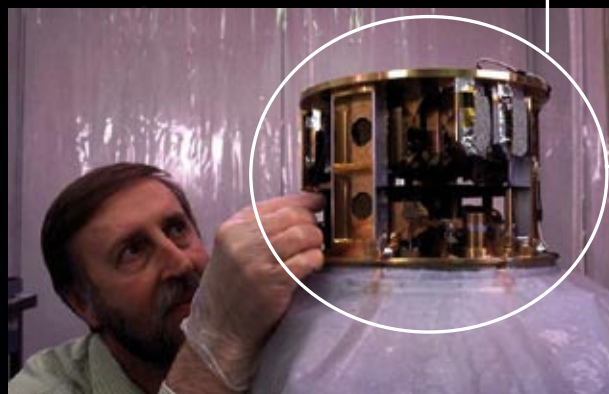
PRONAOS était un instrument constitué d'un télescope de 2 mètres de diamètre et d'un photomètre utilisant 4 bolomètres refroidis à 0,3K.

(température en degrés Celsius + 273,15 = température en degrés Kelvin = T (K))

PRONAOS a observé les nuages froids du milieu interstellaire dans notre Galaxie et l'interaction du rayonnement cosmique avec les amas de galaxies, lors de trois vols effectués en 1994, 1996 et 1999 aux États-Unis.

L'OPTIQUE À 2 K →

L'OPTIQUE À 2K ET LES DÉTECTEURS À 0,3K DANS LE PHOTOMÈTRE ↓



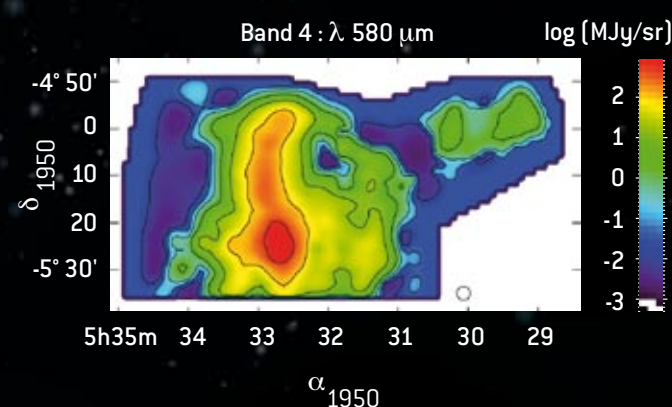
↓ LE PHOTOMÈTRE DERRIÈRE LE TÉLESCOPE



LA NACELLE SOUS LE CAMION-GRUE ET LE GONFLAGE DU BALLON



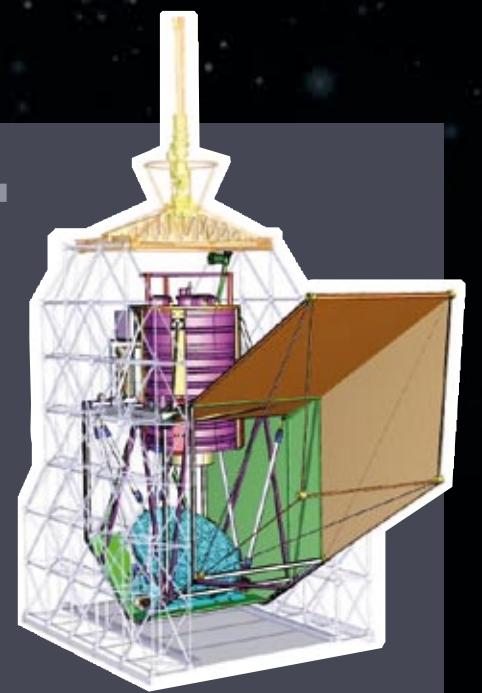
LE LANCEMENT DU BALLON



↑ RÉGION DE FORMATION D'ÉTOILES DANS ORION CARTOGRAPHIÉE AVEC PRONAOS, à la longueur d'onde de 580 microns

PILOT

LA NACELLE ET L'INSTRUMENT PILOT

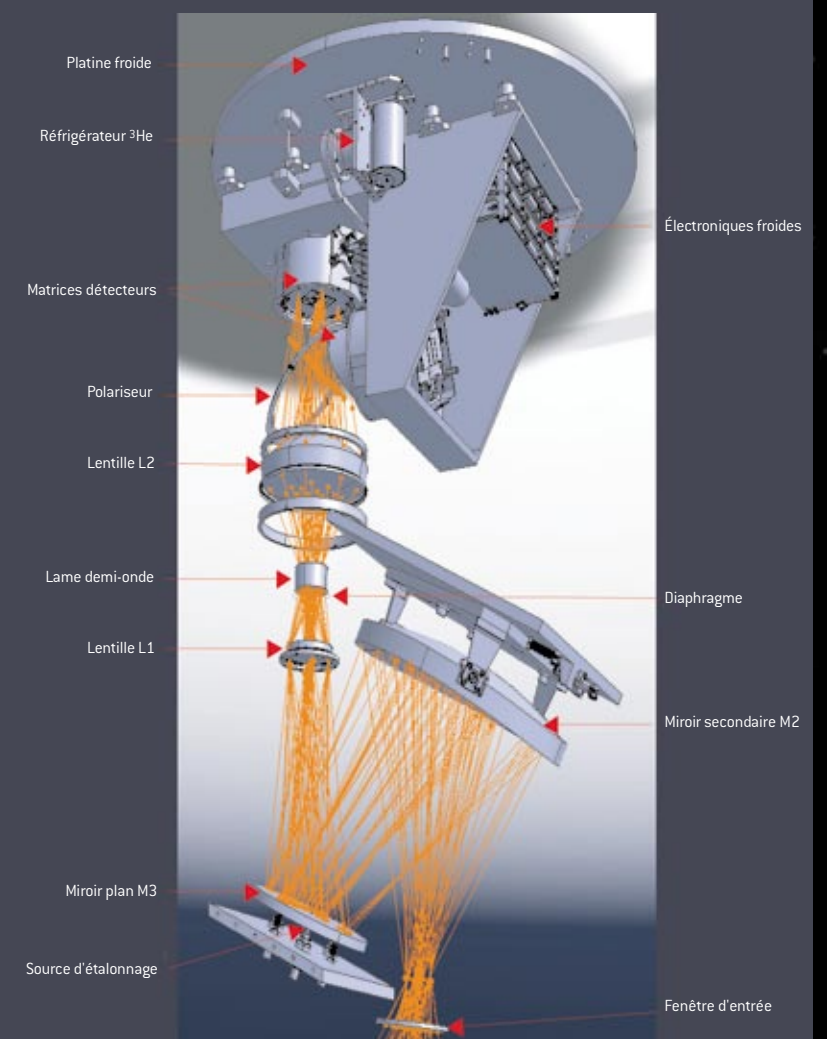


Cet instrument est constitué d'un miroir primaire d'un mètre de diamètre et d'un photomètre contenant un système de détection comportant 2048 bolomètres refroidis à 0,3 K. Le 1^{er} vol est prévu en 2011.

Les observations de PILOT ont deux objectifs majeurs :

- mieux comprendre le rôle du champ magnétique dans l'effondrement gravitationnel menant à la formation d'étoiles,
- mesurer, pour la première fois, l'émission polarisée de la poussière dans la région la plus diffuse du ciel.

L'OPTIQUE À 2 K ET LES DÉTECTEURS À 0,3 K DANS LE PHOTOMÈTRE



ASTROCHIMIE et origines

La compréhension de la formation et de l'évolution de la matière solide extraterrestre requiert des moyens de simulation des conditions physiques du milieu interstellaire en laboratoire, mais aussi des moyens d'observation et d'analyse de matériaux extraterrestres.

Une partie de la matière extraterrestre, composée de matière organique, peut être considérée comme prébiotique, nécessaire à l'apparition de la vie.

L'apport sur Terre de matière organique et d'eau extraterrestres par les poussières de comètes ou d'astéroïdes, aurait favorisé à la surface de notre planète l'émergence de conditions favorables à une évolution biochimique.

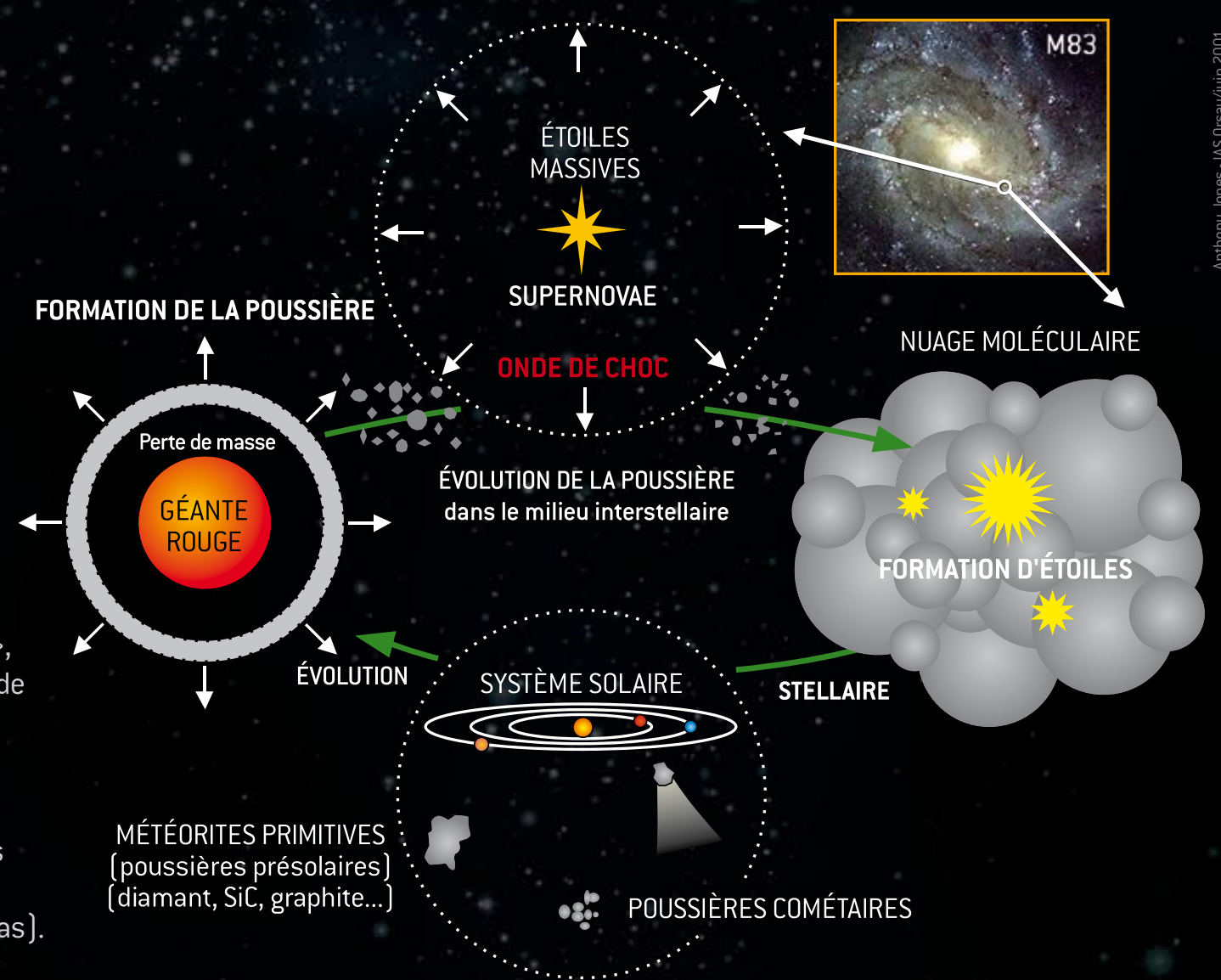
LE CYCLE DE VIE DE LA POUSSIÈRE INTERSTELLAIRE →

Celle-ci naît lors de la condensation des enveloppes stellaires dans les étoiles géantes rouges (à gauche). Elle est injectée dans le milieu interstellaire où elle subit des modifications physiques et chimiques (en haut) puis se retrouve dans les nuages moléculaires (à droite).

De très nombreuses molécules organiques complexes y sont observées,

tant en phase gazeuse qu'en phase solide, sous forme de glaces « sales », de particules de carbone amorphe et de poussières minérales, les silicates.

L'effondrement de ces nuages moléculaires donne naissance à de nouvelles étoiles, à des planètes dans des disques autour de ces étoiles et à des débris tels que les comètes (en bas).



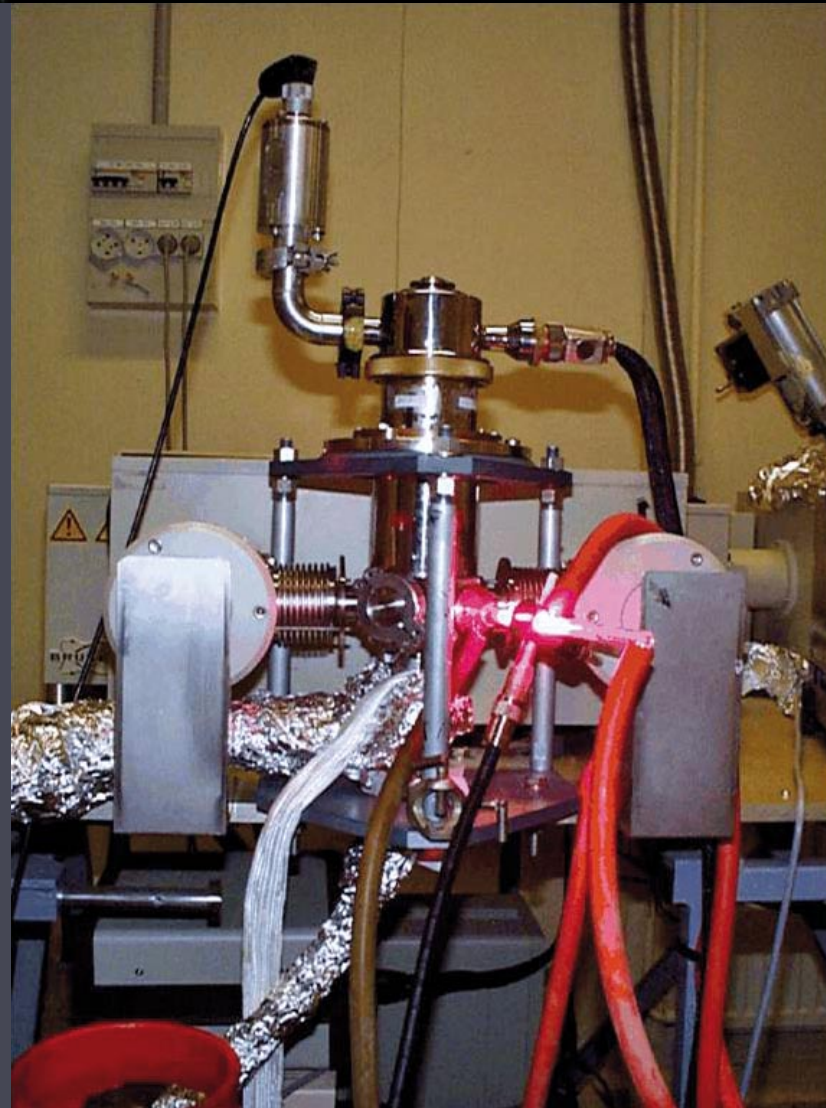
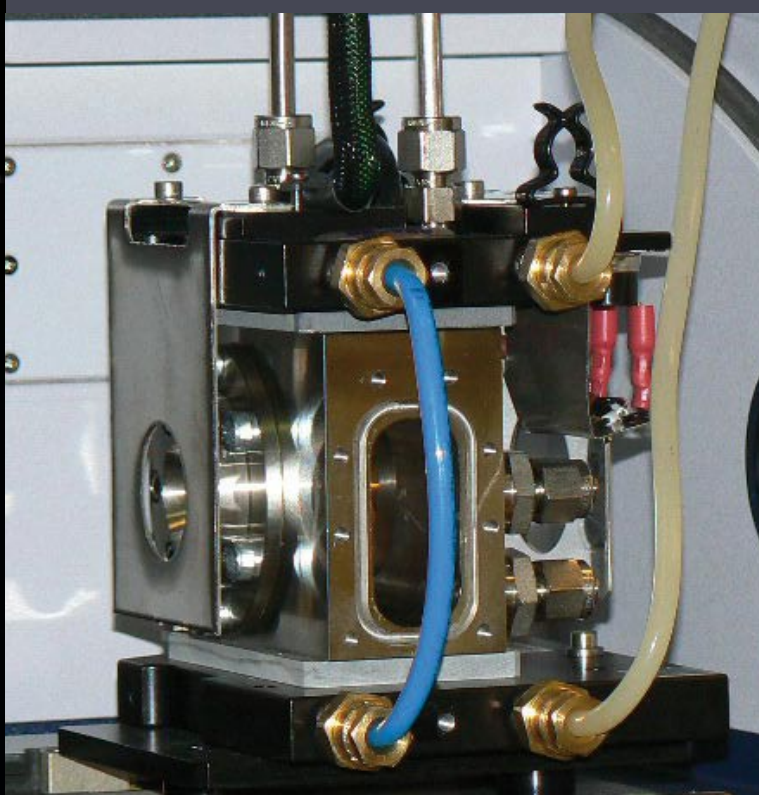
Anthony Jares - IAS Orsay / juin 2001

SIMULATION DE L'ÉVOLUTION DES GLACES INTERSTELLAIRES →

Le cryostat (au centre) permet de condenser sous vide des molécules simples gazeuses (H_2O , CH_4 , NH_3) à basse température (10 K) qui produisent un fin film de glaces tel que celui observé autour d'étoiles en formation.

L'irradiation ultraviolette des glaces, qui dans le milieu interstellaire est due aux étoiles environnantes, est ici effectuée par une lampe à plasma.

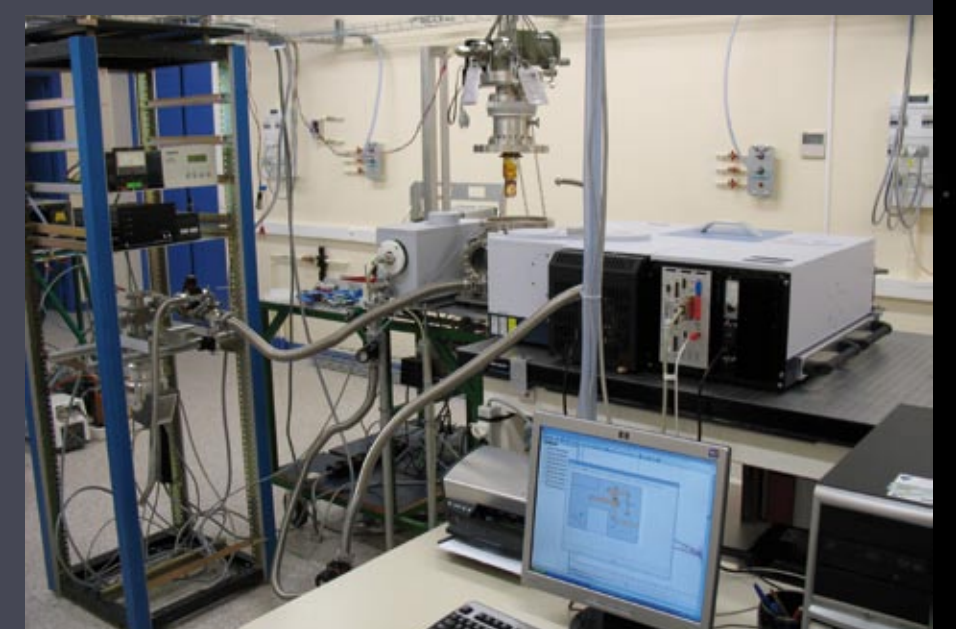
Cette irradiation permet une intense activité chimique dans la glace et la formation de molécules organiques complexes.



↓ EXPÉRIENCE DE SYNTHÈSE DE FILMS DE CARBONE AMORPHE EN COURS DE MONTAGE

L'échantillon est déposé par une lampe à plasma contenant divers hydrocarbures tels que le méthane et l'éthane, sur une surface, au centre du cryostat et à basse température (10 K) afin de former un film de carbone amorphe.

Le principal diagnostic est la spectroscopie infrarouge qui permet une comparaison avec les spectres astronomiques du milieu interstellaire diffus.



← EXPÉRIENCE DE SIMULATION DE RÉACTIONS CHIMIQUES DANS LA NÉBULEUSE SOLAIRE PRIMITIVE

Il s'agit d'une cellule à haute température et haute pression dans laquelle on injecte un gaz « cosmique », similaire à celui qui composait la nébuleuse solaire initiale (H_2 , H_2O , CO , CH_4 , NH_3 ...).

Au centre de la chambre, une surface minérale (silicate de type olivine telle que Mg_2SiO_4) va réagir chimiquement avec ces gaz. L'étude de la vitesse de la réaction et de ses produits permet ensuite de

confronter les résultats soit avec des modèles d'évolution de la nébuleuse, soit avec des objets « réels », des micrométéorites essentiellement.

Les GRAINS cométaires

L'analyse de grains cométaires en laboratoire est l'une des approches pour étudier les comètes. Associée aux survols et aux observations, elle permet une meilleure compréhension des débuts de notre Système Solaire.

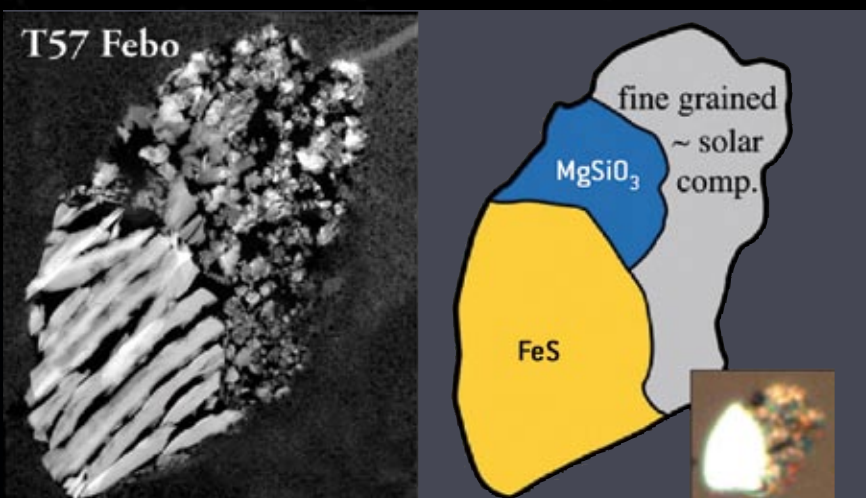


Notre Système Solaire s'est formé il y a environ 4,6 milliards d'années de l'effondrement d'un nuage de gaz (1).

99 % de la masse s'est retrouvée dans le Soleil (2). La masse restante s'est condensée rapidement en grains, puis en amas de grains (3), et enfin en planétésimaux qui orbitaient autour du Soleil (4).

Les planètes (5) résultent de ce processus. Une faible partie de la matière initiale n'a pas été intégrée dans les planètes et a formé des « petits corps » rejetés aux confins du Système Solaire. Ce sont les astéroïdes et surtout les comètes.

Toutes les comètes que l'on observe quand elles se rapprochent du Soleil proviennent de deux réservoirs distincts, la ceinture de Kuiper, au-delà de l'orbite de Neptune, et le nuage de Oort qui entoure notre Système Solaire à des distances considérables de l'ordre de 100 000 fois la distance de la Terre au Soleil.

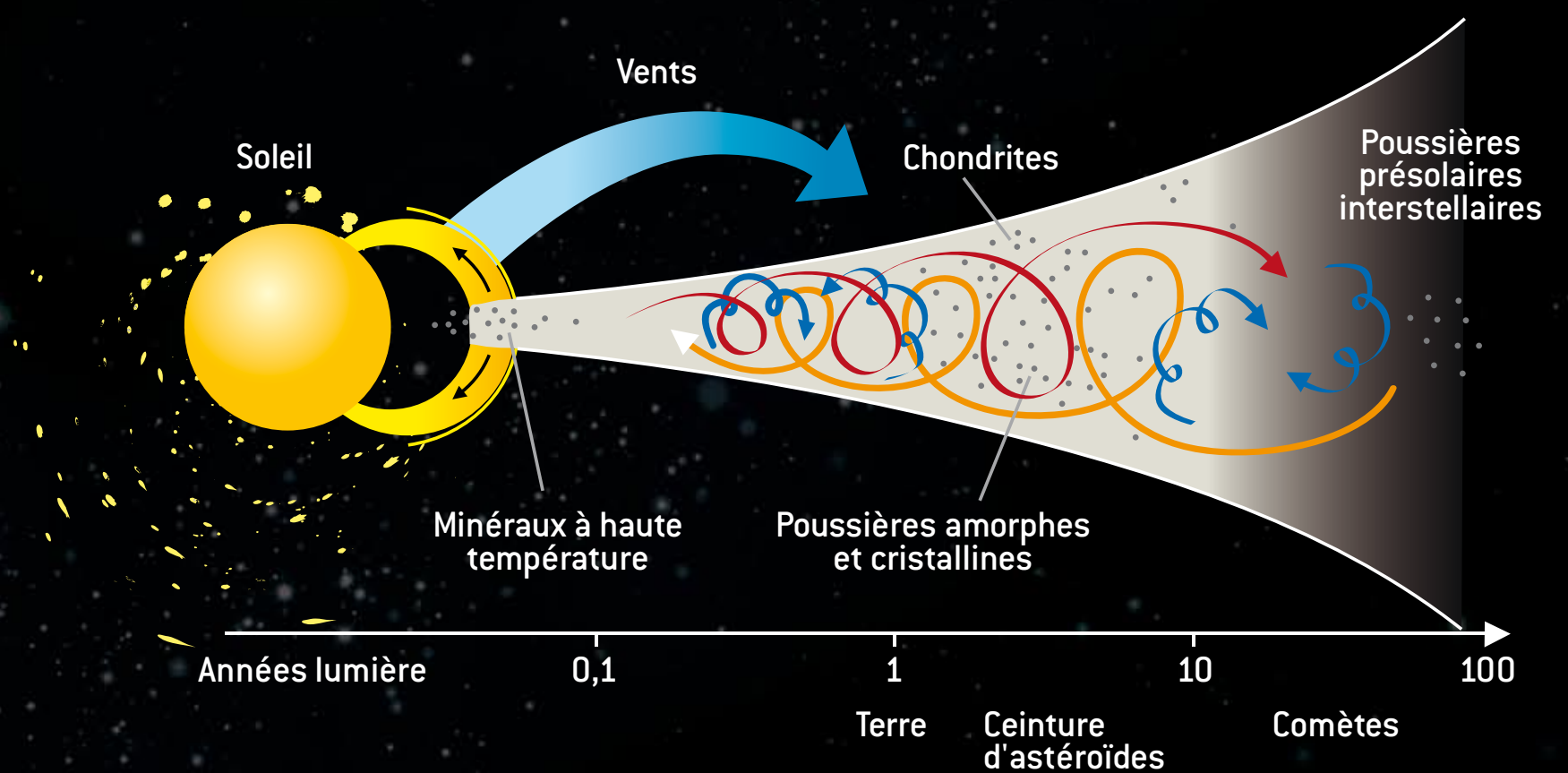


DIFFÉRENTES ANALYSES SUR LES GRAINS RAPPORTÉS PAR LA SONDE STARDUST DE LA COMÈTE WILD-2

Elles ont commencé à révéler les propriétés minéralogiques et chimiques de ces grains.

Par exemple, de nombreux grains terminaux ont été observés par microscopie électronique. La minéralogie de ces grains peut ainsi être connue.

Le grain observé ici [Université de Seattle, USA] montre une juxtaposition de différents minéraux à une échelle de quelques micromètres. Il est surprenant de trouver ainsi mêlés des minéraux formés près du Soleil et des minéraux formés beaucoup plus loin du Soleil. Une grande difficulté de l'analyse de ces grains est la caractérisation de la matière organique cométaire, à cause essentiellement de l'interaction avec l'aérogel de capture.



↑ FORMATION ET ÉVOLUTION DU SYSTÈME SOLAIRE, tel qu'il peut être compris à partir des résultats obtenus sur les grains cométaires analysés en laboratoire

Des minéraux que l'on retrouve de manière courante dans les "chondrites", météorites primitives provenant de corps parents de la ceinture d'astéroïdes, sont présents dans les comètes.

Ce résultat inattendu souligne l'existence de transport de matière efficace pour rejeter ces grains dans la région froide de formation des comètes.

Une autre surprise a été l'absence de "signatures isotopiques anormales". Cette absence indique que l'environnement de formation de certains grains n'est pas au voisinage du Soleil, mais de celui d'une autre étoile.

Ces rapports anormaux ont été retrouvés dans certaines chondrites où l'on observe des grains pré-solaires.

STARDUST ou de la poussière d'étoile au laboratoire

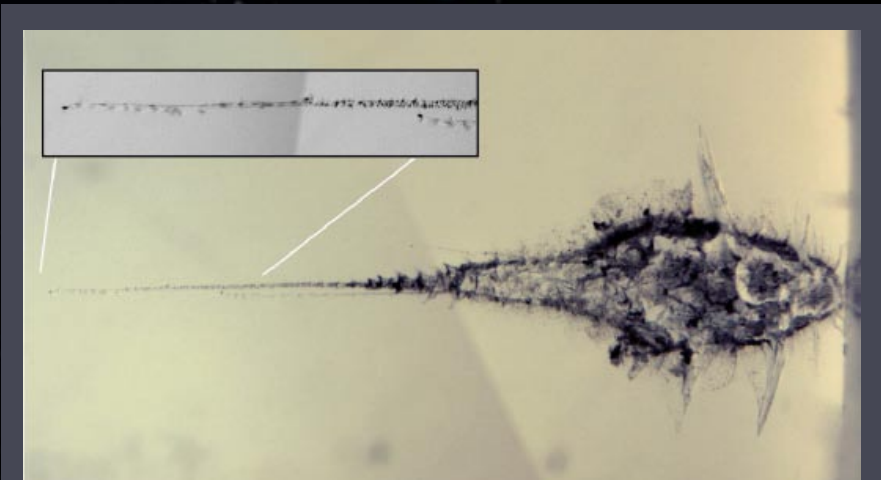
En janvier 2006, la mission américaine STARDUST rapportait sur Terre sa moisson de quelques milliers de grains cométaires prélevés dans l'environnement de la comète Wild-2. L'analyse en laboratoire de ces grains nous aide à mieux comprendre la formation de notre Système Solaire il y a environ 4,6 milliards d'années.



PHOTO DE LA COMÈTE WILD-2

Le noyau de la comète Wild-2 a été photographié lors de son survol par la sonde STARDUST en Janvier 2004. Les comètes sont de petits corps du Système Solaire (ici, environ 4,5 km de diamètre) qui ont passé la plupart de leur vie dans un réservoir de comètes situé au-delà de l'orbite de Neptune. Comme dans un congélateur, elles n'ont pas évolué. Quand une comète se rapproche

du Soleil, les glaces de ses couches externes sont évaporées et les grains piégés dans la glace sont libérés. La comète Wild-2 a été approchée par la sonde STARDUST à une distance du Soleil permettant l'éjection de grains (voir encadré). D'autres comètes, comme la comète de Halley, ont été étudiées de près, mais Wild-2 est la seule pour laquelle on a rapporté des grains sur la Terre.



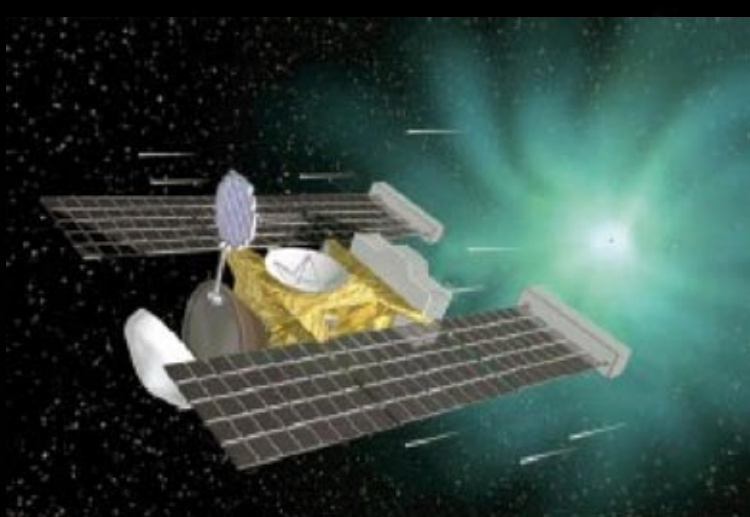
TRACE DE RALENTISSEMENT DANS L'AÉROGEL D'UN GRAIN DE LA COMÈTE WILD-2

Cette trace de quelques mm de long a été créée par un grain relativement gros (quelques dizaines de microns de diamètre) entrant dans l'aérogel à une vitesse de 6,2 km par seconde. La face d'entrée de l'aérogel est à droite sur la photo. Tout au long du ralentissement du grain, de la matière cométaire est déposée et mêlée à l'aérogel. Ce mélange grain-aérogel rend très délicates les analyses.

On reconnaît deux étapes dans ce ralentissement : pendant le premier tiers de la trace, il y a dépôt de matière volatile qui explique l'expansion transverse de la trace et son aspect "bulbeux". Toutes les régions sombres visibles sur la photo sont expliquées par la présence de matière qu'il faut analyser. Le grain terminal de la trace n'est donc pas à lui seul détenteur de l'information complète : tous les éléments de la trace devront être analysés pour avoir une vue d'ensemble sur un grain de la comète. Ce n'est qu'après l'analyse de plusieurs traces et de grains que l'on aura une idée des propriétés des grains de la comète Wild-2.

Minéralogie et contenu en matière organique sont particulièrement étudiés, les comètes étant suspectées d'être à l'origine de la matière organique ayant permis, sur la Terre le développement ultérieur de la vie.

résultats obtenus que l'on aura une meilleure image d'une des comètes du Système Solaire.



RENCONTRE DE LA COMÈTE WILD-2 ET DE LA SONDE STARDUST, LE 2 JANVIER 2004...

La comète est alors à une distance du Soleil telle que l'évaporation des glaces cométaires permet de libérer les grains.

Ces grains sont piégés dans le collecteur en aérogel déployé à cet effet. L'aérogel est un gel de silice, de densité extrêmement faible, dans lequel les grains sont ralentis, sans être détruits. Ils forment alors une « trace » (voir encadré), dont les propriétés sont liées aux

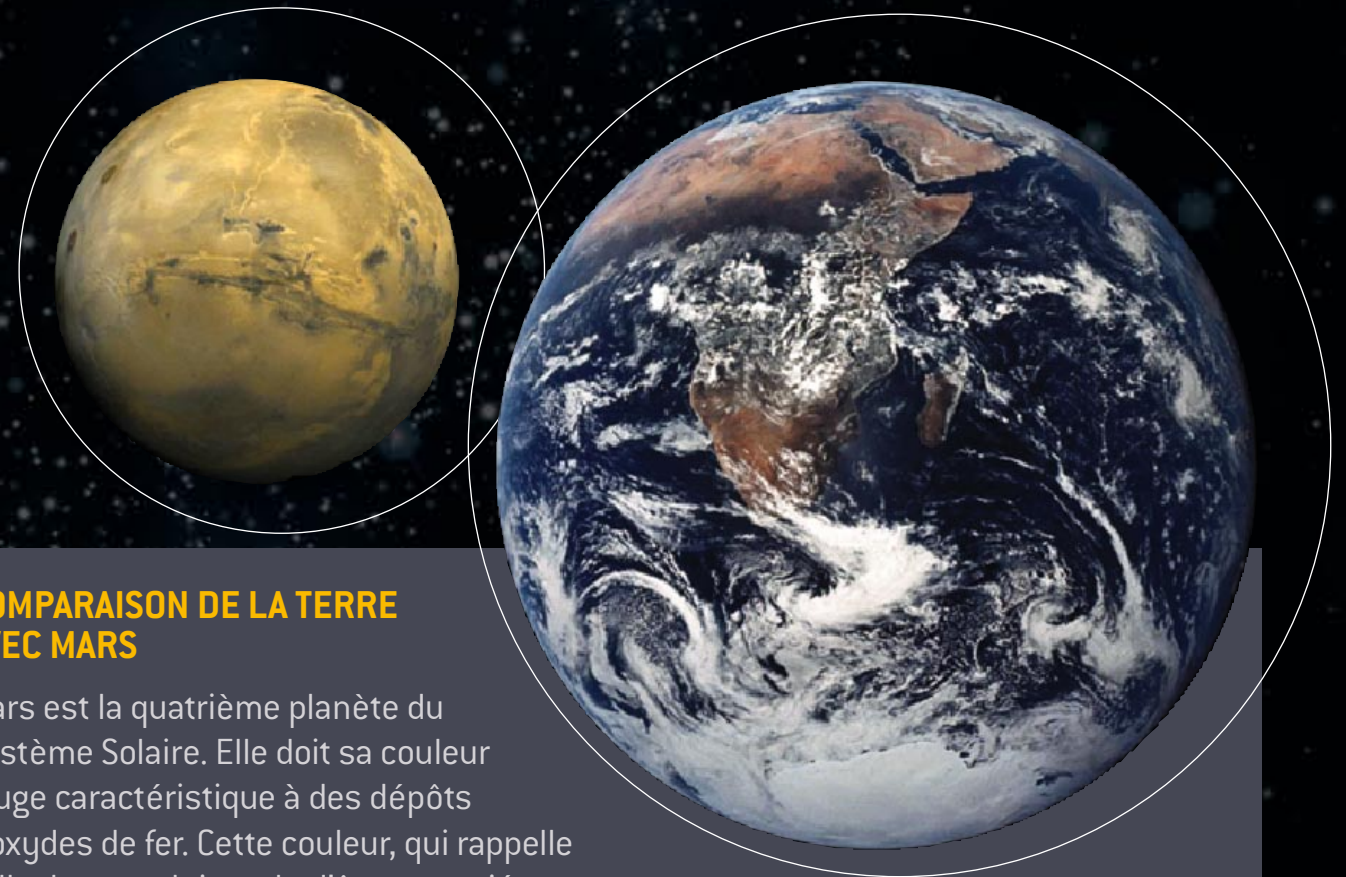
caractéristiques du grain. Les quelques milliers de grains de Wild-2 piégés représentent une masse de l'ordre de dix milliardièmes de gramme ; chaque grain a une taille de quelques microns.

À l'IAS, comme dans différents laboratoires nationaux et internationaux, l'analyse de ces grains par des techniques de haute précision se poursuit. C'est à partir de la compilation des différents

MARS ou la recherche de la vie extraterrestre

Peu après leur formation il y a des milliards d'années, la Terre et Mars étaient deux mondes similaires, et il est fort probable que la vie soit apparue simultanément sur les deux planètes.

Aujourd'hui, Mars n'est plus qu'un vaste désert planétaire et sa surface semble impropre à toute vie. Pourtant, si la vie a existé sur Mars, elle a pu laisser des indices de son éphémère passage. Ces traces initiales, qui sont d'une importance capitale pour tenter de percer le mystère des origines de la vie, seront plus faciles à trouver sur la planète rouge que sur notre propre planète, où de telles traces ont disparu depuis longtemps. L'étude de Mars et la recherche d'une éventuelle vie passée est aujourd'hui un objectif majeur des nombreuses sondes spatiales martiennes.

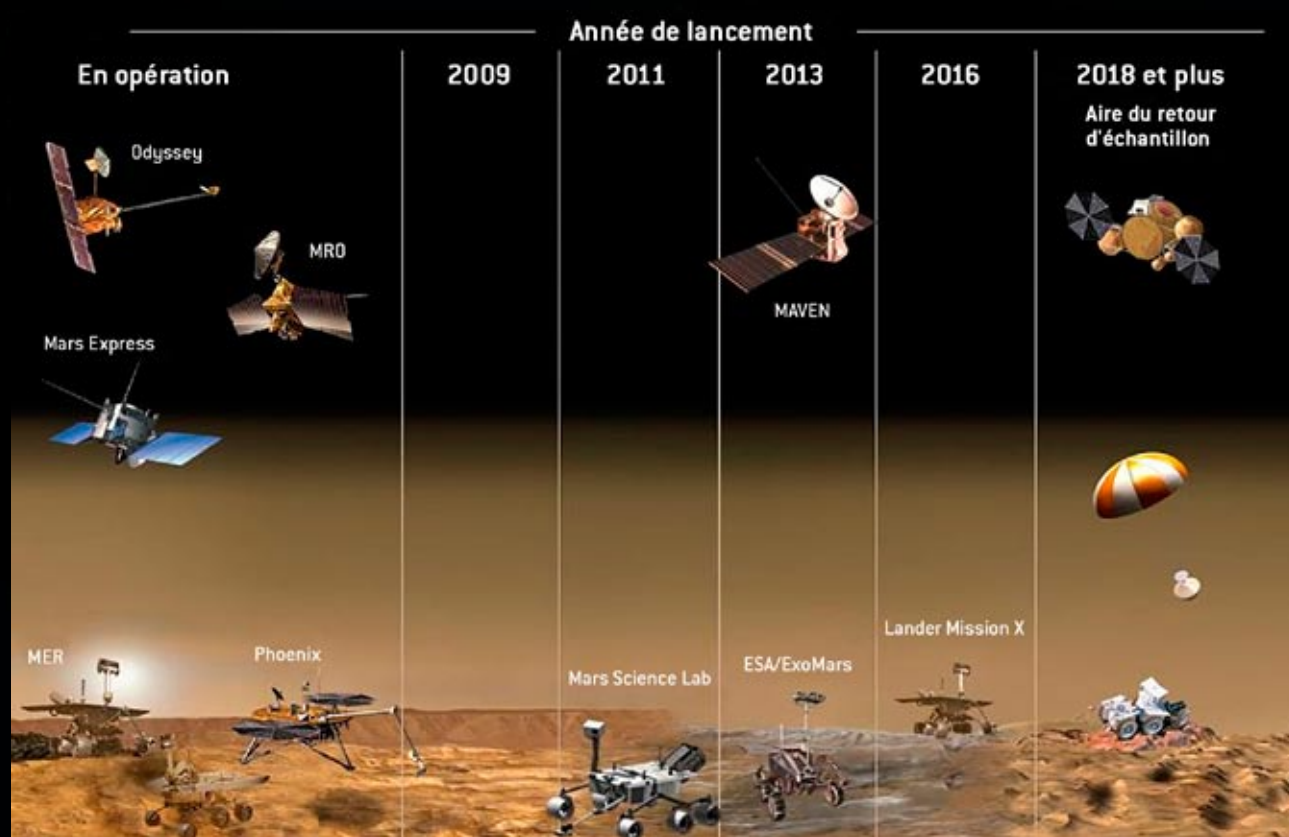


COMPARAISON DE LA TERRE AVEC MARS

Mars est la quatrième planète du Système Solaire. Elle doit sa couleur rouge caractéristique à des dépôts d'oxydes de fer. Cette couleur, qui rappelle celle du sang, lui a valu d'être associée au Dieu de la guerre. La distance qui la sépare de la Terre varie de 55 à 400 millions de km. Avec un diamètre près de deux fois plus petit que celui de la Terre, la masse de Mars n'est que de 1/10^e de celle de la Terre. Ces caractéristiques ont, pense-t-on, entraîné une évolution très différente de ces deux planètes.

Contrairement à la Terre, Mars est assez petite pour que sa surface n'ait pas été remodelée par des processus globaux. D'un autre côté, Mars est assez grande

pour que toutes les étapes majeures de l'évolution planétaire, y compris une grande activité interne se soient produites. Sa masse intermédiaire a donc permis d'enregistrer tous les événements majeurs : bombardement massif primordial, activité tectonique et volcanique, altérations sur des longues et courtes échelles de temps. L'histoire en continu de la planète est donc inscrite dans ses roches, et en particulier dans leur composition.

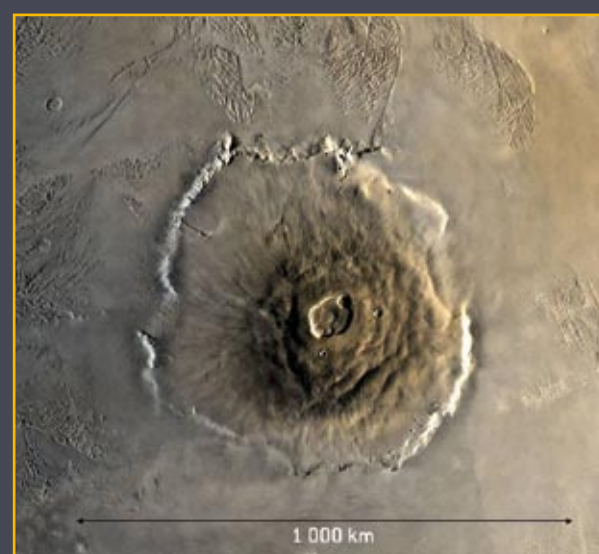


REVUE DES DIFFÉRENTES MISSIONS SPATIALES EN COURS ET FUTURES (satellites, atterrisseurs, robots mobiles)

Mars est l'objet du système solaire qui est le plus exploré par les sondes spatiales.

DE L'EAU SUR MARS ?

De nombreuses structures datant de plus de 3 milliards d'années, découvertes depuis les sondes Viking dans les années 1970, s'expliquent par l'écoulement de l'eau. Plus récemment, des minéraux indiquant la présence durable de l'eau ont été détectés dans des régions très anciennes, par l'instrument OMEGA développé à l'Institut d'Astrophysique Spatiale (Université Paris-Sud), et embarqué sur la sonde de l'ESA, Mars-Express.

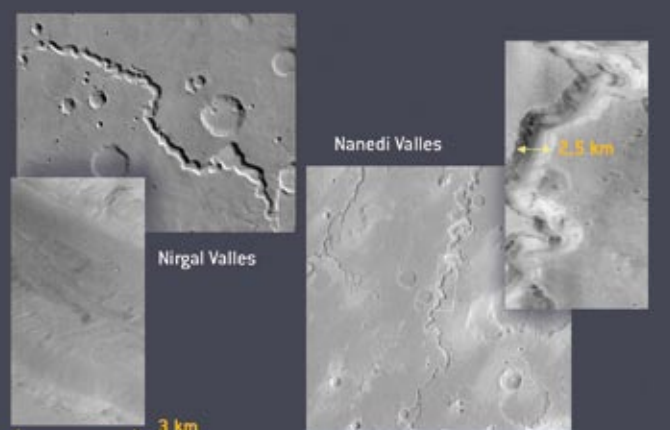


← VOLCAN OLYMPUS MONS

La base de ce gigantesque volcan pourrait recouvrir la France. Des traces d'activité volcanique « récentes », datant de 100 millions d'années, ont été identifiées dans la caldera situé au sommet du volcan.

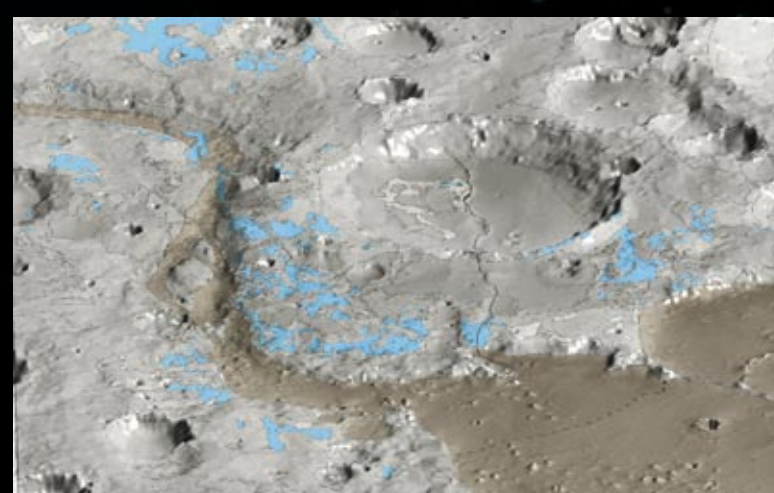


↓ EXEMPLE DE RÉSEAUX DE VALLÉES



← VUE DU SOL DE MARS PHOTOGRAPHIÉ PAR LE ROBOT MOBILE AMÉRICAIN « OPPORTUNITY »

Les roches visibles sur ce cliché sont constituées de minéraux qui se sont formés au contact d'eau liquide.



CARTOGRAPHIE DES DÉPÔTS CONTENANT DES ARGILES (zones en bleu)

dont la formation peut être attribuée à la présence d'eau liquide dans le passé, dans la région de « Mawrth Vallis » sur Mars. Cette région fait partie des sites possibles d'atterrissage de la future mission MSL qui va décoller en 2011.

LE SOLEIL en 3 dimensions

La vision stéréoscopique unique de notre étoile nous est offerte par les deux sondes de la mission STÉRÉO, qui observent le soleil sous deux angles différents depuis la fin de l'année 2006. Il est maintenant possible de reconstituer la géométrie en relief des structures solaires.

Cette vision nouvelle nous permet d'étudier avec un luxe de détails sans précédent les mécanismes responsables des éjections solaires de matière, phénomènes les plus énergétiques de l'espace interplanétaire : 1 milliard de tonnes de matière éjectée à la vitesse de 500 km/s lors d'une seule éruption. Cette matière peut entrer en interaction avec la magnétosphère et l'atmosphère terrestres, et avoir un impact sur la technologie humaine, depuis les satellites en orbite jusqu'aux centrales électriques. Pourtant, les scientifiques comprennent encore mal leur origine et leur expansion dans l'espace interplanétaire.

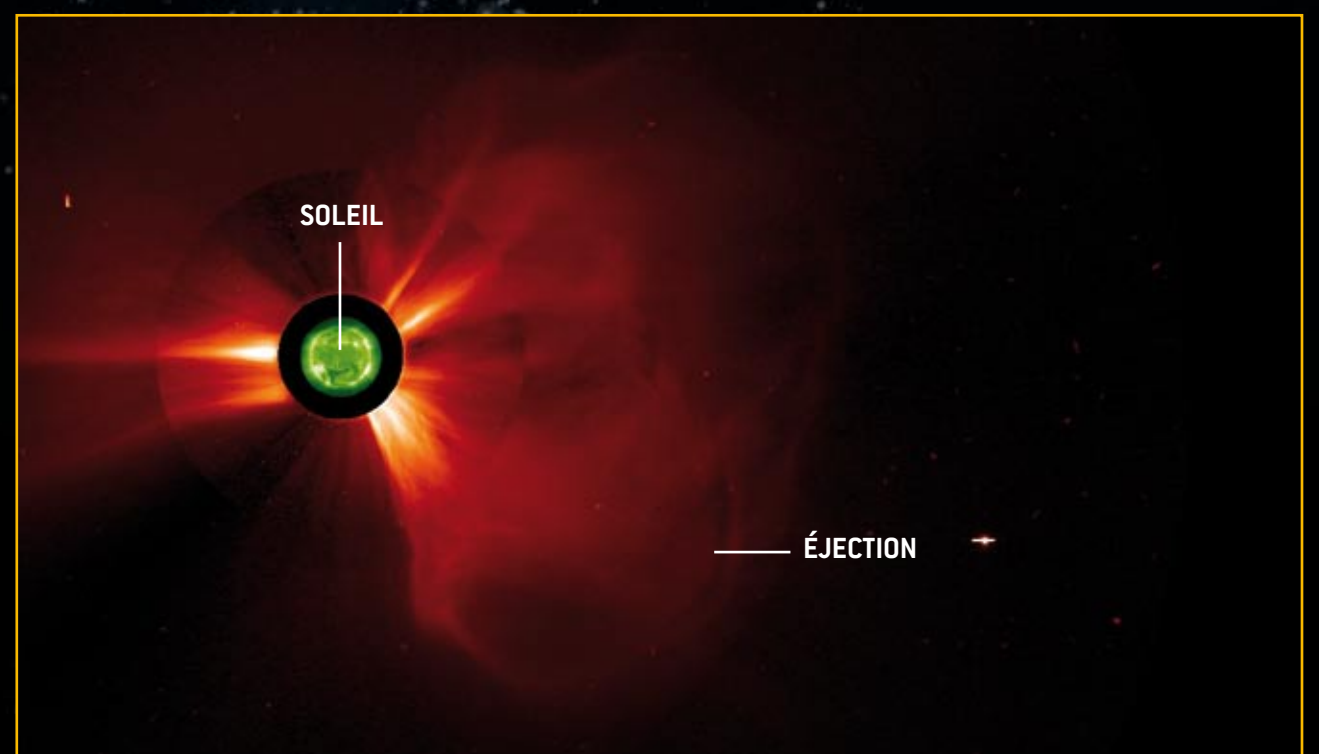
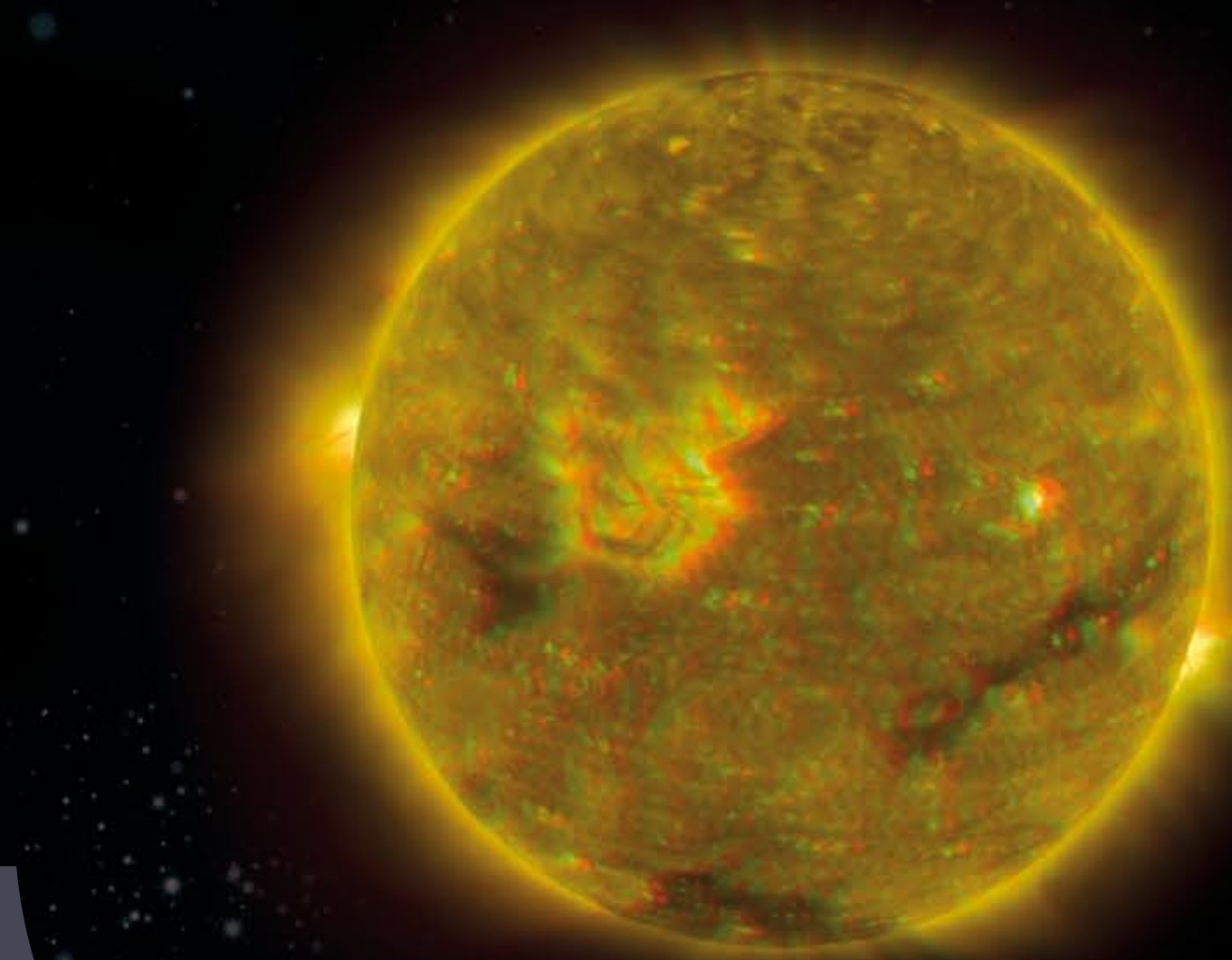


IMAGE DU SOLEIL ET DE L'ESPACE INTERPLANÉTAIRE en fausses couleurs

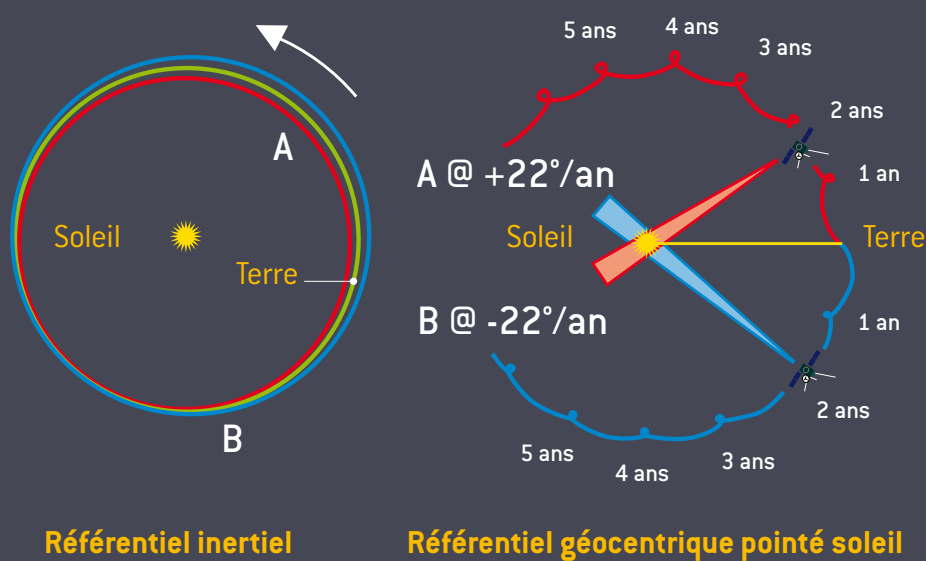
Les 2 sondes de STÉRÉO permettent de voir ces éjections sous deux angles différents donc en 3 dimensions. Il est alors possible de comprendre la géométrie de ces structures ainsi que leur évolution spatiale.



Les lunettes bleu/rouge à votre disposition permettent de voir en 3 dimensions la combinaison ci-contre de 2 images du Soleil prises par la sonde STÉRÉO A et la sonde STÉRÉO B (fausses couleurs).



STÉRÉO : COMMENT CA MARCHE ?



Les sondes s'écartent progressivement de la Terre, à raison de 22 degrés par an chacune. En rouge, est représentée la trajectoire de la sonde située entre la Terre et le

Soleil (sonde STÉRÉO A), en bleu est représentée la trajectoire de la sonde située au-delà de la Terre (sonde STÉRÉO B). La trajectoire de la Terre est représentée en vert.

Sur le web : www.ias.u-psud.fr/website/modules/content_stereo

La mélodie des étoiles

Un regard direct à l'intérieur des étoiles est impossible car le milieu n'est pas transparent.

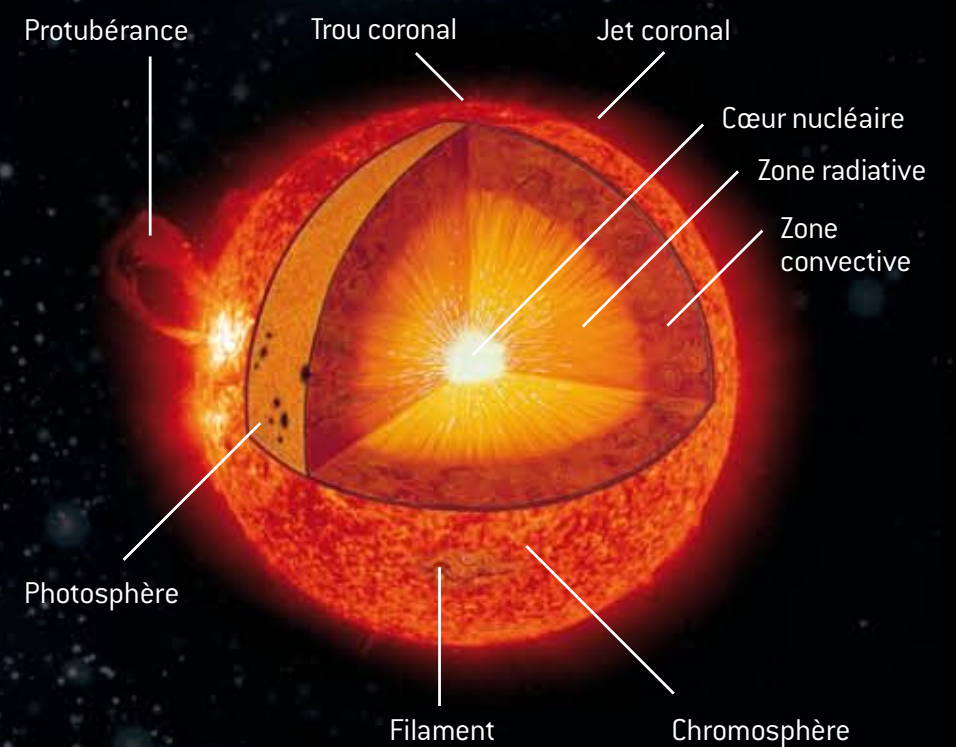
Heureusement, les étoiles jouent leur propre musique, et l'analyse précise des notes jouées permet l'étude des propriétés physiques des régions internes vibrant au passage des ondes.

Les étoiles vibrent suivant de nombreuses notes qui varient par leur fréquence d'où l'extrême richesse de l'analyse sismique de ces objets.

La discipline scientifique associée est l'Astérosismologie, ou Héliosismologie dans le cas

particulier du Soleil. À cause de la taille gigantesque des étoiles, les notes sont des milliers de fois plus graves que les sons habituels. Ces sons nous sont donc inaudibles, et de toute façon, ils ne se propagent pas jusqu'à la Terre à travers le quasi-vide qui nous sépare !

Nous observons donc leurs effets sur la lumière émise : modification de l'intensité ou de la couleur (ou longueur d'onde) de l'étoile.



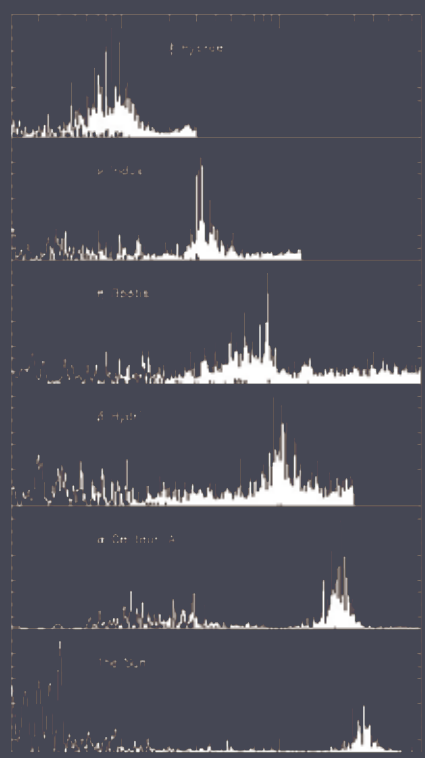
COUPE SCHÉMATIQUE DU SOLEIL ↑

La lumière émise par les réactions nucléaires du cœur en fusion, traverse la zone radiative et se retrouve bloquée par l'opacité de la zone convective. Cette dernière, chauffée à sa base, se met à bouillir pour transporter l'énergie vers les couches supérieures. C'est ce bouillonnement qui excite les vibrations du Soleil.

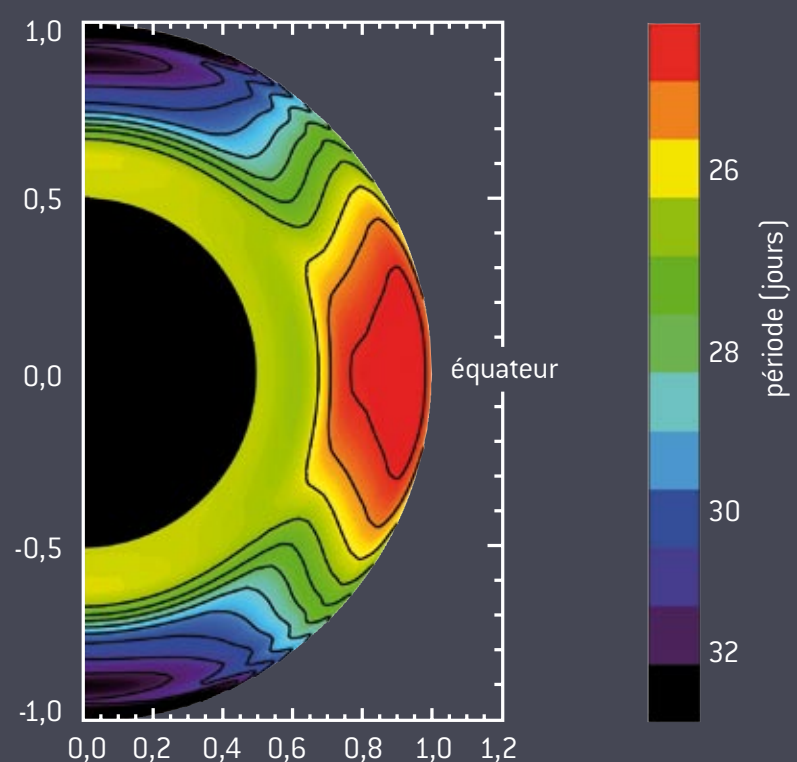
↓ SPECTRE DES « NOTES » POUR PLUSIEURS TYPES D'ÉTOILES

La puissance des notes émises est représentée en fonction de la fréquence.

Pour le Soleil, le maximum de puissance correspond à des fréquences de l'ordre de 3 millièmes de Hertz (périodes de 5 min), soit 17 octaves plus basses que le milieu de la gamme du piano.



La distribution de ces fréquences dépend des caractéristiques de l'étoile, telles que masse, âge ou composition chimique.



L'ASTÉROSISMOLOGIE SPATIALE DÉCOLLE !

L'Astérosismologie vit actuellement une période excitante avec les opérations du satellite CoRoT, qui observe de nombreuses étoiles simultanément.

Les premiers résultats sont prometteurs avec par exemple la découverte de nouveaux types

de pulsateurs. La confrontation permanente des observations aux prévisions théoriques permet de tester avec une grande précision l'évolution stellaire qui a un rôle déterminant dans l'Histoire de l'univers.

LE SOLEIL : DIAGNOSTIC EN PROFONDEUR

Parmi la moisson remarquable des résultats issus de l'Héliosismologie, retenons que :

- le modèle standard de l'étoile est globalement valable. Les estimations de la température du cœur sont confirmées (environ 15 millions de degrés) de même que la décroissance jusqu'à 6000 degrés à la surface.
- La base de la zone convective est connue très précisément, vers 70 %

du rayon solaire, et constitue une piste privilégiée d'étude de la source du cycle magnétique de 11 ans.

Pour parfaire notre connaissance, les théoriciens se creusent la tête pour mieux modéliser les nombreux mécanismes physiques en jeu dans les étoiles. Ces objets constituent ainsi un laboratoire de physique fondamentale réellement inestimable, que la sismologie nous permet d'exploiter.

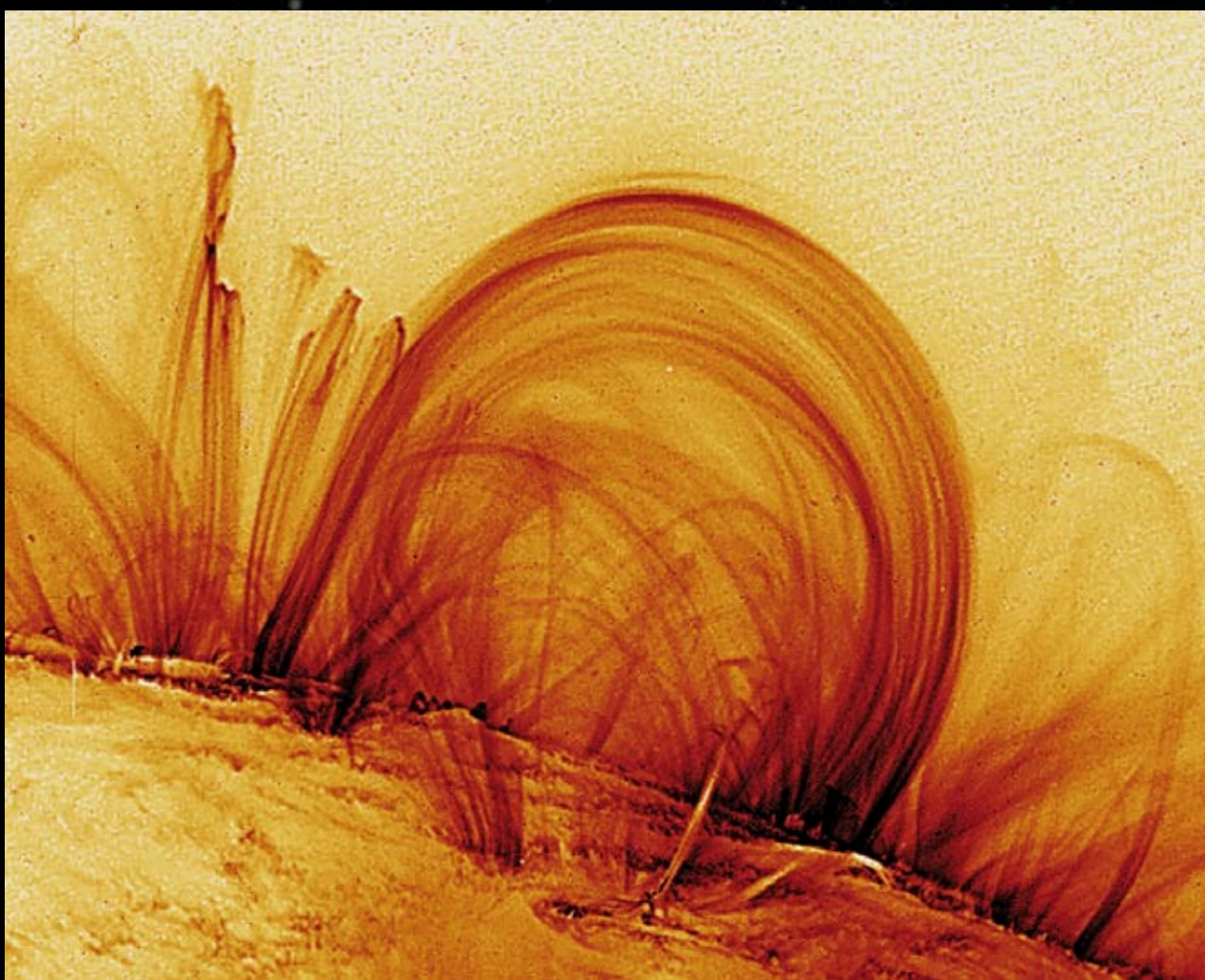
← COUPE DE LA ROTATION INTERNE DU SOLEIL obtenue à partir des observations réalisées par la sonde SOHO

À la surface, les régions équatoriales tournent plus vite que les régions polaires. Cette rotation différentielle, également observable via les taches solaires, s'amenuise petit à petit avec la profondeur.

Dans la zone radiative, la rotation est à peu près uniforme : elle ne dépend pas de la latitude. Les mesures existantes ne sont pas encore suffisamment précises pour connaître la rotation des zones les plus profondes [40 % du rayon solaire].

Modélisation du chauffage de la couronne solaire

La modélisation du chauffage dans les boucles de la couronne solaire est une étape importante vers la compréhension des mécanismes qui maintiennent la température de la couronne autour de 1 million de degrés.



LA COURONNE SOLAIRE EST ORGANISÉE PAR LE CHAMP MAGNÉTIQUE

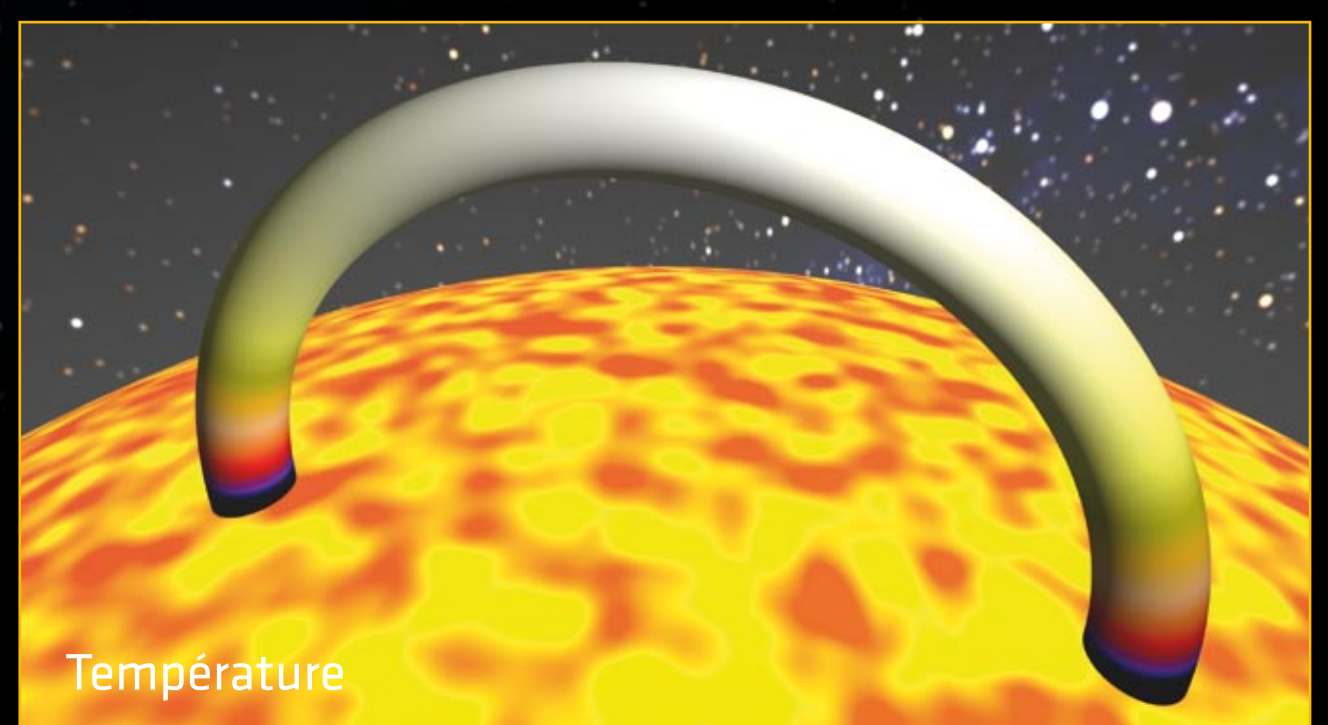
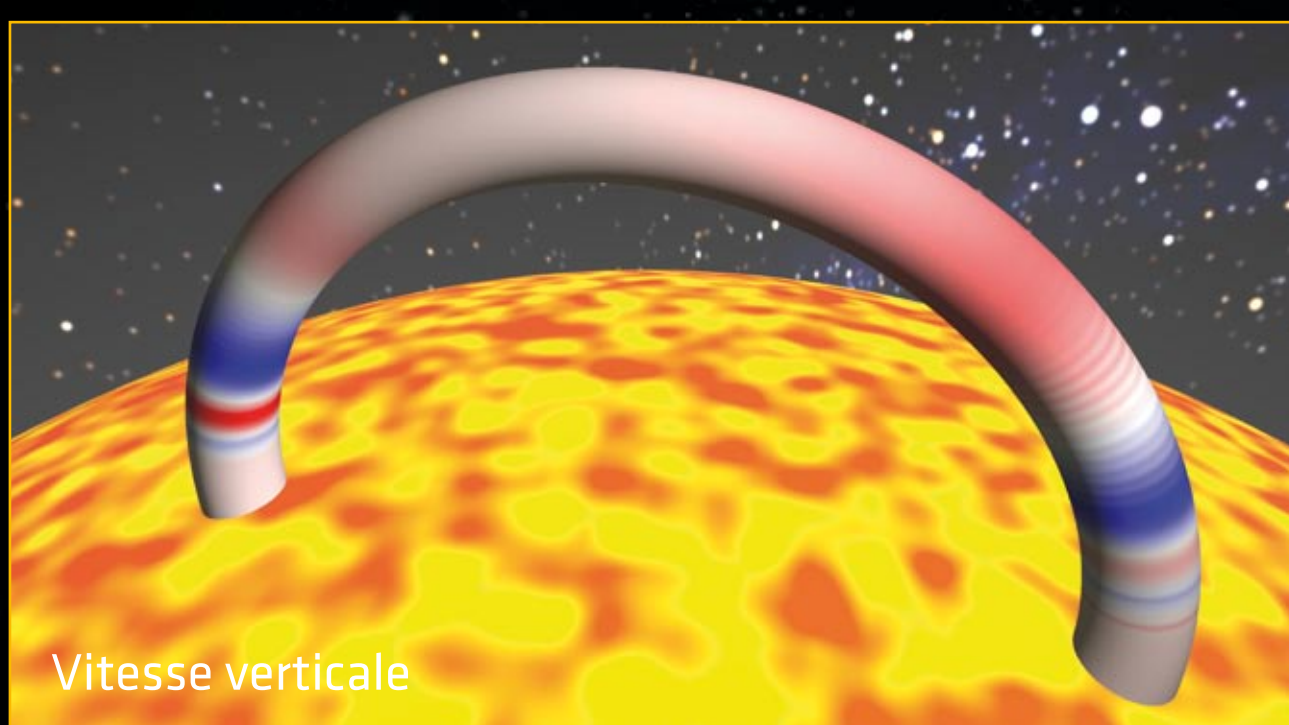
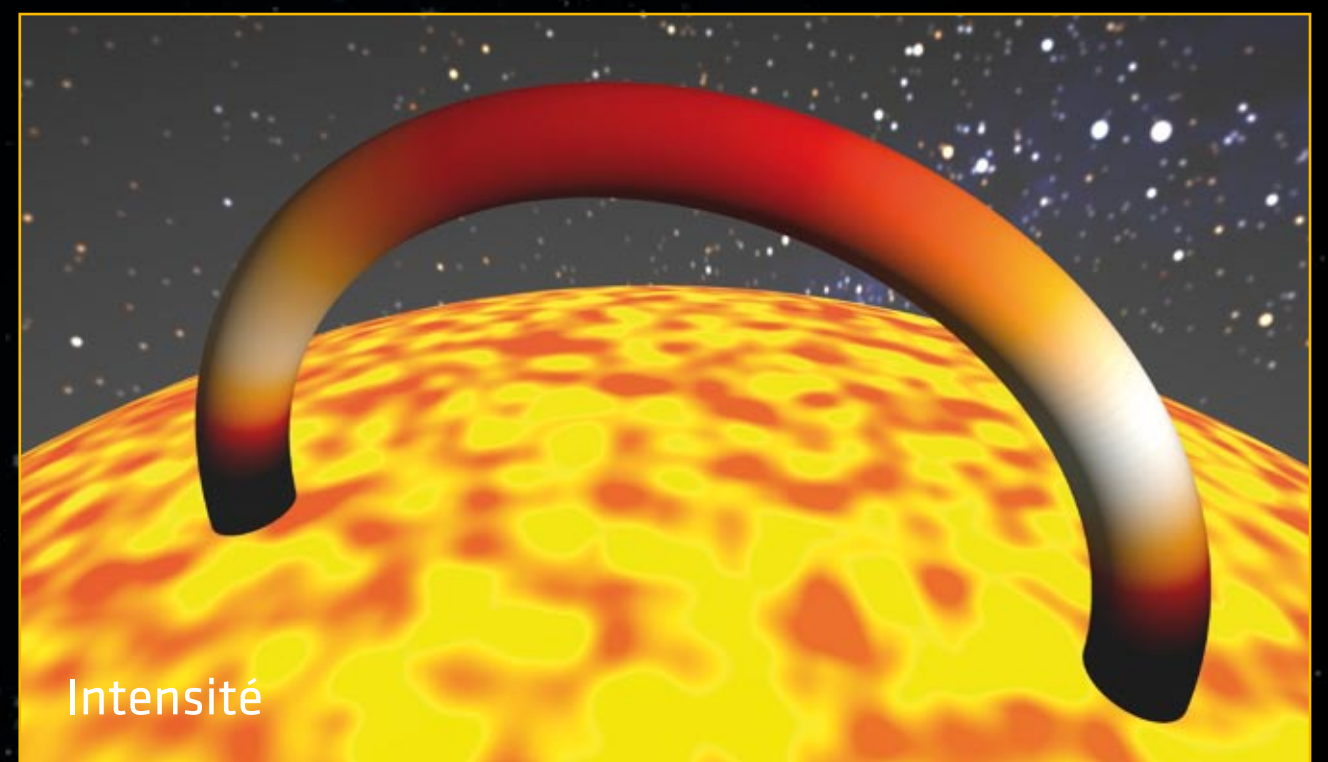
C'est en particulier lui qui donne leur forme aux boucles coronales, observées ici en ultraviolet par le satellite TRACE.

Dans cette image, les couleurs sont inversées : les boucles sont brillantes dans la longueur d'onde observée, ce qui montre qu'elles ont une température de l'ordre du million de degrés.

Elles ont ici une largeur de l'ordre de 1000 km chacune pour une longueur de l'ordre de 100 000 km.

Des simulations numériques ont été développées pour calculer le chauffage dans une boucle coronale.

Les figures représentent l'intensité d'une raie en ultraviolet émise à un million de degrés, la vitesse verticale (de l'ordre de 30 000 km/h ; rouge vers le bas, bleu vers le haut), et la température (jusqu'à 1,2 million de degrés vers le sommet de la boucle).



LES TROUS CORONAUX DU SOLEIL révélés par la sonde SOHO

Le Soleil a des « trous » (magnétiques) dans son atmosphère, notamment à ses pôles.

C'est par là que s'échappe le vent rapide du Soleil (800 km/s) composé d'éléments ionisés et d'électrons qui viennent buter sur le bouclier magnétique de la Terre.

Seule l'observation, depuis l'espace, dans l'ultra-violet permet de détecter le gaz très chaud de ces trous.

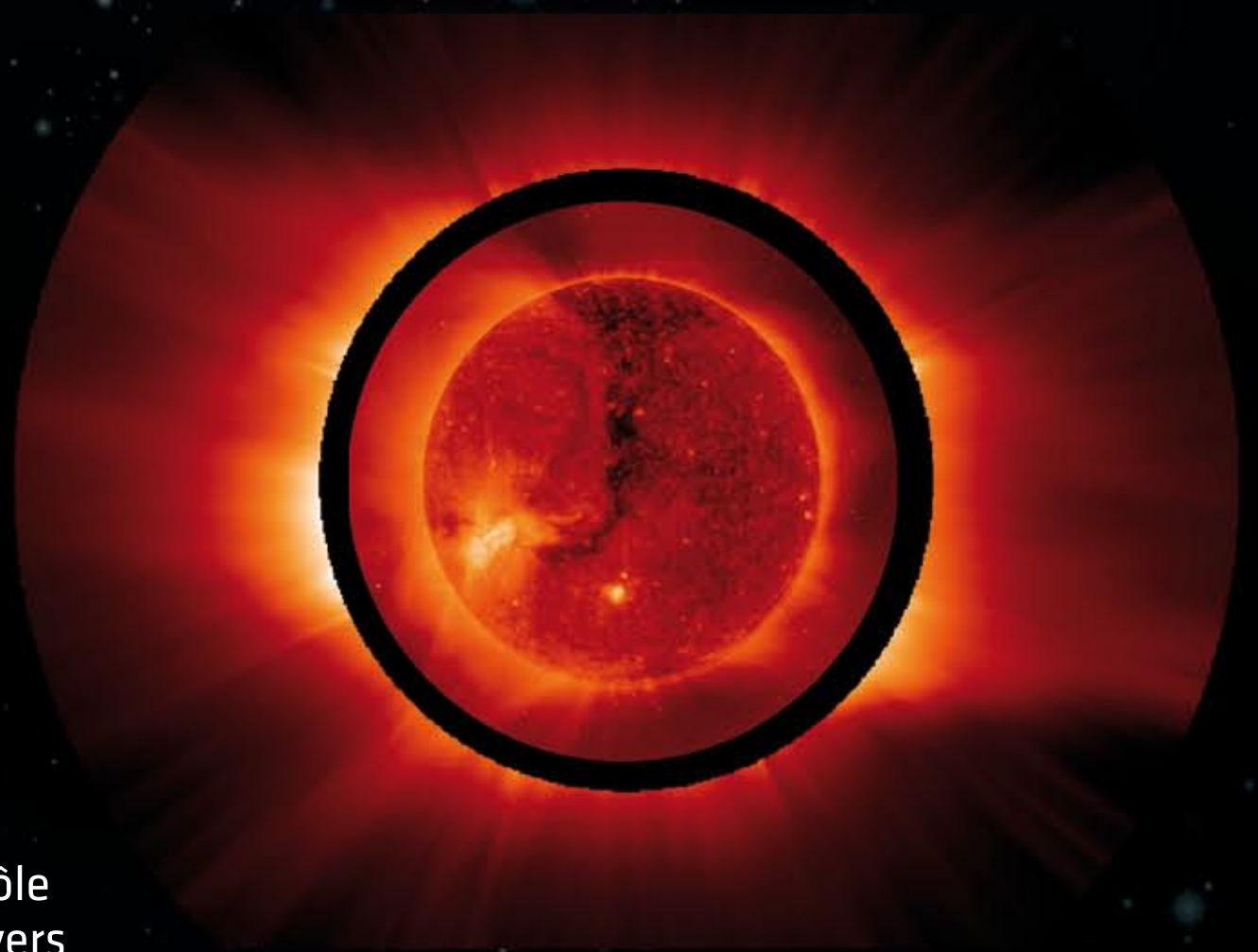
LA COURONNE SOLAIRE EN MAJESTÉ

Atmosphère externe du Soleil vue dans la lumière ultra-violette émise par du fer électriquement chargé (image centrale) et de l'oxygène lui aussi chargé (image périphérique).

L'image composite a été obtenue par l'imageur EIT construit principalement à l'I.A.S. et par le coronographe américain UVCS, tous deux à bord de la sonde SOHO.

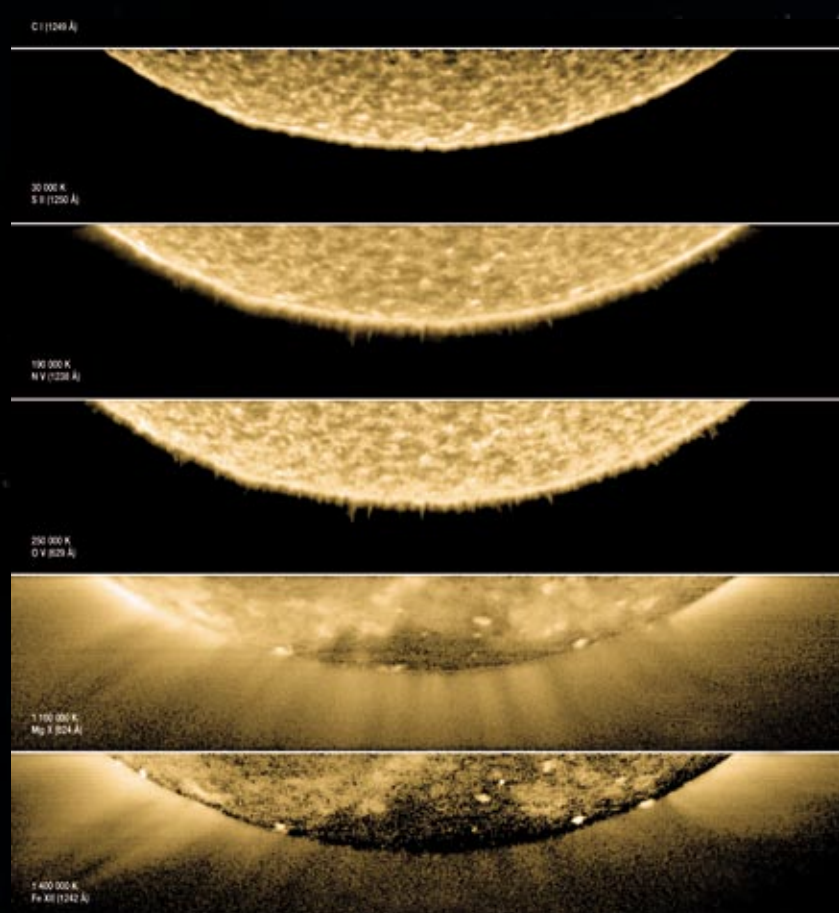
Outre les structures radiales que sont les jets coronaux, on distingue bien une région sombre au pôle Nord, qui s'avance vers le centre du disque : un trou coronal. La température dans le trou (un million de degrés Celsius) est plus « modérée » que dans les jets (deux

millions de degrés) mais la vitesse d'écoulement (800 km/s) est deux fois plus importante.



↓ ANATOMIE D'UN TROU CORONAL AU PÔLE SUD DU SOLEIL

La série de ces 6 images du pôle Sud du Soleil a été obtenue en juillet 1996 par le spectromètre SUMER, construit en partie par l'IAS, embarqué à bord de SOHO.



Les 6 images, obtenues simultanément, visualisent le plasma [gaz chargé électriquement] émetteur à des altitudes et des températures croissantes quand on parcourt la série d'images de haut en bas.

La surface du Soleil [première image, en haut] est à 10 000 K, puis 30 000 K [deuxième], 200 000 K

[troisième], 250 000 K [quatrième].

À partir de la cinquième (1 100 000 K) et de la sixième (1 400 000 K) et dernière image en bas, on remarque une région sombre plus froide et moins fournie en matière, le « trou ». C'est par là que s'échappe le vent solaire rapide.

LE SOLEIL À DEUX ÉPOQUES DE SON CYCLE

Les deux images ont été obtenues par l'instrument EIT/SOHO, à deux ans et demi d'intervalle. L'émission provient du fer chargé électriquement, porté à plus d'un million de degrés Celsius.

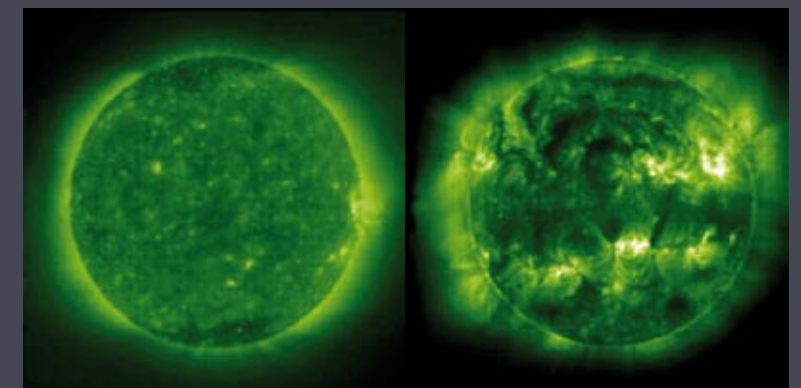
Sur l'image de gauche [minimum d'activité solaire, décembre 1996], le Soleil montre une couronne uniforme sauf à ses pôles d'où émergent les trous coronaux. On peut imaginer que le fer chargé suit les lignes de champ d'un énorme barreau aimanté orienté Nord-Sud et passant par l'intérieur du Soleil.

Sur l'image de droite [maximum d'activité solaire, juillet 1999], le Soleil montre un grand nombre de systèmes de « boucles » brillantes ; les trous

coronaux ont quasiment disparu. Le fer ionisé suit maintenant les lignes de champ d'une multitude de petits barreaux aimantés.

EIT 195A • Déc. 1996

EIT 195A • Juin 1999



LA COSMOLOGIE

naissance et évolution de l'Univers

Depuis les travaux théoriques faisant suite au développement de la Relativité Générale, on sait que l'Univers a évolué depuis le Big Bang jusqu'à nos jours (Fig. 1) et qu'il est en expansion. L'expansion ainsi que la géométrie de l'espace dépendent de la nature et des proportions des composantes de l'Univers (Fig. 2).

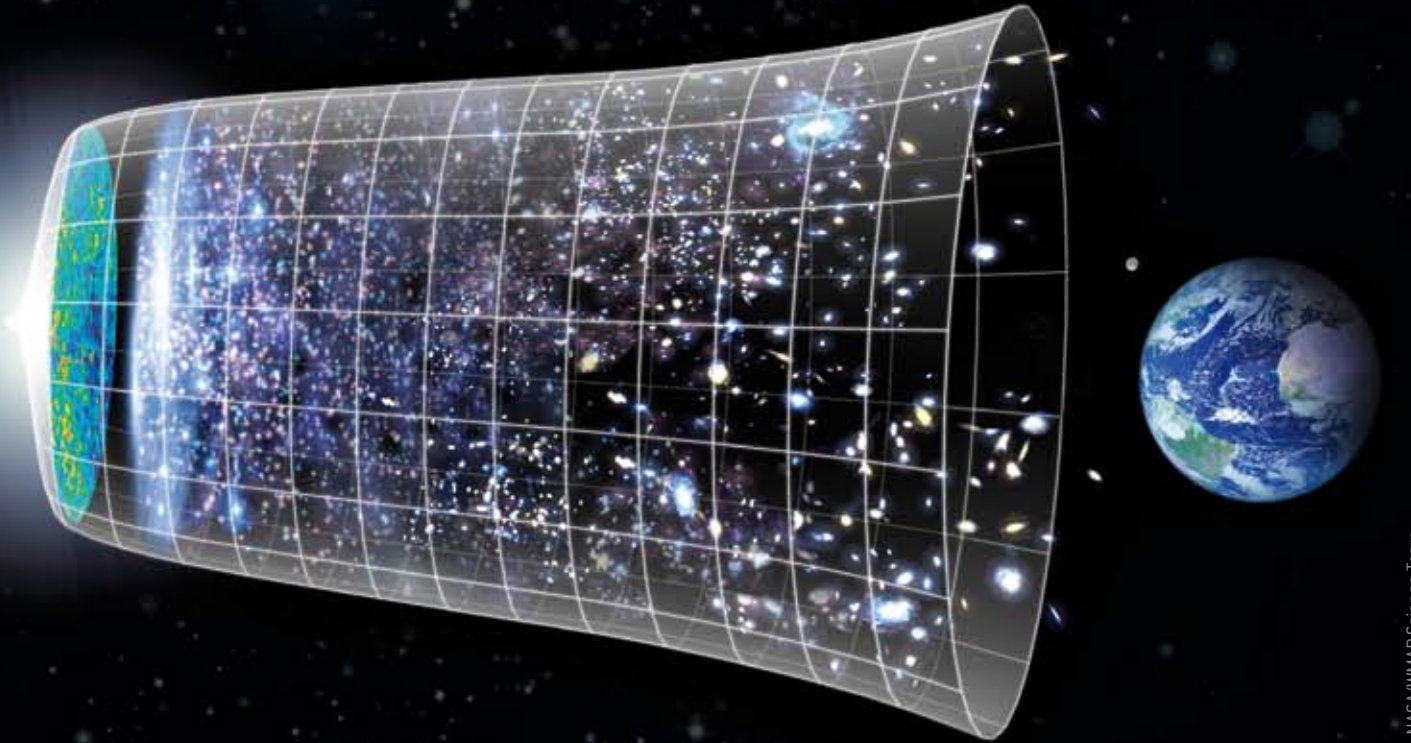


FIG. 1 REPRÉSENTATION DE L'HISTOIRE DE L'UNIVERS, depuis le Big Bang à nos jours (le temps s'écoule de gauche à droite).

NASA/WMAP Science Team

Trois époques de l'histoire de l'univers nous servent de terrain de recherche à l'IAS.

1) La recombinaison : elle marque la transition d'un univers ionisé, dense et opaque à un univers neutre, diffus et transparent. C'est le moment de l'émission du Fond Diffus Cosmologique (FDC) environ 400 000 ans après le Big Bang.

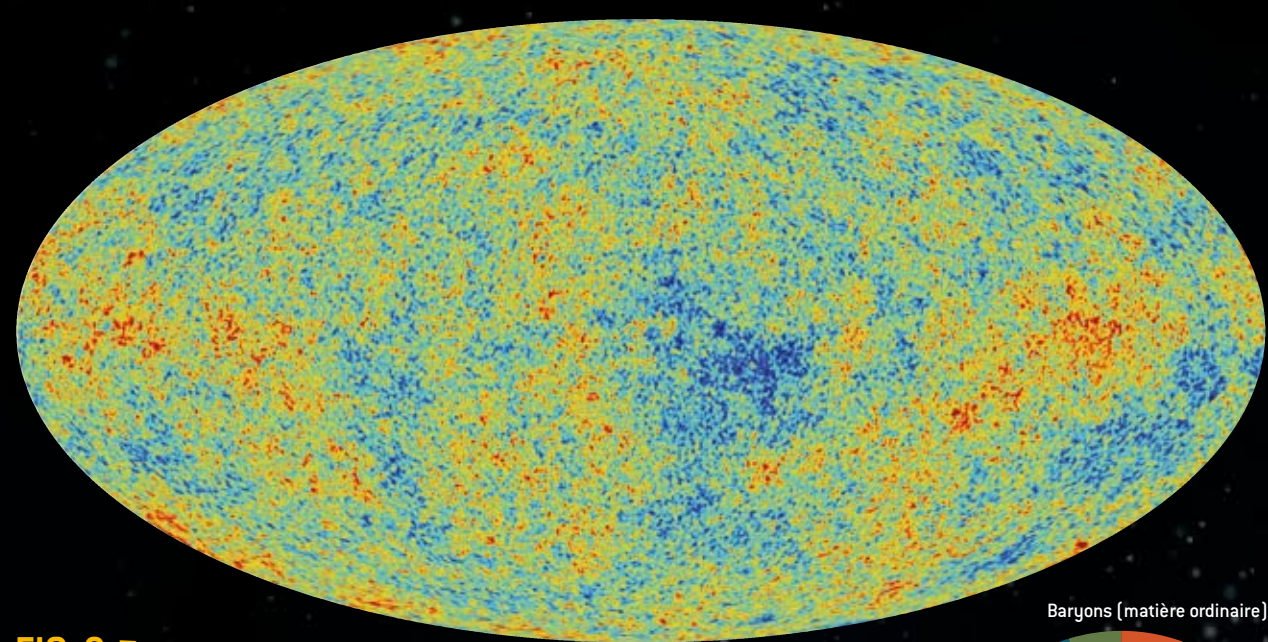
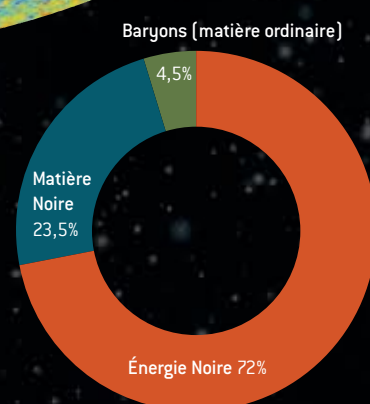


FIG. 2 → FOND DIFFUS COSMOLOGIQUE ET COMPOSITION DE L'UNIVERS →

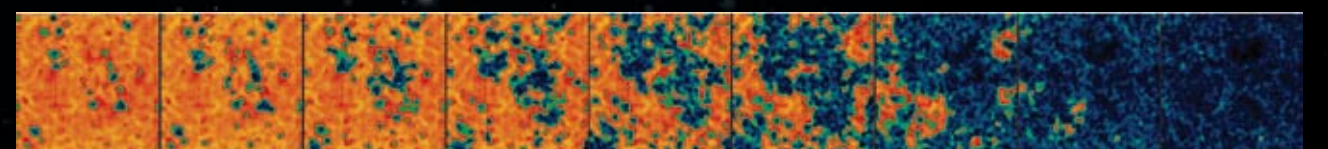
L'analyse statistique des fluctuations du FDC (ci-dessus : simulation du FDC vu par le satellite Planck) nous renseigne sur les conditions initiales et nous indique que l'univers ne contient que peu de matière ordinaire.

Pour l'essentiel, la masse qu'il contient est invisible ; c'est la Matière Noire. Enfin, une forme d'énergie inconnue, l'Énergie Noire, remplit l'univers et est responsable d'une récente accélération de l'expansion.



2) La réionisation : elle correspond à la formation des premières sources de lumière, étoiles et galaxies, quand l'univers est âgé de 200 millions d'années environ (Fig. 3).

3) Enfin, vers 6 milliards d'années, les structures les plus massives sont formées et assemblées en une véritable toile cosmique (Fig. 4).



↑ FIG. 3 DE GAUCHE À DROITE, SIMULATION DE L'ÉVOLUTION DE LA FRACTION DE GAZ NEUTRE AU COURS DE LA RÉIONISATION (de 200 à 700 millions d'années après le Big Bang)

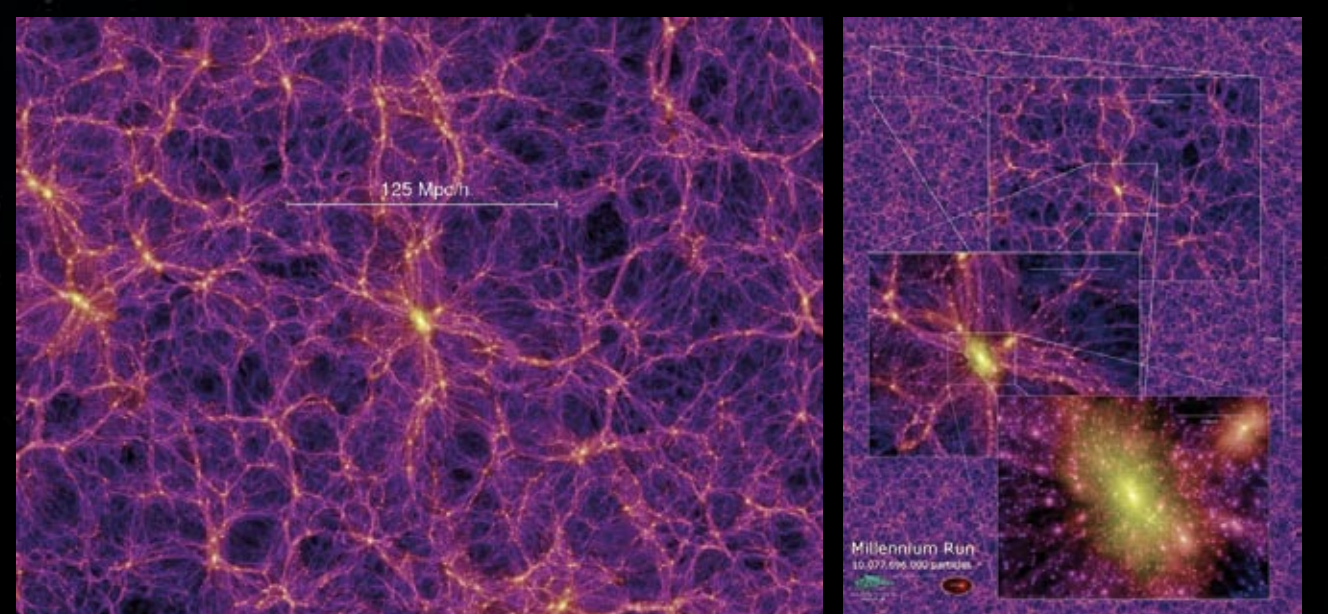
Après l'émission du FDC, l'univers est neutre (orange vif) et le reste jusqu'à l'apparition des premières étoiles. Graduellement, le gaz intergalactique est alors réionisé (bleu sombre) par l'émission de ces étoiles. Nous avons montré que, simultanément, du champ magnétique est créé sur des distances cosmologiques.

Après la réionisation, les photons du FDC interagissent avec les électrons nouvellement libérés. L'analyse des traces de cette interaction, avec le satellite Planck, permet de remonter au moment et à la durée de la réionisation, ainsi qu'à la nature des sources (étoiles, galaxies) et à leur distribution dans l'espace.

FIG. 4 → TOILE COSMIQUE : SIMULATION DE LA STRUCTURE DE LA MATIÈRE NOIRE DANS L'UNIVERS

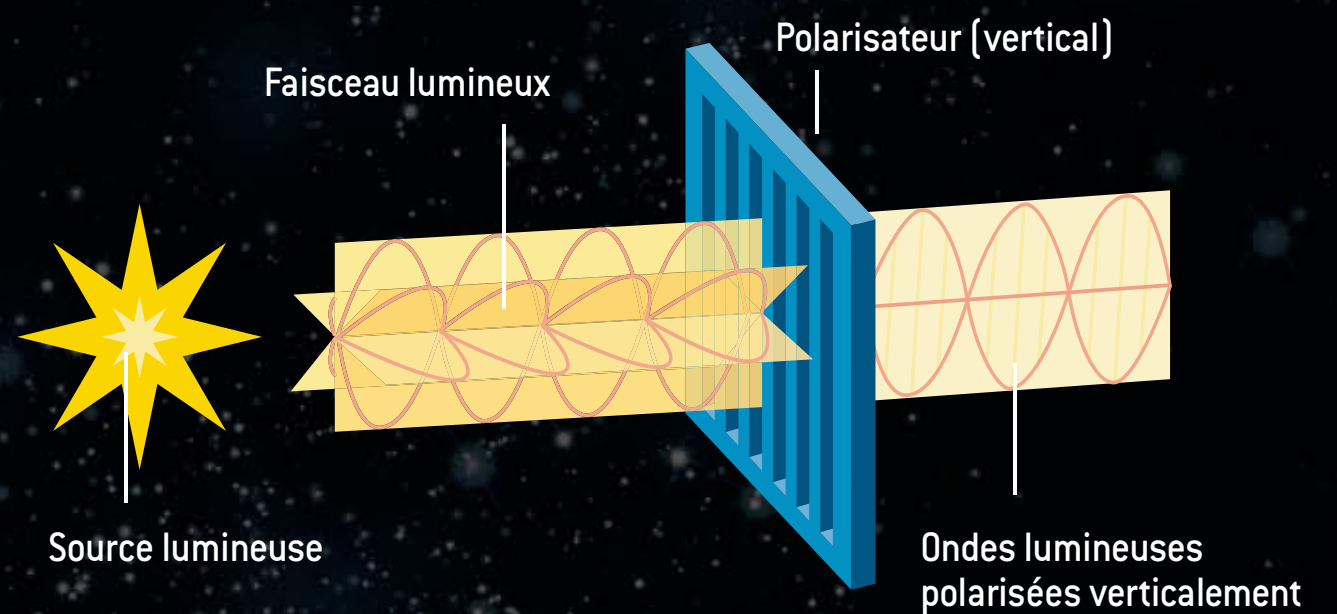
Les germes de structures dont on voit les traces dans le FDC croissent sous l'effet de la gravitation. Ils donnent naissance à une toile cosmique complexe de galaxies, qui se regroupent en amas le long de filaments.

Dans la hiérarchie cosmique, les amas de galaxies sont les objets les plus jeunes et les plus massifs de l'univers. Leur observation complète notre connaissance de l'univers.



LA LUMIÈRE POLARISÉE du ciel

L'émission du ciel est polarisée. Son étude apporte des informations inédites sur le milieu qui produit cette lumière, dans la Galaxie ou dans l'Univers jeune. Le satellite Planck observera la lumière polarisée de tout le ciel dans le domaine millimétrique.



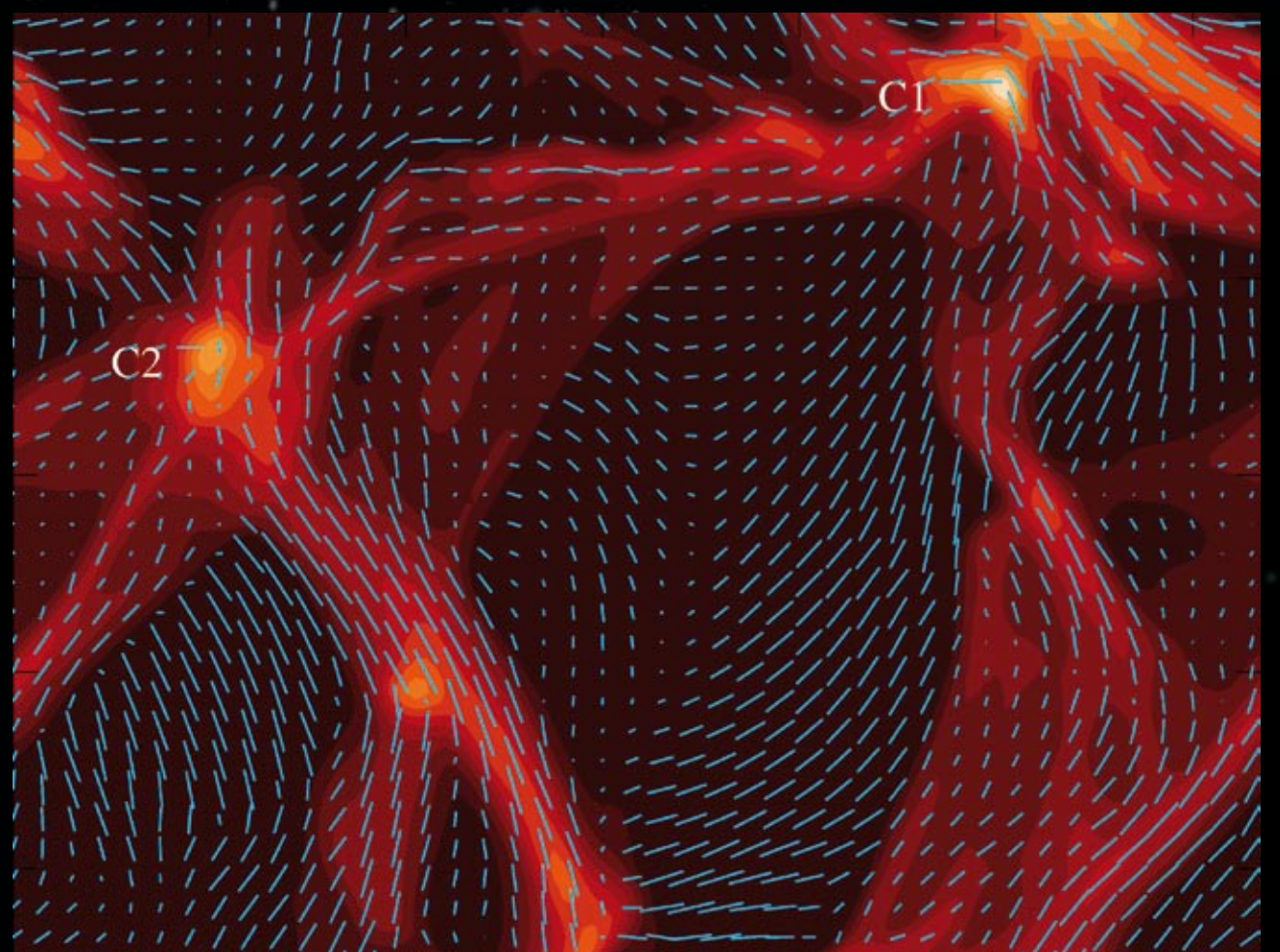
↑ LA LUMIÈRE EST UNE ONDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

et son intensité est proportionnelle au vecteur champ électrique E . On polarise la lumière en imposant à E d'osciller dans une direction donnée (la direction de polarisation). En photographie, cela permet d'éliminer des reflets et d'augmenter le contraste du ciel par exemple.

DANS LA GALAXIE

Les grains du milieu interstellaire sont irréguliers, en forme de toupie aplatie et tournent sur eux-mêmes : ils constituent ainsi de petits aimants qui s'alignent sur le champ magnétique local.

L'observation de la direction de polarisation renseigne sur l'orientation et l'intensité du champ magnétique, informations importantes car ce dernier structure la matière et régule la formation des étoiles.



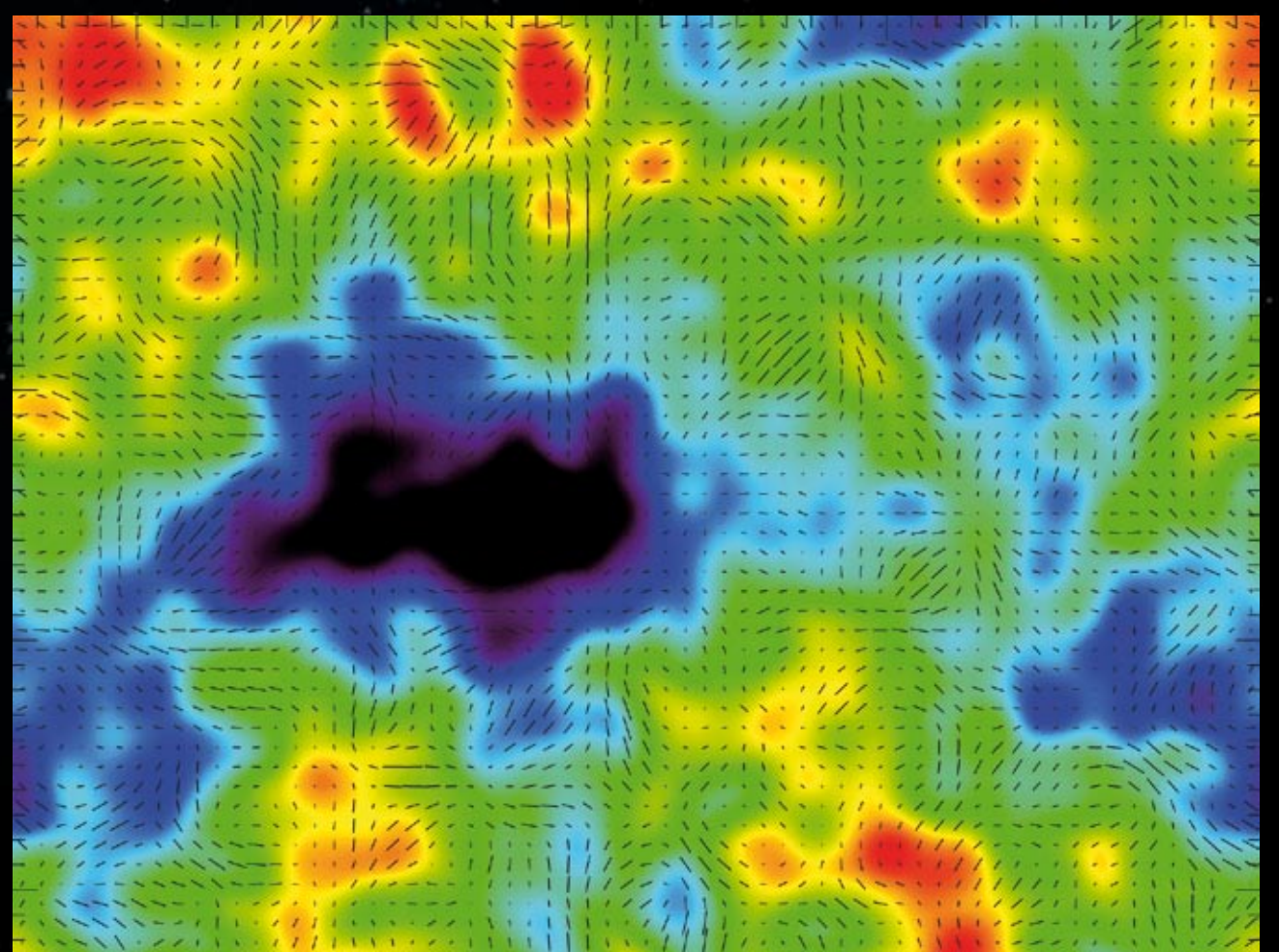
↑ DISTRIBUTION DU CHAMP MAGNÉTIQUE dans une région de formation d'étoiles

Les traits indiquent la direction du champ magnétique et leur longueur son intensité. La carte de couleur montre la densité du milieu (plus clair = plus dense).

DANS LE RAYONNEMENT DE FOND COSMIQUE

Au cours de ses premières fractions de seconde, l'univers a traversé un épisode d'expansion très rapide : l'inflation. Ce phénomène a engendré des perturbations qui, 400 000 ans plus tard, ont polarisé la lumière de l'univers.

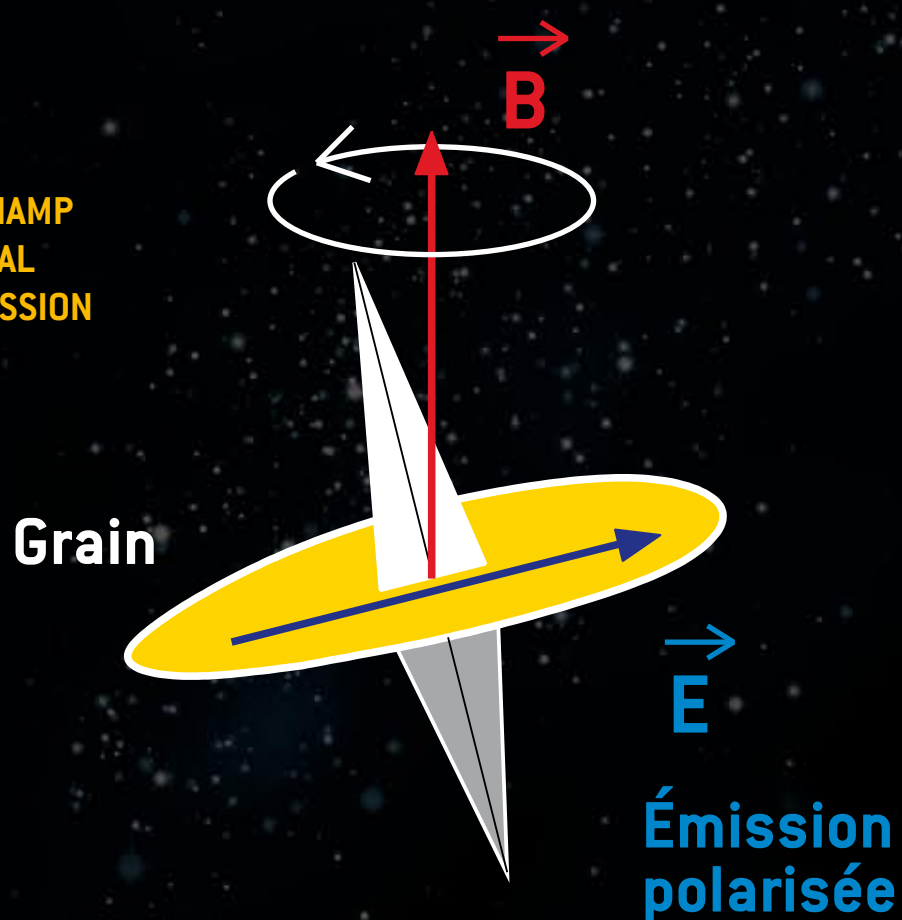
La détection de cette polarisation dans le rayonnement fossile à 3 K permettrait de contraindre l'énergie de l'inflation et les théories de grande unification des forces.



↑ SIMULATION DE LA POLARISATION D'UNE FLUCTUATION DU RAYONNEMENT FOSSILE À 3 K

Les traits indiquent la direction de polarisation et leur longueur est proportionnelle au degré de polarisation.

UN GRAIN INTERSTELLAIRE ALIGNÉ SUR LE CHAMP MAGNÉTIQUE LOCAL PRODUIT UNE ÉMISSION POLARISÉE ↘



LA MATIÈRE INTERSTELLAIRE

La matière interstellaire, composée de gaz et poussières, est intimement liée au cycle de vie des étoiles.

C'est au sein des nuages moléculaires, les régions les plus denses et froides du milieu interstellaire, que naissent les étoiles par effondrement gravitationnel de la matière.

Au cours de leur vie les étoiles sculptent le milieu interstellaire : elles le chauffent avec leur rayonnement et elles le soufflent, parfois très violemment lorsqu'elles explosent en supernova.

Les étoiles retournent également une fraction de leur masse au milieu interstellaire, enrichie en éléments lourds synthétisés en leur sein et à partir desquels se forme la poussière interstellaire.



↑ IMAGE D'UNE PARTIE DE LA RÉGION DE FORMATION D'ÉTOILES W5, observée dans l'infrarouge par le satellite américain Spitzer

La lumière émise ici provient de petits grains de poussière chauffés par le rayonnement d'étoiles jeunes.

Cette image révèle l'impact dynamique des étoiles sur la structure de la matière interstellaire. Le rayonnement et le vent d'une étoile massive située hors de l'image (en haut) sculptent la matière en colonne lorsqu'ils rencontrent des zones plus denses de la matière interstellaire.

Ces observations permettent d'étudier la formation de centaines d'étoiles très jeunes, encore situées dans le nuage interstellaire dont elles sont issues.



↑ LA RÉGION DE FORMATION D'ÉTOILES NGC 604 située dans la galaxie M33 à 2,7 millions d'années-lumière de la nôtre

Ici plus de 200 étoiles massives chauffent et illuminent le milieu interstellaire à partir duquel elles se sont formées (observations du télescope spatial Hubble, NASA)



↑ CETTE IMAGE D'UNE PARTIE DE LA NÉBULEUSE DE L'AIGLE révèle le détail de la structure d'une colonne de poussières et de gaz dense et froid,

un lieu probable de formation de nouvelles étoiles.

Notez que les étoiles blanches et brillantes sont en avant du nuage par rapport au télescope.

Certaines étoiles moins brillantes et rouges sont à l'intérieur du nuage, près de la bordure. Dans le nuage, les étoiles deviennent invisibles du fait de l'absorption de la lumière par les grains de poussière (observations du télescope Hubble, NASA).

↑ IMAGE DE LA RÉGION DU CYGNE permettant de visualiser différentes phases de la matière interstellaire

La couleur bleu-vert représente les zones plus froides constituées de gaz neutre et ayant une structure filamenteuse.

Les structures sphériques compactes représentent des zones où se forment des étoiles.

Les plus grandes coquilles rougeâtres sont des régions à plusieurs milliers de degrés, chauffées par le rayonnement des étoiles à l'intérieur ou par des supernovae (observations du satellite IRAS et du radiotélescope DRAO).



↑ NÉBULEUSE DU VOILE mettant en évidence la structure en filament du milieu interstellaire,

résultat de la dynamique complexe d'un milieu turbulent, magnétique et supersonique.

L'aspect filamentaire de la matière est révélé ici par la présence de grains de poussière de taille de l'ordre de 0,1 micromètre qui diffusent la lumière des étoiles environnantes (observations du télescope spatial Hubble, NASA).

COMPRENDRE LA FORMATION DES ÉTOILES

Le milieu interstellaire est un environnement complexe, agité par des mouvements violents, turbulents et magnétiques, baigné dans le rayonnement des étoiles et où se forment des molécules fragiles et de petits grains de poussière.

À l'aide de simulations numériques et d'observations des propriétés des atomes, des molécules et de la poussière, l'étude de la matière interstellaire consiste à comprendre les processus physiques qui guident la matière interstellaire le long de son parcours et à décrire le scénario qui permet aux étoiles de se former dans un environnement aussi perturbé.

À la recherche de la MATIÈRE NOIRE de l'Univers

Les astronomes sont parvenus à la conclusion que près de 85 % de la matière de l'Univers est constituée d'une matière invisible, de type inconnu: la matière noire.

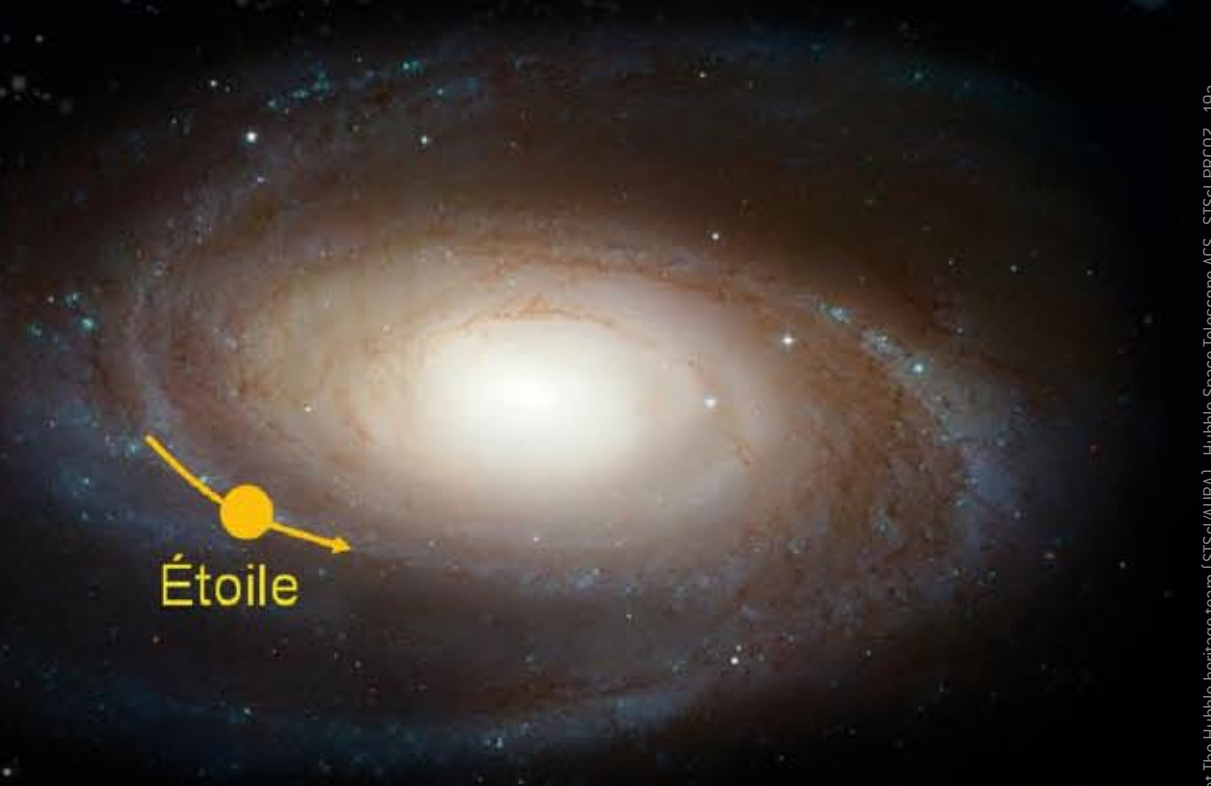
La matière noire a été indirectement mise en évidence en mesurant les vitesses des étoiles dans les galaxies spirales -dont notre Voie Lactée- mais aussi en étudiant les très grandes structures de l'univers.

Il pourrait s'agir de particules encore hypothétiques, des « neutralinos », créées dans les premiers instants de l'univers et présentes sous forme de reliques dans notre environnement.

Leur détection constitue un véritable défi technologique car leurs interactions avec la matière ordinaire sont très rares et laissent peu d'énergie : l'IAS participe à de telles expériences dans des tunnels de haute montagne, protégés des rayons cosmiques par la roche.



LE PIC TOBAZO DANS LES PYRÉNÉES au-dessus du Laboratoire Souterrain de Canfranc. Il abrite l'expérience franco-espagnole ROSEBUD sous 750 m de roches.



UNE GALAXIE SPIRALE vue par le télescope spatial Hubble

UN BOLOMÈTRE SCINTILLANT DE 91g
EN GERMANATE DE BISMUTH avec son
détecteur optique (fabrication IAS)



Les cibles utilisées sont des « bolomètres » constitués par des cristaux scintillants refroidis à très basse température (-273,13 °C) dont on suit en permanence la température. En mesurant la chaleur et la lumière émises lors de la détection d'une particule, on est capable de rejeter la majeure partie du fond mesuré, qui provient de la radioactivité naturelle.

Les mesures sont en cours, mais pour le moment les meilleures expériences n'ont révélé qu'un fond ambiant de particules déjà connues...