



Métrologie des instruments optiques spatiaux

Pierre ETCHETO, CNES DSO/SI/OP

(+illustrations E. Cansot et P. Gamet)

MOI-OTOP « métrologie optique et instrumentation » – 18 Mars 2021



Sommaire

1- Introduction :

- Spécificité des instruments spatiaux
- L'environnement spatial
- Principes de qualification

2- Mesures et tests sur composants

- Traitements et filtres
- Lentilles et miroirs
- Détecteurs
- Contamination

3- Assemblage et tests instrument (AIT)

- Qualité image-réglage
- Radiométrie - spectrométrie
- Lumière parasite

4- Qualification en environnement

- Essais mécaniques
- Cycles vide-thermique
- EMC

5- recalages en vol

- Géométrie
- Radiométrie
- Lumière parasite

6 - Conclusions

Spécificité des instruments spatiaux

Des missions très diverses

- Imagerie : astronomie ou Terre
- Radiométrie UV, visible, IR
- Spectrométrie et spectro-imagerie
- Lidars (télémétrie, sondage atmosphérique)

Une échelle très variable

- Grands télescopes (plusieurs m)
- Micro-satellites (<1m³)
- Nanosatellites : 1-6 modules de (10cm)³

Inaccessible en vol

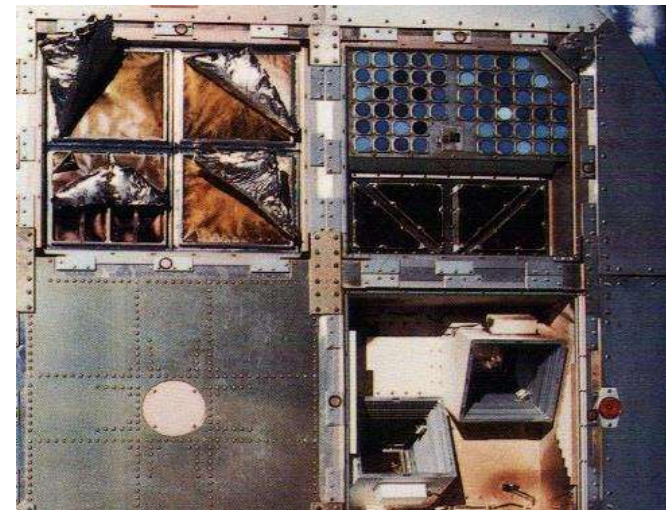
- Stabilité en environnement sur des années ...ou...
- Corrections limitées (refocus)
- Corrections par traitement d'image



L'environnement spatial

De multiples perturbations:

- Vide
- Vibrations au lancement
- Micropesanteur
- Thermique (variations orbitales + dérives)
- Radiations, ions lourds, ATOX, flux solaire
- Contamination particulaire et moléculaire
- Lumière parasite
- Débris orbitaux
- Perturbations électromagnétiques



Effet des UV (en essais)

...Mais aussi au sol : AIT (assemblage, intégration et tests) et stockage

- Chaleur humide
- Contamination
- Erreurs humaines...

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 sol sous vide.

Différence d'indice air-vide

- Défocalisation.
- Traitements CVD poreux => décalage spectral.
- Déformation par effet bilame.

Principes de qualification spatiale

Choix des matériaux et composants

- Compatibles en théorie.
- Tests de qualification sur échantillons (ou COTS).

Conception

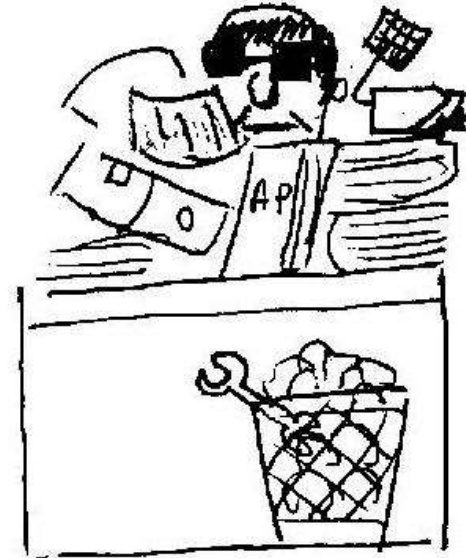
- Dimensionnement méca-thermique.
- Anticipation effet des radiations (defocus)
- Mise à la masse.
- Maîtrise du dégazage.

Réalisation

- Traçage et contrôles à chaque étape.
- Tests qualification de lot (LAT)

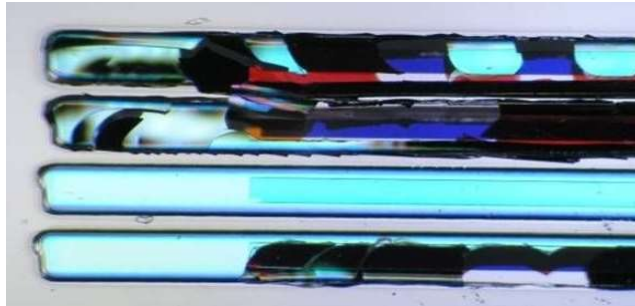
Qualification instrument

- Caractérisation optique et fonctionnelle complète.
- Tests d'environnement.
- Re-caractérisation complète ou partielle.



Mesures et tests : Traitements optiques

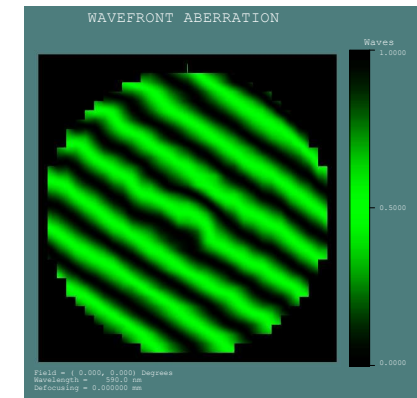
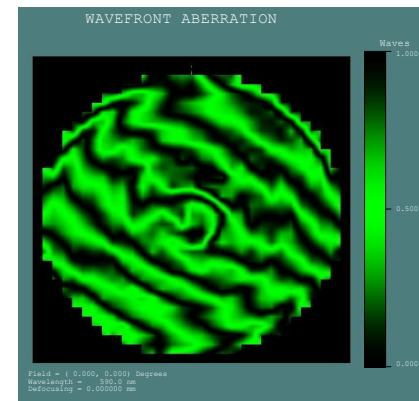
- **Mesures spectrales**, effets :
 - air/vide
 - Uniformité
 - Ouverture + télécentricité
 - Filtres multi-spectraux : géométrie des masques
- **Qualification** : Vide-thermique, chaleur humide, adhérence & nettoyage, ATOX



Délamination de filtres multi-spectraux

Mesures et tests : miroirs & lentilles

- **Erreur de front d'onde** (WFE) A chaque étape de polissage.
 - Hors d'axe, coniques, Free Form => **Correcteur**
 - Grandes dimensions => **stitching**
 - Gravité => mesures par **retournement**
 - Lentilles IR => mesures (visible) faces + épaisseur
 - Miroirs « cavité arrière » => analyse par sous-pupilles
- **Métrologie 3D** :
 - Dimensions
 - Centrage & tilt % interfaces
- **Aspect** : frayures, pinholes, bords, traitement
- **Rugosité** sur témoins.



WFE avant et après retouche de polissage

Mesures : miroirs équipés

➤ **Collage des DFM (pieds) & montage sur I/F:**

- Défaut de (co)planéité
- Déformations des pieds
- Rétreint de la colle
- Serrage des vis

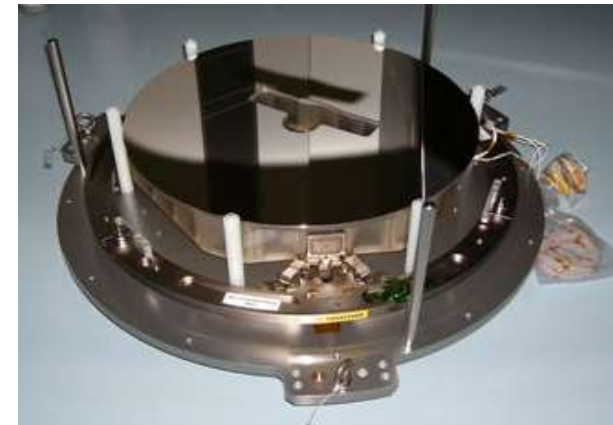
=> Contraintes => WFE (astigmatisme)

➤ **Prévention :**

- Précision des plans d'I/F
- Tenue pendant collage

➤ **Correction :**

- Décoller, redresser/refaire les pièces
- Calculer les contraintes de déformation
- Les compenser par des cales



Miroir primaire équipé



Mesures et tests : détecteurs

Détecteurs

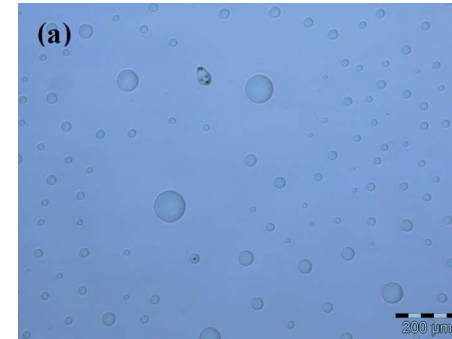
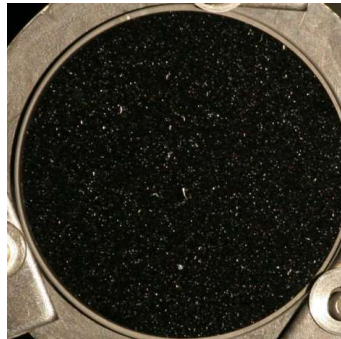
- **Tests fonctionnels en conditions représentatives (T°, vide si nécessaire) :**
 - Sensibilité spectrale
 - Linéarité
 - Réponse temporelle
 - signal d'obscurité
 - Uniformité.

- **Tenue en environnement** (radiations, cyclages thermiques, EMC).

Mesures et tests : contamination

Contamination

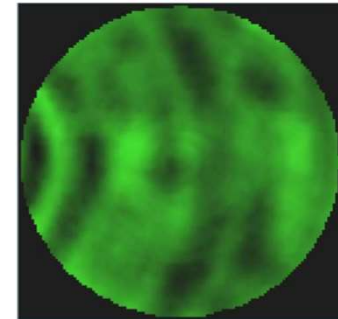
- Témoins suiveurs de contamination **Particulaire** et **moléculaire**
- **Plan propreté :**
 - Salle blanche
 - Temps d'exposition
 - Protections
 - Nettoyage (le moins possible)



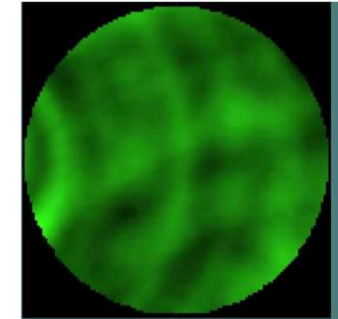
Contrôle du Sous-Ensemble Optique

Qualité image

- **WFE en double passage** (ex : PLEIADES, COROT) :
 - Interféromètre focalisé au foyer + miroir d'autocollimation.
 - Test dans le champ => décentrement des différentes optiques.
- **Réglage** :
 - Analyse polynômes de Zernike => calcul des corrections.
 - Choix des compensateurs les plus efficaces (souvent sur M2)
 - Correction temporaire : vérins.
 - Réglage final : cales, vissage / collage



Centre du FOV :
Défauts M1



Bord de FOV :
Défauts M1+ M3

Tests partiels (télescope + objectif)

- Ex : COROT, CSO
- Image intermédiaire aberrante => Correcteur pour mesurer les sous-ensembles séparément

Contrôles géométriques sur l'instrument

Qualité image sur collimateur

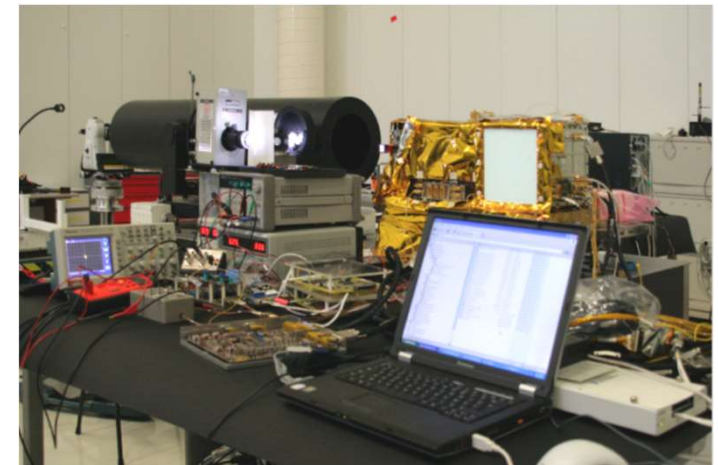
- Mesure de **PSF** et /ou de **FTM** sur mire
- **Diversité de phase** (PSF pour différents défocus) => Focalisation instrument (ex : Tango).
- Etalonnage de la distorsion.
- Repérage des axes instrument par rapport à cube (ex : PICARD)...

Parfois l'instrument est trop grand pour un collimateur en pleine pupille

=> Mesure de WFE par stitching

Tests sur étoiles

- PST (ex : COROT)
- Co-alignement entre instruments (ex : PRONAOS)
- Cartographie de la distorsion (ex : SST ESTADIUS)



Contrôle image + visée PICARD

Contrôles radiométriques sur l'instrument

Sphère intégrante (Φ jusqu'à 1m): calibration relative

- Linéarité (ex : Microcarb)
- Uniformité dans le champ.

Collimateur : source large, LED ou diode laser accordable, selon le cas

- Sensibilité absolue instrument (précision typique 1%)
- Réponse spectrale (test plus résolu que l'instrument)

- Réponse dynamique (ex: TARANIS) :

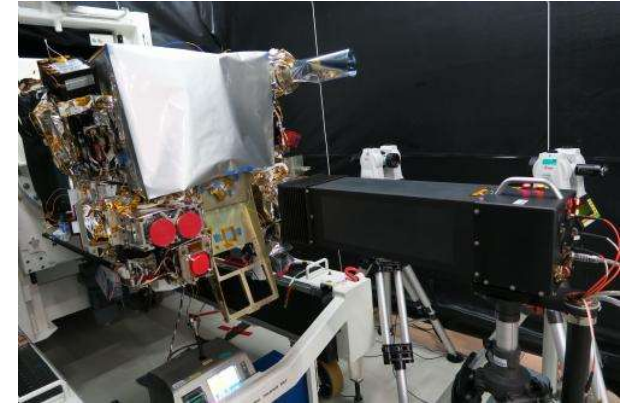
impulsions de profil choisi => Réponse instrument + traitement automatique => détection d'évènement

Source représentative (transition sombre/clair, motifs...)

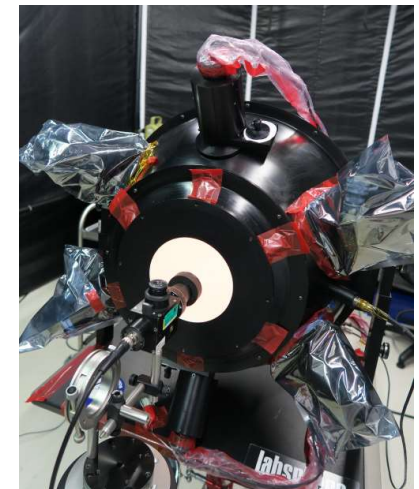
- Lumière parasite (v. plus loin)
- Reconnaissance de motifs

OGSE (outillages de test optique) en pleine pupille, si possible.

OGSE à l'air, mais instrument en condition fonctionnelles (tout ou partie sous vide, refroidi...)



OGSE de TARANIS =>



Essais de lumière parasite

Fortes exigences :

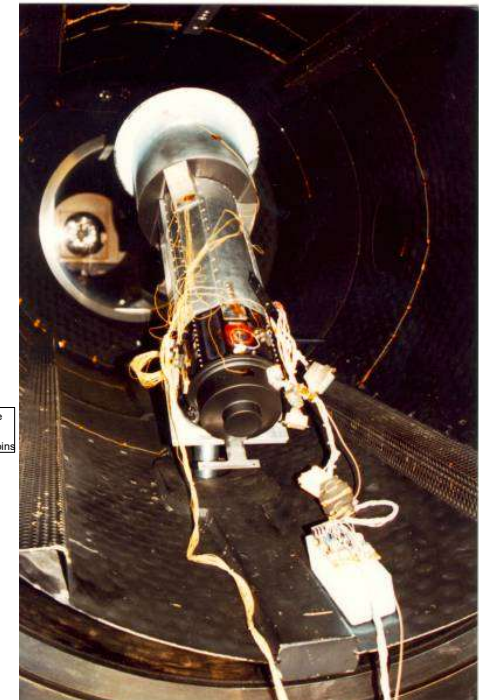
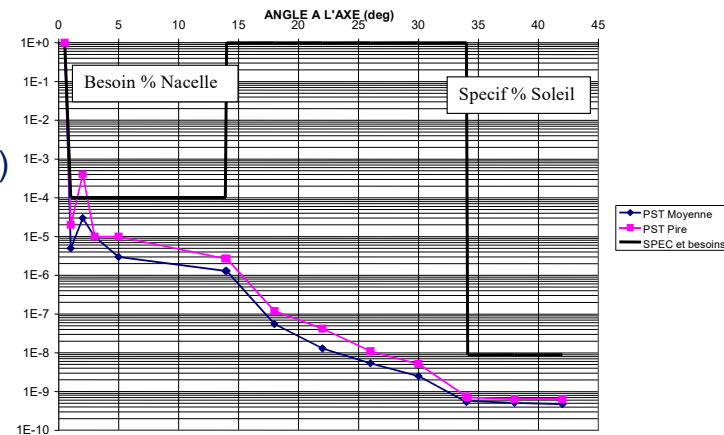
- Contraste 10^{-9} à 10^{-12} entre astres observés et sources parasites : Soleil, Lune, Terre... ou parties du satellite!
- Parasites localisés ou étendus, dans et hors du champ.

⇒ Dégrade l'imagerie, la radiométrie, cross-talk.

Si possible, essais pour recalibrer la modélisation

Configuration de test :

- Source puissante : étendue (Terre hors champ) ou collimateur (parasites dans le champ, PST°)
- Eliminer les parasites ambiants
- Si l'air perturbe, essai sous vide!



Essai de PST du SST de PRONAOS sous vide =>

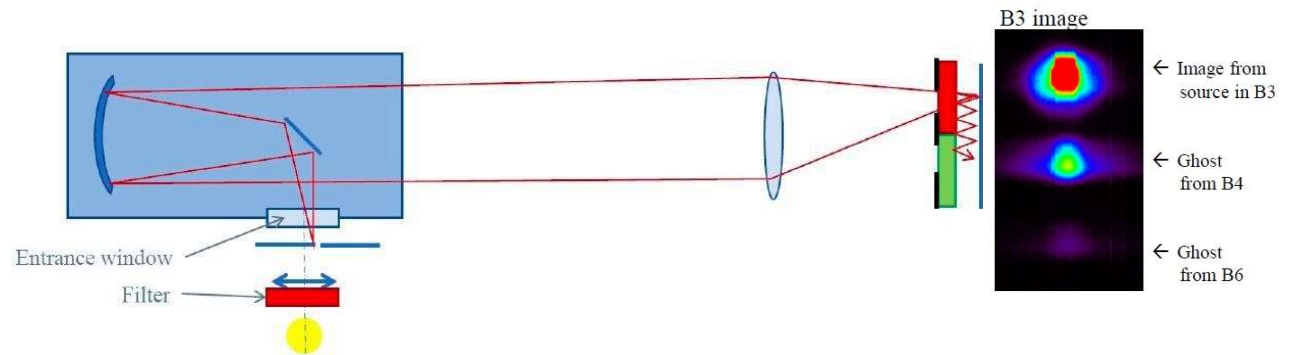
Etalonnage de la lumière parasite

Modélisation + mesures => correction par traitement

Mesure laborieuse :

- Collimateur balayer tout le champ
- Compromis taille source / dynamique
- Mesure intrabande et cross-talk

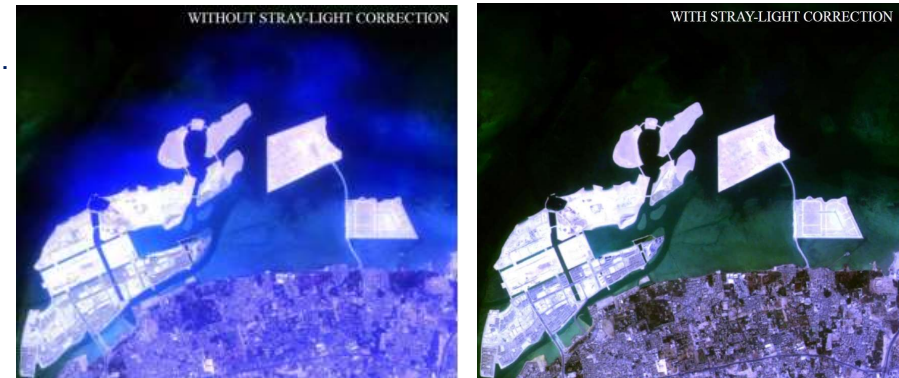
Etalonnage cross-talk VENUS =>



Correction complexe mais efficace (ex : PARASOL, VENUS)

- Recouper modèle (géométrie fine) et mesures (recalage des niveaux).
- Définir une « image parasite » générée par chaque champ.
- « convoluer » l'image brute par ces « images parasites ».
- Itérer avec l'image partiellement corrigée.

Images VENUS : avant et après correction =>



=> Parasites réduits d'un facteur 5 et acceptables. Mais mieux vaut un instrument sain!

Qualification en environnement

Types de tests

- Mécaniques : vibrations, chocs
- Cyclages vide-thermique
- Radiations (sur composants)
- Electro-magnétique (sur satellite)

Appliqués si pertinent à :

- Sous-ensembles (miroir, télescope, bloc focal, mécanismes...)
- Instrument complet
- Satellite

Vérifications avant/après :

- Fonctionnel.
- Performances (PSF, radiométrie).
- Efforts et T° subis.
- Aspect et tests sur témoins optiques
- ***Témoins de propreté particulaire et moléculaire***



Equipements de contrôle en essais

- **Contrôle thermique actif:**
 - Contrôle thermique activé.
 - Références bord activées.
 - Charges aux interfaces (conductives et radiatives).
- **Contrôle passif :**
 - Nombreuses sondes thermiques.
 - Surveillance T° extrêmes et gradients



Contrôle actif du télescope COROT =>



Cryostat d'Herschel : He à 1,7K

Essais sur miroir équipé

Essais mécaniques

➤ **Vibrations / chocs (v. p. suivante)**

➤ **Critères :**

- Stabilité des modes propres
- Stabilité de la WFE
- Stabilité des IF

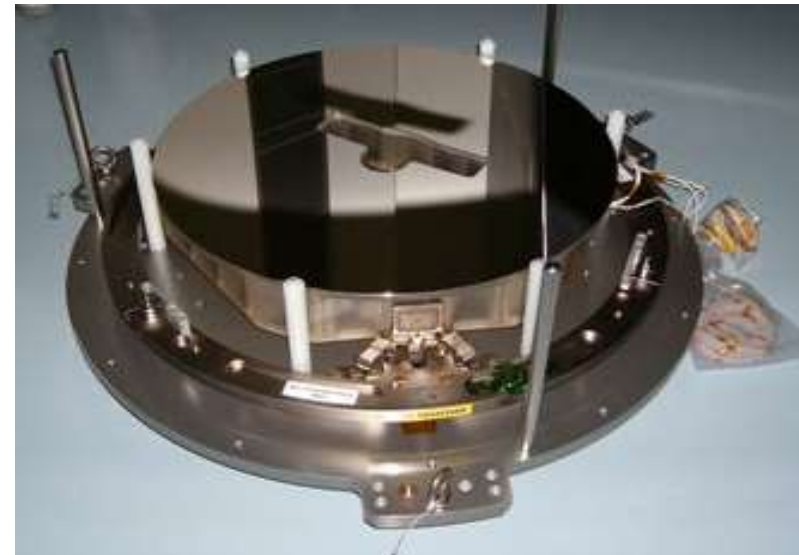
Miroir équipé (TSESO)=>

Essai vide-thermique

➤ **Quelques cycles**, plage de T° couvrante (v. plus loin).

➤ **Critères :**

- Stabilité de la WFE (effets de détensionnement)
- Aspect et tenue des témoins



Essais mécaniques satellite

Dimensionnement par modélisation EF

- Statique (Contraintes) et dynamique (modes propres).

Essais mécaniques :

- Pré-test bas niveau pour :
 - Situer les modes propres
 - Définir les notchings
- Vibrations et/ou chocs 3 axes sur instrument puis satellite.
 - Marges 25% (modèle) + 50% (qualification).
 - Contrôle local par sondes
- **Critères :**
 - stabilité des modes propres
 - Non dépassement des niveaux spécifiés

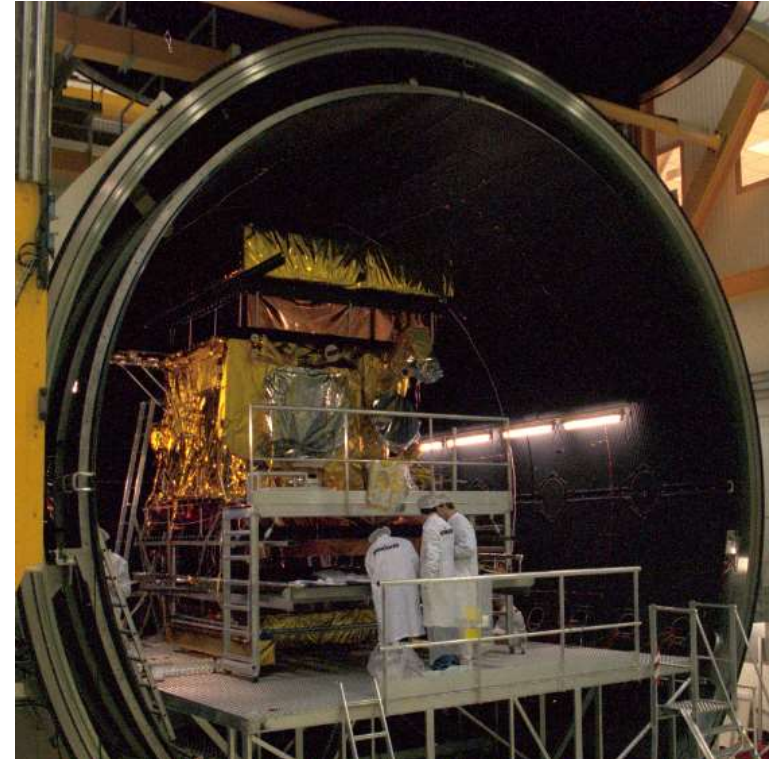
Essai de vibrations de COROT à Intespace =>



Essai vide-Thermique

Sur satellite complet :

- **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

Compatibilité électro-magnétique

➤ **Sources :**

- Électroniques de l'instrument et du satellite.
- Tempêtes solaires.
- Anomalie Sud-Atlantique.

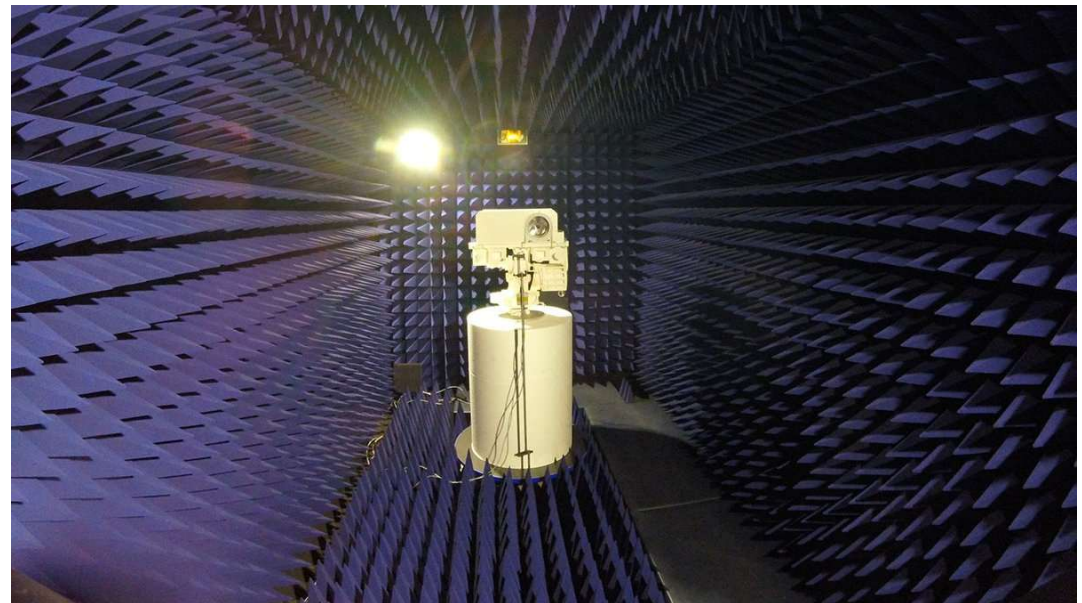
➤ **Conséquences :**

- Dysfonctionnement momentané des électroniques.
- Décharges électrostatiques.

⇒ *Spécifications de conductivité des traitements.*

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

⇒ **Test sur satellite fonctionnel en chambre anéchoïque**



Test EMC de SUPERCAM

Recalages en vol : Géométrie

Restitution de visée

- Senseurs stellaires
- Redressement d'images terrestres sur motifs connus

Taranis et son SST =>

Refocalisation

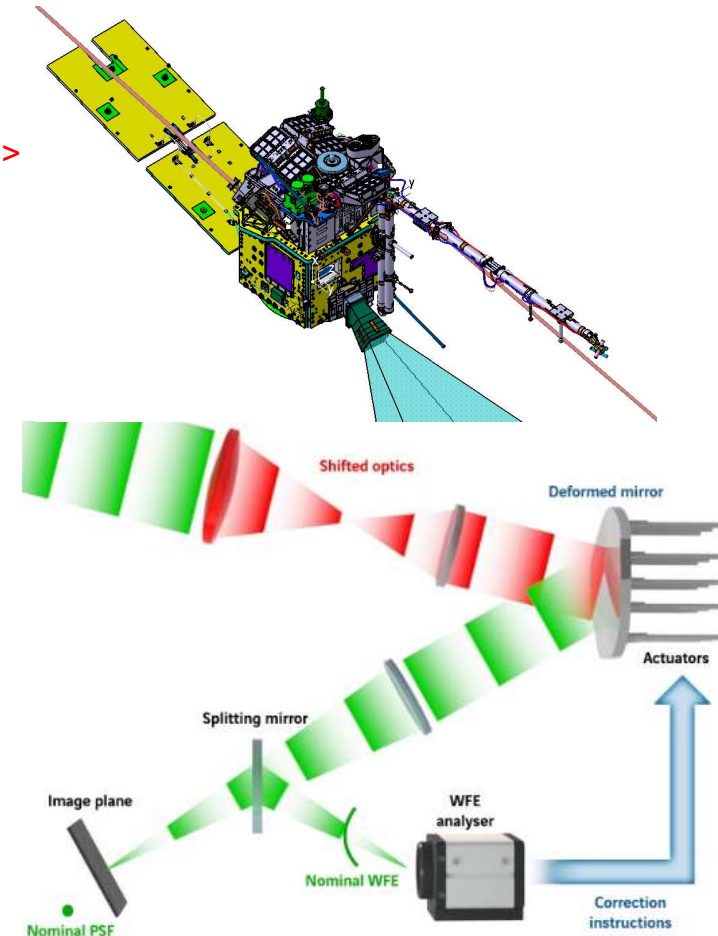
- Mesure de PSF sur étoiles ou :
- Restitution de phase : images à différentes défoc. (ex: PLEIADES)
- Refocalisation par piézo sur M2

Miroir déformable (démonstrateur TANGO)

- Miroir déformable sur pupille intermédiaire + ASO
- Correction en continu (Basse fréquence).

Distorsion

- Visées multiples sur champ d'étoiles



Recalages en vol : Radiométrie

Etalonnage absolu :

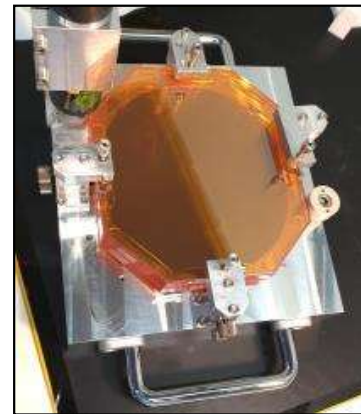
- Sources externes : Soleil, Lune, espace froid => miroir basculant (ex : VENUS)
- Corps noir à T° contrôlée (ex : TRISHNA, imageurs IR, MTG)

Corps noir =>



Recalage spectral :

- Lasers accordables (DFB)
- LEDs (ex : EUCLID, IASI NG)
- Interféromètre de Fabry-Perrot (ex : IASI NG) =>

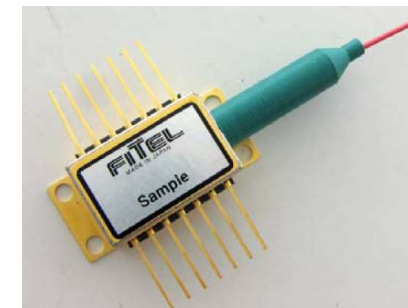


Uniformité :

- Source externe : Lune, White Sands
- Panneaux blancs mat

Rem : sphères intégrantes plus uniformes, mais trop encombrantes

Laser DFB =>



Recalages en vol : Lumière parasite

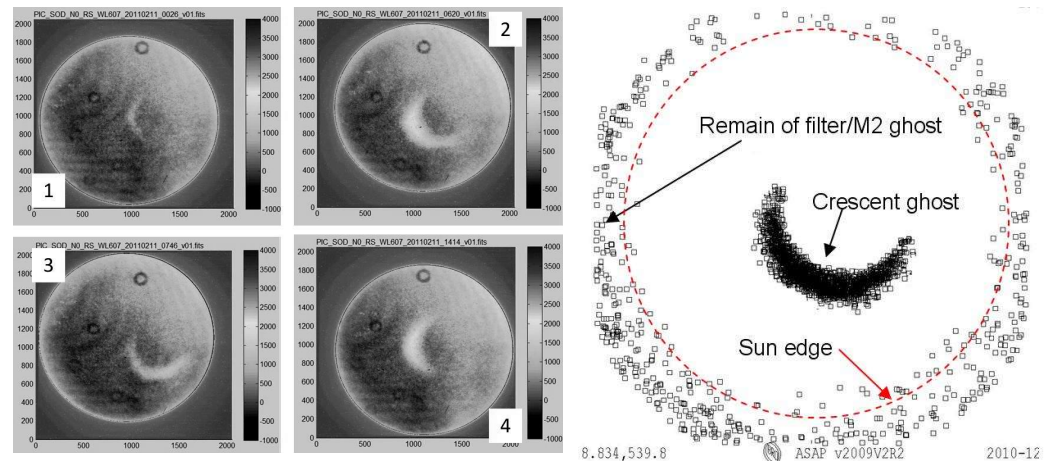
(Pour recaler la correction par modèle et étalonnage)

Acquisition sur la Lune

- Source large + Bord de plage (ex : VENUS)
- Source ponctuelle (astre) : ghosts

Correction après coup (PICARD)

- Visée Soleil avec légers dépointages
 - Comparaison ghost « croissant » : mesure / modèle
- ⇒ Détermination intensité du ghost
- ⇒ Détermination des tilt (optiques + Soleil)
- ⇒ Prédiction du ghost + correction d'image



PICARD : ghost « croissant selon position du Soleil et simulation ASAP

Quelques retours d'expérience

PICARD - SODISM :

- Contamination moléculaire inhomogène sur fenêtre d'entrée.
- ⇒ Perte de signal UV.
- ⇒ Gradient thermique : Perturbation cyclique de la PSF.
- ⇒ Ghosts localisés, position variable
- ⇒ Mission partiellement « récupérée » par modélisation

SUPERCAM:

- Radiations => panne de la diode laser de l'autofocus.
- ⇒ Exploitation des images => refocus « manuel ».

Télescope Hubble :

- Erreur de tirage en mesure de WFE lors du polissage de M1
- ⇒ Défocus.
- ⇒ Ajout en vol d'un correcteur (vol Navette)

Conclusions

- **Contrôles à chaque étape :**
 - **Performances** géométriques, radiométriques, fonctionnelles.
 - Tenue en environnement.
 - **Stabilité sol / vol:**
 - Conception : facteur dimensionnant.
 - Mesures et étalonnages.
 - Instruments de plus en plus grands et exigeants => **Très difficile**
 - **Recalages en vol:**
 - **Visées sur sources extérieures** : astres, espace froid, diversité de phase.
 - **Références embarquées** : corps noirs, lasers, sources accordables...
 - **Analyseur de WFE** (ASO, Schack-Hartman), collimateurs.
 - **Dispositifs de correction** : Refocus, alignement, miroir déformable
- ⇒ **Meilleure performance en vol, conception et test au sol relaxés!**

Merci de votre attention



MOI-OTOP « métrologie optique et instrumentation - 18 Mars 2021