Les composants et systèmes optiques dans l'environnement spatial : conception, vieillissement et qualification

Pierre ETCHETO, CNES DSO/SI/OP

(+illustrations D. Faye et R. Briet)

JT-ROP « optique en environnement extrême », Palaiseau, 13 dec. 2017

cnes
CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES

Sommaire

- **Introduction :**
  - L'environnement spatial : de multiples facteurs
  - Prévention : conception, qualification, recalage
- **Les différents facteurs et leur traitement**
  - Vide
  - Thermique
  - Mécanique
  - Radiations et contamination
  - Lumière parasite
  - Débris orbitaux
  - Electro-magnétique
- **Retours d'expérience**
  - PICARD-SODISM
  - CHEMCAM
  - GAIA
  - Bepi Colombo

Conclusions

© cnes

L'optique spatiale : introduction

Quelques ordres de grandeur :

- **Traille des instruments : 10 cm à plusieurs m.**
- **Tolérances optiques (WFE) : quelques dizaines de nm**
- **Tolérances mécaniques (tenue des optiques): quelques dizaines de µm et de µrad.**

Exigences fondamentales :

- **FIABILITE ! Plusieurs années en vol sans SAV…**
- **Performances toujours accues.**

⇒ **Etat de l'art ou technologies éprouvées?**

© cnes

L'environnement spatial : généralités

Un milieu agressif de multiples façons :

- **Le vide**
- **Vibrations au lancement**
- **La micropesanteur**
- **La thermique** (variations spatiales et temporelles)
- **Les radiations, ions lourds, ATOX, flux solaire**
- **La contamination** (particulaire et moléculaire)
- **Lumière parasite**
- **Débris orbitaux**
- **Perturbations électro-magnétiques**

- ***…Mais aussi au sol : AIT (assemblage, intégration et tests) et stockage***
  - Chaleur humide
  - Contamination particulaire et moléculaire
  - Erreurs humaines…

© cnes

Prévention : grandes lignes

- **Choix des matériaux et composants**
  - Compatibles en théorie => éviter organiques et dégazants.
  - Tests de qualification (ou composants militaires)
  - Embargo sur composants stratégiques (ITAR)
- **Conception :**
  - Dimensionnement mécanique et thermique
  - Contrôle thermique, passif ou actif
  - Blindages + mise à la masse
  - Maîtrise du dégazage / condensation
  - Réduction de la lumière parasite
- **Réalisation :**
  - Optiques, traitements, montures, structures, obturateurs et capots.
  - Traçage serré et contrôles à chaque étape.
- **Qualification / recette :**
  - Tests d'environnement sur composants et/ ou témoins (vieillissement)
  - Tests fonctionnels en environnement sur systèmes (stabilité).

© cnes

Le vide et ses effets

10^{-8} à 10^{-14} pa selon l'orbite

- **Pas de protection contre UV**
  - vieillissement des surfaces.
- **Dégazage**
  - contamination moléculaire.
- **Pas de convection**
  - Contrôle thermique par conduction et rayonnement.
  - Tests sous vide.
- **Effet optique air-vide :** indice de l'air ≠ 1.
  - Focalisation modifiée.
  - Traitements CVD poreux => décalage spectral.
  - Déformation par effet bilame.

⇒ ***Traitements optiques densifiés : IAD, plasma, IBS, DIBS…***

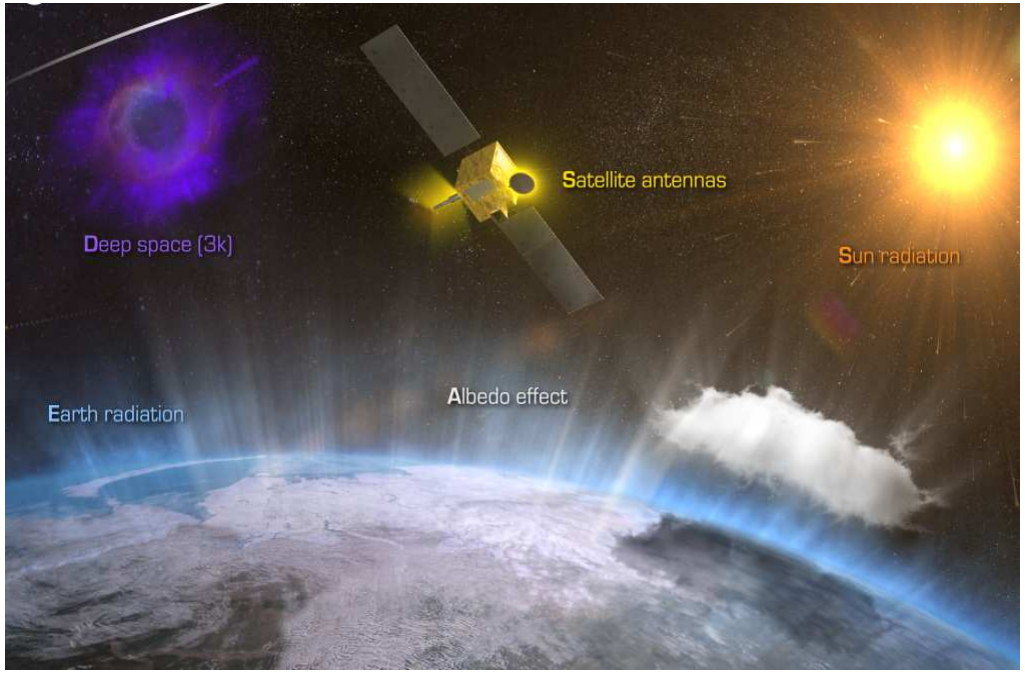
© cnes

Le contrôle thermique 1/5

Fort gradient entre côté éclairé (Terre, Soleil) et côté espace froid

- **cycles saisonniers (orbites lointaines) ou horaires (orbites LEO) :** +/-100 à 150°C selon orbite
  - Déformation des optiques, changements d'indice.
  - Déplacement et rotation des optiques.
  - Vieillissement accéléré des traitements.
  - Détensionnements.
- **Plage de fonctionnement nominal :**
  - +/- quelques °C à quelques mK.

  ⇒ Contrôle thermique fin et stable.
- **Mode survie :** dépointé, contrôle inactif.

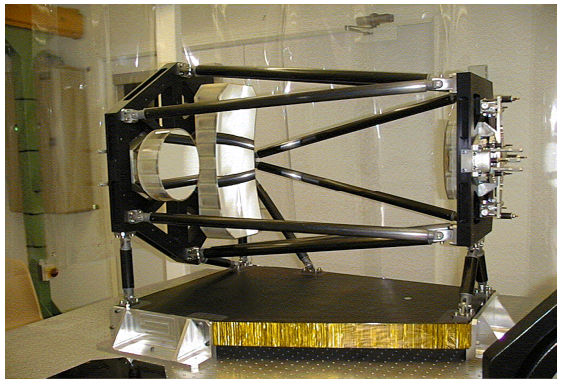


© cnes

Le contrôle thermique 2/5

Conception thermo-optique:

- **Dimensionnement de l'instrument :**
  - Protection : baffles & enceintes, découplage des parties exposées.
  - Réduire les gradients dans les optiques (verres mauvais conducteurs).
  - Ne pas contraindre les optiques (joints et DFM souples).
  - Combinaison optique tolérancée
- **Structures de télescope :**
  - Thermiquement stable : Zerodur + Composite carbone + Invar.
  - Athermique : tout en SiC.



Maquette de TMA
Miroirs Zerodur + barres composite

NAC of Rosetta / Osiris
Télescope tout SiC © ASTRIUM

© cnes

Le contrôle thermique 3/5

Contrôle thermique passif:

- **Couplage avec radiateurs :**
  - Par conduction : structures et tresses (optiques peu émissives).
  - Radiateurs face à l'espace froid ou au Soleil.
  - Dimensionnement pour évacuer la chaleur (+ marges).
  - Disposition pour minimiser les variations orbitales.
- **Isolation des autres parties :**
  - Electroniques de puissance déportées.
  - Isolation conductive (p. ex. baffle) par joints.
  - Isolation radiative par SLI ou MLI (multicouches de Kapton métallisé).
- **Veillissement des radiateurs et MLI :**
  - Sous radiations, UV, ATOX, contamination, particules…
  - Altère gravement absorption solaire et émissivité

Spectromètre d'INTEGRAL : MLI kapton aluminisé face AR + radiateurs peints =>

© cnes

Le contrôle thermique 4/5

Contrôle thermique actif :

- **Optiques et détecteurs très froids (p. ex. IR) :**
  - Cryostat à flux en boucle ouvert ou fermée.
  - Lourd et autonomie limitée.
- **Régulation fine, en complément du passif :**
  - Réchauffeurs asservis sur sondes de T°
  - Répartis pour éviter les gradients spatiaux…
- **Références embarquées :**
  - Corps noirs à T° régulée et ajustable.

Contrôle actif du télescope COROT =>

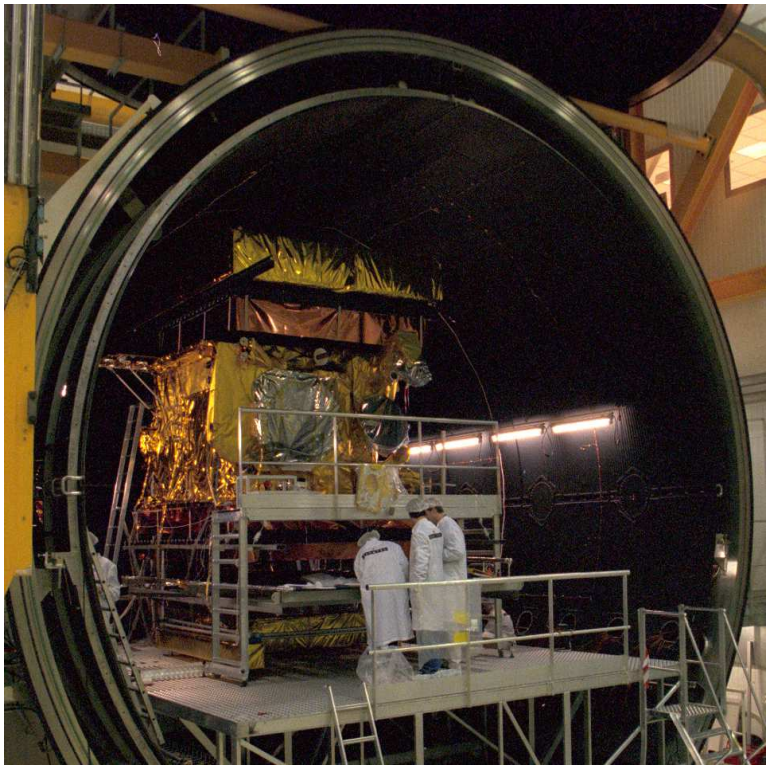
Cryostat d'Herschel : He à 1,7K

© cnes

Le contrôle thermique 5/5

Essais vide-thermique :

- **Cyclages vide-thermique :**
  - Typiquement 5 cycles + paliers, plage nominale margée.
  - Validation de la réalisation
  - Détensionnement + dégazage.
- **Essais fonctionnels sous VT :**
  - Validation de l'architecture thermique (avec flux solaire)
  - Fonctionnement, sensibilité, bruit…
  - qualité optique, visée…



STENTOR en essai VT à Intespace

© cnes

L'environnement mécanique 1/3

Au lancement, vibrations, chocs (plusieurs dizaines de g au niveau composant)

- **Risques de rupture :**
  - verres et structures très allégées
- **Risques de déréglage :**
  - Détensionnement
  - Micro-glissement des liaisons
- **Déplacement de la contamination particulaire**
- **Grippage des mécanismes :**
  - vérins, obturateurs, roues à filtres, couvercles…

⇒ ***Dimensionnement opto-mécanique :***

- *Compromis masse / rigidité / filtrage des basses fréquences.*
- *Ne pas contraindre les optiques (déformation, gradients d'indice).*
- *Combinaison optique tolérante.*

© cnes

L'environnement mécanique 2/3

- **Modélisation éléments finis :**
  - Statique (Contraintes) et dynamique (modes propres).
  - Données sur matériaux et interfaces.
- **Essais mécaniques :**
  - Vibrations et/ou chocs 3 axes sur instrument puis satellite.
  - Marges 25% (modèle) + 25% (recette) ou 50% (qualification).
  - Contrôle par sondes des niveaux locaux.
  - Comparaison aux prédictions d'essai.

=> Contribuent au détensionnement

Essai de vibrations de COROT à Intespace =>

© cnes

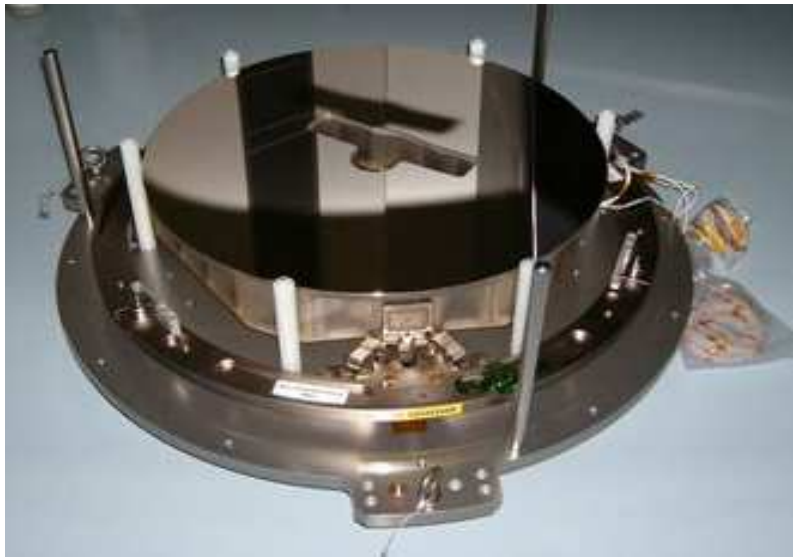
L'environnement mécanique 3/3

La micropesanteur:

- **Contraintes différentes au sol et en vol :**
  - Minimiser l'effet pour régler et caractériser au sol.
  - ⇒ *Miroirs et structures rigides (pas de coma de gravité)*
  - ⇒ *Supportage « astigmatisme zéro » des miroirs*
  - ⇒ *Mesures WFE à différentes orientations,*

    pour séparer WE 0g et WFE gravité

    Tenue des miroirs : DFM (TSESO)=>



- **Risque de blocage des mécanismes**
  - Réglages sol par toujours les bons

© cnes

Les facteurs de viellissement 1/4

Environement radiatif :

- **Radiations ionisantes :**
  - Doses faibles (Soleil), blindage en général suffisant.
- **Radiations non ionisantes :**
  - Surtout Visible + IR proche (Soleil + albédo terrestre).

  ⇒ Echauffement (baffle + zones de focalisation)
  - UV (Soleil) : dose moindre, mais pernicieux chimiquement.
  - IR thermique (Terre)…
- **Oxygène atomique (ATOX) :**
  - Orbites basses, dose selon activité solaire.
  - Provoque oxydation et érosion.
  - Peu d'effet sur traitement intact (couche de protection inerte) mais
  - Aggrave l'effet d'un dommage local, de l'UV, de la contamination…
- ***Protection: optique de tête en Silice non traitée.***

© cnes

Les facteurs de viellissement 2/4

La contamination :

- **Contamination particulaire :**
  - Surtout environnement sol.
  - Particules de 0,5µm ou plus => diffusion => lumière parasite.
- **Contamination moléculaire :**
  - Environnement sol + dégazage en vol.
  - Matériaux divers, notamment organiques.
  - Dépôt : film ou gouttelettes. Mécanisme complexe à modéliser.
  - Réactif chimiquement : polymérisation (accéléré par thermique, ATOX et radiations).
- **Humidité :**
  - Environnement sol (AIT et stockage).
  - Chaleur humide (sur pas de tir à Kourou).

© cnes

Les facteurs de viellissement 3/4

Plans propreté

basés sur les normes :

- Choix de matériaux peu dégazants, ou en faible quantité.
- Conception pour maîtriser le dégazage / redépôt.
- Etuvage des composants.
- Salles blanches (ISO5) + précautions de manipulation.
- Environnement de stockage (pendant des années).
- Suivi sur témoins.

Essai thermique sur COROT, en classe ISO 5 (ou 100) =>

⇒ **Propreté : chère mais indispensable !**

© cnes

Les facteurs de viellissement 4/4

Conséquences sur les optiques :

Synergie entre rayonnements, ATOX, cyclages thermiques, Contamination, chaleur humide…

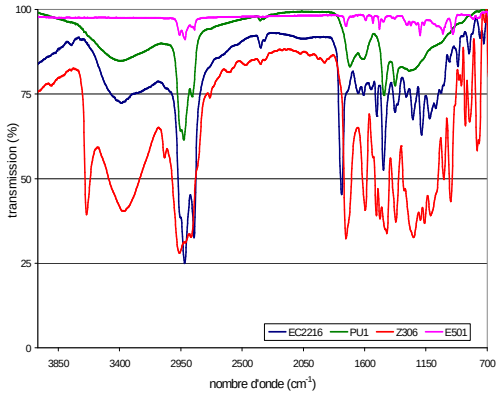
A la moindre amorce, la dégradation se propage!

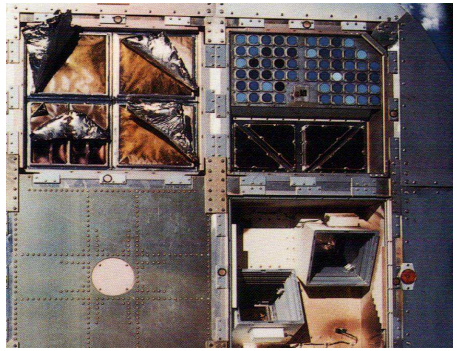
- **Effet dans la masse (radiations) :**
  - Déformation => mécanisme de refocalisation périodique.
  - Changement d''indice et opacification des verres.
- **Effets sur les traitements :**
  - Perte de transmission (en particulier dans l'UV).
  - Rugosité accrue => diffusion.
  - Dégradation des revêtements thermiques et des générateurs solaires.
  - Faïençage et pelage des traitements.

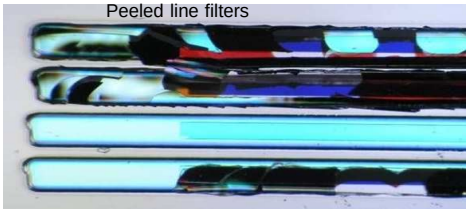
(De haut en bas) : transmission dégradée par contaminants usuels

Expérience LDEF sur mission FRECOPA

Filtres alumettes délaminés







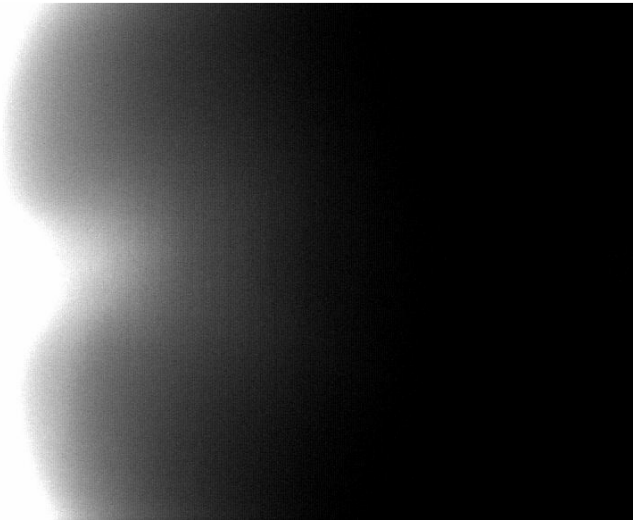
© cnes

La lumière parasite 1/4

Particularité de l'environnement spatial :

- Fort contraste (10^{-9} à 10^{-12}) entre astres observés et sources parasites : Soleil, Lune, Terre… ou parties du satellite!

⇒ Critique pour instruments et senseurs stellaires de pointage.



Parasites solaires dans SST du DTU

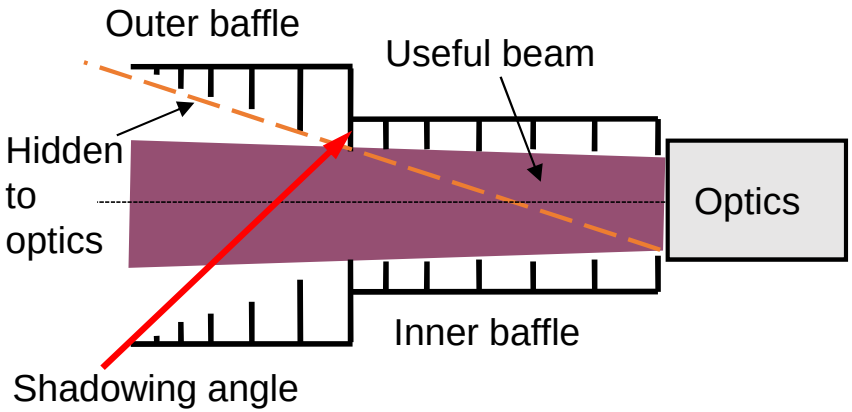
© cnes

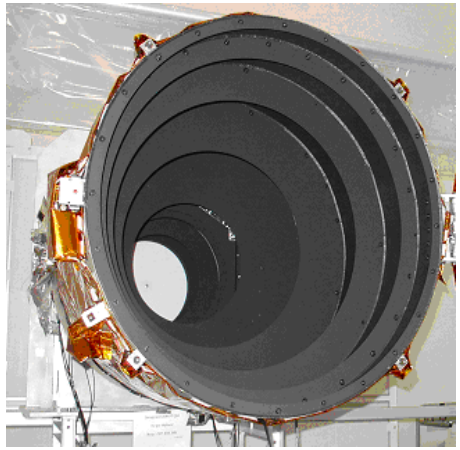
La lumière parasite 2/4

Bafflage:

- Baffle à 2 étages : Encombrant

Baffle de Corot (3,5m) =>





- Technologies « super-noirs » + arêtes fines

Noir multicouche de CILAS =>

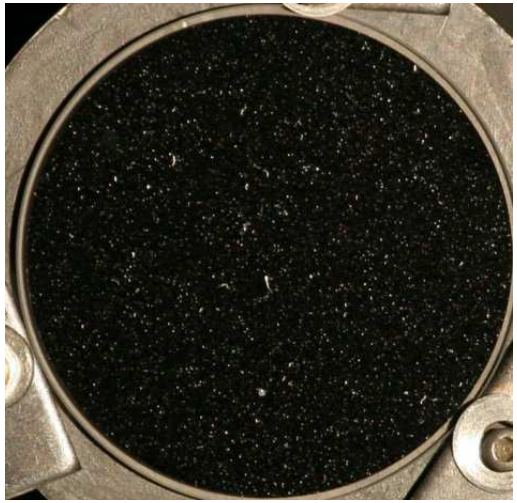
© cnes

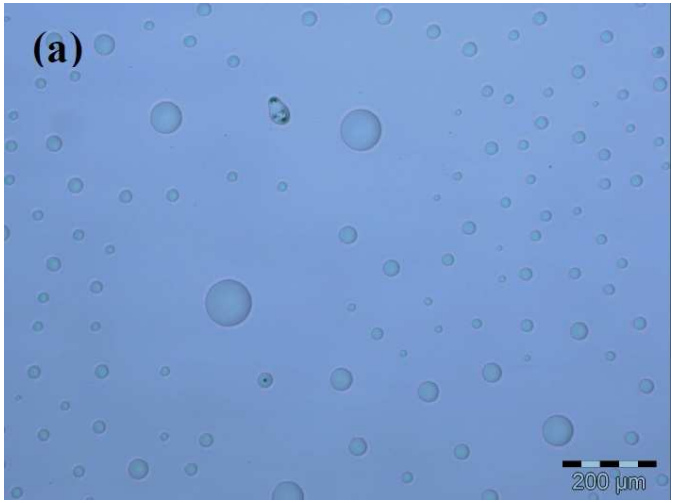
La lumière parasite 3/4

Diffusion des baffles relayée par diffusion des optiques :

- Optiques super-polies + traitements densifiés.
- Contrôle de la contamination :

Particulaire (poussières) ***ET*** *moléculaire (gouttelettes)*





© cnes

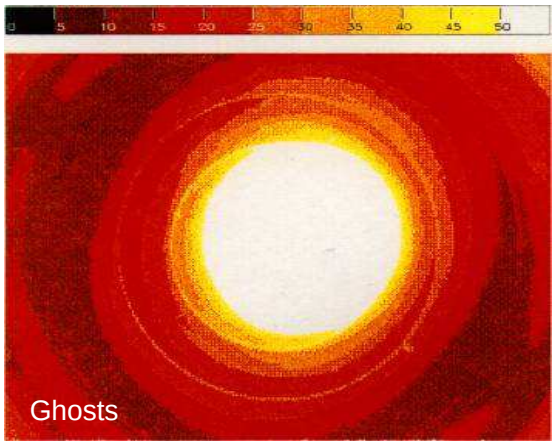
La lumière parasite 4/4

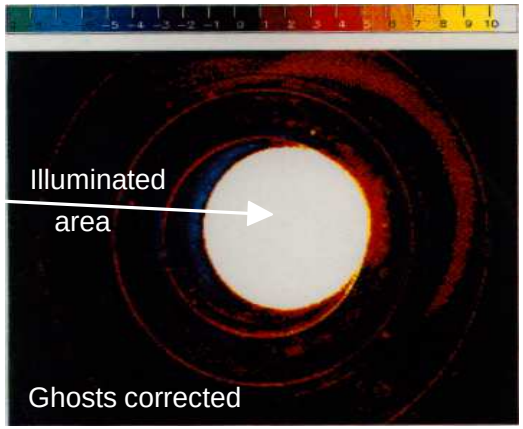
Mesure et correction par traitement :

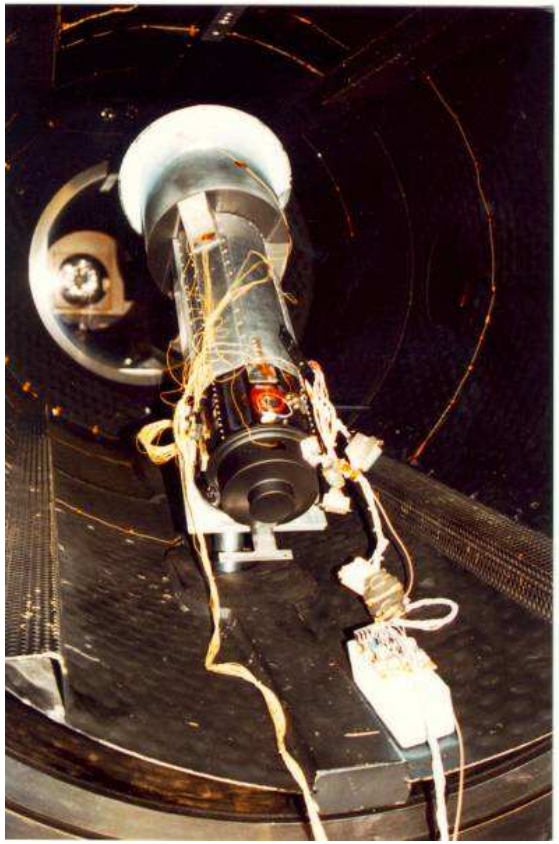
- Mesure difficile (perturbée par dispositif):

SST de PRONAOS =>

- Correction complexe mais efficace : PARASOL







© cnes

Les débris orbitaux

5000 satellites en 60 ans, surtout sur orbites LEO (600-800 Km) :

- Des centaines de milliers de débris (0,1 à >100 mm) : tous ne retombent pas.
- Probabilité d'impact (débris 1mm) : 1 pour quelques années.

⇒ Dégâts locaux sur générateurs solaires et revêtements thermiques.

⇒ Perte totale sur instruments et électroniques.

Pas de solution complète!

- *Blindage : trop lourd.*
- *Détection et évitement des plus gros débris.*
- *Règlementation : désorbitage en fin de vie.*

Parasites solaires dans un senseur stellaire

© cnes

La compatibilité électro-magnétique

- **Sources :**
  - Électroniques de l'instrument et du satellite.
  - Tempêtes solaires.
  - Anomalie Sud-Atlantique.
- **Conséquences :**
  - Dysfonctionnent momentané des électroniques.
  - Décharges électrostatiques.

⇒*Spécifications de conductivité des traitements.*

⇒*Mise à la masse des optiques et des structures.*

⇒*Tests en chambre anécoïque.*

© cnes

Quelques retours d'expérience

- **Télescope SODISM de PICARD :**
  - Radio-imageur solaire très haute précision. Design peu tolérant.
  - Contamination moléculaire inhomogène sur fenêtre d'entrée.

  ⇒ Perte de signal brutale dans l'UV.

  ⇒ Gradient thermique => Perturbation cyclique de la PSF.

  ⇒ Mission partiellement « récupérée » par modélisation du phénomène.
- **Refocalisation de SUPERCAM:**
  - Laser + caméra opérant à distance finie sur Mars
  - Radiations => panne de la diode laser de l'autofocus.

  ⇒ Exploitation des images => focus « manuel ».
- **Lumière parasite dans GAIA :**
  - Chemin parasite très localisé via miroir vers enceinte extérieure.
  - Givre sur la peinture noire => forte diffusion.

  ⇒ Lumière parasite 100x prédiction, pour certaines attitudes.
- **Contamination dans BEPI COLOMBO :**
  - Abords de VENUS => fort flux solaire.
  - Plate-forme : MLI classique inutilisable => fibre de verre.
  - Essais en vibration => bouts de fibres dans les instruments!

© cnes

Recalages en vol

- **Réglages optiques:**
  - Mécanisme de refocalisation tilt.
  - (bientôt) Miroirs actifs => correction de front d'onde.

  ⇒ Permettra des conceptions plus tolérantes.
  - Etalonnage en vol (à bord ou sur astres).
- **Contamination :**
  - Réchauffement périodique => dégivrage provisoire.
- **Restitution par traitement d'image:**
  - Déconvolution de certains défauts de PSF (PAS le défocus).
  - Correction de la lumière parasite dans le champ de vue.

© cnes

Conclusions

- **Multiples facteurs de dégradation:**
  - Déréglage géométrique et radiométrique de l'instrument.
  - Vieillissement progressif => perte de perfo optique et thermique.
  - Combinaison de facteurs => dégradation acclérée.
- **Prévention et correction :**
  - Prise en compte dès le début de la conception.
  - Lien étroit entre technologie et architecture.
  - Technologies : état de l'art ou valeurs sûres?
- **Essais :**
  - Sur composants et sur ensemble (instrument et/ou satellite).
  - Essais couvrants mais pas trop. Représentatifs?
  - Tendance : simulations plus poussées, moins de maquettes et d'essais

⇒ **Faster better cheaper… But not safer!**

© cnes