

# comment concevoir un observatoire spatial ?

Hervé Dole

---

Institut d'Astrophysique Spatiale, Orsay  
Université Paris-Sud 11 et CNRS  
Institut Universitaire de France  
<http://www.ias.u-psud.fr/dole>



# plan

---

1. introduction: démarche observationnelle, signal et bruit
2. conception d'un satellite: vue d'ensemble
3. définissions notre satellite ! + coût & innovation
4. toutes les étapes...pendant 15 à 20 ans
5. quelques résultats de Planck (si le temps le permet)

---

# 1. introduction: démarche observationnelle, signal et bruit

---

# une question, d'abord

---

l'astrophysique et la cosmologie  
sont-elles des sciences, et pourquoi ?

# caractéristiques de la démarche scientifique

---

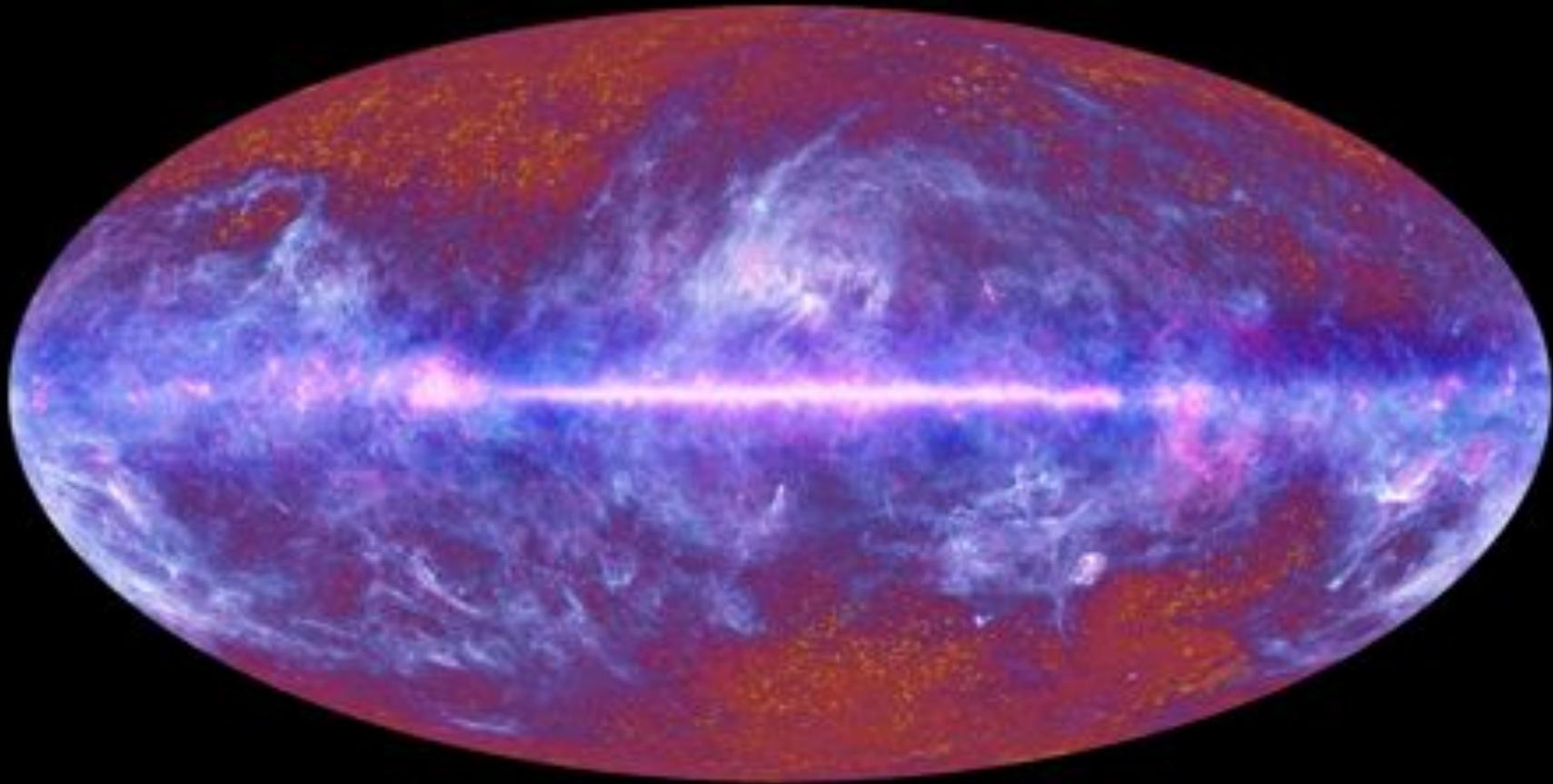
- existence de **fondements théoriques**
- **validation** par l'expérience / observation
- caractère **reproductible**
- théorie: pouvoir **prédictif**
- expérience / observations: résultats éventuellement expliqués théoriquement ensuite
- aller-retour entre expérience et théorie

# démarche observationnelle

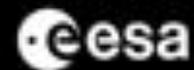
---

1. existence d'une **problématique scientifique**
  - inspirée par une prédiction théorique par exemple
2. élaboration d'une **stratégie d'observation** pour collecter l'information manquante
3. **observations**
4. **traitement des données** (éventuellement automatique)
5. **analyse scientifique** des données (dépend du but scientifique)
6. **interprétation**, modélisation
7. retour à et **lien avec la problématique** scientifique
8. mise à disposition des données et produits haut niveau (images étalonnées, catalogues, ...), documentation, publications

# exemple des données Planck



The PLANCK one-year all-sky survey

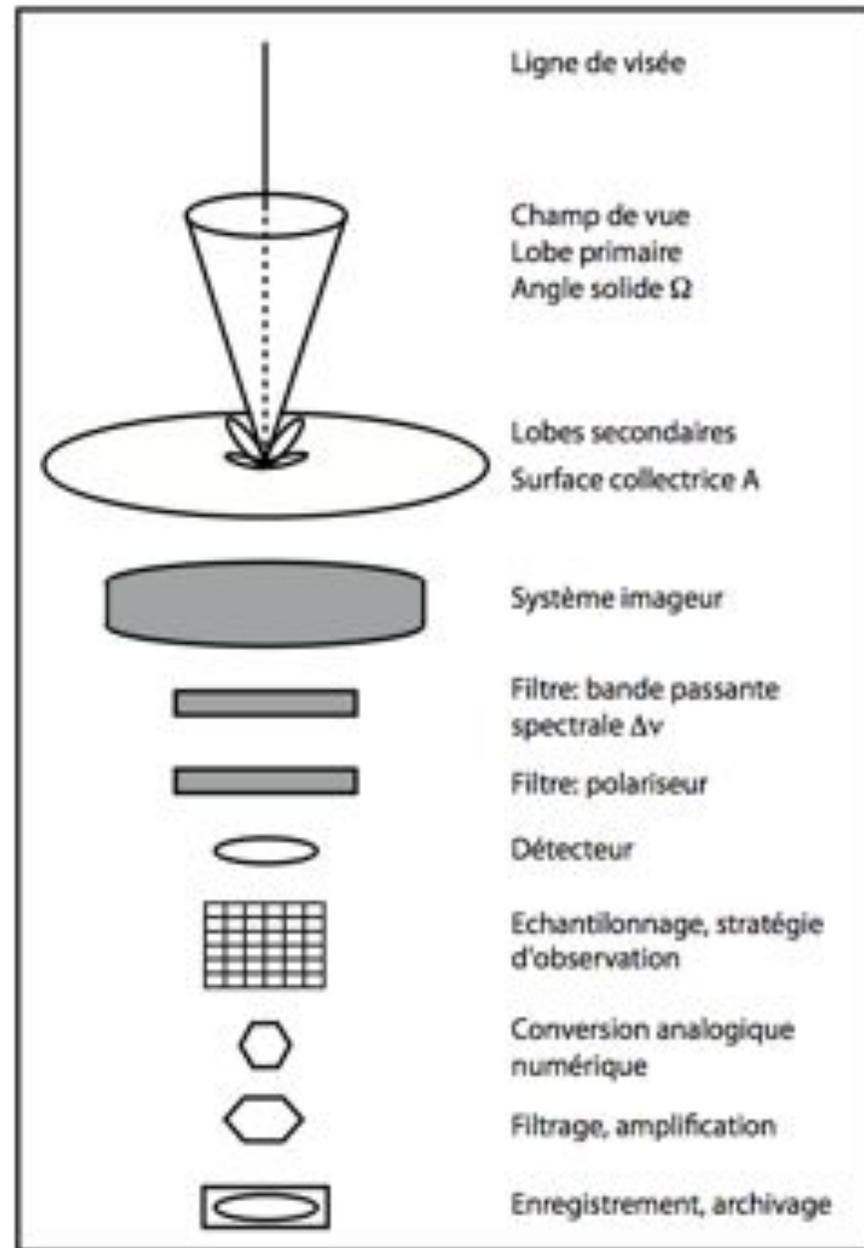


(c) ESA, HFI and LFI consortia, July 2010

# la vie d'un photon n'est pas un long fleuve tranquille

- les caractéristiques des photons que nous observons ont subi de nombreuses **altérations**
- **milieux astrophysiques** (émission / absorption, ...)
- (atmosphère: émission / absorption)
- **télescope** (diffraction, pointage, distortion, diffusion)
- **détecteur** (filtrage, réponse, bruits, biais)
- **échantillonnage** (angulaire et/ou temporel)

# télescope et détecteur



poly Dole 2009  
Léna et al, 2008

# concept de signal et de bruit

---

- signal
  
- bruit

# concept de signal et de bruit

---

- signal
  - **information recherchée** dans un **contexte** donné
- bruit
  - toute information (ou tout processus) **indésirable** dans ce **même contexte**
  - le bruit a (au moins une) une **composante aléatoire**, mais souvent aussi une ou des **composantes systématiques**
- le but d'une observation: **maximiser** le rapport **signal sur bruit**

# résumé

---

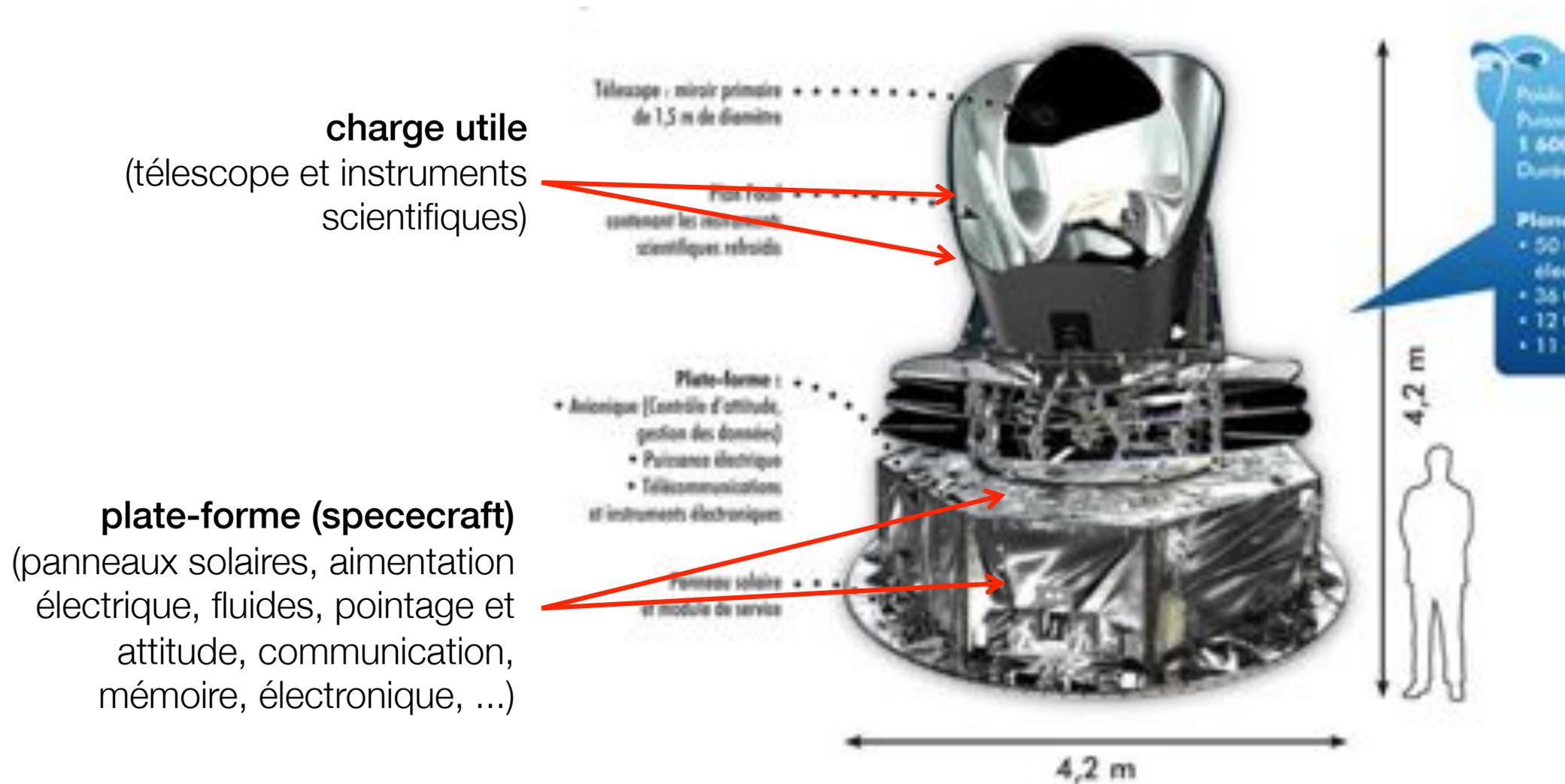
- l'observation
  - est le produit d'une **réflexion globale**, intégrant des aspects théoriques fondamentaux ainsi que des aspects d'optimisation de stratégie
- la conception d'un observatoire spatial (ou d'un nouvel instrument au sol ou d'une nouvelle expérience) est aussi le produit d'une réflexion approfondie, de tests validés, de preuves de concept, de simulations, ... et de beaucoup de ténacité !

---

## 2. conception d'un satellite: vue d'ensemble

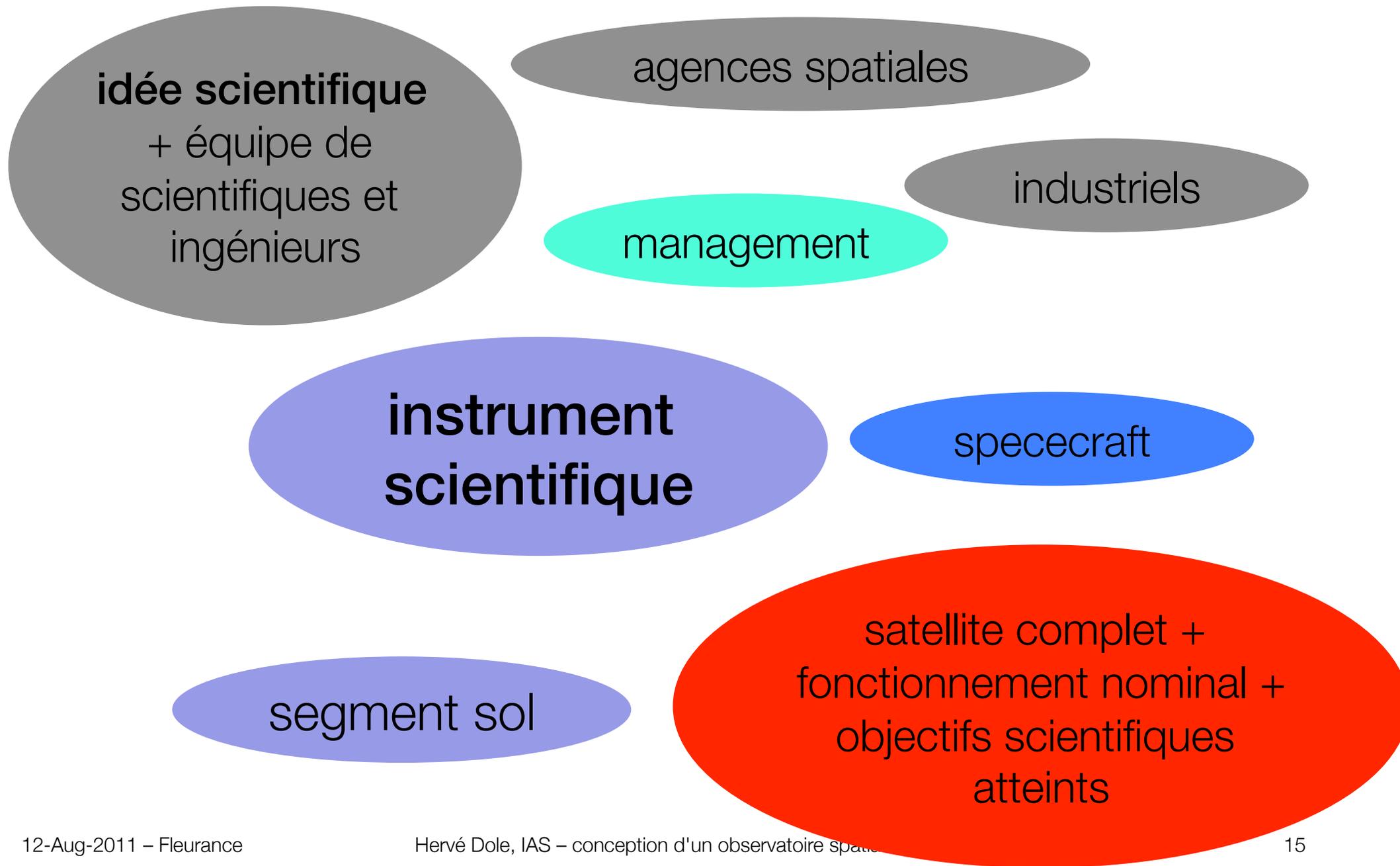
---

# un observatoire spatial



# projet de satellite scientifique

---



---

# 3. définitions notre satellite ! et aspects de coût et d'innovation technologique

---

# projet de satellite scientifique

---

**idée scientifique**

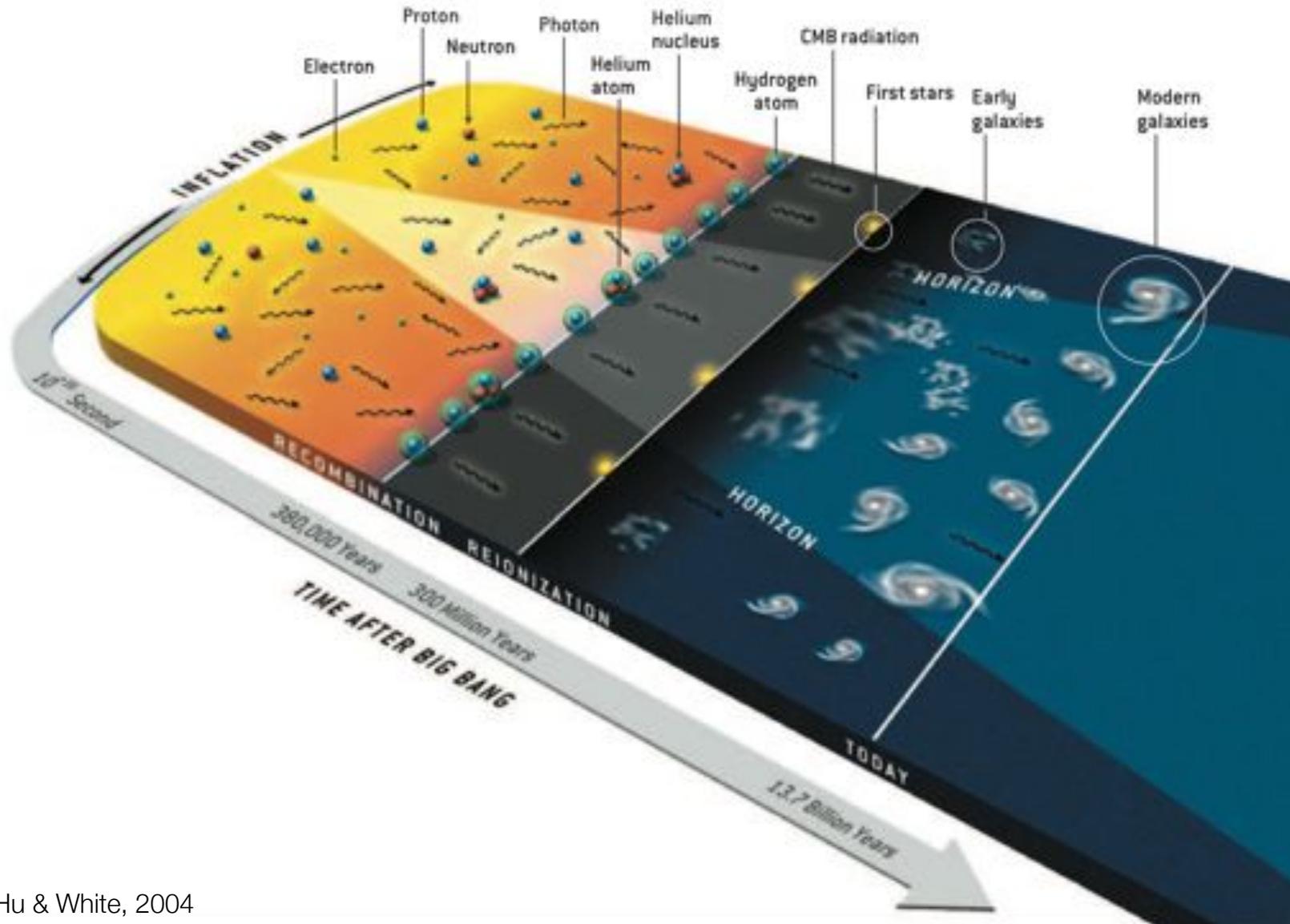
+ équipe de  
scientifiques et  
ingénieurs

# problématique scientifique

---

- identification de la problématique scientifique
- identification des **observables pertinentes** pour la résolution de cette problématique
- exemple ici du fond cosmologique et ou extragalactique

# petite histoire de l'Univers



Hu & White, 2004

# mais comment faire en pratique (1)

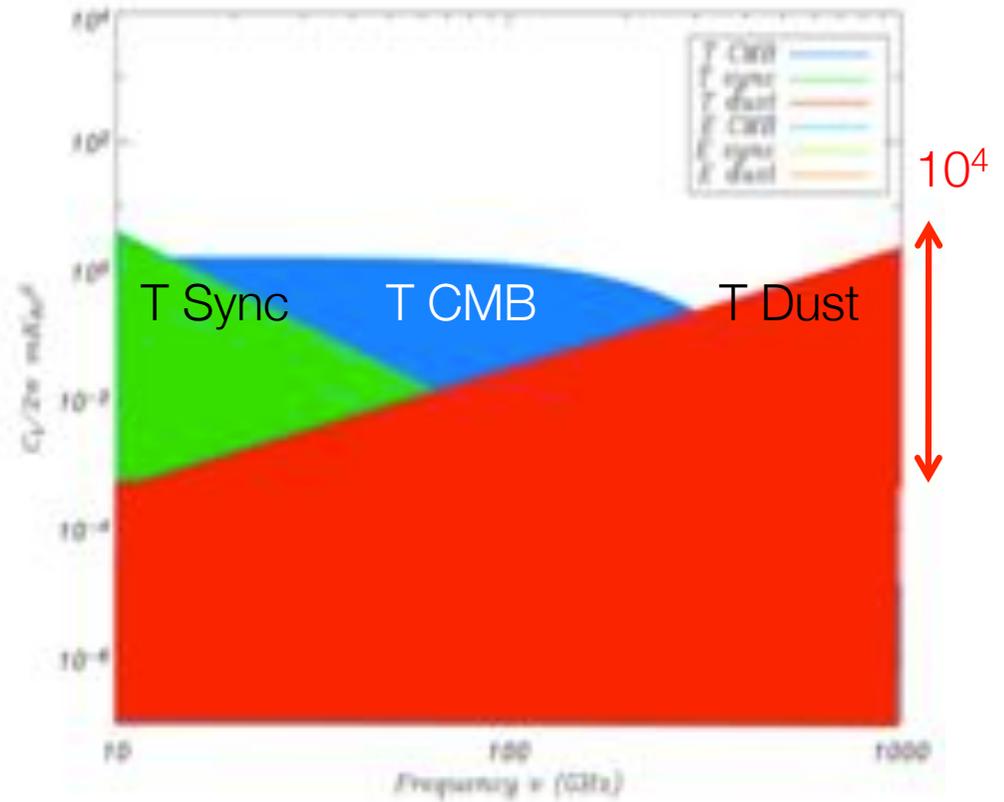
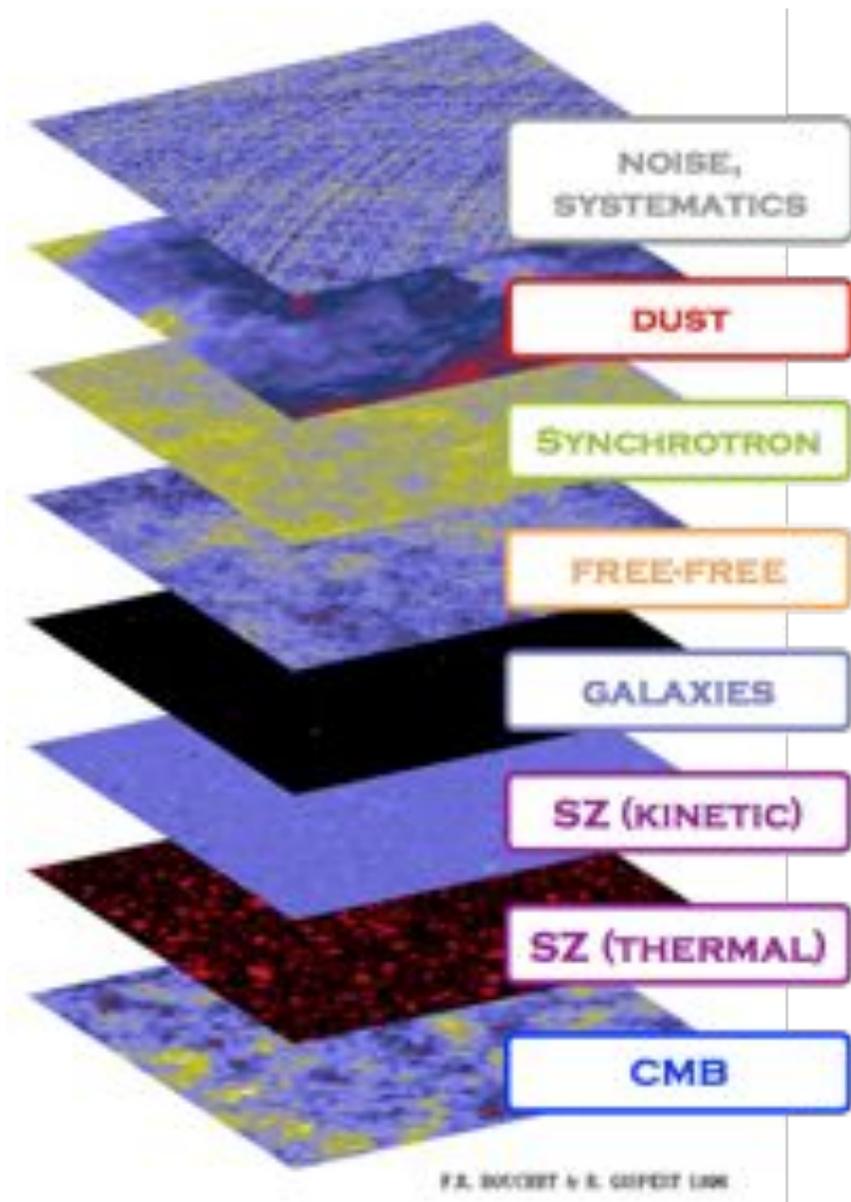
---

## idée scientifique

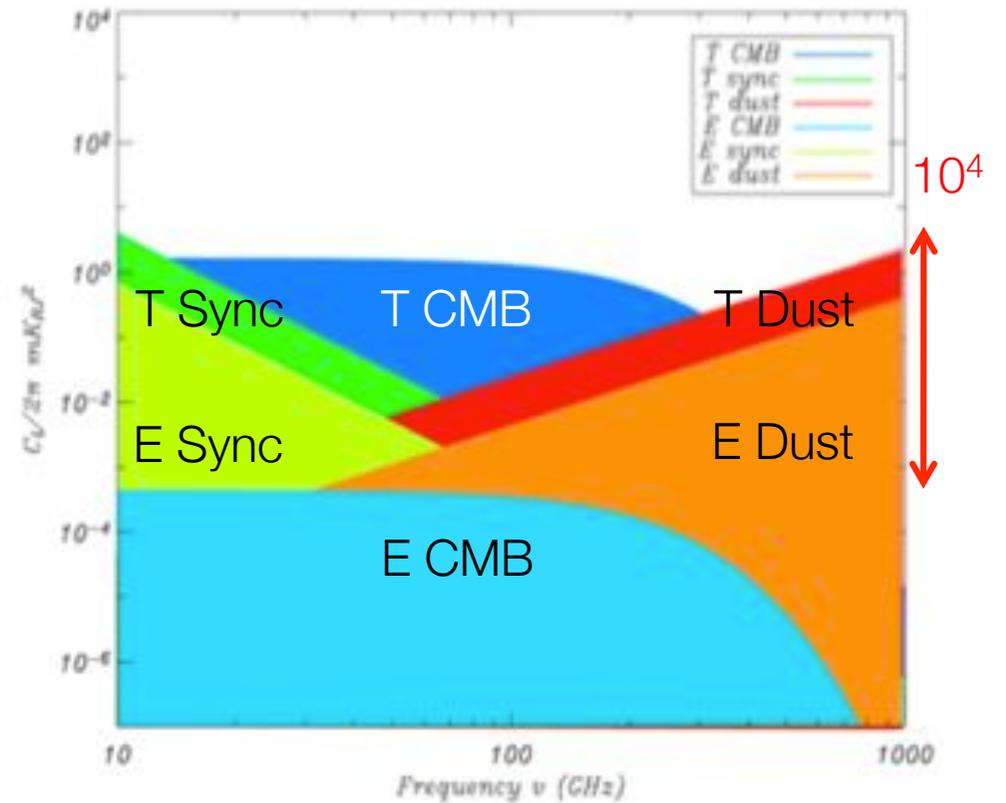
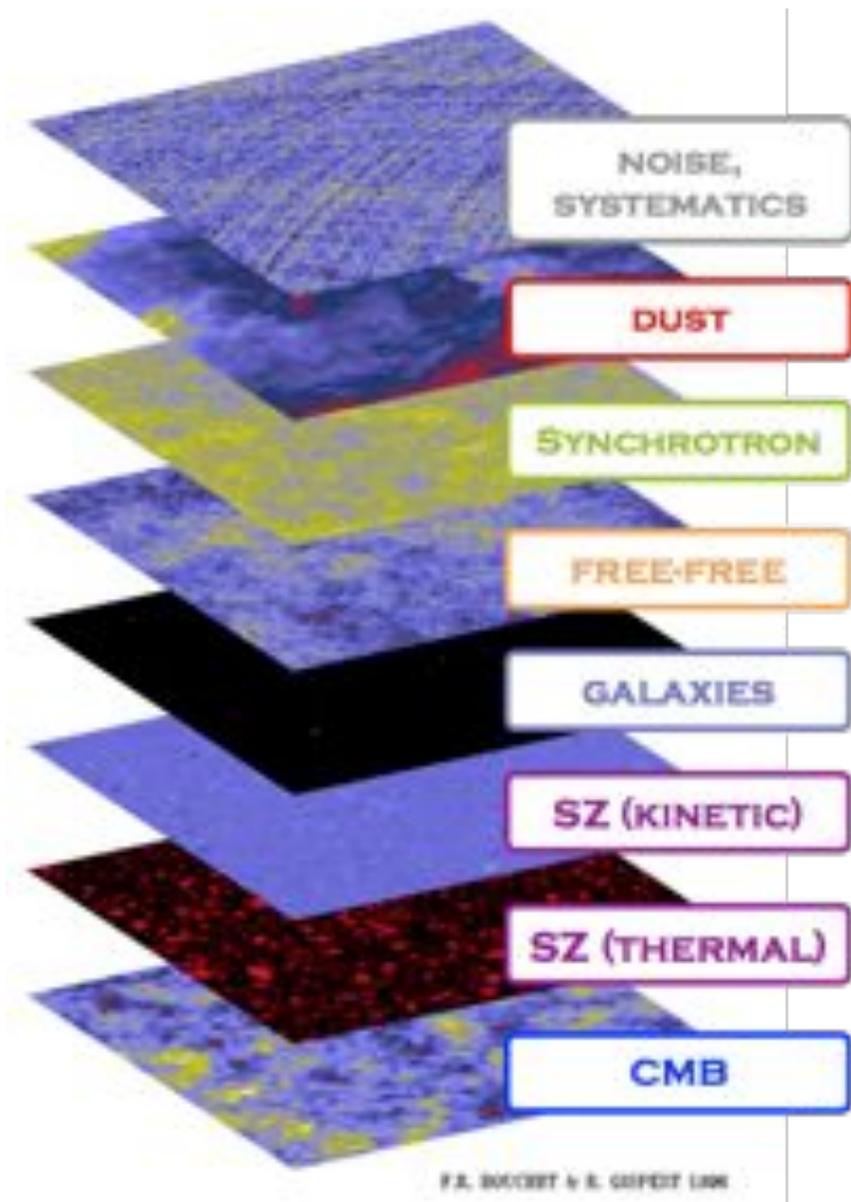
+ équipe de  
scientifiques et  
ingénieurs

- quel type de **mesure** faire exactement ?
- que faire avec les **données** ensuite ? l'a t-on déjà testé ?
- les données sont-elles **contaminées** par d'autres bruits ?
  - comment les « décontaminer »? Quel impact sur le résultat final ?
- travail très lourd et long de **simulation** et de **validation de méthodes**

# simulations: les avant-plans



# simulations: les avant-plans



# mais comment faire en pratique (2)

---

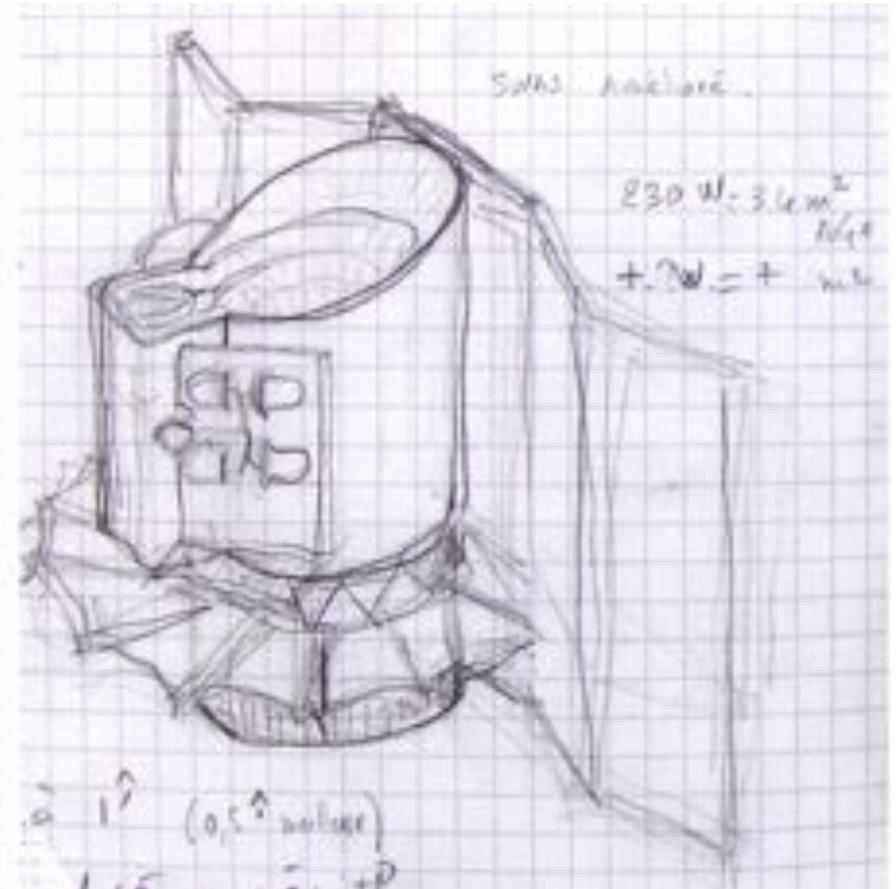
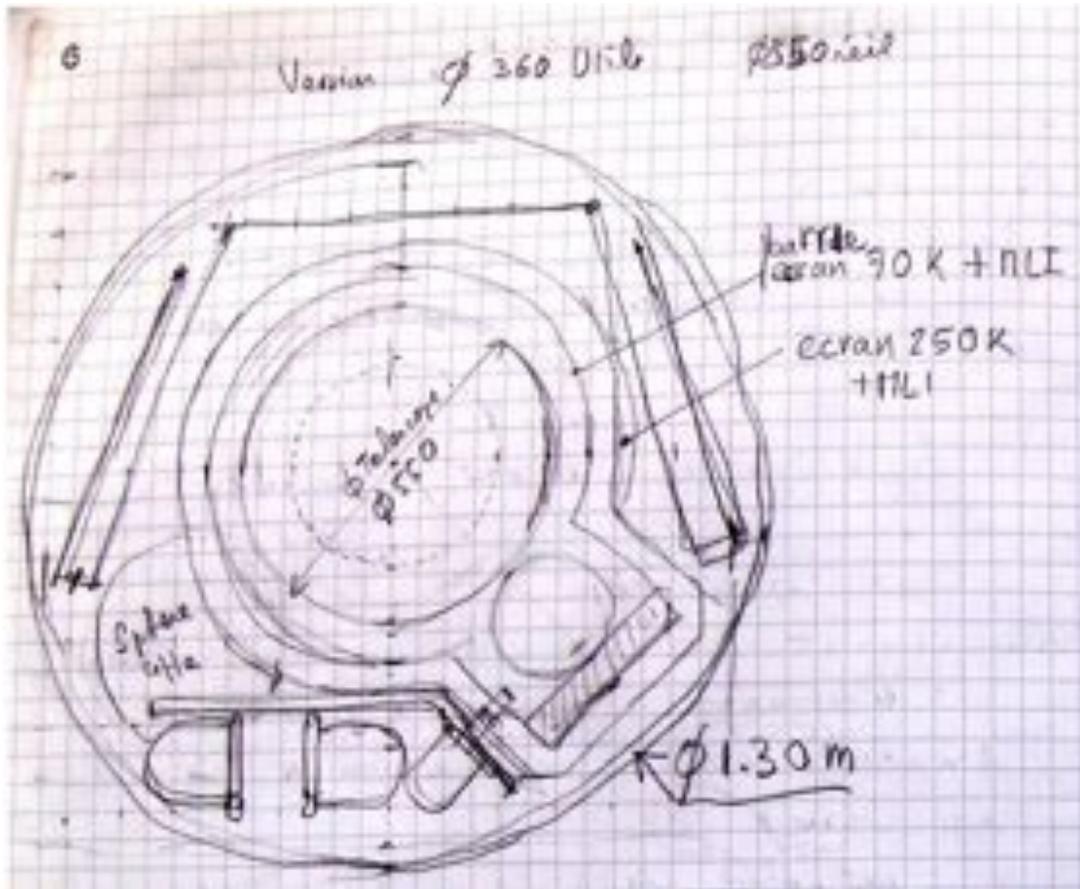
## idée scientifique

+ équipe de scientifiques et ingénieurs

- quel type de **détecteur**, quelle type de technologie ?
- quels types de **bruits** et d'effets systématiques ?
- travail très lourd et long de **développement instrumental**, de preuve de concept
- + notion de TRL + pari de développement technologique

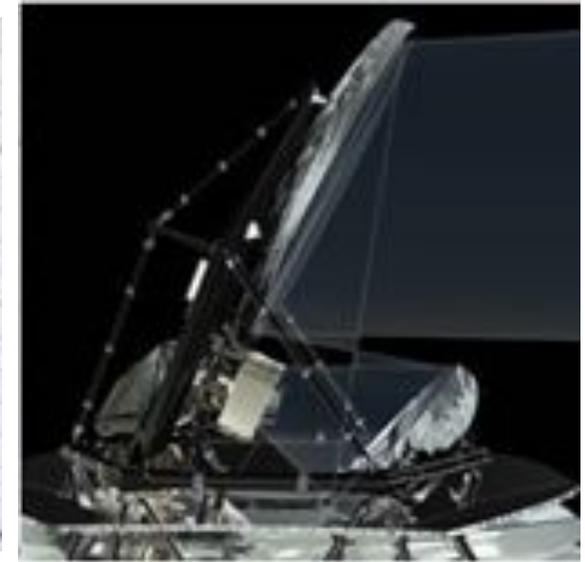
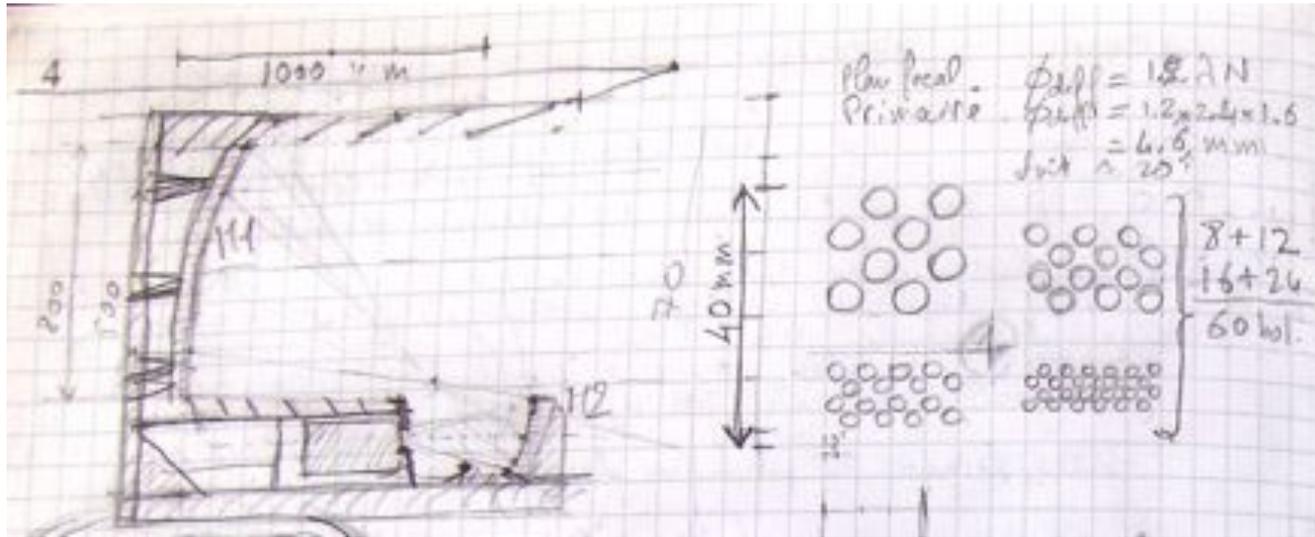
# exemples de développement instrumental

1993: premier design de Jean-Michel Lamarre

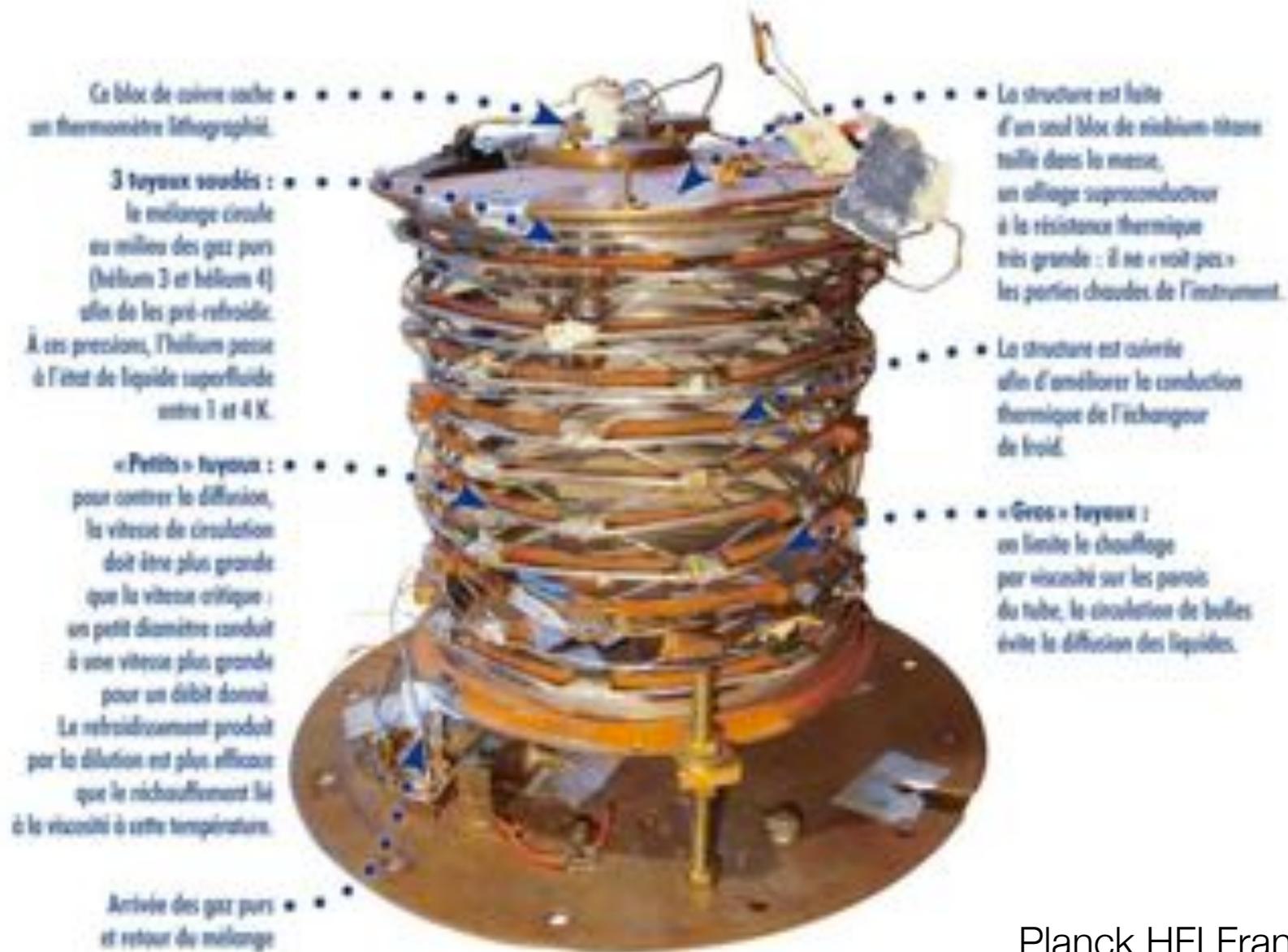


# exemples de développement instrumental

1993: design de Jean-Michel Lamarre



# exemples de développement instrumental



Planck HFI France  
<http://www.planck.fr>

# projet de satellite scientifique

---

## agences spatiales

- il faut « vendre » le projet aux agences spatiales
  - appels d'offres
    - rares (tous les 10 ans au mieux ?)
    - extrêmement compétitifs (~50 propositions pour 1 à 3 sélections)
  - intérêt scientifique majeur
  - coût maîtrisé
    - développement technologique maîtrisé
  - montrer la faisabilité du projet de bout en bout
  - nécessité du soutien de l'agence nationale (R&D etc)
  - aspects scientifiques, technologiques, industriels, politiques, voire stratégiques, industriels, économiques, géopolitiques

# est-ce cher ?

- apparemment en absolu
- non au regard:
  - de l'apport en **évolution technologique** (retour sur investissement)
  - de la demande **sociétale** et industrielle et/ou politique, économique ou **géostratégique**, sans parler de l'apport à la connaissance et à notre vision du monde
  - des autres dépenses gouvernementales

satellites Planck+  
Herschel ESA  
~15 ans  
~1.2 milliard d'Euro  
dont ~600 ME pour Planck

satellite Spitzer  
NASA  
~20 ans  
~1.3 milliards \$

4+2 télescopes VLT  
ESO  
~10 ans  
~500 millions d'Euro

comparaisons perfides:

- coût baisse TVA restauration: 2.5 milliards en 1 an
- coût bouclier fiscal 2008+2009: 1.2 milliards en 2 ans
- coût d'un rafale: 140 millions (Planck=1/2 rafale/an)

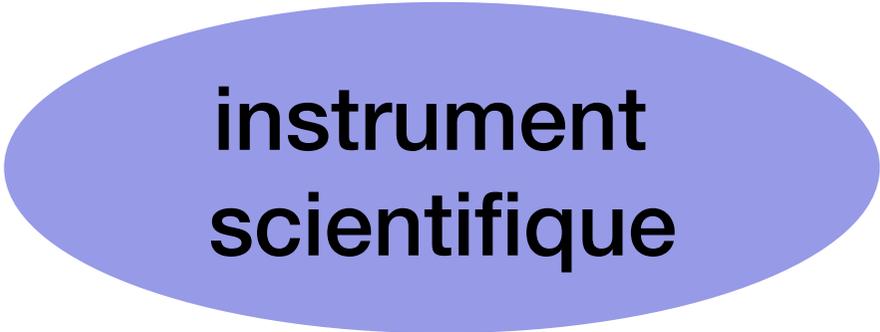
Ballon Archeops  
CNES  
~5 ans  
~5 millions d'Euro

# innovation technologique

---

# projet de satellite scientifique

---



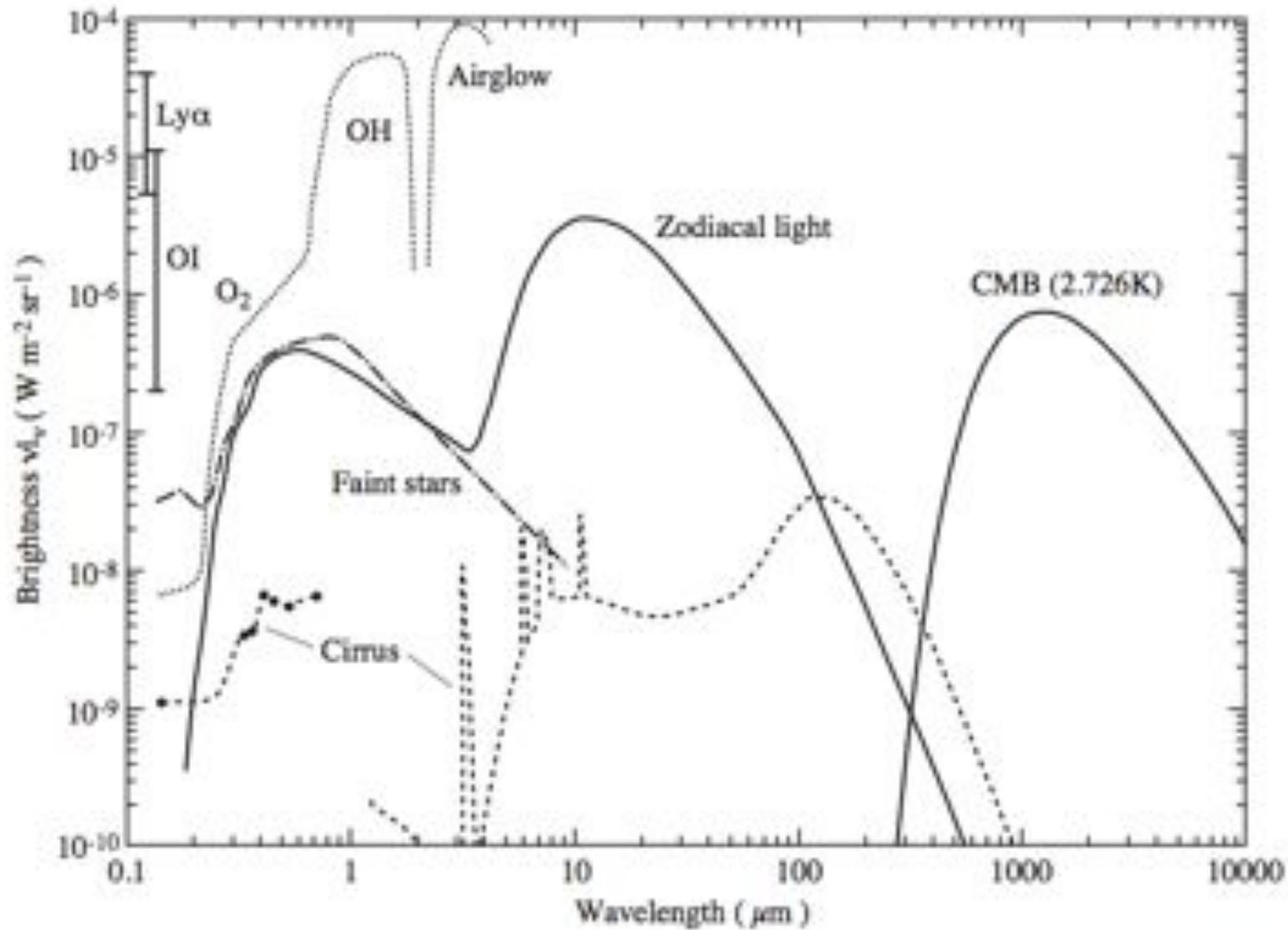
**instrument  
scientifique**

# mais il existe des problèmes

---

- détecteurs et technologie
  - sensibilité des détecteurs suffisante ?
  - technologie disponible des détecteurs ?
  - notion de TRL, i.e. niveau de maturité technologique
- émissions astrophysiques gênantes ?
  - émission zodiacale
  - émission de notre Galaxie
  - émission des galaxies et des amas
  - émission du CMB
    - exercice: calculer la longueur d'onde correspondant au maximum d'émission de ces composantes astrophysiques (sauf amas), dans l'hypothèse du corps noir

# les émissions du ciel (pas noir)



---

4. toutes les étapes...  
pendant 15 à 20 ans !

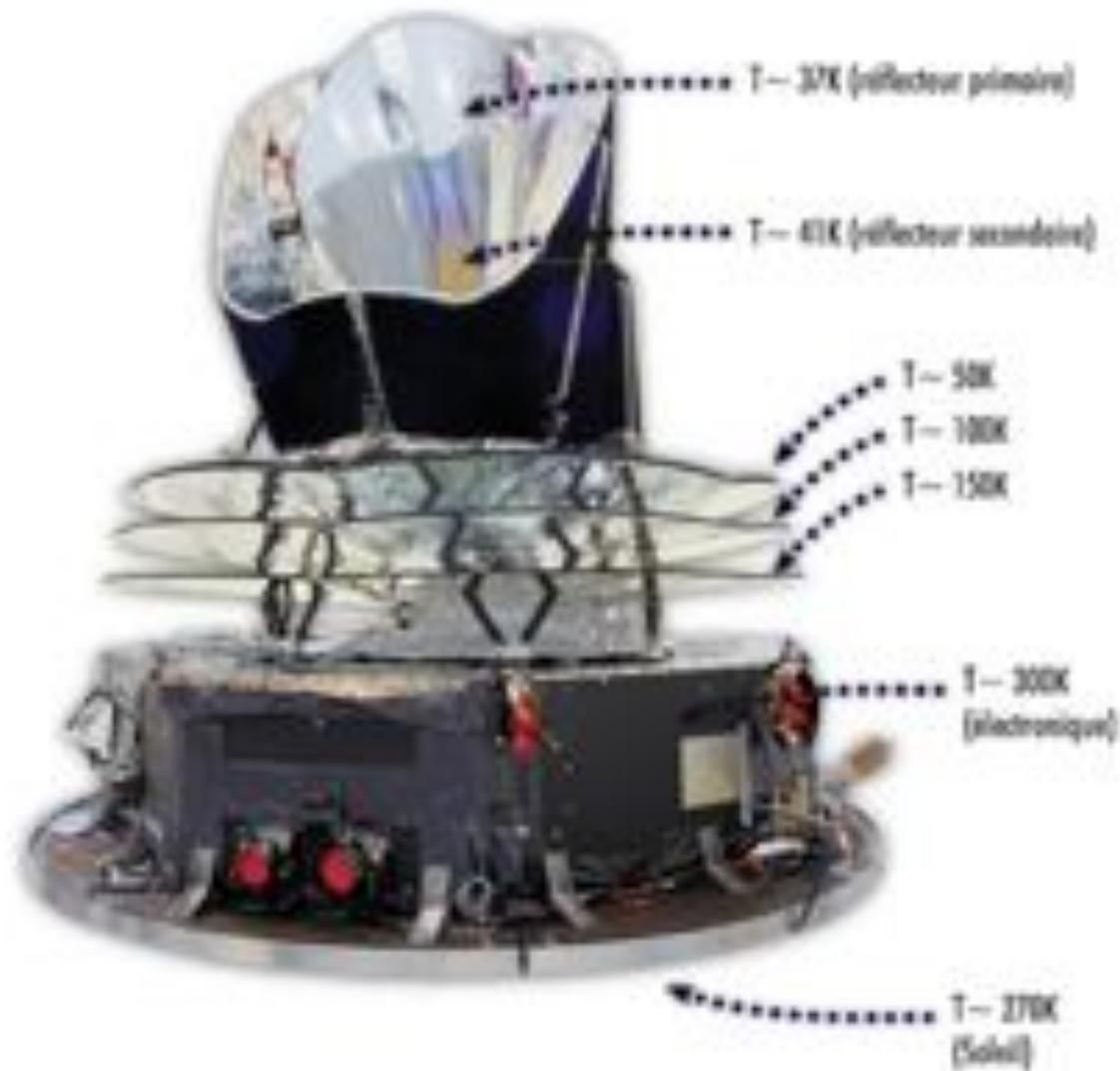
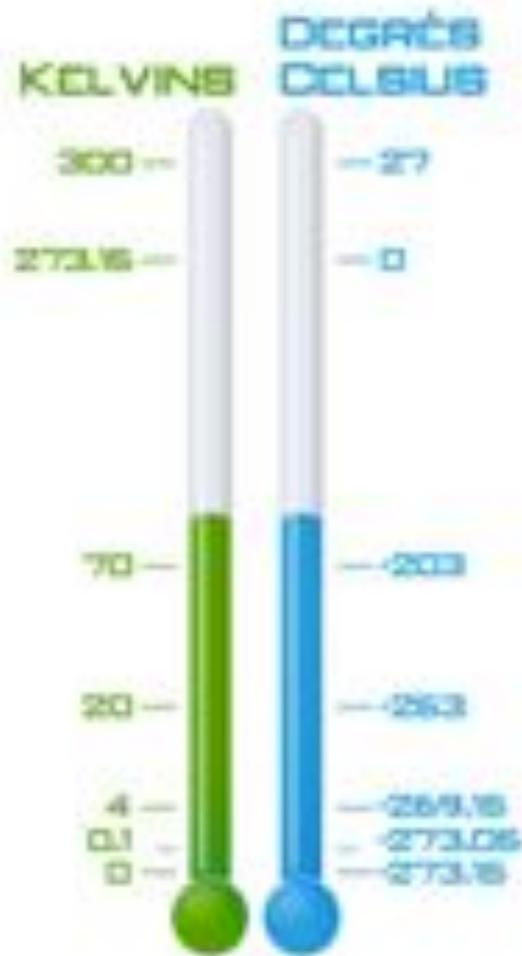
---

# projet de satellite scientifique

---

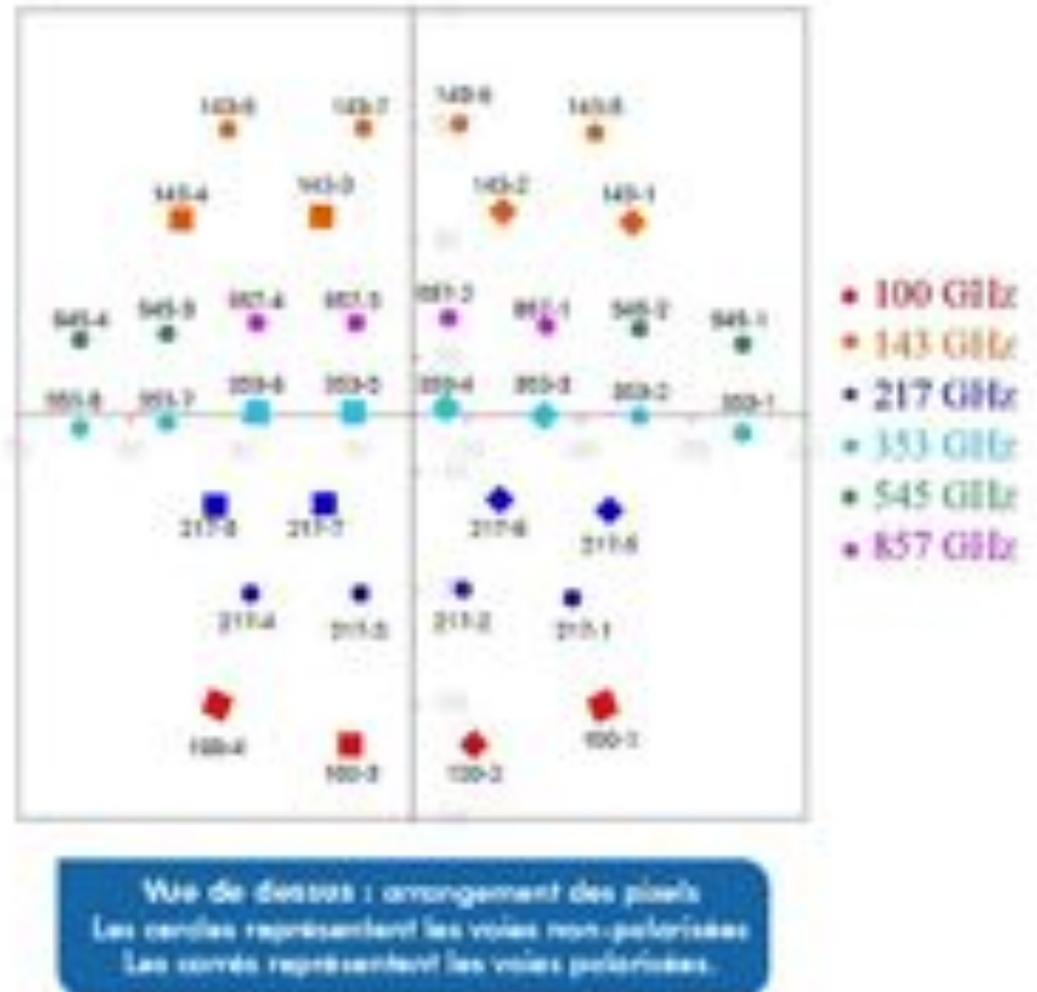
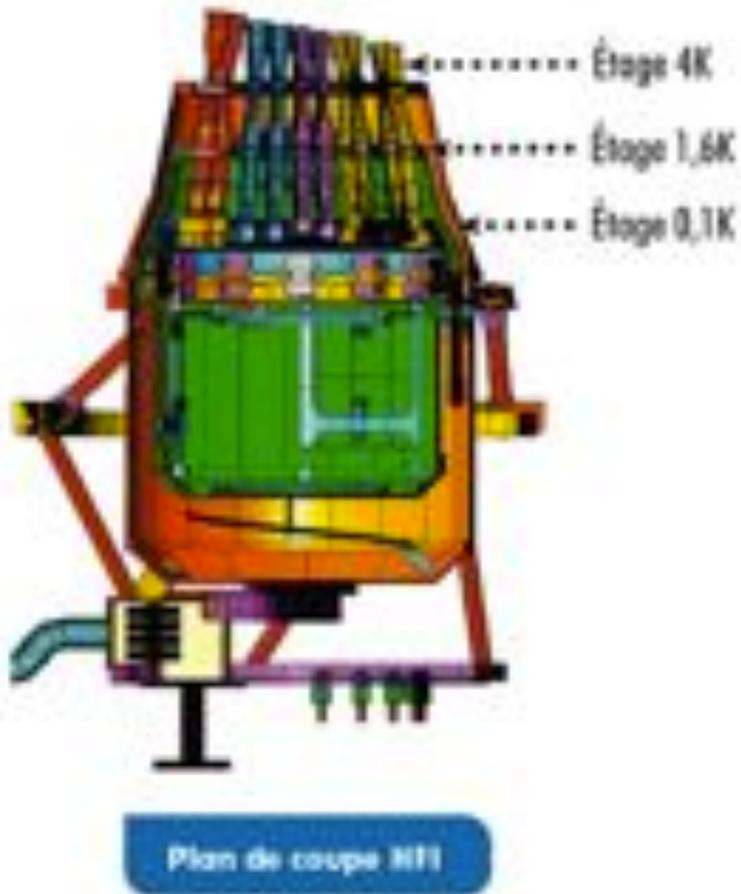
**instrument  
scientifique**

# architecture thermique



Planck HFI France  
<http://www.planck.fr>

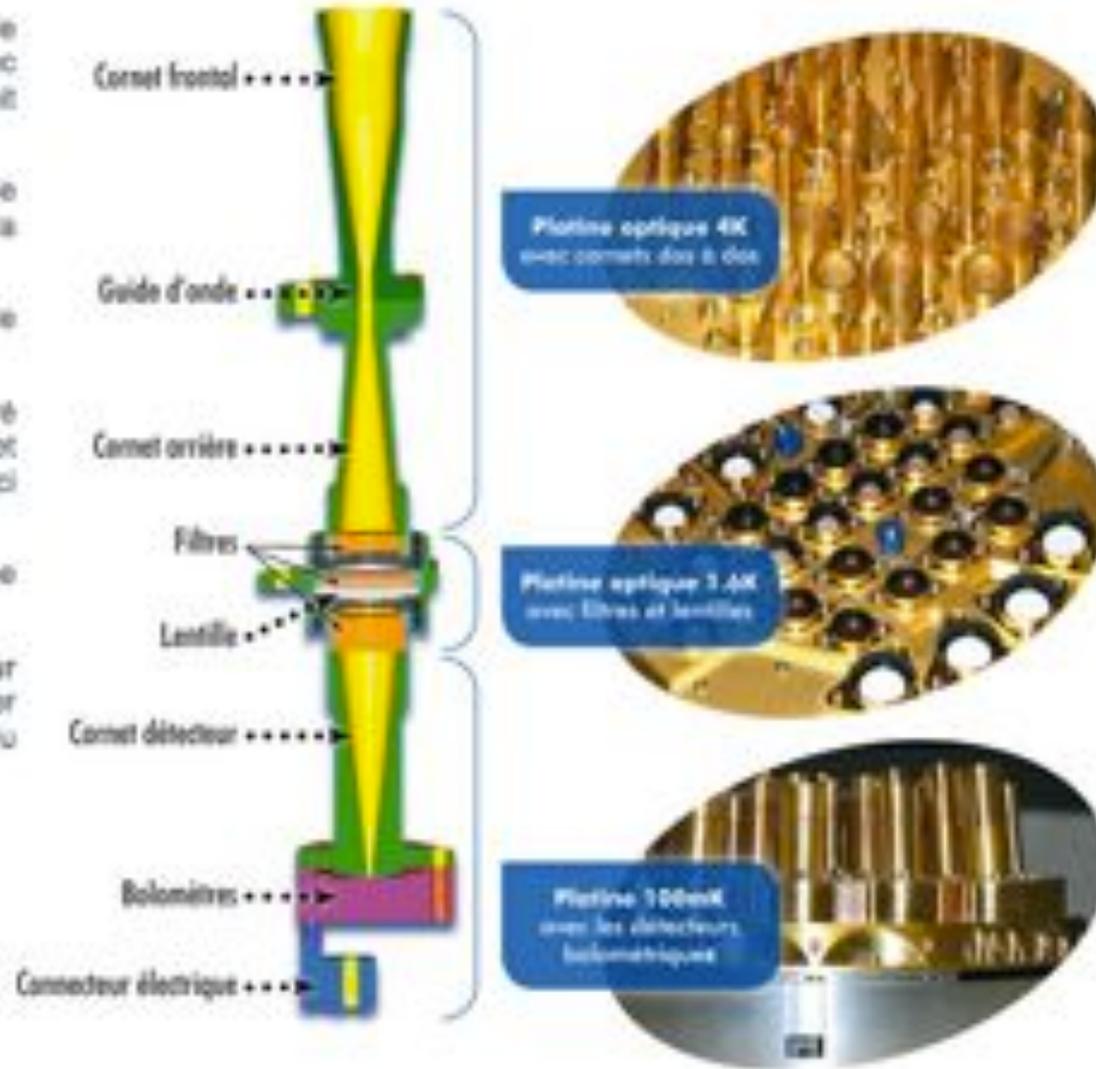
# dans Planck HFI



Planck HFI France  
<http://www.planck.fr>

# dans Planck HFI

- ★ Le premier cornet (frontal) couple le rayonnement provenant du ciel avec l'optique froide via le télescope. Il définit la forme du faisceau.
- ★ La combinaison entre le guide d'onde et les fibres interférentielles définit la bande spectrale d'observation.
- ★ Le guide d'onde définit aussi le nombre de modes qui se propagent.
- ★ Le découplage thermique est assuré par la séparation entre le 2ème cornet (arrière) et le cornet détecteur. C'est ici que sont placés les filtres.
- ★ La lentille assure un bon couplage optique entre les deux cornets.
- ★ Le guide d'onde du cornet détecteur est optimisé afin de coupler efficacement le signal à l'absorbeur du bolomètre.



Planck HFI France  
<http://www.planck.fr>

# le refroidissement de Planck

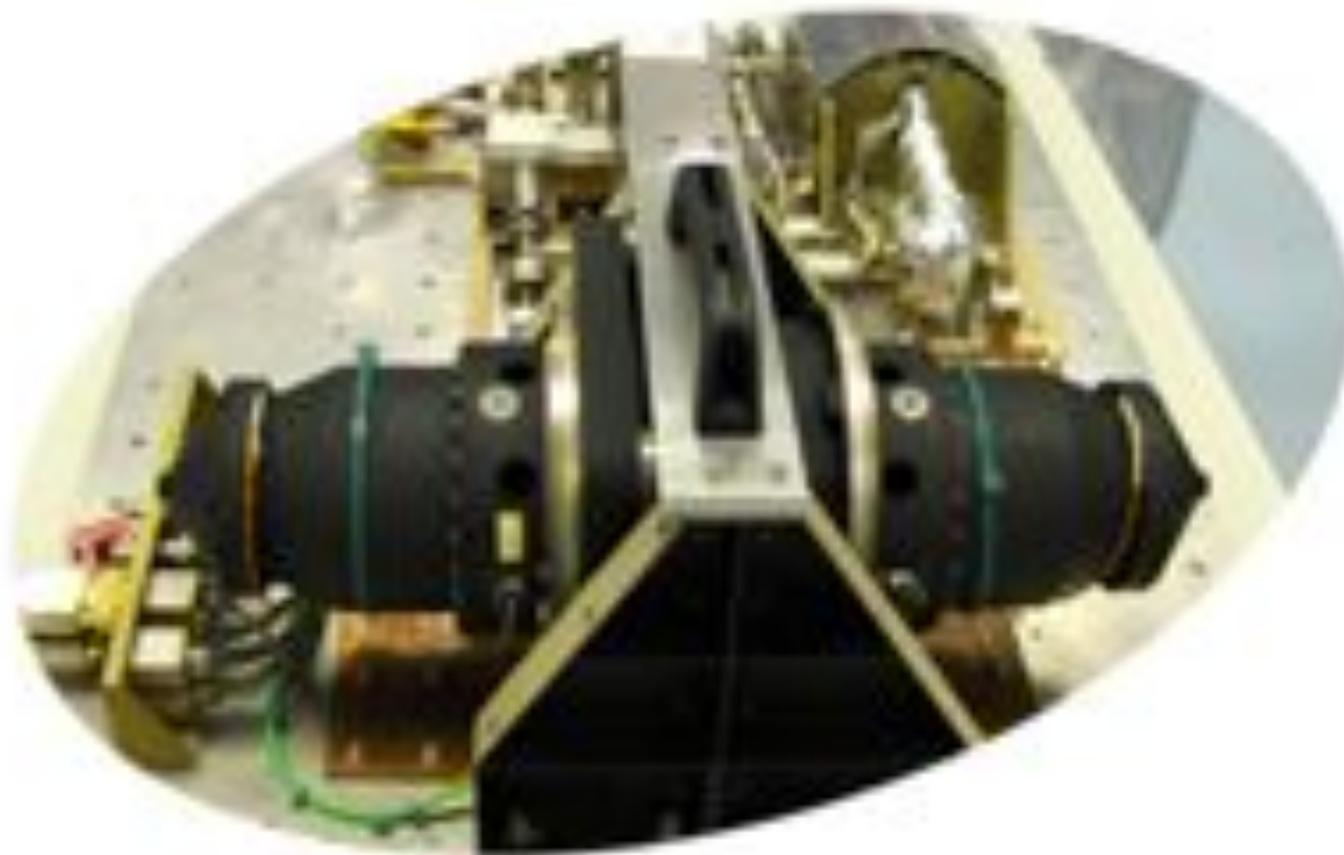
---



20K

# le refroidissement de Planck

---



4K

# le refroidissement de Planck

---



0.1K

# projet de satellite scientifique

---



industriels

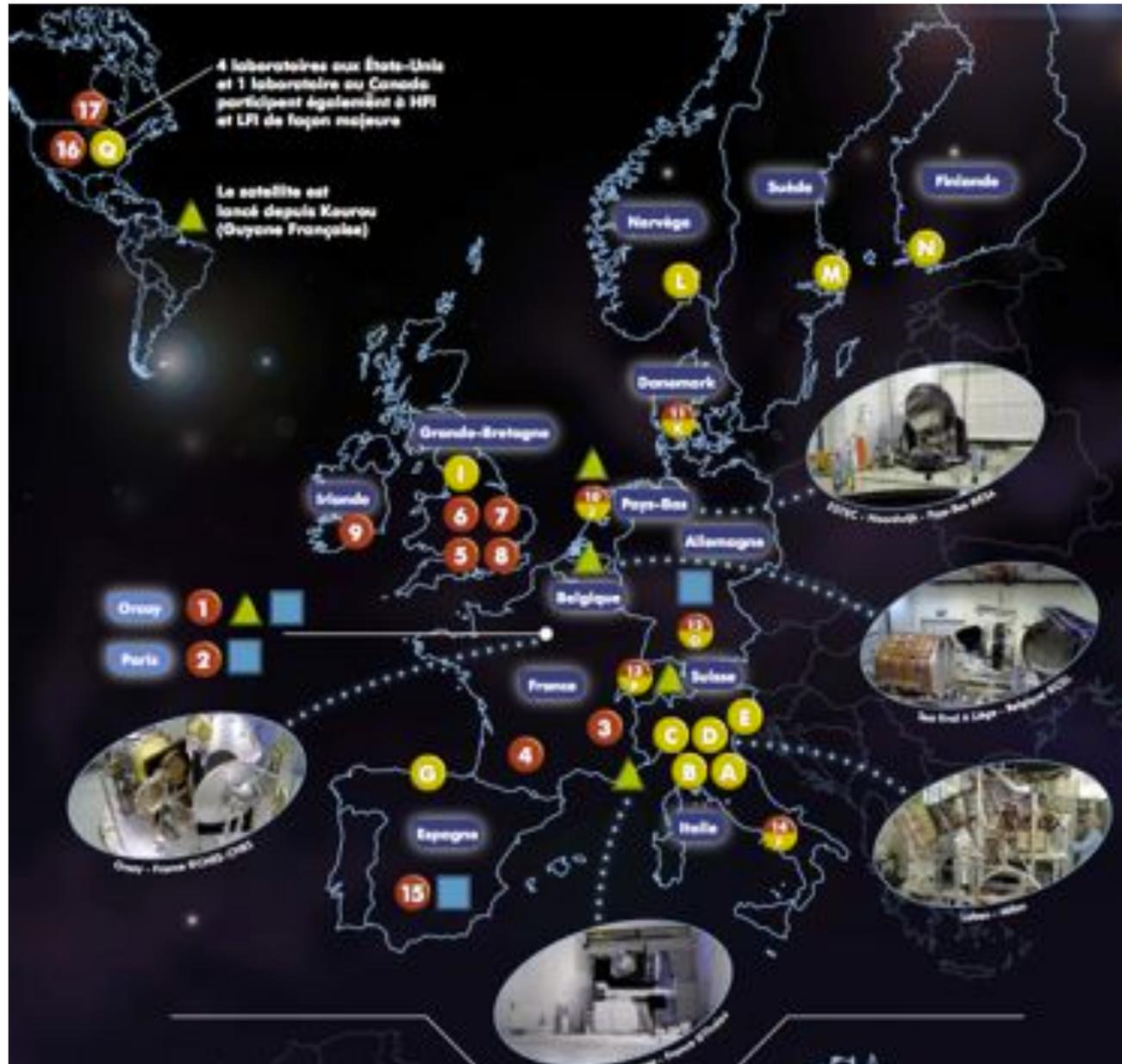
# projet de satellite scientifique

---



management

# des centaines de personnes impliquées



Planck HFI France  
<http://www.planck.fr>

The scientific results that we present today are a product of the Planck Collaboration, including individuals from more than 50 scientific institutes in Europe, the USA and Canada



Planck is a project of the European Space Agency - ESA - with instruments provided by two scientific Consortia funded by ESA member states (in particular the lead countries: France and Italy) with contributions from NASA (USA), and telescope reflectors provided in a collaboration between ESA and a scientific Consortium led and funded by Denmark.

# de nombreux partenaires et financeurs

## Les partenaires de la réalisation :

- \* 13 laboratoires européens et nord-américains (dont 5 en France)
- \* 5 industriels européens et nord-américains (dont 1 en France) principaux, et environ 80 sous-traitants
- \* 2 agences françaises : le CNES et le CNRS
- \* Plus de 70 ingénieurs, techniciens et administratifs en France

## Le consortium scientifique :

- \* 25 laboratoires européens et nord-américains (dont 9 en France)
- \* Plus de 200 scientifiques



Planck HFI France  
<http://www.planck.fr>

# projet de satellite scientifique

---

**instrument  
scientifique**

# tests, tests, encore des tests...

---



# projet de satellite scientifique

---



spececraft

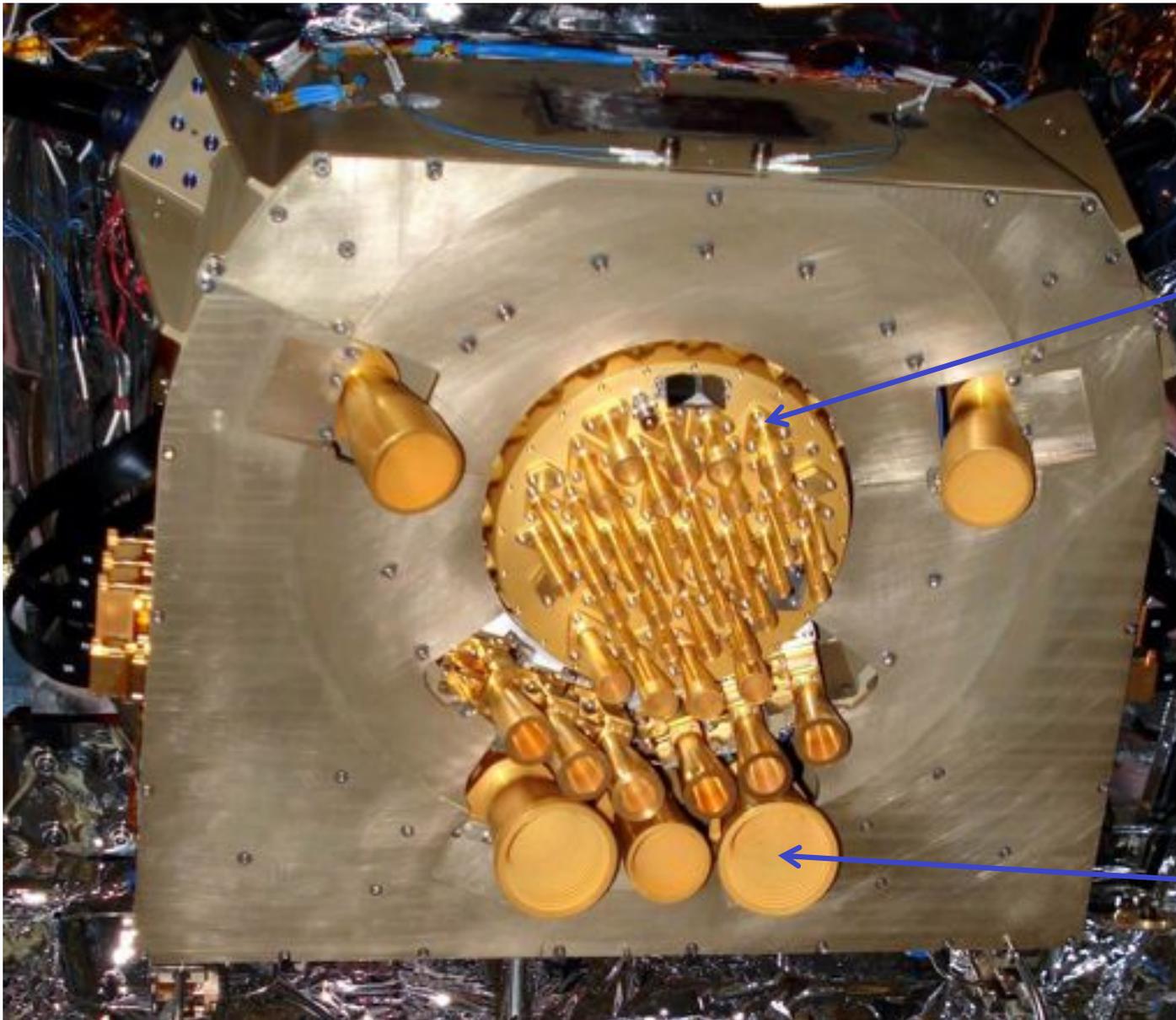
# projet de satellite scientifique

---

**instrument  
scientifique**

spacecraft

# Planck HFI et LFI



HFI  
fonctionne  
à 0.1K

Fabriqué sous  
responsabilité  
IAS, Orsay

LFI

# intégration / technologie de Planck

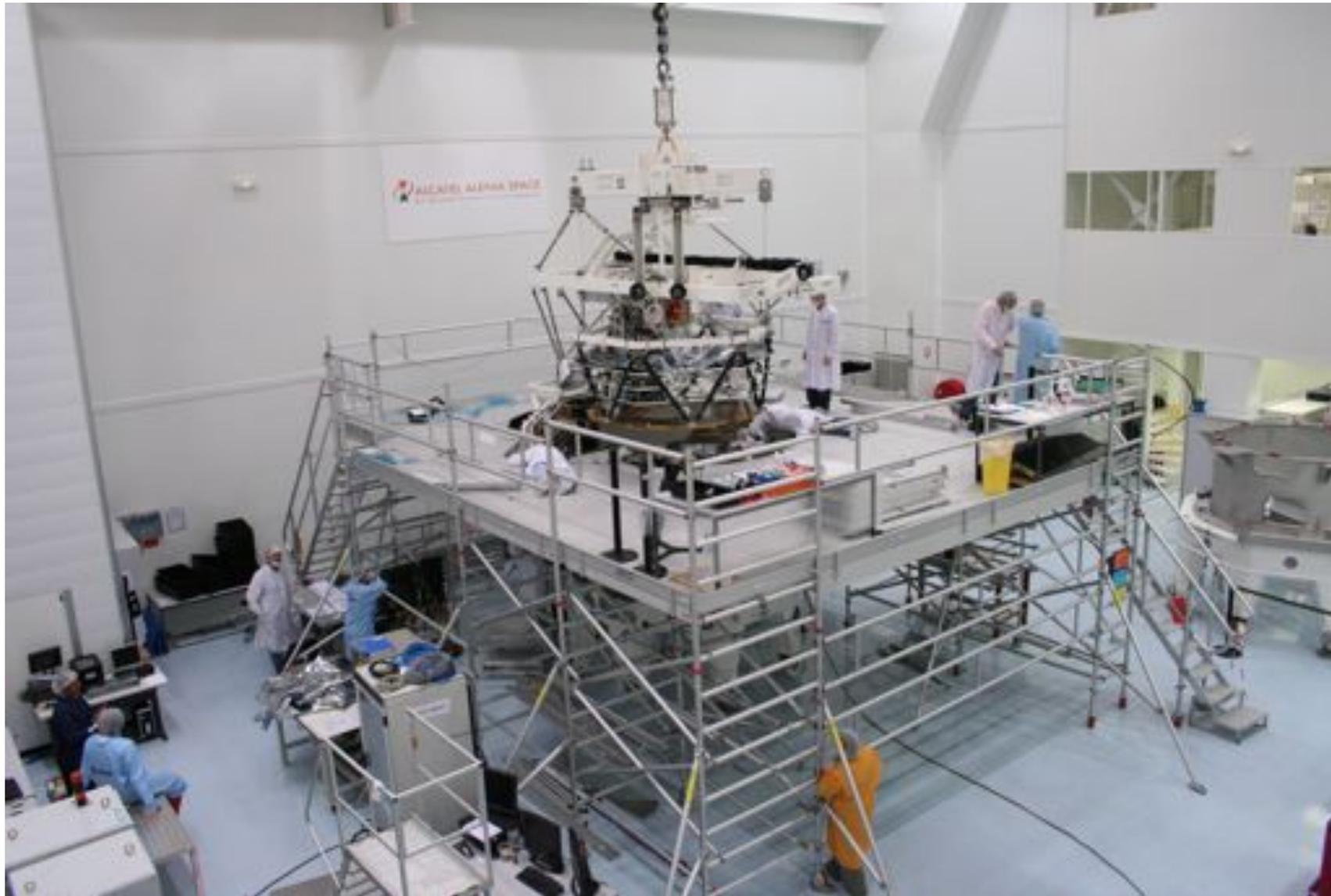
---



Planck, ESA, HFI & LFI

# intégration Thales Cannes

---



# tests, tests, encore des tests...

---



# le satellite terminé et testé

---



# projet de satellite scientifique

---

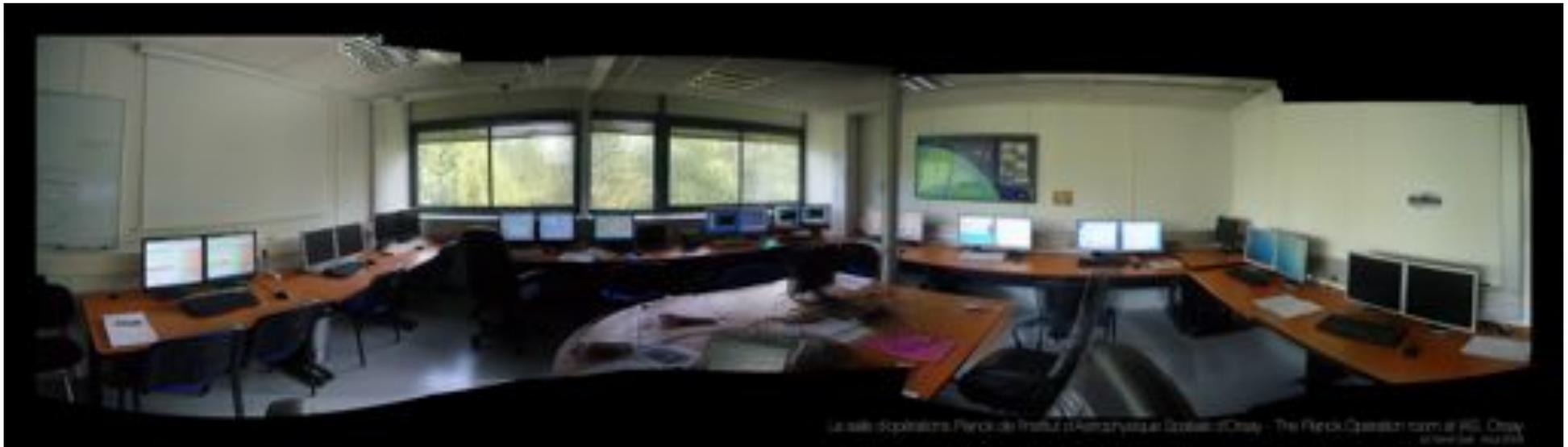
**instrument  
scientifique**

segment sol

# segment sol de Planck HFI

---

- IAS
  - surveillance quotidienne de l'instrument HFI



H. Dole, IAS

- IAP
  - Data Processing Center
  - ordinateur cluster IBM dédié à Planck de 1 128 cœurs, offrant 13 Teraflops

# segment sol de Planck HFI

---

- IAP
  - Data Processing Center
  - ordinateur cluster IBM dédié à Planck de 1 128 cœurs, offrant 13 Teraflops
- production des cartes du ciel:
  - 2 jours de calcul et traitement sur ce cluster
  - équivalent à 6 ans sur un micro-ordinateur, s'il avait
    - 200To de disque dur
    - un accès rapide aux disques (lecture de 11 CDROM en 1 seconde)

# segment sol de Planck HFI



Planck HFI France  
<http://www.planck.fr>

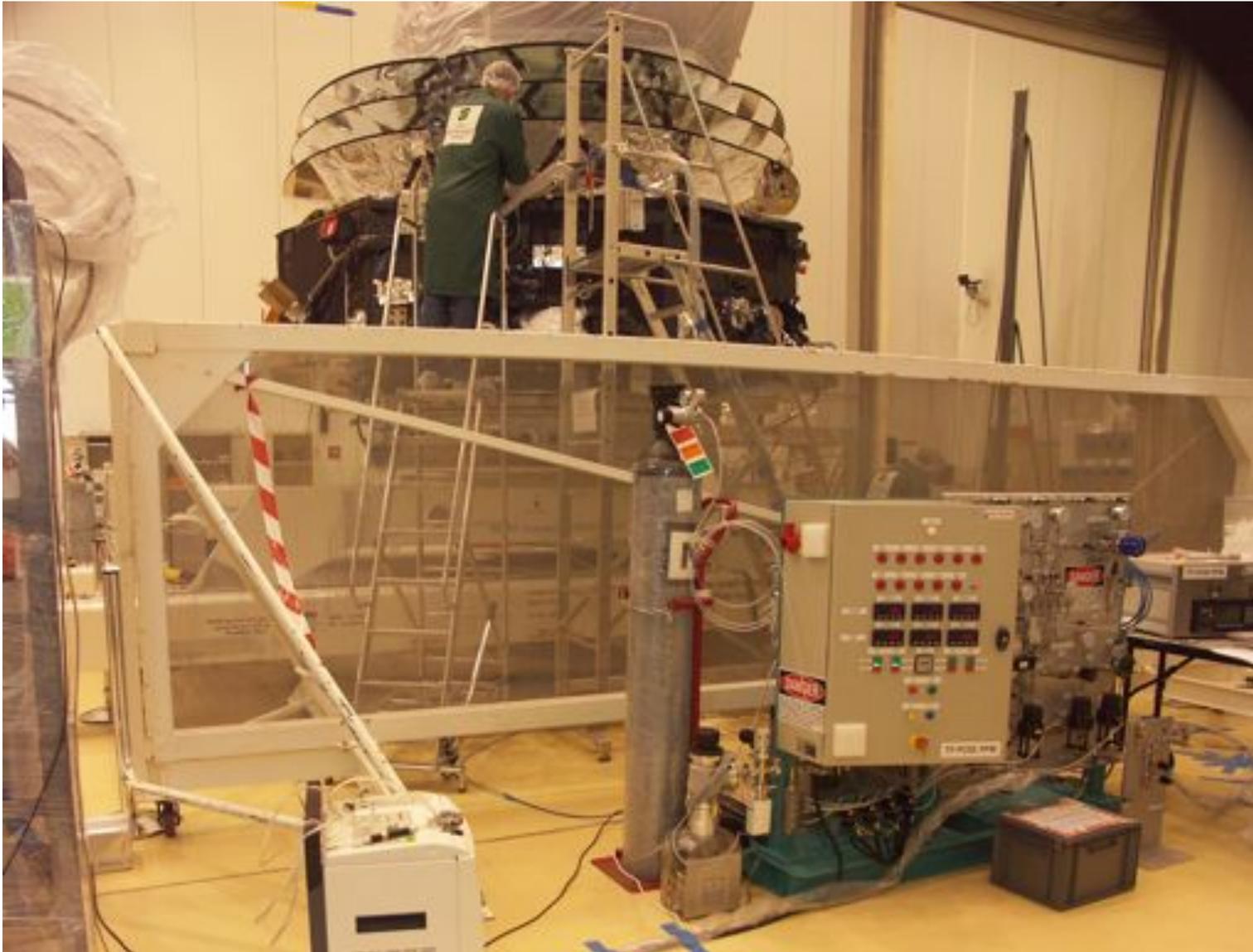
# projet de satellite scientifique

---

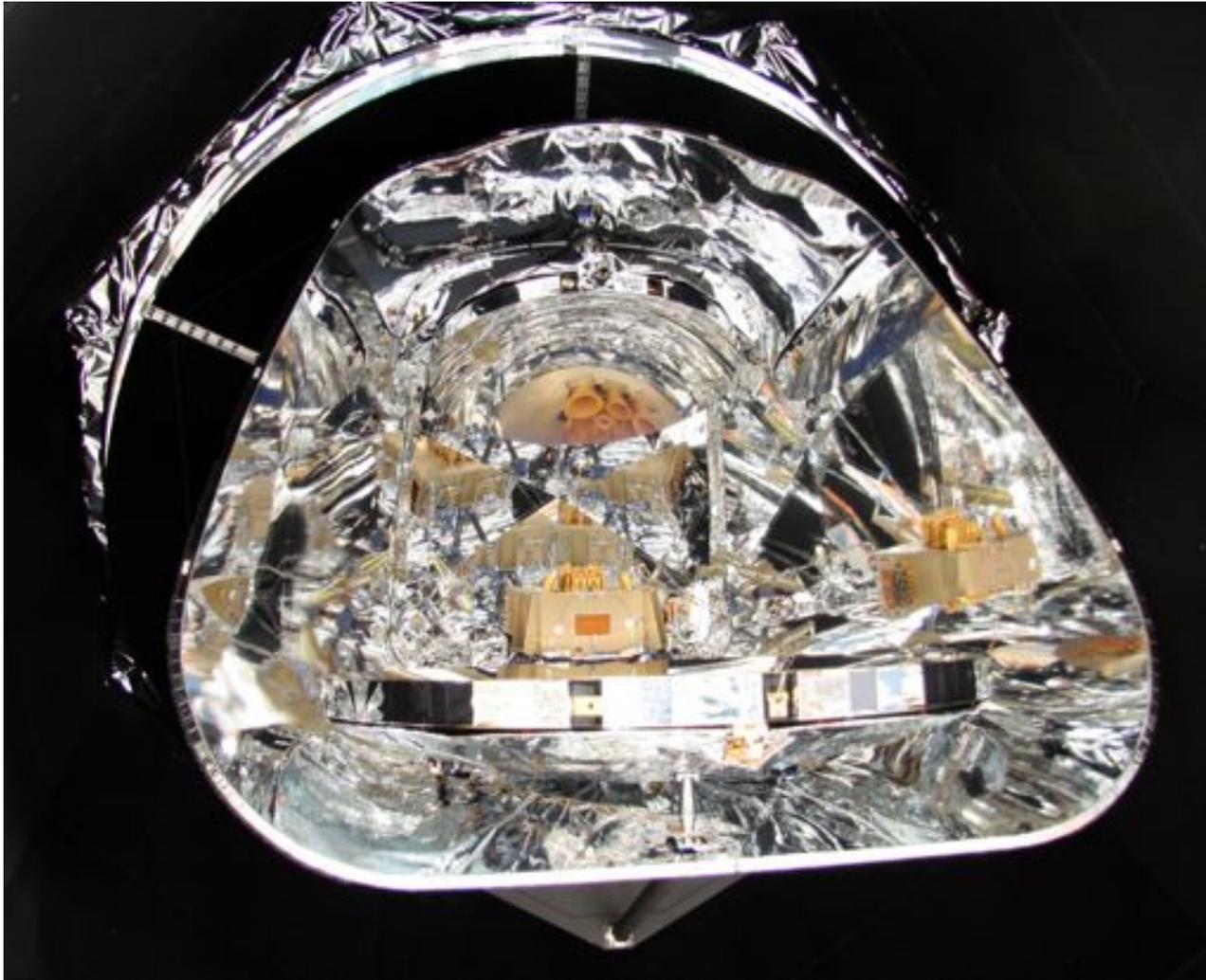
satellite complet +  
fonctionnement nominal +  
objectifs scientifiques  
atteints

# tests, tests, encore des tests...

---

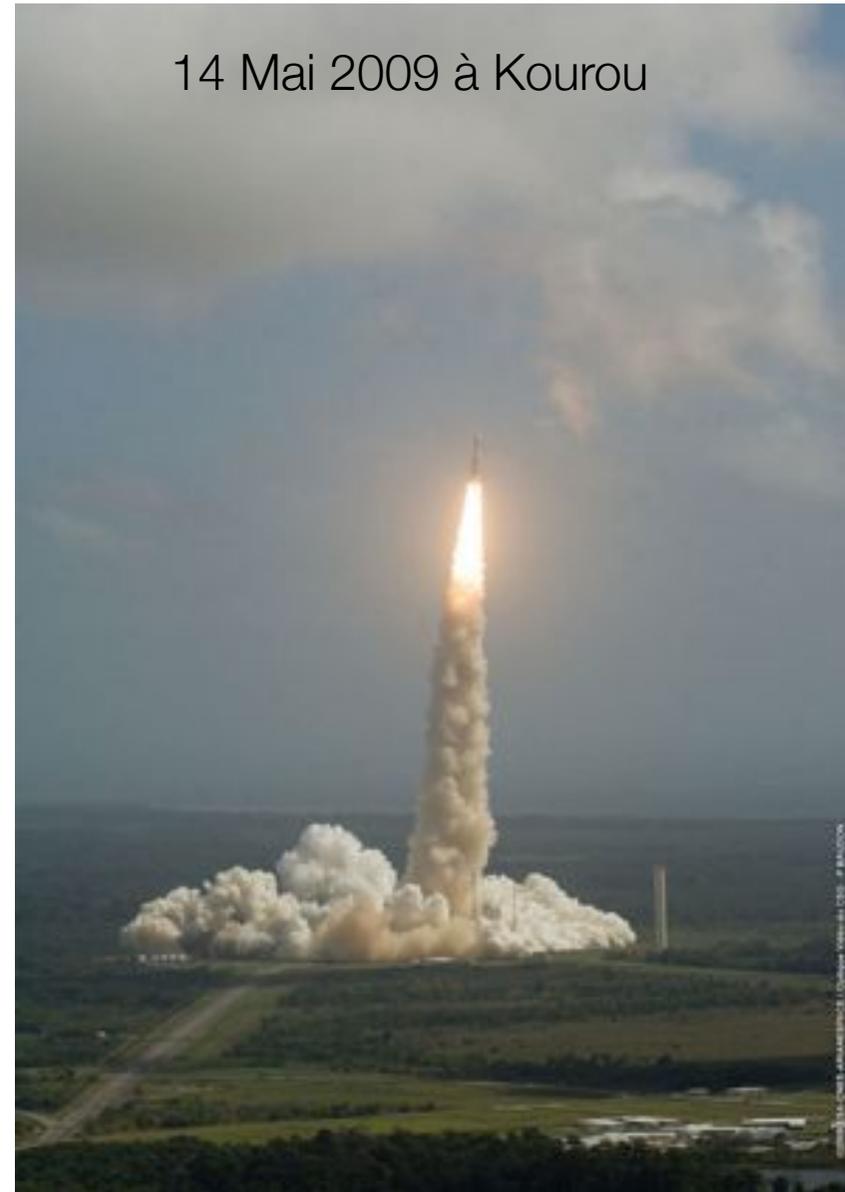
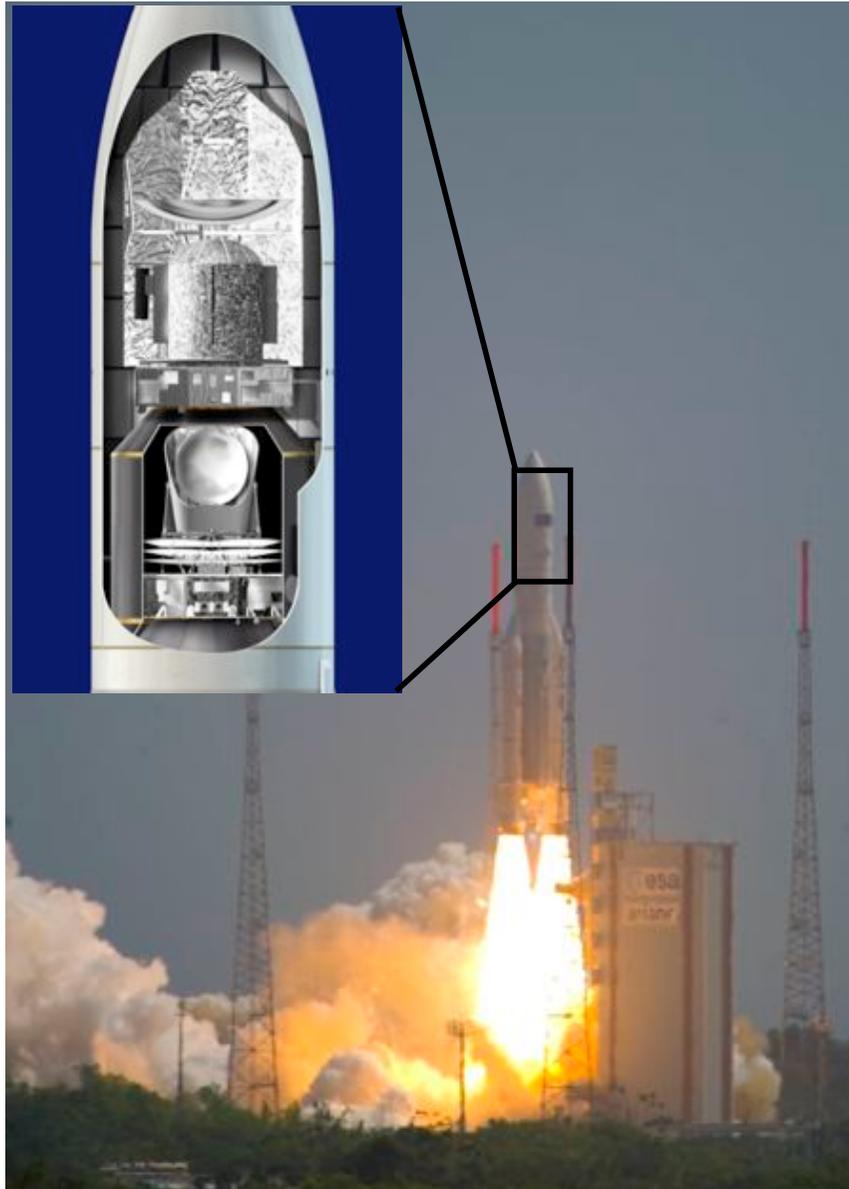


# observatoire spatial qualifié et prêt



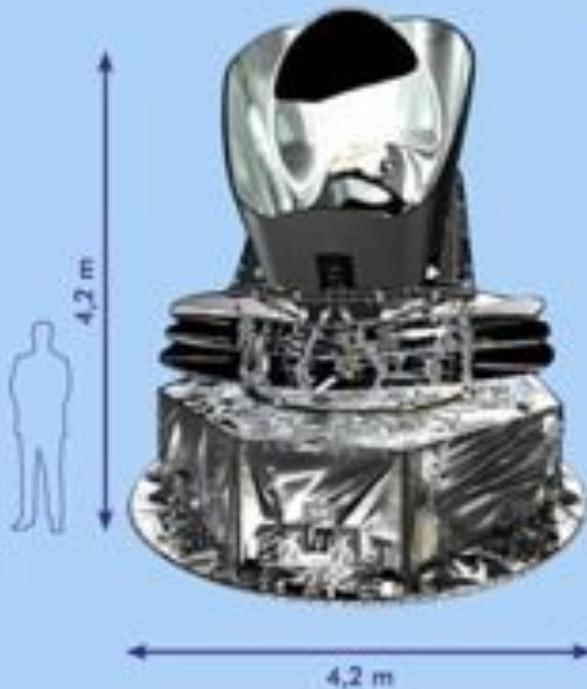
Planck, ESA, HFI & LFI

# lancement de Planck & Herschel



# l'observation spatiale commence...

## PLANCK EN CHIFFRES



### ★ Caractéristiques

- **2** tonnes
- **1,5** mètre de diamètre pour le miroir
- **2** instruments scientifiques avec des technologies de détection différentes
- **52** bolomètres, dont 32 sensibles à la polarisation pour l'instrument HFI
- **22** radiomètres, tous sensibles à la polarisation pour l'instrument LFI
- **9** bandes de fréquence d'observation, entre 30 et 850 GHz
- **3** systèmes cryogéniques en cascade refroidissant successivement à 20 K, 4 K et 0,1 K
- **50 000** composants électroniques
- **48 000** litres d'hélium embarqués
- **1600 W** de consommation électrique

### ★ En vol

- **2009** est l'année du lancement par Ariane 5
- **18** mois est la durée de vol minimale de Planck
- **1,5** million de km est la distance entre la Terre et le satellite
- **L2** est l'adresse de résidence de Planck, dans l'axe Terre-Soleil
- **2** est le nombre de fois où Planck observera l'ensemble de la voûte céleste (au minimum)

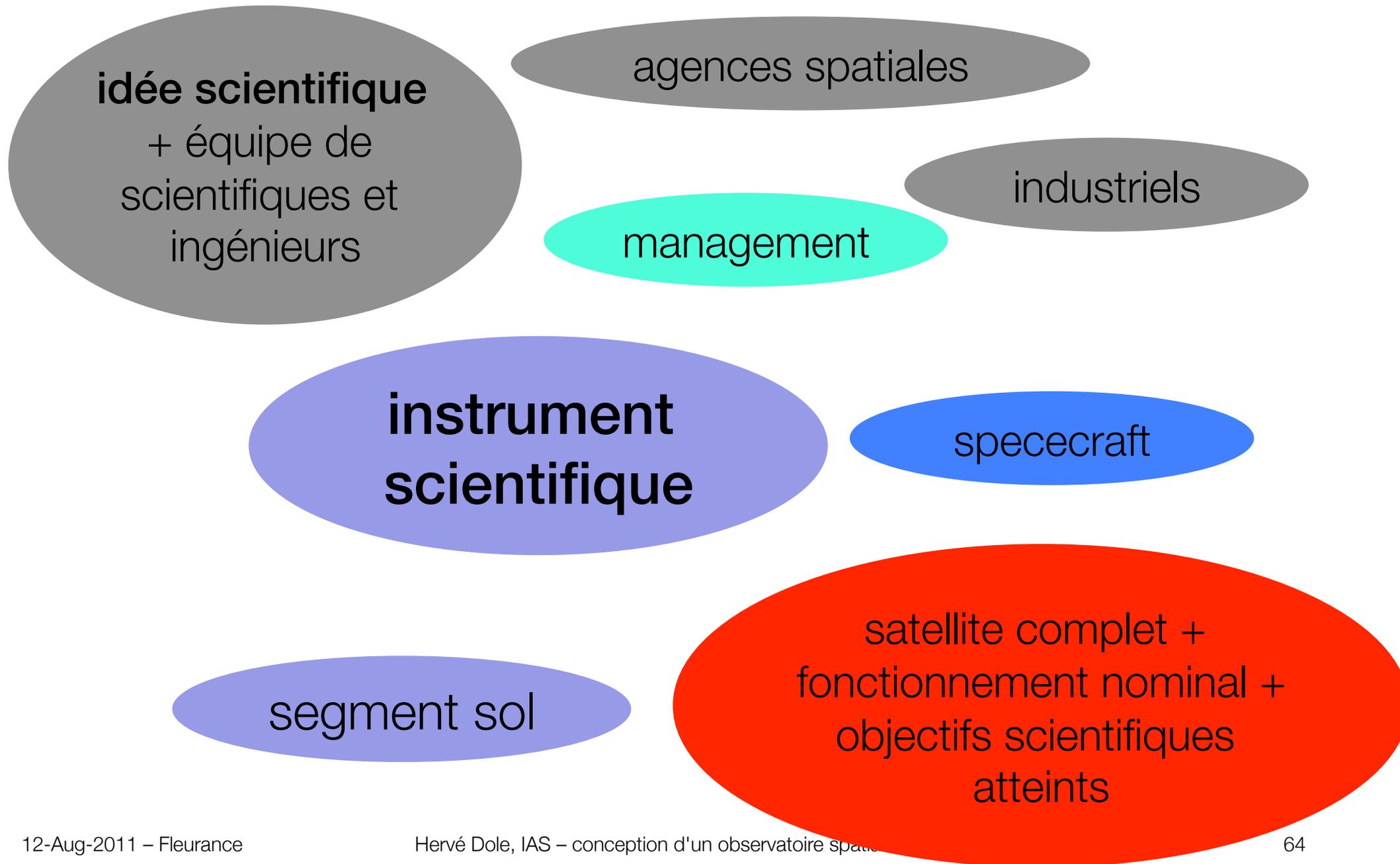
### ★ Résultats de base

- **23** cartes en température ou en polarisation d'environ 50 millions de pixels chacune (9 fréquences, ciel complet)

Planck HFI France  
<http://www.planck.fr>

# projet de satellite scientifique

---

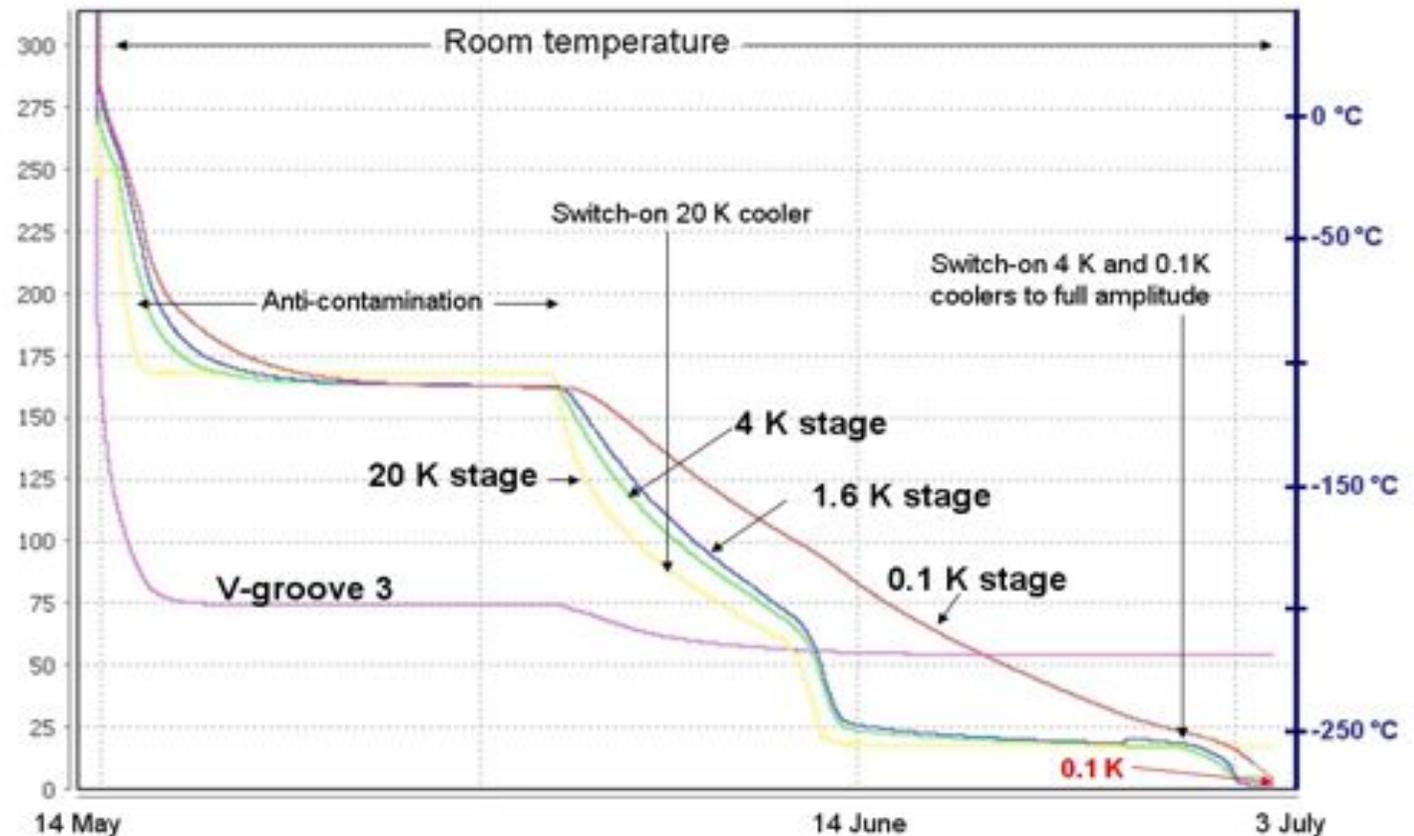


# les données arrivent ...

---

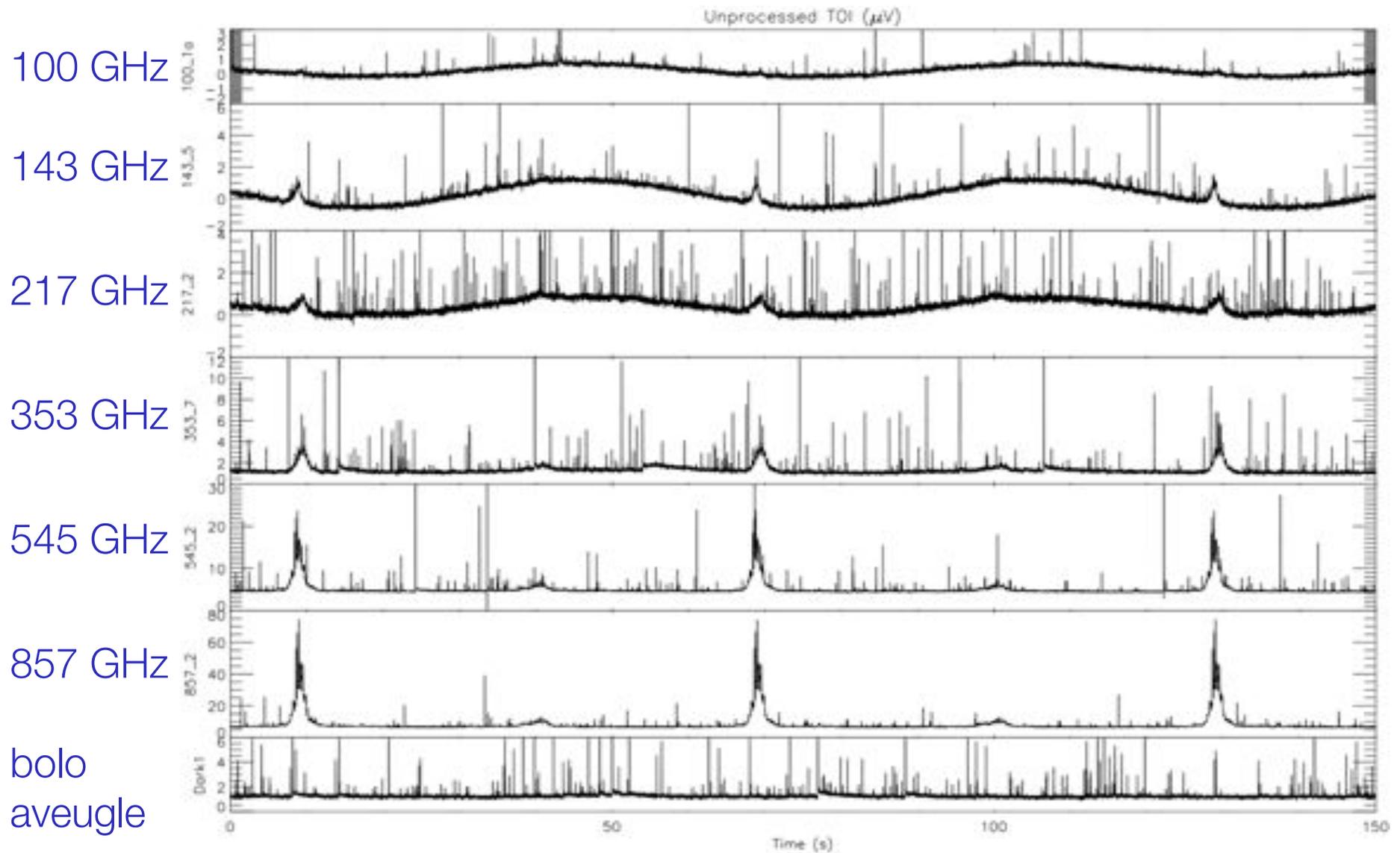
# Planck is very cool !

- Left earth at  $\sim 10$  km/s
- 1.5 million km in 45 days
- Cooling on the way
- Arrived smoothly at L2 on July 2 2009 with almost no trajectory correction
- 1 rpm
- Data acquisition @ 180Hz
- 40-50 minutes on the same circle
- Covers the whole sky in  $\sim 6$  months
- Survey started on Aug 13 2009
- nominal mission: 2 surveys
- extended mission: 5 surveys !!!!



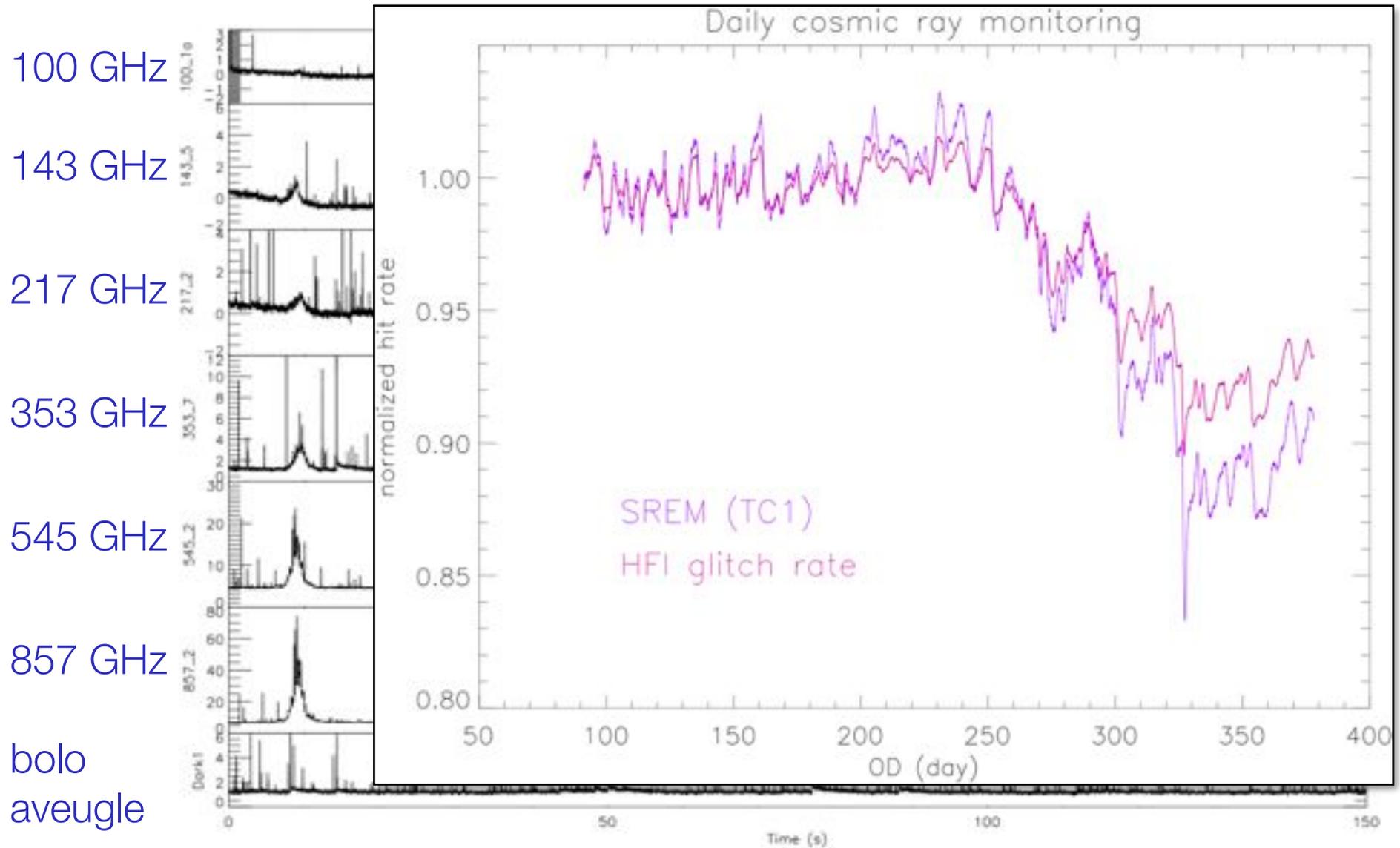
Planck-HFI Core Team, 2011, arXiv:1101.2048

# 2 tours de Planck-HFI



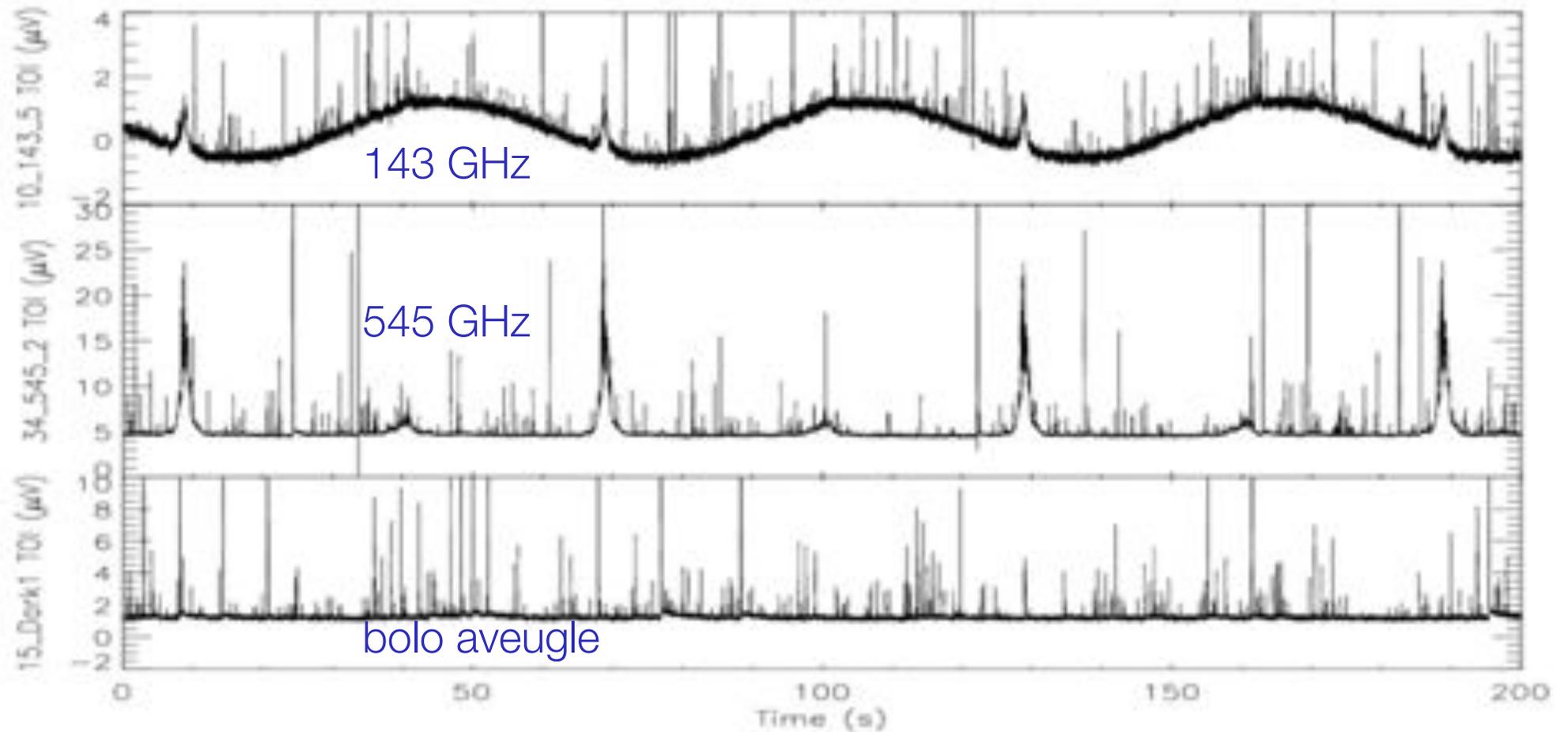
Planck-HFI Core Team, 2011, arXiv:1101.2048

# 2 tours de Planck-HFI



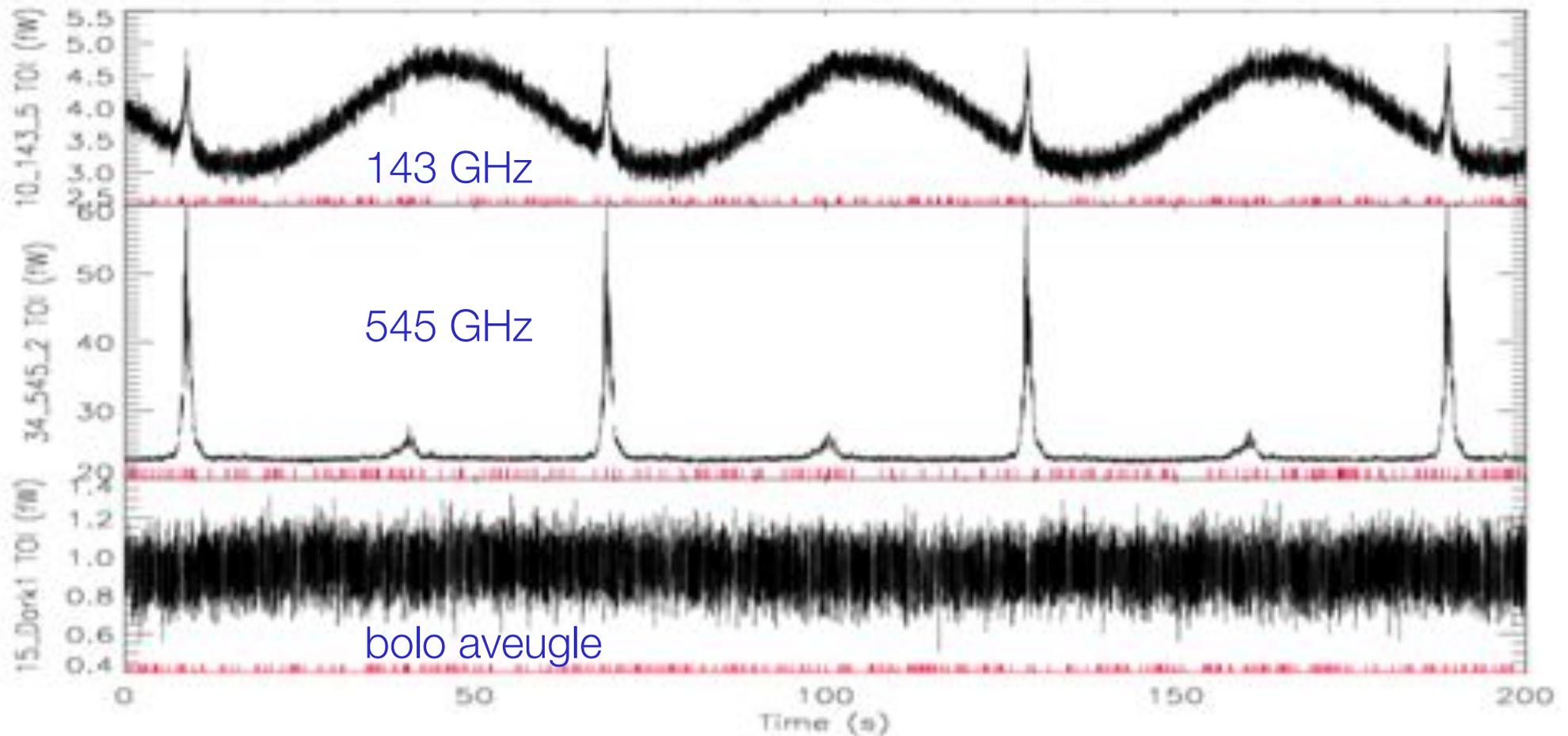
Planck-HFI Core Team, 2011, arXiv:1101.2048

# beaucoup de travail...



Planck-HFI Core Team, 2011, arXiv:1101.2048

# beaucoup de travail...

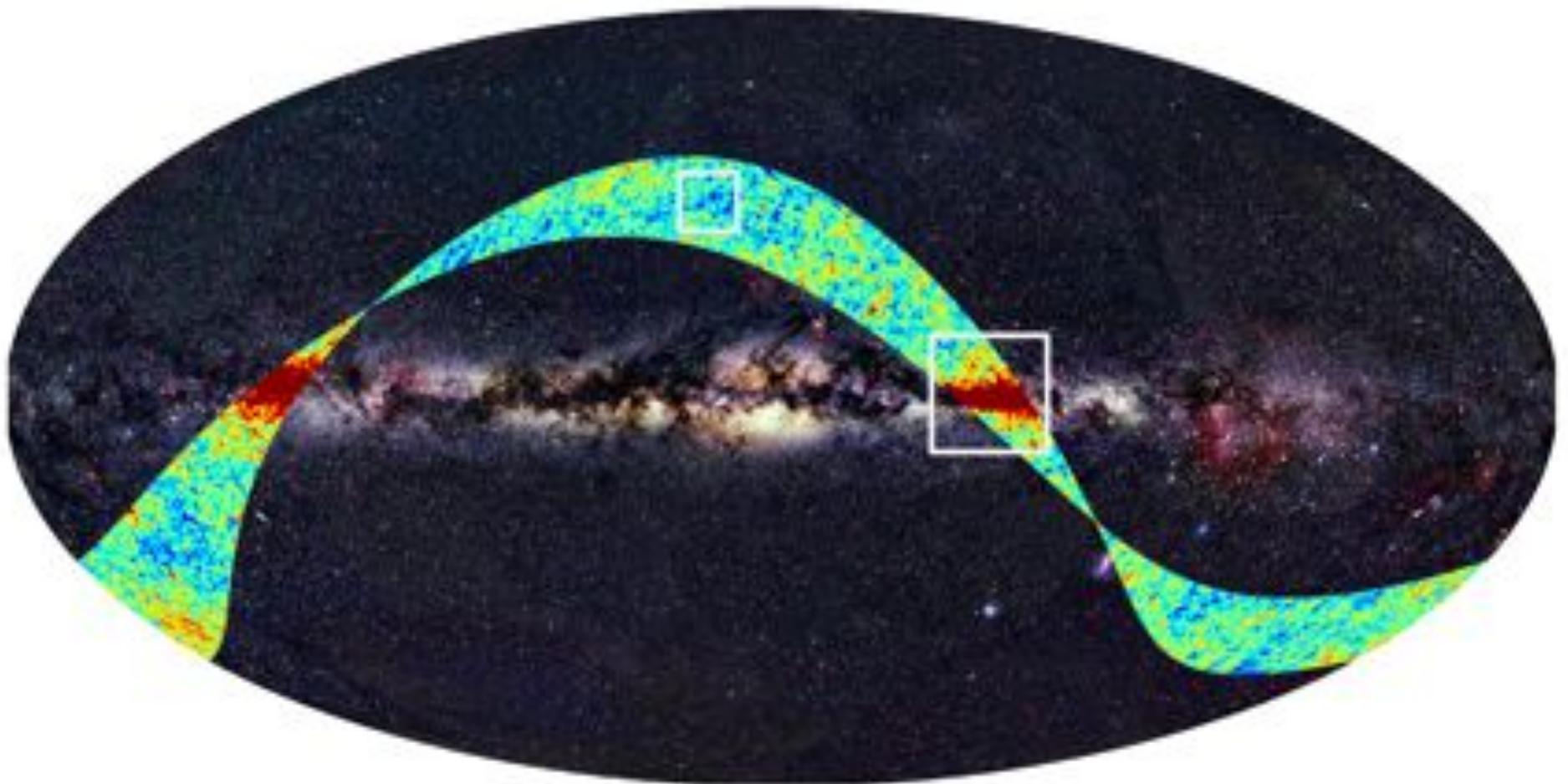


de 10 à 15% de données perdues à cause des glitches

Planck-HFI Core Team, 2011, arXiv:1101.2048

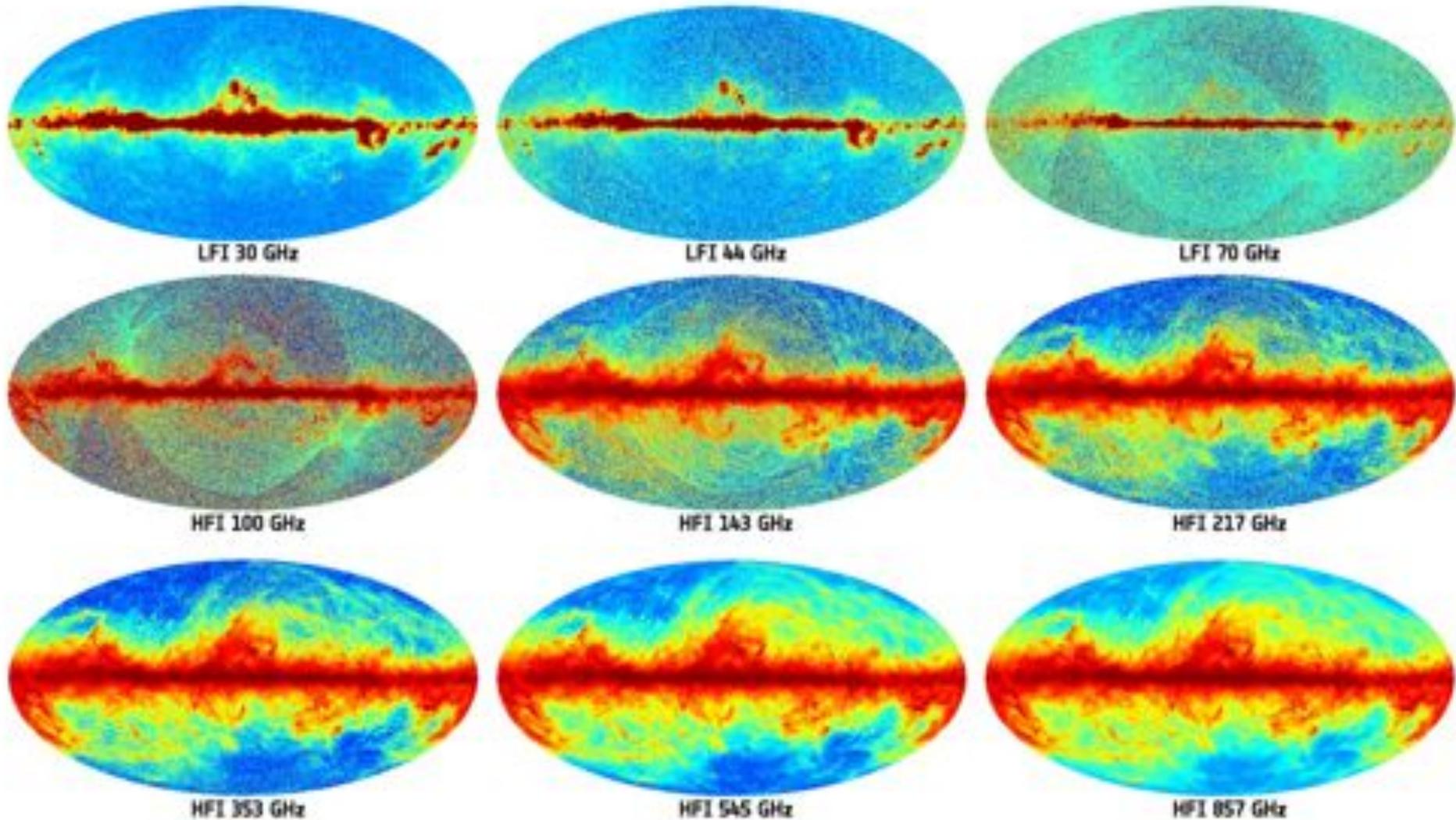
# premiers résultats !

---



# et de nombreux autres résultats !

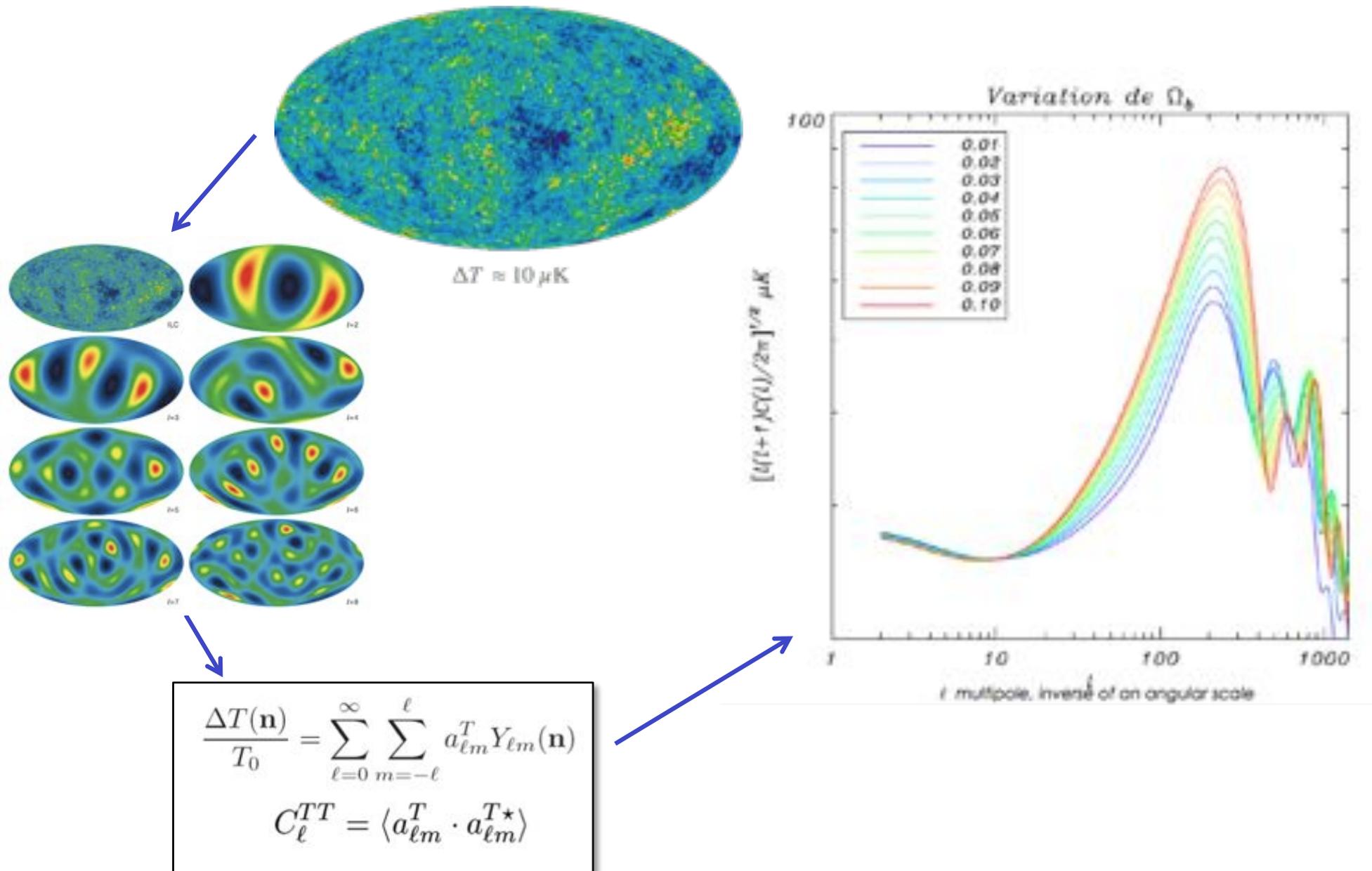
Planck all-sky foreground maps



Planck, ESA, HFI & LFI

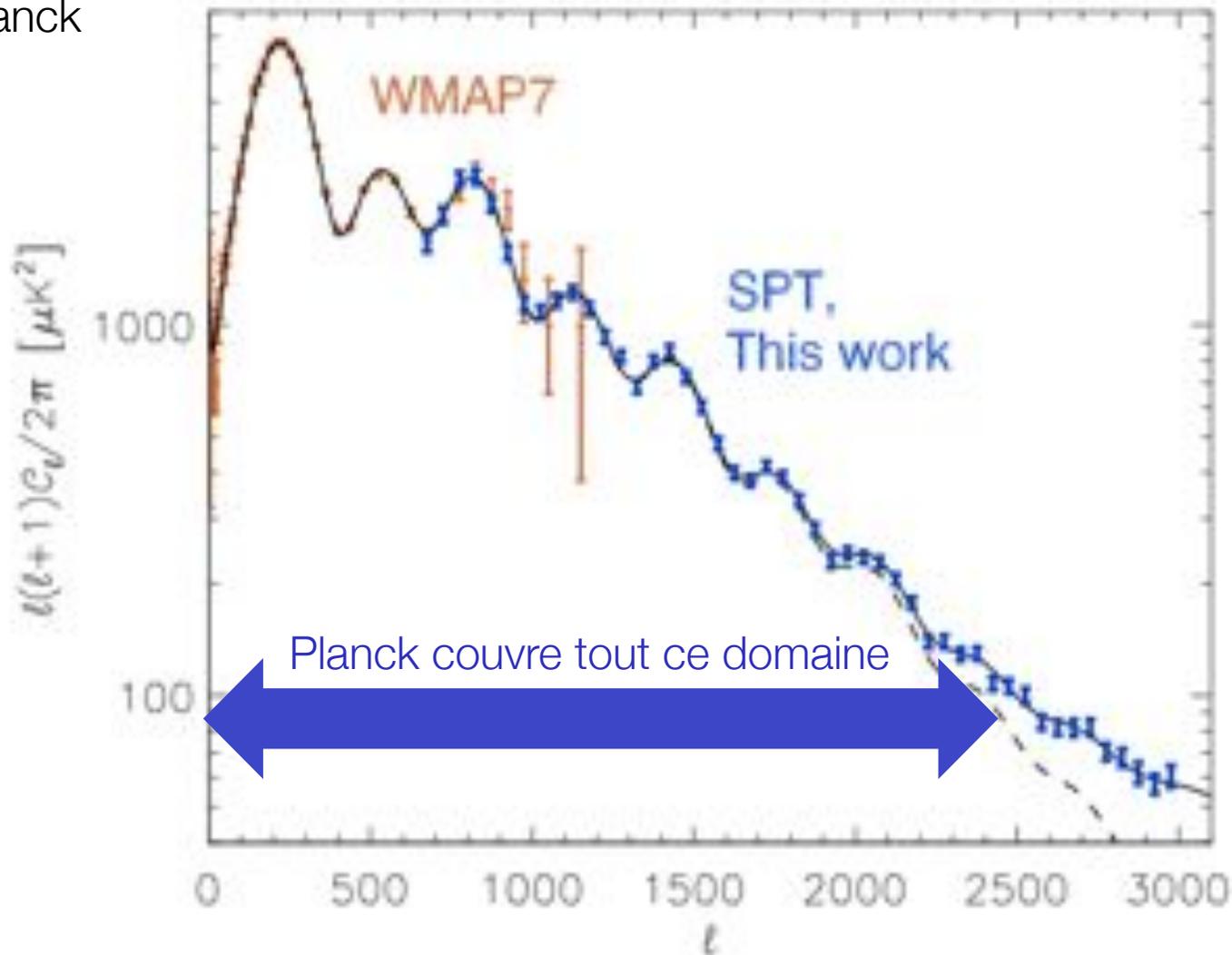
Planck-HFI Core Team, 2011, arXiv:1101.2048

# mais encore beaucoup de travail...



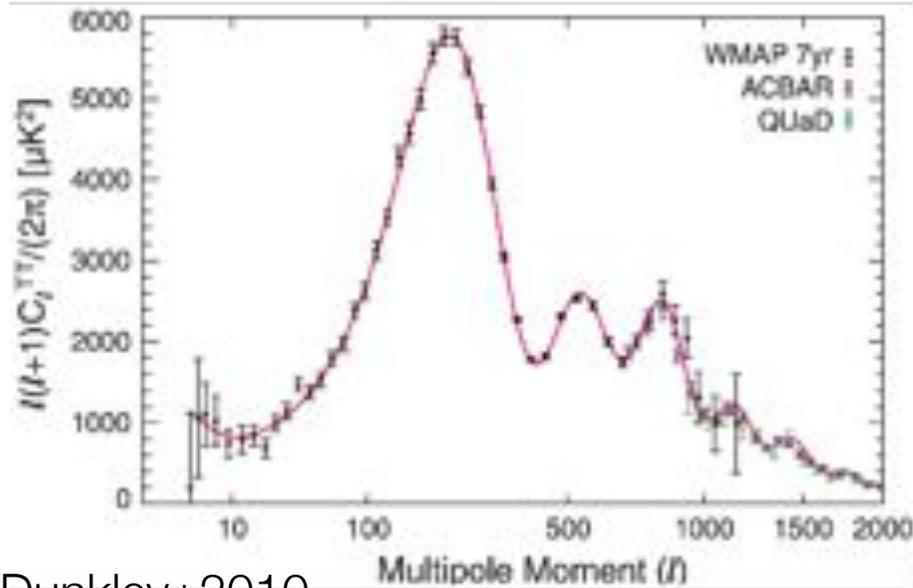
# le point sur le CMB (1)

avant Planck



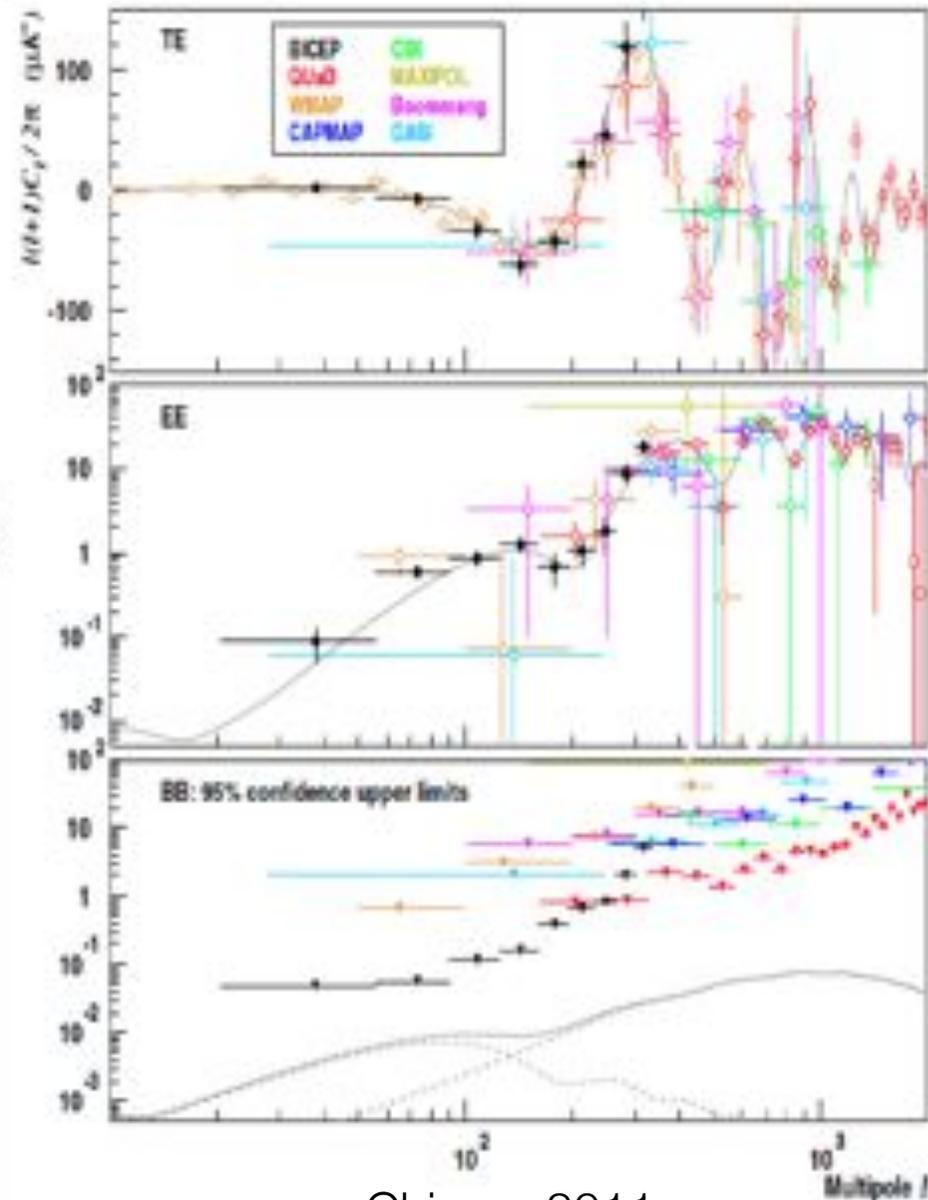
Keisler+2011, arXiv:1105.3182

# le point sur le CMB (2)



Dunkley+2010

avant Planck



Chiang+2011

---

# conclusion

---

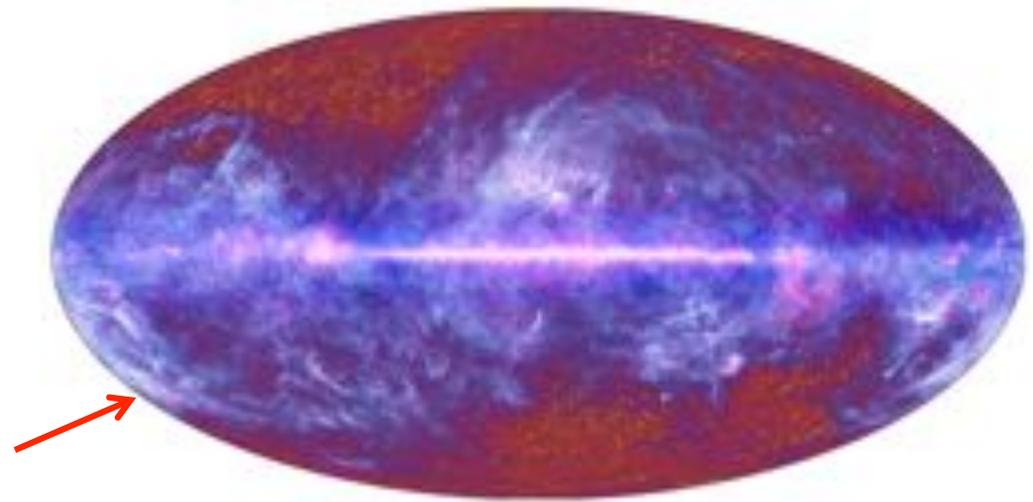
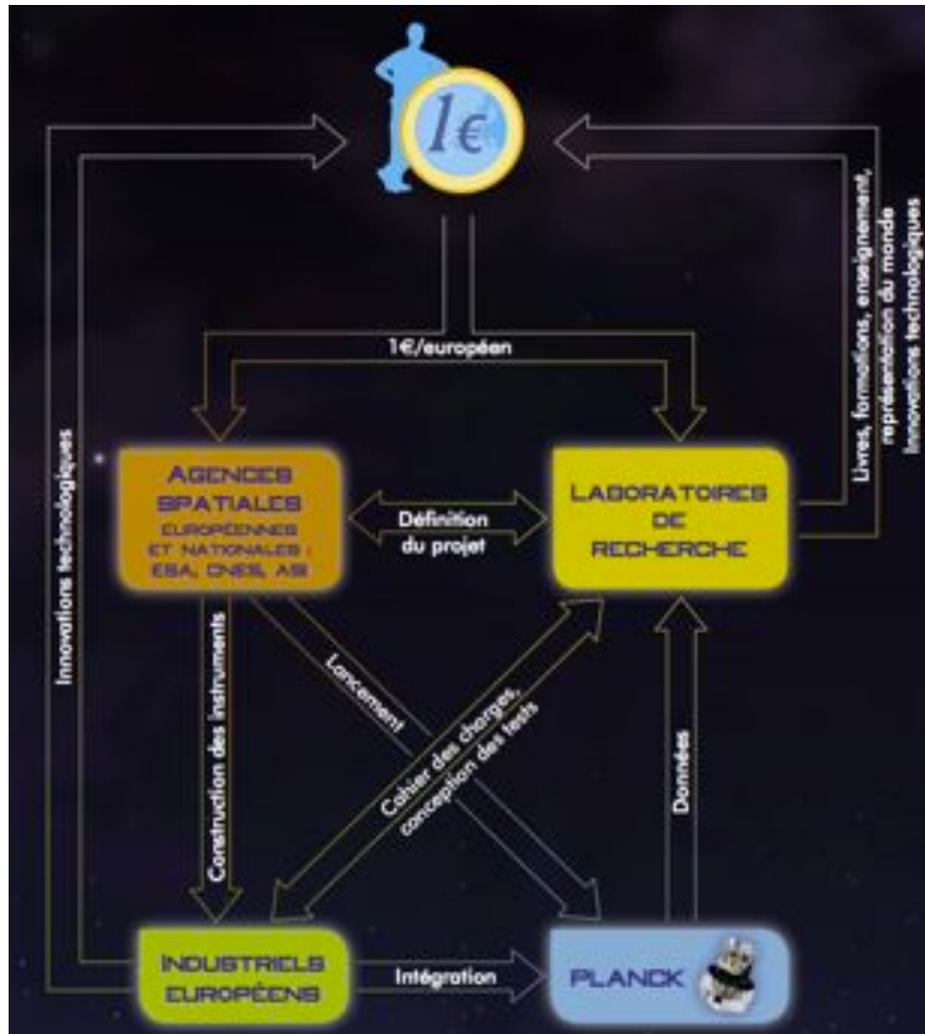
# conception d'un observatoire spatial

---

- aventure humaine, scientifique et technologique fascinante
- organisation complexe (scientifiques, agences, industriels)
- le dimensionnement de la manip est un préalable
- de 15 à 20 ans de projet
  - avec aléas, beaucoup de tests
  - la science évoluant rapidement, bien faire attention à ne pas se faire doubler dans l'intervalle !
- accès à une nouvelle fenêtre spectrale et/ou nouveaux domaines de sensibilité: quasi assurance de résultats majeurs

-> mieux comprendre l'origine de l'Univers, de son histoire, et de la physique régissant son évolution.

# finalement



Planck HFI France  
<http://www.planck.fr>

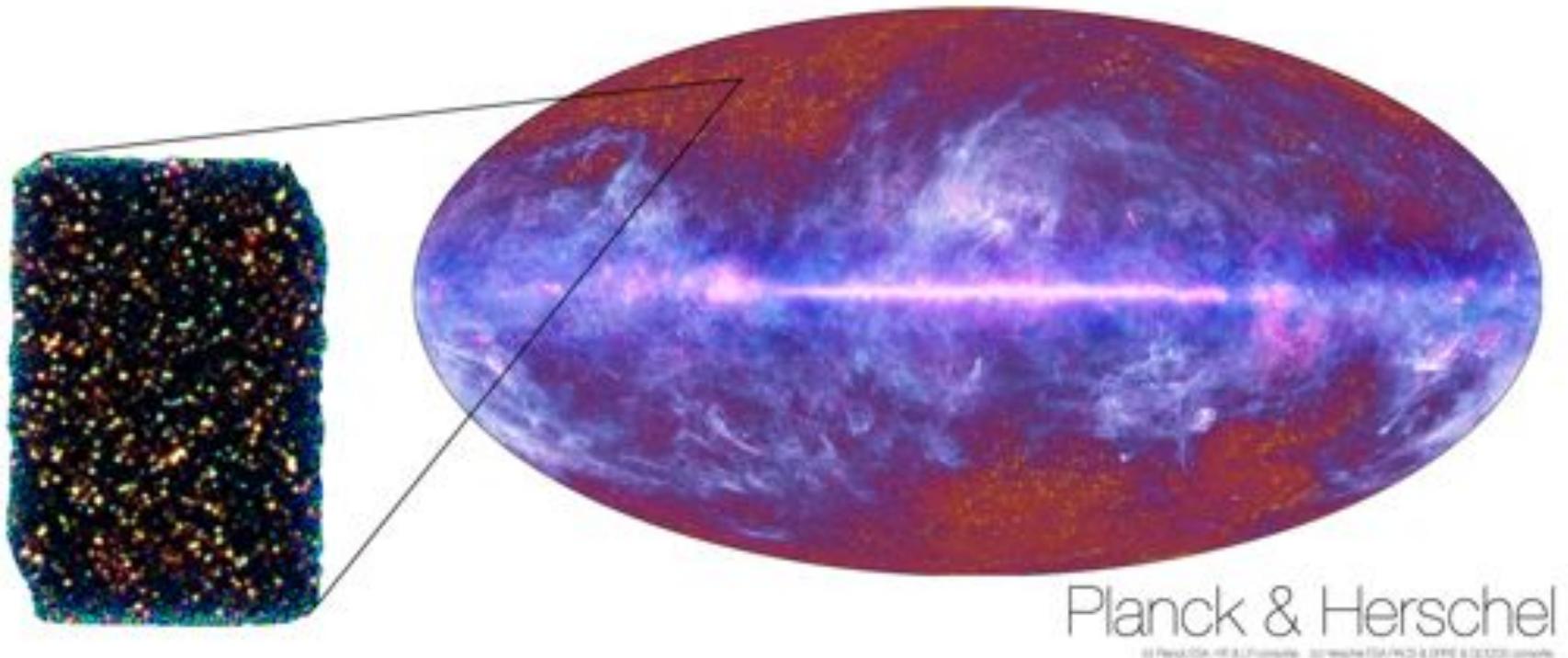
---

merci

---

<http://www.ias.u-psud.fr/dole/>

<http://www.planck.fr>



# quelques références

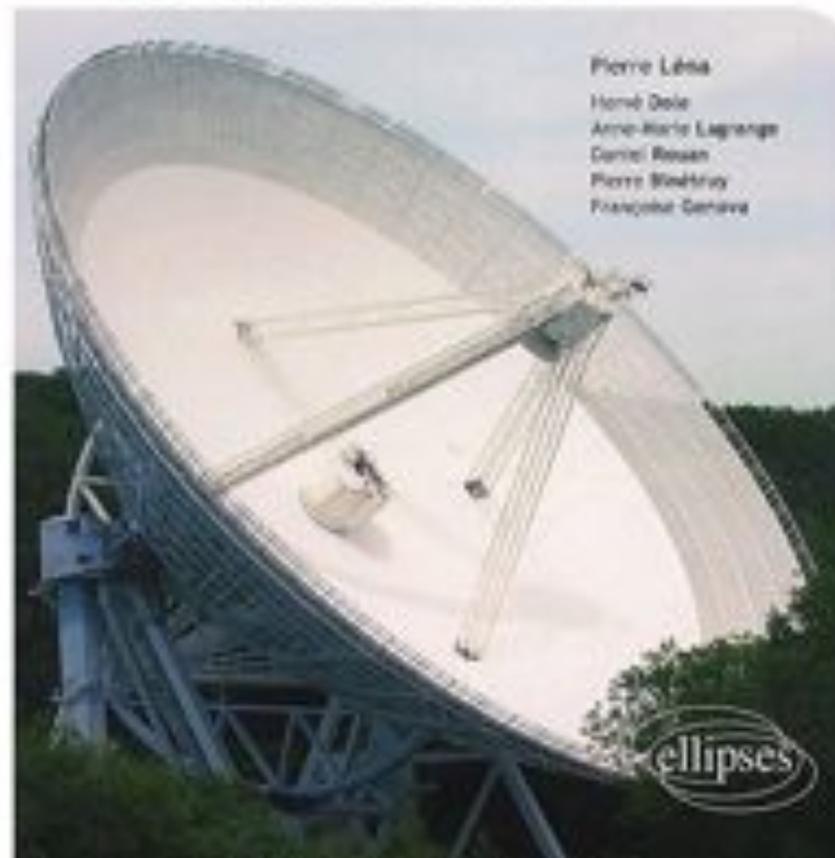
---

- *L'observation en astronomie*, **Pierre Léna, Hervé Dole, Anne-Marie Lagrange, Daniel Rouan, Pierre Binétruy, Françoise Genova**, 2010, Ellipses
- *L'observation en astrophysique*, 2008, **Léna, P., Rouan, D., Lebrun, F., Mignard, F. & Pelat, D.**, EDP Sciences / CNRS Editions
- *Observation et mesure en astrophysique*, **H. Dole**, 2009, <http://www.ias.u-psud.fr/dole/enseignement/>
- Planck: un regard vera l'aube de l'Univers, **H. Dole et al.**, 2011, Plein Sud Special Recherche 2010-2011, page 16: <http://www.plein-sud.u-psud.fr/>
  
- *Extragalactic Astrophysics and Cosmology: An Introduction*, **P. Schneider**, Springer, 2006.
- *Observational Cosmology*, **S. Serjeant**, Cambridge, 2010
- *Astrophysical Concepts*, **M. Harwit**, 3rd Ed, Springer
  
- films ou reportages TV
- **BLAST**, expérience ballon en Antartique (DVD)
- **Herschel**, avec M. Sauvage du CEA (chercher sur [herschel.fr](http://herschel.fr))
- **Planck**, avec H. Dole J-L Puget et al. de l'IAS par Télésonne <http://www.ias.u-psud.fr/dole/>
- 1<sup>er</sup> épisode de *From the Earth to the Moon*, 2000 (construction du LEM)

# livre

---

## L'observation en astronomie





HERVÉ DOLE, NABILA AGHANIM, MARYSE CHARRA, MARIAN DOUSPIS, JULIEN GRAIN,  
GUY GUYOT, GUILAINE LAGACHE, MARC-ANTOINE MIVILLE-DESCHÈNES,  
FRANÇOIS PAJOT, NICOLAS PONTHEIU, JEAN-LOUP PUGET, LAURENT VIBERT

Institut d'Astrophysique Spatiale (IAS) (UMR 8617, UPS/CNRS)  
UFR Sciences

# Un regard vers l'origine de l'Univers



© ESA / D. DUCROS

Quel est l'âge de l'Univers ? Quelle est sa forme ? Comment va-t-il évoluer ? Pour répondre à toutes ces questions, il faudrait pouvoir remonter dans le temps et capter la toute première lumière émise par l'Univers 380 000 ans après le Big Bang, soit il y a environ 13 milliards d'années. Tel est le défi qu'est en passe de relever le satellite Planck.

Photo : image d'artiste représentant Planck et une carte du fond diffus cosmologique.

**P**lanck est le satellite européen conçu pour mesurer avec une précision inégalée l'écho lumineux du Big Bang (encadré 1). Cette lumière, la plus ancienne présente dans l'Univers, a été émise il y a plus de 13 milliards d'années, et est aussi appelée rayonnement fossile ou fond diffus cosmologique (FDC). Une fois la mission terminée, les données accumulées et rendues publiques fourniront les informations les plus détaillées jamais obtenues sur la taille, la masse, l'âge, la géométrie, la composition et le destin de l'Univers observable. Fonctionnant parfaitement depuis son lancement en mai 2009, Planck produit des images d'exceptionnelle qualité, comme attendu. Cet article relate la formidable aventure humaine, technologique, et scientifique de Planck vue par des chercheurs, enseignant-chercheurs et ingénieurs de l'Institut d'Astrophysique Spatiale impliqués dans le projet, des premiers tests aux premières découvertes scientifiques, en attendant la publication finale des résultats vers fin 2012.

## De l'importance du rayonnement fossile dans la cosmologie

Forts de différentes observations astronomiques et de nouvelles théories physiques comme la relativité générale ou la mécanique quantique, les astrophysiciens ont élaboré un scénario possible de l'Histoire de l'Univers et créer ainsi un modèle standard de la cosmologie. Il repose sur le concept d'un Univers en expansion qui a débuté il y a 13,7 milliards d'années à une époque très dense et chaude communément appelée Big Bang. Entre  $10^{-35}$  et  $10^{-32}$  secondes après le Big Bang, s'ensuit une période d'expansion exponentielle qui aurait permis à l'Univers de grossir d'un facteur considérable. Il s'agit de la théorie de l'inflation cosmique. Puis une dilatation globale de l'Univers au cours du temps le rend de moins en moins dense et de plus en plus froid mais possédant une grande homogénéité et une géométrie plane. Des petites fluctuations produites avant et étendues durant l'inflation se sont structurées sous l'influence de forces gravitationnelles, pour former bien plus tard des galaxies et amas de galaxies. L'Univers est constitué de différentes formes de matière et d'énergie: on retrouve la lumière, la matière ordinaire (composée d'atomes, de molécules, d'électrons...), des neutrinos (particules élémentaires n'ayant ni couleur ni charge électrique), la matière noire\* et l'énergie noire\*. On connaît très peu de choses sur ces deux dernières composantes, inconnues en laboratoire et pour lesquelles aucune explication théorique n'a même pu être établie, mais qui sont invoquées pour expliquer certains effets observés. La lumière voyage à une vitesse finie et inégalée, c'est une constante physique ne dépendant pas de l'observateur. Lorsque l'on regarde un objet, on observe en fait la lumière qu'il nous envoie. Cette lumière met un certain temps pour arriver à nos yeux

donc en regardant loin, on regarde dans le passé. Dans l'Univers primordial très dense, la lumière ne pouvait pas se propager librement: l'Univers était opaque. Puis vint le moment où l'Univers cessa d'être opaque. Ce bref épisode s'appelle époque de dernière diffusion. Elle s'est produite environ 380 000 ans après le Big Bang. C'est le rayonnement qui baignait l'Univers à ce moment-là, appelé fond diffus cosmologique, ou rayonnement fossile, toujours présent autour de nous et qui est observé par le satellite Planck: ce rayonnement permet ainsi de remonter jusqu'à la prime jeunesse de l'Univers. Au moment de leur dernière émission (on plutôt de dernière diffusion), les photons du FDC acquièrent une polarisation\* linéaire qui dépend de la vitesse du plasma électrons-photons à ce moment. Le degré et la direction de polarisation des photons provenant d'un point du ciel nous apportent des informations

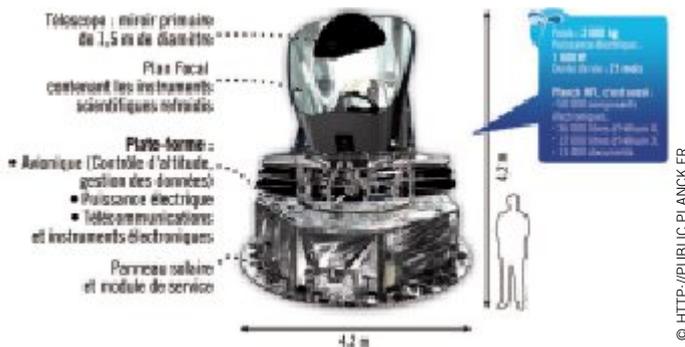
### 1 Le satellite Planck

Baptisé du nom du physicien allemand Max Planck (1858-1947) qui a notamment expliqué, en 1899, la façon dont un corps à l'équilibre thermique émet un rayonnement déposant alors les bases de la mécanique quantique, le satellite Planck est situé à 1,5 millions de kilomètres de la Terre. Il observe le ciel dans neuf bandes de fréquence en utilisant deux instruments de dernière génération, conçus pour produire des mesures multifréquences à haute sensibilité et finesse du rayonnement diffus du ciel: l'instrument haute fréquence (HFI) de responsabilité française, qui couvre six bandes entre 100 et 857 GHz, et est refroidi à une température record de - 273 °C, et l'instrument basse fréquence (LFI) de responsabilité italienne, qui couvre trois bandes entre 30 et 70 GHz. Le premier relevé intégral du ciel par Planck a débuté mi-août 2009 et s'est achevé en juin 2010. Planck devrait continuer de collecter des données jusqu'à début 2012, lui permettant d'établir quatre relevés complets du ciel afin d'obtenir des données encore plus précises. Un premier ensemble de données astronomiques, appelé « catalogue initial de sources compactes » a été rendu public en janvier 2011. Les résultats scientifiques sont disponibles sur internet en français pour un large public sur <http://www.planck.fr>. Un reportage télévisé de 20 minutes résume l'implication de l'IAS dans le projet Planck: <http://www.ias.u-psud.fr/dole/vulgarisation/Telesonne20091211.wmv>. Les principaux résultats cosmologiques demanderont, quant à eux, près de deux années supplémentaires de traitement et d'analyse des données, afin d'arriver à un premier ensemble de données traitées et disponibles pour la communauté scientifique mondiale vers fin 2012.

complémentaires sur l'état de l'Univers à cette époque. Ces informations sont capitales, car elles permettent de préciser des modèles que seules des variations de température jusqu'alors relevées ne permettaient de trancher.

## FIGURE 1

Description du satellite Planck.



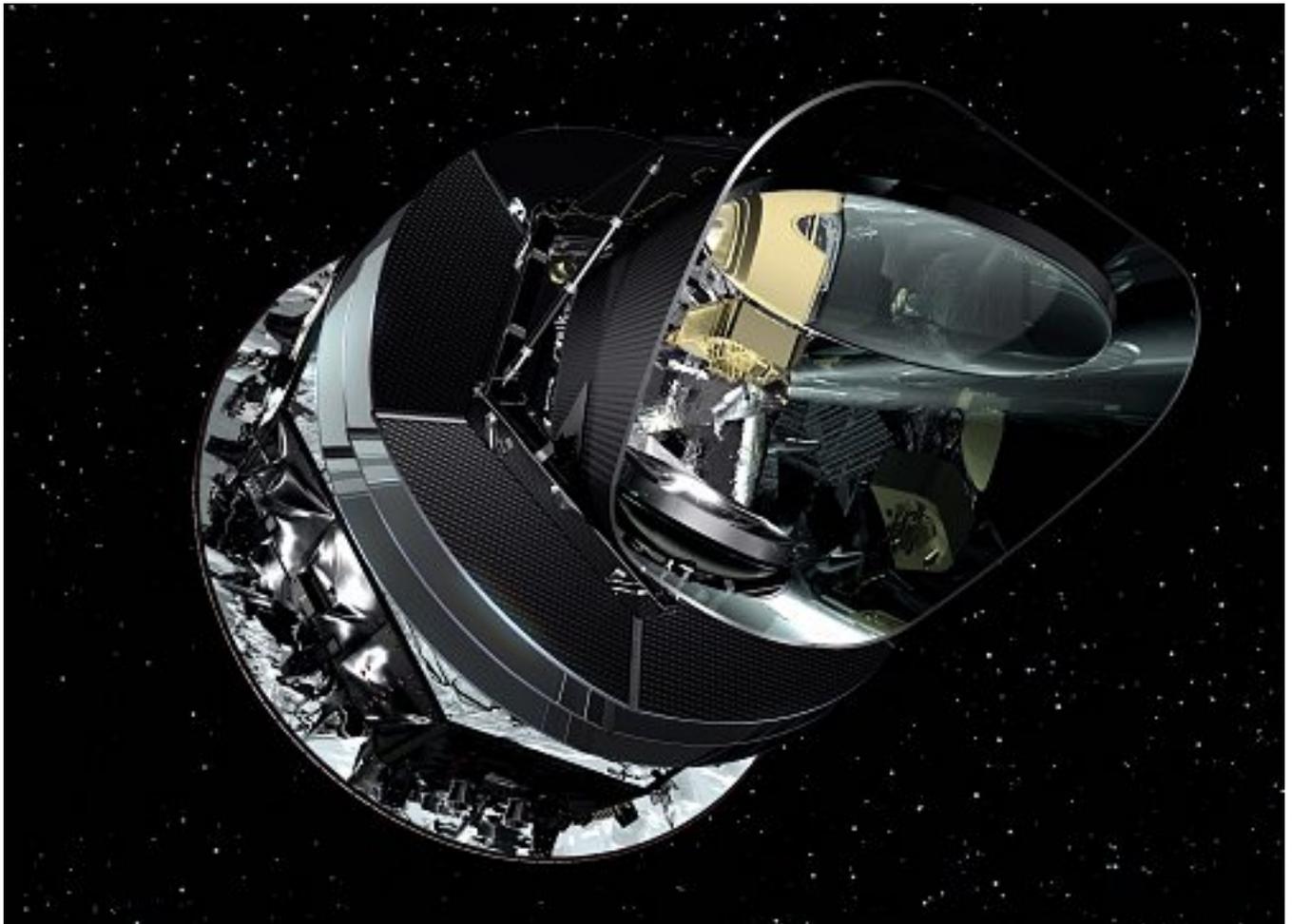
© HTTP://PUBLIC.PLANCK.FR

## 2 Architecture cryogénique

Le système de réfrigération fait appel à des technologies complètement nouvelles. La base du satellite étant chauffée par le panneau solaire et l'activité de l'électronique embarquée, un premier refroidissement passif à  $-225\text{ °C}$  ( $50\text{ K}$ ) se fait au niveau de radiateurs (écrans noirs situés à la base du satellite) par rayonnement thermique (car dans le vide interplanétaire un échange de chaleur par conduction est impossible) pour isoler le télescope et les instruments scientifiques. Puis deux refroidisseurs successifs permettent d'atteindre d'abord  $-253\text{ °C}$  ( $20\text{ K}$ ), puis  $-268\text{ °C}$  ( $4,5\text{ K}$ ). La dernière étape est découpée en deux : une première partie de ce système cryogénique refroidit à  $-271,4\text{ °C}$  ( $1,6\text{ K}$ ). Il fonctionne par détente Joule-Thomson du mélange hélium 3/hélium 4 et pré-refroidit les gaz purs de la dilution ainsi que les filtres de l'instrument HFI; la seconde partie de ce système refroidit à  $-273\text{ °C}$  ( $0,1\text{ K}$ ). Il fonctionne par dilution d'hélium 3 dans l'hélium 4 en circuit ouvert, le mélange étant ensuite évacué dans l'espace. La mission prendra donc fin lorsque la totalité de l'hélium sera épuisée.

## Des prouesses technologiques pour répondre aux objectifs scientifiques

Pour être sûr d'avoir des données probantes, le satellite observe le ciel dans une large gamme de fréquences (au nombre de neuf). On obtient alors des images (appelées cartes) avec des sources mélangées (poussière galactique, FDC, bruit, synchrotron galactique...). Il faut ensuite séparer les différentes composantes astrophysiques indépendantes grâce à des algorithmes de traitement de données. Ces observations ne s'effectuent pas dans des longueurs d'onde correspondant au domaine visible, car l'émission du FDC y est trop faible. On préférera une étude faite dans le domaine millimétrique et sub-millimétrique, où le FDC est maximum en intensité : Planck observe donc dans les micro-ondes. L'étude des différentes composantes permet non seulement une optimisation de leur soustraction pour l'étude du FDC mais offre également la possibilité de répondre à de nouvelles questions traitant des plus grandes structures de l'Univers (amas de galaxie, galaxies lointaines) jusqu'aux structures plus voisines (formation stellaire et physique du gaz dans notre propre Galaxie). L'étude du FDC est déterminante pour la cosmologie. Les données collectées par les différentes campagnes d'observation pré-Planck tendent à favoriser la théorie de l'inflation, car elle permet de rendre compte de l'incroyable uniformité statistique du FDC et de la géométrie plate de l'Univers. Si l'on regarde le FDC avec un faible niveau de contraste, on se retrouve face à une émission uniforme sur tout le ciel : la température et la polarisation de cette « première » lumière sont identiques, quelle que soit la direction d'observation dans le ciel ; autrement dit le FDC est isotropiquement distribué dans le ciel. Une telle uniformité est la signature d'un Univers extrêmement homogène au moment de la formation des premiers atomes cosmiques. Mais à y regarder de plus près, on observe d'infimes variations de température (au millième de pourcent) et de polarisation (au dix-millième de pourcent). Ces points chauds et froids, appelés anisotropies, soulignent quant à eux la présence de faibles inhomogénéités dans l'Univers au moment de la libération des photons du FDC. Ces inhomogénéités ont évolué pour former les galaxies et autres grandes structures cosmiques. Cependant les données actuelles ne sont pas suffisantes. Les nombreux modèles d'inflation jusqu'à présent construits sont donc pour la plupart issus de nouvelles propositions théoriques en physique des hautes énergies ou en gravitation quantique. Cela changera avec les résultats de Planck, qui devraient permettre de discriminer entre trois grandes classes de modèles d'inflation issus de la physique des hautes énergies. La théorie de l'inflation fournit une solution à la question de l'origine des perturbations cosmologiques car elle est le moteur d'un mécanisme de production des



© ESA / A0ES MEDIALAB

Image d'artiste du satellite Planck vu de face.

### 3 Un consortium de laboratoires

Les laboratoires français ont joué un rôle crucial dans la conception, le développement et la maîtrise d'œuvre de l'instrument **HFI** (High Frequency Instrument). En particulier :

- l'**Institut d'Astrophysique Spatiale** (IAS: CNRS, Université Paris-Sud, OSU/INSU) a joué le rôle principal en assurant la conception initiale et la responsabilité scientifique et technique de l'instrument. Il a de plus assuré l'intégration et les tests de l'instrument fini, et est responsable des opérations en vol de HFI;
- l'**Institut d'Astrophysique de Paris** (IAP: CNRS, Université Pierre et Marie Curie, OSU/INSU) il héberge le centre de traitement des données et est responsable de cette activité;
- le **Centre de recherches sur les très basses températures**, aujourd'hui Institut Néel (CNRS) et le **Laboratoire de Physique Subatomique et Cosmologie** (LPSC: CNRS, Université Joseph Fourier, Institut Polytechnique de Grenoble) ont joué un grand rôle dans le développement de la cryogénie à respectivement 0,1 K et 20 K;
- le **Centre d'Etudes Spatiales des Rayonnements** (CESR: CNRS, Université Paul Sabatier, OMP-OSU/INSU) dans celui de l'électronique de lecture des détecteurs;
- le **Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire** (LAL: CNRS, Université Paris-Sud) dans celui de l'ordinateur de bord de l'instrument;
- le laboratoire **AstroParticule et Cosmologie** (APC: CNRS, Université Paris-Diderot, CEA, Observatoire de Paris) dans le développement de moyens de tests;
- le **Laboratoire d'AstrOphysique de Grenoble** (LAOG: CNRS, Université Joseph Fourier, OSUG-OSU/INSU) et le **Laboratoire d'Etudes du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique** (LERMA: CNRS, Observatoire de Paris, Université Cergy-Pontoise, Université Pierre et Marie Curie, Ecole Normale Supérieure), ont apporté leur expertise dans la modélisation de l'instrument.

faibles inhomogénéités, avec les bonnes propriétés statistiques, par amplification des fluctuations quantiques\*. En fin d'inflation, l'Univers se trouve donc non seulement rempli de sur et sous-densités locales, mais aussi d'un bain d'ondes gravitationnelles\* primordiales. Cette bouffée de gravitons primordiaux n'a toujours pas été détectée, mais l'observation

des anisotropies de polarisation (dite de mode B) du FDC permettrait d'en observer les effets. Enfin, puisque l'inflation se base sur des nouvelles constructions théoriques, tester cette dernière grâce aux FDC, en général, et aux données de Planck, en particulier, c'est aussi interroger par l'observation les fondements de la physique. L'échelle d'énergie de l'inflation est encore peu connue mais pourrait atteindre  $10^{16}$  GeV (2 mégajoules); une énergie de 13 ordres de grandeur supérieure à l'énergie sondée au nouveau collisionneur du CERN, le LHC. L'univers primordial est donc un formidable laboratoire de nouvelle physique fondamentale (physique des hautes énergies et, évidemment, gravitation quantique) et c'est par l'observation du FDC que nous avons accès à ce laboratoire. Si les récents collisionneurs de particules, de part les gigantesques énergies qu'ils sondent, sont qualifiés d'incroyables microscopes, alors il est évident que la nouvelle ère d'observations du FDC inaugurée par Planck constituera le plus «incroyable microscope» jamais conçu.

## FIGURE 2

Le plan focal de HFI dans la cuve Saturne de la station d'étalonnage de l'IAS, lors des phases d'étalonnage.



© M. CHARRA / IAS.

## 4 Étalonnage d'HFI

L'étalonnage d'un instrument consiste à établir les relations entre les valeurs numériques qui nous parviennent de la chaîne de mesure via la télémétrie du satellite, et le flux, en unités physiques, des sources astronomiques observées. A cet effet, un simulateur de ciel et d'environnement pour l'instrument HFI a été construit dans la station d'étalonnage de l'IAS. Ce simulateur comprend une cuve, Saturne, refroidie à 2 K (- 271,15 °C), et des sources de rayonnement équivalentes à celles qui sont attendues dans l'espace, comme le rayonnement du fond cosmologique micro-onde. Ce simulateur doit reproduire également toutes les interfaces mécaniques et thermiques dont HFI aura besoin lorsqu'il sera intégré dans le satellite. Deux campagnes d'étalonnage ont été réalisées, sur le modèle de qualification puis le modèle de vol. Cette dernière a duré 6 semaines sans interruption durant l'été 2007. Elle a permis de vérifier que les performances de l'instrument au sol atteignaient nos estimations les plus optimistes, et d'apprendre à le faire fonctionner dans une large gamme de conditions possibles en orbite.

## Quinze années de projet

La température du FDC n'excède plus aujourd'hui 2,725 K (soit - 270,435 °C). Ses fluctuations intéressantes les astrophysiciens étant d'environ dix millièmes de degré: des appareils de mesure extrêmement froids ont été mis au point afin qu'ils puissent détecter ces plus infimes variations de température sur le ciel. Pour pouvoir mener les observations dans les meilleures conditions il a fallu concevoir un satellite audacieux grâce à de nombreuses prouesses technologiques. Le satellite Planck (figure 1) est constitué d'un module de service / plate-forme, d'un télescope, et du plan focal contenant deux instruments de mesure: HFI et LFI pour High et Low Frequency Instrument. La principale prouesse technologique du satellite consiste à embarquer des instruments scientifiques dont certaines parties sont refroidies à 0,1 Kelvin, soit environ - 273 °C et sont stables au millionième de degré. Ce tour de force est obtenu grâce à l'évacuation de la chaleur avec des radiateurs et l'empilement de plusieurs étages de réfrigérateurs novateurs (encadré 2). Les performances de l'optique et de l'électronique qui manipulent le signal constituent d'autres prouesses technologiques inégalées. L'ensemble de la construction d'un instrument scientifique spatial et la préparation du traitement des données ont été le défi technologique et organisationnel le plus important qu'un consortium de laboratoires (encadré 3) ait eu à relever dans ce domaine. C'est une grande aventure humaine qui s'étale sur plus de quinze années, avec chaque jour un programme chargé et de nombreuses difficultés liées à la complexité de cette entreprise. C'est aussi avec beaucoup d'enthousiasme et de motivation que nous avons été témoin de l'avancement de ce projet: passer de sa conception, à son assemblage et

aux premiers essais au sol furent passionnant mais les derniers préparatifs, le lancement puis le retour des premières données furent vraiment l'occasion de réaliser et de savourer l'étendue du travail fourni par tant de personnes. Revenons sur les principales étapes de la mission.

## Etape 1: Les phases d'intégration

Les phases d'intégrations sont parmi les phases les plus palpitantes d'un projet. Tout ce qui a été pensé et réalisé pendant des années prend alors forme. La première phase d'intégration a été l'étalonnage du plan focal de l'instrument HFI, étape indispensable et cruciale pour l'exploitation par les scientifiques des données que fournira l'instrument en vol (**encadré 4**). La particularité de ce projet est que le satellite Planck est construit autour des instruments HFI et LFI. L'intégration des instruments sur le satellite et celle du satellite lui-même sont donc simultanées. Toutes les équipes travaillent alors ensemble: les équipes de l'industrie (Thales Alenia Space Cannes) pour le satellite Planck lui-même; l'équipe de l'IAS assistée d'experts des laboratoires coopérant pour l'instrument HFI (**encadré 5**); l'Agence Spatiale Européenne (ESA) pour le suivi du projet Planck. La phase suivant cet étalonnage a été l'intégration de l'instrument sur le satellite (**figures 2 et 3**). Ces opérations ont été effectuées chez le constructeur du satellite. L'instrument commence alors à prendre vie, et cette phase se termine lorsque le satellite et les instruments sont complètement intégrés. Certains essais fonctionnels ne peuvent être menés que si le satellite se trouve en ambiance spatiale, c'est-à-dire sous vide, avec une température inférieure à  $-265^{\circ}\text{C}$ . Ces essais ont été effectués au Centre Spatial de Liège, qui a fourni le simulateur spatial, à savoir: un caisson à vide de grande dimension pouvant accueillir le satellite, tapissé d'écrans refroidis (**figure 4**). Ce sont des essais qui ont mobilisés toutes les équipes, et qui ont duré plus d'un mois, 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7. La fin de ce test donne le signal du grand départ pour la campagne de lancement. Planck est envoyé à Kourou par avion (**figure 5**).

## Etape 2: La Campagne de lancement

La campagne de lancement comprend toutes les activités qui permettent d'intégrer le satellite sur le lanceur Ariane 5, de vérifier le fonctionnement de l'ensemble après cette intégration, et d'effectuer toutes les opérations qui mettront le satellite et les instruments en configuration pour le vol. Nous rejoignons alors les équipes du champ de tir (Centre Spatial Guyanais de Kourou) et les équipes du lanceur. Les activités des instruments pendant cette campagne se sont étalées sur trois mois, et elles se

FIGURE 3

Intégrations des instruments scientifiques et du satellite à Thalès Cannes.



© M. CHARRA / IAS.

FIGURE 4

Installation du satellite Planck dans le simulateur spatial du centre spatial de Liège.



© M. CHARRA / IAS.

FIGURE 5

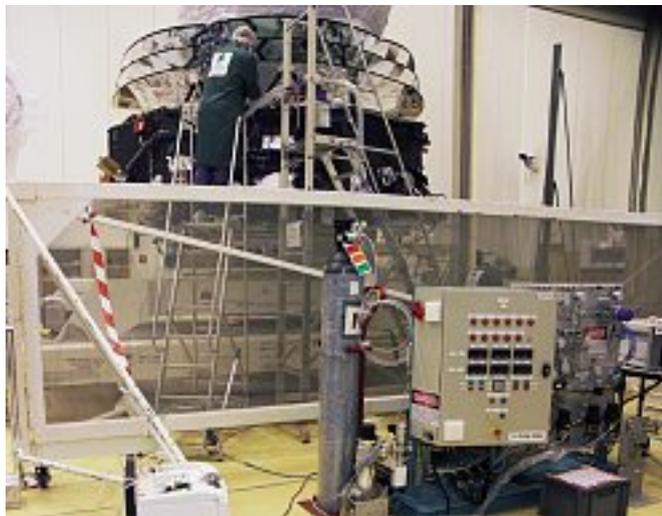
Départ de Planck (dans la caisse blanche au fond de l'avion) en Antonov 124 de l'aéroport de Liège-Bierset le 19 Février 2009 pour le centre spatial de Guyane.



© A. ARTS.

## FIGURE 6

Campagne de lancement à Kourou au centre spatial de Guyane : remplissage des sphères d'hélium pour le bon fonctionnement de HFI.



© M. CHARRA / IAS

## 5 L'instrument HFI, une coopération mondiale

HFI est le fruit du travail de plus de dix laboratoires, instituts et d'industriels, d'Europe et des Etats-Unis. De nombreux points hautement technologiques ont été développés et maîtrisés par des équipes internationales, comme la fabrication des détecteurs travaillant à 0,1 Kelvin par nos collègues américains du JPL, l'ensemble électronique permettant de reproduire fidèlement le signal des détecteurs (l'image du ciel) construites par nos collègues Italiens et du CESR à Toulouse, ou les optiques très froides, fournies par nos collègues Anglais qui ont aussi fourni le refroidisseur permettant d'atteindre 4,5 Kelvin, température usuelle des conteneurs à hélium de nos laboratoires. Le LAL d'Orsay a fourni le système de contrôle / commande qui permet, aujourd'hui de communiquer avec l'instrument, et conduit la réflexion sur les modes de fonctionnement en vol, tandis que le LPSC à Grenoble a livré les électroniques de gestion des refroidisseurs français et américain. Ces équipements sont tous issus de l'héritage technologique développé par ces équipes et amené au plus haut niveau pour satisfaire aux exigences de l'instrument embarqué sur Planck. L'IAS enfin, est maître d'œuvre de l'instrument, et a piloté les opérations d'étalonnage (à Orsay et ailleurs), et est responsable des opérations en vol durant toute la mission. Notons le rôle essentiel du CNES qui a permis et soutenu le développement de la dilution Hélium 3- Hélium 4 permettant de refroidir les détecteurs à 100 mK.

déroulent en parallèle aux activités des équipes du satellite Herschel, qui partage la coiffe du lanceur. Les satellites arrivent dans une première salle blanche où sont effectués tous les tests fonctionnels des satellites et des instruments scientifiques. Sont ensuite effectuées sur les instruments scientifiques les activités qui ne peuvent être faites trop longtemps avant le tir. Pour Planck, ce fut le remplissage des sphères en hélium 4 et hélium 3 (figure 6). Les deux satellites sont ensuite transportés dans un autre bâtiment en zone sécurisée où est effectué le remplissage des réservoirs d'hydrazine, combustible qui permet de manœuvrer les satellites en vol. Est également effectuée la mise en configuration des instruments. Les satellites sont ensuite transportés dans le bâtiment lanceur, pour y être montés sur celui-ci. Cette opération est là encore suivie de tests fonctionnels. Cela a abouti, le 16 mai 2009, au décollage d'Ariane 5 lançant les satellites Planck et Herschel (figure 7). Après la séparation, le satellite Planck a continué sa course jusqu'au point Lagrange L2\* à 1,5 millions de kilomètres de la Terre.

## Etape 3 : Surveillance et contrôles

Après le lancement, commencent les « opérations », c'est-à-dire les activités liées à la surveillance et au contrôle à distance du satellite et de ses instruments scientifiques. En fonctionnement nominal, une unique station au sol de l'ESA, située en Australie, est utilisée pour communiquer avec le satellite. Cette station sol ne « voit » le satellite qu'une fois par jour et pendant 3 heures. En ce court laps de temps, les données acquises à bord du satellite pendant les dernières 24 heures sont descendues au sol. Les données sont ensuite acheminées au Mission Operation Center (MOC) de l'ESA à Darmstadt en Allemagne. Les ingénieurs du MOC ont en charge le pilotage du satellite : dynamique de vol, surveillance du bon fonctionnement et opérations de maintenance. Le MOC a également la responsabilité de mettre les données reçues à disposition des deux centres de traitement des données du consortium Planck. Pour ce qui concerne l'instrument HFI, le centre de récupération de ces données est assuré par l'Institut d'Astrophysique Spatiale à Orsay. L'IAS est donc à la fois le point d'entrée du traitement des données de Planck (récupération et premier niveau de traitement des données) et le centre des opérations de l'instrument HFI. Une salle spécialisée de l'IAS est aménagée dans IDOC (IAS Data and Operation Center) avec une batterie d'ordinateurs qui permettent de suivre en temps réel 3 heures par jour les données arrivant « directement » du satellite situé à 1,5 millions de kilomètres d'Orsay (figure 8). Chaque jour, les ingénieurs et les scientifiques effectuent une permanence pour surveiller les paramètres de bon fonctionnement et la qualité des signaux scientifiques acquis par l'instrument. Cette surveillance

(soutenue par l'infrastructure, les informaticiens de IDOC et les ingénieurs de Planck de l'IAS), est critique pour détecter une éventuelle défaillance, la partie la plus critique étant la chaîne cryogénique complexe permettant aux détecteurs de fonctionner nominale à 0,1 K. En effet, une rupture de cette chaîne de seulement quelques heures impliquerait un réchauffement quasi immédiat de l'ensemble des éléments, et par conséquent une nouvelle mise en froid d'une durée d'environ une semaine. Sachant que pendant ce temps l'instrument continuerait de consommer le très précieux mélange d'hélium 3 - hélium 4, sa courte durée de vie continuant de décroître et diminuant irrémédiablement la prise de données du ciel... Par ailleurs, les scientifiques et ingénieurs profitent également de ces heures de surveillance pour commencer le traitement et l'analyse des données.

par exemple. A l'issue de ce premier traitement, les données peuvent être projetées sous forme de cartes (ou images du ciel). Ces cartes sont la base des analyses scientifiques: ce sont elles qui contiennent l'ensemble des informations. La façon d'analyser ces cartes dépend ensuite de la science que l'on veut en extraire, c'est-à-dire des informations que l'on veut faire sortir. Selon que l'on s'intéresse davantage aux propriétés d'objets individuels, aux propriétés statistiques d'une classe d'objet, ou de type de rayonnement, les outils développés par les chercheurs relèvent davantage de techniques de photométrie, de traitement d'image ou d'analyse statistique et probabiliste. Parmi les défis liés à l'analyse de données, il y a tout d'abord l'étalonnage du satellite, c'est-à-dire la conversion des mesures physiques enregistrés par les détecteurs en unités

## Etape 4: Le traitement des données

L'analyse des données englobe des aspects divers du travail des scientifiques. Conceptuellement, on peut distinguer plusieurs étapes mais il faut cependant bien garder à l'esprit que le travail des scientifiques, s'il peut certes se concentrer davantage sur un aspect particulier, nécessite de faire de nombreux allers-retours entre ces différentes étapes. Comme tout télescope, Planck collecte des photons, qui interagissent avec les détecteurs pour fournir des variations de tension électrique qui sont enregistrées. Au premier stade, les données de Planck sont donc une collection de mesures dans des unités instrumentales (Volts par exemple). Une première étape consiste à soustraire de ces données certains effets parasites inévitables: contamination par le rayonnement cosmique de haute énergie, soustraction des dérives basses fréquences, correction de l'effet des constantes de temps de la chaîne de détection,

### FIGURE 7

Décollage réussi d'Ariane 5 vol 188, avec Planck et Herschel, le 16 mai 2009.



© 2008 - ESA/CNES/ARIANESPACE/ACTIVITÉ PHOTO OPTIQUE VIDEO CSG

### FIGURE 8

Panorama de la salle d'opérations Planck HFI à l'Institut d'Astrophysique Spatiale.



La salle d'opérations Planck de l'Institut d'Astrophysique Spatiale - The Planck Operation room at ASI, Orsay

© H. DOLE / IAS

comparables aux modèles théoriques (Kelvin par exemple par le biais de l'électronvolt). Une partie de cet étalonnage a été effectuée au sol, notamment à l'Institut d'Astrophysique Spatiale d'Orsay. Une autre partie ne peut s'effectuer qu'en vol et nécessite de connaître les caractéristiques de certaines sources astrophysiques pour caractériser Planck au moment où il les observe. Une difficulté est que l'on doit s'appuyer sur des mesures effectuées par d'autres instruments, qui ont eux-mêmes des sources d'incertitude de nature différente qu'il faut connaître et prendre en compte. Viennent ensuite les difficultés liées à la technique. Il y a tout d'abord le « rapport signal sur bruit » des données qui est très faible, malgré l'extrême sensibilité des détecteurs de Planck. Ceci a deux conséquences : il faut acquérir un grand nombre de mesures pour réduire le bruit statistique, donc gérer un gros volume de données (plusieurs téraoctets); certains traitements ne peuvent se faire qu'avant la projection sur les cartes et souffrent donc de l'incertitude sur les échantillons individuels. Il y a également des difficultés d'ordre algorithmique. Les opérations mathématiques de traitement du signal ou d'extraction de l'information sont complexes et coûteuses en ressources informatiques, et requièrent l'utilisation de supercalculateurs pour être menées dans des délais à échelle humaine. Le faible rapport signal sur bruit des données instantanées, même si les cartes finales sont dominées par le signal, implique le recours à de nombreuses simulations et des estimations statistiques dits Monte-Carlo, car basés sur des procédés aléatoires, qui sont donc nécessairement longs et complexes à mettre en œuvre. Ils nécessitent à chaque fois de remonter toute la chaîne de traitement pour voir l'impact d'un paramètre sur les produits finaux. Planck s'appuie sur une infrastructure informatique spécialement développée, ainsi que sur des ordinateurs massivement parallèles à l'Institut d'Astrophysique de Paris (IAP) - cluster dédié à Planck de 1 128 cœurs, offrant 13 Teraflops - et des

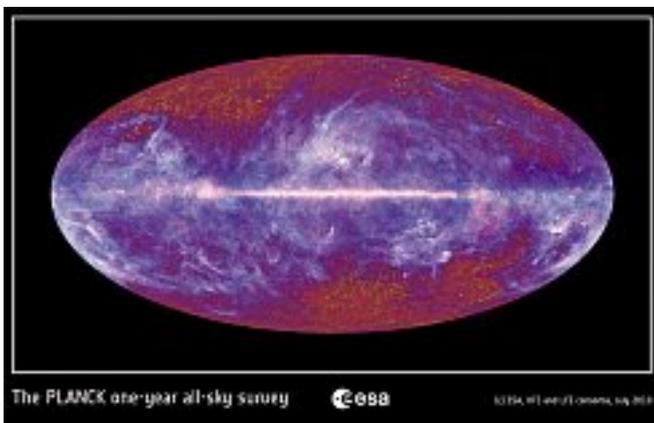
centres de calculs tels que celui de l'IN2P3 à Lyon ou le NERSC à Berkeley (USA) qui offrent jusqu'à 38 000 processeurs. Par exemple, la création des images de Planck de tout le ciel (voir image plus bas), à partir des données brutes nécessite environ 2 jours de calculs sur la machine dédiée de l'IAP, avec des algorithmes développés par les laboratoires d'Orsay (LAL), de Paris (IAP) et de Grenoble (LAOG et LPSC). Cela pourrait se convertir en environ 6 ans de calcul sur un seul ordinateur personnel, s'il avait suffisamment de mémoire, de disque (environ 200 Teraoctets) et de performances d'accès aux disques (la machine dédiée Planck permet de lire l'équivalent de 11 CD-ROMs par seconde). Une grande partie du traitement des données en vue de mesurer la polarisation du FDC est commune au cas de la température. Les mêmes effets instrumentaux et la superposition des mêmes composantes astrophysiques doivent être pris en compte et mélangés. La difficulté supplémentaire est que le signal recherché est encore plusieurs ordres de grandeur plus faible que la température et requiert donc un contrôle de tous les effets parasites d'autant meilleur. On touche véritablement ici aux limites de ce que peut faire l'instrument et de ce que l'on sait faire pour cette génération de télescopes.

## Des premiers résultats à la hauteur du défi

Les premiers résultats de Planck sont à la hauteur des attentes, et couvrent un domaine scientifique large, des propriétés de la poussière dans notre Galaxie, aux plus grandes structures de l'Univers. En juillet 2010, une image exceptionnelle de l'intégralité du ciel provenant du tout premier relevé (**figure 9**) juste achevé, du satellite Planck, mettait en évidence les deux sources de rayonnement du ciel les plus importantes dans le domaine des micro-ondes : le FDC et la Voie lactée. Les minuscules fluctuations de température du FDC portent la trace des germes des grandes structures cosmiques qui se sont formées plus tard, comme les galaxies ou les amas de galaxies. Cette première image de tout le ciel représente une synthèse particulière de toute l'information que Planck est en train de collecter. Elle a été spécifiquement traitée pour mettre en valeur l'émission de notre Galaxie. Cette image provient des données de Planck collectées pendant les neuf premiers mois de sa mise en service. Le satellite poursuit ses mesures et devrait fournir au moins 3 autres relevés complets du ciel : prévu pour durer 12 mois (soit 2 relevés complets du ciel), Planck devrait finalement observer le ciel pendant 34 mois grâce aux excellentes performances de son système cryogénique. Le principal obstacle qui limite la précision de la cartographie de l'émission du fond cosmologique sur le ciel entier est le fait qu'elle se superpose à l'émission provenant du milieu interstellaire de notre propre galaxie. Le parti pris de Planck a été de ne pas concentrer tous les

### FIGURE 9

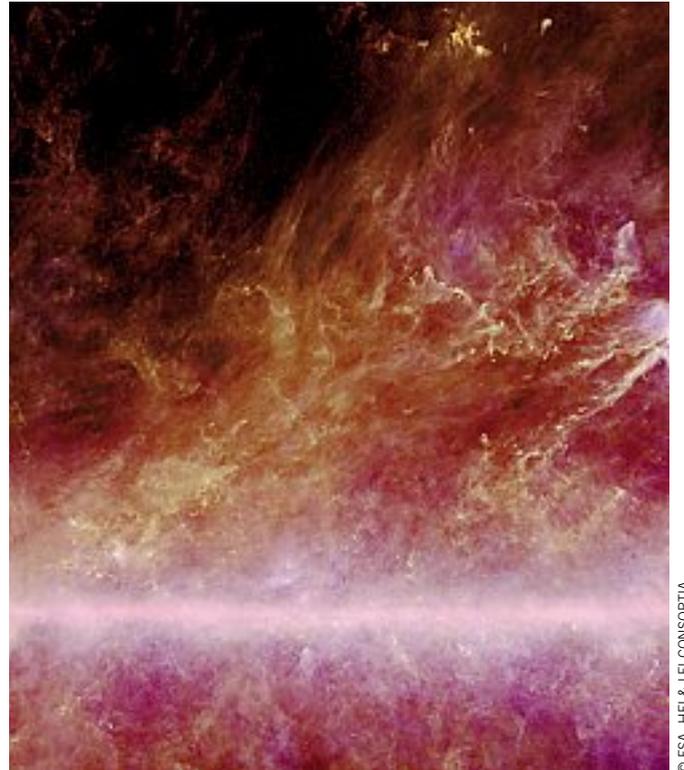
Le premier ciel complet observé par Planck durant sa première année.



détecteurs aux fréquences où le fond cosmologique est le plus fort, mais d'étendre le domaine spectral vers des fréquences où l'émission Galactique est dominante, spécifiquement pour être en mesure de mieux la comprendre et ainsi optimiser sa soustraction. De ce fait, Planck est un projet majeur pour l'étude du milieu interstellaire de la Voie Lactée puisqu'il fournit des cartes du ciel complet dans un domaine de fréquences pratiquement vierge pour l'astrophysique Galactique (figure 10). Parce que Planck est équipé de filtres polariseurs, il permet aussi pour la première fois de sonder la structure du champ magnétique dans le milieu interstellaire. Cette avancée est majeure car le champ magnétique joue un rôle indéniable dans l'organisation et la dynamique de la matière interstellaire. Une des questions principales qui anime les recherches en astrophysique est celle de la formation des étoiles. Le processus qui transforme la matière interstellaire chaude et diffuse en étoiles est complexe et il fait intervenir plusieurs étapes clés que Planck permet d'étudier. Avec sa grande couverture spectrale, Planck détecte l'émission de la poussière interstellaire, ces petits grains qui sont chauffés par le rayonnement des étoiles et qui irradient dans le domaine infrarouge et submillimétrique. Planck détecte aussi l'émission des électrons libres (rayonnement de freinage) situés dans les régions les plus chaudes du milieu interstellaire et l'émission des rayons cosmiques spiralant autour des lignes du champ magnétique Galactique (rayonnement synchrotron). La combinaison de ces émissions permet d'avoir une vue détaillée de milieu interstellaire, révélant ainsi certains secrets des différentes étapes de l'évolution de la matière interstellaire qui mènent à la formation des étoiles. Planck permet entre autre d'étudier les nuages interstellaires les plus diffus, ceux où débute le processus de condensation du gaz. Ces nuages, qui composent la majeure partie de la matière interstellaire, sont le lieu des toutes premières étapes de la formation des étoiles. Ce milieu est turbulent, magnétique et en proie à de fortes transitions de phases. La lumière émise par la poussière interstellaire et détectée par Planck permet de cartographier directement la structure de ces nuages mais aussi la structure du champ magnétique. Pour la première fois Planck nous donne accès sans ambiguïté à la structure du milieu interstellaire diffus façonnée par cette physique complexe, non-linéaire et chaotique, et donc de mieux comprendre les conditions initiales de la formation des étoiles. Planck permet également l'étude des régions les plus denses de notre Galaxie, là où naissent les étoiles. Les données permettront d'apporter des éléments de réponse à l'une des grandes questions de l'astrophysique qui concerne la compétition entre l'effondrement gravitationnel des cœurs denses qui donnent naissance aux étoiles, et le rayonnement puissant des premières étoiles formées qui chauffent et dispersent le nuage dont elles sont issues, limitant ainsi le potentiel de formation des nuages.

FIGURE 10

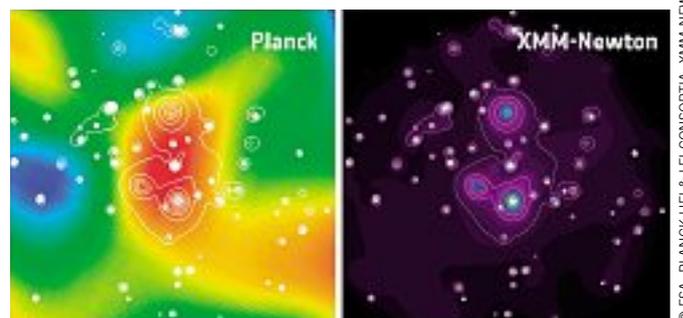
Poussières froides détectées par Planck dans une région de notre Galaxie (couvrant environ 50 par 50 degrés carrés). Le plan de notre Galaxie est visible comme une bande brillante horizontale au quart inférieur de l'image. L'image est une composition de l'émission observée à l'aide du satellite IRAS à 100 microns de longueur d'onde (violet) et des données Planck (orange et rouge) à 350 microns (857 GHz) et 550 microns (543 GHz).



© ESA, HFI & LFI CONSORTIA

FIGURE 11

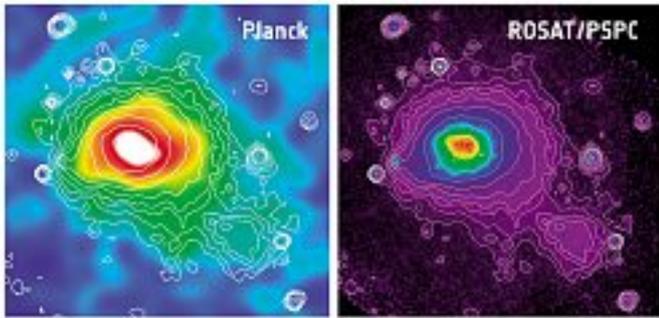
Image composite multi-fréquences d'un superamas de galaxies découvert par Planck (à gauche, le rouge signifiant un excès d'émission dû à l'effet Sunyaev-Zel'dovich dans le domaine des ondes submillimétriques) comparée à l'image dans le domaine des rayons X obtenue avec le satellite XMM-Newton (à droite). Les contours blancs indiquent les régions où l'émission en rayons X est de même intensité. La taille de l'image est d'environ 15 x 15 minutes d'arc sur le ciel, la moitié de la taille de la Lune.



© ESA, PLANCK HFI & LFI CONSORTIA, XMM-NEWTON

FIGURE 12

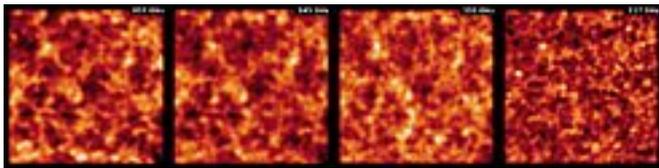
L'amas Coma, bien étudié, est très chaud et contient un millier de galaxies identifiées. Il présente une émission forte dans le domaine des rayons X (image de droite) obtenue avec le satellite ROSAT, et montre un effet Sunyaev-Zel'dovich fort et étendu (image composite multi-fréquences de gauche) obtenue avec Planck.



© ESA, PLANCK HFI & LFI CONSORTIA, AND ROSAT

FIGURE 13

Un champ de 26 degrés carrés (soit environ 130 fois la Lune) observé par Planck à 350 microns de longueur d'onde dans lequel apparaissent des fluctuations liées aux grandes structures de galaxies format des étoiles.



© ESA, PLANCK HFI CONSORTIUM

## Les plus grandes structures de l'Univers

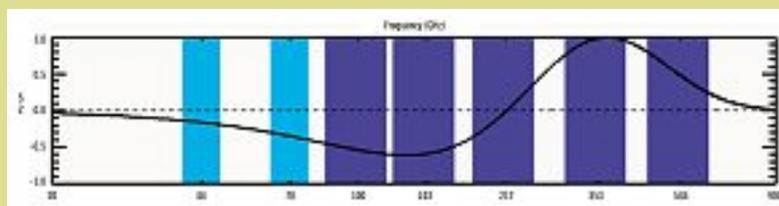
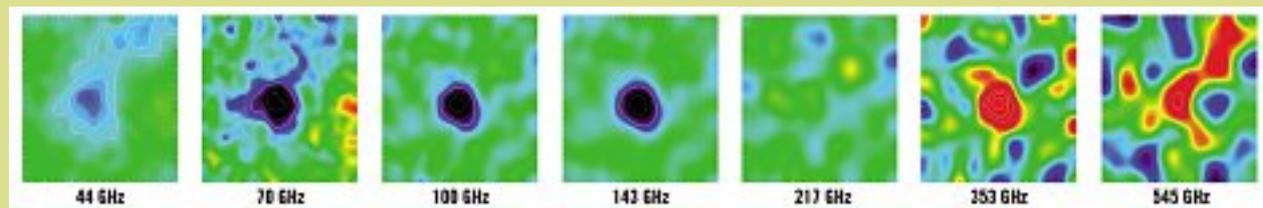
Au cours de leur parcours à travers l'univers, les photons du rayonnement fossile interagissent avec la matière qu'ils rencontrent. Ces interactions laissent des empreintes chargées d'informations précieuses sur l'évolution de l'univers. C'est notamment le cas de l'effet Sunyaev-Zel'dovich (SZ)\* (encadré 6) produit par l'interaction des photons avec le gaz chaud des amas de galaxies. Le satellite Planck est de ce fait unique et idéal pour observer dans la direction des amas de galaxies l'effet SZ. Les premières observations de l'intégralité du ciel tout juste achevées nous ont déjà permis de découvrir de nouveaux amas de galaxies, voire des structures encore plus grandes: des superamas de galaxies. Environ 200 amas viennent d'être publiés. Un programme d'observations complémentaires alloué par le responsable scientifique du satellite XMM-Newton, a permis de confirmer la découverte de nouveaux amas. En particulier, les observations faites avec XMM-Newton d'un «candidat amas» ont révélé qu'il était en réalité un superamas constitué d'au moins trois amas de galaxies (figure 11). C'est la toute première fois que l'on découvre un superamas de galaxies grâce à l'effet Sunyaev-Zel'dovich. L'autre atout essentiel de l'objet Planck réside dans le fait que c'est la seule expérience capable d'observer le ciel entier et donc de former une image des grandes échelles angulaires en plusieurs couleurs dans les ondes millimétriques. Ceci est mis en évidence de manière éloquent par l'image composite multi-

## 6 Illustration de l'effet Sunyaev-Zel'dovich (SZ)

La frise d'images en haut illustre l'effet dans le cas d'un amas de galaxie connu et proche, Abell 2319. La variation de couleur due de l'effet Sunyaev-Zel'dovich SZ est observée avec les deux instruments de Planck,

LFI et HFI, de 44 à 545 GHz. Le signal négatif (zone sombre centrale) est indiqué en bleu alors que le signal positif (zone brillante centrale) est indiqué en rouge. Le schéma en dessous montre la perte ou le gain en énergie, d'un

point de vue théorique, dus à l'effet SZ (bandes de sensibilité de LFI à 44 et 70 GHz en bleu clair, bandes de sensibilité de HFI de 100 à 545 GHz en bleu foncé). L'accord entre prédiction et observation est remarquables!



© ESA, PLANCK HFI & LFI CONSORTIA

fréquences de l'amas Coma obtenue avec Planck et comparée à l'émission dans le domaine des rayons X du gaz chaud obtenue par le satellite ROSAT (figure 12). Coma est un amas bien étudié, qui couvre plus de 2 degrés sur le ciel, c'est à dire plus de quatre fois la taille apparente angulaire de la Lune. Il est très chaud et présente donc une émission forte dans le domaine des rayons X (image de droite) ainsi qu'un effet SZ fort et étendu (image de gauche). Grâce à ces deux images, X et SZ, et en utilisant des observations à d'autres longueurs d'onde – visible ou infrarouge, il est possible d'en apprendre beaucoup plus sur les processus physiques en action dans ces objets exceptionnels. Enfin, Planck vient de découvrir l'émission de galaxies très lointaines en train de former des étoiles, dans une « lueur cosmique de galaxies » (appelée rayonnement extragalactique,

ou fond diffus infrarouge, voir Plein Sud Spécial recherche 2008-2009) (figure 13). L'étude de ces émissions est utile pour comprendre comment la matière ordinaire s'agence à grande échelle avec la matière noire pour former les galaxies. Ainsi la mission Planck est une formidable aventure scientifique, technique et humaine longue d'une quinzaine d'années ayant comme résultante en mai 2009, le lancement d'un satellite innovant et performant. En l'espace d'un an et demi, celui-ci a déjà cartographié le ciel dans son intégralité renvoyant ainsi aux scientifiques rattachés au projet les prémices d'une révolution scientifique, à venir puisqu'il lui reste encore un an pour accumuler toutes les données nécessaires à la résolution des plus grands mystères de notre Univers. Les premiers résultats scientifiques publiés en janvier 2011 confirment ces attentes. ■

## Glossaire

### **Cosmologie :**

Etude de l'Univers dans son ensemble : son histoire, sa structure et son évolution.

### **Effet Sunyaev-Zel'dovich (SZ) :**

Il s'agit de l'interaction entre les photons issus du FDC avec le gaz chaud présent à l'intérieur des amas de galaxies provoquant des légers changements de fréquence des photons. L'effet SZ est très caractéristique, car, observé aux fréquences inférieures à 217 GHz (soit 1,3 mm de longueur d'onde), il apparaît comme une zone donnée du ciel plus sombre que la moyenne (signal négatif) mais il est plus brillant (signal positif) aux plus hautes fréquences. L'effet est nul à la fréquence 217 GHz, il n'y a alors pas de variation de brillance.

### **Énergie noire :**

Il existe une forme d'énergie inconnue en laboratoire qui impliquerait l'univers lors de son expansion. C'est, aujourd'hui, la forme d'énergie la plus abondante.

La mission Planck pourrait nous permettre une analyse combinée de plusieurs observations cosmologiques et mettre en évidence les propriétés atypiques et inconnues de l'énergie noire.

### **Fluctuation quantique :**

Phénomène caractéristique de la physique à petite échelle. Comportement éminemment imprévisible d'un système.

### **Fond cosmique diffus (FDC) :**

Il s'agit de la plus ancienne lumière encore présente dans l'Univers. Datée à 380 000 ans après le Big Bang, elle correspond au moment où l'Univers devient transparent, la lumière est alors aisément diffusée dans le milieu. Le FDC est aussi appelé rayonnement fossile.

### **Matière noire :**

L'existence de la matière noire a été mise en évidence grâce à la vitesse de rotation des étoiles autour du centre de la galaxie. En déterminant la masse visible de l'ensemble de notre galaxie on obtient une vitesse théorique de rotation des étoiles autour du centre de la galaxie puisque la vitesse et la masse sont proportionnelles. Cependant, d'après les observations faites, cette vitesse est beaucoup plus grande. La masse de la galaxie est donc plus élevée, ce qui suggère l'existence d'une matière appelée « noire » car elle n'émet aucune lumière et nous est donc invisible. Il existe d'autres observations indépendantes confirmant la présence de ce qui peut être interprété comme de la matière noire.

### **Onde gravitationnelle :**

C'est une onde associée à la force de gravité, se propageant à la vitesse de la lumière. L'onde gravitationnelle émise consiste en une intime perturbation de la trame de l'espace et du temps. Elle posséderait une particule messagère véhiculant l'interaction : le graviton (analogue du photon avec les ondes électromagnétiques). De tels phénomènes n'ont encore jamais été observés directement.

### **Point L2 de Lagrange :**

Il s'agit du point situé sur l'axe reliant le Soleil et la Terre pour lequel un objet (ici le satellite), d'une masse très inférieure par rapport à celle de la Terre, reste en quasi-équilibre. Afin d'éviter toute nuisance due au rayonnement direct du Soleil, de la Terre et de la Lune, on place certains satellites d'observation de l'Univers (comme Planck, mais aussi Herschel, WMAP et d'autres en projet) en ce point distancé à 1,5 millions de kilomètres au delà de la Terre.

### **Polarisation de la lumière :**

En plus de l'intensité, la lumière peut transporter de l'information par son état de polarisation. Assimilable à une orientation, la lumière garde ainsi une mémoire plus riche de la façon dont elle interagit avec l'environnement.