Séminaire CNES

Toulouse,
le 4 avril 2014

La charge utile PICARD

Présenté par : M. Meftah – CNRS – LATMOS (Ex. Service d'Aéronomie)

A. Hauchecorne, A. Irbah, J.-F. Hochedez, T. Corbard et toute l'équipe PICARD
LATMOS, OCA, IAS, CEA, CNES, IRMB, PMOD, CRAAG

Sommaire

La mission PICARD (rappel)

Les objectifs de la mission spatiale PICARD (rappel)

La charge utile PICARD

Les essais de qualification

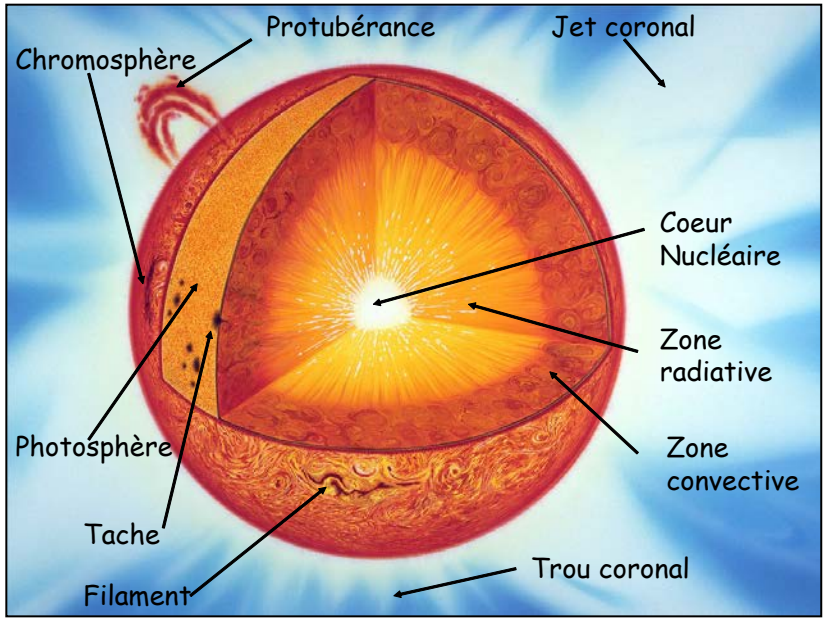
L'environnement spatial & le retour d'expérience

Principaux résultats de la mission PICARD (introduction)

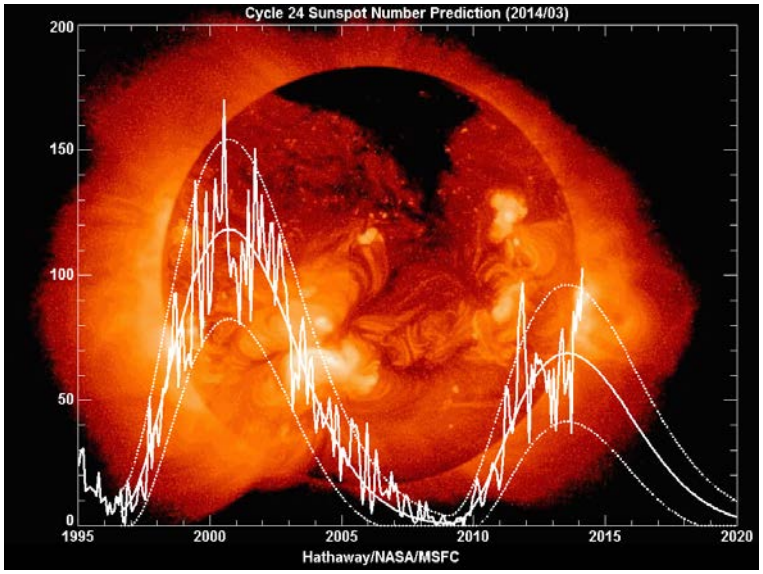
…

La mission PICARD

PICARD est une mission scientifique dédiée à l'étude du Soleil.
Son objectif est d'apporter des mesures spécifiques (diamètre solaire, aplatissement solaire, rotation différentielle, éclairement solaire total, éclairement solaire spectral, hélio-sismologie, *etc.*) pour approfondir notre connaissance du fonctionnement de notre étoile.

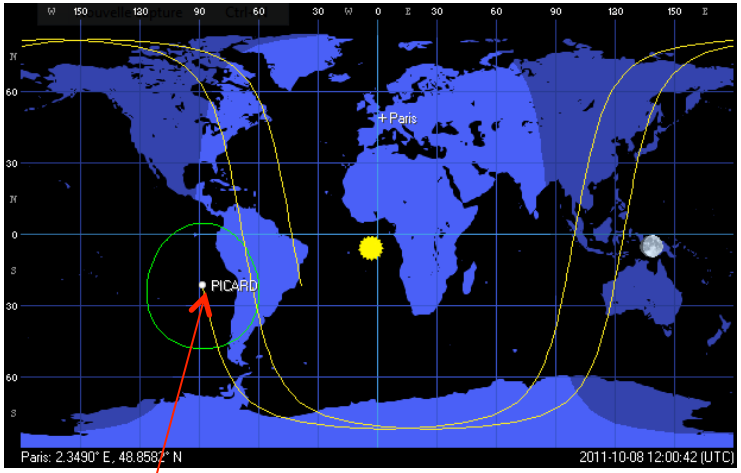


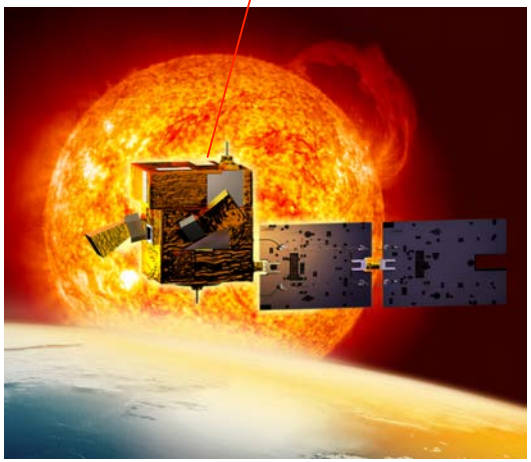
La mission PICARD a été ainsi nommée en hommage à l'astronome français Jean Picard (1620-1682) qui fut un des premiers à réaliser des mesures de précision du diamètre solaire.



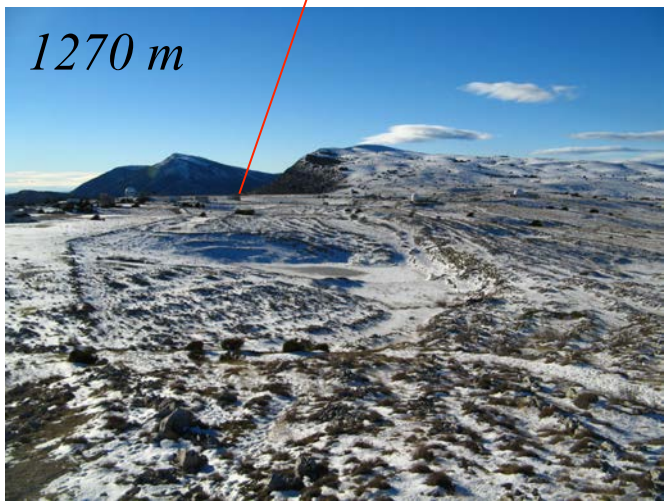
Ainsi, deux segments ont été développés :
- Un segment « spatial » → PICARD
- Un segment « sol » → PICARD SOL

La mission PICARD





PICARD *en orbite depuis juin 2010*
En phase F (retrait de service)



PICARD SOL *opérationnel depuis mars 2011*
En phase d'exploitation (plateau de Calern)

Etude de la structure du Soleil

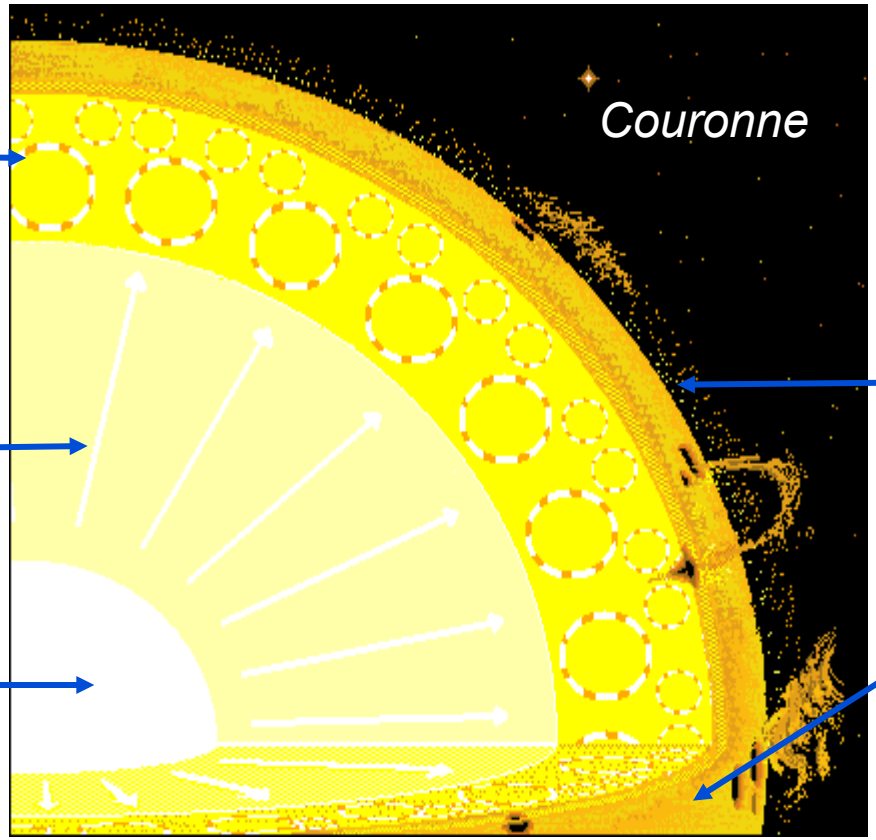
INTERIEUR

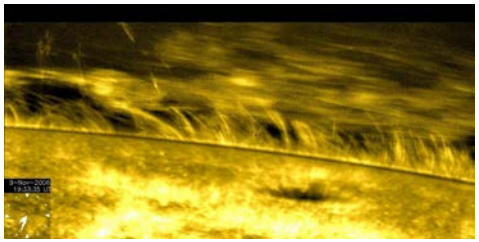
ATMOSPHERE

Zone Convective

Zone Radiative

Cœur nucléaire





Chromosphère

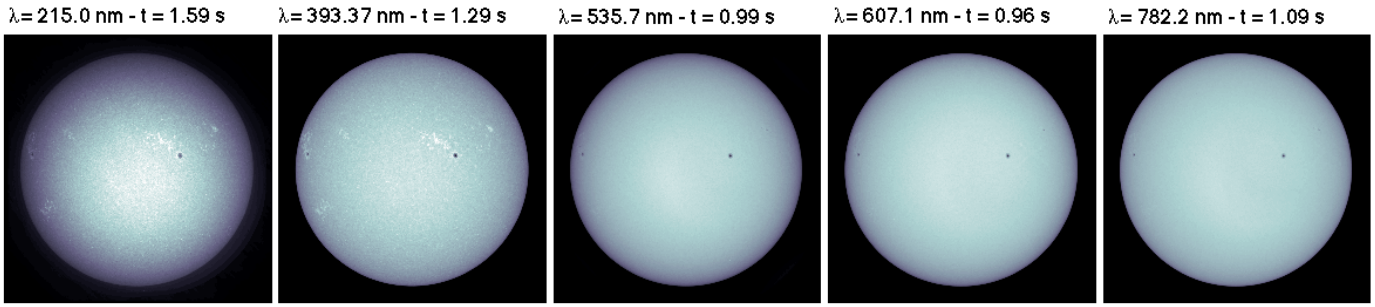
393.37 nm

Photosphère

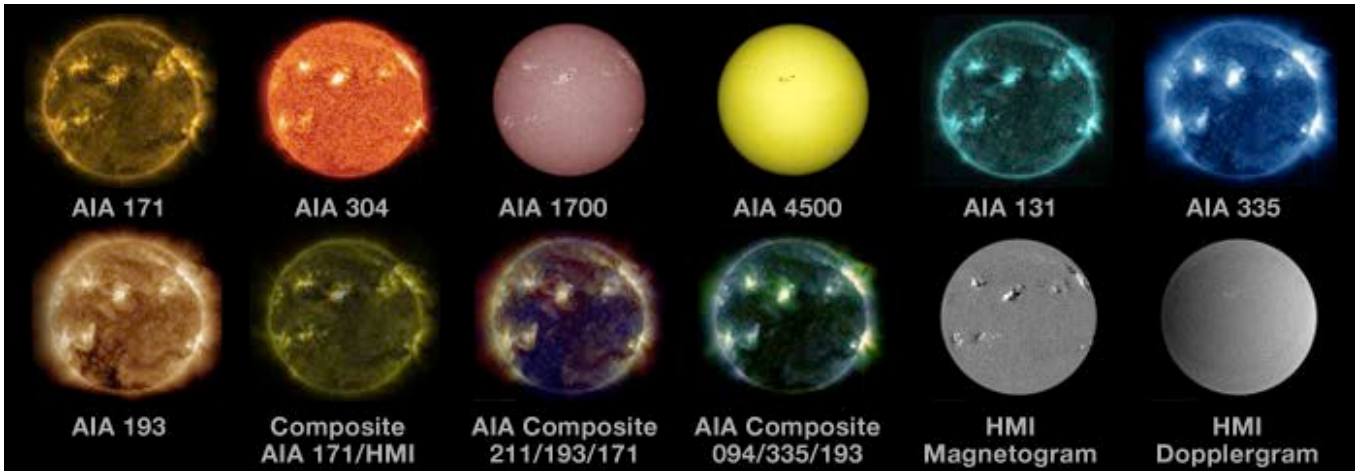
535.7, 607.1, 782.2 nm

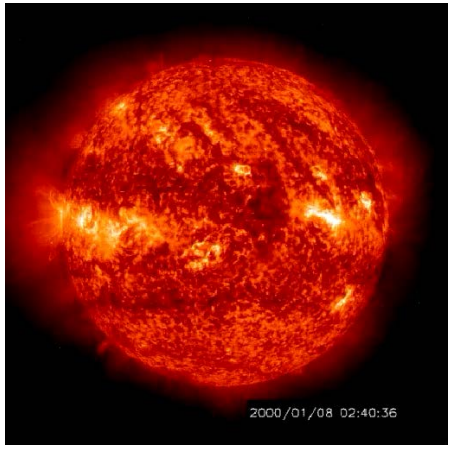
La mission PICARD et la coopération avec l'université de Stanford

PICARD



SDO





Les objectifs de la mission PICARD

- Astrométrie solaire

Mesurer le diamètre solaire et l'asphéricité solaire (valeurs absolues) ainsi que leurs variations au cours du temps.

- Radiométrie et photométrie

Mesurer l'éclairement solaire total (ou TSI pour « Total Solar Irradiance ») en absolu et au cours du temps. Impact sur le climat.

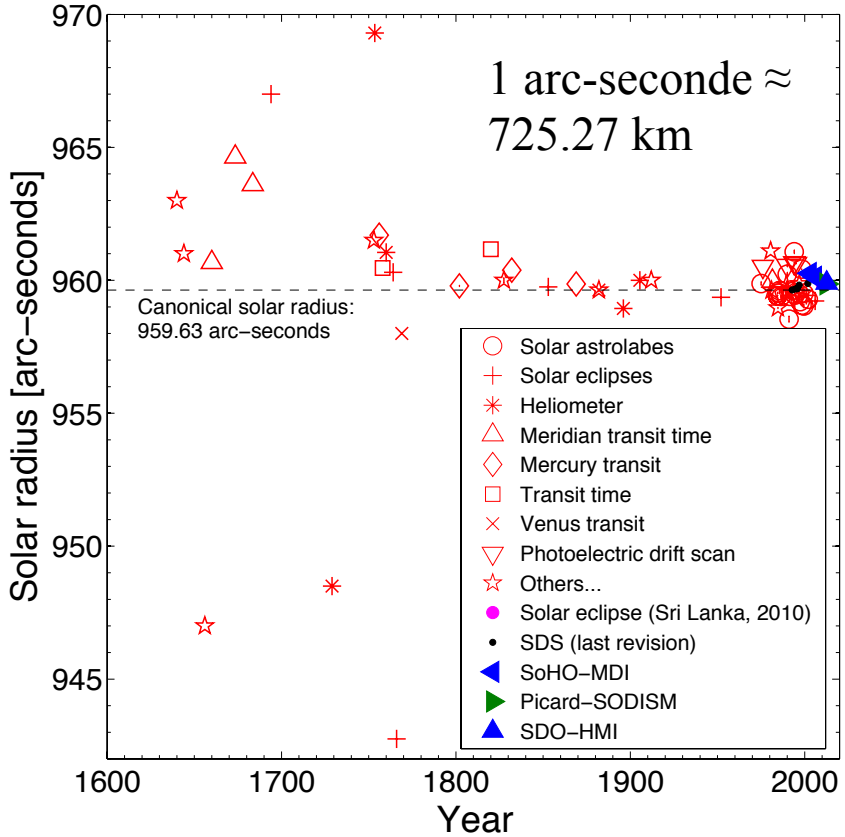
Etablir la relation : variation du diamètre / variation de l'éclairement (paramètre W).

Mesurer les variations de l'éclairement solaire spectral dans l'UV (influence sur l'ozone et le climat).

- Héliosismologie

Observations des oscillations acoustiques de basses fréquences et détection des modes de pression et de gravité (étude détaillée de la dynamique et de la structure du cœur nucléaire).

La problématique « Diamètre » - valeur absolue



Meftah, Corbard, Irbah et al., A&A, 2014

Jean Picard
(1620-1682)

Mesurer le diamètre d'une boule de gaz !

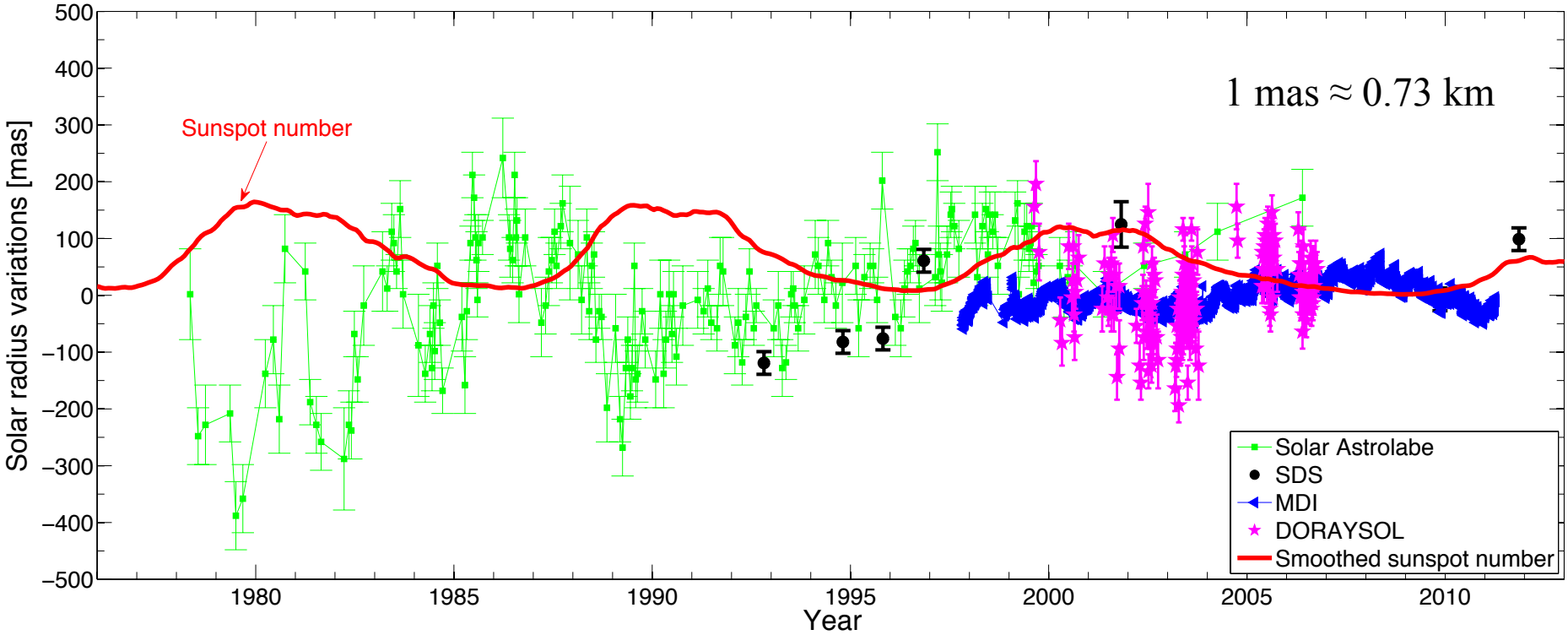
« Ce qui est incompréhensible, c'est que le monde soit compréhensible. »
A. Einstein

R ≈ 696,156 km (PICARD)

La problématique « Diamètre » - variations

Le diamètre du Soleil est-il variable ?
Au cours d'un cycle solaire ?
Depuis le minium de Maunder ?

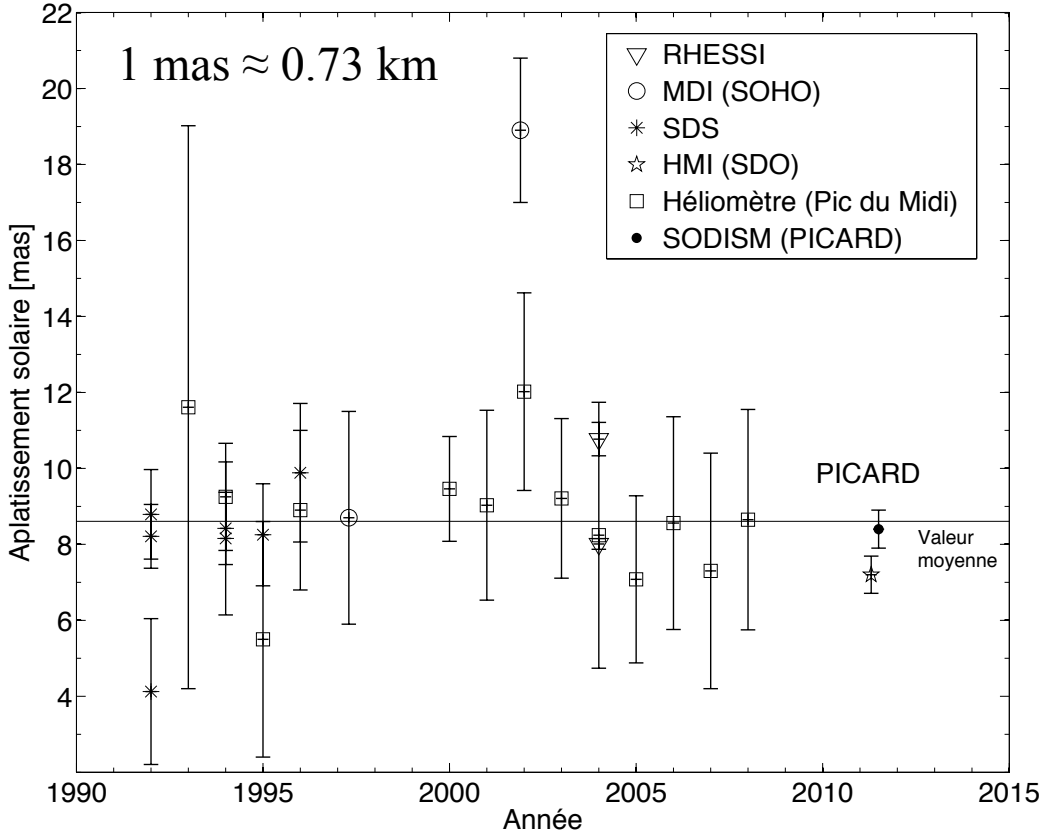
Francis Laclare (OCA) est à l'origine d'une longue série de mesures



Meftah, Corbard, Irbah et al., A&A, 2014

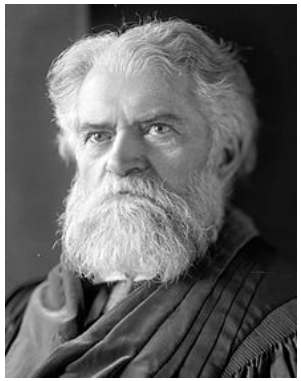
La problématique « aplatissement solaire » - valeur absolue

La mesure de l'aplatissement solaire donne des indications précieuses sur la rotation des couches internes du Soleil et sur l'activité de sous surface.

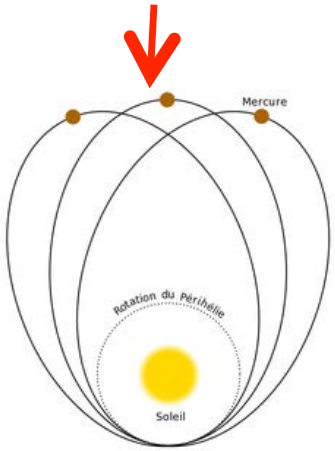


Irbah, Meftah, Hauchecorne et al., APJ, 2014

Urbain Le Verrier (1811-1877)



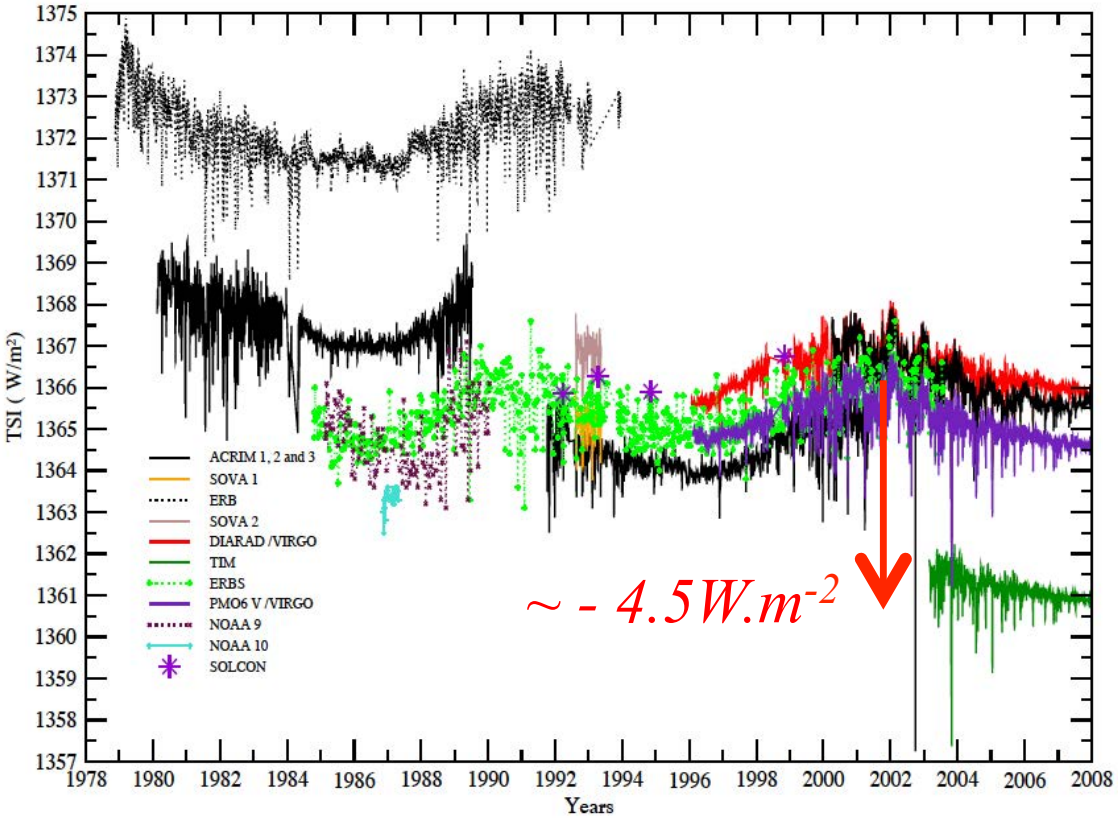
Simon Newcomb (1835-1909)



Première estimation de l'aplatissement solaire ≈ 500 mas

Etant données les perturbations gravitationnelles entre les planètes, à chaque révolution, l'orbite de Mercure se décale.

La problématique « TSI » - valeur absolue



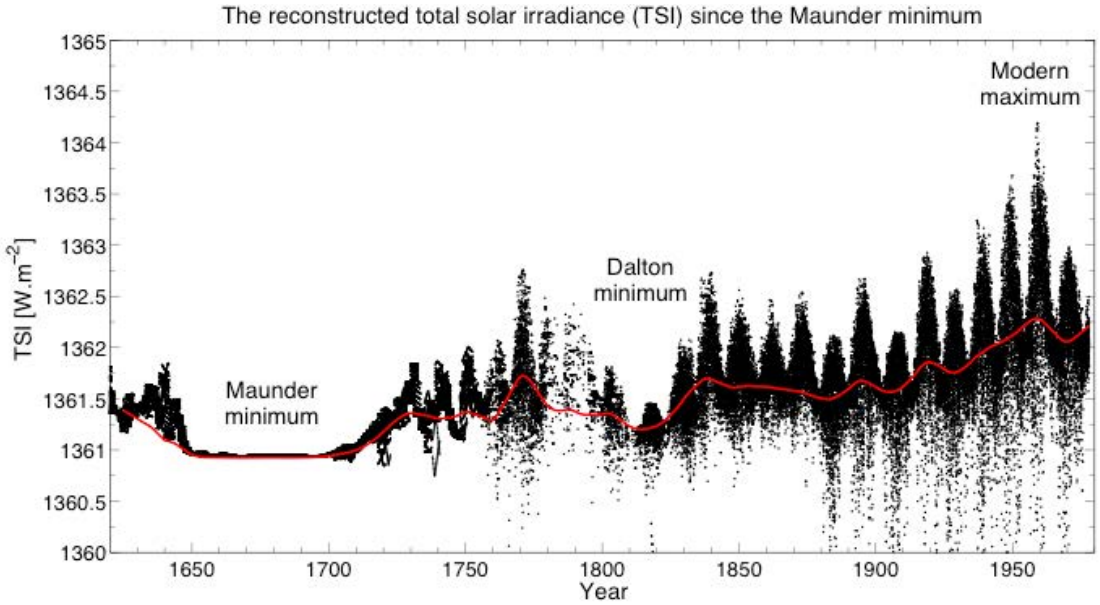
Claude Pouillet
(1790-1868)

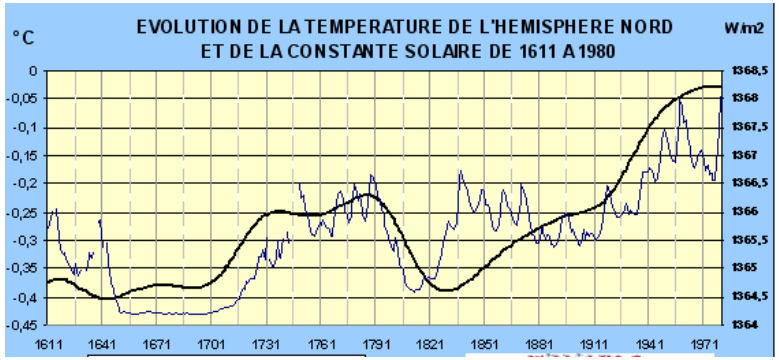
L'instrument TIM/SORCE mesure une TSI inférieure de ~4.5W.m^{-2} par rapport aux instruments spatiaux :

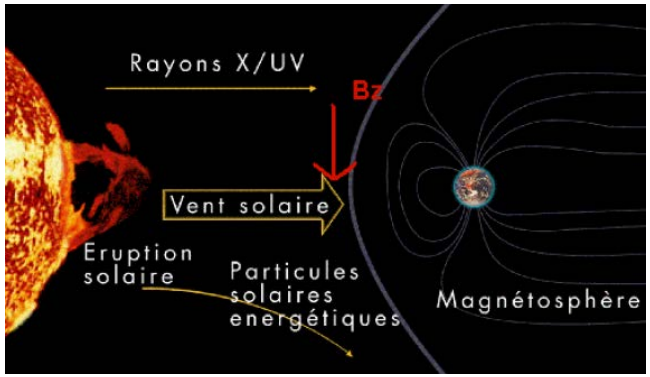
- ACRIM3/ACRIMSAT,
- DIARAD/VIRGO,
- PMO6V/VIRGO,
- *etc.*

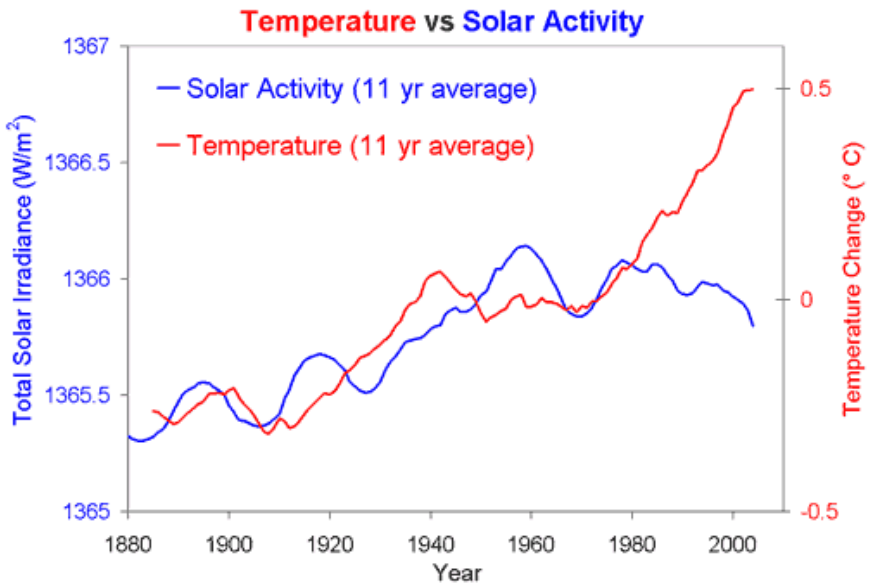
La reconstruction de la « TSI » et les liens avec le climat

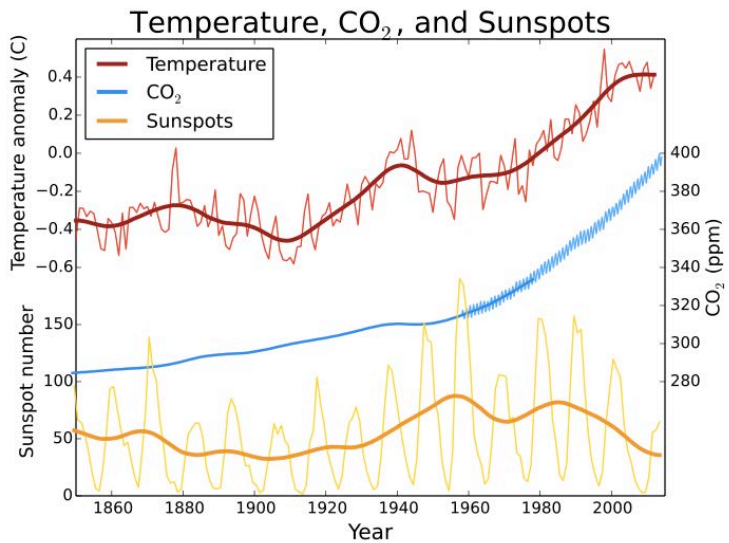
PICARD nous fournit des informations essentielles.





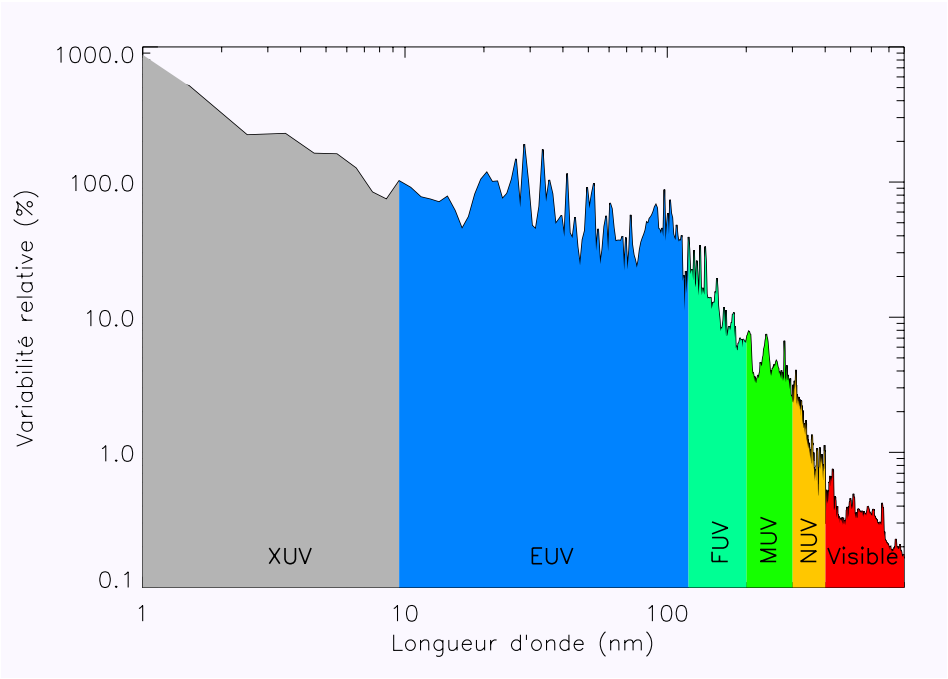



Temperature vs Solar Activity
Solar Activity (11 yr average)
Temperature (11 yr average)
Total Solar Irradiance (W/m²)
Temperature Change (° C)
Year
1367
1366.5
1366
1365.5
1365
0.5
0
-0.5
1880
1900
1920
1940
1960
1980
2000

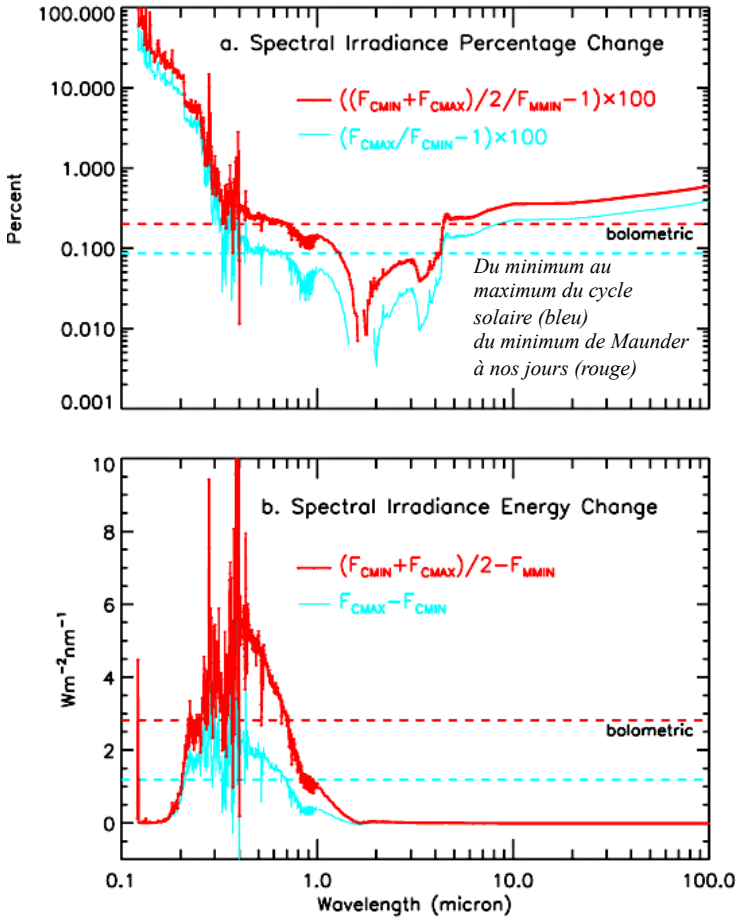

Temperature, CO₂, and Sunspots
Temperature
CO₂
Sunspots
Temperature anomaly (C)
Sunspot number
CO₂ (ppm)
Year
0.4
0.2
0.0
−0.2
−0.4
−0.6
150
100
50
0
400
380
360
340
320
300
280
1860
1880
1900
1920
1940
1960
1980
2000

Importance de l'éclairement solaire dans l'UV

Dans l'UV, l'amplitude des variations de « l'irradiance » spectrale (« Solar Spectral Irradiance » ou SSI) est plus importante : de 1 à 20% de variabilité au cours d'un cycle solaire (Cebula and Deland, 2012).



Source : G. Cessateur

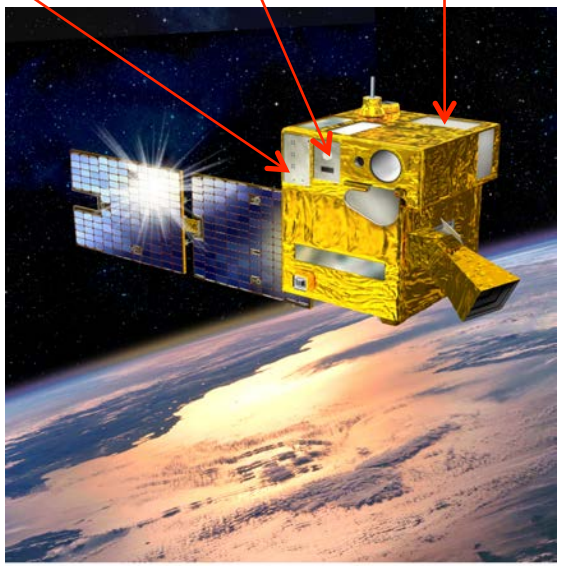


La charge utile PICARD

SODISM (LATMOS)

SOVAP (IRMB & ORB)

PREMOS (PMOD)



© CNES - Mars 2008 /Illustration D. Ducros

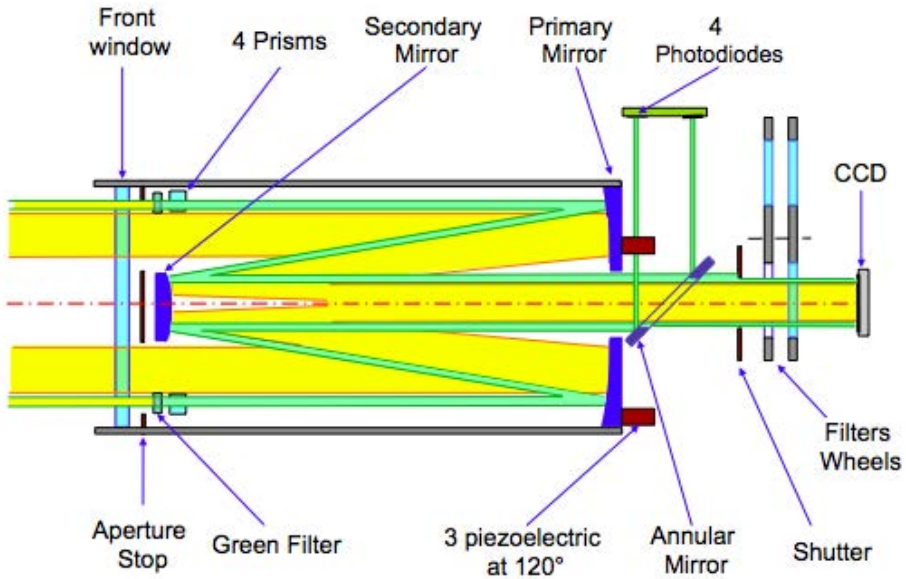
PICARD est un microsatellite [CNES], de 130 kg de masse, dédié à l'étude du Soleil.

- Date de lancement : 15 juin 2010
- Durée de vie initiale : 2 à 3 ans
- En phase F (retrait de service) – avril 2014
- Orbite héliosynchrone 06H00/18H00
- 730 km d'altitude

Principaux instruments :
- SODISM, un télescope imageur
- SOVAP, un radiomètre
- PREMOS, un photomètre et un radiomètre

Responsabilité de la charge utile (LATMOS)

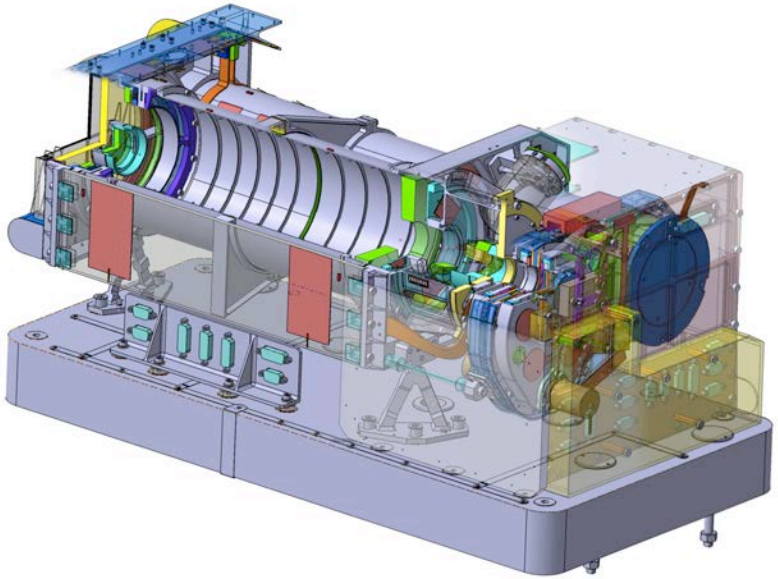
SODISM, un télescope imageur

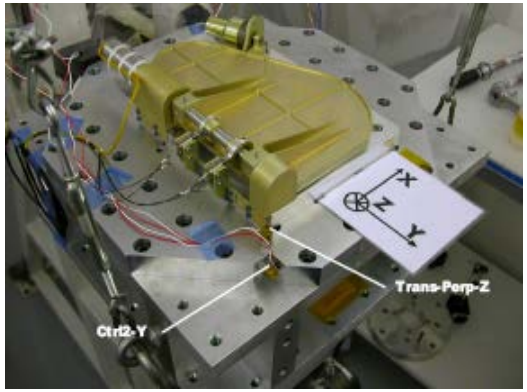


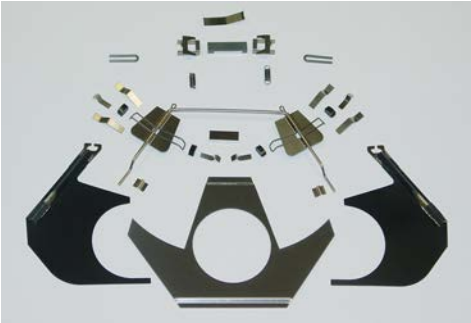
λ en nm	Δλ en nm	Fonctions
215.0	7	Activité solaire, O3, diamètre
393.37	0.7	Observation des régions actives, diamètre
535.7	0.5	Oscillations (héliosismology)
535.7	0.5	Diamètre
607.1	0.7	Diamètre
782.2	1.6	Diamètre

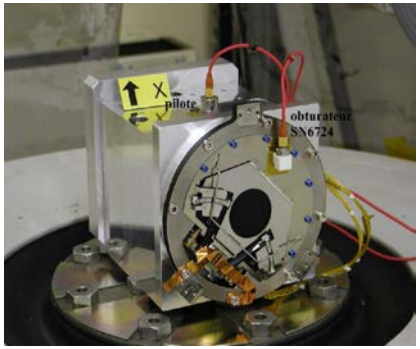
Principales caractéristiques de SODISM :

- Type de télescope : Ritchey Chretien
- Focale : 2626 mm ?
- Champ de vue : 35 arc-minutes
- Résolution angulaire : 1.06 arc-seconds ?
- Dimensions : 300x308x370 mm^3
- Masse : 27.7 kg
- Puissance (SODISM and PGCU) : 43.5 W

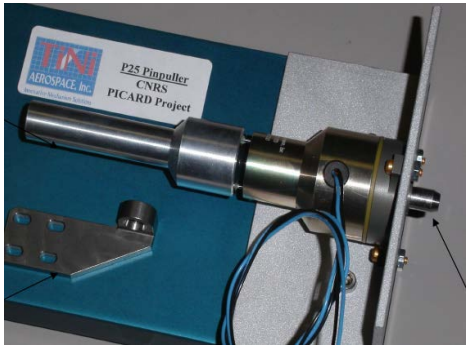


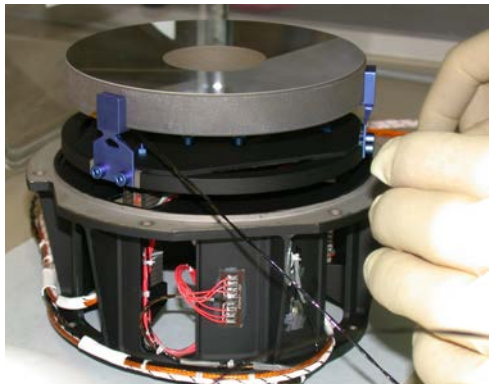




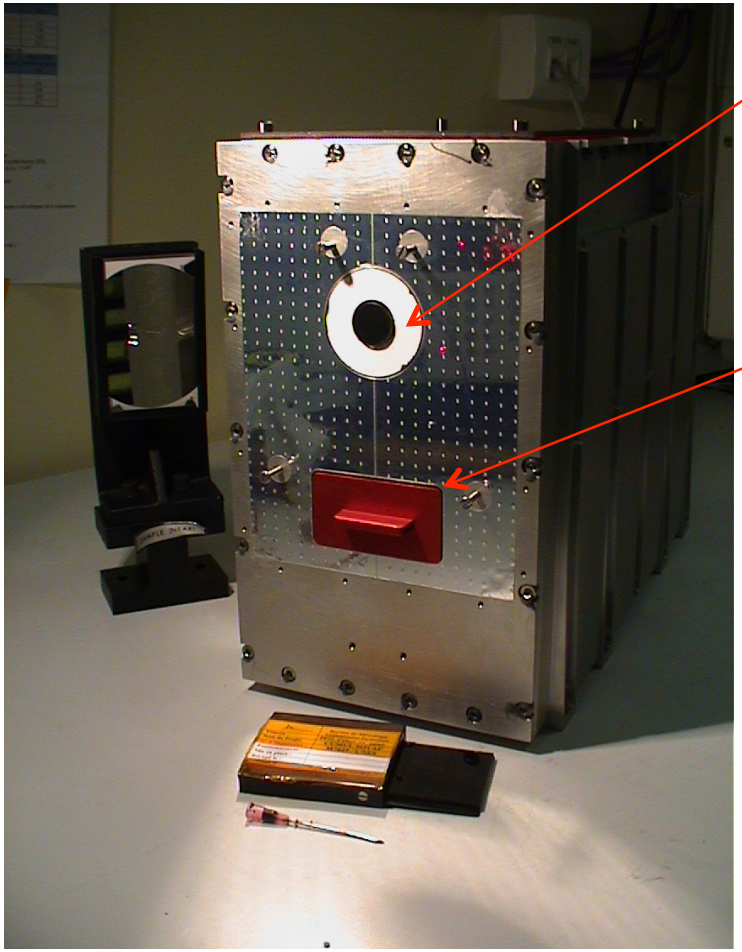


SODISM, un télescope imageur avec un grand nombre de mécanismes et beaucoup de technologie



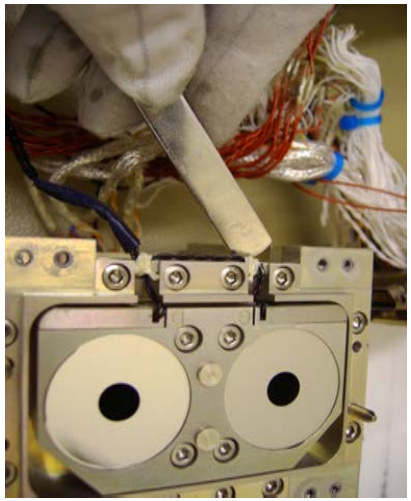


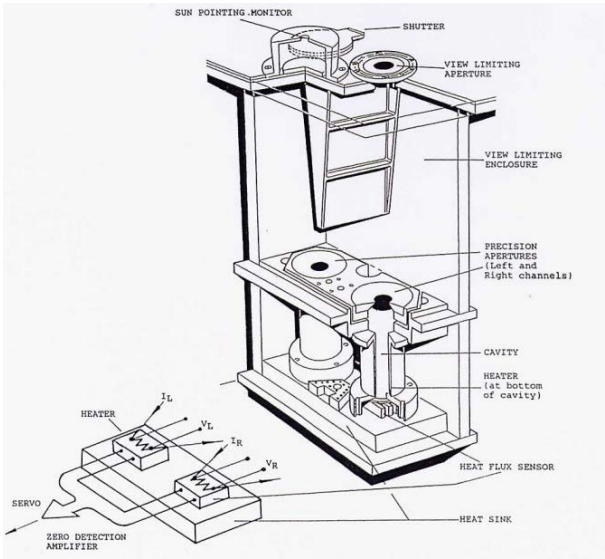
SOVAP, des radiomètres et un bolomètre



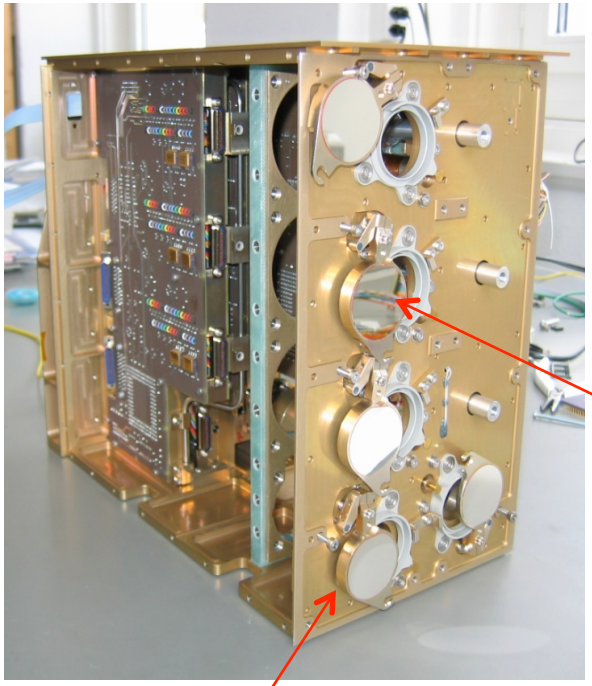
Bolomètre

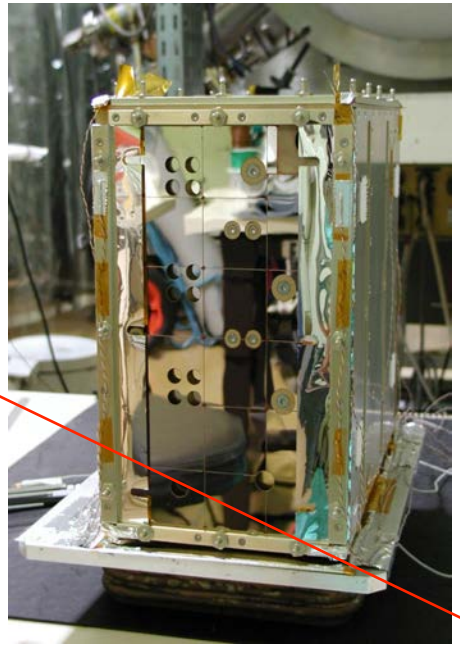
Radiomètre

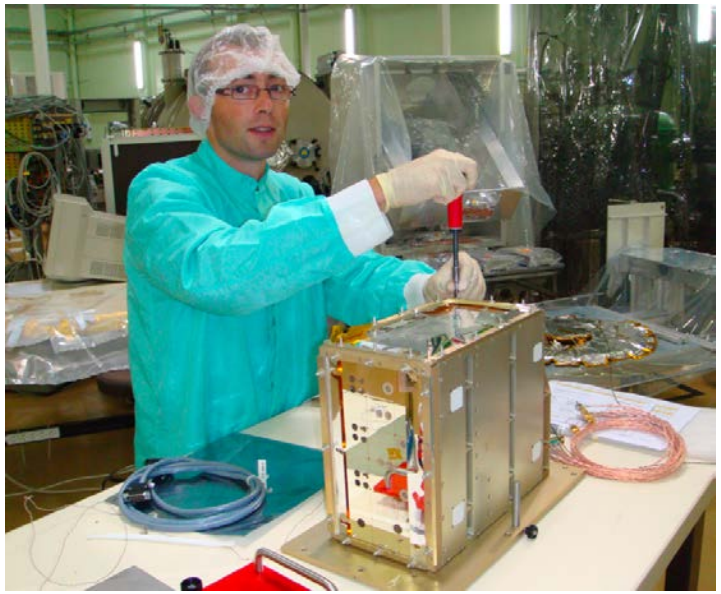




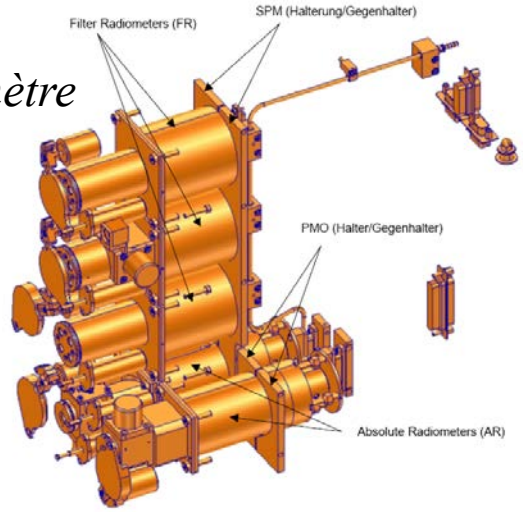
PREMOS, des photomètres et des radiomètres



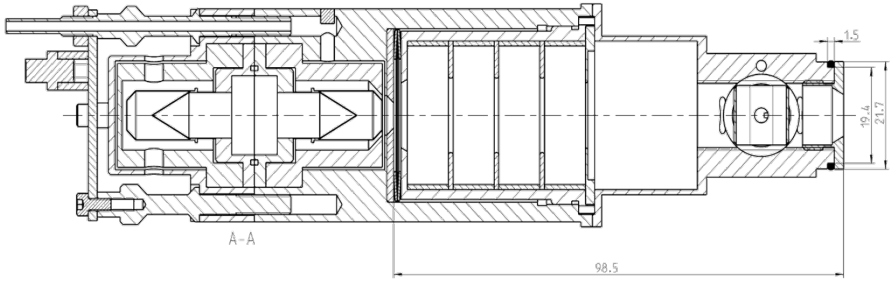




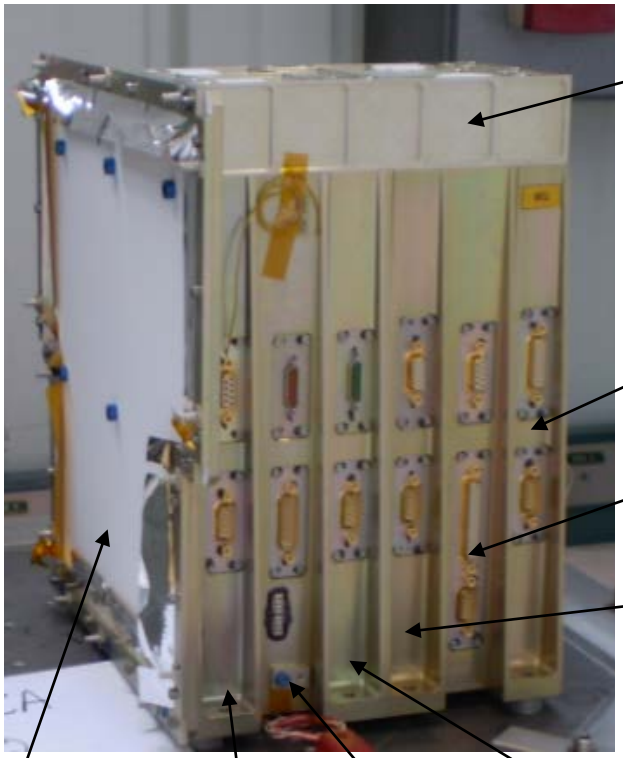
Photomètre



Radiomètre



PGCU, un équipement électronique de 13 kg développé par le LATMOS



Support Antenne TM-TC / SAS

Carte de gestion de l'asservissement de position du miroir primaire

Carte de gestion du contrôle thermique

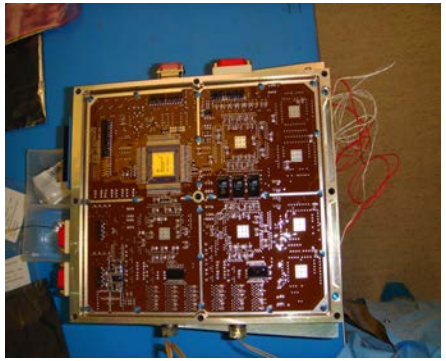
Carte de pilotage des mécanismes

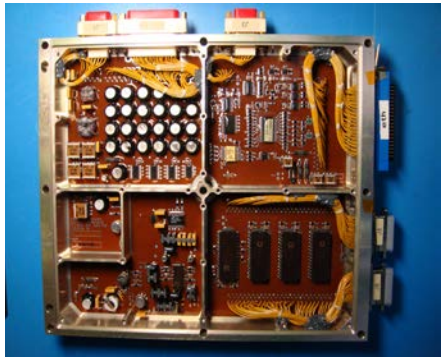
Radiateur PGCU

Carte d'alimentation

Carte DSP

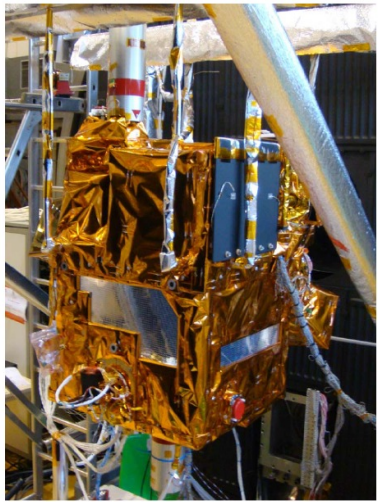
Carte d'alimentation de l'électronique de proximité du CCD

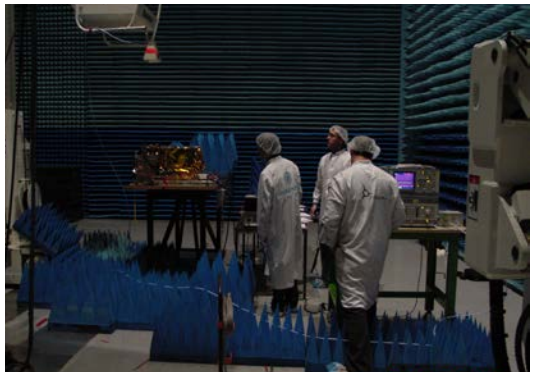




Les essais de « qualification »

Plus de cent essais de qualification ont été réalisés (électrique, thermique, mécanique, moment magnétique, *etc.*), conformément au plan de validation de programmes spatiaux classiques.





Nous allons nous focaliser sur les principales limitations associées aux essais réalisés avant le lancement du satellite PICARD à savoir :

- Les essais de performances instrumentales (caractérisations optiques, balance thermique avec ou sans simulateur solaire, *etc.*).

Les essais de « performance »

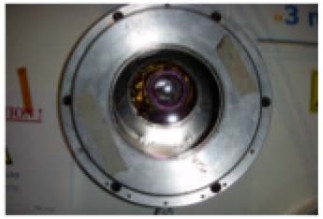
Essai de balance thermique avec simulateur solaire (moyen CNES) avec faisceau solaire conique dont la divergente est de +/- 1.03° :
- performances thermiques → OK
- performances optiques → NOK

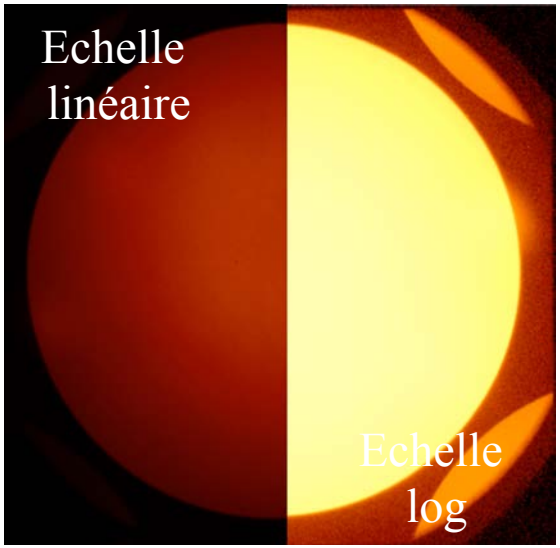
Essai « sol » de caractérisation :
- performances optiques limitées
- effets de la turbulence

Comment vérifier la stabilité de l'instrument ?

Un essai de « performance »

Essai de balance thermique avec collimateur solaire (moyen LATMOS) avec faisceau solaire :
- performances thermiques → OK
- performances optiques → très limitées (peu de flux et fenêtre d'entrée non-nominal)

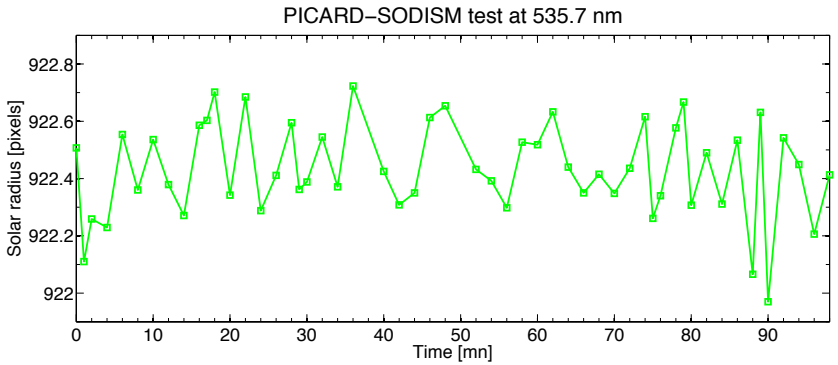




Des images ont été prises à 535.7 nm avec l'instrument SODISM afin de vérifier l'impact de l'environnement sur les performances.

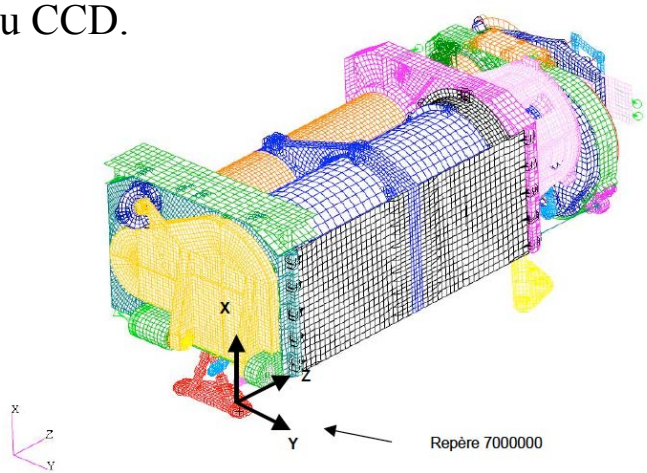
- Simulation de l'environnement spatial (IR, albédo, *etc.*) avec modulation orbitale
- Absence de flux solaire sur la face avant
- Aucune tendance observée

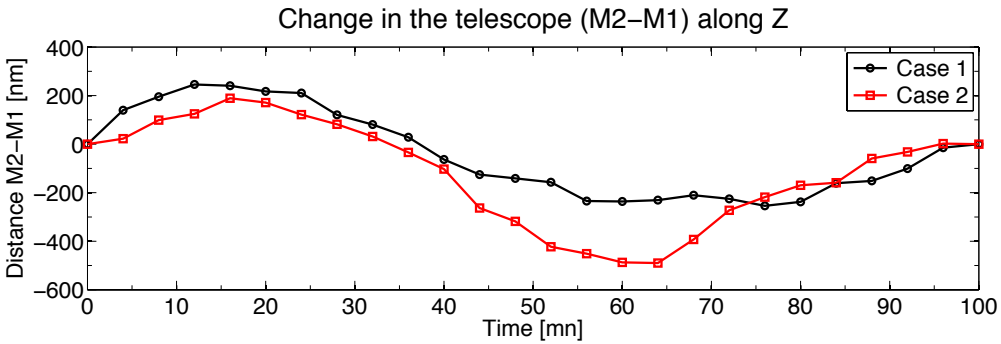
Un essai de « performance » et une simulation associée

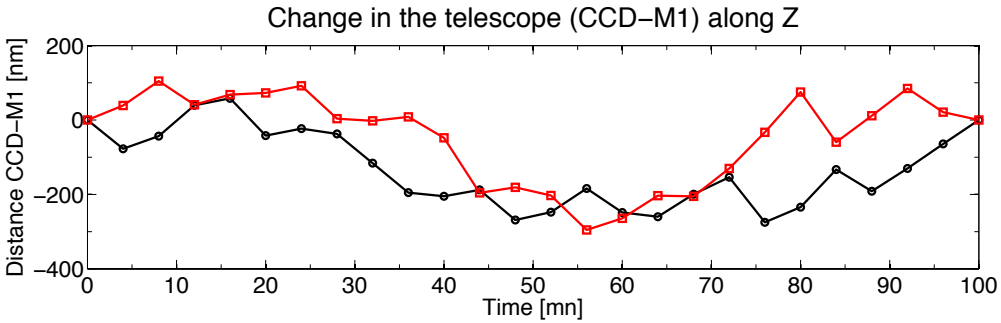


Effet inférieur à 2 milli-pixel (≈ 2 mas).
L'effet thermo-mécanique n'est pas prépondérant.

A partir des températures d'un modèle thermique et/ou des données d'essai, nous avons réalisé un modèle thermo-mécanique afin d'analyser les déplacements des miroirs et du CCD.







Le lancement

PICARD sous coiffe lanceur avant encapsulation de Prisma

Chargement du SHM (Photos APAVE D. Dufau)

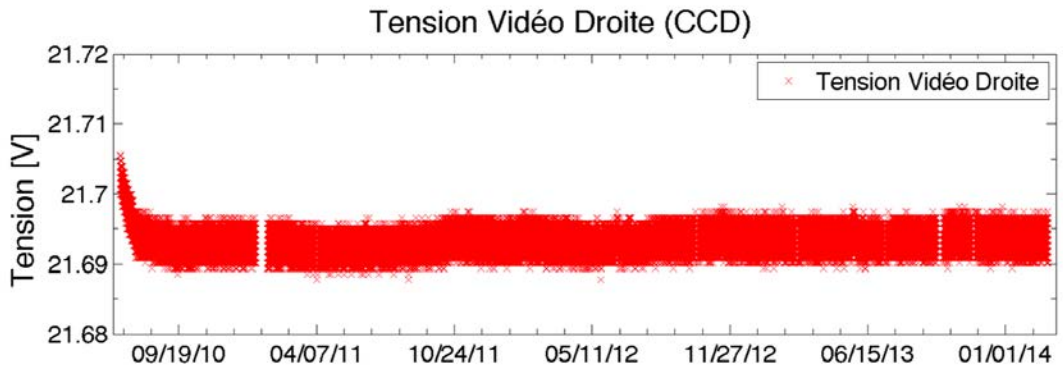
Décollage du DNEPR

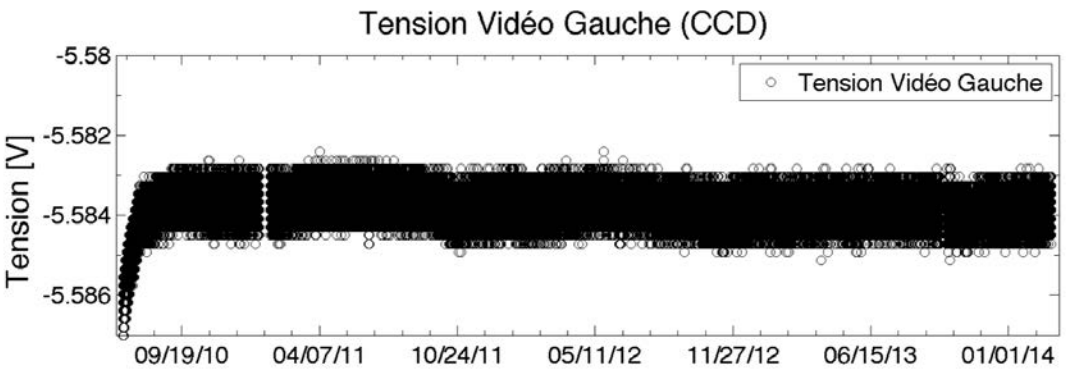
Le satellite PICARD (issu de la filière Myriade du CNES) a été développé et mis en orbite le 15 juin 2010.

Depuis, les instruments PICARD fonctionnent très bien.

Aucune anomalie fonctionnelle.
C'est une réussite sur le plan technologique !

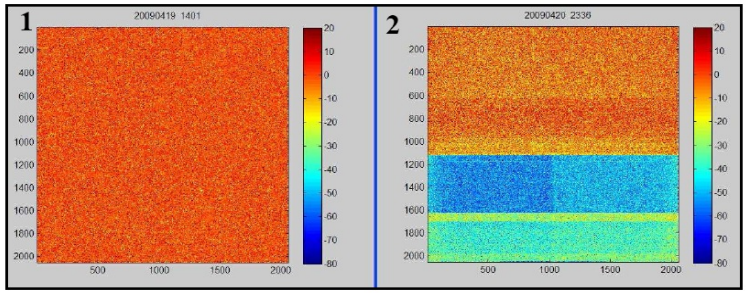
Fonctionnement nominal en orbite



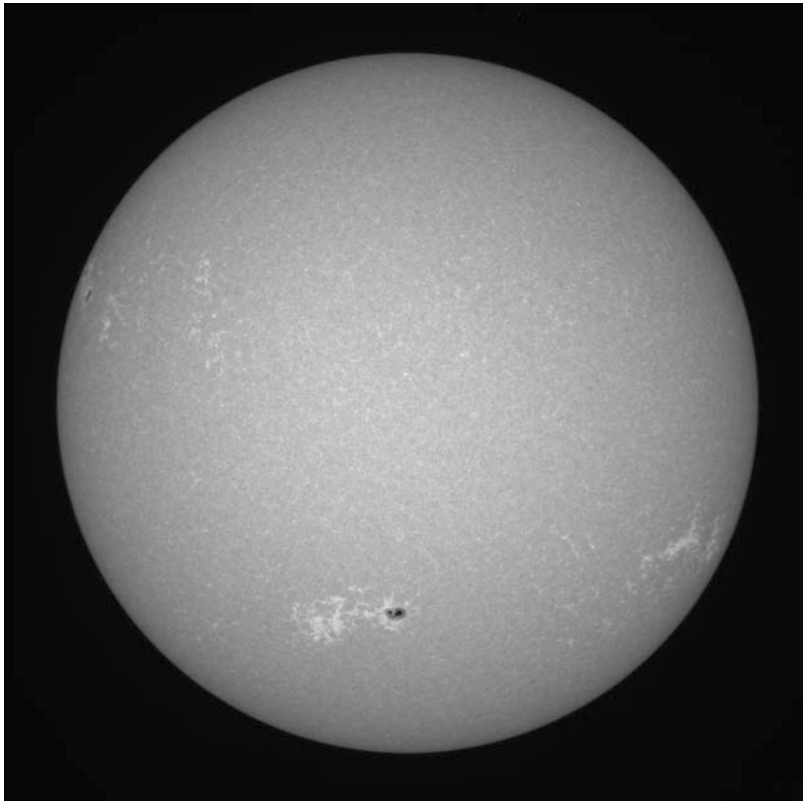


Fonctionnement nominal de la chaine d'acquisition de SODISM

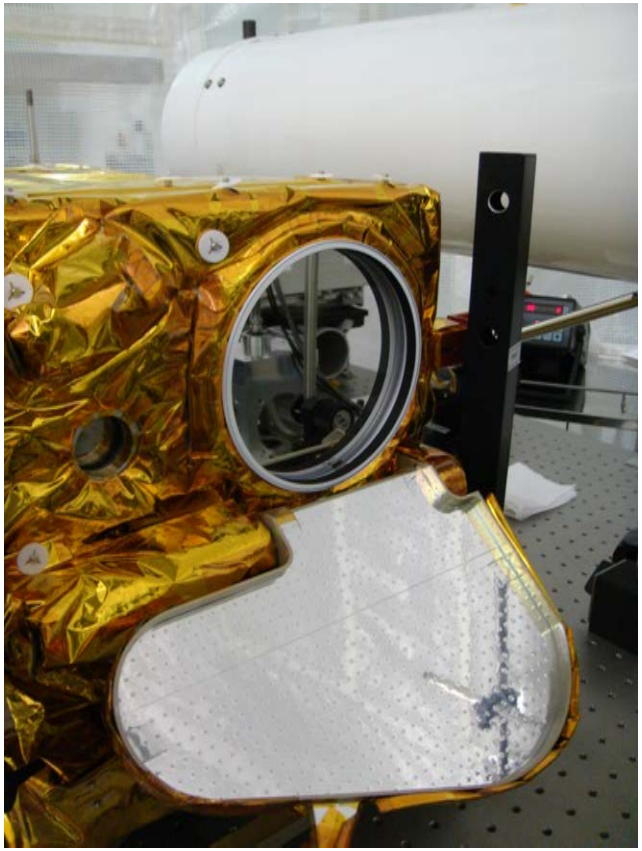
Un lot de capacité de 100nF (Eurofarad) était défectueux (détection lors d'un essai de vide thermique satellite).



Fonctionnement nominal en orbite



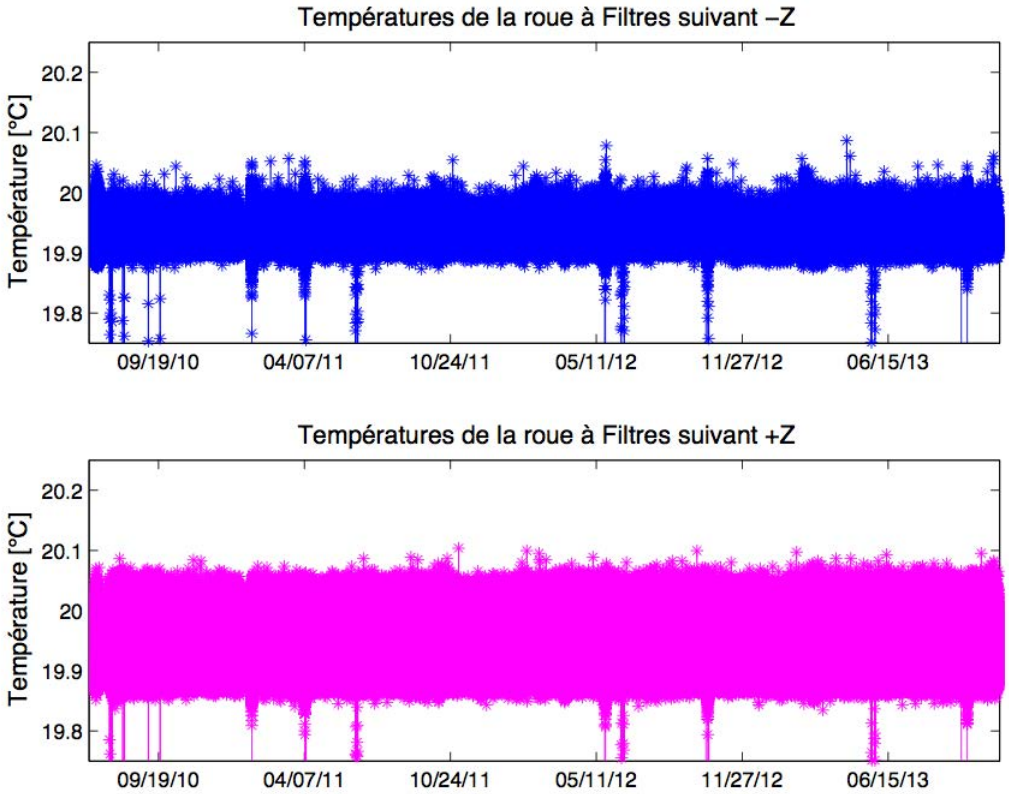
~ 1,300,000 images acquises



Robustesse des mécanismes développés

Fonctionnement nominal en orbite

Température de l'instrument SODISM



Pas de problème de stabilité thermo-mécanique de l'instrument.

La structure est stable.

Les températures des filtres interférentiels de l'instrument SODISM restent très stables. La structure qui supportent les filtres est régulée, et se situe à l'intérieur de l'instrument.

L'environnement spatial & le retour d'expérience

Tous les instruments spatiaux directement exposés au rayonnement solaire sont particulièrement vulnérables. Deux réunions de travail ont été organisées avec les « instrumentalistes solaires » du monde entier afin de discuter de la dégradation des instruments spatiaux observant le Soleil.

La charge utile PICARD est dédiée à de la métrologie fine.
Les effets de l'environnement spatial ont des conséquences sur nos mesures.
Comment se combinent tous ces effets ?

Environment	Effects	hazards
Logistics and launch	Shock, dirt, pressure changes, optical alignment	Relevant
Microgravity	Fluid management, Mechanisms	Relevant
Vacuum and solar UV	**Outgassing, contamination**	**Important**
Neutral atmosphere	Atomic oxygen attack	Relevant
Plasma environment (protons, electrons)	Surface charging, electrostatic discharge	Relevant
Radiations (solar particle events)	Total dose degradation, Single Event Effects	Relevant
Radiations (trapped radiation belts)	Total dose degradation, Single Event Effects	Relevant
Radiations (galactic cosmic rays)	Total dose degradation, Single Event Effects	Relevant
Orbital debris	Impact	Relevant

Meftah, Irbah, Hauchecorne et al., SPIE 2013

L'environnement spatial & le retour d'expérience

En effet, l'environnement spatial est « sévère ».
Chaque mission spatiale solaire présente des « avaries ».
Similitude des phénomènes observés entre les instruments HMI, MDI et SODISM.

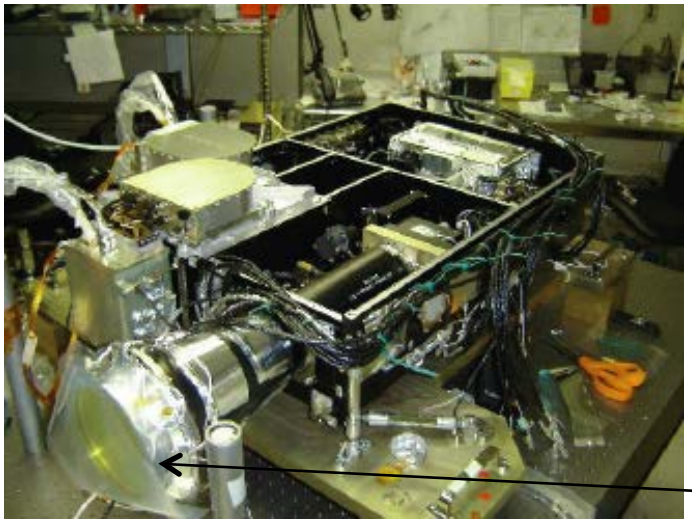
1980 – Solar Maximum Mission (NASA)
1991 – Yohkoh (JAXA)
1995 – SOHO (ESA/NASA) – instrument MDI
1998 – TRACE (NASA)
2001 – CORONAS-F (Roskosmos)
2006 – Hinode (JAXA)
2006 – STEREO A et B (NASA)
2009 – KORONAS-FOTON (Roskosmos)
2009 – PROBA-2 (ESA) – instrument LYRA
2010 – Solar Dynamics Observatory (NASA) – instrument HMI
2010 – PICARD (CNES) – instrument SODISM

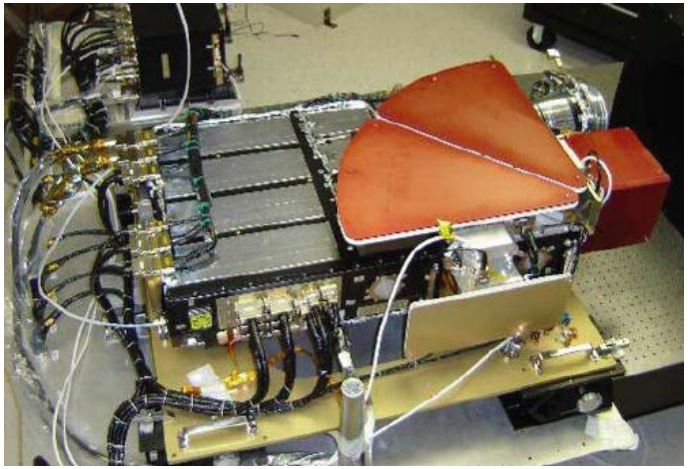
Crepel, 2013

L'environnement spatial & le retour d'expérience

SDO

HMI

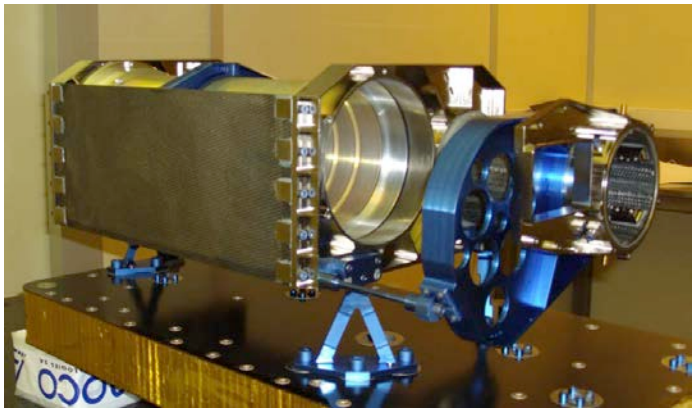




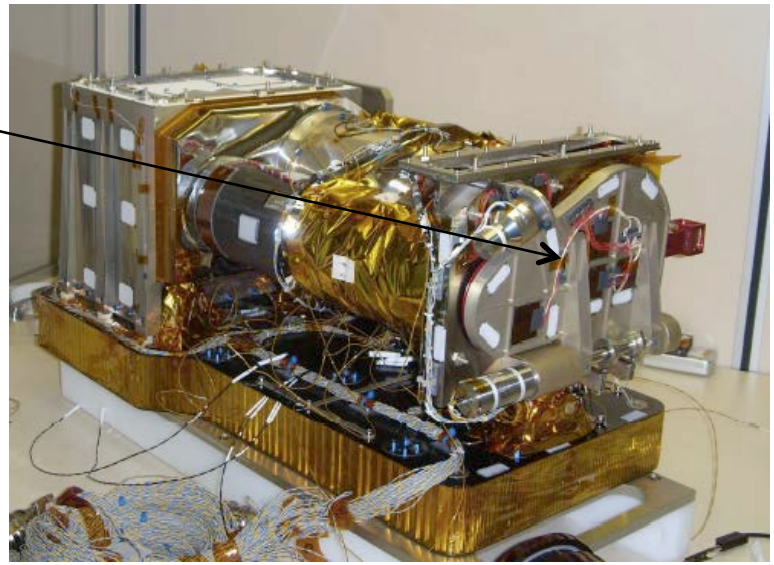
Crédits : R.I. Bush, Stanford University

PICARD

SODISM



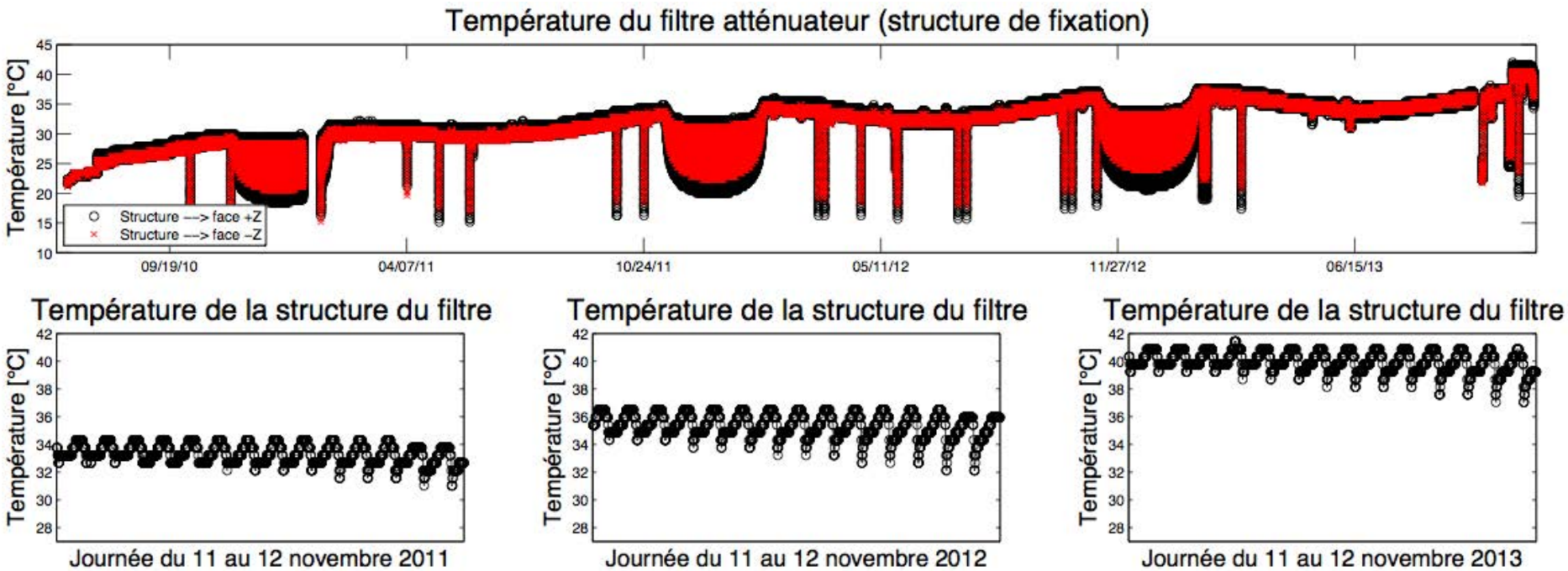
Fenêtre d'entrée



Crédits : M. Meftah, CNRS - LATMOS

L'environnement spatial & le retour d'expérience

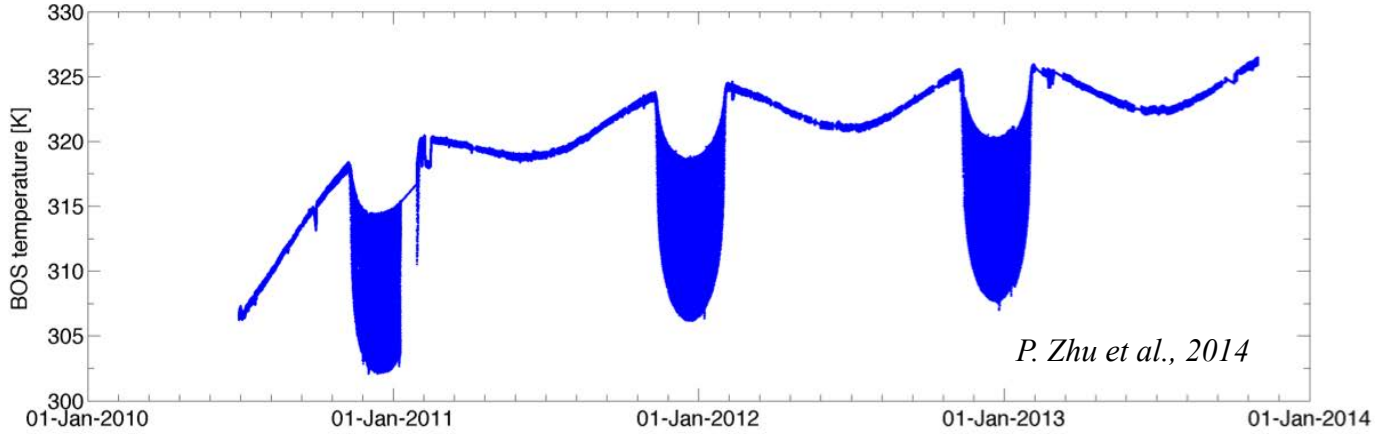
Température de l'instrument SODISM



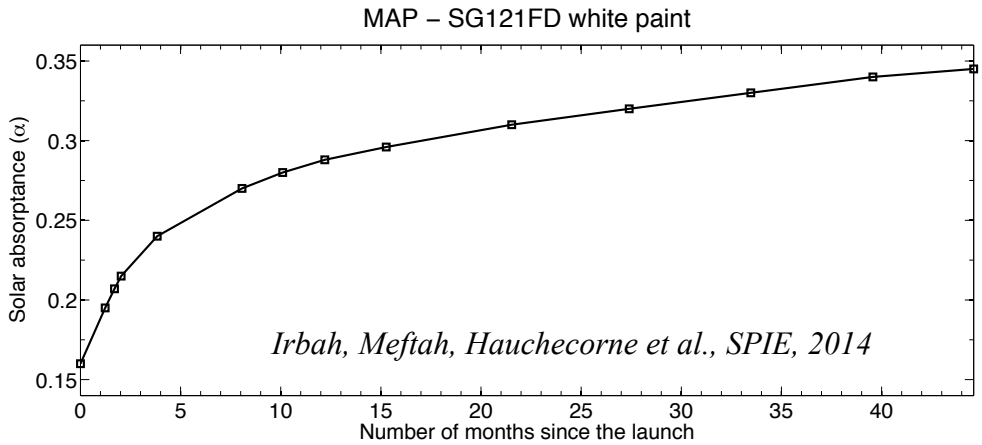
La température de la fenêtre de l'instrument SODISM évolue au cours du temps. Un élément optique (regardant l'espace froid) est difficilement contrôlable thermiquement. Problème similaire avec l'instrument HMI.

L'environnement spatial & le retour d'expérience

Température du BOS



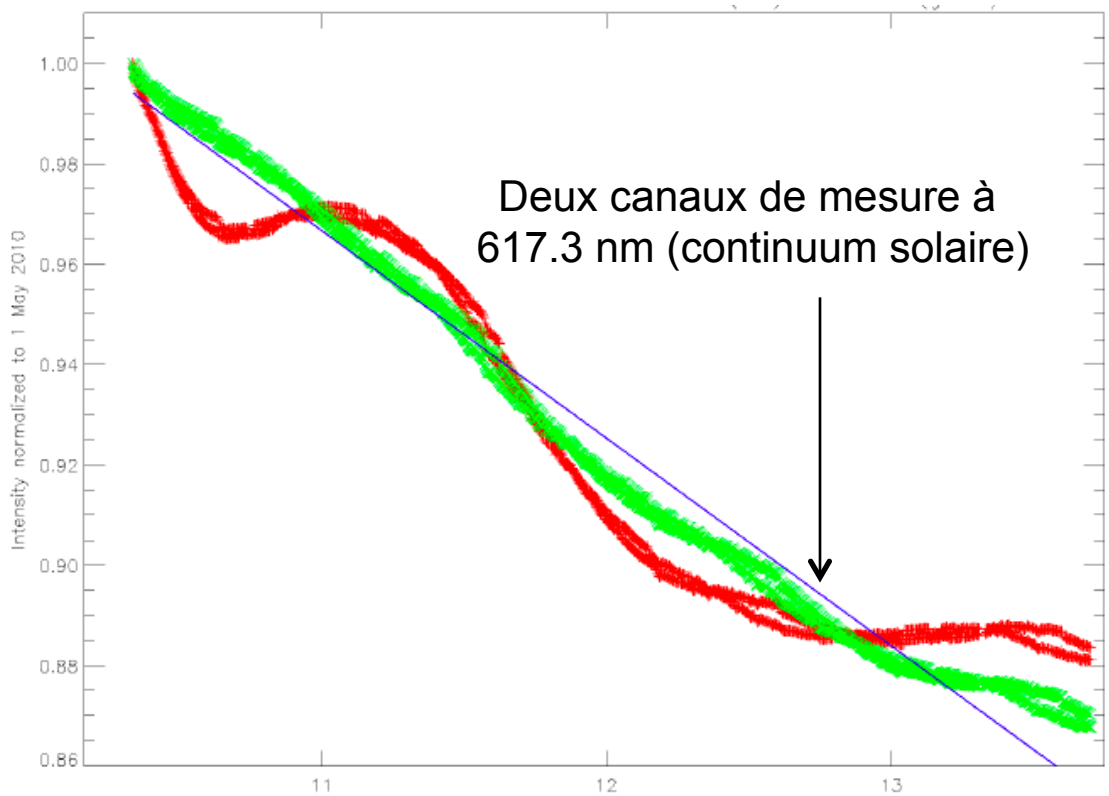
Le vieillissement est plus important que prévu (rayonnement UV, contamination du satellite).



La température des éléments non régulés thermiquement et directement exposés au flux solaire évolue rapidement (notamment en début de mission).

L'environnement spatial & le retour d'expérience

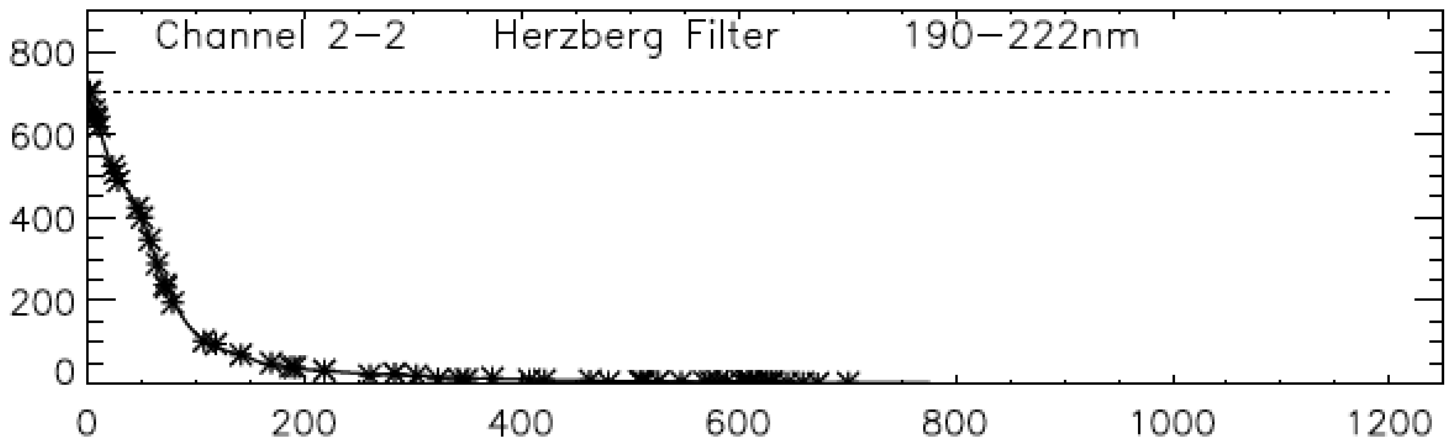
Intensité des images de l'instrument HMI



La transmission de l'instrument HMI baisse d'environ 4,5% par an en raison d'un assombrissement de la fenêtre dû à aux effets des radiations.

L'environnement spatial & le retour d'expérience

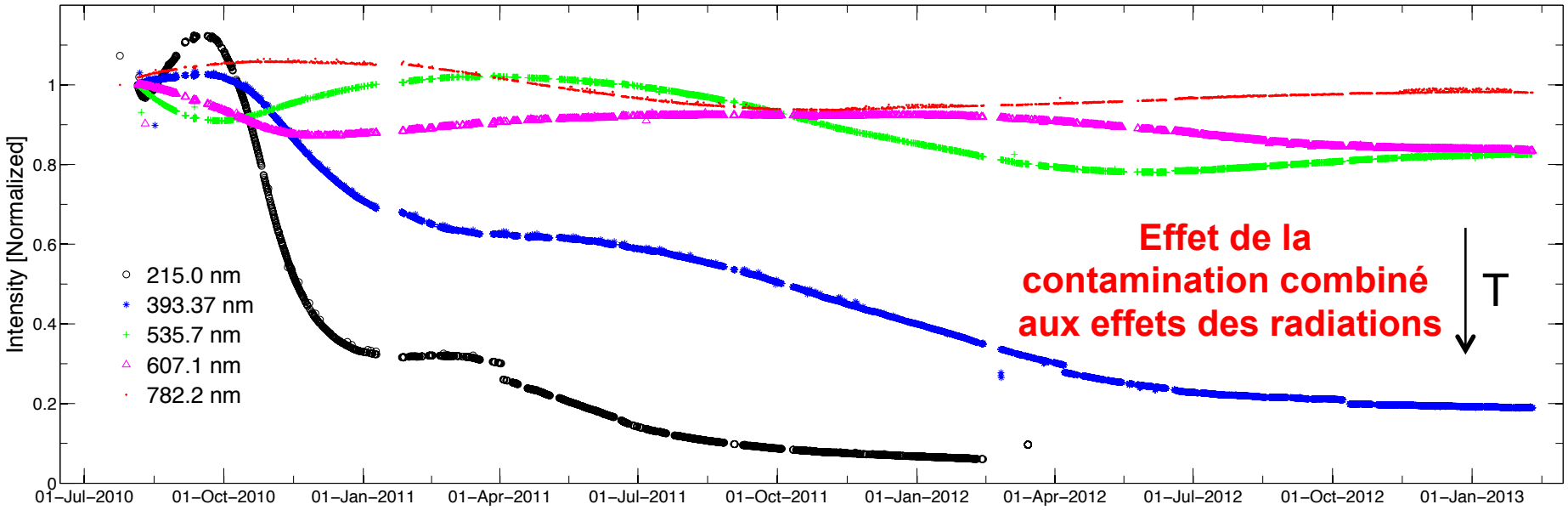
Intensité des images de l'instrument LYRA (PROBA 2)



Après 100 jours en orbite, la dégradation des filtres de l'instrument est très importante (continuum de Herzberg, à comparer avec le filtre à 215 nm de l'instrument SODISM).

L'environnement spatial & le retour d'expérience

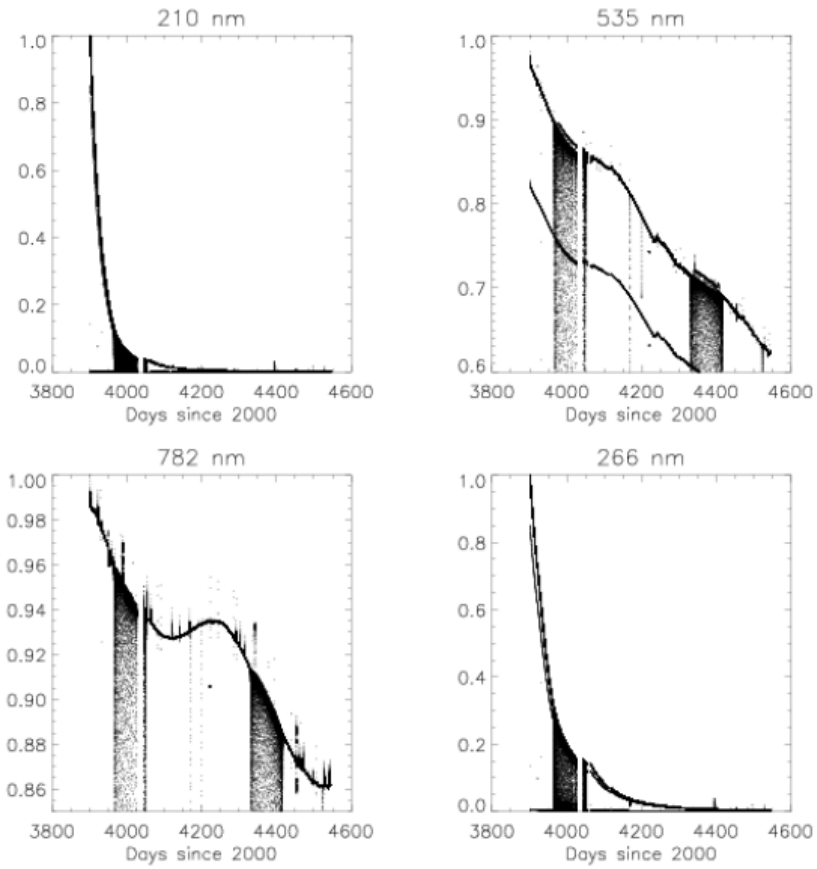
Intensité des images de l'instrument SODISM



La transmission de l'instrument SODISM baisse d'environ 5% par an (à 607.1 nm) en raison d'un assombrissement de la fenêtre dû aux effets de la contamination et à un faible effet des radiations.

L'environnement spatial & le retour d'expérience

Intensité des images de l'instrument PREMOS



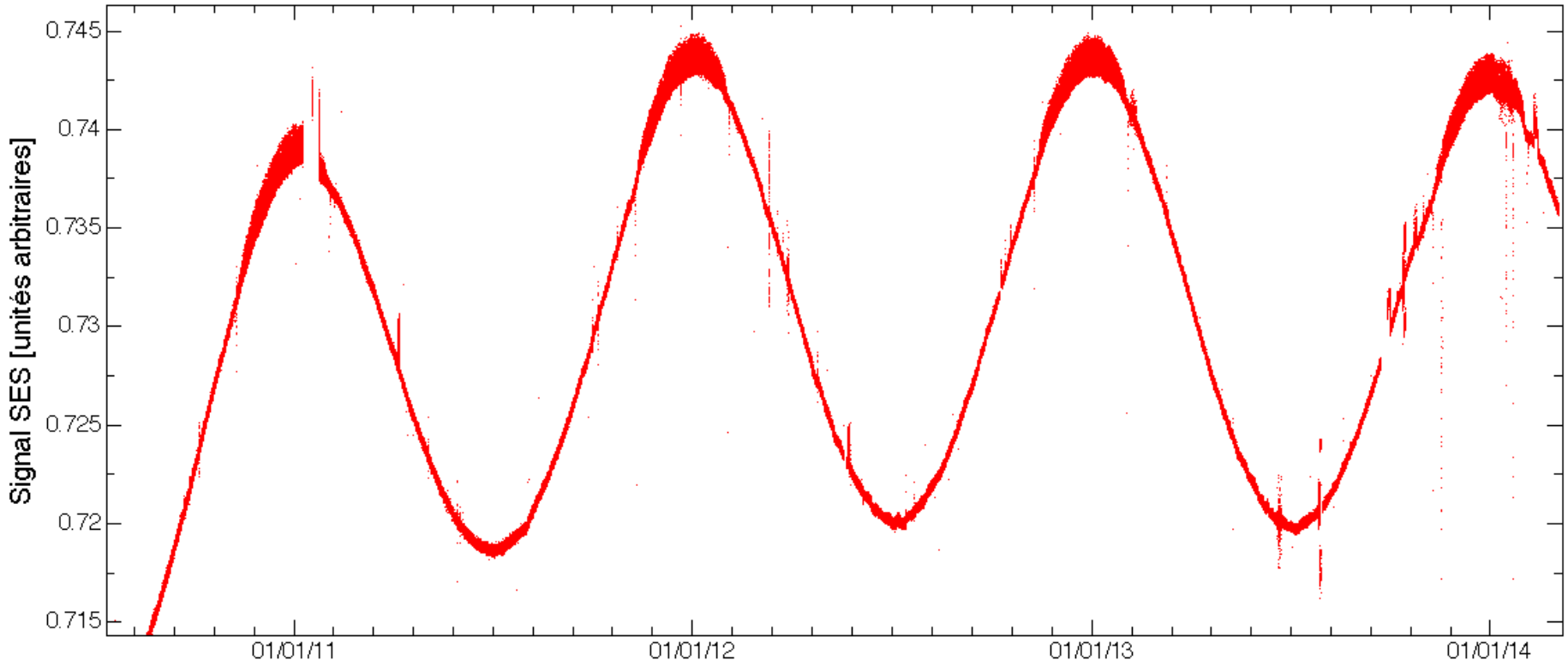
La transmission des photomètres PREMOS baisse considérablement dans l'UV.

→ **Effets de la contamination**

BenMoussa et al, Sol. Physics, 2013 (Source: G. Cessateur – PMOD)

L'environnement spatial & le retour d'expérience

Evolution du signal de l'écartomètre solaire PICARD



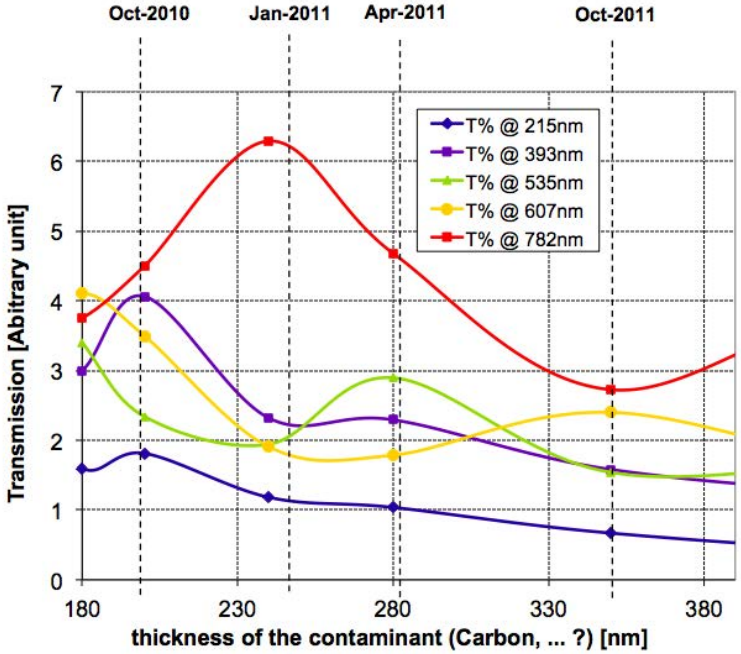
Dégradation similaire à la mesure faite par l'instrument SODISM à 782.2 nm

L'environnement spatial & le retour d'expérience

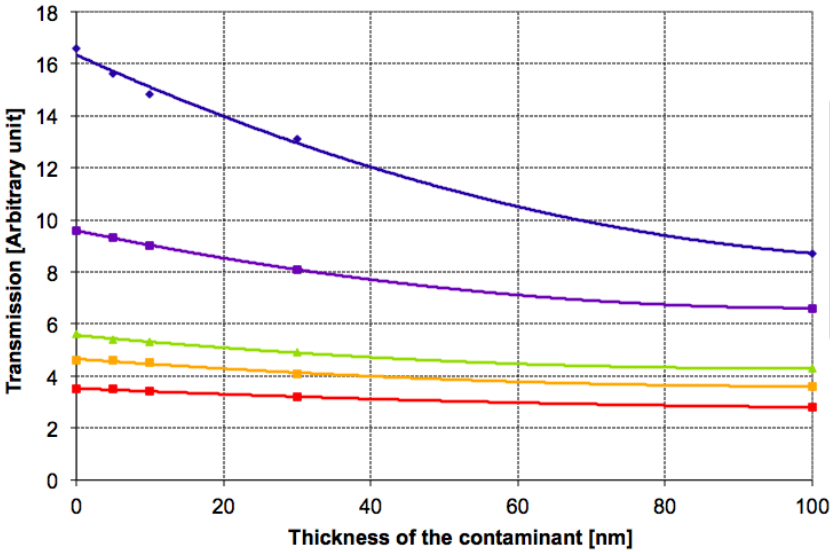
Effets des contaminants (intégration, tests, lancement, séparation, …)

- *0.1 mg « Hydrocarbons » (HCO) au niveau de la fenêtre d'entrée ?* → *50% d'atténuation T [%]*
- *0.1 mg « Silioxanes » (Silicones) (Si O C3 H6) ?* → *50% d'atténuation T [%]*

En simulant la présence de contaminants sur la face interne et externe de l'instrument SODISM, nous arrivons à simuler les variations d'intensité observées.



Simulation – SAGEM / CNRS LATMOS



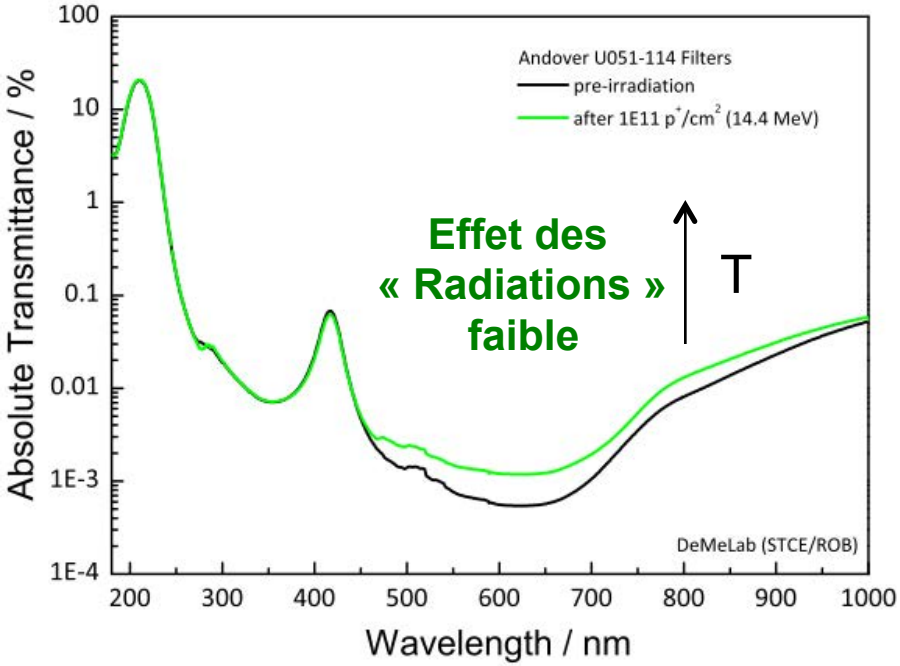
Simulation – SAGEM / CNRS

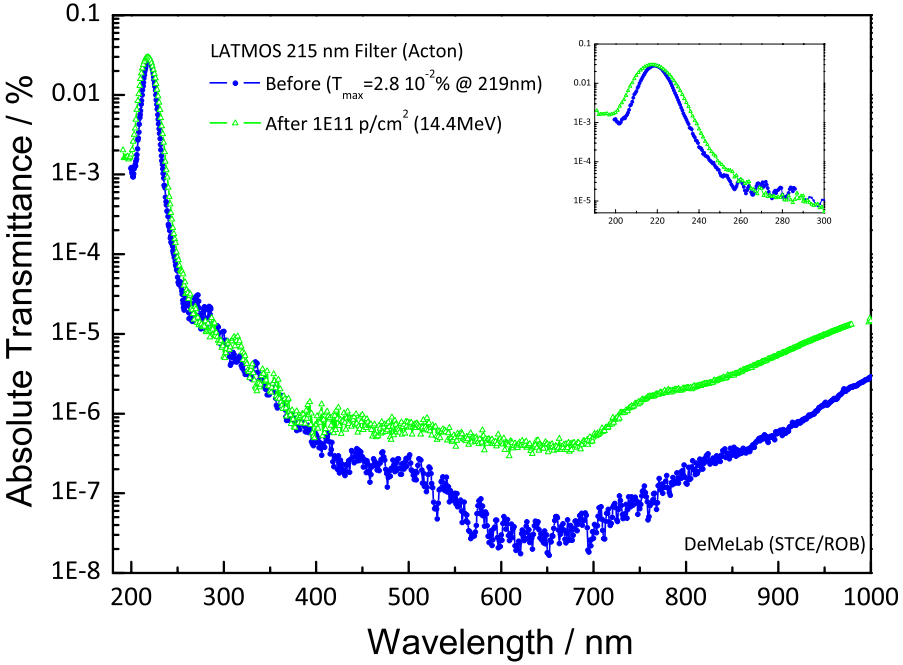
L'environnement spatial & le retour d'expérience

- ➔ Contamination du satellite
- ➔ Contamination interne et externe de la fenêtre de l'instrument SODISM
- ➔ Plan de propreté SOHO (à prendre comme référence)
- ➔ Cal/Val : vérifier la performance optique au fur et à mesure (faire vieillir la première surface optique qui observe le Soleil)
- ➔ Orbite basse à éviter pour les missions solaires (métrologie)
- ➔ Faible effet des radiations sur la fenêtre d'entrée de l'instrument SODISM (test réalisé récemment)
- ➔ Revoir les spécifications des matériaux et des procédés
  - ➔ Pas de silicone, attention aux MLI, aux peintures, au Mapsil, aux panneaux solaires (températures importantes)
  - ➔ TML<1% et CVCM<0.1%, c'est insuffisant pour les instruments qui observent dans l'UV (il faut quantifier tous les matériaux)

L'environnement spatial & le retour d'expérience

Essais sur des filtres SODISM (impact faible de l'effet des radiations)

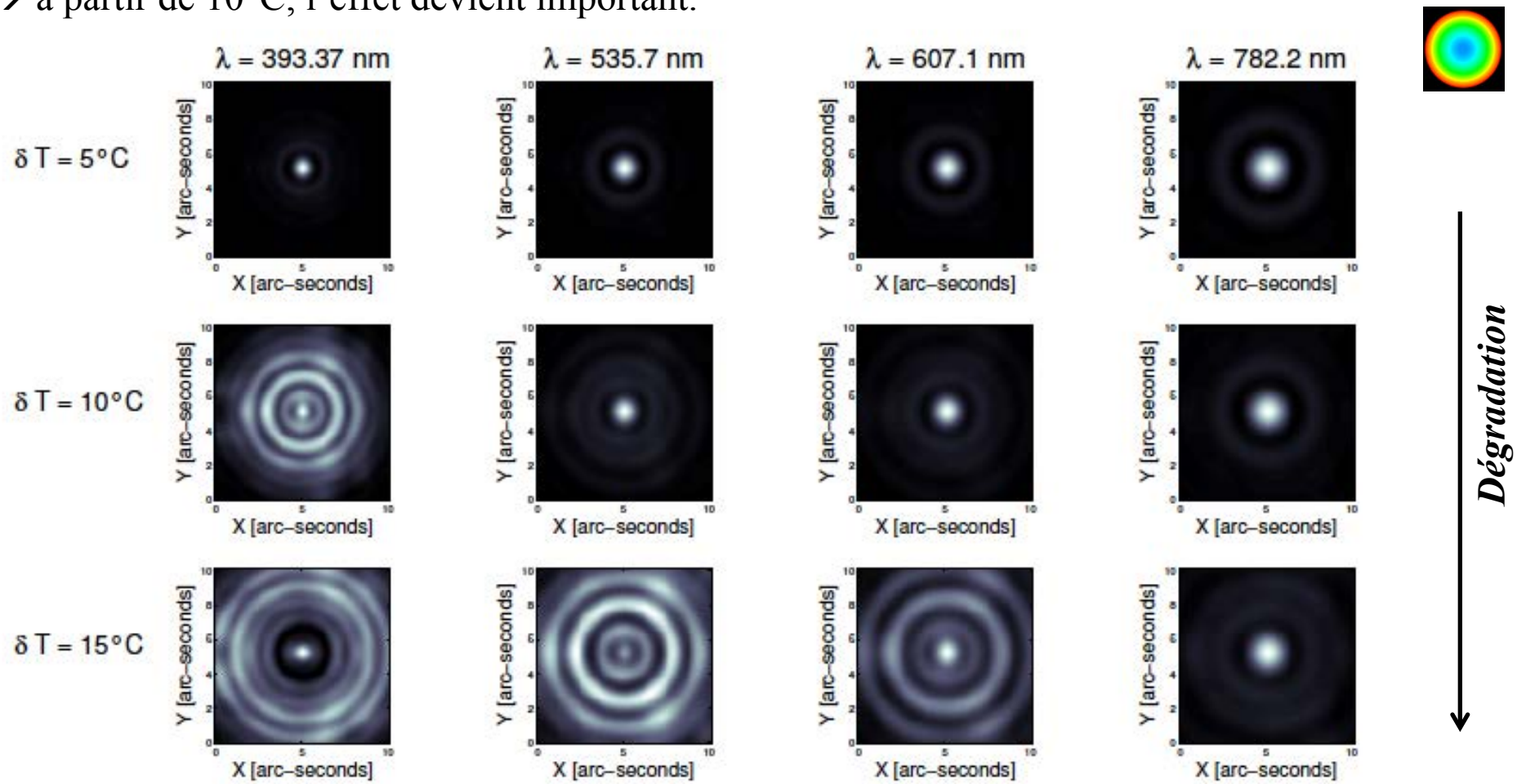




Des essais sont en cours de réalisation afin de mieux comprendre les effets des « Radiations » sur la transmission de la fenêtre et des filtres de l'instrument SODISM. Relation avec une R&D « Télescopes lointains ».

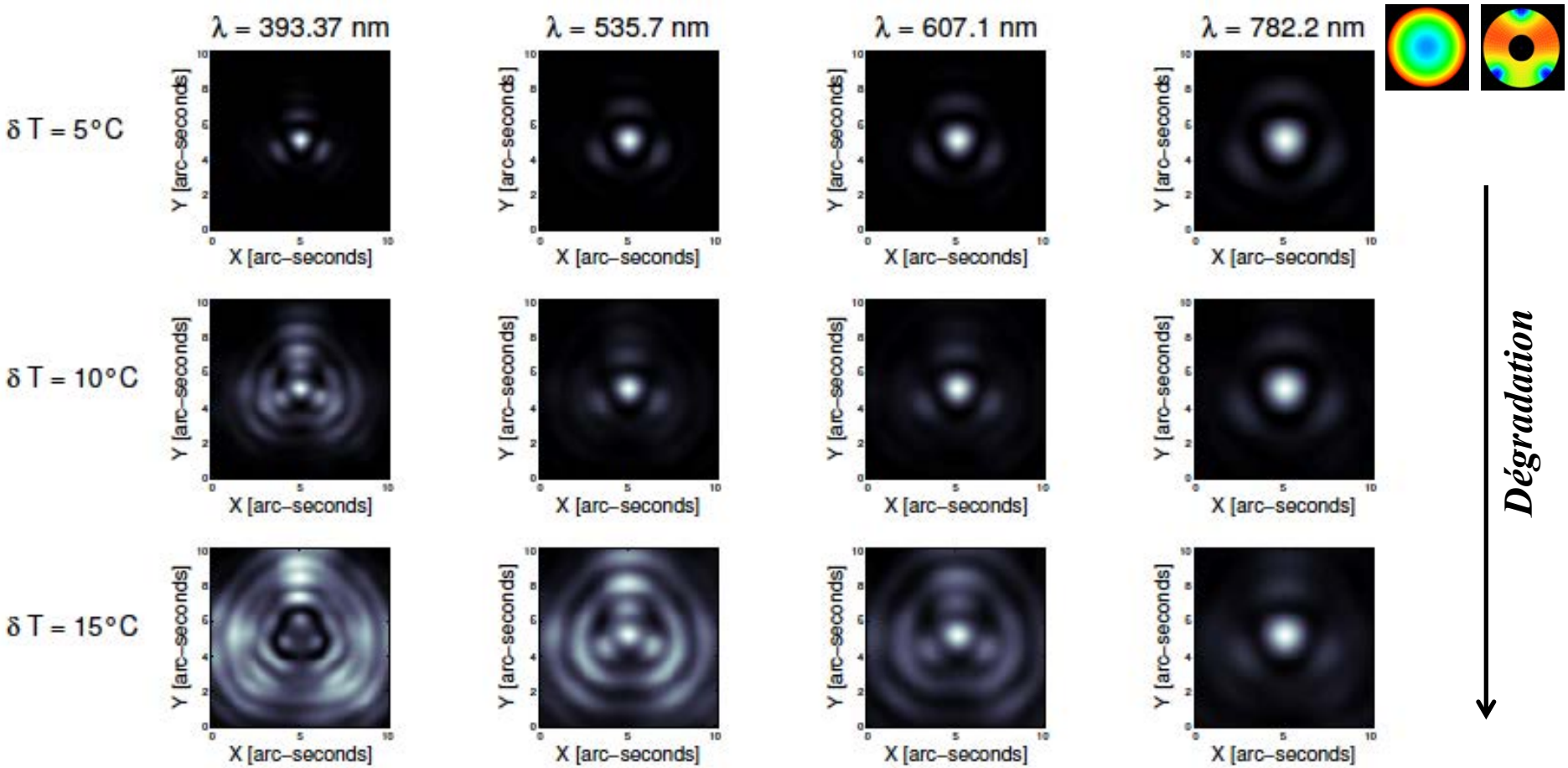
L'environnement spatial & le retour d'expérience

Psf de l'instrument SODISM avec un gradient de température quadratique au niveau de la fenêtre
→ à partir de 10°C, l'effet devient important.



L'environnement spatial & le retour d'expérience

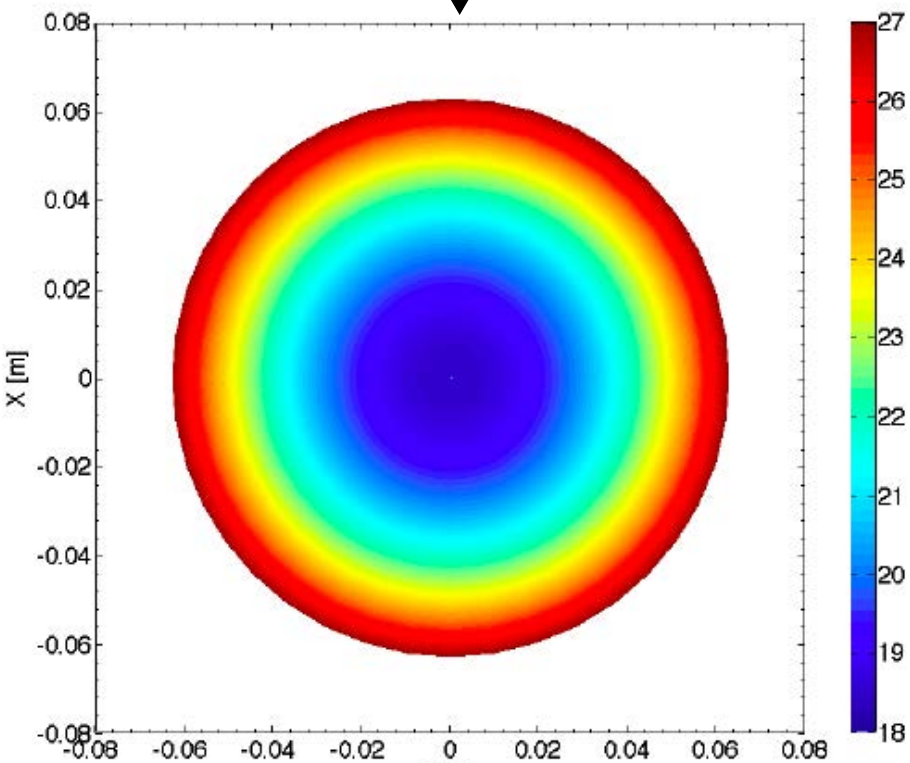
Psf de l'instrument SODISM avec un gradient de température quadratique au niveau de la fenêtre et gradient de type triangulaire au niveau du miroir M1 → de quelques dizaines de nm rms.



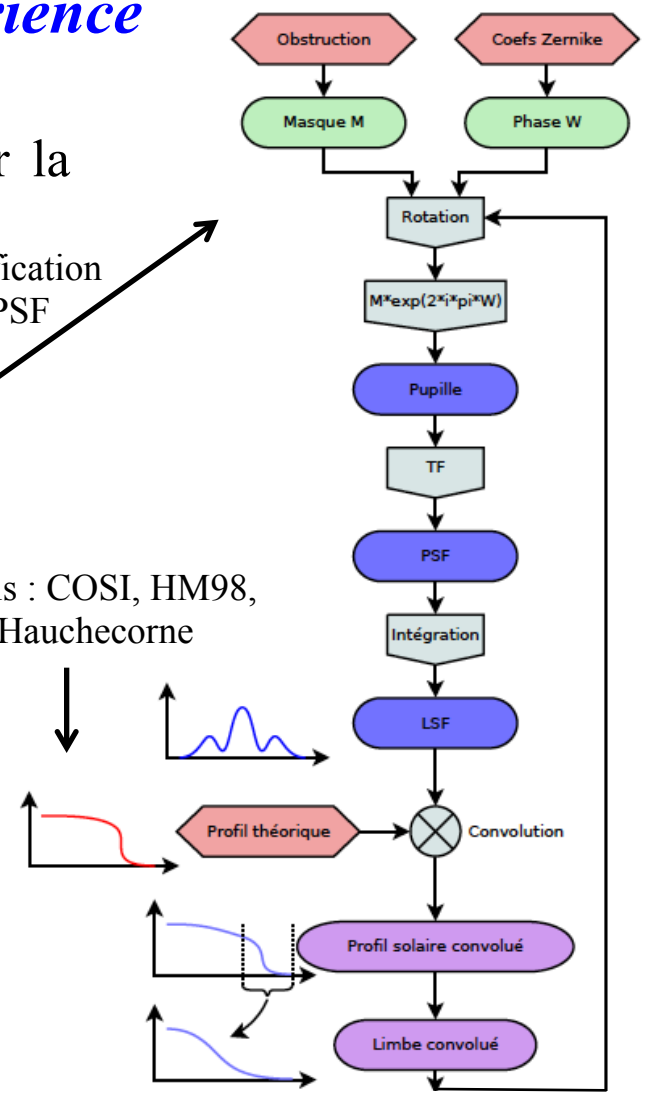
L'environnement spatial & le retour d'expérience

→ Développement « d'un simulateur End to End » :
Génération de gradient de température & impact sur la forme du limbe solaire

PLTM, HKTM, modèle M



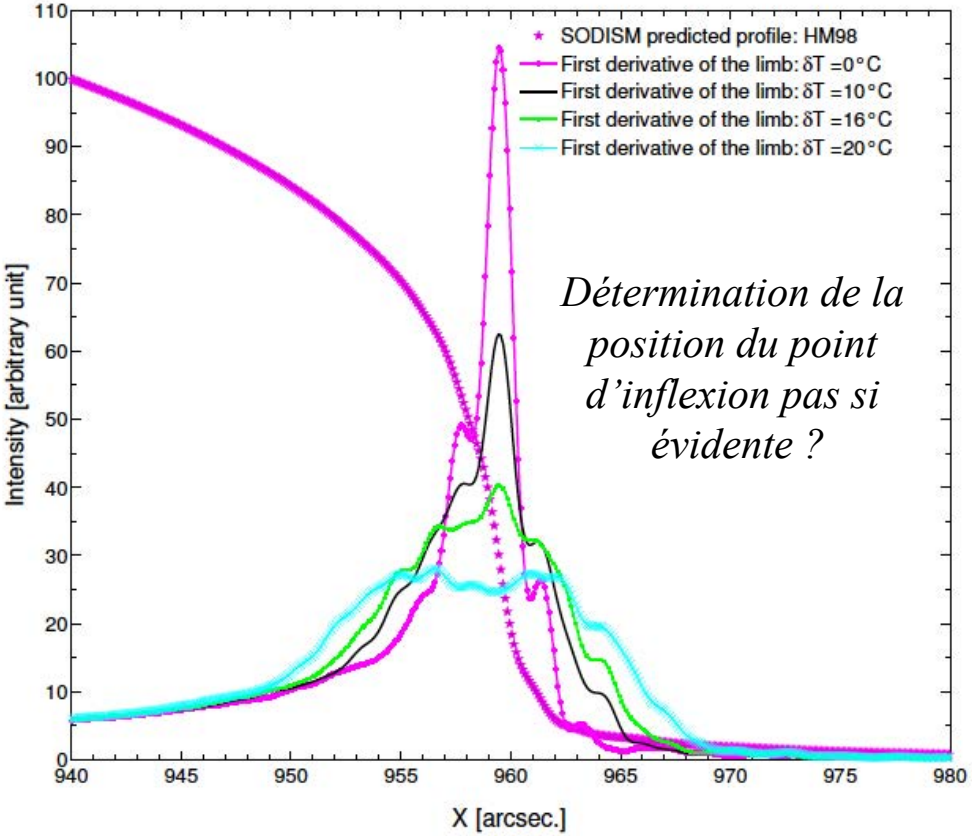
Modification de la PSF



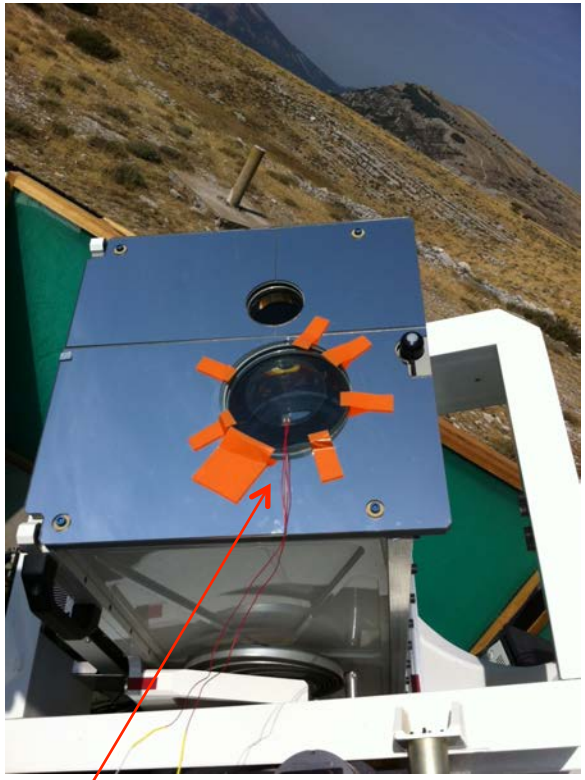
Profils : COSI, HM98, Piau-Hauchecorne

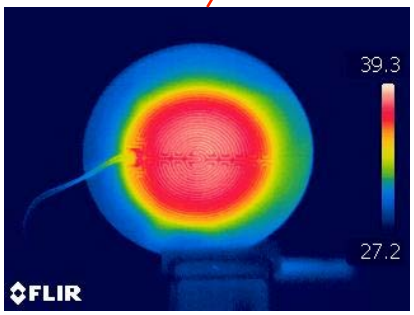
L'environnement spatial & le retour d'expérience

→ L'impact sur la mesure est dramatique.



Détermination de la position du point d'inflexion pas si évidente ?

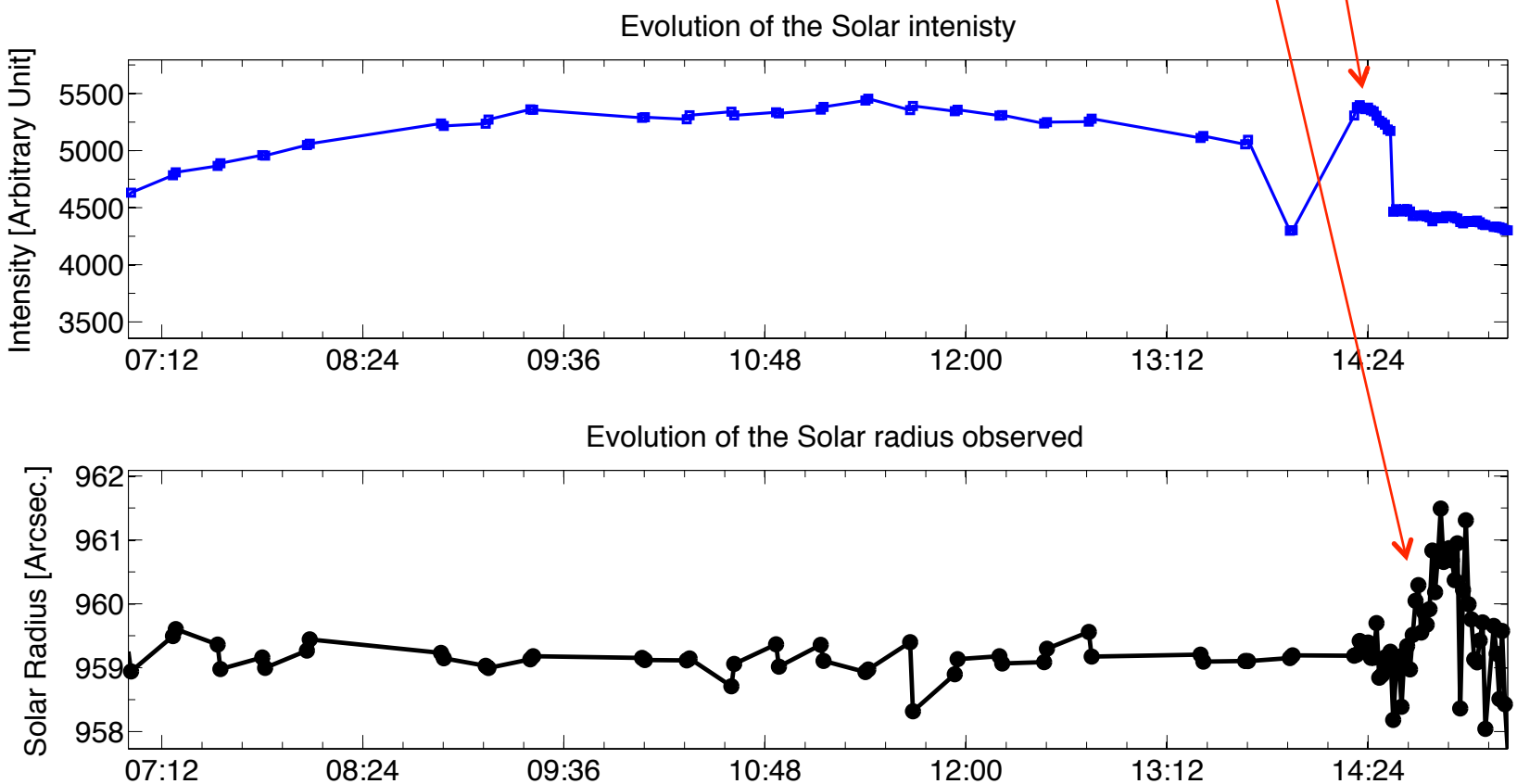




Utilisation d'un élément optique avec un réchauffeur simulant l'effet recherché

L'environnement spatial & le retour d'expérience

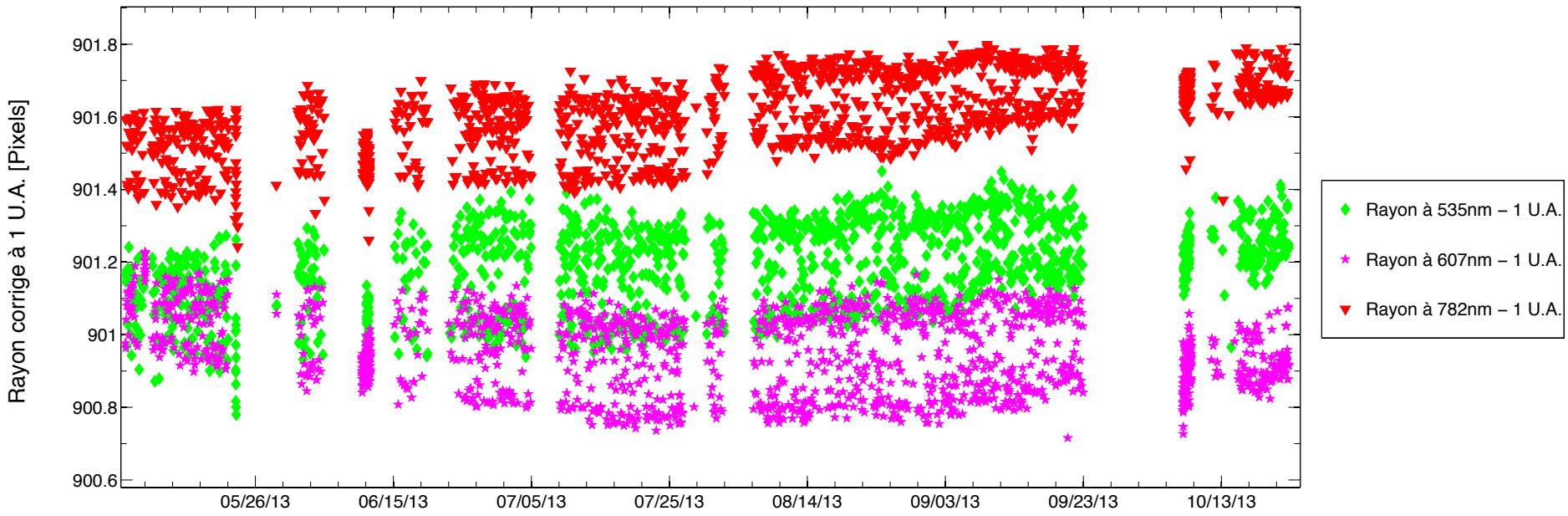
Modification du front d'onde & impact d'un gradient de température associé à un effet de contamination



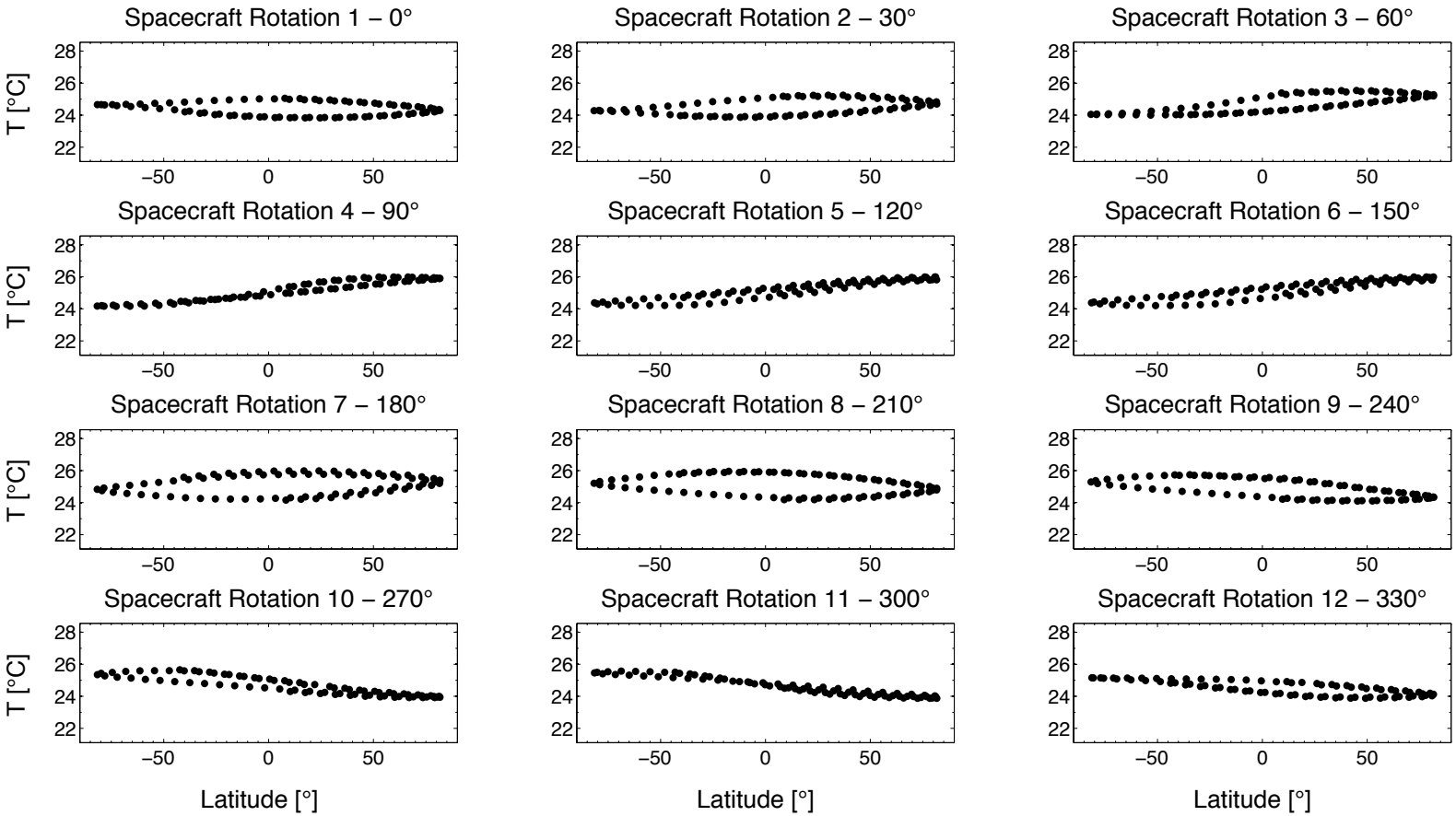
Les principaux résultats de la mission PICARD

- Couplage SODISM & SODISM II (segment « espace » et « sol »)

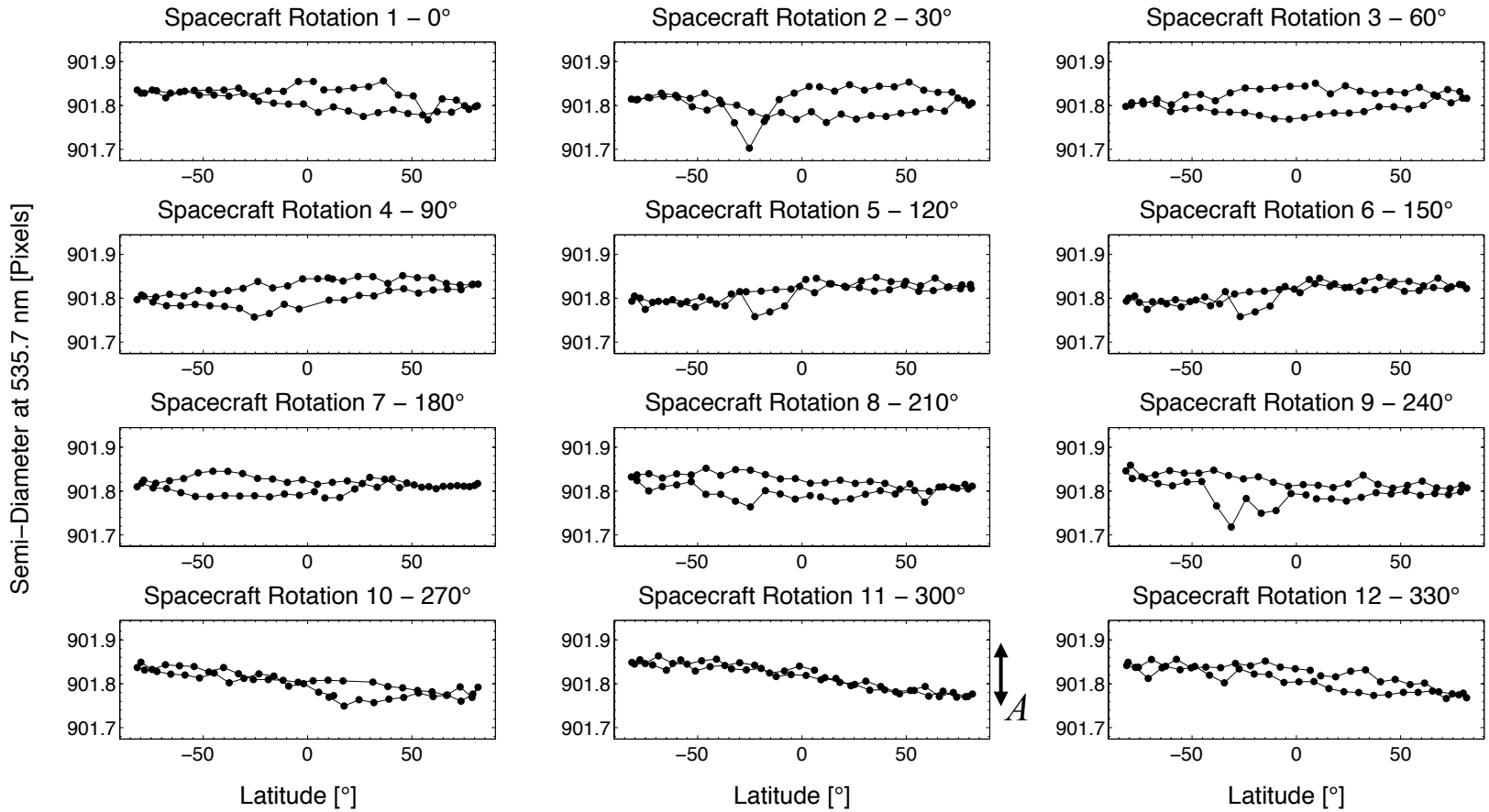
Valeurs obtenues avec SODSIM (très stable à court terme)



La température de l'instrument SODISM varie très faiblement au cours d'une orbite.

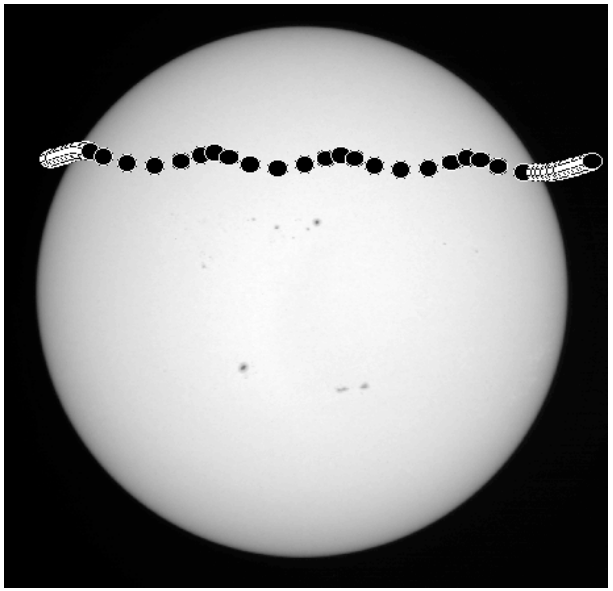


Le rayon solaire observé suit la même allure que la température de l'instrument.

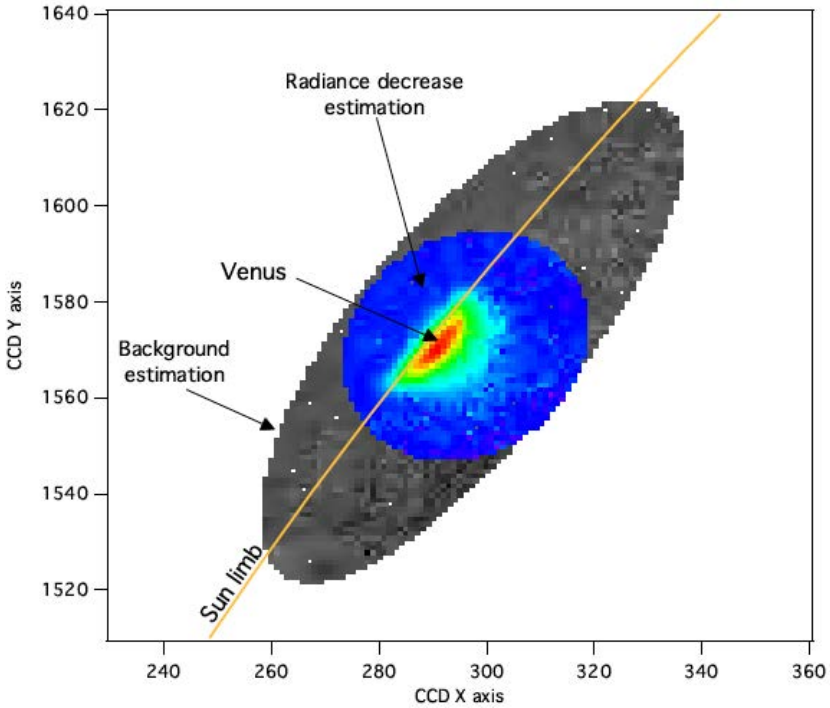


Les principaux résultats de la mission PICARD

- Le diamètre absolu du Soleil



Meftah, Hauchecorne, Irbah et al., Sol. Physics, 2014



Hauchecorne, Meftah, Irbah et al., APJ, 2014

959.86 +/- 0.20 arc-secondes
Méthode : point d'inflection

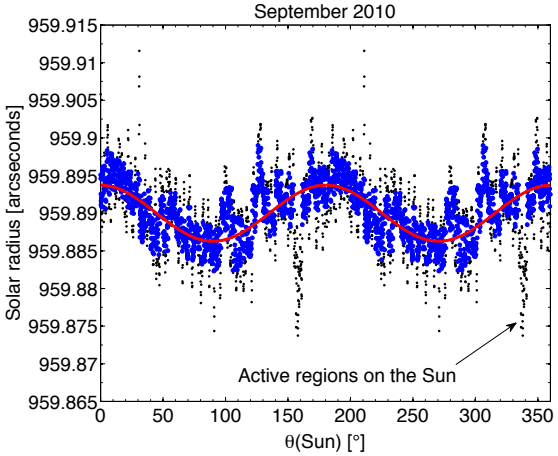
959.85 +/- 0.19 arc-secondes
Méthode : estimation de la baisse d'intensité (indépendant de la psf)

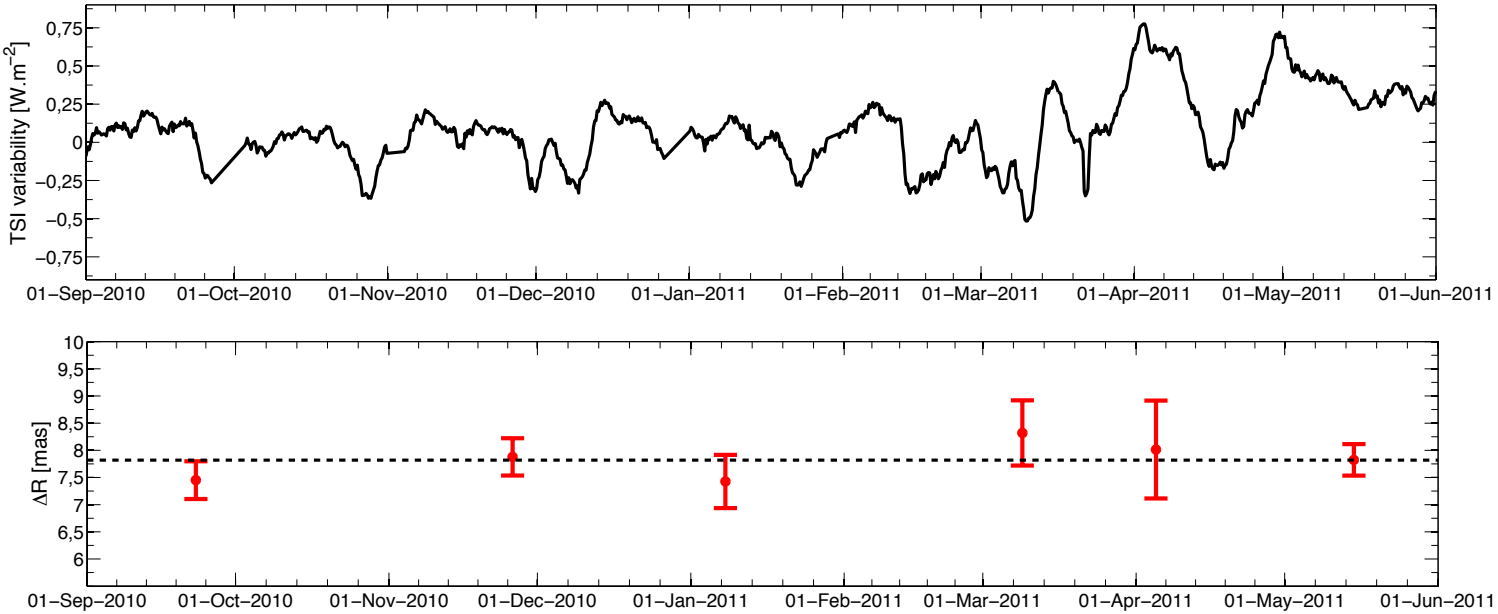
Les principaux résultats de la mission PICARD

- L'aplatissement solaire au cours du temps

Impact des régions actives du Soleil sur sa forme

Pas de corrélation avec l'activité solaire





Meftah, Irbah, Hauchecorne et al., Solar Physics, 2014

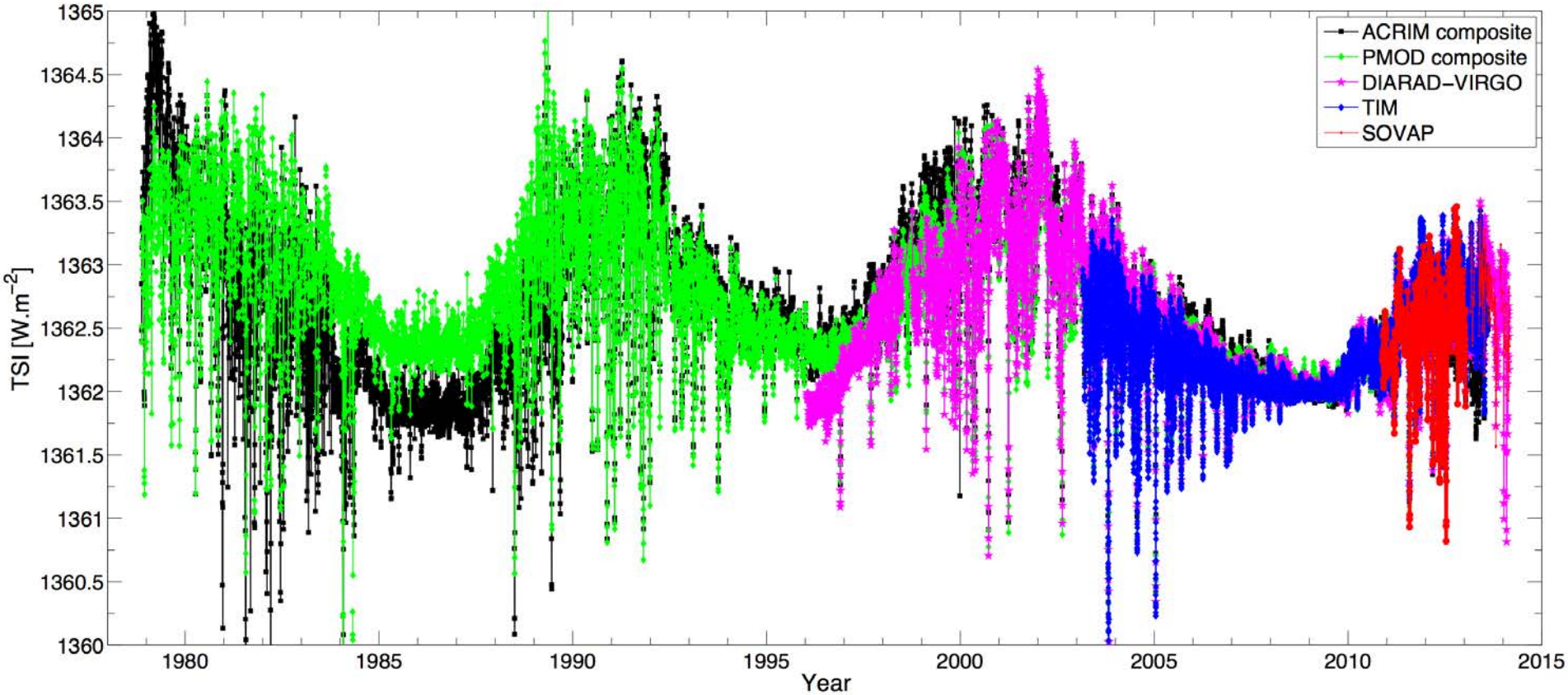
Les principaux résultats de la mission PICARD

- La valeur absolue de la TSI

Instrument	Années	TSI	Références
ERB/NIMBUS 7	**1978-1993**	**TSI ~ 1371 W.m^{-2}**	**Hickey et al., 1980 Hickey et al., 1988 Kyle et al., 1994**
ACRIM 1/SMM	1980-1989	TSI ~ 1367 W.m^{-2}	Willson et al., 1981 (1368.31 W/m2)
ERBE/ERBS	1984-2003	TSI ~ 1365 W.m^{-2}	Lee et al., 1987
ERBE/NOAA 9	1985-1989	TSI ~ 1364 W.m^{-2}	Barkstrom et al., 1990
ERBE/NOAA 10	1986-1987	TSI ~ 1364 W.m^{-2}	Barkstrom et al., 1990
ACRIM2/UARS	1991-2001	TSI ~ 1365 W.m^{-2}	Willson & Mordvinov, 2001
SOVA 1/EURECA	1992-1993	TSI ~ 1365 W.m^{-2}	Crommelynck et al., 1993
DIARAD/VIRGO on SOHO	1996-present	TSI ~ 1365 W.m^{-2}	Dewitte et al., 2004
PMO6V/VIRGO on SOHO	1996-present	TSI ~ 1365 W.m^{-2}	Finsterle et al., 2006 Fröhlich et al., 1997
ACRIM3/ACRIMSAT	2000-present	TSI ~ 1365 W.m^{-2}	Willson & Helizon, 1999
TIM/SORCE	2003-2013	TSI ~ 1361 W.m^{-2}	Kopp et al., 2005
PREMOS/PICARD	**2010-present**	**TSI ~ 1361 W.m^{-2}**	**Schmutz et al., 2013**
SOVAP/PICARD	**2010-present**	**TSI ~ 1362 W.m^{-2}**	**Meftah et al., 2013 (Solar Phys.)**

Les principaux résultats de la mission PICARD

- La TSI depuis 1978

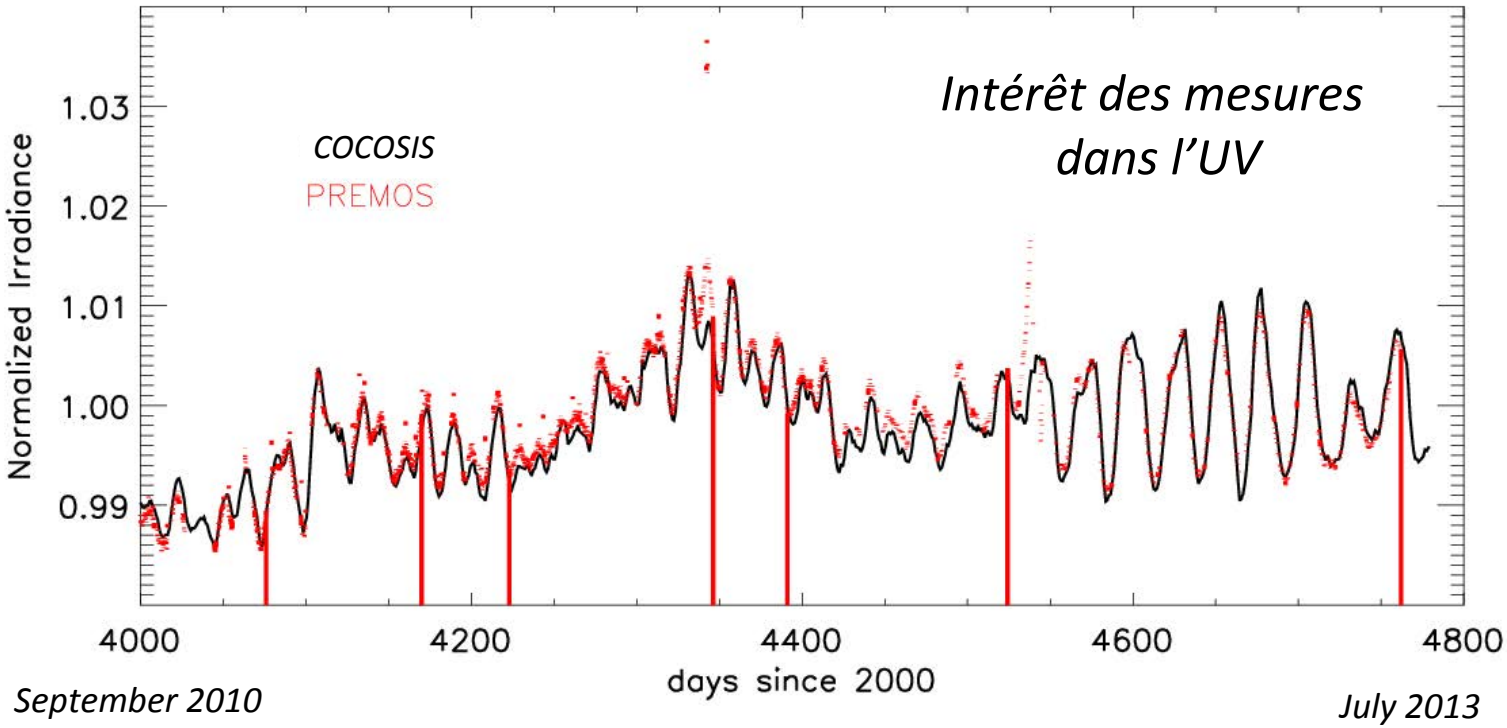


Dewitte et al., Solar Phys, 2005

Meftah, Dewitte, Irbah et al., Solar Phys, 2014

Les principaux résultats de la mission PICARD

- La SSI à 215 nm



Cessateur et al., A&A, 2014

Les données PREMOS peuvent être considérées comme des données de référence à la place de celles de SORCE.

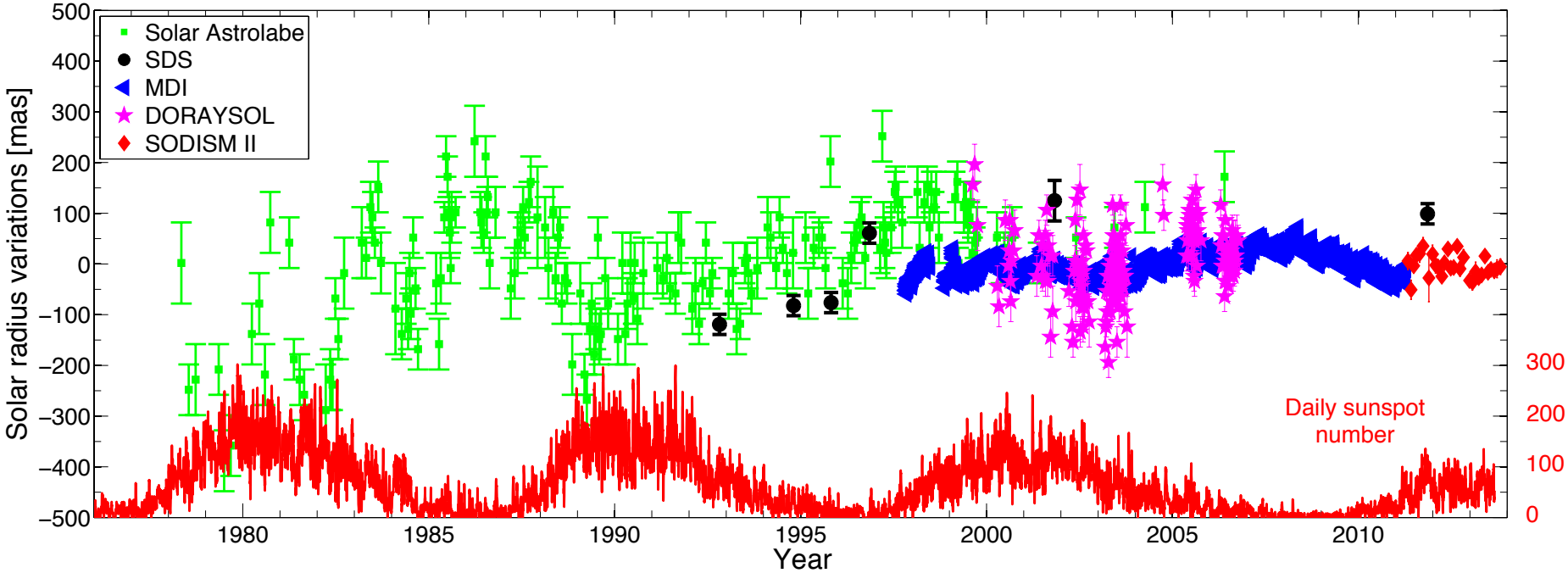
Les principaux résultats de la mission PICARD

- Le diamètre solaire au cours du temps

- Continuité des observations durant le cycle solaire 24 (minimum de Gleissberg ?)

$$\frac{\Delta TSI}{TSI} = 2 \times \frac{\Delta R_\odot}{R_\odot} + 4 \times \frac{\Delta T_{eff}}{T_{eff}}$$

Résultat très important

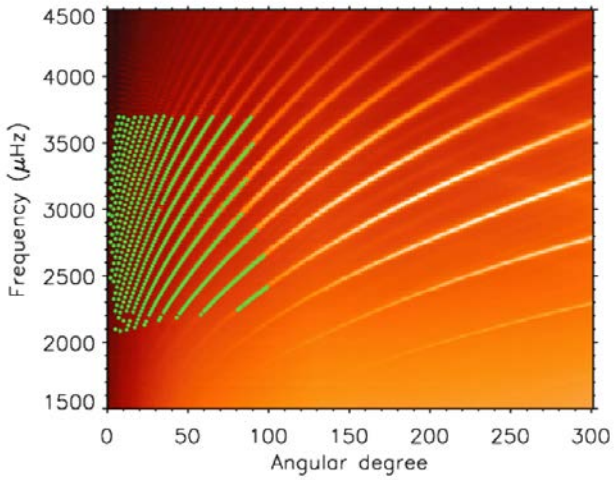


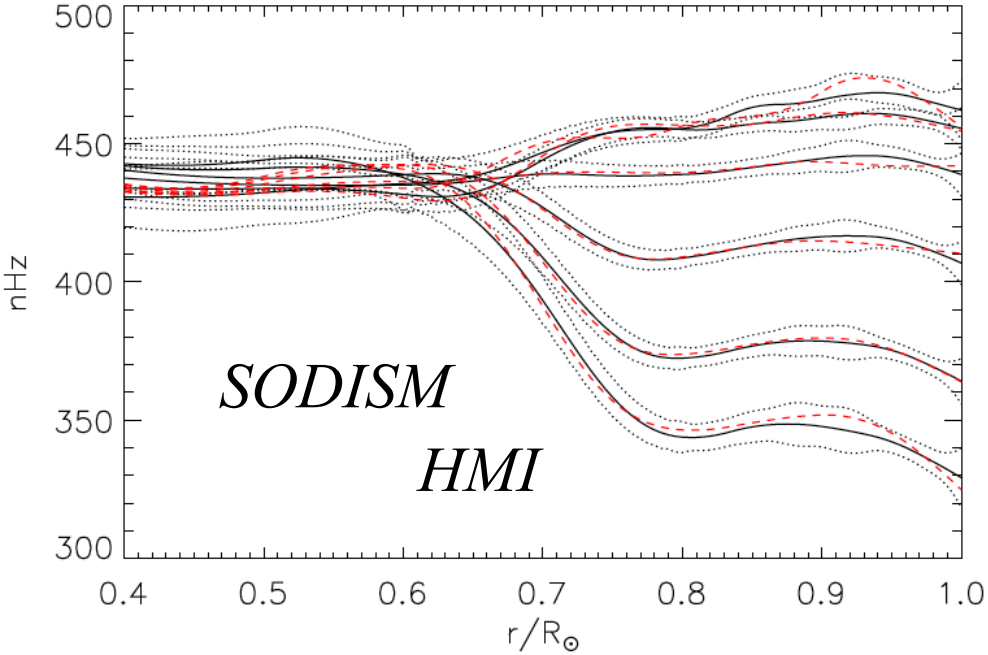
Meftah, Corbard, Irbah et al., A&A, 2014

Les principaux résultats de la mission PICARD

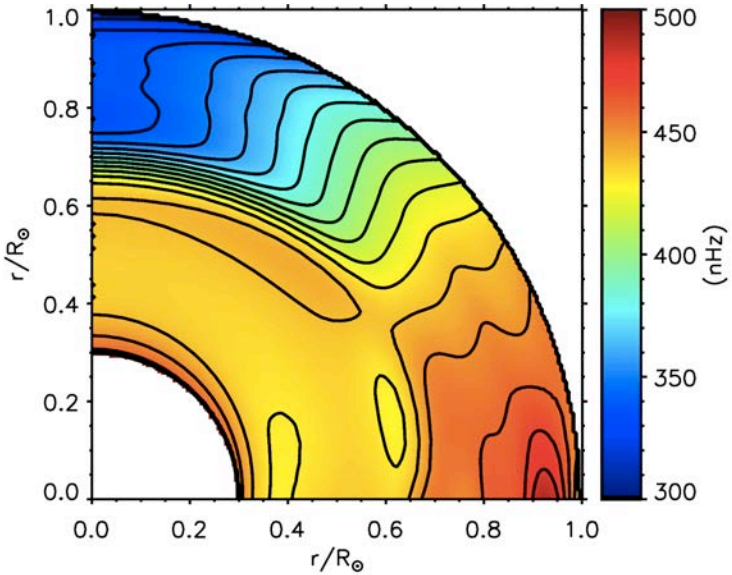
- L'héliosismologie

- Détection des modes p, non-détection des modes g





Rotation solaire interne de l'intérieur radiatif à la photosphère pour les latitudes allant de 0°, 15°, 30°, 45°, 60° et 75° de haut en bas.

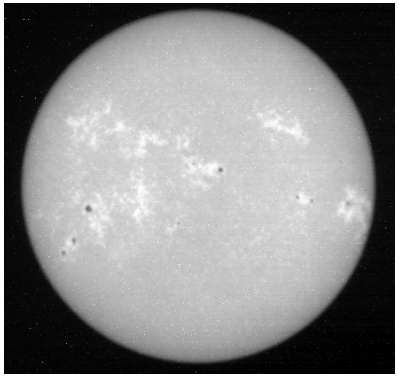


Corbard, Salabert, Boumier et al., 2013

Remerciements au CNES, à'IRMB, à l'ORB, au PMOD, au B-USOC et au CNRS

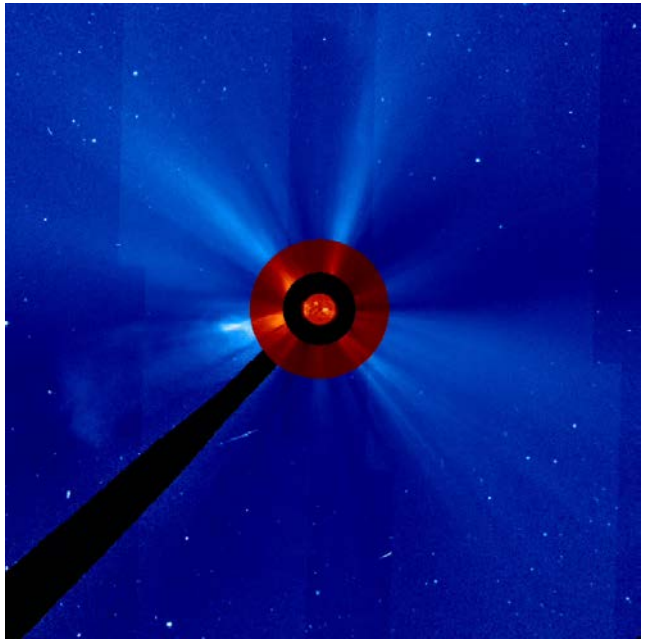
Le cycle solaire 24 est très particulier. Ejection de masse coronale importante en février 2014.

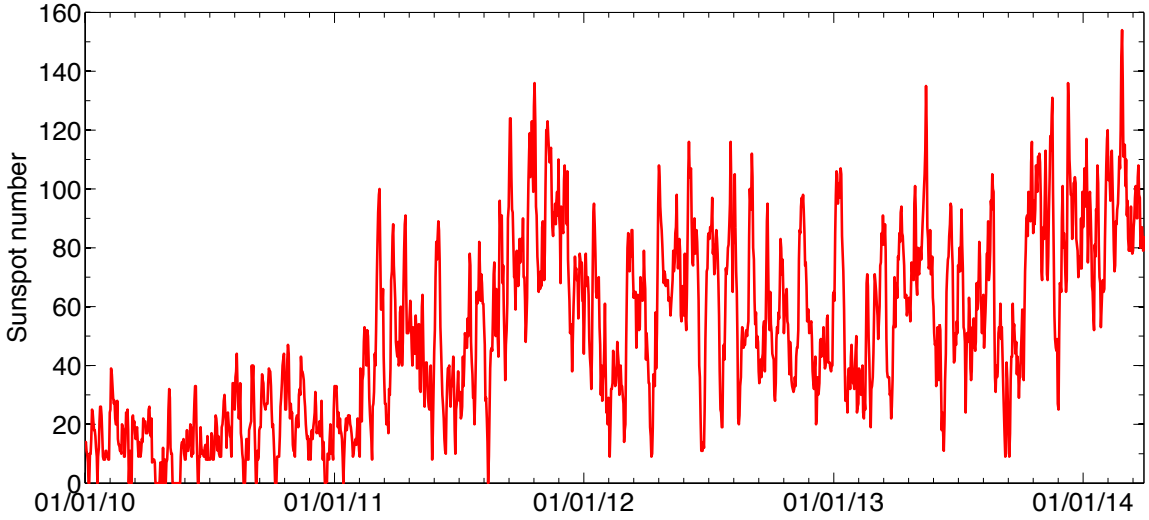
Il fallait continuer les acquisitions.

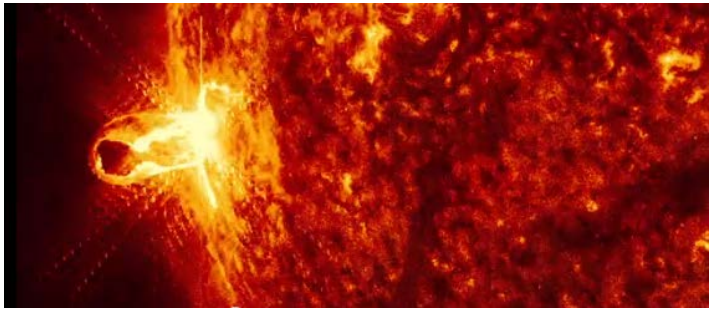


Dernière image acquise en mars 2014

Février-mars 2014







Première conclusion

PICARD nous apporte des informations scientifiques mais également des informations concernant le vieillissement et la dégradation de certains matériaux dans l'espace utiles aux développeurs d'instruments spatiaux.

Instrumentation	- Gestion d'une charge utile par un laboratoire jusqu'à la production des données scientifiques - Maitrise de l'expérimentation solaire spatiale - REX (effets de la contamination) → TRL …
Diamètre solaire	- Détermination absolu du rayon solaire (959.9 arc-sec.) et développement d'une nouvelle méthode de calcul (insensible vis à vis de la psf) : résultat différent de MDI et en accord avec HMI - Variation du rayon solaire au cours du temps (synergie Picard Sol) : < 40 mas et sans lien avec l'activité solaire
Aplatissement solaire	- Résultats importants : environ 8 mas (différent des résultats proposés par HMI, et en accord avec les modèles théoriques - Variation au cours du temps sans lien avec l'activité solaire
TSI	- Résultat important : TSI de ≈ 1362 W/m^2, en accord avec TIM/ SORCE & continuité des mesures PICARD lors de l'arrêt de TIM
Héliosismologie	- Modes p : rotation différentielle et amplification au limbe - Pas de détection des modes g (challenge)