

PROGRAMME NATIONAL DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE DANS LE
DOMAINE DE LA TELEDETECTION SPATIALE

Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique

Contrat TELSAT/II/13/3

Rapport Final

P.C. SIMON et D. BOLSEE

Table des matières:

Résumé	2
Abstract	3
1. Objectifs	4
1.1. Objectifs généraux	4
1.2. Objectifs spécifique	4
2. Synthèse bibliographique	5
2.1. Instrumentation	5
2.2. Corrections dues à l'atmosphère	6
3. Methodologie	7
3.1. Disperseur	7
3.2. Qualité de l'optique	7
4. Choix des optiques du spectroradiometre	7
4.1. Objectif du type Petzval	7
4.2. Solution intermédiaire	8
4.3. Utilisation d'un double simple	8
4.4. Utilisation d'une lentille simple	8
5. Solutions possibles relatives au choix de l'optique	8
5.1. Solution 4.1. : objectif du type Petzval	8
5.2. Solution 4.2. et 4.3.	10
5.3. Optique frontale	10
5.4. Conclusions relatives au choix de l'optique	10
6. Etude de l'optique Petzval simplifiée	11
6.1. Design optique	11
6.2. Discussion	13
7. Utilisation d'un spectrographe Czerny-Turner à champ plan	13
8. Caractérisation du spectroradiometre	17
8.1. Etalonnage en longueur d'onde	17
8.2. Etalonnage radiométrique	21
9. La mesure de la lumière dite Zenithale	21
10. Conclusions	25
11. Bibliographie	11

Résumé

L'objet du contrat TELSAT II/13/03 avec l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique consistait en l'étude et la réalisation d'un spectroradiomètre aéroporté, pour l'observation de la luminance du sol dans l'infrarouge, entre 1,2 et 3,5 μm , avec une résolution spectrale de 0,1 μm et une résolution spatiale de 10 m². Ce spectroradiomètre devait s'intégrer avec un détecteur CCD préalablement défini, de 8 mm de long, comprenant 256 pixels. De plus la distance entre le détecteur et la fenêtre en quartz du boîtier était fixée à 40 mm. L'ouverture optique de l'instrument devait être de F/2 compte tenu des performances radiométriques prévues du spectroradiomètre et de son détecteur. Plusieurs solutions basées sur un optique réfractive, vu l'ouverture demandée, et sur l'utilisation d'un prisme comme disperseur ont été étudiées. Une solution basée sur une optique de Petzval répondait aux spécifications demandées, mais n'a pas été retenue pour des raisons budgétaires.

Finalement, vu les difficultés rencontrées pour les autres solutions, un spectrographe à réseau du type Czerny-Turner croisé, ouvert à F/4, a été modifié pour pouvoir être utilisé avec un prisme. Le boîtier du détecteur a dû également être modifié pour être compatible avec les caractéristiques du spectrographe qui ne pouvaient pas être changées.

Les performances optiques et les résultats de l'étalonnage radiométrique du spectroradiomètre avec le détecteur CCD déterminés au laboratoire sont finalement présentés.

Abstract

The "Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique" was asked in the frame of the contract TELSAT II/13/03, to design and to built an airborne spectroradiometer for ground radiance observation in the infrared, between 1.2 and 3.5 μm , with a spectral resolution of 0.1 μm and a spatial resolution at the ground of 10 m². This spectroradiometer had to fit the characteristics of a CCD detector already defined, of 8 cm long, with 256 pixels. In addition the back focal of the instrument should have minimum 40 mm in order to be compatible with the housing of the CCD. The speed of the spectroradiometer according to the predicted radiometric sensitivity of the instrument should be as large as possible, preferably F/2.

Several solutions have been studied, based upon refractive optics due to the requested high speed of the system and using a prism as dispersive element. One solution based upon Petzval optics met the required specifications but was not kept of because budget limitations. Finally, due to the difficulties encountered with the alternative solutions, a crossed Czerny-Turner grating spectrograph, with a speed of F/4, has been modified to be used with a prism. The detector housing was also modified in order to fit the back focal of the spectrograph which cannot be changed.

The instrument characteristics and radiometric calibration results performed in the laboratory with the CCD are presented.

1. OBJECTIFS

1.1. Objectifs généraux

Les objectifs scientifiques généraux du projet ont été définis par la Station de Phytopathologie dans sa note préliminaire communiquée en septembre 1990. Ils se sont traduits par des spécifications instrumentales pour le spectroradiomètre dont la construction incombait à l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB). De plus, le "Interuniversitair Micro-Elektronica Centrum" (IMEC) avait pour tâche de fournir un détecteur infrarouge avec un cryostat dont les caractéristiques physiques étaient préalablement définies. Le spectroradiomètre devait donc impérativement tenir compte de l'ensemble de ces paramètres pour la définition de l'optique et de l'interface mécanique.

1.2. Objectifs spécifiques

Le domaine spectral de 1,2 à 3,5 μm a été défini pour répondre aux objectifs généraux. La limite supérieure est essentiellement due au fait qu'à partir de cette longueur d'onde, l'émission thermique de la Terre devient prédominante par rapport à la luminance du sol, et que le détecteur présente une chute de sensibilité. Une bande passante de 1 μm a été demandée pour le spectroradiomètre. Le spectre formé sur la surface du détecteur doit être à champ plan sur une longueur de 8 mm maximum qui correspond à la dimension du détecteur proposé par IMEC. Ce détecteur du type "Charged Coupled Device" (CCD) comporte 256 pixels de 30 μm de hauteur et de 18 μm de largeur. L'espace mort entre chaque pixel est d'environ 10 μm . La surface sensible du CCD était placée 40 mm en retrait de la fenêtre optique du boîtier du détecteur.

Compte tenu, des résultats des premières estimations radiométriques, il avait été demandé de développer une instrumentation ouverte à F/2. Le champ de vue est fixé par la surface élémentaire de 10 m² devant être analysée par le spectroradiomètre à une altitude de 1000 à 1500 m. Il est donc nécessaire de prévoir une optique frontale formant une image de la parcelle observée, sur la fente d'entrée.

2. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1. Instrumentation

Dès le début des années 1980, la spectroscopie à moyenne résolution de la surface terrestre a été développée pour l'étude des minéraux et des végétaux, afin de compléter et vérifier les observations à large bande spectrale réalisées par Landsat avec le "Multispectral Scanner" (MSS) et le "Thematic Mapper" (TM).

Aux longueurs d'onde supérieure à 1000 nm, d'importantes absorptions atmosphériques dues principalement à la vapeur d'eau et au dioxyde de carbone sont encore présentes. Les minéraux ont des spectres de réflexion avec plusieurs structures permettant leur identification. Pour les végétaux, les structures sont moins prononcées (Goetz and Rowan, 1981; Goetz et al., 1983).

Le premier spectromètre pour avion a été développé par la compagnie "Geophysical Environmental Research" (GER) et décrit par Chiu et Collins (1978). Il couvrait le domaine visible et infrarouge de 400 à 2500 nm.

Le premier spectromètre imageur pour avion (AIS) a été développé au début des années 1980 au Jet Propulsion Laboratory (JPL) par Vane et al. (1984). Les premières images ont été acquises dès la fin 1982. Cet instrument est basé sur un détecteur IR à multi-éléments, à 2 dimensions. Son domaine de longueur d'onde s'étend de 1200 à 2400 nm, avec une bande passante de l'ordre de 100 nm. Une deuxième version, (AIS-2) couvrant le domaine de longueur d'onde de 800 à 2400 nm, a été réalisée en 1985 (LaBaw, 1987). La comparaison des performances des 2 spectromètres est donnée par Vane (1986).

Un senseur plus puissant a été développé au JPL sur base de acquis des 2 premières spectromètres imageurs. Les observations avec le Airborne Visible / Infrared Imaging Spectromtre (AVIRIS; Vane, 1987) ont débuté en 1987. Son domaine spectral s'étend de 400 à 2450 nm. La résolution spatiale au sol est de 10 à 30 m. Il sert aux études en botanique, géologie, hydrologie et océanographie. Pour une altitude de vol de 3 à 3,2 km, la résolution spatiale est de 415 m suivant la dimension perpendiculaire à la direction de vol et de 6,3 m pour la dimension de l'élément du détecteur.

Deux instruments ont été développés par l'industrie :

- le "Geoscan Advanced Multi-spectral Scanner" (AMSS, Australie) qui a volé en 1988. Son domaine de longueur d'onde s'étend de 500 à 11500 nm (Lyon et Honey, 1990).
- La "Geophysical Environmental Research Imaging Spectrometer II (GER II, USA) qui a volé en 1987. Il couvre le visible et l'infrarouge (400 - 2500 nm).

D'autre part, plusieurs spectroradiomètres visible pour avion ont été développés pour l'étude notamment du stress géochimique des végétaux (Chang et Collins, 1983).

Ces instruments ont nécessité le développement de nouvelles méthodes pour l'extraction et l'assimilation des données (Goetz et al., 1985). Plusieurs références concernant ces problèmes sont données dans la liste bibliographique reprise à la fin de ce document.

2.2. Corrections dues à l'atmosphère

L'influence de l'atmosphère sur le signal mesuré est essentiellement due aux absorptions par la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone et à l'extinction due aux aérosols, les brumes et les nuages.

Un modèle atmosphérique comme le LOWTRAN 7 (Kneizys et al., 1988) peut être utilisé pour corriger la mesure des effets des constituants atmosphériques. La vapeur d'eau et les aérosols présentent des variations temporelles importantes. De ce fait, des mesures complémentaires au sol permettant de caractériser l'atmosphère au moment des observations ont été définies dans le cadre de campagnes d'étalonnage du spectromètre AVIRIS.

Les paramètres observés sont les épaisseurs optiques dans le visible et le proche infrarouge, permettant de caractériser les aérosols et de déterminer la vapeur d'eau, le spectre solaire direct, et les données obtenues par radiosondage. Des hygromètres ont été également utilisés.

Un instrument portable développé à cette fin, le "Portable Instant Display and Analysis Spectrometer" (PIDAS) a été développé (Goetz, 1987) pour la caractérisation d'une surface prise comme référence, à partir de mesure effectuée au sol.

Outre le code LOWTRAN, des algorithmes ont été développés pour calculer l'éclairement solaire au niveau du sol pour des conditions atmosphériques sans nuage. Le modèle de Leckner (1978) permet de calculer les transmissions dans l'infrarouge jusqu'à 4000 nm. Il tient compte des absorptions due au dioxyde de carbone et de l'oxygène, considéré comme étant en mélange uniforme dans la troposphère, et de la quantité d'eau précipitable. Des tables avec les coefficients d'absorption utilisés dans l'algorithme sont fournies. Il faut ajouter l'extinction due aux aérosols, en tenant compte du paramètre de turbidité qui peut être déterminé suivant l'équation proposée par McClatchey and Selby (1972).

D'autre part, les observations effectuées par le spectromètre AIS-2 ont été corrigées en utilisant une technique dite de normalisation (Conel, 1985; Ustin et Rock, 1985). Des techniques basées sur l'étalonnage ou le rapport des valeurs mesurées avec celle de cibles préalablement caractérisées ont été développées par Roberts et al. (1986) et Elvidge (1988).

3. METHODOLOGIE

Etant donné la vitesse au sol de l'avion (30 m/sec) et la résolution spatiale demandée, le temps d'intégration ne pouvait pas dépasser 333 msec. Il était donc exclu durant ce temps de faire un balayage spectral. Il a fallu de ce fait définir un spectroradiomètre à disperser fixe. Le problème du balayage spatial latéral est également difficile à effectuer durant ce temps. Il a été décidé de commun accord de ne pas le considérer dans le cadre de ce projet.

La détermination des paramètres optiques a été essentiellement guidée par les points suivants :

3.1. disperser :

La résolution spectrale peut être atteinte par un prisme en CaF_2 . Ce matériau convient parfaitement pour le domaine spectral demandé (1,2 à 3,5 microns). Il faut cependant rappeler que la dispersion d'un spectromètre à prisme n'est pas constante en fonction de la longueur d'onde. Par contre, l'utilisation d'un prisme évite le problème la superposition des ordres de diffraction rencontré avec les réseaux.

3.2. Qualité de l'optique :

Du fait de s'attendre à chromatique l'ouverture importante du faisceau, il faut un niveau élevé d'aberrations sphérique et chromatique. Afin de minimiser autant que possible ce problème, il est préférable d'utiliser des optiques suivant un angle d'incidence proche de la normale (sur l'axe optique). En conséquence, le montage classique consistant à placer la fente au foyer d'un collimateur, le détecteur au foyer d'un objectif et le prisme entre les deux (figure 1) est le mieux adapté au problème.

4. CHOIX DES OPTIQUES DU SPECTRORADIOMETRE

4.1. Objectif du type Petzval

C'est la solution classique pour les objectifs à grande ouverture. Le principe de cet objectif consiste à utiliser deux doublets de manière à minimiser l'angle d'incidence sur les surfaces, en appliquant la règle de l'équipartition des puissances entre ces deux doublets.

4.2. Solution intermédiaire

Une solution intermédiaire pourrait consister à reprendre le principe d'équipartition des puissances et à n'utiliser que des lentilles simples. Un tel système aboutirait logiquement à un ensemble de deux ou trois lentilles comprenant un plan convexe en entrée et un ou deux ménisques. Cette solution devrait permettre de corriger relativement bien l'aberration sphérique. Le problème du chromatisme devrait quant à lui pouvoir être résolu partiellement en inclinant le détecteur. Il ne resterait dès lors que les aberrations de champ.

4.3. Utilisation d'un doublet simple

L'utilisation d'un doublet corrigé de l'aberration sphérique devrait permettre d'obtenir une image correcte pour une longueur d'onde donnée. Le chromatisme des optiques réfractives devrait pouvoir être corrigé au premier ordre en inclinant transversalement le détecteur linéaire.

4.4. Utilisation d'une lentille simple

Ce type de lentille n'est pas corrigé pour les aberrations. Les performances d'une telle solution doivent de ce fait être très médiocres. Ceci est confirmé par le calcul du "spot diagram" à 1,2 micron, pour une ouverture à $f/4$, l'aberration donnant une tache allant jusqu'à 600 microns de diamètre, ce qui est incompatible avec les spécifications demandées.

5. SOLUTIONS POSSIBLES RELATIVES AU CHOIX DE L'OPTIQUE

Excepté pour la solution 4.4 mais qui ne rencontre pas la demande en résolution spatiale et spectrale, les autres solutions requièrent des études spécialisées pour la conception du spectroradiomètre.

5.1. Solution 4.1. : objectif du type Petzval

Afin de minimiser les délais, un objectif commercial a été recherché. La seule réponse a été fournie par la société DIAP (Diversified Optical Limited, Suffolk, England). Il s'agit d'un objectif avec les caractéristiques suivantes :

focale : 100 mm
 ouverture : F/2
 champ : 4°
 transmission : 80%

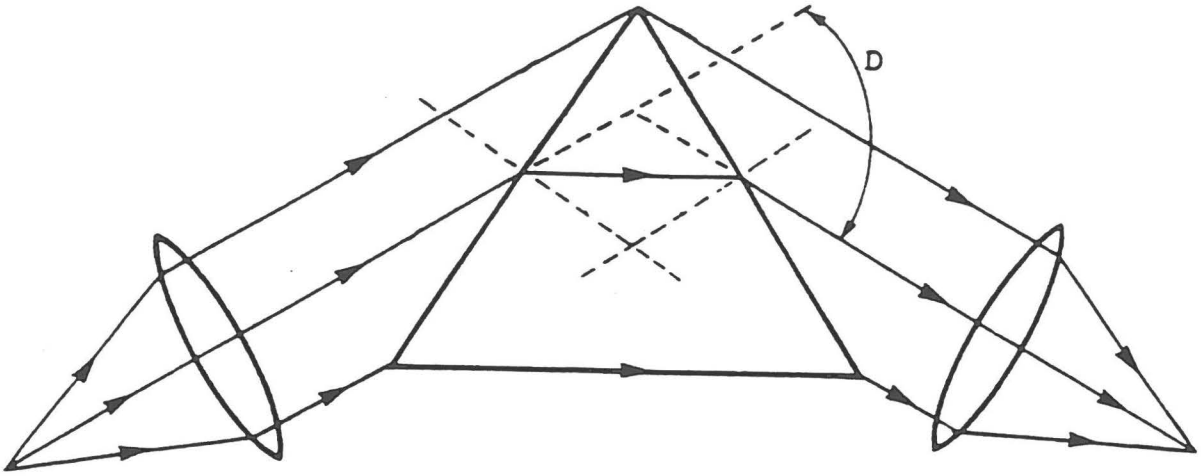


Fig. 1. Schéma d'un spectromètre à prisme.

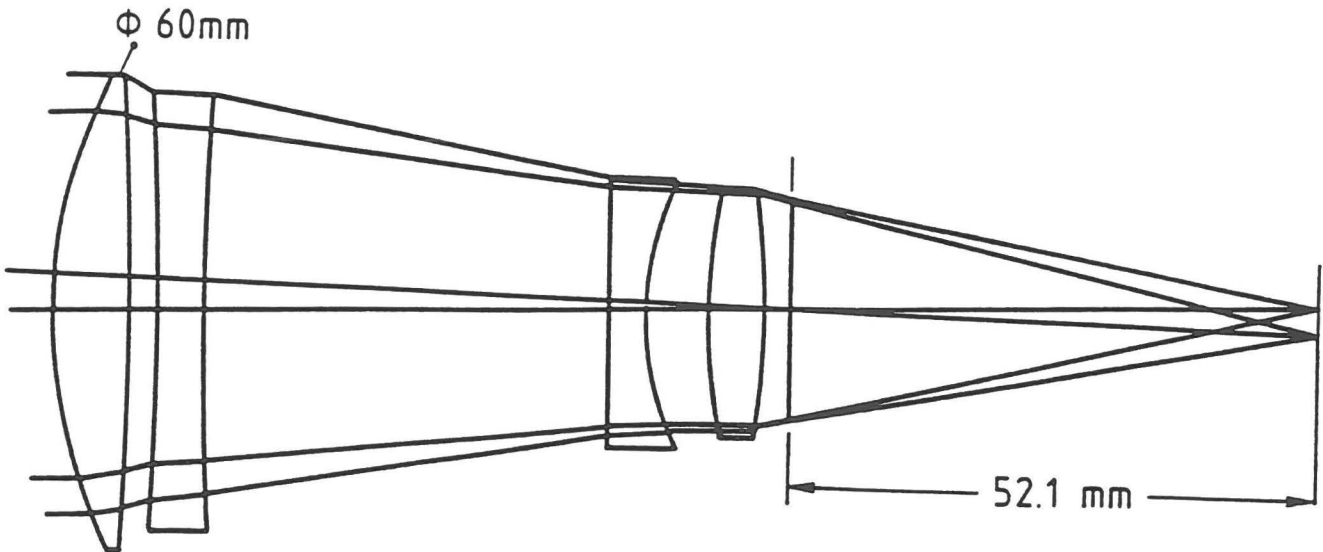


Fig. 2. Objectif de Petzval ouvert à $F/2$

Le tirage de l'optique de 52,1 mm est compatible avec l'encombrement du détecteur.

Le schéma est donné en figure 2.

5.2. Solutions 4.2 et 4.3

Dans les deux cas, une étude détaillée, calcul des aberrations, fonction de transfert de modulation, "spot diagram", doit être faite par un bureau d'études optiques. Il n'existe, à notre connaissance, aucune solution commerciale pour le domaine de longueur d'onde concerné. Après étude, il y a donc lieu de faire fabriquer les optiques spécifiques pour ces solutions.

Le firme ROS optics BV ont proposé deux solutions partielles pour le problème posé :

- un doublet $\text{SiO}_2/\text{CaF}_2$ limité à 3 microns avec une absorption due à H_2O à 2,7 microns. Ils doivent en faire l'étude et le fabriquer.
- un doublet ZnSe/Si pour le domaine 1,2-3,5 microns, avec multi-couche anti-réflexion. Cette proposition, qui demande une confirmation théorique quant à l'utilisation de la solution doublet simple, réduit le coût à environ 70.000 FB pièce, TVAC. Le délai de fabrication serait de 10 semaines minimum.

5.3. Optique frontale

Le choix de l'optique située devant la fente d'entrée du spectroradiomètre repose sur la même analyse faite pour l'optique de collimation et de focalisation décrite au point 3, avec les mêmes limitations.

5.4. Conclusions relatives au choix de l'optique

Vu le coût de l'optique proposée par la firme DIOP (2 x 19.000\$ + TVA) il a décidé, de commun accord avec les SPPS de sous-traiter une étude pour une optique répondant à la solution intermédiaire du type Petzval (solution 4.2) en utilisant une combinaison des lentilles simples disponibles sur le marché, afin de minimiser les coûts. Vu la complexité des calculs, ils ont été confiés à la firme SPACEBEL Instrumentation. Deux phases ont été définies afin de juger au terme de la première phase de la faisabilité de la solution sur base des calculs et des contraintes apportées par le chromatisme sur la position du détecteur par rapport au spectroradiomètre. La deuxième phase serait alors éventuellement réalisée.

6. ETUDE DE L'OPTIQUE PETZVAL SINPLIFIEE

Le domaine de longueur d'onde de 1,2 à 3,5 μm détermine le choix du matériau pour les lentilles du point de vue transmission et stabilité dans un environnement extérieur très variable. De plus, le coût des lentilles fabriquées avec des matériaux comme le ZnS et ZnSe est relativement élevé. Le choix a été limité au SiO_2 et au CaF_2 avec une préférence pour ce dernier qui présente une meilleure transmission.

6.1. Design optique

La solution proposée pour l'objectif et le collimateur avec une focale de 100 mm est présentée à la figure 3. Les caractéristiques fournies par SPACEBEL sont reprises au tableau 1. Le plan focal se situe 40 mm derrière la lentille n° 4 (back focal). Le "spot diagram" de l'optique complète (collimateur et objectif) est inférieur à 10 μm pour $\lambda = 1,2 \mu\text{m}$ et sur tout le champ (8 mm).

TABLEAU 1.-

n°	rayon	Epaisseur	Milieu	Dia (mm)
1	66.4	5.0	CaF_2	26.0
2	-78.3	5.8	AIR	26.0
3	-56.0	6.0	CaF_2	26.0
4	-165.5	31.0	AIR	26.0
5	23.08	5.0	CaF_2	26.0
6	55.8	7.87	AIR	26.0
7	23.72	5.0	CaF_2	26.0
8	12.56	40.0	AIR	26.0

La variation chromatique de 1,2 à 3,5 μm de la "back focal" est présentée à la figure 4. Elle implique, pour la corriger, que le détecteur soit incliné de 60° sur l'axe optique.

Pour l'optique frontale, le même schéma optique peut être utilisé, sa résolution angulaire étant de 4 mrad pour une focale de 100 mm ce qui est meilleure que la résolution demandée de 10 mrad.

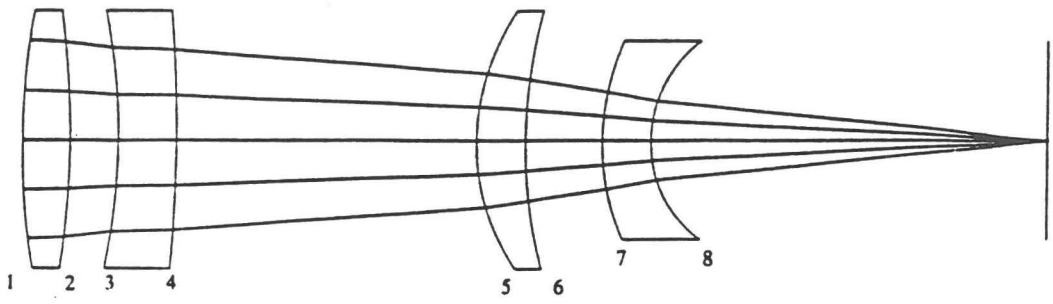


Fig. 3. Schéma optique proposé par SPACEBEL

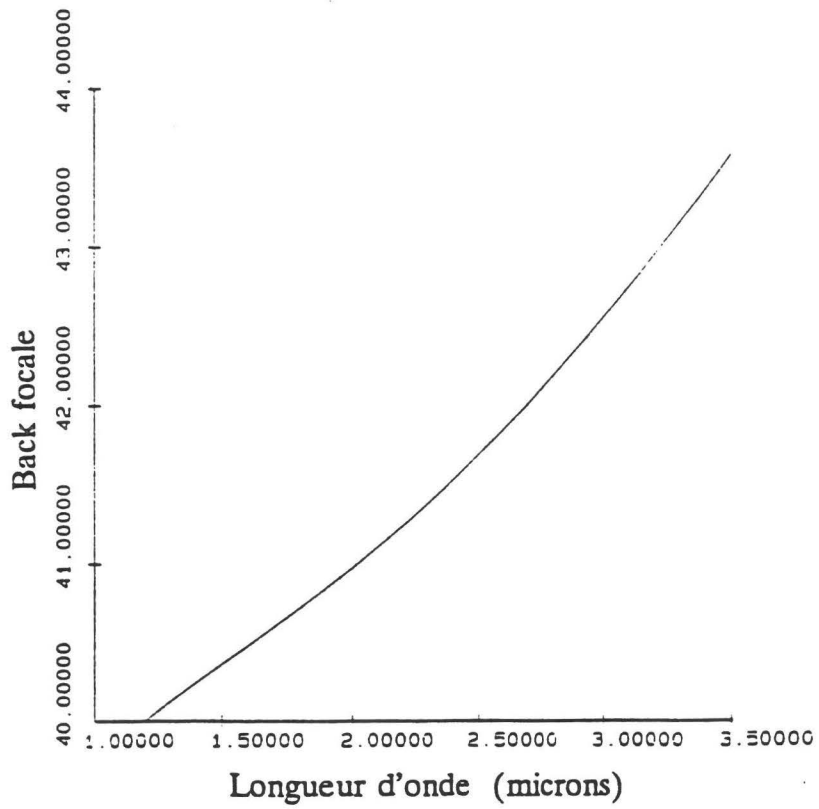


Fig. 4. Aberration chromatique de l'optique de la figure 3

6.2. Discussion

La correction des aberrations chromatiques par l'inclinaison du détecteur sur l'axe optique étant impossible pour des raisons optique et mécanique, la solution proposée à l'issue de la phase I de l'étude a dû être rejetée pour l'objectif et le collimateur du spectroradiomètre. Elle peut toutefois être retenue pour l'optique frontale.

7. UTILISATION D'UN SPECTROGRAPHE CZERNY-TURNER A CHAMP PLAN

Pour autant que la spécification sur l'ouverture numérique de l'instrument puissent être réduite de F/2 à F/4 et que les contraintes mécaniques du détecteur ("back focal") puissent être modifiées, nous avons alors proposé de modifier un spectrographe commercial à réseau, ayant une focale de 12,5 cm et utilisant des miroirs pour l'objectif et le collimateur corrigés pour les aberrations optiques, permettant d'obtenir un champ focal plan adapté pour des détecteurs à multiéléments de 18 mm x 2,5 mm. Les caractéristiques des miroirs ne sont pas fournies par le fabricant.

La modification consiste à remplacer le réseau par un prisme équilatéral en fluorine (CaF_2), couplé avec un miroir plan pour garder la compatibilité avec la géométrie du faisceau lumineux propre au spectrographe. Le réseau ne peut être utilisé vu la résolution trop importante dans l'infrarouge et le domaine de fréquence trop étroit couvert pour une position fixe du réseau.

Toute modification du design mécanique du spectrographe étant interdite sous peine de devoir redéfinir et calculer de nouveaux miroirs, la distance entre la surface du détecteur et l'interface mécanique de l'instrument doit être maintenue à 15

Une solution de modification du boîtier du détecteur a été proposée par IMEC, permettant d'approfondir l'étude de faisabilité de cette option.

Une étude théorique et expérimentale en laboratoire reproduisant la géométrie du spectrographe a été réalisée et a confirmé que la solution permettait de couvrir l'intervalle de longueur d'onde avec une dispersion acceptable.

La dispersion angulaire de la lumière se déduit des lois de l'optique géométrique pour la réfraction et la réflexion de la lumière par un prisme et un miroir.

Nous avons en outre choisi d'imposer une symétrie des chemins optiques associés à la double déviation du prisme, c'est-à-dire que les angles d'incidence et d'émergence seront identiques pour les deux traversées du prisme. Pour une longueur d'onde donnée, cette contrainte permet de déterminer la position adéquate du double disperseur par rapport au faisceau incident de manière à produire la déviation totale (D) de 26° imposée par la géométrie du spectrographe (voir figure 5).

On trouve pour $\lambda = 2 \mu\text{m}$:

$$\text{angle d'incidence (i)} = 33^\circ 30'$$

$$\begin{aligned} \text{angle entre la normale du miroir et la base du prisme } (\varphi) \\ = 16^\circ 27' \end{aligned}$$

Pour (i, φ) fixé, on calcule alors :

- à 1,2 micron

$$n = 1,4277 \qquad D = 26,8994$$

- à 3,5 microns

$$n = 1,4140 \qquad D = 30,3104$$

La différence de déviation vaut donc $3,4108^\circ$ entre 1,2 et 3,5 microns, ce qui correspond à une dispersion spectrale moyenne sur cette bande de $D_\lambda = 25,88 \text{ mrad/micron}$.

Les modifications mécaniques pour l'implantation du prisme et du miroir plan ont été réalisées sur base de ces études.

Les interfaces mécaniques, la plaque de base, l'interface avec le cryostat, le support principal pour l'ensemble des instruments (spectroradiomètre, Hasselblad, cryostat ont été également réalisés à l'IASB (voir figure 6).

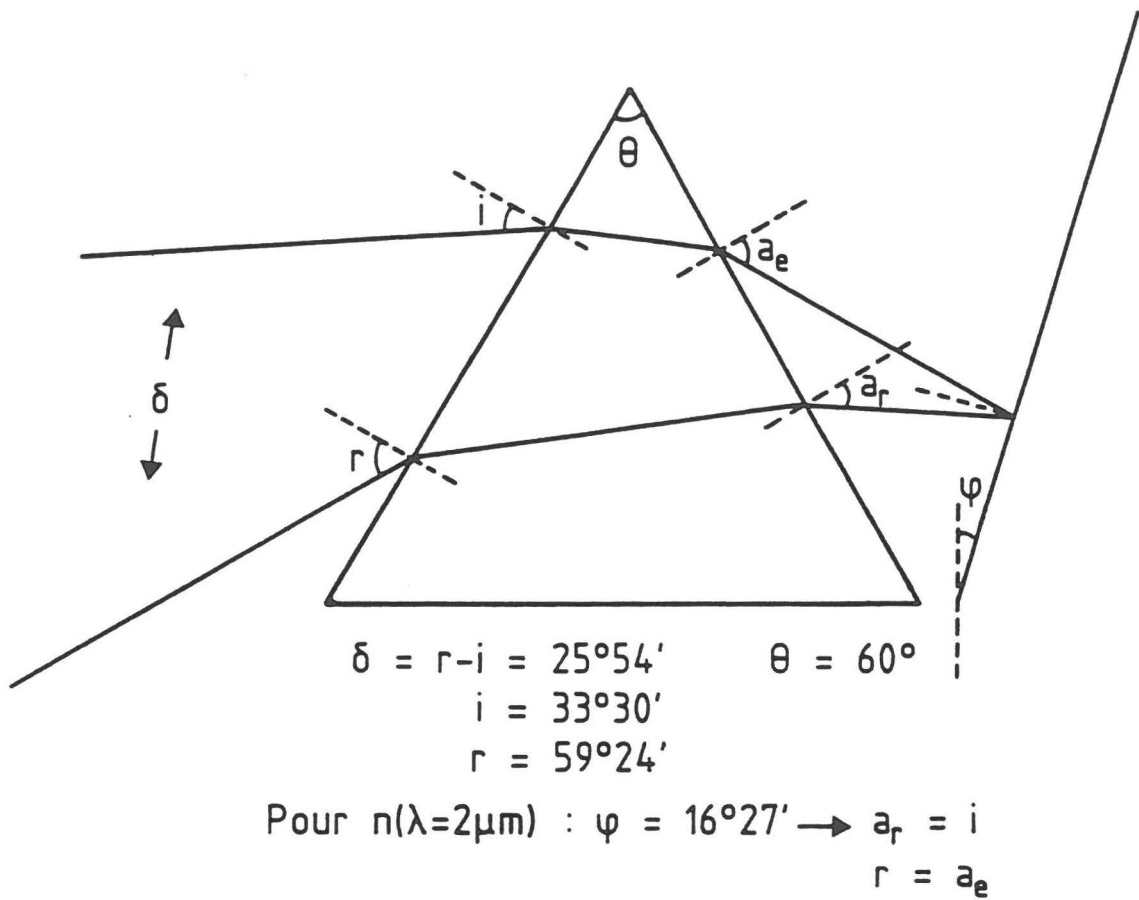


Fig. 5. Géométrie des rayons optiques liés au prisme disperser

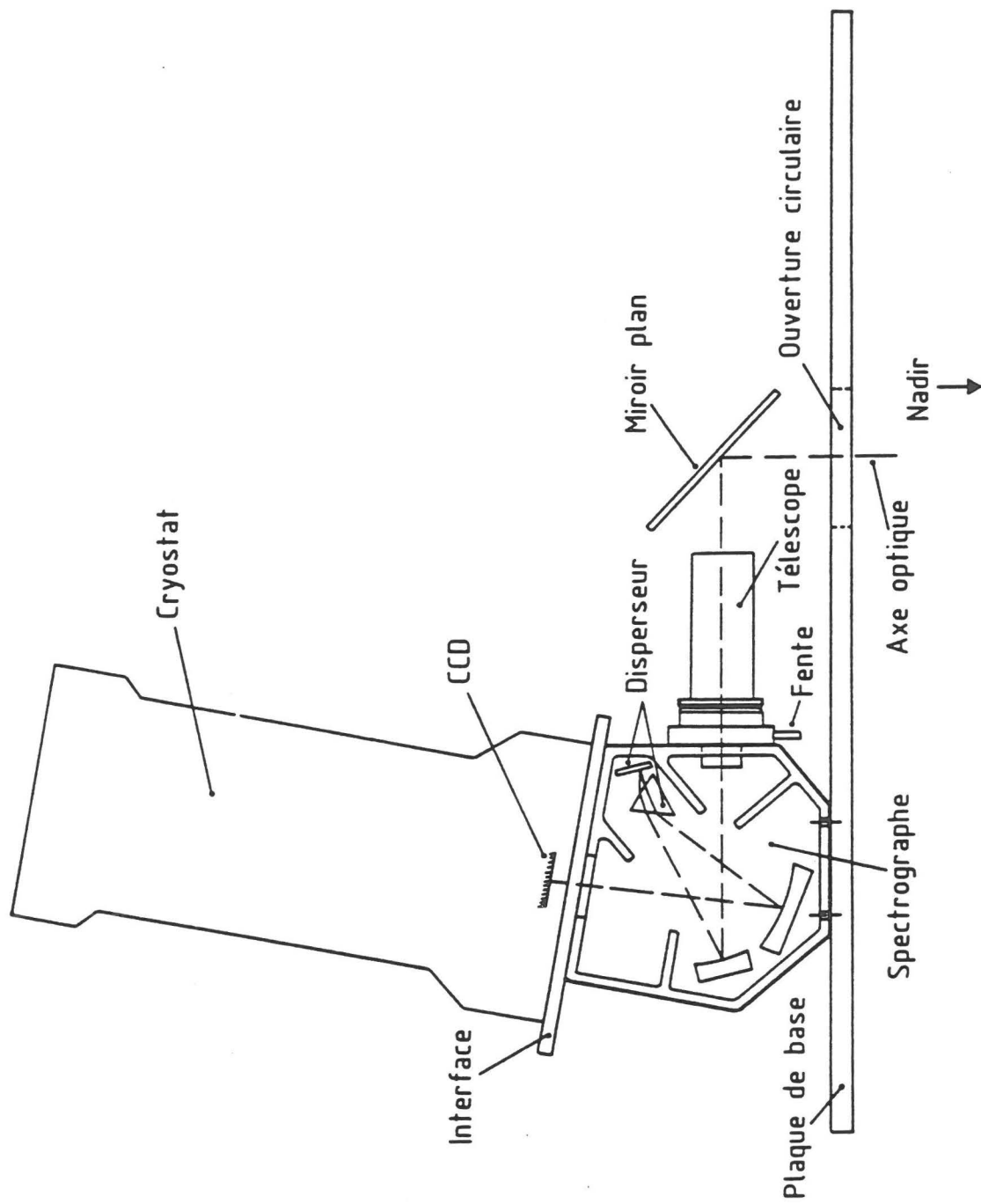


Fig. 6. Schéma d'ensemble du spectroradiomètre

8. CARACTERISATION DU SPECTRORADIOMETRE

Après les réglages optiques du spectroradiomètre et son intégration avec le détecteur, des essais ont été effectués avec différentes sources infrarouge. La fonction d'appareil à $1.2 \mu\text{m}$ a été mesurée à l'aide d'un filtre (figure 7). La figure 8 donne la dispersion angulaire calculée pour le prisme en fluorine, pour un intervalle de $0,1 \mu\text{m}$. La fonction instrumentale (largeur à mi-hauteur) entre $1,2$ et $2,6 \mu\text{m}$ est calculée à partir des résultats des figures 7 et 8 et est présentée à la figure 9. L'étalonnage en longueur d'onde a été réalisé ainsi qu'une analyse du taux de lumière parasite. Après que les problèmes de stabilité du détecteur et de l'électronique aient été résolus par IMEC, l'objectif d'entrée, après livraison par la firme SOPTEL, a été intégré et aligné. Un étalonnage préliminaire a pu être réalisé (avant la fin juin 1992) donnant la courbe de sensibilité de l'instrument en fonction de la longueur d'onde. Une étude du comportement du détecteur CCD a été réalisée : mesure du courant d'obscurité stabilité du signal,....

8.1. Etalonnage en longueur d'onde

La méthode utilisée pour l'étalonnage en longueur d'onde diffère sensiblement des procédures usuelles pour le rayonnement visible et ultra-violet. En effet, les sources spectrales utilisées en laboratoire ne génèrent pas de raies d'émission intenses entre $1,2$ et $3,5 \mu\text{m}$. Dès lors, pour assigner une longueur d'onde connue aux pixels du détecteur, nous avons utilisé une série de filtres passe-bande associée à une lampe d'émission continue, du type quartz-halogène à filament de tungstène.

D'autre part, l'optique géométrique permet de calculer la forme analytique de la fonction de dispersion du spectrographe. Pour pouvoir attribuer une longueur d'onde à tous les pixels du détecteur, nous avons ajusté par la méthode des moindres carrés, la fonction théorique de dispersion sur les points expérimentaux mesurés à l'aide des filtres. Les résultats de cette analyse sont illustrés à la figure 10. La figure 11 reprend l'échelle de longueur d'onde définitive comparée à celle obtenue après le premier vol de l'instrument, afin de démontrer sa stabilité optique.

Spectrographe TELSAT : fonction d'instrument

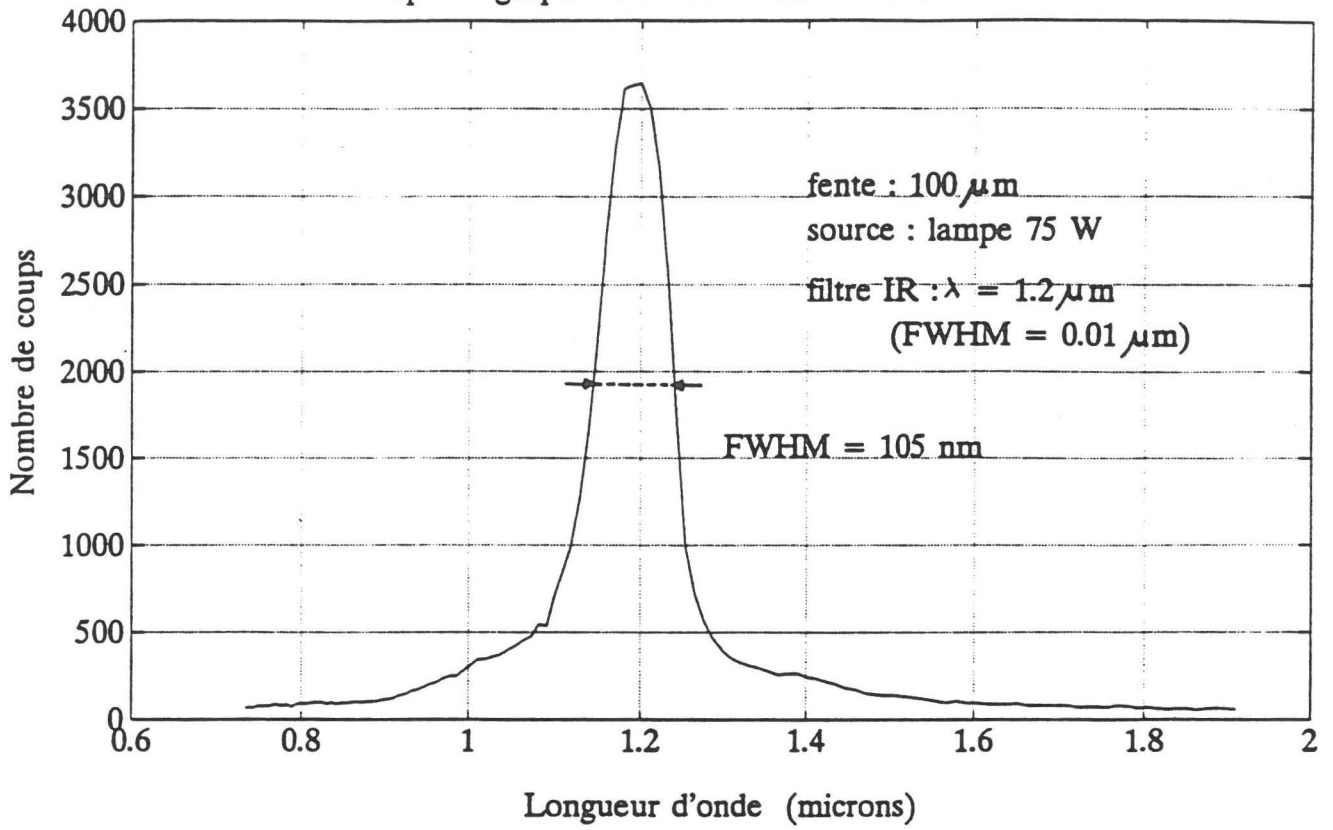


Fig. 7. Fonction d'appareil à 1,2 μm

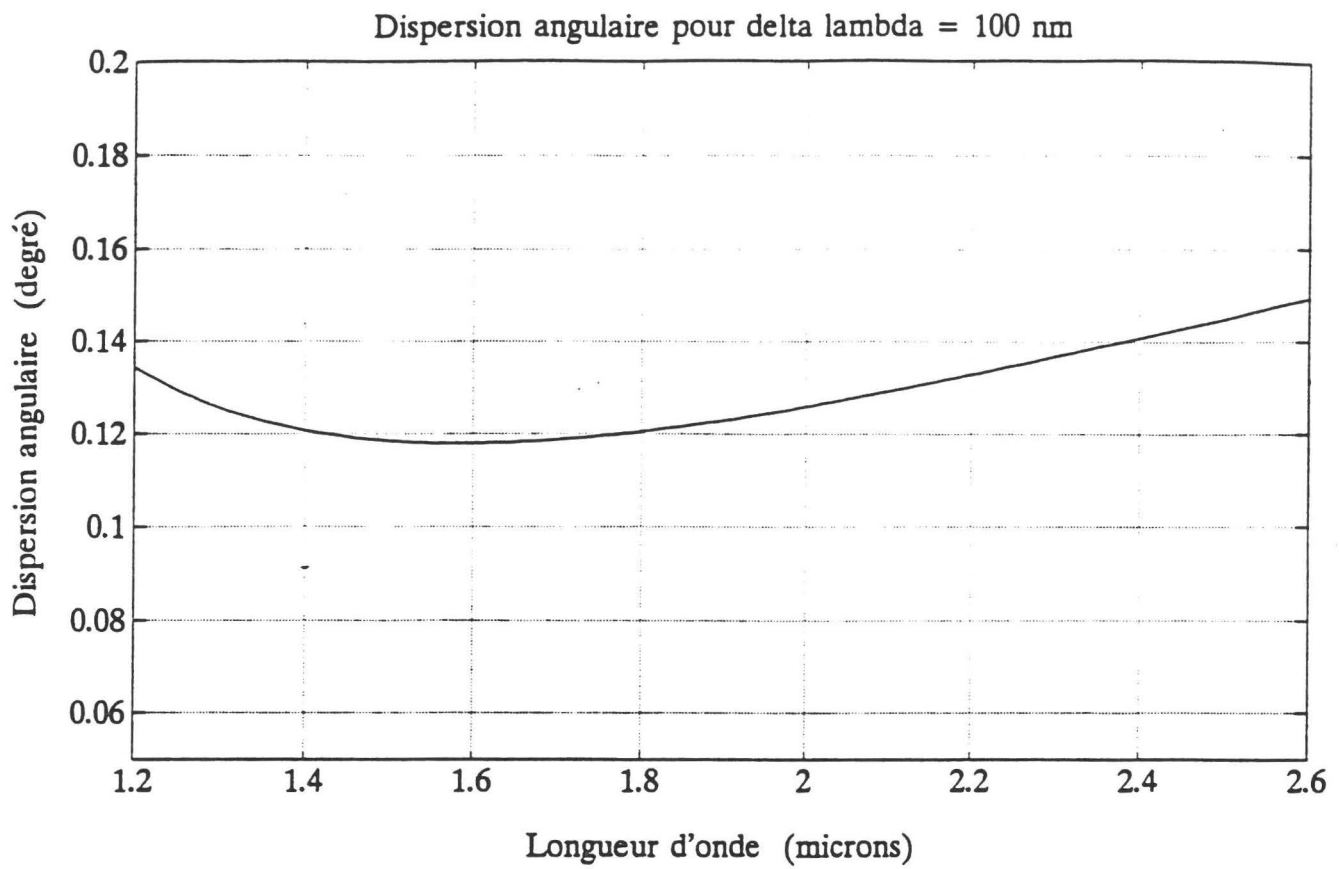


Fig. 8. Dispersion angulaire du prisme en fonction de la longueur d'onde

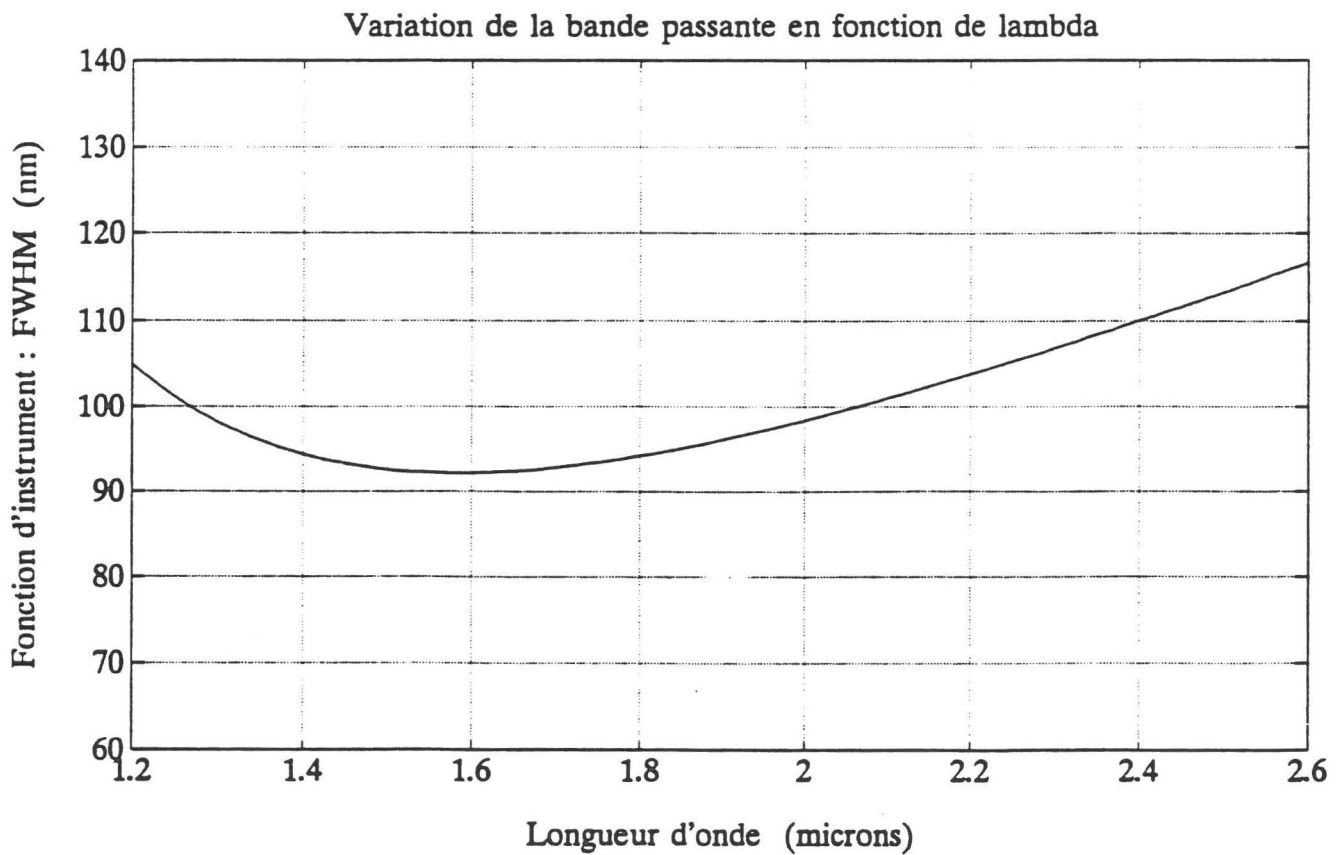


Fig. 9. Variation de la bande passante du spectrographe en fonction de la longueur d'onde

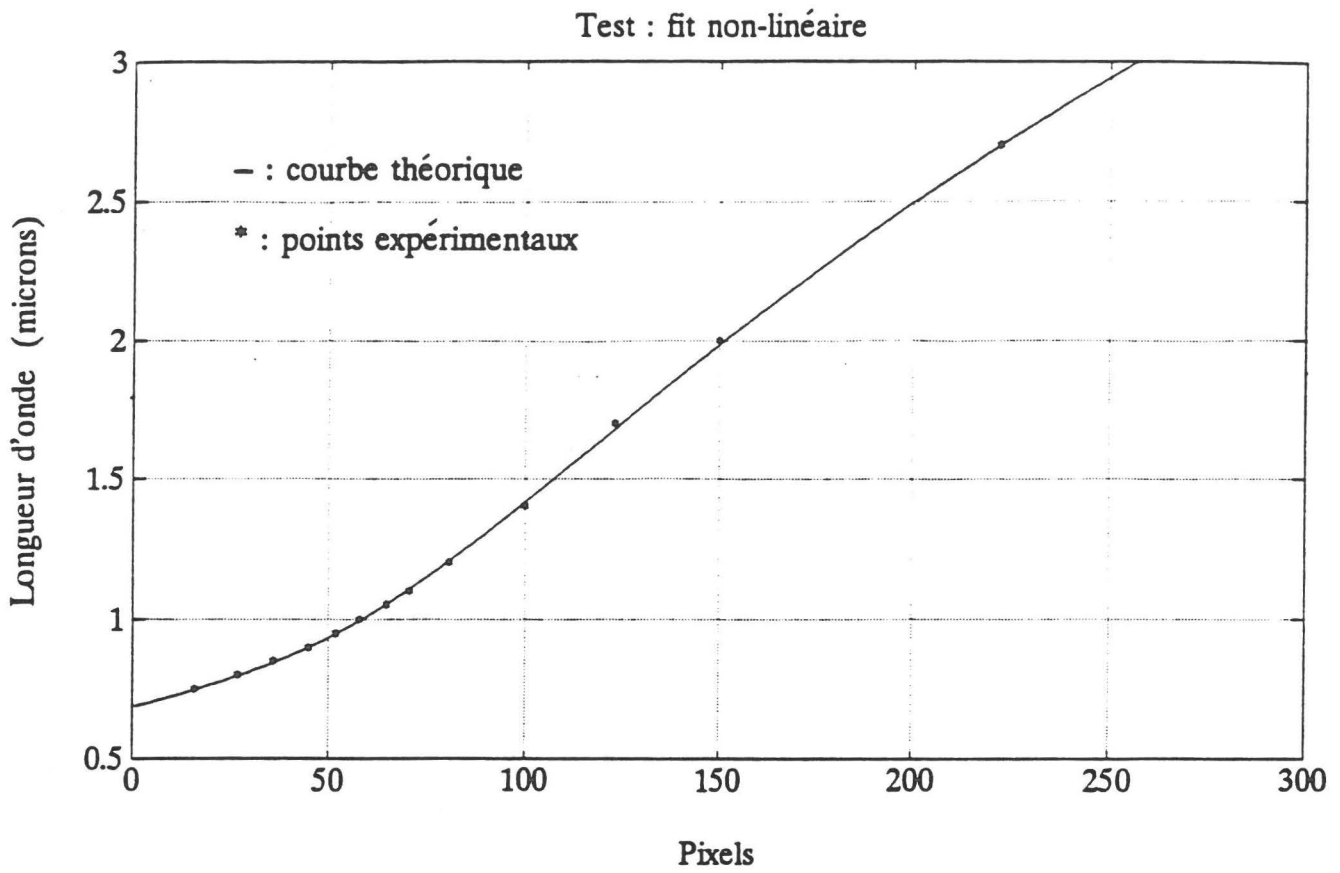


Fig. 10. Echelle de longueur d'onde préliminaire pour déterminer la fonction de dispersion

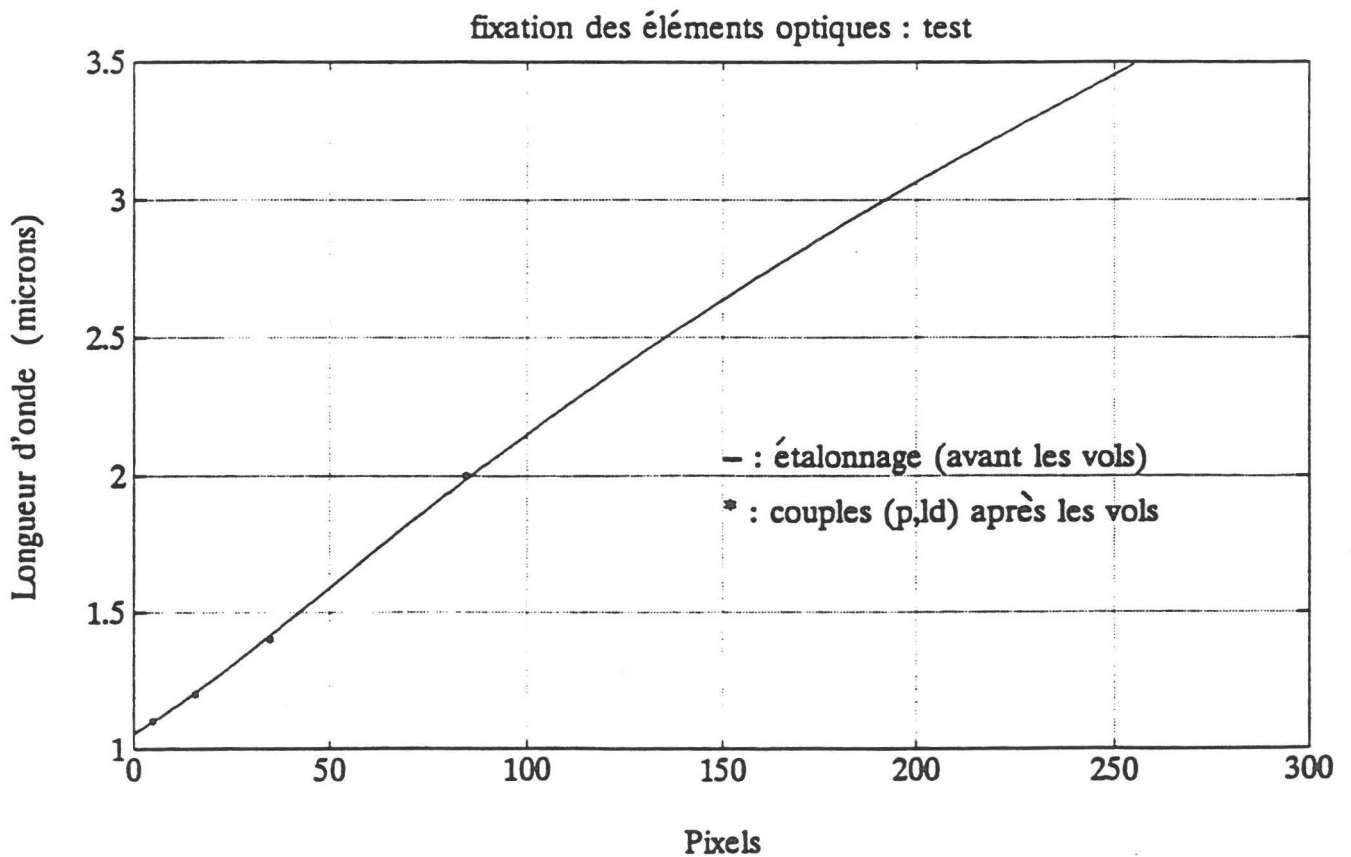


Fig. 11. Echelle de longueur d'onde définitive

8.2. Étalonnage radiométrique

Pour mesurer l'éclairement spectral du sol en unités absolues, il faut mesurer préalablement au laboratoire, la réponse $R\lambda$ de l'instrument (spectrographe + détecteur) pour un éclairement spectral $E\lambda$, et s'assurer de la linéarité du détecteur. La courbe de sensibilité du spectrographe correspond alors au rapport $R\lambda/E\lambda = S\lambda$. L'étalonnage a été réalisé en utilisant une lampe quartzhalogène à filament de tungstène de 1000 W étalonnée au NIST (National Institute for Science and Technology) jusqu'à 2,5 μm . Dans le domaine de l'infrarouge, l'émission d'un filament incandescent s'écarte peu de l'émission d'un corps noir. Nous avons donc extrapolé les données du NIST jusqu'à 3,5 μm à l'aide de la courbe théorique d'émission du corps noir.

Les courbes d'émission de la lampe et l'étalonnage du spectroradiomètre sont illustrées aux figures 12 et 13. L'étalonnage final de l'instrument a été réalisé en octobre 1992, après les dernières modifications de l'électronique du détecteur de vol par IMEC.

9. LA MESURE DE LA LUMIERE DITE ZENITHALE

Au cours du projet (fin février 1991), la mesure zénithale de l'éclairement solaire au niveau de l'avion simultanément aux mesures de luminance du sol dans l'intervalle spectral 1,2 - 3,5 μm a été demandée par la station de Phytopathologie. La justification est basée sur le fait que "les mesures obtenues (à partir de senseurs aéroportés) ne sont pas prises simultanément mais enregistrées séquentiellement. Lorsque l'on compare les valeurs de la luminance d'un endroit à l'autre de l'image, il devient essentiel de les corriger en fonction des changements de l'éclairement" (note du 11 mars 1992).

Différentes solutions techniques ont été proposées. Toutefois ce type de mesure soulève plusieurs problèmes physiques liés aux différentes géométries d'observation et aux propriétés de l'atmosphère (voir figure 14). Le point de vue de l'IASB peut être résumé de la manière suivante :

- la mesure se fait à bord de l'avion. Elle ne tient pas compte du double trajet optique entre l'avion et le sol, qui traverse les couches les plus denses et relativement variables du point de vue épaisseur optique. La correction des mesures de luminance sur ce double trajet optique requiert donc une modélisation de l'atmosphère et un calcul du transfert radiatif.

Interpolation de la fonction de Planck pour la lampe FEL 300

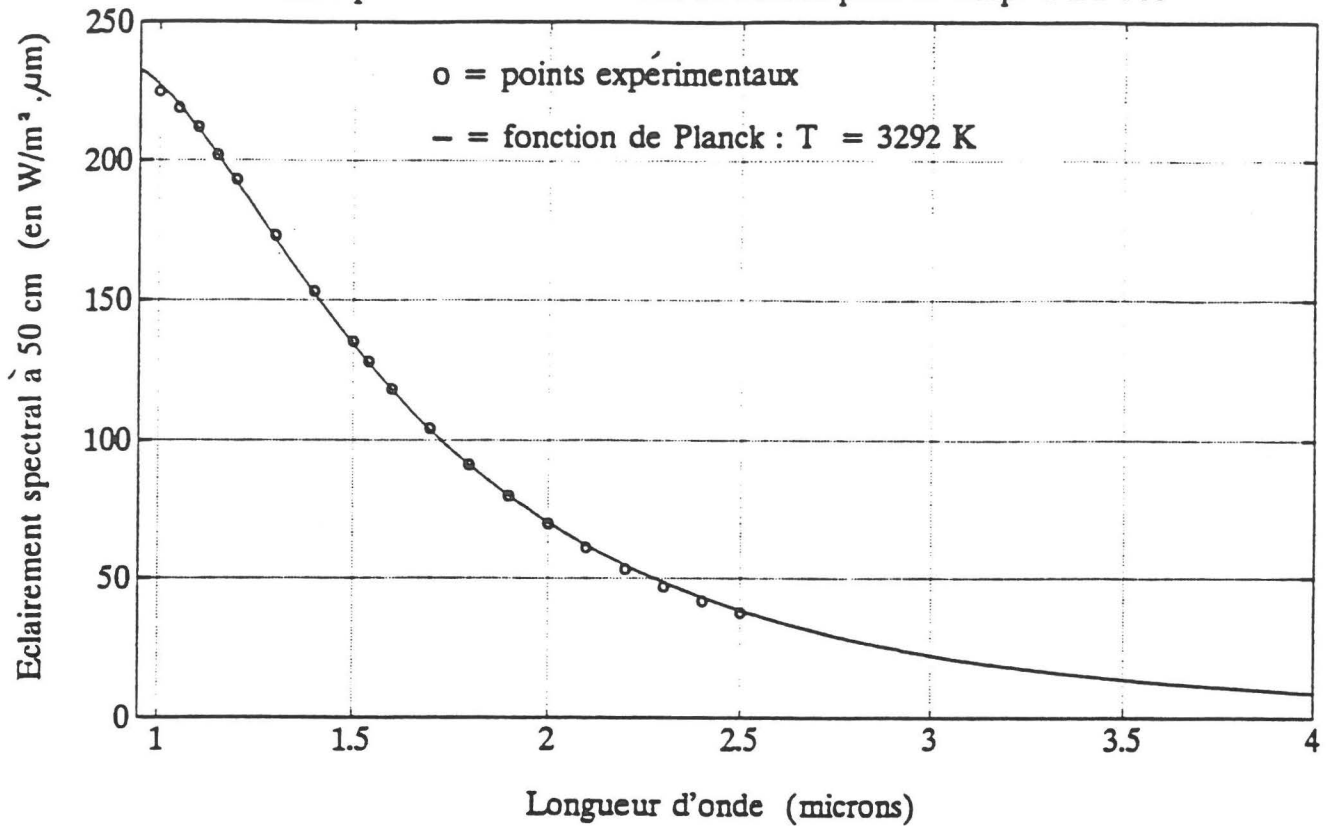


Fig. 12. Eclairement spectral de la lampe d'étalonnage FEL

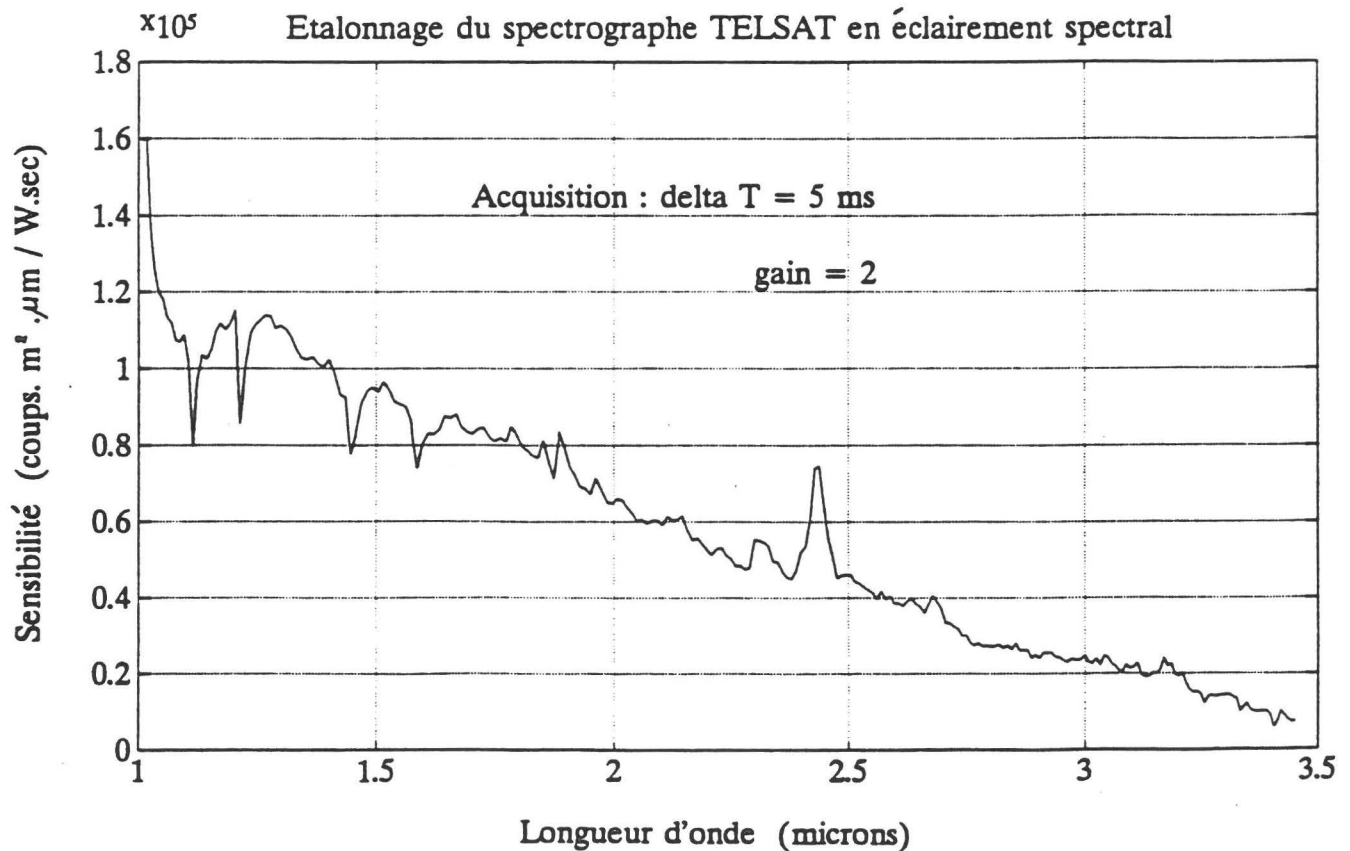


Fig. 13. Courbe de sensibilité du spectroradiomètre

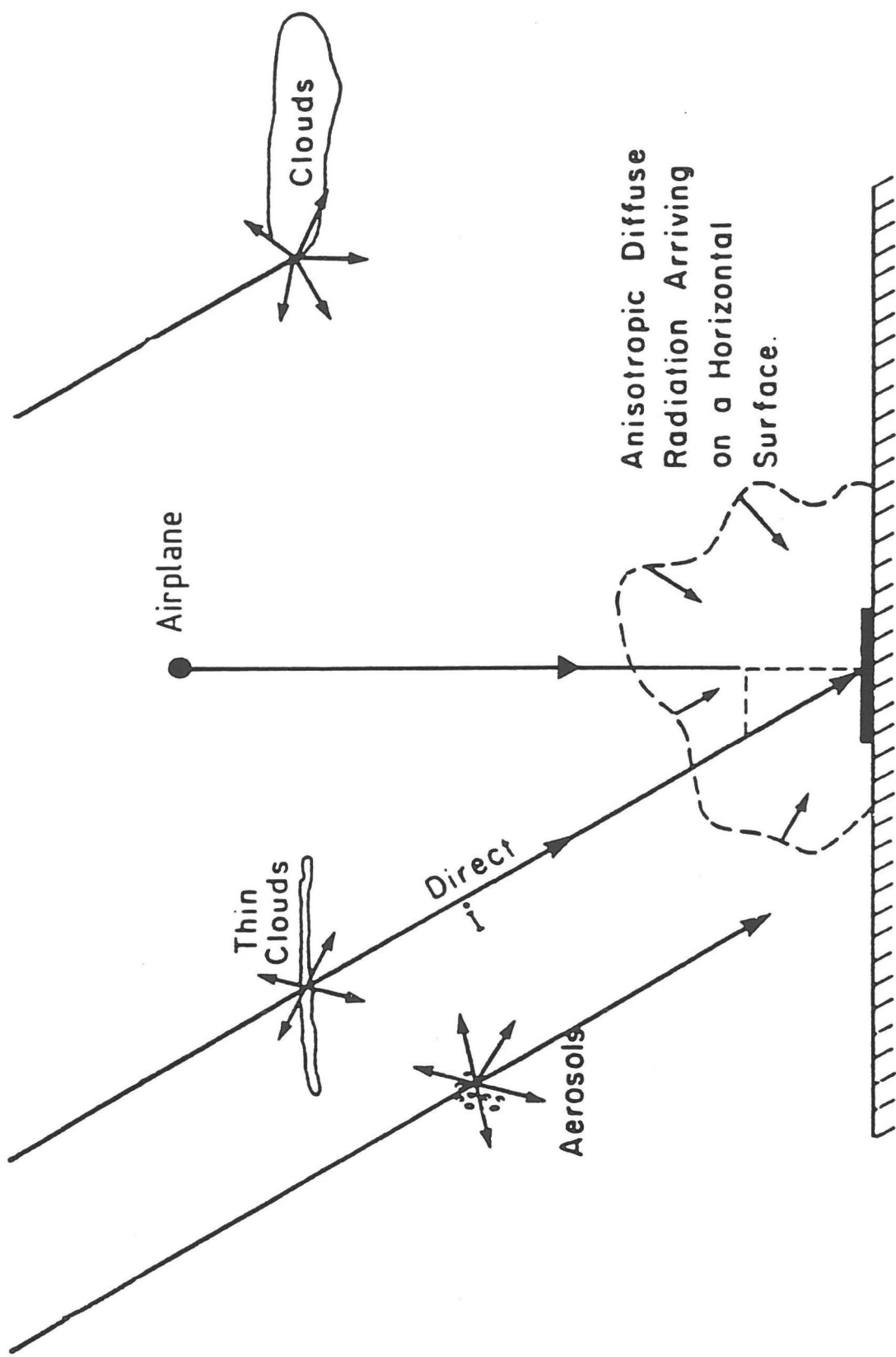


Fig. 14. Géométrie d'observation relative à la mesure zénithale

- la mesure faite à bord de l'avion correspond au trajet optique dans l'atmosphère défini par la position relative du soleil et de l'avion. L'éclairement au niveau de la parcelle de 10 m² observée à la verticale de l'avion correspond à un trajet optique, parallèle au premier, mais différent. Il peut donc avoir une épaisseur optique différente due par exemple à la présence de brume ou nuages. A titre d'exemple, le rayonnement solaire éclairant le sol traverse une masse d'air située entre 550 et 1300 m à l'horizontale de l'avion. Cette distance dépend de l'angle zénithale du soleil choisi (28 à 41°) et de l'altitude de l'avion (1000 à 1500 m). Ces angles correspondent à des observations effectuées aux environs de 14hrs du 15 avril au 15 juin. Cette distance augmente rapidement avec la valeur de l'angle zénithal.
- le trajet optique de l'éclairement solaire direct aux altitudes inférieures à celle de l'avion est également différent et allongé de manière significative par rapport à la visée verticale.

Il est donc nécessaire de corriger la mesure zénithale en tenant compte de ces différents points. Ce problème n'a pas été abordé de manière plus approfondie si ce n'est le fait que la Station de Phytopathologie a admis que la solution optimale consisterait à acquérir les valeurs de l'éclairement au sol pour répondre au problème posé.

Le problème de la mesure zénithale a fait l'objet d'une controverse entre les partenaires de projet. La solution adoptée par l'IASB a tenu compte des conclusions de sa réflexion sur le sujet, de la faisabilité des solutions proposées compte tenu des difficultés techniques, du temps disponible (la solution concernant le spectroradiomètre a été fixée au cours du 4^e trimestre 1991) et le budget disponible.

C'est pourquoi l'option de mesure à une longueur d'onde de 1,7 μm à l'aide d'une photodiode au germanium a été choisie en se basant sur la possibilité d'une modélisation de la transmission de l'atmosphère par des algorithmes existants dans le domaine spectral mesuré, à partir d'un point de mesure, dans cet intervalle. Des travaux ont été publiés sur ce problème de modélisation qui, pour rappel, devait de toute façon être abordé compte tenu des différences de trajets optiques (voir plus haut).

Une photodiode a été fournie avec son support mécanique et une électronique de mesure délivrant un signal analogique avec une amplification sur 3 décades et une tension de + 10V, qui devait être traitée par la carte A/D de l'électronique de l'ensemble de l'instrumentation.

Pour rappel, la mesure de la lumière zénithale n'était pas incluse dans ce contrat.

10. CONCLUSIONS

La contribution de l'IASB à ce projet consistait en la conception, la réalisation et la caractérisation d'un spectroradiomètre infrarouge aéroporté pour observer la luminance du sol entre 1,2 et 3,5 μm . Il devait s'adapter à un détecteur CCD préalablement défini et fourni par IMEC.

Les spécifications demandées concernaient l'ouverture de l'optique (F/2), la résolution spatiale au sol de 10 m², pour des observations effectuées entre 1000 et 1500 m, la longueur du plan focal et la distance entre la surface du détecteur (256 pixels de 8 mm longueur) et de son boîtier mécanique (40 mm). La bande passante dans le domaine spectral défini devait être de l'ordre de 100 nm.

La solution d'un spectroradiomètre à prisme a été rapidement retenue. Une solution commerciale pour l'objectif et le collimateur qui répondait à toutes les spécifications a été proposée au début 1991. Toutefois son coût a été jugé trop élevé par les SPPS. D'autres solutions négligeant notamment la correction des aberrations chromatiques par la combinaison de lentilles, ont été étudiées par la firme SPACEBEL.

La solution du type Petzval simplifié proposée par SPACEBEL n'a pu être retenue que pour l'optique frontale nécessaire pour la résolution spatiale au sol. Elle n'était pas acceptable pour le spectroradiomètre lui-même étant donné qu'elle impliquait une inclinaison du détecteur de 60° sur l'axe optique.

L'utilisation d'un spectrographe commercial du type Czerny-Turner croisé a alors été étudiée pour autant que son ouverture à F/4 puisse être acceptée, que le réseau puisse être remplacé par un prisme couplé à un miroir de renvoi pour conserver la géométrie du spectrographe et que le boîtier du détecteur CCD puisse être modifié.

Après l'étude des modifications montrant leur faisabilité, un spectrographe à prisme a été fabriqué à partir de la structure du spectrographe commercial, en conservant ses miroirs de collimation et de focalisation. Après alignement et vérifications il a été intégré avec le détecteur CCD. Sa caractérisation (échelle de longueur d'onde, dispersion,....) a été réalisée ainsi qu'un étalonnage absolu à l'aide d'une source radiométrique de transfert étalonnée au NIST (USA) dès que les problèmes liés au détecteur ont été résolus.

L'instrument a été intégré avec son optique frontale dans une structure mécanique spécialement adaptée aux observations en avion, avec un miroir de renvoi pour les observations au nadir afin de conserver le cryostat du détecteur dans une position quasi verticale. Le montage dans l'avion a été réalisé et les premiers vols ont permis de vérifier la stabilité optique du spectroradiomètre.

Une photodiode au germanium a été montée pour la mesure de l'éclairement zénithal au niveau de l'avion, avec son électronique d'amplification à 3 gains différents.

Les caractéristiques de l'instrument fourni répondent globalement aux spécifications révisées qui avaient été demandées.

Il ne permet toutefois pas une étude spectrale et spatiale, de part et d'autre de la ligne de visée au nadir. La solution à ce problème serait l'utilisation d'un détecteur à 2 dimensions couplé avec un spectroradiomètre imageur. L'introduction d'un miroir pour le balayage latérale ou toute autre solution couplée à l'optique d'entrée de l'instrument ne permet pas une mesure continue du terrain compte tenu de la vitesse de déplacement de l'avion (30 m/sec) et le temps actuel d'intégration du détecteur CCD. Le problème de la mesure de l'éclairement zénithal mériterait une étude approfondie pour permettre une interprétation utile des données d'observation pour la correction des observations de la luminance du sol.

11. BIBLIOGRAPHIE

- Chang, S.H. & Collins, W., 1983, Confirmation of the airborne biogeophysical mineral exploitation technique using laboratory methods, *Econ. Geol.*, 78, 723-736.
- Chiu, H.Y. & Collins, W.E., 1978, Spectroradiometer for Airborne Remote Sensing, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 44, 507-517.
- Conel, J.E., 1985, Calibration of AIS data using ground-based spectral reflectance measurements, in *Proceedings of the Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop* (G. Vane and A.F.H. Goetz, Eds.), 8-10 April 1985, Pasadena, California, JPL Publication 85-41.
- Conel, J.E., Adams, S., Alley, R.E., Hoover, G. & Schultz, S., 1986, Analysis of AIS radiometry with emphasis on determination of atmospheric properties and surface reflectance, in *Proceedings of the Second Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop* (G. Vane and A.F.H. Goetz, Eds.), 6-8 May 1986, Pasadena, CA, JPL Publication 86-35, pp.31-51
- Conel, J.E. et al., 1987, AIS-2 radiometry and a comparison of methods for the recovery of ground reflectance, *Proc. Third Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop*, Vane, F. (ed.), JPL Publ. 87-30, pp.18-47.
- Conel, J.E., Green, R.O., Vane, G., Bruegge, C.J. & Alley, R.E., 1987, Airborne imaging spectrometer-2 : radiometric spectral characteristics and comparison of ways to compensate for the atmosphere, *Imaging Spectroscopy II* (Gregg Vane, Ed.), *Proc. SPIE 834*, SPIE, Bellingham, WA, pp. 140-157.
- Elvidge, C.D., 1988, Vegetation reflectance features in AVIRIS data, in *Proceedings Sixth Thematic Conference : "Remote Sensing for Exploration Geology"*, Houston, TX, 16-19 May, 1988.
- Gao, B.C. & Goetz, A.F.H., 1989, Column atmospheric water vapor retrievals for airborne imaging spectrometer data, *IGARSS 90, 12th Can. Symp. of Rem. Sens. Vancouver. Can.*, IEEE#89CH2768-0, 4, 2664-2668.
- Goetz, A.F.H., 1987, The portable instant display and analysis spectrometer (PIDAS), *Proc. Third AIS Data Analysis Workshop*, June 2-4, 1987, JPL Pub. 87-30.
- Goetz, A.F.H. & Rowan, L.C., 1981, *Geologic remote sensing*, Science, USA, 211, 781-791.
- Goetz, A.F.H., Rock, B.N. and Rowan, L.C., 1983, Remote sensing for exploration : an overview, *Econ. Geol.* 78, 573-590.
- Goetz, A.F.H., Vane, G., Solomon, J.E. & Rock, B.N., 1985, *Imaging spectrometry for earth remote sensing*, Science, 228, 1147-1153.
- Gonzales, R.A. & Wintz, P., 1979, *Digital Image Processing*, Addison Wesley, Reading, MA.
- Green, R.O. et al., 1990, Determination of the in-flight spectral and radiometric characteristics of the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS), *Proc. Second Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop*, Green, R.O. (ed.), JPL Pub. 90-54, pp. 15-34.

- Green, R.O., Carrere, V. & Conel, J.E., 1989, Measurement of atmospheric water vapour using the airborne visible/infrared imaging spectrometer, Image Processing '89, Sparks, NV, May 1989, Am. Soc. for Photogram and Rem. Sens., pp. 341-44.
- Green, R.O., Vane, G. & Conel, J.E., 1988, Determination of in-flight AVIRIS spectral, Radiometric, Spatial, and Signal-to-Noise characteristics using atmospheric and surface measurements from the Vicinity of the Rare-Earth-Bearing Carbonatite at Mountain Pass, California, Proc. Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer Performance Evaluation Workshop, Vane G. (ed.), JPL-Pub. 88-38, pp. 162-184.
- Herrmann, K., Rock, B.N., Ammer, U. & Paley, H.N., 1988, Preliminary assessment of airborne imaging spectrometer and airborne thematic mapper data acquired for forest decline areas in the Federal Republic of Germany, Remote Sensing of Environment, 24, 129-150.
- Kahle, A.B. & Goetz, A.F.H., 1983, Mineralogical information from a new airborne thermal infrared multispectral scanner, Science, 222, 24-27.
- Kneizys, F.X., Shettle, E.P., Anderson, G.P., Abreu, L.W., Chetwood, J.H., Selby, J.E.A., Clough, S.A. & Gallery, W.o., 1988, Users Guide to LOWTRAN 7, Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, Massachusetts, AFGL-TR-88-0177.
- LaBaw, C., 1987, Airborne Imaging Spectrometer 2 : The optical design, in proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 834 (G. Vane, A.F.H. Goetz, and D.D. Norris, Eds).
- Leckner, B., 1978, The spectral distribution of solar radiation at the earth's surface-elements of a model, Sol. Energy, 20, 143-150.
- Lyon, R.J.P. & Honey, F.R., 1990, Direct mineral identification (DMI) with Geoscan Mk II Advanced Multispectral Scanner (AMSS), SPIE, 1298, 50-61.
- Mazer, A.S., Martin, M., Lee, M. and Solomon, J.E., 1988, Image processing software for image spectrometry data analysis, Remote Sensing Environ., 24.
- McClatchey, R.A. & Selby, J.E., 1972, Atmospheric transmittance from 0.25 to 28.5 μ m : computer code LOWTRAN-2. Air Force Cambridge Research Laboratories, AFCRL-72-0745, Environ. Res. Paper 427.
- Miller, J.R., Hare, E.W., Hollinger, A.B. & Sturgeon, D.R., 1987, Imaging spectrometry as a tool for botanical mapping, Proc. SPIE, Imaging Spectroscopy II, No. 834, pp. 108-113.
- Peterson, D.L., Aber, J.D., Matson, P.A., Card, D.H., Swanberg, N., Wessman, C. & Spanner, M., 1988, Remote sensing of forest canopy and leaf biochemical contents, Remote Sensing Environ. 24, 85-108.
- Roberts, D.A., Yamaguchi, Y., & Lyon, R.J.P., 1986, Comparison of various techniques for calibration of AIS data, in Proceedings of the Second Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop (G. Vane and Q.F.H. Goetz, Eds.), 6-8 May, Masadena, CA, JPL Publication 86-35, pp. 31-51.

- Rock, B.N., Hoshizaki, T. & Miller, J.R., 1988a, Comparison of in situ and airborne spectral measurements of the blue shift with forest decline, *Remote Sens. Environ.*, 24, 109-128.
- Rock, B.N., C.D. Elvidge, N.J. Defeo, 1988b, Assessment of AVIRIS data from vegetated sites in the Owens Valley, CA? Proc. Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Performance Evaluation Workshop, JPL Publication 88-38, pp. 88-96.
- Slater, P.N. et al., 1987, Reflectance and Radiance-Based methods for the in-flight absolute calibration of multispectral sensors, *Rem. Sens. Environ.* 22, 11-37.
- Tucker, C.J., 1976, Sensor design for monitoring vegetation canopies, *Photogram. Eng. and Rem. Sens.*, 42, 1399-1410.
- Ustin, S.L. & Rock, B.N., 1985, Preliminary analysis of AIS spectral data acquired from semi-arid shrub communities in the Owens Valley, California, in Proceedings of the Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop (G. Vane and A.F.H. Goetz, Eds.), 8-10 April, Pasadena, CA, JPL Publication 85-41.
- Vane, G., 1986, Introduction to the proceedings of the Second Airborne Imaging Spectrometer Data Analysing Workshop, Proceedings of the Second Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop, Pasadena (G. Vane and A.F.H. Goetz Eds.), JPL Publication 86-35, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, pp. 1-16. Vane, G., Ed., 1987, The Airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS) : a description of the sensor, ground data processing facility, laboratory calibration, and first results, JPL Publication 87-38, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA.
- Vane, G., Goetz, A.F.H. & Wellman, J.B., 1984, Airborne Imaging Spectrometer : A new tool for remote sensing, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 22, 546-549.
- Wessman, C.A., Aber, J.D., Peterson, D.L. & Melillo, J.M., 1988a, Remote sensing of canopy chemistry and nitrogen cycling in temperate forest ecosystems, *Nature* 335, 154-156.
- Wessman, C.A., Aber, J.D., Peterson, D.L. & Melillo, J.M., 1988b, Foliar analysis using near infrared reflectance spectroscopy, *Can. J. For. Res.* 18, 6-11.