

International Conference on Space Optics—ICSO 1997

Toulouse, France

2–4 December 1997

Edited by George Otrio



Maquette IASI: un outil de validation et d'expertise

*Philippe-Jean Hébert, Gilles Chalon, Didier Blonde,
Christian Buil*



icso proceedings



International Conference on Space Optics — ICSO 1997, edited by Georges Otrio, Proc. of SPIE Vol. 10570,
1057006 · © 1997 ESA and CNES · CCC code: 0277-786X/18/\$18 · doi: 10.1117/12.2326435

ICSO 97 2-3-4 Décembre 1997

Session 1 : Observation de la Terre et surveillance de l'atmosphère

Maquette IASI : un outil de validation et d'expertise

Philippe J. Hébert & Gilles Chalon, CNES, Toulouse, France
D. Blonde, F. Bourcier, C. Buil, CNES, Toulouse, France

Résumé :

Cet article présente une activité originale du CNES dans le projet IASI, celle du maquetage de l'instrument et de son expertise avancée.

IASI (Intéféromètre Atmosphérique de Sondage Infrarouge) est un projet d'interféromètre par transformée de Fourier qui sondera l'atmosphère en température et en humidité, à bord du satellite METOP, et ses données permettront d'améliorer les prévisions météorologiques. Les phases A et B se sont déroulées en maîtrise d'œuvre interne au CNES. A ce titre, le CNES s'est donné un moyen d'expertise et de validation en développant une maquette de l'instrument, fonctionnellement représentative de IASI.

Après un bref rappel sur la mission et la définition de IASI, nous détaillons le rôle imputé à la maquette du CNES dans le cadre du développement de l'instrument : validation des concepts, des outils numériques de simulation développés au CNES en parallèle, validation des algorithmes de traitement prévu dans l'instrument, fourniture de données réelles IASI aux futurs utilisateurs. Puis nous décrivons cette maquette fonctionnelle, ses différentes parties et son mode de fonctionnement.

La recette de la maquette a permis de mesurer ses performances de niveau "système". Nous présentons ces caractéristiques, et nous les comparons aux spécifications de l'instrument de vol.

Enfin, nous passerons en revue les premiers résultats obtenus sur la maquette dans le cadre des études menées par l'équipe projet en phase B : spectres atmosphériques, fonction d'appareil, mise en évidence de spectres "fantômes" ...

Maquette IASI : un outil de validation et d'expertise

Philippe J. Hébert & Gilles Chalon, CNES, Toulouse, France
D. Blonde, F. Bourcier, C. Buil, CNES, Toulouse, France

PRESENTATION DU PROJET IASI

IASI (Interféromètre Atmosphérique de Sondage Infrarouge) est l'instrument essentiel de la charge utile des satellites météorologiques européens en orbite polaire de la série METOP. La figure 1 présente un schéma du système IASI. Il est composé d'un segment sol essentiellement intégré dans le segment sol EPS (European Polar System) et d'un instrument monté sur METOP. L'instrument

délivre les spectres atmosphériques calibrés dans le domaine $[3.7 \mu\text{m}, 15.5 \mu\text{m}]$ et le segment sol élabore les profils de température et d'humidité, déduits, à partir des luminances énergétiques spectrales observées, par inversion de l'équation de transfert radiatif. L'instrument assure une couverture globale de la terre, avec 4 points de mesure tous les 25 kms et une résolution verticale de 1 km. La précision est de 1 K sur la température et 10 % pour l'humidité.

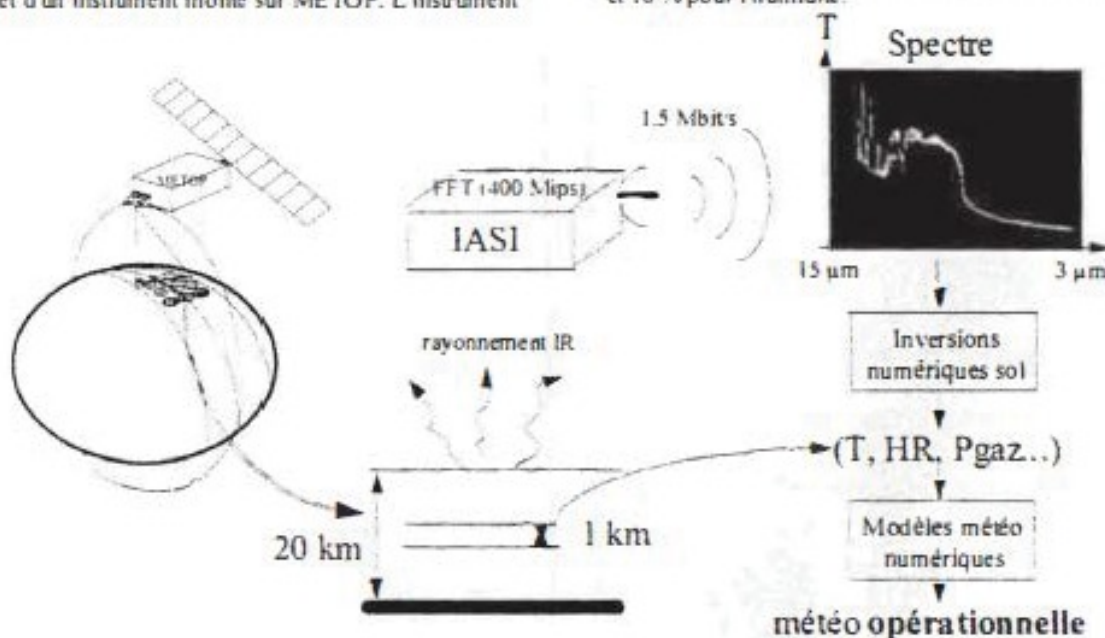


Figure 1

Cette résolution verticale passe par une résolution spectrale meilleure que celle des instruments actuels. Pour l'obtenir, le CNES a retenu le concept instrumental de spectromètre à transformée de Fourier. Par rapport à un spectromètre à réseau, ce concept conduit à une meilleure résolution spectrale dans les courtes longueurs d'onde, région spectrale sensible à la vapeur d'eau et à la température des basses couches de l'atmosphère. Il offre de plus la possibilité d'un produit dérivé, à savoir des mesures de constituants minoritaires tels que le monoxyde de carbone ou le méthane.

Les limitations du flot des données ont imposé d'effectuer la transformée de Fourier des interférogrammes et la calibration à bord, de sorte que le segment sol reçoit des spectres calibrés. Ainsi, IASI sera à même de remplir une mission de météorologie, et une mission scientifique pour la recherche en climatologie et en chimie de l'atmosphère.

L'INSTRUMENT IASI

L'instrument comprend un interféromètre de Michelson et un imageur infrarouge associé, qui permet de coregistrer les sondages avec les images

fournies par l'instrument AVHRR, embarqué sur la même plate-forme. Un boîtier déporte contient le calculateur.

Sur la figure 2 on trouvera le schéma optique du "sensor module".

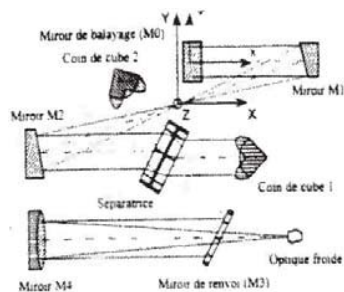
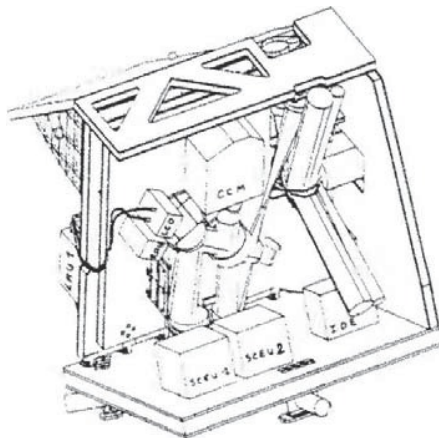


Figure 2

La figure 3 donne une vue de l'instrument de vol. Il est composé des éléments suivants, dans l'ordre du parcours du faisceau lumineux :

- le miroir de balayage : il fait une balayée perpendiculaire à la trace du satellite, avec, pour empêcher la scène de glisser pendant chaque acquisition, un rattrapage du filé grâce à des paliers magnétiques qui impriment à l'axe de rotation un mouvement transverse. Il vise aussi les corps noirs de calibration.



- un télescope afocal hors d'axe qui image la pupille sur le miroir de balayage.

- un interféromètre de Michelson, avec une lame séparatrice, une compensatrice et deux coins de cube en carbure de silicium. L'un des coins de cube est translaté sur ± 1 cm en 151 ms. Un laser stabilisé en fréquence à $1.54 \mu\text{m}$, par asservissement sur une raie d'absorption de l'acétylène, est injecté dans l'interféromètre. Il

fournit le signal de référence pour l'échantillonnage de l'interférogramme mesuré, directement en fonction de la différence de marche variable.

- un miroir de repliement dirige le faisceau vers le miroir de focalisation hors d'axe, chargé d'imager la terre à l'entrée de la boîte froide de détection.

- la boîte froide contient les diaphragmes de champ et d'ouverture froids, les optiques froides qui imagent les pupilles sur les éléments mobiles de l'optique chaude (minimisation de leurs dimensions), l'éclateur spectral qui sépare la bande spectrale en trois, et les détecteurs. L'ensemble est refroidi à moins de 100 K par un radiateur passif à trois étages.

- les interférogrammes sont numérisés et traités par le sous-système de traitement de signal, qui effectue les transformées de Fourier inverses et la calibration radiométrique. Cette dernière utilise des visées sur un corps noir chaud embarqué et sur l'espace froid, toutes les 80 s.

SPECIFICATIONS PRINCIPALES DE L'INSTRUMENT

PERFORMANCES SPECTRALES

- La couverture spectrale est coupée en trois bandes

Bande 1	645 - 1210 cm^{-1}	15.5 - 8.26 μm
Bande 2	1210 - 2000 cm^{-1}	8.26 - 5 μm
Bande 3	2000 - 2760 cm^{-1}	5 - 3.62 μm

- La résolution spectrale dépend de la bande spectrale

Bande 1	$\Delta\nu \leq 0.35 \text{ cm}^{-1}$
Bande 2	$\Delta\nu < 0.45 \text{ cm}^{-1}$
Bande 3	$\Delta\nu \leq 0.5 \text{ cm}^{-1}$

- La calibration spectrale relative $d\nu/\nu$ doit être meilleure que $2 \cdot 10^{-4}$ sur le long terme, et que 10^{-6} entre 2 calibrations

La précision de la calibration spectrale globale $\delta\nu/\nu$ en relatif, après traitements, est spécifiée à $2 \cdot 10^{-6}$

La fonction d'appareil admet des déformations qui sont quantifiées par "l'index d'erreur de forme" [1]. Celui-ci ne doit pas dépasser les valeurs suivantes

Bande 1	Index ≤ 0.04
Bande 2	Index ≤ 0.05
Bande 3	Index ≤ 0.06

PERFORMANCES RADIOMETRIQUES

IASI doit tenir ses performances radiométriques dans un intervalle de 200 K à 300 K.

Le bruit radiométrique admissible entre deux calibrations, défini pour une température de référence de 280 K, doit être inférieur à 0.25 K ou 0.47 K suivant les bandes spectrales.

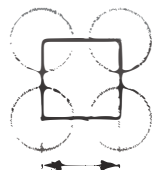
La précision de la calibration radiométrique doit être meilleure que 0.5 K.

PERFORMANCES GEOMETRIQUES

La fauchée est de $\pm 48^{\circ}20'$ de part et d'autre du nadir, chaque ligne comportant 4×30 mesures de l'atmosphère, plus les visées sur les corps noirs de calibration. Pendant une acquisition l'axe de visée est stabilisé à ± 0.15 mrd. L'imageur est aligné avec l'interféromètre à mieux que 5 mrd.

Le champ de vue instantané se compose de 4 pixels répartis sur un carré, comme indiqué figure 4

$$11 \text{ mrd} < D < 14.65 \text{ mrd}$$



$$L < 21.63 \text{ mrd}$$

Figure 4

Avoir 4 pixels augmente la probabilité des visées exemptes de nuages. Mais l'interférométrie hors d'axe est aussi la source de certaines difficultés, et fait l'originalité de IASI.

A l'altitude de 819 km, cela donne des pixels dont le diamètre est égal à 12 kms au nadir.

L'uniformité de réponse dans le champ doit être supérieure à 95 % sur un pixel de $0.8 \times D$.

SPECIFICATIONS OPERATIONNELLES

Le programme IASI s'étendra sur 15 ans après le premier tir. La durée de vie de chaque modèle sera de 5 ans. La fiabilité calculée est de 0.8 sur cette période, la mission pouvant continuer avec seulement 3 pixels. La disponibilité de l'instrument sera au moins de 97.5 % après la recette en vol. IASI est donc d'emblée un instrument opérationnel.

LA MAQUETTE ET LE PROJET IASI

HISTORIQUE

En 1989, le CNES prenait en charge l'étude et le pré-développement de l'instrument IASI. En fin de la phase A, après que le dimensionnement général et les grands choix technologiques eurent été faits, la conception et l'assemblage de la maquette

fonctionnelle ont commencé. Les études de phase B de l'instrument ont été menées, sous maîtrise d'œuvre du CNES, avec des contractants extérieurs. Par contre la maquette fonctionnelle a bénéficié de moyens exclusivement internes pour la conception, l'assemblage et les tests.

Aujourd'hui, la maquette a été recettée et son exploitation a débuté.

ROLE DE LA MAQUETTE

Généralités

Dès l'origine le CNES a ressenti le besoin, pour les phases A et B, d'une maquette fonctionnelle pour mieux aborder les risques de développement qui avaient été identifiés. Une maquette constitue un banc d'essai nécessaire, tant au niveau des sous-systèmes qu'au niveau global, pour seconder les simulations numériques et les calculs théoriques, et procéder à des vérifications croisées.

Plusieurs missions ont alors été confiées à la maquette

Validation du Modèle Numérique de Performance :

L'équipe projet du CNES a développé un ensemble de logiciels, regroupés et liés sous le nom de "Modèle Numérique de Performance". Ce modèle se veut exhaustif, et toutes les études du CNES sont basées sur ses résultats. Il était donc souhaitable de le valider et de le calibrer sur un instrument réel, même si des validations avec d'autres modèles en interne ou avec des organismes extérieurs ont d'ores et déjà confirmé ses résultats principaux. Mais une fois validé sur la maquette, il pourra simuler l'instrument de vol avec une confiance accrue.

Validation des algorithmes de l'instrument :

En phase A et B, le CNES a fait le choix à plusieurs reprises d'effectuer certaines corrections ou déterminations par des algorithmes de traitement des données, de préférence à l'implantation de sous-système dédiés, ou pour pouvoir relâcher certaines spécifications. Ainsi, la frange centrale des interférogrammes est-elle déterminée par un algorithme embarqué. De même la non-linéarité est corrigée par logiciel. Ces algorithmes se doivent d'être robustes et efficaces, sous peine de remettre en question la définition de l'instrument. Les tester sur des données réelles, fournies par la maquette, permet de les valider définitivement.

Fourniture de spectres IASI aux utilisateurs :

Les futurs utilisateurs de IASI ont émis la demande de disposer, bien avant le premier instrument de vol, de données au format IASI pour tester les méthodes et les traitements le plus tôt possible. La maquette répond à cette demande.

Validation des méthodes d'alignement et de diagnostic :

Même si la maquette n'est pas complètement représentative de l'instrument, elle permet d'expérimenter les procédures d'alignement imaginées pour l'instrument. De plus, comme on peut introduire des dérèglages contrôlés, elle permet de valider les traitements prévus pour diagnostiquer et corriger d'éventuels défauts de ce type sur l'instrument.

Validation du dimensionnement et des choix technologiques :

Les performances de la maquette permettent de confirmer les dimensionnements principaux de l'instrument, tels la taille des pupilles, la course du coin de cube etc... Elles confortent aussi certains choix, comme celui des coins de cube à la place de miroirs plans. Enfin, la maquette intègre certains sous-systèmes de technologie nouvelle, par exemple le laser stabilisé de référence, ce qui permet de s'assurer que leurs performances conduisent un comportement "système" satisfaisant.

Suivi de l'instrument en vol :

Lorsqu'il sera en orbite, les performances de l'instrument seront suivies et dépouillées avec précision. On ne peut exclure des difficultés dans leurs interprétations, surtout pendant la recette en vol. La maquette sera alors un outil précieux d'expertise

DESCRIPTION DE LA MAQUETTE FONCTIONNELLE

LA MAQUETTE PAR RAPPORT A L'INSTRUMENT

La maquette fonctionnelle reproduit les fonctions suivantes de l'instrument : collecte du flux optique, collimation, interférométrie, imagerie et conjugaisons pupillaires.

Néanmoins la mission de la maquette est réduite, par rapport à celle de l'instrument, pour simplifier sa mise au point, tout en préservant une bonne représentativité. Sous cet aspect, voici la liste des différences principales entre la maquette et l'instrument

Critère	Valeur instrument	Valeur maquette	Commentaire
Miroir de visée	rotatif	fixe	ne rentre pas en compte dans le principe de l'instrument
Vitesse du coin de cube	12 cm/s	< 4 cm/s	idem
Traitement des interférogrammes	en direct	en différé	idem
Bande spectrale	B1, B2, B3	B3	B3 est la plus contraignante pour les aspects géométriques
Matériau de la lame semi	KBr (AC)	ZnSe	la lame semi définitive pourra être intégrée sans difficulté pour valider sa définition
Traitements optiques de la lame séparatrice	[3-15,5 µm]	[3-5 µm]	idem
Nombre de pixels	4 pixels simultanés	1 pixel que l'on place à volonté	les 4 pixels sont équivalents. Pour des mesures "simultanées", on sait re-phaser les interférogrammes en différé
Température du corps noir froid de calibration	3 K (espace froid)	88 K (azote liquide)	ne remet pas en cause le principe de calibration, car T _{nf} est connue à ± 0.1 K
Température du corps noir chaud de calibration	293 K	293 K	idem
		définition simplifiée	
Sens des sondages	De haut en bas	De bas en haut	adaptation sans conséquence du modèle de transfert radiatif

La combinaison de l'optique froide a pu être simplifiée puisqu'elle n'inclue pas d'éclateur spectral, et comprend un seul détecteur.

En outre des contraintes liées au laboratoire sont contournées par des corrections des données qui n'existent pas à bord

- l'enceinte externe du cryostat, et le hublot qui le ferme, ne sont pas froids, comme l'est la boîte de détection de l'instrument. La calibration doit donc corriger un flux parasite plus important.

- le hublot en ZnSe qui ferme le caisson injecte un nouveau flux parasite dans l'instrument.

C'est une calibration supplémentaire sur un corps noir froid externe qui permet de le soustraire aux mesures utiles.

Enfin, les montures mécaniques incluent des platines qui permettent, sur la maquette, des réglages selon tous les degrés de liberté.

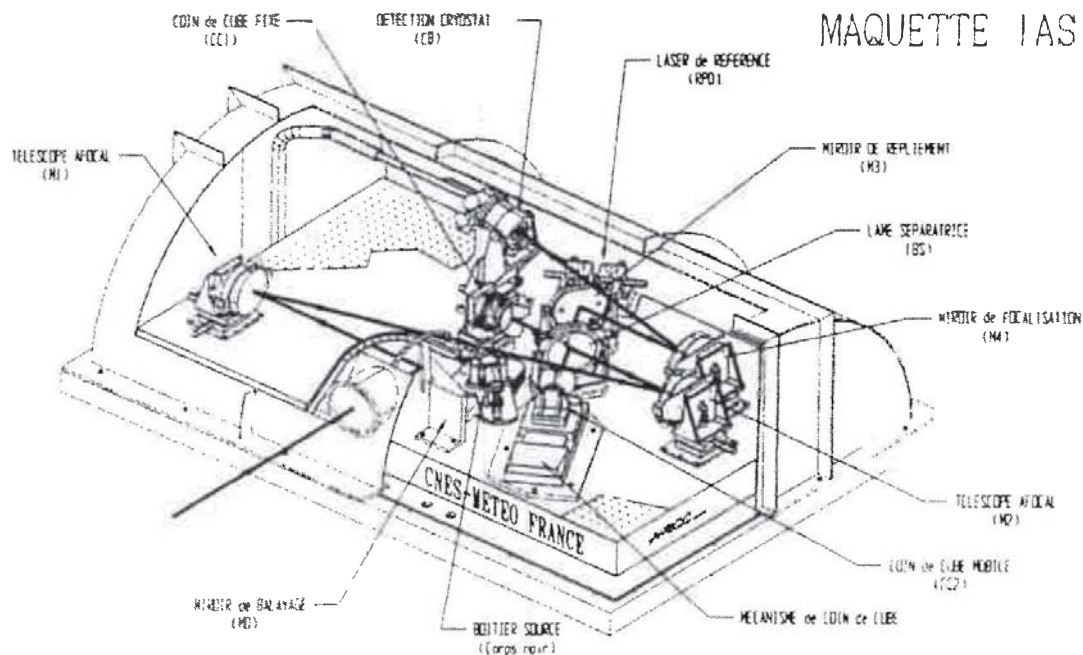
LES ELEMENTS DE LA MAQUETTE

Une salle blanche classe 100 000 est dédiée à la maquette IASI au Centre Spatial de Toulouse. Le banc optique repose sur un bloc sismique, et possède des isolateurs pneumatiques. D'une taille de 1 m x 1.5 m, il supporte les optiques, le mécanisme du coin de cube, le cryostat et les corps noirs de calibration. Cryostat et corps noir froid sont refroidis par des circuits d'azote liquide.

Les corps noirs sont des surfaces radiatives gravées de mini-pyramides et peintes en PU1. Elles couvrent un pixel. Des sondes Pt100 intégrées entre ces surfaces et leurs supports mesurent leurs températures à ± 0.1 K. Un miroir motorisé permet de viser l'un ou l'autre, ou s'éclipse pour les visées extérieures. L'ensemble de calibration est placé au foyer du télescope afocal.

C'est le corps noir froid qui a, en partie, conduit à faire fonctionner la maquette sous vide, pour éviter la formation de givre à sa surface. Une deuxième raison était qu'il fallait s'affranchir des problèmes de turbulence. Enfin il fallait éviter l'absorption par l'eau et le gaz carbonique à l'intérieur de l'instrument. La mise sous vide se fait grâce à un caisson qui recouvre le banc.

On retrouve ces éléments en figure 5



Le laser de référence a fait l'objet d'un développement pré-industriel, et le premier modèle a été intégré à la maquette. Le boîtier émetteur est déporté, et le faisceau stabilisé en longueur d'onde est injecté, puis récupéré, par des fibres optiques.

De nombreuses connections air-vide sont nécessaires pour transmettre l'azote liquide, les alimentations électriques, les télécommandes et les mesures, pour passer les fibres optiques, ainsi que pour relier le cryostat à sa pompe à vide.

Le détecteur est une diode InSb, refroidie à 77 K. Il est suivi d'un préamplificateur faible bruit développé au CNES. Après amplification et

réduction du niveau moyen de l'interférogramme, le signal est numérisé sur 16 bits, au rythme de l'horloge délivrée par le laser de référence (50 KHz pour une vitesse de 50 cm/s). Chaque interférogramme a environ 50 000 points.

La salle blanche possède une fenêtre à hauteur de l'axe optique, que l'on ouvre pour faire des sondages de l'atmosphère, par l'intermédiaire d'un miroir extérieur à 45°.

En mode automatique, la maquette est entièrement pilotée par un logiciel, développé en interne, installé sur un ordinateur de type PC.

Validation des méthodes

d'alignement et de diagnostic :

Même si la maquette n'est pas complètement représentative de l'instrument, elle permet d'expérimenter les procédures d'alignement imaginées pour l'instrument. De plus, comme on peut introduire des dérèglages contrôlés, elle permet de valider les traitements prévus pour diagnostiquer et corriger d'éventuels défauts de ce type sur l'instrument.

Validation du dimensionnement et des choix technologiques :

Les performances de la maquette permettent de confirmer les dimensionnements principaux de l'instrument, tels la taille des pupilles, la course du coin de cube etc... Elles confortent aussi certains choix, comme celui des coins de cube à la place de miroirs plans. Enfin, la maquette intègre certains sous-systèmes de technologie nouvelle, par exemple le laser stabilisé de référence, ce qui permet de s'assurer que leurs performances conduisent à un comportement "système" satisfaisant.

Suivi de l'instrument en vol :

Lorsqu'il sera en orbite, les performances de l'instrument seront suivies et dépouillées avec précision. On ne peut exclure des difficultés dans leurs interprétations, surtout pendant la recette en vol. La maquette sera alors un outil précieux d'expertise.

DESCRIPTION DE LA MAQUETTE FONCTIONNELLE

LA MAQUETTE PAR RAPPORT A L'INSTRUMENT

La maquette fonctionnelle reproduit les fonctions suivantes de l'instrument : collecte du flux optique, collimation, interférométrie, imagerie et conjugaisons pupillaires.

Néanmoins la mission de la maquette est réduite, par rapport à celle de l'instrument, pour simplifier sa mise au point, tout en préservant une bonne représentativité. Sous cet aspect, voici la liste des différences principales entre la maquette et l'instrument :

Critère	Valeur instrument	Valeur maquette	Commentaire
Miroir de visée	rotatif	fixe	ne rentre pas en compte dans le principe de l'instrument
Vitesse du coin de cube	12 cm/s	< 4 cm/s	idem
Traitement des interférogrammes	en direct	en différé	idem
Bande spectrale	B1, B2, B3	B3	B3 est la plus contraignante pour les aspects géométriques
Matériau de la lame semi	KBr (AC)	ZnSe	la lame semi définitive pourra être intégrée sans difficulté pour valider sa définition
Traitements optiques de la lame séparatrice	[3-15.5 μ m]	[3-5 μ m]	idem
Nombre de pixels	4 pixels simultanés	1 pixel que l'on place à volonté	les 4 pixels sont équivalents. Pour des mesures "simultanées", on sait re-phaser les interférogrammes en différé
Température du corps noir froid de calibration	3 K (espace froid)	88 K (azote liquide)	ne remet pas en cause le principe de calibration, car T_{enf} est connue à ± 0.1 K
Température du corps noir chaud de calibration	293 K	293 K	idem
		définition simplifiée	
Sens des sondages	De haut en bas	De bas en haut	adaptation sans conséquence du modèle de transfert radiatif

La combinaison de l'optique froide a pu être simplifiée puisqu'elle n'inclue pas d'éclateur spectral, et comprend un seul détecteur. En outre des contraintes liées au laboratoire sont contournées par des corrections des données qui n'existent pas à bord.

- l'enceinte externe du cryostat, et le hublot qui le ferme, ne sont pas froids, comme l'est la boîte de détection de l'instrument. La calibration doit donc corriger un flux parasite plus important.
- le hublot en ZnSe qui ferme le caisson injecte un nouveau flux parasite dans l'instrument.

ICSO97, maquette IASI, 2-3-4 Décembre 1997, Toulouse

7

malgré un guidage du coin de cube moins performant.

Réponse spectrale :

La maquette ne respecte pas exactement la bande ± 3 parce qu'il a fallu l'étendre à $3.39 \mu\text{m}$ (2950 cm^{-1}) afin d'y inclure la longueur d'onde du laser

HeNe, source monochromatique infrarouge la plus simple d'emploi.

Fonction d'appareil :

Le laser infrarouge fournit une fonction d'appareil à $3.39 \mu\text{m}$. La figure 6 reproduit la fonction d'appareil mesurée pour un pixel centré, et la figure 7 pour un pixel en position hors d'axe nominale

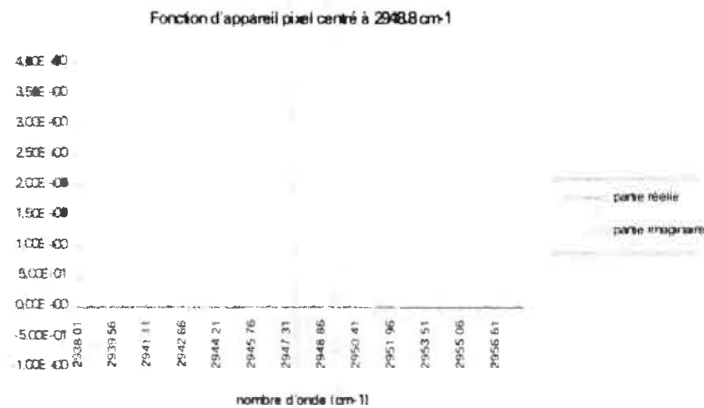


Figure 6

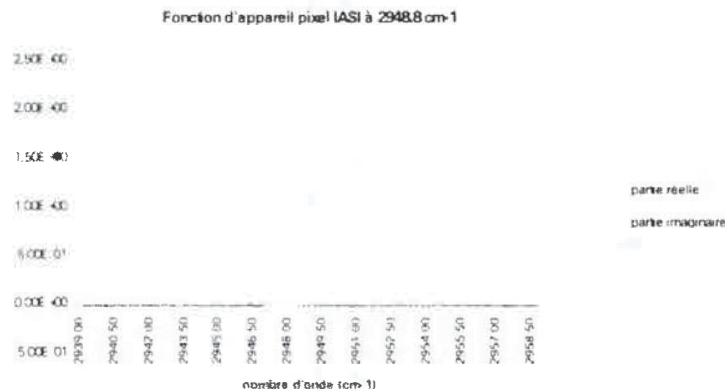


Figure 7

La calibration spectrale a les performances suivantes :

Longueur d'onde entrée	$3.3912 \pm 0.0002 \mu\text{m}$
ν entrée	$2948.8 \pm 0.3 \text{ cm}^{-1}$
ν estimée	2948.6 cm^{-1}
Stabilité demandée sur 30 mn en relatif (dv/v)	2.10^{-6}
Stabilité mesurée, ramenée à 30 mn	$1.3.10^{-6}$

Pour la résolution spectrale, on a mesuré la largeur à mi-hauteur de la fonction d'appareil : elle se situe entre 0.43 et 0.46 cm^{-1} , ce qui est meilleur que les 0.5 cm^{-1} spécifiés. Son évolution naturelle sur une période de 30 mn est inférieure à 0.8% .

Une estimation de l'index d'erreur de forme a été faite sur une collection de fonctions d'appareil, comparées à une fonction de référence moyenne. On trouve un index maximum de 0.078 , légèrement supérieur à la spécification de l'instrument.

Contraste interférométrique :

Le contraste interférométrique a été mesuré à 0.6, et l'efficacité de l'interféromètre est de 0.77, pour un objectif de 0.8 dans B3.

Bruit radiométrique global :

Pour B3, la spécification est : NEDT < 0.47 K. On a fait 100 acquisitions d'un même corps noir et mesuré le bruit sur ces acquisitions. Il en résulte la courbe de la figure 8 :

Bruit radiométrique spectral

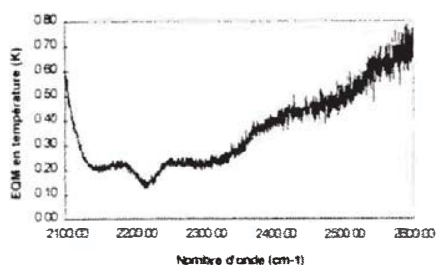


Figure 8

Dans les limites de la bande mission "utile" ($\nu < 2450 \text{ cm}^{-1}$), la spécification est tenue puisque NEDT < 0.4 K.

La précision de la calibration radiométrique est en cours d'évaluation, les premiers résultats étant encourageants.

PREMIERS RESULTATS DE LA MAQUETTE

GENERALITES

Depuis que la recette de la maquette a été prononcée, différentes investigations se sont succédées. Elles ont été menées soit en interne, pour des études "projet", soit en collaboration avec différents intervenants sur le projet.

VALIDATION DES ALGORITHMES DE L'INSTRUMENT

Calibration radiométrique :

La validation de la procédure de calibration complexe radiométrique — élément fondamental de l'instrument — était le but d'une campagne de mesure couplée avec des sondages par ballons météorologiques. Durant leurs ascensions, ils mesuraient la température et l'humidité aux différents niveaux de pression. Pendant ce temps, la maquette procédait à des sondages interférométriques de l'atmosphère. Les données météo furent entrées dans le modèle de transfert radiatif ETR93, pour simuler des spectres. Ces derniers doivent être comparés aux spectres effectivement mesurés. Les premiers dépouillements indiquent un bon fonctionnement de la calibration, puisque les énergies absolues mesurées et celles simulées se recoupent très bien.

Algorithme de la frange centrale :

L'algorithme de NZPD (Number of Zero Path Difference) est chargé d'identifier, dans chaque interférogramme, l'échantillon le plus proche de la différence de marche nulle. L'implantation d'un tel algorithme a été préférée à celle d'un matériel annexe à bord de l'interféromètre. L'enjeu de cette validation était donc la définition de l'instrument. L'expérience a montré que le critère utilisé[2] distingue en général l'échantillon cherché avec une bonne marge par rapport aux minimums secondaires. Des investigations sont en cours pour annuler le taux, déjà faible, de mauvaises détections.

Algorithmie bord :

D'une manière générale, toute l'algorithmie bord qui traite les interférogrammes bruts pour obtenir les spectres calibrés a été confrontée à des données réelles, très proches des futures données de l'instrument. Toute la chaîne de traitement a pu être ainsi validée.

FOURNITURE DE SPECTRES ATMOSPHERIQUES AUX UTILISATEURS

La figure 9 donne un exemple d'interférogrammes acquis : sur le corps noir froid à 88 K, sur le corps noir chaud à 290 K et sur l'atmosphère. On remarque que la ligne de base n'est pas exactement plate : c'est la conséquence du défaut d'imagerie pupillaire sur le coin de cube mobile.

La figure 10 donne le détail des franges centrales :

9

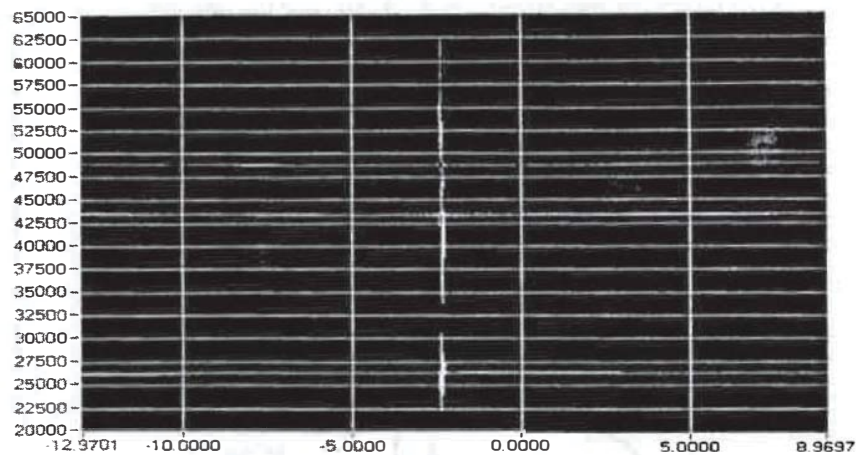


Figure 9

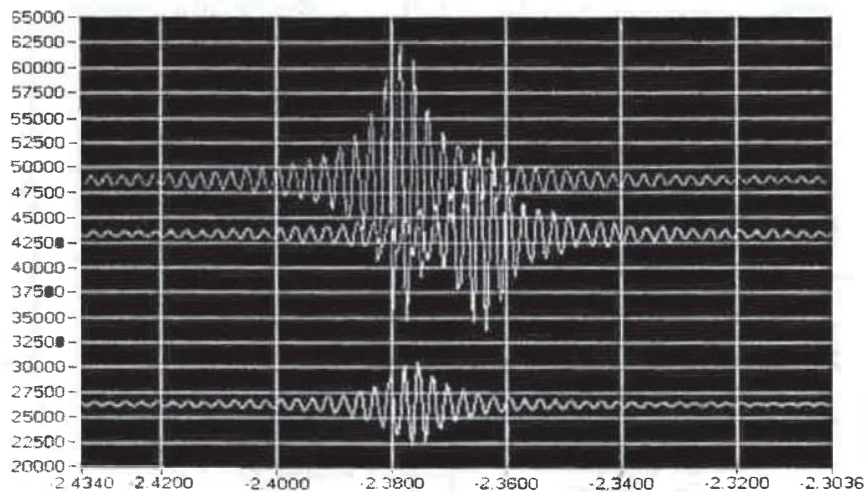


Figure 10

Ces interférogammes ne sont pas traités, c'est pourquoi ils ne sont pas phasés sur ces figures. On remarque que l'interférogramme du corps noir froid est en opposition de phase avec les deux autres. C'est que l'on capte le flux émis par l'enceinte du cryostat vers l'interféromètre. Ce flux est modulé, et une partie retourne vers le détecteur.

passant par le port par lequel il était entré dans l'interféromètre.

Après tous les traitements, on aboutit à des spectres de l'atmosphère, tel celui de la figure 11 mesuré par temps clair, où l'on a fait figurer les espèces chimiques dont on voit les raies d'absorption ou d'émission :

10

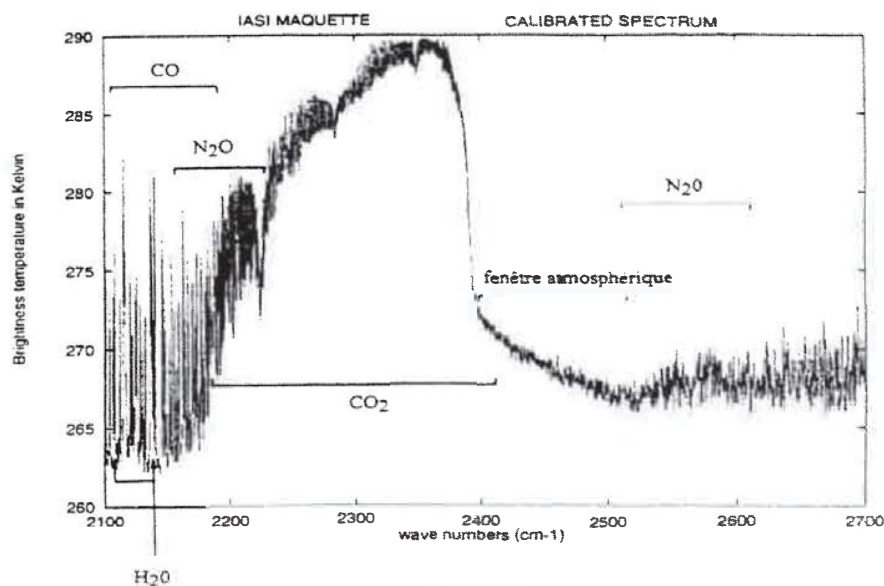


Figure 11

La comparaison de tels spectres avec ceux qui ont été simulés d'après les mesures ballons, fait constater que l'on retrouve parfaitement les structures des raies. Sur la figure 12 les raies larges sont celles de l'eau, et les fines celles du CO.

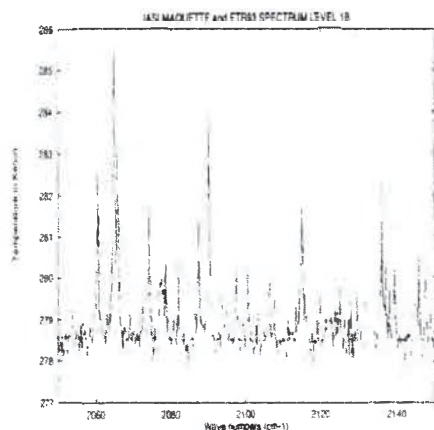


Figure 12

Les petites différences qui subsistent montrent les limites de la précision des modèles spectroscopiques utilisés.

VALIDATION DES METHODES D'ALIGNEMENT ET DE DIAGNOSTIC

Une méthode d'alignement des éléments optiques de la maquette, et en particulier de l'interféromètre, a été mise au point comme on l'a vu plus haut. Les précisions à atteindre sont de l'ordre du micron dans l'interféromètre. Les réglages ont été sanctionnés par la visualisation de la fonction d'appareil à 3.39 μm .

Néanmoins, cette méthode ne sera pas applicable telle quelle à l'instrument : les accès ne seront pas les mêmes, les degrés de liberté des réglages seront moins complets, la lame séparatrice ne sera pas transparente, etc... Aussi une procédure propre à l'instrument a dû être inventée. La maquette a permis d'en tracer les grandes lignes et de faire les premiers choix.

VALIDATION DU DIMENSIONNEMENT ET DES CHOIX TECHNOLOGIQUES

L'acquis le plus important reste peut-être la validation du concept instrumental, à commencer par l'interférométrie grand champ. Même si les dépouillements ne sont pas terminés aujourd'hui, on peut dire que les données ont confirmé sa validité.

De même, tous les concepts novateurs donnent satisfaction sur la maquette : laser de référence asservi, coins de cube...

La maquette permet aussi de spécifier au mieux les sous-systèmes. En fournissant des performances globales réelles, les observations faites sur le matériel consolident les simulations numériques quand il s'agit, éventuellement, de relâcher certaines spécifications de sous-systèmes, ou d'en resserrer d'autres.

DECOUVERTE INATTENDUE

Les acquisitions ont mis en évidence l'existence d'un interférogramme parasite, de fréquence double par rapport à l'interférogramme nominal. Il est causé par des réflexions parasites sur le hublot du cryostat, qui réfléchissent le signal, modulé une première fois, vers l'interféromètre. Le signal est donc modulé une seconde fois, et la partie qui en est captée par le détecteur à une amplitude d'environ 1 % de l'interférogramme nominal. Même si le spectre parasite qui en découle est hors de la bande utile, il vient mettre en défaut la correction de la non-linéarité. En effet celle-ci donne naissance à du signal, là-aussi à la fréquence double, à cause de son terme quadratique. Ces deux signaux se superposent.

Bien que de moindre amplitude sur l'instrument, des simulations numériques ont montré que ce phénomène n'y serait pas négligeable. Des modifications ont donc été suggérées pour le rendre compatible avec l'algorithme de correction de la non-linéarité.

CONCLUSION

Après son intégration et sa recette, la maquette IASI développée au CNES a atteint les premiers objectifs qui lui étaient assignés. Elle a permis de conforter les choix faits en phases A et B de l'instrument. Malgré les défauts d'imagerie de la pupille et du champ, son comportement est satisfaisant.

Elle constitue un outil d'expertise souple et assez représentatif de l'instrument pour fournir des résultats fondamentaux dans le développement de IASI. Elle est ainsi appelée à accompagner le développement de l'instrument en phase C, et jusqu'à la recette en vol. Avec elle, CNES et les autres intervenants disposent d'un outil d'ingénierie important.

Elle permet enfin de mener des expériences à caractère scientifique avant que l'instrument ne soit lancé.

REMERCIEMENTS

Météo-France a financé une partie des équipements de la maquette, et a assuré les sondages par ballons sondes.

REFERENCES

- [1] D. Siméoni, C. Singer (Aérospatiale, Space & Defence Division) & G. Chalon (CNES, Centre Spatial de Toulouse) "Infrared Atmospheric Sounding Interferometer", in IAF-96-B.3.P212
- [2] F.-R. Cayla (Météo-France) : "IASI project status : NZPD determination by software", in 6th international workshop on atmospheric science from space using Fourier transform spectrometry, 1995.