

L'INTERFÉROMÈTRE IASI

UN NOUVEAU SONDEUR SATELLITAIRE À HAUTE RÉOLUTION

François-Régis Cayla

Centre national d'études spatiales (Cnes)

Direction des programmes et des affaires industrielles

18, avenue Édouard-Belin

31401 Toulouse Cedex 4

Courrier électronique : francois-regis.cayla@cnes.fr

RÉSUMÉ

Le Centre national d'études spatiales (Cnes) et Eumetsat développent conjointement un sondeur satellitaire infrarouge à haute résolution pour répondre aux besoins de la météorologie opérationnelle. Ce sondeur, appelé Iasi, sera embarqué sur les satellites défilants européens *Metop*, dont le premier exemplaire doit être lancé en 2003. L'article rappelle d'abord le principe des méthodes d'inversion permettant de calculer les profils verticaux de température et d'humidité dans l'atmosphère à partir des mesures d'un sondeur. Puis il présente les spécifications de Iasi et décrit en détail son fonctionnement instrumental, avant de donner l'état actuel des performances attendues de ce nouveau sondeur, tant du point de vue radiométrique que géophysique. L'article se termine par une description du calendrier complet du développement de Iasi.

ABSTRACT

The interferometer IASI, a new high resolution satellite sounder

The French national centre for space studies (CNES) and Eumetsat are jointly developing a high resolution infrared satellite sounder to meet the needs of operational meteorology. This sounder, named IASI, will fly aboard the European polar-orbiting satellites *METOP*, the first launch of which is planned for 2003. This paper first reviews the principle of the retrieval methods which permit the deduction of the atmospheric temperature and humidity vertical profiles from the measurements of a sounder. It then gives the IASI requirements and details its instrumental processes before giving the new sounder's expected radiometric and geophysical performance. The paper concludes with a description of the whole development schedule of IASI.

CONTEXTE GÉNÉRAL

La communauté météorologique européenne a décidé de prendre à sa charge l'un des deux satellites météorologiques défilants jusqu'alors mis en œuvre par les seuls États-Unis (Gillet, 1995). Cette tâche a été confiée à l'organisation européenne Eumetsat (Pastre, 1996) et fait l'objet du programme EPS (Eumetsat Polar System), qui se compose d'une série de trois satellites *Metop* et d'un sec-teur-sol. Les satellites *Metop* emporteront la charge utile des satellites défilants américains *NOAA*, complétée (figure 1 et encadré ci-après) par le sondeur infrarouge à haute résolution Iasi, le diffusiomètre Ascat, le radiomètre Gome destiné à mesurer le contenu intégré en ozone, enfin le sondeur Gras reposant sur l'analyse des signaux radio émis par un satellite de navigation planétaire (GNSS en anglais) et ayant traversé tangentiellement l'atmosphère.

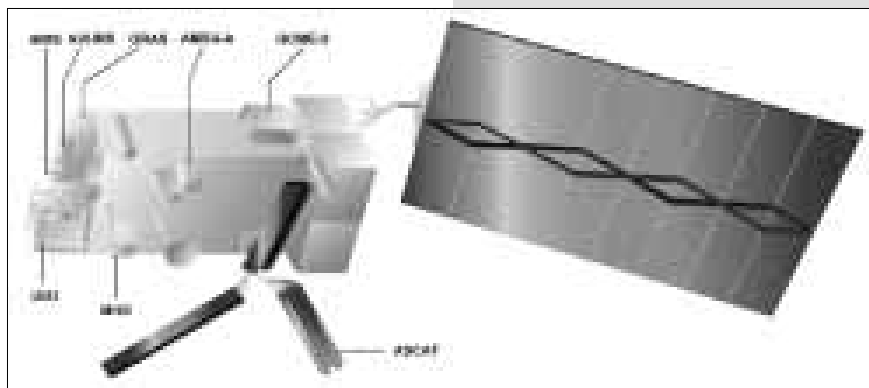


Figure 1 - Le futur satellite défilant européen *Metop* et les instruments qu'il embarquera.

Les instruments du satellite « Metop »

HIRS (High-Resolution Infrared Radiation Sounder) : sondage optique de la température et de l'humidité atmosphériques (par ciel clair) ; déjà sur les satellites NOAA.

AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) : imagerie optique des nuages, du sol et de l'océan ; déjà sur les satellites NOAA.

GRAS (Global Navigation System Satellite Receiver for Atmospheric Sounding) : sondage de la température de la haute atmosphère.

AMSU-A (Advanced Microwave Sounding Unit) : sondage micro-ondes de la température atmosphérique (tous temps) ; déjà sur les satellites NOAA.

GOME-2 (Global Ozone Monitoring Experiment) : mesure du contenu intégré en ozone.

IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) : sondage optique à très haute résolution de la température et de l'humidité atmosphériques (par ciel clair).

MHS (Microwave Humidity Sounder) : sondage micro-ondes de l'humidité atmosphérique (tous temps).

ASCAT (Advanced Scatterometer) : diffusiomètre pour la mesure du vent à la surface des océans.

Bien que l'objet de cet article soit la description de l'instrument Iasi et des performances que l'on peut en attendre, on a jugé utile de présenter auparavant un bref historique des sondeurs satellitaires et de rappeler quelques aspects des méthodes d'inversion conduisant aux profils de température et d'humidité.

Historique

Dès le début de l'ère spatiale⁽¹⁾, la détermination des profils atmosphériques de température et d'humidité par télédétection a été l'un des objectifs principaux fixés aux satellites météorologiques. Aux États-Unis, les développements aboutirent, sur le satellite *Nimbus 3* (avril 1969), à la mise en orbite de deux sondeurs infrarouges SIRS-A (Satellite InfraRed Spectrometer) et IRIS-C (InfraRed Interferometer Spectrometer). Ces instruments et leurs successeurs sur *Nimbus 4* permirent la définition du premier sondeur opérationnel, le VTPR (Vertical Temperature Profile Radiometer), lancé sur *NOAA 2* en octobre 1972. Le VTPR poursuivit sa carrière sur *NOAA 3*, *NOAA 4* et *NOAA 5*, pendant que, sur les satellites expérimentaux *Nimbus 5* (décembre 1972), *Nimbus 6* (juin 1975) et *Nimbus 7* (octobre 1978), le système de sondage évoluait en incluant, autour d'un radiomètre infrarouge multicanaux, un sondeur micro-ondes et un sondeur stratosphérique.

Cet ensemble de trois instruments a conduit à un nouveau système de sondage opérationnel, le sondeur Tivs (Tiros Operational Vertical Sounder), lancé pour la première fois en octobre 1978 sur le satellite *Tiros N*. Le sondeur Tivs comprend en fait trois instruments : le sondeur HIRS 2 (High-Resolution Infrared Sounder), radiomètre infrarouge à 20 canaux, le sondeur MSU (Microwave Sounding Unit), radiomètre micro-ondes à 4 canaux, et le sondeur SSU (Stratospheric Sounding Unit), radiomètre à détection synchrone et à modulation. Ce système Tivs fonctionne encore de nos jours, mais ses performances sont jugées insuffisantes, notamment pour la prévision numérique du temps (Pailleux, 1996).

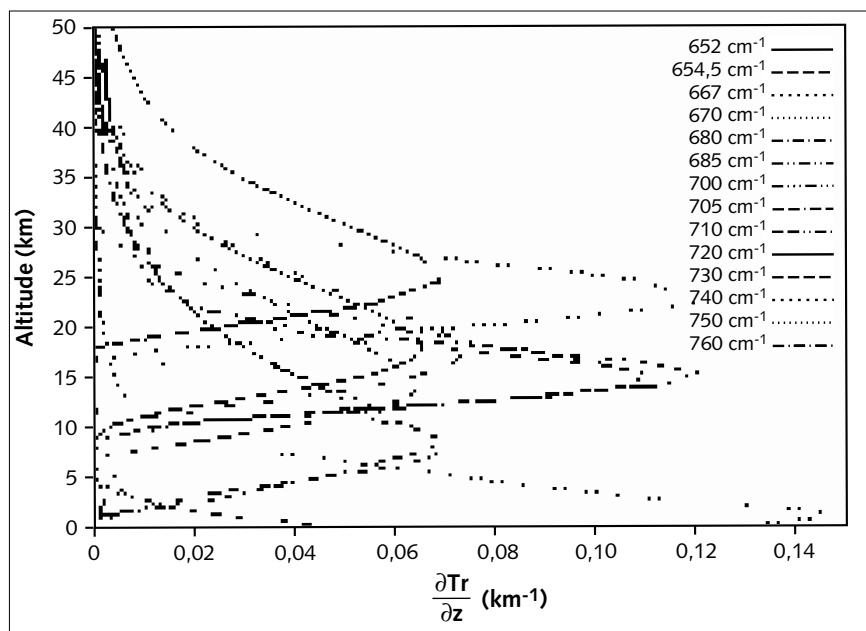
(1) Cet historique est dominé par les activités américaines de la Nasa et de la NOAA. Une évolution parallèle a eu lieu en URSS, mais avec une visibilité limitée.

Aussi, suite à des expériences sur avion, les scientifiques ont-ils entrepris le développement de sondeurs infrarouges plus performants et d'un nouveau type, prévus pour être lancés entre 2000 et 2003 : le sondeur AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) développé par la Nasa américaine et le sondeur Iasi (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer), premier sondeur infrarouge européen développé en coopération entre le Cnes et Eumetsat. Parallèlement, les sondeurs micro-ondes, dont l'avantage est de pouvoir faire des mesures même en présence de nuages, ont progressé et ont inclus la restitution des profils de vapeur d'eau (satellites NOAA 15 lancé en mai 1998 et NOAA 16 lancé en septembre 2000), aboutissant ainsi au nouveau système américain de sondage Atovs (Advanced Tovs).

La fonction de poids et l'inversion des luminances

Pour comprendre le fonctionnement d'un système de sondage par télédétection passive, il est nécessaire de bien appréhender quelques notions fondamentales de transfert radiatif. En particulier, avec les approximations valables pour l'atmosphère et le domaine infrarouge thermique (au-delà de 3,5 μm), la **luminance**⁽¹⁾ mesurée au sommet de l'atmosphère est une moyenne pondérée des valeurs prises par la luminance du corps noir (exprimée par la fonction de Planck) dans les différentes couches émettrices (la surface de la Terre et les couches successives de l'atmosphère). Le poids associé à chaque couche élémentaire combine deux effets : d'une part, l'opacité de la couche, qui gouverne sa

Figure 2 - Les fonctions de poids de quelques-uns des canaux du sondeur Iasi. On observe, par exemple, que le canal à 652 cm⁻¹ contient de l'information sur les couches atmosphériques situées entre 20 km et 50 km d'altitude, tandis que le canal à 760 cm⁻¹ contient de l'information sur les très basses couches, situées en dessous de 5 km.



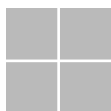
capacité à émettre du rayonnement (loi de Kirchoff), de l'autre, l'atténuation du rayonnement émis par la couche entre son point de départ et le sommet de l'atmosphère ; cette atténuation est la conséquence des opacités cumulées des couches situées au-dessus.

On montre que le poids associé à chaque couche atmosphérique élémentaire est égal à l'atténuation entre la face de sortie et le sommet de l'atmosphère diminuée de l'atténuation entre la face d'entrée et le sommet de l'atmosphère. Notant classiquement cette atténuation atmosphérique T_r et utilisant l'altitude z comme coordonnée verticale, le poids associé à chaque couche élémentaire d'épaisseur dz

est égal à $\frac{\partial T_r}{\partial z} dz$ où la fonction $\frac{\partial T_r}{\partial z}$ est appelée **fonction de poids**. Cela dit, il

est simple de concevoir que, dans une région du spectre où l'atmosphère est fortement absorbante, la luminance mesurée au sommet de l'atmosphère représentera la moyenne de la fonction de Planck sur les couches supérieures, alors qu'au

(1) La **luminance énergétique** (ici, en abrégé **luminance**) mesurée par un radiomètre est la puissance reçue sous forme de rayonnement depuis une direction donnée, rapportée à l'unité de surface réceptrice et à l'unité d'angle solide. Elle s'exprime en $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$. Les Anglo-Saxons utilisent le terme **radiance**.



contraire, dans une région du spectre où l'atmosphère absorbe peu, la moyenne s'étendra à l'ensemble de l'atmosphère et à la surface. La figure 2 présente les fonctions de poids pour quelques-uns des canaux de Iasi.

Dans le cas où les fonctions de poids sont connues, car traduisant l'effet d'un absorbant dont la concentration est homogène (c'est le cas lorsque l'on utilise les bandes d'absorption du dioxyde de carbone), les luminances mesurées permettent de reconstituer le profil de température. Considérant une atmosphère découpée en couches, le traitement peut être schématisé de la façon suivante : la luminance mesurée dans le canal le plus absorbé donne la fonction de Planck pour la couche supérieure, et donc la température de cette couche ; cette température est alors utilisée pour corriger de la contribution de la première couche la luminance d'un canal dont la fonction de poids couvre les deux couches supérieures ; on obtient ainsi la valeur de la fonction de Planck pour la deuxième couche à partir du haut, donc sa température ; le traitement se poursuit ainsi de couche en couche jusqu'à atteindre le sol.

Résolution verticale et largeur de la fonction de poids

La description schématique du processus d'inversion présentée ci-dessus est bien évidemment simpliste. Mais elle a le mérite de montrer immédiatement que les couches décrivant l'atmosphère ne peuvent pas avoir une épaisseur trop faible : elles doivent être telles que leur luminance, corrigée des contributions des couches supérieures, soit encore suffisamment importante pour ne pas être noyée dans le bruit de la mesure. Or le bruit est égal au bruit instrumental du canal, combiné au bruit induit par le bruit des luminances utilisées pour la correction. On sent bien, et c'est évident pour la couche supérieure, que l'épaisseur

des couches est gouvernée par la largeur des fonctions de poids. On perçoit aussi l'importance du bruit de mesure. La recherche d'une bonne résolution verticale passe donc par la définition d'un instrument fournissant les meilleures fonctions de poids possibles, c'est-à-dire les plus étroites, tout en limitant au mieux le bruit de mesure.

On a vu plus haut que la fonction de poids dépend de l'absorption par l'atmosphère. Cette absorption est rapidement variable dans les bandes d'absorption de gaz atmosphériques, bandes qui sont constituées par de nombreuses raies d'absorption. La figure 3 montre la variation spectrale du coefficient d'absorption dans une petite partie de la bande à 600 cm⁻¹ du dioxyde de carbone et définit des exemples de positions (a et b) et de canaux (A et B). La figure 4 montre les fonctions de poids pour des canaux infiniment étroits aux positions a et b, ainsi que celles pour des canaux intégrant les intervalles spectraux A et B. On constate que la fonction de poids pour le canal A est très peu différente de la fonction monochromatique a, tandis que la fonction de poids pour le canal B est intermédiaire entre les fonctions de poids a et b et nettement plus large. Cela

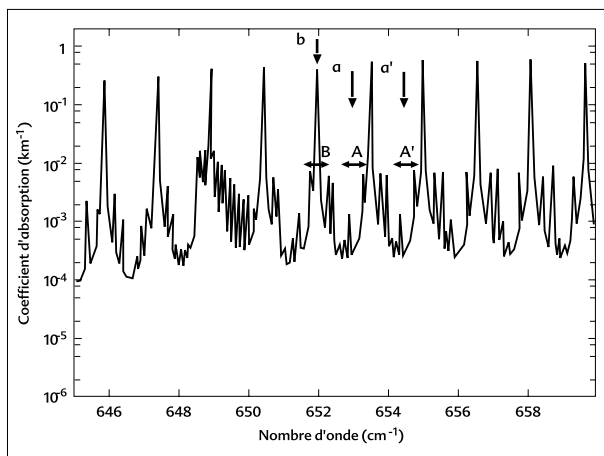


Figure 3 - Variation, avec le nombre d'onde, du coefficient d'absorption du CO₂ atmosphérique au niveau de pression 100 hPa. Les positions a, a', b et les canaux A, A', B sont explicités dans le texte de l'article.

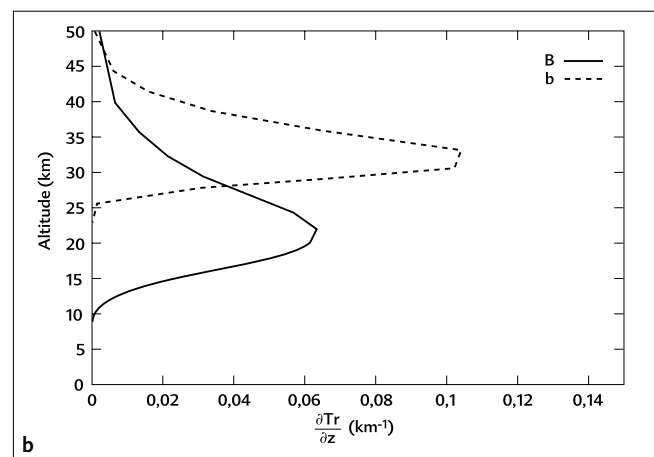
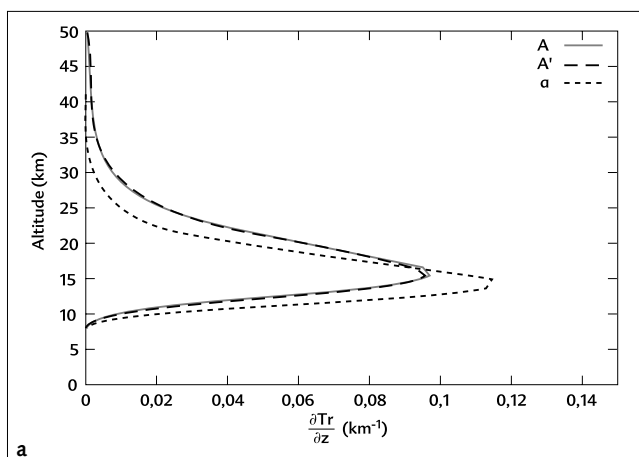


Figure 4 - Fonctions de poids du CO₂ atmosphérique pour plusieurs longueurs d'onde et plusieurs canaux. a : position monochromatique a et canaux A et A' ; b : position monochromatique b et canal B.

illustre le fait que la fonction de poids d'un canal est d'autant plus large que les variations du coefficient d'absorption sont importantes dans la largeur spectrale du canal.

Ainsi, compte tenu des variations quasi périodiques du coefficient d'absorption, la recherche de fonctions de poids aussi étroites que possible impose de limiter la largeur du canal à une fraction de la distance entre raies d'absorption. Cette limitation se traduit par une diminution de l'énergie disponible par canal, et donc par une plus grande difficulté pour la mesurer avec précision. On voit ainsi apparaître la nécessité d'un compromis entre résolution spectrale et précision de mesure dans la recherche de la meilleure résolution verticale possible.

Le nombre de canaux

Le schéma d'inversion décrit plus haut ne nécessite qu'un canal par couche. Sur les figures 3 et 4, on voit que le canal A' possède les mêmes propriétés que le canal A et une fonction de poids pratiquement identique. Le canal A+A' conserve donc la même fonction de poids que le canal A, mais, collectant une énergie double, il a un niveau de bruit plus faible. L'emploi d'un grand nombre de canaux permet donc de diminuer le bruit sur la luminance associée à une fonction de poids, ce qui présente l'avantage de déplacer vers de plus hautes résolutions verticales et spectrales le point de compromis évoqué précédemment⁽¹⁾.

Les composants à concentration variable

Dans cette description schématique du processus d'inversion de la température, la fonction de poids est connue sur la coordonnée verticale « pression ». Pour un absorbant à concentration variable tel que la vapeur d'eau, on peut considérer que la fonction de poids est connue sur la coordonnée verticale « quantité cumulée d'absorbant depuis le sommet de l'atmosphère ». On peut donc déterminer sur cette coordonnée un profil de température. La confrontation au profil de température obtenu sur la coordonnée pression permet de recalibrer les deux coordonnées verticales, et donc d'obtenir un profil de concentration de l'absorbant variable.

OBJECTIFS DE IASI ET CONTRAINTES MÉTROLOGIQUES

Objectifs scientifiques

Lors du lancement du projet Iasi, il a fallu préciser les objectifs scientifiques assignés à l'instrument et spécifier en conséquence ses caractéristiques radiométriques et géométriques.

Iasi doit contribuer à fournir à la communauté météorologique opérationnelle et à la communauté de recherche atmosphérique des profils verticaux de température et d'humidité d'une qualité nettement meilleure que celle actuellement disponible à l'aide du sondeur Toms. Les précisions demandées pour les systèmes de prévision numérique du temps ou d'assimilation de données sont :

- pour la température, précision absolue 1 K et résolution verticale 1 km ;
- pour l'humidité spécifique, précision relative 10 % et résolution verticale 1 km.

Ces chiffres représentent les performances que l'on attend de Iasi aux endroits où les mesures radiométriques seront exploitables, c'est-à-dire dans les régions de ciel clair ou partiellement nuageux. La couverture planétaire du système de sondage sera complétée grâce à l'utilisation conjointe des sondeurs micro-ondes AMSU-A et MHS.

Pour la surveillance de l'évolution des gaz à l'état de traces, Iasi doit pouvoir également fournir les contenus intégrés sur la verticale des constituants gazeux O₃, CH₄, CO et N₂O. La précision attendue est meilleure que 5 % pour l'ozone (avec, si possible, description du profil sur 2 ou 3 niveaux) et meilleure que 10 % pour les autres gaz.

(1) Pour les lecteurs ayant suivi depuis longtemps l'histoire des méthodes d'inversion, cela évoquera peut-être un argument ancien aboutissant à une conclusion opposée sur l'utilité d'augmenter le nombre des canaux : « Supposant mesurés tous les canaux, il est possible de sélectionner un nombre limité de canaux à partir desquels on peut calculer tous les autres avec une précision meilleure que le bruit instrumental ; donc, toutes les autres mesures sont inutiles. » Cet argument est faux, car il néglige le fait que les erreurs sur les canaux calculés seront corrélées. Dans le cas considéré, le canal A' peut être calculé à partir du canal A. Soit A'' la valeur calculée ; l'erreur sur (A+A'')/2 est égale à l'erreur sur A, alors que l'erreur sur (A+A')/2, combinant deux erreurs indépendantes, est égale à $\sqrt{2}$ fois l'erreur sur A ; cela prouve l'utilité de la mesure A'.



Iasi doit permettre de déterminer les températures de surface sur les océans et sur les continents. Sur ces derniers, il doit en outre contribuer à améliorer la connaissance des propriétés spectrales des surfaces.

Iasi doit enfin contribuer à l'étude des interactions entre les nuages et le rayonnement atmosphérique ; d'une part, il doit être capable de caractériser les nuages en termes de couverture partielle, de température du sommet, de type et de semi-transparence, déterminations qu'il effectue à l'aide de son imageur intégré et en synergie avec l'imageur AVHRR ; d'autre part, il doit être capable de mesurer les variations des propriétés optiques des nuages avec la longueur d'onde.

La définition des objectifs de mesure est complétée par la description des résolutions temporelle et horizontale attendues, soit 12 heures (intervalle de temps entre deux passages successifs du satellite) et de l'ordre de 25 km au point sous-satellite.

Caractéristiques radiométriques

Le début de l'article a mis en évidence l'importance de la résolution spectrale et de la qualité radiométrique du sondeur pour pouvoir effectuer des mesures précises et à haute résolution verticale. Les propriétés d'absorption de l'atmosphère, qui influent sur les fonctions de poids, définissent les régions spectrales dans lesquelles il y a de l'information disponible, et donc les régions spectrales à mesurer. Enfin, il est important de noter que le processus d'inversion impose d'être capable de calculer, avec une bonne précision, les contributions des couches atmosphériques au rayonnement mesuré. On en déduit un certain nombre de contraintes sur la connaissance des fonctions de transfert de l'instrument.

Caractéristiques spectrales

Le **domaine spectral** utile s'étend de la fin de la fenêtre de transmission atmosphérique à 3,62 μm (2 760 cm^{-1}) jusqu'au-delà du pic de la branche Q de la bande d'absorption du CO_2 vers 15,5 μm (645 cm^{-1}). À l'intérieur de ce domaine, les régions spectrales données dans le tableau 1 concentrent l'essentiel de l'information utile.

Tableau 1 - Principales régions spectrales utilisées par l'instrument Iasi.

Nom	Région spectrale	Absorbants concernés	Applications de Iasi
R1	650 à 770 cm^{-1}	Bande d'absorption de CO_2	Profil de température
R2	790 à 980 cm^{-1}	Fenêtre atmosphérique	Propriétés des surfaces et des nuages
R3	1 000 à 1 070 cm^{-1}	Bande d'absorption de O_3	Sondage de O_3
R4	1 080 à 1 150 cm^{-1}	Fenêtre atmosphérique	Propriétés des surfaces et des nuages
R5	1 210 à 1 650 cm^{-1}	Bande d'absorption de H_2O	Profil de vapeur d'eau - Contenu en CH_4 et N_2O
R6	2 100 à 2 150 cm^{-1}	Bande d'absorption de CO	Contenu en CO
R7	2 150 à 2 250 cm^{-1}	Bandes d'absorption de N_2O et de CO_2	Profil de température - Contenu en N_2O
R8	2 350 à 2 420 cm^{-1}	Bande d'absorption de CO_2	Profil de température
R9	2 420 à 2 700 cm^{-1}	Fenêtre atmosphérique	Propriétés des surfaces et des nuages
R10	2 700 à 2 760 cm^{-1}	Bande d'absorption de CH_4	Contenu en CH_4

La spécification de **résolution spectrale** découle de l'espacement des raies dans la bande d'absorption à 15 μm du CO_2 , soit 1,5 cm^{-1} . On demande à Iasi une résolution spectrale après apodisation⁽¹⁾ de 0,5 cm^{-1} , soit 0,25 cm^{-1} avant apodisation.

La connaissance de la **fonction de réponse spectrale** de Iasi doit être d'une qualité telle que l'erreur induite sur la détermination de la température d'une cible atmosphérique soit inférieure à 0,1 K.

Enfin, pour ce qui est de l'étalonnage en nombre d'onde de l'instrument, le nombre d'onde central de chaque canal doit être déterminé avec une précision relative meilleure que $2 \cdot 10^{-6}$.

(1) Apodisation : suppression des pieds de la fonction de réponse spectrale en multipliant la fonction fenêtre par une fonction à transformée de Fourier plus acceptable. Mais on perd ainsi de la résolution spectrale.



Longueur d'onde et nombre d'onde

Le **nombre d'onde** n d'un rayonnement monochromatique est donné par

$$n = \nu/c = 1/\lambda$$

où ν est sa fréquence (Hz), c la vitesse de la lumière (m/s) et λ sa longueur d'onde (m). Si le nombre d'onde est exprimé en cm^{-1} et la longueur d'onde en μm , on a la relation

$$n (\text{cm}^{-1}) = 10^4/\lambda (\mu\text{m})$$

Caractéristiques de la mesure de luminance

La **sensibilité radiométrique** de l'instrument est spécifiée comme l'écart de température qui donne une variation de luminance du corps noir équivalente au bruit de la mesure. Son évaluation en termes de luminance implique sa multiplication par la dérivée en température de la fonction de Planck ; elle dépend donc du nombre d'onde et de la température. Pour des raisons de commodité, on choisit de spécifier cette température de façon indépendante du canal et l'on prend comme température de référence 280 K. Pour les régions spectrales importantes définies dans le tableau 1, la sensibilité radiométrique spécifiée est indiquée dans le tableau 2.

R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
0,20	0,24	0,20	0,24	0,20	0,36	0,36	0,36	0,36	1,53

Tableau 2 – Sensibilité radiométrique (K) spécifiée pour les diverses régions spectrales de Iasi.

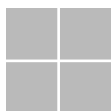
En dehors de ces régions, une dégradation des performances par rapport aux régions adjacentes est acceptable dans la limite de 20 %. Le bruit pris en compte par cette spécification inclut toutes les sources de bruit (détecteurs, amplificateurs, numérisation, traitement) et d'erreurs assimilables au bruit (par exemple, les erreurs liées à l'étalonnage en nombre d'onde ou à la connaissance de la fonction d'instrument).

La spécification d'**étalonnage en luminance** comporte plusieurs aspects : le premier (a) correspond à la précision absolue des températures équivalentes mesurées avec Iasi, et donc à l'erreur totale d'étalonnage. Le deuxième (b) correspond à la reproductibilité des étalonnages et représente donc les erreurs autres que les biais. Le troisième (c) correspond aux termes d'erreur ayant un comportement différent entre bandes spectrales, entre pixels de la matrice de détecteurs ou pour des positions angulaires différentes du miroir de balayage.

- (a) Le système d'étalonnage doit permettre la détermination, en vol, des températures équivalentes à mieux que 1 K dans le domaine 200 à 300 K (objectif 0,5 K).
- (b) La reproductibilité des étalonnages doit être telle que les variations n'induisent pas d'erreur sur la température équivalente supérieure à 0,3 K dans le domaine 200 à 300 K.
- (c) Les différences d'étalonnage entre bandes, entre pixels simultanés et entre positions du miroir de balayage ne doivent pas introduire, pour une cible à la même température équivalente, des différences supérieures à 0,2 K. Cette partie de la spécification limite l'amplitude des effets variables non modélisés ou des résidus après modélisation (variations de réflectivité ou de polarisation).

Enfin, pour ce qui concerne le **domaine de température**, Iasi doit pouvoir mesurer des températures équivalentes comprises entre 2 K et 315 K.

Caractéristiques géométriques



Le **balayage nominal** de Iasi est compatible avec celui du sondeur AMSU-A, ce qui veut dire que les axes optiques de Iasi et de AMSU-A pointent vers les mêmes positions au sol au cours du balayage. Plus précisément, l'axe optique de Iasi balaie l'espace dans un plan perpendiculaire à la trace au sol du satellite (figure 5). Le balayage est discontinu, avec un déplacement rapide entre les positions de visée et un arrêt pendant la visée (acquisition de l'interférogramme). Il y a 30 positions de visée sur la ligne de mesure, écartées d'environ 3,3 degrés et

symétriques par rapport à la verticale. L'axe optique se déplace donc de - 47,85 degrés à + 47,85 degrés par rapport au nadir. Le balayage d'une ligne inclut, en plus des 30 visées vers le sol, les visées sur les cibles d'étalonnage et le retour à la position de départ ; il dure en tout 8 secondes. Sachant que *Metop* sera en orbite à une altitude proche de 840 km, la **fauchée** de Iasi (longueur de la ligne de mesure au sol) sera de 2 400 km environ.

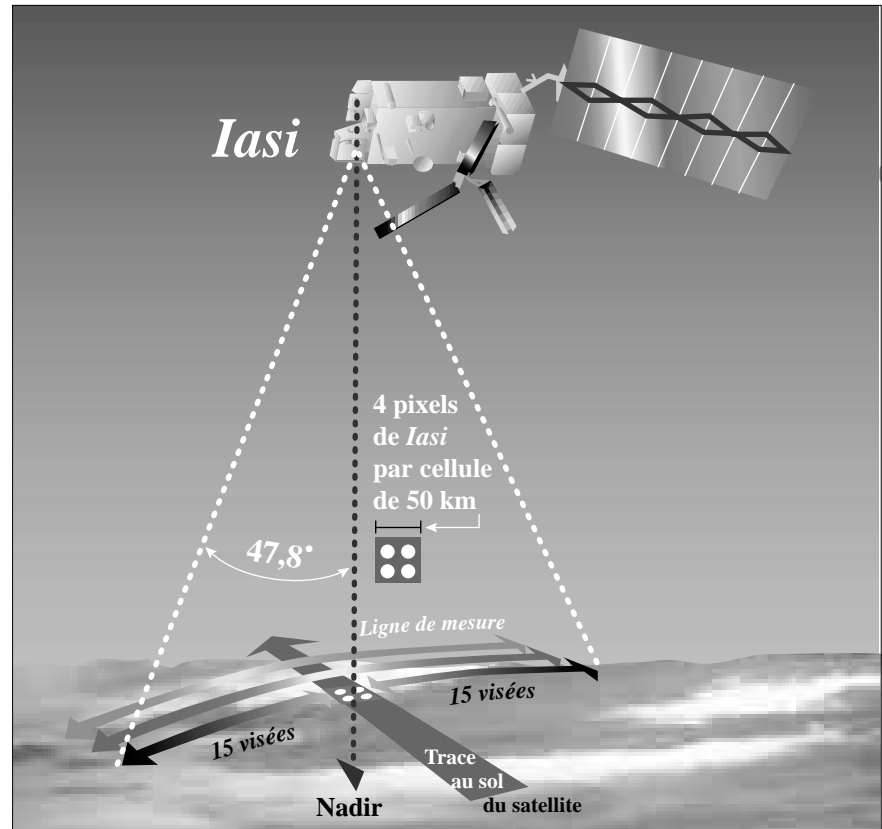


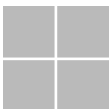
Figure 5 - Le balayage de Iasi.

Pour assurer la **stabilité de la visée**, il est nécessaire que le champ de l'instrument soit fixe pendant l'acquisition de l'interférogramme, afin d'éviter une contamination du spectre résultant de variations de la scène. Les résultats de simulations montrent que la position de l'intersection de l'axe optique de Iasi avec le sol ne doit pas s'écarter de plus de 140 mètres de sa position moyenne pendant les 150 millisecondes que dure l'acquisition de l'interférogramme. Cela correspond à une précision angulaire de 0,17 milliradians.

Le **champ angulaire total** de Iasi est conique avec un angle au sommet de 3,3 degrés. Il est analysé par une matrice de 2 x 2 cellules circulaires correspondant à un angle de 1,25 degrés et dont les centres sont situés sur des lignes et colonnes situées à $\pm 0,825$ degrés de l'axe optique de l'instrument (figure 5). Au sol, chacune des cellules de la matrice d'analyse correspond ainsi à un pixel circulaire de 18 km de diamètre au point sous-satellite.

L'imageur intégré

De façon à faciliter le traitement des régions partiellement nuageuses, à l'aide d'une analyse fine des propriétés des nuages présents dans le champ de Iasi, et en synergie avec l'imageur AVHRR, un radiomètre imageur à large bande spectrale et à haute résolution spatiale est intégré à Iasi. Cet imageur repose sur une matrice de microbolomètres déjà développée. Il possède un unique canal spectral qui s'étend de 10,5 à 12,5 μm (fenêtre atmosphérique). Sa sensibilité radiométrique doit être meilleure que 0,3 K à 300 K et il doit être étalonné à mieux que 1 K. Enfin, sa matrice de 64 x 64 détecteurs analyse un champ carré de 3,3 degrés de côté, centré sur l'axe optique du sondeur, ses lignes étant parallèles aux lignes de la matrice de cellules du sondeur. Chacun des détecteurs de l'imageur intégré voit ainsi un pixel carré de 0,8 km de côté au point sous-satellite.



PRINCIPES PHYSIQUES ET DESCRIPTION DE L'INSTRUMENT

La spectrométrie par transformée de Fourier

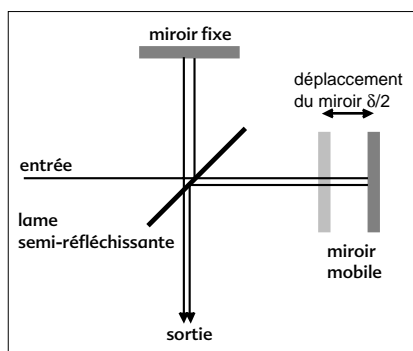


Figure 6 - Schéma optique d'un interféromètre de Michelson.

Après un rappel sommaire du principe de la spectrométrie par transformée de Fourier, on examine pas à pas chacun des processus instrumentaux mis en œuvre dans Iasi.

Iasi est un **interféromètre de Michelson**. Dans un tel instrument (figure 6), le faisceau de rayonnement monochromatique de nombre d'onde n est divisé par une lame semi-réfléchissante, appelée **séparatrice**, en deux parties approximativement égales, qui parcourent des trajets de longueurs différentes l_1 et l_2 avant de se combiner à nouveau sur la séparatrice. Cette recombinaison de deux ondes cohérentes déphasées de $\varphi = 2\pi n \cdot (l_1 - l_2)$ donne lieu à un phénomène d'interférences. L'amplitude A de l'onde combinée vaut :

$$A = 2\alpha \cos(\varphi/2) \tag{1}$$

Son intensité $I(\delta)$, où δ est la **différence de marche** $l_1 - l_2$, est proportionnelle à A^2 , soit :

$$I(\delta) = 2\alpha^2 [1 + \cos(2\pi n \delta)]$$

Si l'on considère maintenant, au lieu d'une onde monochromatique, un rayonnement ayant un spectre continu $S(n)$, on aura :

$$I(\delta) = 1/2 \int S(n) \cdot [1 + \cos(2\pi n \delta)] \cdot dn$$

L'**interférogramme** $I(\delta)$ se compose d'un terme constant auquel s'ajoute la partie réelle de la transformée de Fourier du spectre $S(n)$. En faisant varier δ grâce au miroir mobile, on obtient donc la transformée de Fourier du spectre $S(n)$. Il suffit ensuite de calculer la transformée de Fourier inverse pour en déduire le spectre $S(n)$.

Dans la pratique, la transformation qui fait passer du spectre à l'interférogramme n'est pas une transformée de Fourier parfaite. Elle est discrète, car l'interférogramme est obtenu avec un pas dx , et elle est limitée à la différence de marche maximale δ_{max} permise par le mécanisme. En conséquence, le spectre résultant est échantillonné avec un pas $1/(2\delta_{max})$ et est limité à la fréquence maximale $1/(2dx)$; de plus, étant le résultat de la transformée de Fourier inverse d'un interférogramme infini multiplié par une fenêtre de largeur $2\delta_{max}$, il est égal à la convolution du spectre infini (transformée inverse de l'interférogramme infini) par la transformée de la fonction fenêtre. Dans le cas d'un interféromètre parfait, cette fonction de convolution définit le **fonction de réponse spectrale** de l'instrument.

Processus instrumentaux

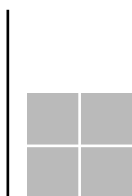
Pour décrire les processus instrumentaux, il est commode de suivre l'« information » quand elle progresse, tout d'abord sous forme de photons dans le système optique, puis sous forme de signal électrique à travers les éléments de la chaîne électronique jusqu'à la conversion numérique ; au-delà, on doit encore décrire les traitements mis en œuvre avant d'aboutir aux produits finaux distribués aux utilisateurs.

Le fonctionnement du sondeur

Le premier processus (figure 7) consiste à collecter le rayonnement infrarouge émis par l'atmosphère terrestre, en provenance du champ de visée, et à le transporter à travers l'interféromètre jusqu'au détecteur. Le premier élément est un miroir de balayage qui déplace la direction de visée perpendiculairement à la direction de propagation du satellite. Comme on l'a déjà vu, ce déplacement est discontinu. Pendant l'arrêt correspondant au déplacement du miroir mobile pour l'acquisition de l'interférogramme, le miroir de balayage déplace la direction de visée parallèlement au déplacement du satellite, de façon à compenser ce déplacement. Le miroir de balayage permet aussi de viser deux cibles de référence, l'espace et un corps noir interne, pour l'étalonnage radiométrique de l'instrument.

Dans un radiomètre infrarouge, il est nécessaire de limiter le nombre total de photons n'appartenant pas au signal utile et arrivant sur le détecteur ; pour cela, il faut que le détecteur ne voie que des surfaces froides en dehors du faisceau utile. Ce dernier est donc délimité, dans la cavité froide (à 100 K) contenant les détecteurs, par deux diaphragmes froids : un diaphragme d'ouverture, dans un plan conjugué du miroir de balayage, et un diaphragme de champ dans un plan image.

Le deuxième processus est la transformée de Fourier optique. Il s'effectue dans la partie centrale de l'instrument (figure 8), une variante de l'interféromètre de Michelson dans laquelle la lame compensatrice est éloignée de la lame



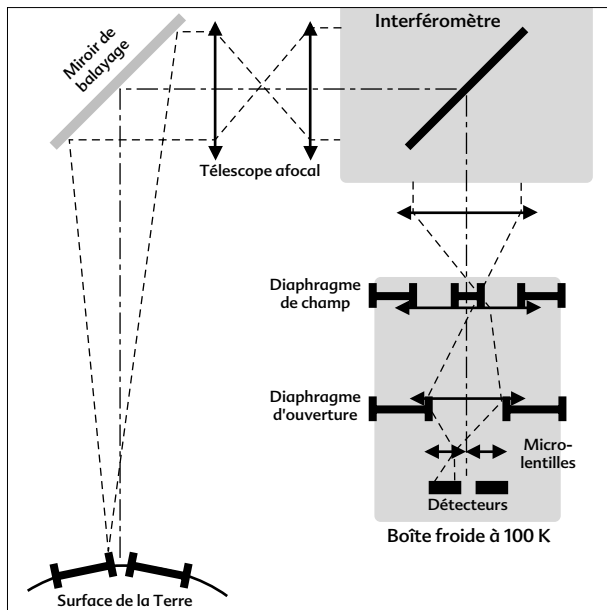


Figure 7 - Principaux éléments optiques de Iasi et parcours du rayonnement infrarouge dans l'instrument.

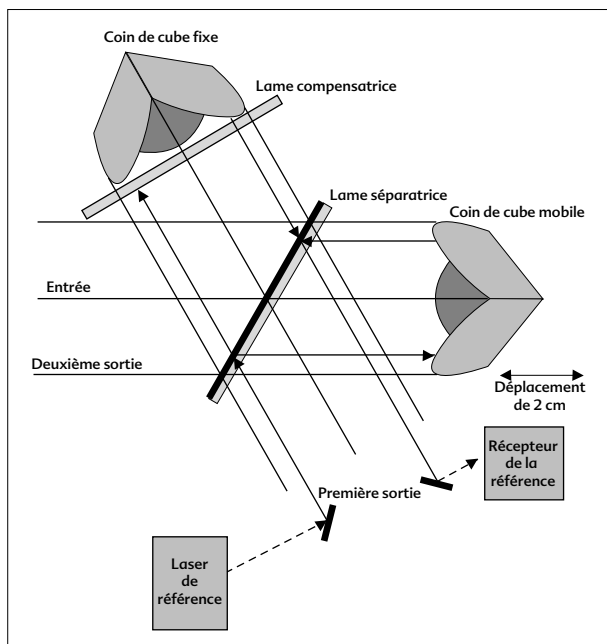


Figure 8 - Schéma détaillé de l'interféromètre de Iasi.

séparatrice (variante dite Connes) et placée perpendiculairement au faisceau. Le faisceau d'entrée est divisé en deux faisceaux par la lame séparatrice. Le premier, qui traverse la séparatrice, est à parcours variable, ce qui est obtenu en déplaçant le **coin de cube**⁽¹⁾ mobile de 2 cm. Le second, après réflexion par la lame séparatrice, traverse la lame compensatrice avant d'être réfléchi par le coin de cube fixe. Les deux faisceaux se combinent en deux faisceaux de sortie, l'un poursuivant vers le détecteur, l'autre retournant vers l'entrée de l'instrument. Ces deux faisceaux sont modulés comme indiqué précédemment.

Il faut, à ce niveau, considérer un effet important lié au fait que le faisceau infrarouge en provenance d'un pixel visé par Iasi n'est pas infiniment étroit. La variation de la direction de propagation à l'intérieur du pixel va se traduire, pour l'argument du cosinus de l'équation (1), par des variations proportionnelles à la différence de marche. Cela va diminuer l'amplitude de la modulation du signal intégré sur le pixel, d'autant plus que la différence de marche sera importante. L'interférogramme théorique va être multiplié, non pas par la fonction fenêtre, mais par une fonction amortie sur les bords, ce qui va engendrer une diminution des oscillations de la fonction de réponse spectrale de l'instrument et une augmentation de sa largeur ; cet effet, proche de ce que l'on recherche lors de l'apodisation du spectre, est appelé « autoapodisation ».

Le dernier processus optique (figure 9) divise le rayonnement qui sort de l'interféromètre en trois bandes spectrales. Cette séparation est nécessaire pour deux raisons : d'une part, il n'existe pas de détecteur infrarouge fonctionnant à 100 K et capable de couvrir l'ensemble du domaine spectral de Iasi ; d'autre part, la diminution rapide de l'émission du corps noir quand le nombre d'onde croît est telle que, pour les grands nombres d'onde, le signal utile serait enfoui sous le **bruit de photons**⁽²⁾ si l'on utilisait un seul détecteur pour tout le domaine spectral. Les trois bandes spectrales sont ainsi : bande B1 de 645 à 1 210 cm^{-1} , bande B2 de 1 210 à 2 000 cm^{-1} , bande B3 de 2 000 à 2 760 cm^{-1} . La séparation est effectuée par un jeu de deux lames dichroïques.

On arrive maintenant dans le groupe des processus électro-optiques et électroniques.

Le premier est la détection, consistant à convertir les photons en un signal électrique ; elle est réalisée par un jeu de trois détecteurs. Pour la bande B1, on utilise un détecteur photoconducteur en tellure de cadmium et de mercure (HgCdTe), associé à un circuit conçu de façon à minimiser la non-linéarité. Pour la bande B2, on emploie un détecteur HgCdTe photovoltaïque et, pour la bande B3, un détecteur

photovoltaïque en antimoniure d'indium (InSb). Au-delà d'un préamplificateur spécifique à chaque bande, les trois circuits sont identiques et incluent un amplificateur, un détecteur de saturation et un filtre antireflet.

La difficulté particulière de la conversion analogique-numérique réside dans le fait que l'échantillonnage du signal doit être effectué à des positions extrêmement stables et précisément équidistantes en termes de différence de marche optique. Il est impossible de réaliser mécaniquement une qualité de mouvement du coin de cube mobile telle qu'un échantillonnage piloté par une horloge temporelle soit suffisamment précis.

(1) Coin de cube : ensemble de trois miroirs perpendiculaires, qui renvoie un rayon symétrique du rayon incident par rapport au sommet du trièdre.

(2) Le bruit de photons provient de la nature granulaire de la lumière ; il limite la qualité d'une mesure de luminance.

On est donc obligé de mesurer la différence de marche par un interféromètre auxiliaire utilisant les mêmes réflecteurs, dans lequel on injecte parallèlement à la direction de déplacement du coin de cube le faisceau monochromatique d'un laser stabilisé. On obtient après détection et filtrage une sinusoïde extrêmement pure, dont les passages au zéro servent à générer l'horloge d'échantillonnage. Le laser choisi est une diode-laser de haute fiabilité, développée pour les communications par fibre optique ; elle est stabilisée en fréquence par asservissement à une raie d'absorption de l'acétylène. Les tops d'horloge ne déclenchent une conversion que lorsque le coin de cube mobile est à l'intérieur du domaine utile de différence de marche.

Il reste à décrire les processus qui aboutissent à l'interférogramme numérisé. Pour les premiers points de l'interférogramme, le signal analogique est numérisé et cette valeur est utilisée pour générer un niveau de référence grâce à un convertisseur numérique-analogique. Pour le reste de l'interférogramme, on numérise la différence obtenue analogiquement entre le signal et ce niveau de référence. Cette technique permet

de limiter la dynamique du convertisseur analogique-numérique (CAN), sans pour autant perdre l'information sur le niveau moyen. La qualité radiométrique recherchée impose un CAN à 16 bits et une fréquence d'échantillonnage proche de 350 kHz. De tels convertisseurs n'existent pas en technologie spatialisable ; c'est pourquoi un numériseur adapté au signal interférométrique a dû être développé. Il repose sur un CAN à 12 bits qui convertit la dernière sortie non saturée d'un jeu de trois amplificateurs de gain 1, 4 et 16. On génère alors un mot de 16 bits contenant, outre les 12 bits en provenance du CAN, 2 bits identifiant l'amplificateur utilisé et 2 bits logiques indiquant l'un, un écrêtement du signal analogique, l'autre la saturation du CAN. On obtient, de cette manière, un résultat identique à ce qu'aurait donné un convertisseur à 16 bits pour 99 % des échantillons.

Les processus suivants sont des traitements numériques, qui vont transformer les interférogrammes en produits pouvant être distribués aux utilisateurs. Il n'y a pas de frontière évidente à l'intérieur de cette chaîne de traitements, mais les contraintes du satellite ont imposé d'effectuer à bord une partie importante du traitement, de façon à ramener le flux de données à un niveau compatible avec le volume de transmission alloué à Iasi.

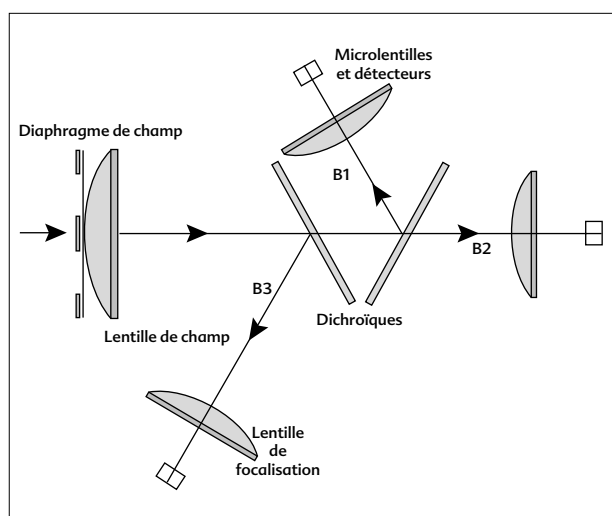


Figure 9 - L'optique de séparation des trois bandes spectrales de Iasi.

Tous les interférogrammes numérisés sont traités à bord pour corriger les effets systématiques connus affectant la chaîne de détection et pour détecter – et si possible corriger – les défauts aléatoires. Cela correspond aux traitements suivants :

- détection des pics provoqués par l'impact d'ions lourds sur le détecteur ;
- correction des défauts de linéarité d'après des lois déterminées au sol ;
- détermination du rang de l'échantillon associé à la différence de marche nulle.

Les interférogrammes corrigés subissent une transformation de Fourier inverse pour aboutir à un spectre complexe, appelé « spectre brut ».

Les spectres bruts des visées de référence (espace froid et corps noir interne) sont utilisés pour calculer les coefficients complexes d'étalonnage, en admettant que l'instrument est linéaire dans le plan complexe. Comme ces coefficients sont contaminés par le bruit sur les visées de référence, on accumule des déterminations successives pour atténuer cette contamination. Ces coefficients sont ensuite appliqués, à bord, aux visées atmosphériques pour obtenir un spectre préétalonné. Il faut noter qu'il y a un jeu de coefficients d'étalonnage par cellule, par bande spectrale et par direction de déplacement du coin de cube. Les spectres sont ensuite codés de façon à ramener le flux de données à l'intérieur de la valeur allouée à Iasi.

Après avoir été enregistrées tout au long de l'orbite, les données sont envoyées vers les stations de réception du système EPS. Là, on extrait les données de Iasi et on les envoie au système de traitement de niveau 1, qui transforme les données brutes de Iasi en données de niveau 1a, 1b et 1c.

Le niveau 1a contient des spectres complètement étalonnés, tant spectralement que radiométriquement ; ces spectres sont localisés à la fois dans un repère géographique et dans les coordonnées de l'imageur AVHRR ; les positions spectrales sont connues, mais restent non nominales. Pour atteindre ce niveau 1a, on applique les traitements suivants :



- étalonnage spectral obtenu par corrélation du spectre mesuré avec un spectre synthétique ;
- correction d'étalonnage radiométrique, qui prend en compte des distorsions non corrigées à bord ;
- détermination des positions géographiques des spectres et de leur position dans l'image AVHRR.

Pour passer au niveau 1b, les données 1a sont rééchantillonnées sur une échelle nominale en nombre d'onde. Enfin, les données de niveau 1c sont des données 1b traitées pour ramener leur fonction de réponse spectrale à une fonction prédéfinie, unique sur tout le spectre.

L'imageur intégré

Les processus optiques de l'imageur de Iasi sont beaucoup plus simples et se limitent à la fonction de collecte du rayonnement infrarouge sur une matrice de 64 x 64 détecteurs, placée au plan focal d'une optique dioptrique. L'imageur utilise le même miroir de balayage que le sondeur, ce qui élimine toute possibilité de dérive entre les visées de l'un et de l'autre. Le détecteur est du type microbolomètre et couvre la fenêtre atmosphérique située autour de 11 μm . L'étalonnage utilise les mêmes visées de référence que le sondeur et fait l'hypothèse de la linéarité. Le traitement, outre l'étalonnage, comporte la corrélation avec l'image AVHRR de façon à localiser précisément les visées du sondeur de Iasi dans cette dernière.

Pour illustrer cette longue séquence d'opérations, la figure 10 montre le schéma de décomposition fonctionnelle de l'instrument et fait apparaître, outre les composants décrits ci-dessus, les systèmes de servitude tels que la gestion de bord qui pilote tout le fonctionnement de l'instrument en gérant les télécommandes et en produisant la télémesure de gestion, le contrôle thermique qui assure une température de fonctionnement correcte aux boîtiers électroniques et aux mécanismes, le radiateur cryogénique qui permet de maintenir à 100 K les détecteurs et la cavité froide. La figure 11 montre comment les différents éléments optiques sont combinés dans la maquette de l'instrument.

CONTRAINTES ET CHOIX TECHNIQUES

On décrit maintenant le fonctionnement de l'instrument Iasi, tel qu'il résulte d'un certain nombre de choix techniques effectués au cours du développement du projet, en essayant de donner succinctement les raisons qui ont amené à ces choix.

Figure 10 - Diagramme fonctionnel de l'instrument Iasi.

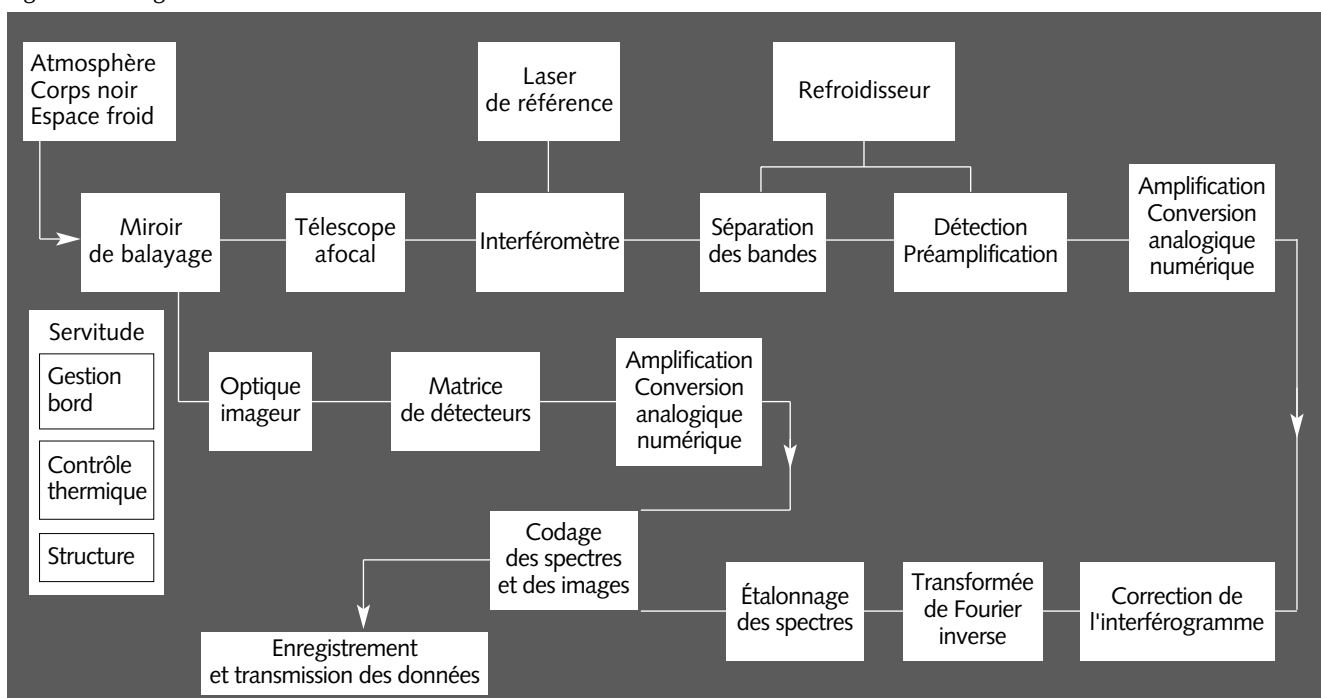
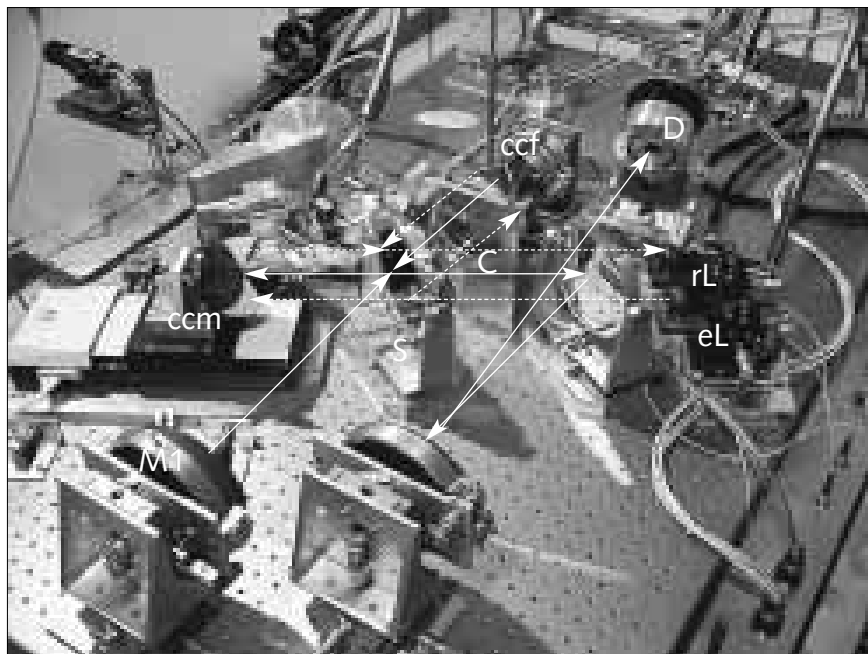


Figure 11 - Photographie de la maquette fonctionnelle de Iasi. On distingue le miroir M1 d'entrée dans l'interféromètre, la lame séparatrice S, la lame compensatrice C, le coin de cube fixe ccf et le coin de cube mobile ccm, enfin le détecteur D. Les lignes en trait plein indiquent la propagation des deux faisceaux depuis M1 jusqu'au détecteur. On a indiqué en trait discontinu les faisceaux de l'interférogramme de référence, de l'émetteur laser eL jusqu'au récepteur rL.



Contraintes dues au satellite « Metop »

L'embarquement de Iasi sur le satellite *Metop* entraîne un certain nombre de contraintes liées à l'environnement spatial (résistance au vide et aux rayonnements) et au lancement (résistance aux accélérations, aux vibrations, aux chocs). D'autres contraintes proviennent du partage des ressources (masse, puissance électrique, capacités de retransmission vers le sol des données, ce qui inclut les capacités de stockage au cours d'une orbite) entre les différents instruments embarqués sur *Metop*. Il est à noter que, pour des raisons de coût et de délai, *Metop* réutilise une plate-forme déjà développée ; il faut donc réussir à faire tenir l'ensemble des instruments dans une enveloppe prédéfinie au lieu de développer l'enveloppe en fonction des besoins des instruments.

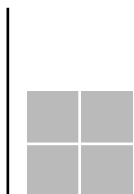
La contrainte qui a été la plus déterminante concerne le débit de données : la capacité totale de *Metop* est de 3,5 Mbits/s et Iasi a reçu une allocation de 1,5 Mbits/s. Une autre source importante de contraintes sur la définition de l'instrument est la durée de vie en orbite, spécifiée en termes de probabilité de fonctionner au bout de cinq ans avec des performances peu dégradées par rapport aux performances nominales.

Choix des matériels

L'ensemble des choix de matériels correspond à une procédure continue de compromis. Cette procédure ordonne les compromis en les hiérarchisant et en hiérarchisant aussi les critères de choix. Le premier critère de choix est la réponse à la spécification, mais tous les points de la spécification n'ont pas la même importance et il faut les ordonner ; on a privilégié la résolution spectrale et la qualité radiométrique, ainsi que la fiabilité et la disponibilité, qualités déterminantes pour un instrument devant être opérationnel.

L'ordre d'exécution des choix a visé à limiter le plus rapidement possible l'éventail des choix technologiques. Le premier choix a confirmé la technique interférométrique, de préférence à la spectrométrie à réseau. La qualité de l'étalement radiométrique impose alors un interféromètre bilatère. La résolution spectrale impose enfin une différence de marche maximale de 2 cm en chemin optique. Le choix suivant a été la nature du réflecteur : coin de cube ou miroir plan ; la grande sensibilité des performances à l'alignement des miroirs plans, sensibilité qui impose un alignement dynamique, a fait choisir les coins de cube.

Ensuite, le très grand nombre de cycles au cours de la vie de l'instrument (5 ans x 365 jours x 24 heures x 3 600 secondes x 2 cycles/seconde = 3.10^8 cycles) est incompatible avec des glissières à billes ; on a donc choisi un mécanisme où le guidage du coin de cube mobile est réalisé par des lames métalliques flexibles. Les mêmes considérations de longévité avaient d'abord conduit à choisir un palier magnétique pour le mécanisme de balayage du miroir ; les difficultés rencontrées au cours de la réalisation de la maquette – qui a abouti avec beaucoup de retard à des résultats hors spécifications – ont amené à plutôt se tourner vers une solution reposant sur des roulements à lubrification liquide.



D'autres choix fondamentaux ont été dictés par la maturité technologique et par des considérations d'environnement de l'instrument. Cela a été le cas pour le choix d'un refroidissement passif des détecteurs, de préférence à une machine cryogénique, pour laquelle le manque d'expérience ne permet pas une bonne confiance dans la longévité et pour laquelle le niveau de vibration à l'intérieur de l'instrument risquait d'avoir de lourdes conséquences sur la qualité spectrale.

Enfin, le dernier choix majeur a été imposé par la limitation des capacités de transmission de *Metop*. En effet, l'instrument Iasi fournit les données brutes (les interférogrammes) à la cadence de 50 Mbits/s ; l'étude des possibilités de compression a montré, très tôt dans la vie du projet, que le seul moyen d'atteindre un taux de compression de 30 était d'effectuer la transformation de l'interférogramme en spectre complexe (taux 15), puis de réaliser l'étalonnage (taux 2 par disparition de la partie imaginaire).

PERFORMANCES PRÉVUES POUR IASI

Performances de l'instrument

On examine ici les performances attendues du sondeur Iasi, d'abord du point de vue radiométrique, puis du point de vue géophysique.

Les performances de l'instrument ne seront caractérisées complètement qu'au cours de la recette technique, juste avant la livraison par l'industriel. Elles seront complétées au cours de la recette en vol, pendant les six premiers mois de Iasi en orbite. Il est cependant nécessaire, au cours du développement de l'instrument, d'avoir à tout moment une estimation de ses performances. Cette estimation est le résultat d'un **modèle numérique de l'instrument**, qui relie les performances de Iasi à celles de ses différents composants. Ce modèle a d'abord servi, au cours des phases de définition de l'instrument, à écrire un jeu de spécifications cohérent pour l'ensemble des composants. Il sert, maintenant que les réalisations ont commencé, à apprécier l'impact des propriétés des composants lorsque des évaluations par l'industriel responsable ou des mesures d'échantillons deviennent disponibles.

À ce jour, on a les résultats suivants pour la sensibilité radiométrique et la fonction de réponse spectrale de Iasi, qui conditionnent ses performances en termes de précision et de résolution verticale du sondage.

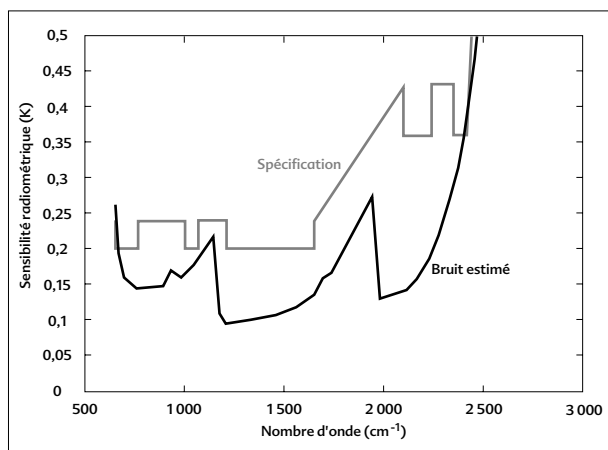
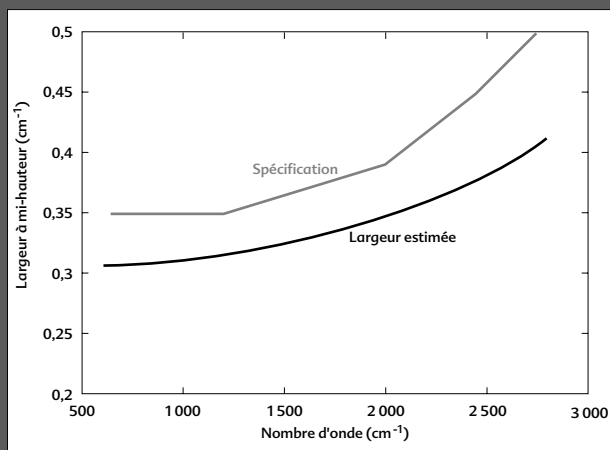


Figure 12 - Sensibilité radiométrique de Iasi ; comparaison de la simulation et des spécifications de départ.

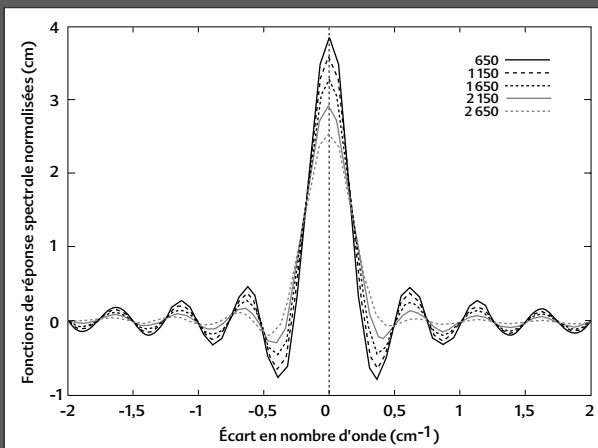
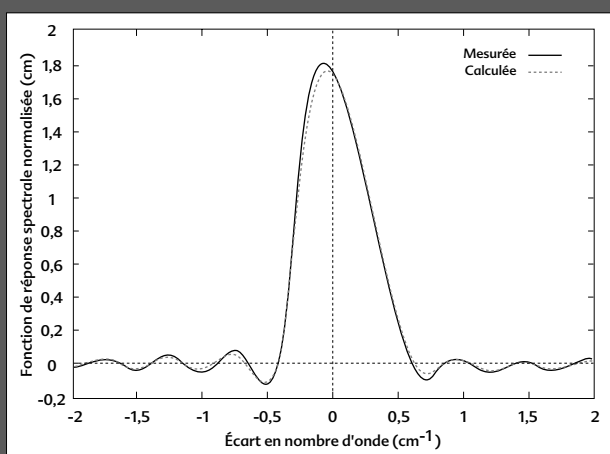
incluant le bruit de tous les traitements appliqués pour aboutir aux spectres de niveau 1c, est donnée dans la figure 12 sur laquelle sont aussi indiquées les spécifications correspondantes. On constate que les performances attendues sont nettement meilleures que les spécifications dans la plus grande partie du domaine spectral, notamment dans la bande R5 de la vapeur d'eau ($1\,210 - 1\,650\text{ cm}^{-1}$). Il y a par contre des régions spectrales où la sensibilité est hors spécifications. Parmi celles-ci, les régions correspondant aux coupures entre bandes ne sont pas gênantes, les limites de bande ayant été choisies de façon à éviter les parties utiles du spectre. La région $650 - 680\text{ cm}^{-1}$ est, en revanche, beaucoup plus problématique, car elle concentre la majeure partie de l'information sur le profil de température dans la stratosphère ; les responsables du projet et l'industriel font de leur mieux pour améliorer les performances dans cette région, mais le problème est compliqué par l'apparition d'une absorption importante des matériaux optiques. De même, à l'autre extrémité du domaine, au-delà de $2\,400\text{ cm}^{-1}$, la sensibilité n'atteint que marginalement le niveau spécifié. Cette fois, la difficulté est inhérente au comportement de la fonction de Planck, mais l'impact sur les profils est faible, la majeure partie de cette région étant une fenêtre atmosphérique où la résolution spectrale n'est pas indispensable et où il est donc loisible de regrouper les canaux afin de réduire le bruit.

Les performances spectrales de Iasi sont présentées sur la figure 13, qui montre la variation de la largeur à mi-hauteur de la fonction de réponse spectrale, superposée aux spécifications. On voit que la largeur à mi-hauteur est partout meilleure que la spécification. La figure 14 montre les fonctions de réponse spectrale pour plusieurs nombres d'onde ; on voit l'effet de l'autoapodisation, qui croît avec le nombre d'onde et qui élargit la fonction de réponse en réduisant l'importance de ses pieds.





◀ Figure 13 - Largeur à mi-hauteur de la fonction de réponse spectrale de Iasi ; comparaison de la simulation avec les spécifications de départ.



▲ Figure 14 - Simulation de la fonction de réponse spectrale de Iasi, pour cinq valeurs différentes du nombre d'onde. On note l'élargissement et l'amortissement de cette fonction à mesure que croît le nombre d'onde.

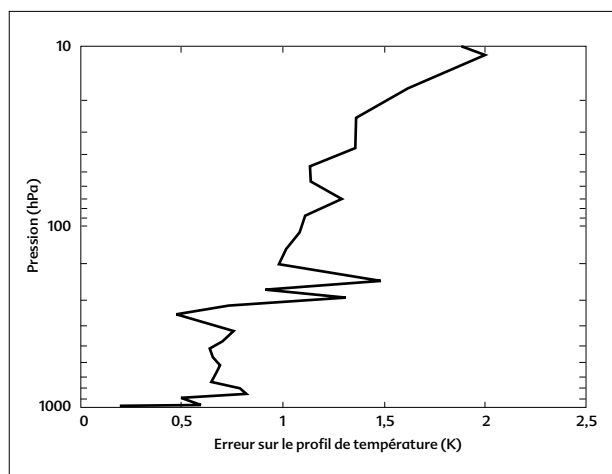
◀ Figure 15 - Fonction de réponse spectrale à 2 948 cm⁻¹ ; comparaison de la simulation et d'une mesure effectuée sur la maquette de Iasi.

Ces résultats proviennent de modélisations. Mais la figure 15 montre en superposition la fonction de réponse spectrale mesurée, avec la maquette de l'instrument, sur un laser émettant à 2 948 cm⁻¹ et la fonction calculée, ce qui témoigne de la très bonne prévisibilité des caractéristiques spectrales de l'interféromètre.

Performances du sondage

De même que pour la qualité de l'instrument, la qualité des profils atmosphériques déduits des mesures de Iasi ne sera connue qu'après le lancement, et même, si l'on se réfère à l'exemple du Tovs, qu'après plusieurs années d'utilisation. Il est cependant possible d'obtenir a priori une évaluation de cette qualité, par simulation ou par analyse des propriétés de l'opérateur faisant passer des profils atmosphériques aux luminances mesurées par Iasi.

Cette évaluation a fait l'objet de nombreuses études à l'intérieur du groupe de travail scientifique de Iasi ; les résultats obtenus, bien que présentant une certaine variabilité, s'accordent pour conclure que les profils de température déterminés par Iasi auront, dans la troposphère, une qualité sensiblement meilleure que la spécification de 1 K pour une résolution verticale de 1 km (dans le cas de mesures en l'absence de nuages). La figure 16 montre ainsi le profil d'erreur sur la température calculé par Cassé et Prunet (2000). De la même façon, Cassé et Prunet ont évalué la précision de la restitution du profil d'humidité et confirmé que la qualité sera conforme, en dessous de 500 hPa, à la spécification de 10 % pour une résolution verticale de 1 km (figure 17).



◀ Figure 16 - Erreur absolue de restitution du profil de température atmosphérique par Iasi, pour une résolution verticale de 1 km. (D'après Cassé et Prunet, 2000)

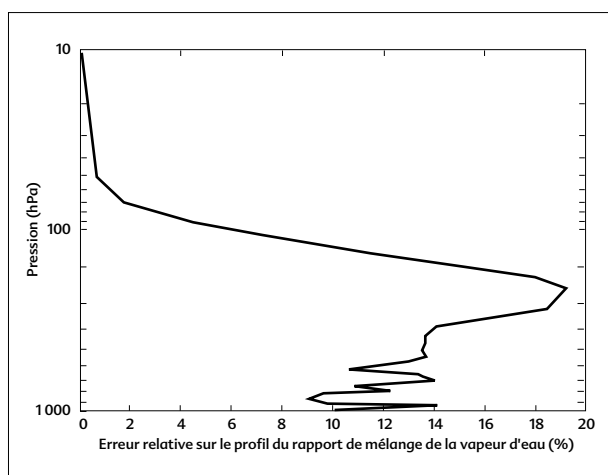


Figure 17 - Erreur relative de restitution du profil du rapport de mélange de la vapeur d'eau par Iasi, pour une résolution verticale de 1 km. (D'après Cassé et Prunet, 2000)

Il faut noter que les outils d'évaluation fournissent une image un peu optimiste de la situation car, reposant en général sur des outils linéaires d'estimation, ils ne prennent pas en compte les biais instrumentaux ou ceux des modèles de transfert radiatif utilisés. Ces biais peuvent théoriquement être estimés, mais cela demandera de longues séries de données et des efforts importants de la part de la communauté des utilisateurs.

Un autre point beaucoup plus difficile concerne l'influence de la présence de nuages et l'apport de l'emploi simultané des sondeurs micro-ondes. Les travaux menés à l'intérieur du groupe scientifique de AIRS, travaux transposables à Iasi, semblent montrer qu'au prix d'un effort important de modélisation des nuages, tant dans le domaine infrarouge que dans celui des micro-ondes, la qualité des profils obtenus en situation partiellement nuageuse pourrait, elle aussi, respecter les spécifications.

Cela étant, il demeure difficile de quantifier l'effet de cette amélioration du système d'observation sur la qualité des prévisions météorologiques. Les méthodes adaptées à l'examen de cette question, à savoir les expériences de simulation de systèmes d'observation, nécessitent de simuler les mesures pendant une période relativement longue et, surtout, requièrent une maquette représentative des logiciels de restitution des profils à partir des données. La réalisation d'une telle expérience est en cours, dans le cadre du groupe de travail scientifique de Iasi, mais elle n'aboutira que d'ici à deux ans.

Plus ponctuellement, Prunet et al. (1998) ont essayé de comprendre comment Iasi permettrait d'éviter des erreurs majeures de prévision du temps ; ils montrent, dans le cas de la tempête Floyd (12-13 septembre 1993), que Iasi aurait permis de remédier, avec une bonne précision, au défaut de connaissance de l'état initial à l'origine de cette mauvaise prévision.

Pour conclure sur les performances géophysiques et tempérer un peu l'impression d'exercice purement mathématique, on rappellera que les outils de simulation utilisés pour Iasi ont été appliqués aux sondeurs existants, d'abord HIRS mais aussi HIS (*High spectral resolution Interferometer Sounder*), beaucoup plus proche de Iasi, ce qui permet d'avoir une bonne confiance dans ces prévisions de performances.

CALENDRIER DU DÉVELOPPEMENT DE IASI

L'une des caractéristiques des projets spatiaux est leur durée importante de développement. Dans le cas de Iasi, en Europe, les premières études exploratoires du concept d'interféromètre de sondage ont été menées en 1988 en Italie, à l'initiative de B. Bizzari, dans le cadre de l'appel à idées de l'Agence spatiale européenne, qui préparait la charge utile de la plate-forme *Poem*⁽¹⁾. À la même époque, à Agde, le séminaire de prospective du Cnes insistait sur la priorité d'une mission de sondage infrarouge à haute résolution. Des négociations entre le Cnes et l'Agence spatiale italienne (ASI) aboutirent, début 1990, à la décision de mener en commun une étude de faisabilité (phase A), qui dura un an et conclut à la faisabilité du concept Iasi en juin 1991.

La fin de l'année 1991 vit le passage à l'étude de définition préliminaire (phase B), toujours en coopération entre le Cnes et l'ASI. C'est à ce moment que l'industrie commença à être impliquée dans le projet et que débutèrent les maquettes de systèmes critiques. Les indécisions sur le programme, associées à des difficultés financières à l'ASI, retardèrent l'étude des sous-systèmes de responsabilité italienne. La revue de définition préliminaire – le terme de la phase B – eut lieu de façon échelonnée : en juin 1994 pour le système et les sous-systèmes sous la responsabilité du Cnes, en décembre 1994 pour les sous-systèmes sous responsabilité italienne.

L'étape suivante fut marquée par des incertitudes sur le programme, sa réorganisation suite à la défection de l'ASI pour des raisons budgétaires, puis la recherche de coopérations européennes aboutissant à une participation importante d'Eumetsat. Du

(1) Le projet *Poem* de plate-forme spatiale opérationnelle consacrée à la météorologie et à l'environnement, projet de l'Agence spatiale européenne, fut séparé en deux et aboutit aux satellites *Envisat* et *Metop*.

point de vue technique, outre la reprise des phases B des sous-systèmes initialement confiés à des industriels italiens, cette étape vit le transfert de la maîtrise d'œuvre du Cnes à Alcatel et aboutit, fin 1997, à une revue de définition préliminaire industrielle et à une proposition pour les phases de réalisation (phases C et D). L'année 1998 a été presque entièrement consacrée à la négociation du contrat avec le maître d'œuvre et à la sélection des sous-contractants, tout cela pour aboutir, fin novembre 1998, à la notification. La première tâche de ce contrat a permis de figer la configuration de l'instrument et la définition détaillée (phase C) est désormais en cours.

La livraison du premier modèle de vol de Iasi, pour intégration sur le satellite *Metop*, est prévue en 2002 pour un lancement en 2003. On voit que, dans le cas de Iasi, plus de treize ans seront nécessaires pour passer de l'idée de départ à un instrument en opération. Certes, les incertitudes sur le programme ont retardé le projet de trois ou quatre ans, mais, en l'absence de ces retards, le développement de Iasi aurait quand même duré dix ans.

CONCLUSION

Comme pour tout projet novateur, les conclusions définitives ne pourront être tirées qu'après son aboutissement. Au stade actuel, on peut dire que l'on a une bonne confiance dans la capacité de l'instrument Iasi à fournir des profils atmosphériques de température et d'humidité avec la précision spécifiée. Les difficultés du développement instrumental sont maîtrisées les unes après les autres et, avec des hauts et des bas, les performances instrumentales prévues se stabilisent à un niveau respectant presque complètement les spécifications. Enfin, d'un point de vue plus personnel, malgré sa durée, la participation à un tel projet laisse fort peu de place à l'ennui.

BIBLIOGRAPHIE

Cassé V. et P. Prunet, 2000 : Communication personnelle.

Gillet M., 1995 : Les nouveaux programmes européens de satellites météorologiques. *La Météorologie* 8^e série, 11, 10-35.

Pailleux J., 1996 : Impact des mesures satellitaires sur la prévision numérique. *La Météorologie* 8^e série, 15, 5-18.

Pastre C., 1996 : La construction de l'Europe météorologique. *La Météorologie* 8^e série, 15, 53-59.

Prunet P., J.-N. Thépaut et V. Cassé, 1998 : The information content of clear sky IASI radiances and their potential for numerical weather prediction. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 124, 211-241.

POUR EN SAVOIR PLUS

Sur le transfert radiatif dans l'atmosphère et la spectroscopie des gaz atmosphériques

Goody R. M. et Y. L. Yung, 1989 : *Atmospheric radiation; Theoretical basis*. 2nd édition, Oxford University Press, Oxford, 438 p.

Sur le problème d'inversion

Chédin A., 1990 : Les modèles d'interaction rayonnement-atmosphère et la détermination de paramètres météorologiques et climatologiques à partir d'observation satellitaires. Dans *Téledétection spatiale : aspects physiques et modélisation*, Cepadues-Edition, Toulouse, 485-518.

Sur l'interféromètre de Michelson

Griffiths P. R. et J. A. de Haseth, 1986 : *Fourier transform infrared spectroscopy*. John Wiley & Sons, New York, 656 p.

Sur les satellites en météorologie

Kidder S. Q. et T. H. Vonder Haar, 1995 : *Satellite meteorology; an introduction*. Academic Press, San Diego, États-Unis, 466 p.

