

# LIVRET DE L'ENSEIGNANT

**Propositions pour 8 séances  
à la découverte de la mission Planck**



**Hfi PLANCK**  
un regard vers l'origine de l'Univers

# BIENVENUE DANS LE MONDE DE LA MISSION SATELLITE «PLANCK»

Notre mallette s'adresse à vous, les enseignants de physique/chimie en lycée. Grâce à elle, vous pouvez, par exemple, travailler avec vos élèves sur le thème « science et vision du monde » et mettre en place une démarche projet à travers l'enseignement d'exploration « Méthodes et pratiques scientifiques » (MPs).

L'objectif de la mallette Planck est de vous fournir un support simple d'utilisation et au contenu adaptable à vos propres besoins en classe. Elle vous aidera, nous l'espérons, à consolider les connaissances de vos élèves en physique, à les initier à la démarche scientifique et à leur montrer comment la science d'aujourd'hui fonctionne. Elle vous permettra ainsi d'atteindre vos divers objectifs pédagogiques tout en s'appuyant sur un seul et même objet d'étude.

En effet, grâce à sa portée scientifique ainsi qu'en raison de son originalité technologique, Planck se prête parfaitement à un usage scolaire. À vos élèves, la mallette se doit de donner le goût de la science, plus particulièrement de la cosmologie, en les familiarisant avec les métiers scientifiques et techniques. Planck leur permettra également de découvrir le caractère interdisciplinaire et international d'une mission spatiale.

Il est à noter que les activités proposées sont conçues pour un travail en commun avec le professeur de mathématiques et, si souhaité, avec le professeur d'anglais (dernière séance). Les durées des activités sont purement indicatives.

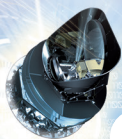
Les séances 1 à 3 sont dédiées à l'astrophysique et la cosmologie, les séances 4 à 7 sont liées au satellite, ses instruments et ses mesures, la séance 8 est une séance de synthèse qui aborde aussi les aspects "humains" du projet, en anglais comme il se doit pour un projet international.

Les séances 1 à 4 sont accessibles à tout niveau de lycée - avec plus ou moins d'aide du professeur selon la classe. La séance 5 sur la trajectoire est spécialement adaptée au programme de seconde. Les séances 6 à 8 pourraient, en revanche, être difficiles d'accès aux classes de seconde ; mais le quizz peut être fait pour clore le travail sur Planck.

Les présentations sont disponibles sur le DVD, en format PPT pour pouvoir être modifiées si besoin.

Pour une exploitation optimale de cette mallette, n'oubliez pas de vous rendre sur notre site internet :

[www.planck.fr](http://www.planck.fr)



# 1/ QUELQUES ÉLÉMENTS POUR FAIRE DE L'ASTROPHYSIQUE ET DE LA COSMOLOGIE

## SUPPORTS :



Présentation : «Observer et comprendre notre Univers»



Vidéo : «Cartographier l'Univers»



Document : «Spectres de 2 galaxies» (livret élève et ci-après)

## ACTIVITÉS :

### \* Projection de la présentation et visionnage du film inclus (45')

Toutes les galaxies que l'on voit sont de véritables observations et non des simulations.

#### Suggestions de questions collectives :

- De quoi a-t-on besoin pour situer une galaxie dans l'univers ?

*Il faut trois coordonnées pour situer un point dans l'espace. On utilise les coordonnées sphériques : la position est donnée par 2 angles et la distance.*

- Quelle coordonnée est difficile à mesurer ?

*La distance qui doit être estimée en utilisant des "règles" astronomiques, d'après la luminosité ou la vitesse des galaxies essentiellement.*

- Pourquoi voit-on des "tranches" d'Univers ?

*Ces tranches correspondent aux zones du ciel observées. À priori, on retrouve une distribution similaire des galaxies entre les tranches observées - c'est ce qu'on appelle l'isotropie de l'Univers. Les observations d'objets très lointains prennent énormément de temps ; on ne peut donc couvrir qu'une petite partie du ciel avec les instruments actuels.*

- L'Univers proche de nous est-il isotrope ?

*Non, pas du tout. Il faut avoir un grand volume, se placer à un minimum de 500 millions d'années-lumière, pour que l'Univers soit effectivement isotrope. On est alors à une échelle cosmologique.*



## \* Mesures et calcul (45')

- Mesurer la vitesse de 2 galaxies en utilisant l'effet Doppler :  $\Delta\lambda / \lambda = v / c$  en utilisant plusieurs raies pour chacune des galaxies (spectres et valeurs numériques dans le livret de l'élève). Vérifier a posteriori que cette loi simple peut s'appliquer ici (soit  $v \ll c$ ).

*Spectre noir :  $v \sim 0$ , spectre rouge :  $v \sim 10\,583\text{ km/s}$ , c'est bien négligeable devant la vitesse de la lumière.*

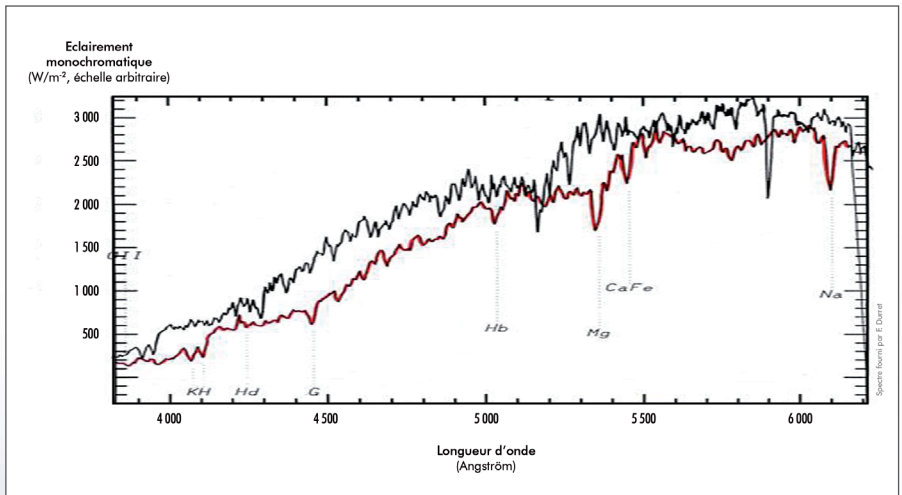
- Commenter le cas d'Andromède (spectre noir).

*Sa vitesse par rapport à nous est négligeable : c'est la galaxie la plus importante de l'amas local, avec la Voie Lactée. En fait, si on regardait des spectres à plus haute résolution, on verrait que ces deux galaxies tombent l'une sur l'autre : elles sont trop proches pour que l'expansion de l'univers domine leurs mouvements relatifs.*

- En déduire la distance de l'autre galaxie en utilisant la loi de Hubble (valeur numérique dans le livret de l'élève).

$$v = H_0 d, \text{ donc } d = 10\,583 / 70.4 \sim 150 \text{ Mpc}$$

## Spectres de 2 galaxies





## 2/ MODÈLE DE CONCORDANCE :

### DESCRIPTION CONTEMPORAINE DE L'UNIVERS

#### SUPPORTS :



Présentation : « Le modèle de concordance »



Documents : « Tableau de mesures du satellite Hubble »  
« Spectres de 2 galaxies » (livret élève et ci-après)



Document : « Carte des observations d'Archeops » (livret élève)

#### ACTIVITÉS :

★ **Projection de la présentation** (20')

★ **Graphes, calcul et discussion** (40')

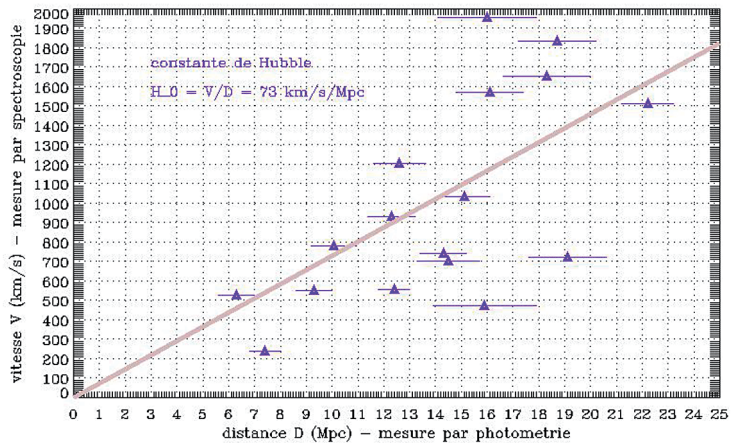
- Faire le diagramme de Hubble qui trace la distance en fonction de la vitesse avec les éléments du tableau suivant (1 pc = 1 parsec = 3,2616 al).

**Tableau de mesures du satellite Hubble**

Nom de la galaxie	Distance (Mpc)	Erreur sur la distance (Mpc)	Vitesse (Km/s)
NGC 925	9,29	0,69	553
NGC 1326A	18,7	1,5	1836
NGC 1365	18,3	1,7	1652
NGC 1425	22,2	1,0	1512
NGC 2090	12,3	0,9	931
NGC 2541	12,4	0,6	556
NGC 3198	14,5	1,2	702
NGC 3319	14,3	0,9	742
NGC 3351	10,05	0,88	779
NGC 3621	6,3	0,7	526
NGC 4321	16,1	1,3	1571
NGC 4414	19,1	1,5	720
NGC 4535	16,0	1,9	1957
NGC 4548	15,9	2,0	475
NGC 4725	12,6	1,0	1207
NGC 5457	7,4	0,6	241
NGC 7331	15,1	1,0	1035



- Tracer la droite qui passe par l'origine et au milieu des points.



- Commenter la dispersion des mesures.

*On mesure très précisément la vitesse ( $\sim$  pas d'erreur) mais c'est la vitesse totale qui est la combinaison des vitesses propre des étoiles, des vitesses propres des galaxies et de la vitesse d'expansion de l'univers. Il y a une large erreur sur la mesure de la distance car il faut prendre en compte plusieurs effets astrophysiques, et leurs incertitudes, pour déduire des mesures de flux lumineux la distance de ces étoiles spéciales.*

- Calculer la pente de la droite qui est la constante de Hubble aujourd'hui notée  $H_0$ . La comparer à celle donnée dans le livret élève.

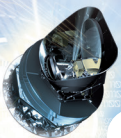
*$H_0 \sim 73 \text{ km/s/Mpc}$ . C'est à deux déviations standard de la meilleure mesure actuelle qui combine les mesures du rayonnement fossile, de Hubble et des oscillations baryoniques.*

- Calculer l'inverse de cette pente (astuce : écrire les unités et non tout convertir en SI).

*Résultat : seconde  $\times 10^6 \times 3,2616 \times$  années  $\times 300\,000 \text{ km/seconde} / 72 \text{ km} = 10^6 \times 3,2616 \times 300\,000 / 72$  années  $\sim 13$  milliards d'années.*

- Que représente cet âge ? Pourquoi ? Qu'a-t-on implicitement supposé ?

*C'est une estimation de l'âge de l'univers. En inversant la pente, on remonte le cours du temps pour trouver quand toutes les galaxies étaient - enfin auraient été - au même endroit. On a supposé que la vitesse d'expansion de l'Univers est constante au cours de toute l'histoire de l'univers car on ne mesure ici que  $H_0$ , c'est-à-dire la vitesse d'expansion de l'univers aujourd'hui. Cela fonctionne car c'est vrai pendant une suffisamment grande fraction de l'histoire de l'univers.*



## \* Recherche documentaire (30')

On essaie de reconstituer l'histoire de la matière tout au long de l'histoire de l'univers.

- Quand et comment se seraient produites les premières fluctuations ?

*Ce seraient des fluctuations quantiques du vide - prédites par la mécanique quantique, produites au tout début de l'univers et qui seraient devenues macroscopiques lors de l'inflation.*

- Que sont-elles devenues 400 000 ans après le Big-Bang, 10 milliards d'années après le Big-Bang ? Quelle force gouverne leur évolution ?

*Ce sont des grumeaux de matière - légères sur-densités ou sous-densités, qui apparaissent comme des zones un peu plus froides ou un peu plus chaudes dans la carte du rayonnement fossile. Sous l'effet de la gravité, le contraste de densité a considérablement augmenté et quelques milliards d'années plus tard, ces grumeaux sont devenus des galaxies et amas de galaxies.*

### Télescope spatial Hubble. Crédits : NASA



### 3/ LE RAYONNEMENT FOSSILE

#### QUELLES INFORMATIONS LIT-ON DANS LA PREMIÈRE LUMIÈRE DE L'UNIVERS ?

##### SUPPORTS :



Vidéo : « Big-Bang et rayonnement fossile »



Présentation : « Le rayonnement fossile et les premiers atomes »



Quizz : « Astrophysique générale » ([www.planck.fr](http://www.planck.fr))

##### ACTIVITÉS :

###### \* Visionnage de la vidéo & présentation (20')

La présentation comprend un visionnage complet du film par étape, l'intérêt et la méthode pour étudier le rayonnement fossile.

###### \* Graphe et interprétation (20')

- Prendre la carte des observations d'Archeops. Sachant que le zoom couvre  $30 \times 30$  degrés du ciel, en déduire la taille typique des fluctuations les plus marquées.

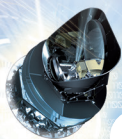
*1 degré*

- Dessiner un triangle Observateur - fluctuation.
- Quelle est la taille physique  $L$  de cette fluctuation sachant que la lumière a voyagé pendant tout l'âge de l'Univers ?

*C'est une approximation de considérer que  $d = c \times t$  dans un univers en expansion mais le calcul exact n'est pas simple.  $L \sim \sin(1 \text{ degré}) \times 13,6 \times 10^9$  années-lumière  $\sim 240$  millions d'années-lumière.*

- À quelle structure cette échelle correspond-elle dans l'univers ?

*Revoir ce qui a été dit à la séance 1. C'est la taille typique d'un amas de galaxies.*





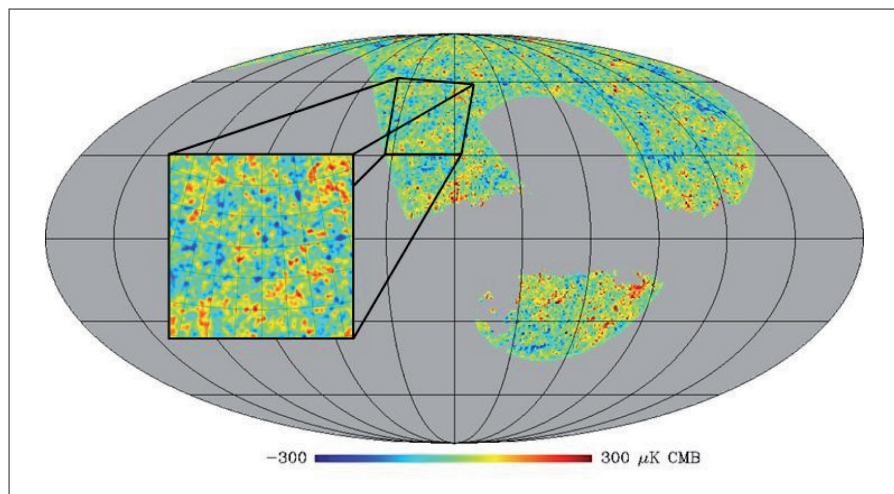
## \* Travail sur le site Planck (20')

Espace éducatif > Applet «Le rayonnement fossile et les paramètres cosmologiques»

- À l'aide de l'applet, observer comment évolue le spectre de puissance en fonction de chacun des paramètres. Retrouver les paramètres qui ajustent au mieux le spectre observé.

La densité totale  $\rho_{tot}$  affecte en priorité la position en multipoles des pics,  $t$  affecte l'amplitude du spectre car plus les étoiles se forment tôt, plus l'image est lissée.  $n_s$  caractérise la pente du spectre : le nombre de fluctuations de petites tailles par rapport aux fluctuations de grandes tailles.  $\rho_{tot} = 1.0$ ,  $t = 0.13$ ,  $n_s = 1.0$ .

## Carte des observations d'Archéops



## \* Quizz «Astrophysique et cosmologie» de 10 questions à faire sur le site Planck (30')



## 4/ LE SATELLITE PLANCK

Un satellite est une construction complexe qui doit contenir tous les éléments nécessaires aux observations et les mettre en œuvre de façon parfaitement fiable.

### SUPPORTS :



Vidéo : « Planck en bref »



Maquette : « Comment Planck est-il construit ? »

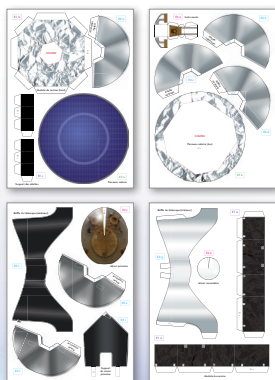
### ACTIVITÉS :

#### \* Visionnage de la vidéo (15')

Présentation synthétique de la mission, de la cosmologie aux observations

#### \* Construction de la maquette du satellite (1h15)

- A faire par petit groupe d'élèves.
- Le découpage et le montage doivent être soigneux pour que les éléments se mettent bien en place.
- Questions incluses, à chaque étape de la notice de montage, pour comprendre le rôle des divers éléments.
- Pour gagner du temps, demander éventuellement aux élèves de découper les éléments avant le cours.



## 5/ LE POINT DE LAGRANGE L2

### SUPPORTS :



Document : «Dossier\_lanceur\_latitude5»



Vidéos : «Lancement de Planck-Herschel»  
«Trajectoire de Planck»



Présentation : «La trajectoire de Planck»

### ACTIVITÉS :

#### \* Etude de document (45')

- Qu'appelle-t-on vitesse de libération ? Comment la calcule-t-on ? De quels paramètres dépend-elle ? Combien vaut-elle à la surface de la Terre ?

C'est la vitesse nécessaire pour se libérer de l'attraction d'un corps. C'est la vitesse  $v$  telle que  $\frac{1}{2} m v^2 = G m m' / r$ . Donc  $v = \sqrt{2 G m' / r}$ . Elle dépend de la masse de l'objet qui exerce l'attraction ( $6 \cdot 10^{24}$  kg), de la distance au centre de cet objet (6 378 km) - et de la constante de gravitation  $G$  bien sûr ( $6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$ ). La vitesse de libération de l'attraction terrestre depuis la surface de la terre est donc environ de 11,2 km/s soit plus de 40 300 km/h.

- Est-ce une vitesse importante ? Est-ce facile de se déplacer à cette vitesse ?

C'est une vitesse très importante - 40 fois celle d'un avion de ligne, 100 fois celle du TGV. Il faut une énergie considérable pour l'atteindre. Si la vitesse ne dépend pas de la masse, l'énergie pour l'atteindre si. C'est pourquoi les fusées larguent les parties devenues inutiles au fur et à mesure.

- Le port spatial européen de Kourou est considéré comme le mieux placé au monde. Pourquoi ?

Il est le plus proche de l'équateur terrestre et donc bénéficie donc de la plus forte accélération "naturelle", idéale pour les orbites géostationnaires.

- Planck va à L2. Quel type d'orbite doit-on choisir ? quels sont les avantages de cette position ?

On doit choisir la trajectoire hyperbolique ou orbite de libération. Cette position offre un point d'équilibre : peu d'énergie nécessaire. Les 3 éléments Terre / Soleil / Lune sont alignés : pas de pollution lumineuse ou thermique si on regarde dans la 1/2 sphère opposée à la direction du Soleil.

#### \* Présentation incluant les deux vidéos (45')



## 6/ UN INSTRUMENT EXTRÊMEMENT FROID

### SUPPORTS :



Vidéo : « Le satellite Planck en 3D »  
« Planck de la Terre au Ciel »



Présentation : « Au cœur du satellite »

### ACTIVITÉS :

#### \* Présentation (35')

- Rappel des objectifs du satellite
- Présentation de l'architecture cryogénique
- Présentation des détecteurs

#### \* Calcul et discussion (35')

- Calculer la fraction d'énergie évacuée à chaque étape de l'architecture cryogénique sachant que  $E = k T$  où  $T$  est la température en kelvin et  $k$  la constante de Boltzman. Les températures des étages sont 300 K, 50K, 18 K, 4 K, 1.6 K, 0.1 K.

$$f = (E_0 - E_1) / E_0 \times 100 = (T_0 - T_1) / T_0 \times 100$$

$$f = 83 \%, 64 \%, 78 \%, 60 \%, 94 \%$$

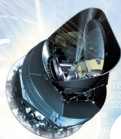
- Comparer l'efficacité cryogénique totale de Planck et celle de votre réfrigérateur. Commenter.

L'efficacité cryogénique de Planck est de  $(300 - 0,1) / 300 \times 100 = 99,96\%$  ;  
celle d'un réfrigérateur est de  $(293 - 275) / 293 \times 100 = 6 \%$ .

*Planck est évidemment beaucoup plus efficace. Il est néanmoins indispensable d'avoir toute une architecture cryogénique en "poupées russes" car aucune technique ne permet de refroidir directement de la température ambiante à moins d'un kelvin.*

#### \* Visionnage de la vidéo «Planck de la Terre au Ciel» (20')

- Film "autonome", pas de commentaire audio, quelques informations écrites.
- Relate les principales étapes de Planck, de la conception à la construction, des tests au sol au lancement.





## 7/ LES VRAIES DONNÉES DE L'INSTRUMENT PLANCK HFI

### SUPPORTS :



Vidéos : « Rayonnement fossile : du photon à la carte »  
« Planck cartographie le ciel »  
« Données "en temps réel" de l'instrument HFI »



Présentation : « Planck mesure le ciel micro-ondes »



Document : « Données en temps réel de l'instrument HFI »  
(livret élève et ci-après)

### ACTIVITÉS :

#### \* Présentation incluant les trois vidéos (30')

Inclut les 3 films, avec commentaires :

- Trajet du signal, d'abord optique puis électronique après le détecteur (commentaires audio inclus).
- Stratégie d'observation.
- Observations par plusieurs détecteurs en "temps réel".

#### \* Recherche documentaire et discussion (30')

- Qu'est-ce que le dipôle cosmologique ? Quelle est l'amplitude de cet effet ? Quels sont les mouvements en jeu ?

*C'est l'effet Doppler dû au mouvement propre de l'observateur par rapport à la surface qui correspond à l'émission du rayonnement fossile. Il a une amplitude de 3 mK, il est produit à 90 % par le mouvement du soleil dans notre galaxie et à 10% par le mouvement de la Terre autour du Soleil.*

#### \* Calcul et interprétation (30')

- Estimer le taux de "glitch" (impact de particule cosmique : laisse un pic étroit dans le signal) sur les détecteurs.

*Nombre d'impact par minute, environ 60.*



- Calculer le taux de glitch attendu. On réfléchira d'abord aux variables nécessaires.

On a la relation  $N = F \times \Omega \times S \times \Delta t \times \Delta E$  avec  $N$  le nombre de coups mesurés,  $F$  le flux de particules incident,  $\Omega$  l'angle solide vu par les détecteurs,  $S$  la surface sensible du détecteur,  $\Delta t$  le temps d'intégration et  $\Delta E$  la gamme d'énergie des particules incidentes. Le flux est typiquement de 5 000 particules / m<sup>2</sup> / sr / s / GeV entre 500 MeV et 1.5 GeV. Les détecteurs sont sensibles aux particules venant de toutes les directions (l'angle solide vaut donc  $4\pi$ ). La grille d'un bolomètre mesure entre 0.1 et 0.4 mm<sup>2</sup>, le thermistor environ 0.03 mm<sup>2</sup>.

Résultat :  $N \sim 5\,000 \times 4\pi \times 0.28 \cdot 10^{-6} \times 60 \times 1$ , soit environ 1 impact / minute.

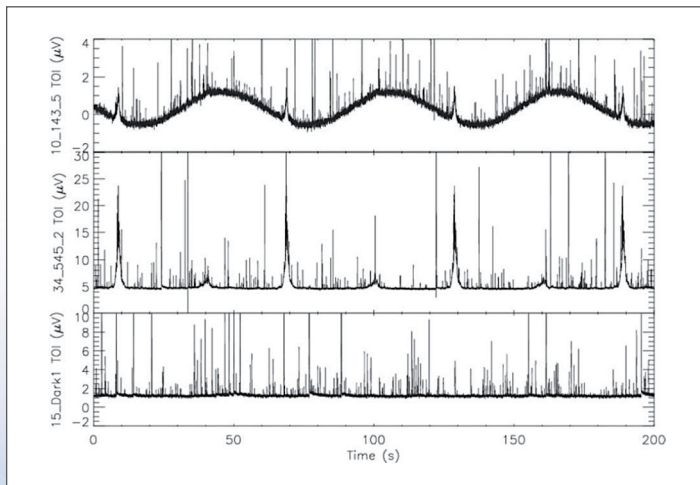
- Comparer les deux nombres et émettre des hypothèses sur l'origine du désaccord.

Il faut considérer chaque terme de l'équation : le temps et l'énergie étant des intervalles, ils sont corrects, l'angle solide est déjà maximale. Il faut donc soit augmenter le flux, en cas de création de particules secondaires par exemple, soit augmenter la surface : considérer que le détecteur "voit" le signal produit dans d'autres parties que la grille et le thermomètre.

Ce problème bien réel semble enfin avoir trouvé une solution : le taux observé est essentiellement dû aux impacts sur le substrat en silicium qui entoure le bolomètre. Il est isolé du bolomètre... mais pas assez et le bolomètre est en fait tellement sensible qu'il "voit" ces impacts. La surface de ce substrat est effectivement de l'ordre de 0.5 cm<sup>2</sup>.

Conclusion : il faut modifier le mode de fabrication des bolomètres pour les futures expériences qui seront au moins aussi sensibles que Planck-HFI.

### Données en temps réel de l'instrument HFI



## 8/ PLANCK EST UNE MISSION SPATIALE EUROPÉENNE

Comment fonctionne la science d'aujourd'hui et de quelles compétences a besoin un projet spatial ?

### SUPPORTS :



Vidéo : «Premier relevé du ciel» (reportage en anglais)



Fiches en anglais : «Planck in the economy of the pursuit of knowledge»  
«Discover our jobs»



Quizz : «Connaissance de Planck» ([www.planck.fr](http://www.planck.fr))

### ACTIVITÉS :

#### \* Visionnage du reportage (20')

Quelques éléments pour commenter les films :

- Résumé de la mission après la publication du ciel complet observé par Planck.
- Présentation par Jan tauber, le responsable de la mission Planck à l'ESA, l'agence spatiale européenne.

#### \* Lecture, compréhension et discussion de la fiche recto/verso (40')

#### \* Quizz «Connaissance de Planck» de 10 questions à faire sur le site Planck (30')

Etait-ce intéressant ? Auriez-vous aimé d'autres informations, d'autres activités ?  
N'hésitez pas à poser vos questions et à transmettre vos suggestions, critiques et remarques ! (Rubrique contact sur le site [www.planck.fr](http://www.planck.fr) ou par mail à l'adresse [planck@iap.fr](mailto:planck@iap.fr)).



POUR EN SAVOIR PLUS :  
**WWW.PLANCK.FR**

Contact : 01 44 32 80 52 - [planck@iap.fr](mailto:planck@iap.fr)



Cette mallette a été conçue et diffusée en partenariat avec le CVC (Centre de Vulgarisation de la Connaissance), le service de la Faculté des Sciences d'Orsay ([www.sciences.u-psud.fr](http://www.sciences.u-psud.fr)) avec le soutien du CNRS ([www.cnrs.fr](http://www.cnrs.fr)). Le CVC a pour mission de mettre le savoir à la portée d'un large public dans tous les domaines de la connaissance et plus particulièrement en science.



Canopée

L'agence Canopée a contribué à l'organisation des contenus pédagogiques et assuré la direction graphique de cette mallette.



Cette mallette est l'une des actions de diffusion de la connaissance du groupe de communication de la collaboration Planck-HFI France soutenues par le CNES.

