

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN
RESSOURCES RENOUVELABLES**

par

Jean-Michel Gastonguay

B. Sc. Physique

**Mise au point d'un réflectomètre imageur
à partir de la vidéographie
aérienne multispectrale (VAM)**

20 AVRIL 2002



Mise en garde/Advice

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

RÉSUMÉ

En télédétection aérienne, on peut obtenir des images du sol avec différents types de capteurs, justifiés par l'usage que l'on souhaite faire des images. Le système utilisé par le laboratoire de télédétection aérienne de l'UQAC est la vidéographie aérienne multispectrale (VAM). Ce système de caméra peut capter indépendamment jusqu'à 6 bandes spectrales, réparties du violet au proche infrarouge. Un système comme celui-ci peut nous permettre d'obtenir de l'information au sol dans des plages de longueurs d'onde bien définies, ce qui simplifie l'étude de certains aspects du sol.

L'usage d'un capteur sensible au proche infrarouge est particulièrement intéressant pour étudier les stades phénologiques des végétaux. Ceux-ci peuvent se discriminer en observant la variation temporelle de l'albédo dans cette bande, caractéristique de la chlorophylle qui est produite par les végétaux.

La télédétection aérienne avec la bande proche infrarouge est donc souvent employée pour faire le suivi dans le temps d'un secteur particulier. Prenons par exemple des zones dévastées par des feux de forêt ou encore des zones agricoles. Il faut alors faire plusieurs survols espacés temporellement d'un même endroit pour constater s'il y a eu ou non évolution de l'albédo des végétaux observés.

Malheureusement, il était impossible avec le système original de constater une évolution de l'albédo car il n'y avait pas d'appareils pouvant nous assurer que les observations avaient été faites dans les mêmes conditions de lumière incidente. La variation dans l'intensité de signal alors reçu au capteur dépendait beaucoup plus de la lumière incidente que de la variation de l'albédo.

La comparaison directe d'imagerie aérienne ne devrait alors être faite que lorsque l'on sait que la lumière ambiante disponible était la même au moment de la prise d'information. Malheureusement, ce n'est à proprement parler jamais le cas car l'intensité et le contenu spectral de la lumière incidente dépendent beaucoup de facteurs incontrôlables. L'on doit alors se résoudre à faire les vols dans toutes sortes de conditions d'ensoleillement et trouver une autre manière de pouvoir faire un suivi temporel.

Il faut alors connaître l'intensité spectrale de la lumière disponible au moment de la prise d'images pour pouvoir comparer ces dernières. C'est pourquoi, lors de ce projet de maîtrise, nous avons ajouté au système de vidéographie aérienne multispectrale un capteur de lumière incidente. L'information captée par ce dernier est intégrée aux images mêmes, sous forme d'un point lumineux dans un coin de l'image. L'intensité spectrale de ce point sert alors de référence. Lorsque les images seront traitées par informatique, l'on pourra faire varier la luminosité globale de l'image jusqu'à ce que l'intensité du point soit égale à

celle du point d'une autre image du même secteur prise à un autre moment. L'on comparera alors les images en ayant la certitude que la luminosité ambiante simulée était la même dans les deux cas. À ce moment, la variation de la luminosité de tous les autres objets de l'image peut être comparée. Cela donne alors une mesure de la variation de l'albédo.

L'ajout d'un capteur de lumière ambiante au système VAM pourrait sembler simple à première vue mais il en est tout autrement. L'ancien système optique de la caméra multispectrale a dû être modifié de façon radicale et ce, de manière à pouvoir intégrer l'information du capteur de lumière incidente (CLI), amenée par fibre optique, dans une partie de l'image de la caméra. Des simulations du nouveau système optique ont été faites à l'aide du logiciel *ZEMAX*. Elles ont permis d'introduire à l'intérieur de la caméra un système de lentilles relais, en plus de deux lentilles de champ.

Les informations obtenues sont donc des images monochromes représentant l'intensité du signal réfléchi par le sol avec en un coin, une plage lumineuse d'intensité proportionnelle à la lumière incidente disponible dans cette même bande au moment de l'acquisition. Les images pourront donc être comparées entre elles en amenant par traitement informatique leur point de référence respectif à la même intensité. Un suivi temporel pourra alors être effectué pour voir s'il y a eu évolution du terrain.

AVANT-PROPOS

Durant les années 1998 et 1999, j'ai eu la chance de travailler pour la compagnie de télédétection aérienne Air Focus inc. de Chicoutimi. Pendant plusieurs journées de beau temps, j'étais opérateur de caméra, piloté par Stéphan Mc Laughlin. Pendant les autres moments, je travaillais au traitement d'images. Nous volions la plupart du temps avec le système de vidéographie aérienne multispectrale (VAM) de l'Université du Québec à Chicoutimi. J'ai donc eu l'occasion de constater que certaines modifications pourraient être apportées au système, pour mieux l'adapter aux besoins des gens qui requièrent des images aériennes. En effet, la nature des besoins de télédétection aérienne est souvent de faire un suivi de l'évolution temporelle des végétaux d'un terrain particulier.

N'ayant pas à proprement parler de système approprié pour ce genre d'usage, le système pouvait toujours fonctionner à cet effet de manière relative, pour permettre de percevoir une évolution du terrain par rapport à lui-même. Ceci arrive si un certain type de végétation évolue plus qu'un autre, mais encore faut-il qu'il y ait plus d'un type de végétation sur l'image. Par contre, il était impossible de faire un suivi par rapport à une référence fondamentale, qui serait la même pour toutes les images.

Le système qui a été mis au point durant ce projet de recherche tient donc compte de la lumière incidente comme référence. Ce système a été conçu dans l'éventualité où un suivi temporel d'une région particulière. Évidemment, ce système est décrit en détail dans

les pages qui suivent.

J'aimerais premièrement remercier mon directeur de maîtrise, M. René Verreault. Il a été d'une grande disponibilité et il m'a permis de comprendre une multitude de principes d'optique qui ne pouvaient pas être vus au niveau du baccalauréat. N'oublions pas les nombreux autres sujets que nous avons approfondis ensemble au cours des années.

Merci à Stéphan Mc Laughlin, avec qui mes 72 heures de vol se sont relativement bien passées. Ses conseils d'ancien étudiant dans le même domaine et avec le même directeur ont su m'influencer et m'aider. Il est aussi devenu un bon ami.

Je tiens aussi à remercier Daniel Bégin qui a su au fil des années, m'apprendre avec patience et passion, beaucoup en théorie, mais aussi beaucoup en pratique. Ce côté est trop souvent négligé dans l'enseignement et je continuerai moi aussi à perpétuer le contraire.

J'aimerais aussi remercier, mon père Michel et ma mère Lise. Sans leur appui financier, je ne me serais probablement pas rendu aussi loin. Merci à mes amis, qui ont su m'écouter, me soutenir, m'amener de nouvelles idées et aussi me les changer. Je pense plus particulièrement à Luc Pilote, Michel Bradette, Philippe-Alexandre Villeneuve et François Leclerc. Je n'oublie pas ma copine Mélanie qui a su me supporter même si mon humeur était souvent proportionnelle à la manière dont se déroulait cette maîtrise.

Je n'oublie pas les gens du module des sciences fondamentales qui ont été patients car j'aurai pris le temps maximum pour conclure cette recherche. L'opportunité d'emploi que j'ai eue comme professeur au collégial après seulement ma première année de maîtrise était non refusable et c'est ce qui a occasionné ce délai. J'ai tout de même persévétré à conclure le travail que j'avais commencé et ce, à la surprise de bien des gens.

Plusieurs choses que j'ai apprises durant ces années de recherches m'auront permis d'améliorer ma compréhension de l'optique et par conséquent, mon enseignement. Je sais maintenant qu'il faut parfaitement comprendre les choses si l'on veut pouvoir les expliquer à d'autres.

Enfin, je remercie infiniment le Consortium de recherche sur la forêt boréale qui a su me soutenir financièrement durant mes recherches et mes trouvailles.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	II
AVANT-PROPOS	IV
LISTE DES FIGURES	IX
LISTE DES GRAPHIQUES	X
LISTE DES IMAGES	XI
LISTE DES TABLEAUX	XII
I INTRODUCTION	1
II CONTEXTE THÉORIQUE	7
2.1 Facteurs influençant l'éclairage incident	7
2.1.1 Le couvert nuageux	7
2.1.2 L'humidité de l'air	9
2.1.3 L'angle solaire	10
2.1.4 La diffusion moléculaire de Rayleigh	12
2.2 Facteurs influençant l'albédo de la végétation	14
2.2.1 Les stades phénologiques	14
2.2.2 La réflectance bidirectionnelle	16
III MÉTHODOLOGIE	23
3.1 Description du principe de base du système optique	23
3.2 Simulation du système optique	26
3.2.1 Principe de base de la caméra	26
3.2.2 Principe de base du capteur de lumière incidente	29
3.3 Les outils d'évaluation de la performance optique du système	30
3.3.1 Représentation graphique du système optique de la camera	30
3.3.2 Diagramme des taches sur le plan image	31
3.3.3 Courbure de champ et distorsion	33
3.3.4 Les aberrations chromatiques longitudinales	35
3.4 Construction du système	38
3.5 Configuration du système d'acquisition	38
3.6 Calibration	39
3.7 Tests en vol (grandes directions d'un projet futur)	41

IV LE SYSTÈME D'ACQUISITION	43
4.1 Parties conservées du capteur Xybion MSC-02 SPL - 4076	43
4.1.1 Le module caméra (adapté de Mc Laughlin, 1998)	43
4.1.2 La roulette de filtres (adapté de Mc Laughlin, 1998)	45
4.1.3 Les filtres (adapté de Mc Laughlin, 1998)	47
4.1.4 La calibration de la roulette de filtres	49
4.2 L'objectif principal	50
4.3 Les accessoires et instruments périphériques du système d'acquisition d'imagerie	53
4.3.1 L'enregistreur vidéo	53
4.3.2 Le système informatique	54
V RÉSULTATS	55
5.1 Système optique de la caméra théorique	55
5.1.1 La frontière entre simulation et pratique	55
5.1.2 Le système optique simulé	58
5.2 Le système optique expérimental	62
5.2.1 Vue d'ensemble	62
5.2.3 Système optique du capteur de lumière incidente (CLI)	70
5.3 Essais préliminaires du système	72
5.3.1 Calibration à l'aide du spectrophotomètre	72
5.2.2 Calibration des capteurs de lumière incidente et réfléchie	74
5.2 Tests du spectromètre imageur sur le terrain	77
5.3.1 Première série de tests	77
VI CONCLUSION	86
Bibliographie	90

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 2.1: Schéma de l'angle d'incidence des rayons solaires à deux périodes différentes d'une journée.</i>	<hr style="width: 100%; border: 0; border-top: 1px solid black; margin-bottom: 5px;"/> 10
<i>Figure 2.2: Schéma de l'influence de l'ombre d'un arbre à deux périodes différentes d'une journée.</i>	<hr style="width: 100%; border: 0; border-top: 1px solid black; margin-bottom: 5px;"/> 11
<i>Figure 2.3: Diffusion moléculaire de Rayleigh. Schéma illustrant l'influence sur la lumière incidente au sol de l'épaisseur de la couche d'atmosphère traversée par la lumière solaire.</i>	<hr style="width: 100%; border: 0; border-top: 1px solid black; margin-bottom: 5px;"/> 13
<i>Figure 2.4: Représentations schématiques de la différence entre les réflexions spéculaires, lambertienne et non-lambertienne.</i>	<hr style="width: 100%; border: 0; border-top: 1px solid black; margin-bottom: 5px;"/> 17
<i>Figure 2.4: Le concept de la réflectance bidirectionnelle</i>	<hr style="width: 100%; border: 0; border-top: 1px solid black; margin-bottom: 5px;"/> 18
<i>Figure 2.5: Indicatrice de luminance en coordonnées polaires. (source: voir anonyme)</i>	<hr style="width: 100%; border: 0; border-top: 1px solid black; margin-bottom: 5px;"/> 20
<i>Figure 2.6: Exemples d'indicatrices de réflectance observées dans le plan du Soleil. (Source: voir anonyme)</i>	<hr style="width: 100%; border: 0; border-top: 1px solid black; margin-bottom: 5px;"/> 21
<i>Figure 3.1: Principe général du système optique du réflectomètre imageur.</i>	<hr style="width: 100%; border: 0; border-top: 1px solid black; margin-bottom: 5px;"/> 24
<i>Figure 4.1: Réponse spectrale du CCD du capteur Xybion MSC-02 -SPL - 4076. Adaptée de: Xybion Electronic Systems Corp., User's Manual, p. 2.</i>	<hr style="width: 100%; border: 0; border-top: 1px solid black; margin-bottom: 5px;"/> 45
<i>Figure 4.2: Vue éclatée du capteur Xybion MSC-02 SPL - 4076 Adaptée de: Xybion Electronic Systems Corp., User's Manual, p. 32.</i>	<hr style="width: 100%; border: 0; border-top: 1px solid black; margin-bottom: 5px;"/> 46

LISTE DES GRAPHIQUES

<i>Graphique 2.1: Graphique de la transmissivité expérimentale de l'eau dans le proche ultraviolet, le visible et le proche infrarouge</i>	9
<i>Graphiques 5.1: Transmissivité de la fibre optique du capteur de lumière incidente.</i> <i>Adapté de: Edmund Industrial Optics Catalog 2000, p.227.</i>	71
<i>Graphique 5.2: Représentation de la loi du rayonnement d'un corps noir de Planck.</i>	74
<i>Graphique 5.1: Réponse du capteur CCD en fonction de la longueur d'onde du monochromateur.</i>	75
<i>Graphique 5.2: Réponse normalisée du capteur de lumière incidente et réfléchie</i>	76
<i>Graphiques 5.3, 5.4 et 5.5: Comparaisons des signaux du capteur de lumière réfléchie et incidente.</i>	80
<i>Graphiques 5.6, 5.7 et 5.8: Variations des intensités mesurées par les capteurs de lumière incidente et réfléchie, lors d'une séance d'essais effectuée sur la passerelle de l'UQAC, le 17 septembre 2001.</i>	84

LISTE DES IMAGES

<u>Images 2.1 et 2.2: Mosaïques de l'autoroute Félix-Leclerc (40) dans le secteur de Lavaltrie, en couleurs naturelles et en infrarouge fausses couleurs.</u>	8
<u>Image 4.1: Carte électronique de synchronisation de la roulette de filtres</u>	46
<u>Image 4.2: Gros plan de la roulette de filtres.</u>	47
<u>Image 4.1: Objectif Fujinon CF25L f/0,85</u>	50
<u>Image 5.1: Vue d'ensemble du spectromètre imageur</u>	62
<u>Image 5.2: Vue de l'objectif principal, du support, de la fibre du capteur de lumière incidente, de la lentille relais 1, du diaphragme, de la roulette de filtres et d'une partie du système électronique.</u>	65
<u>Image 5.3: Vue agrandie à travers une loupe du microprisme fixé à l'extrémité de la fibre du CLI.</u>	71
<u>Image 5.4: Le spectrophotomètre du laboratoire de physique.</u>	72
<u>Image 5.5: Tests du spectromètre imageur sur le terrain, le 1^{er} août 2001.</u>	77

LISTE DES TABLEAUX

<u>Tableau 3.1: Tableau des données des lentilles dans le logiciel ZEMAX</u>	27
<u>Tableau 3.2: Première ligne d'informations du Lens Data Editor.</u>	27
<u>Tableau 3.3: Informations sur la première lentille.</u>	28
<u>Tableau 5.1: Caractéristiques des éléments optiques du spectromètre imageur.</u>	67
<u>Tableau 5.2 : Caractéristiques physiques de la fibre optique du C.L.I.</u>	70
<u>Tableau 5.3: Intensités lumineuses du sol versus CLI pour les tests du 17 septembre 2001</u>	81

I

INTRODUCTION

Dans les sciences de l'imagerie, un objectif commun est de "voir" le sujet d'intérêt et de le distinguer clairement de son environnement. Malheureusement, ceci peut être difficile ou impossible à accomplir avec l'œil humain, un film ou une caméra vidéo ordinaire (Frost, 1990). La télédétection est un domaine en pleine expansion depuis plusieurs années et on s'en sert pour faire des observations de diverses régions de la Terre à plus ou moins grande échelle. En télédétection aérienne, on peut obtenir des images du sol avec différents types de capteurs, justifiés par le type d'usage que l'on souhaite faire des images. Ils peuvent aller de la caméra conventionnelle de photographie aérienne en format 9" x 9" jusqu'aux systèmes à balayage au laser.

Le système utilisé par le laboratoire de télédétection aérienne de l'UQAC est la vidéographie aérienne multispectrale que l'on appelle couramment VAM. Ce système a peu à peu gagné ses lettres de noblesses au cours des années '80 comme outil d'investigation de la végétation par télédétection (Verreault et al., 1993). L'imagerie multispectrale diffère de l'imagerie ordinaire de par le fait que chaque scène est séparée en plusieurs "tranches" spectrales. Par conséquent, une "image multispectrale" est une série

d'images de laquelle on peut tirer non seulement de l'information spatiale, mais aussi de l'information spectrale (Frost, 1990). La VAM est un système portatif peu coûteux duquel on peut obtenir des données multispectrales appropriées pour des mesures fréquentes et de la cartographie. La VAM permet d'obtenir des images multispectrales de haute résolution spatiale dans six bandes prédéfinies par l'utilisateur, dans la région de longueur d'onde de 400 à 900 nm (Niedrauer, 1991).

Elle est une caméra vidéo avec une roulette dans laquelle sont montés des filtres qui tournent entre la lentille et le plan imageur de la caméra. La vitesse de rotation est de 300 tours par minute ce qui place un filtre différent en face du plan focal de la caméra à tous les 30° de seconde ce qui est la vitesse de capture de la caméra (Witherspoon et Holloway, 1992). Un système comme celui-ci peut donc nous permettre d'obtenir de l'information au sol dans des plages de longueurs d'onde bien définies, ce qui simplifie l'étude de certains aspects du sol.

Un capteur sensible au proche infrarouge est particulièrement intéressant pour étudier les stades phénologiques des végétaux. On peut voir s'il y a évolution, en observant l'albédo, soit la variation de la quantité de lumière réfléchie dans cette bande, qui est caractéristique de la présence de chlorophylle.

Le système VAM est basé sur le même principe que la photographie: il capte la lumière réfléchie par les objets observés, la source de lumière incidente dans notre cas étant

le Soleil. En photographie, les professionnels utilisent un posemètre placé près du sujet à photographier afin de savoir à quelle ouverture régler leur caméra à une vitesse donnée pour avoir la bonne exposition. Pour des systèmes vidéo standards, ceci se fait automatiquement en temps réel, à l'aide de systèmes électroniques. Un diaphragme motorisé s'ouvre et se ferme en temps réel dépendamment de la quantité de lumière réfléchie et/ou émise par l'objet observé. Par contre, pour la VAM, l'ouverture de l'objectif de la caméra doit être réglée manuellement de manière à ne pas saturer le capteur. Cette ouverture est réglée très précisément en fonction de la lumière qui est reçue par la caméra.

Ce réglage précis est nécessaire car l'éclairement du Soleil n'est pas constant à cause d'une multitude de facteurs physiques, il est donc logique de dire que les données obtenues à l'aide de la VAM dépendent en totalité de la source. Voici les principaux facteurs qui influencent la lumière incidente:

1. Le couvert nuageux ;
2. L'humidité de l'air ;
3. L'angle solaire, directement relié à l'heure et à la période de l'année ;
4. La diffusion moléculaire de Rayleigh.

La présence de tous ces facteurs est incontrôlable et surtout variable. Dans plusieurs genres d'études, la calibration radiométrique absolue n'est pas nécessaire, comme la cartographie de zones forestières et de champs (King et Vlcek, 1990 et Everitt et al.,

1992). D'autre part, pour l'étude à moyen et long terme de ces mêmes zones où une évolution dans la détection est désirée, une imagerie radiométriquement juste devrait être utilisée de manière à quantifier convenablement les changements possibles (Neale et al., 1995, Bannari et al., 1998). Le système que l'on doit employer doit donc tenir compte de la variation de la lumière incidente.

Des expérimentations de ce type ont déjà été tentées. La calibration radiométrique a permis de convertir l'information des images de radiance en réflectance. Cela a été utilisé pour faire un suivi temporel de l'évolution d'un endroit au sol car il est impossible de comparer avec précision deux images prises à des temps différents, si l'intensité lumineuse incidente dans les différentes bandes du spectre est variable. Prenons l'exemple d'un arbre qui nous paraîtra moins vert en fin d'après-midi qu'à midi car le contenu spectral de la lumière incidente a changé pour des raisons que l'on verra plus loin.

De ce fait naît donc la problématique : *Il y a impossibilité de faire le suivi temporel d'un terrain en contenu spectral sans préalablement se référer à celui de la lumière incidente.* Pour tenter de résoudre ce problème, un système pouvant capter un signal proportionnel à l'intensité de la lumière incidente devrait être conçu et intégré au système d'imagerie, de manière à ce qu'une calibration soit toujours possible. Ce dernier devra travailler en parallèle avec la VAM et donner, pour chacune des images acquises, de l'information sur la quantité de lumière qui était disponible dans cette bande lors de la prise de cette image. (Xu et al, 1993) ont converti des images de radiance en des images de

réflectance apparente à l'aide de données prises d'un diffuseur monté au toit de l'avion qui mesure simultanément les spectres d'éclairement descendant.

Pour expliquer l'ampleur du phénomène, prenons par exemple, une image proche infrarouge d'un terrain prise au printemps. La caméra reçoit un niveau bas d'intensité lumineuse dans cette bande, car les végétaux au sol commencent à peine à produire de la chlorophylle. La valeur de l'intensité de lumière incidente quant à elle, toujours dans la bande du proche infrarouge, est aussi moyenne. Ceci est entre autres dû au fait que le Soleil ne s'élève pas aussi haut au-dessus de l'horizon qu'en été.

Comparons notre image à une autre du même terrain prise en été. La caméra aura été exposée à une émission de très forte intensité lumineuse, à cause de la grande présence de chlorophylle des végétaux sur le terrain. La lumière incidente, quant à elle, était de forte intensité à cause de l'angle du Soleil. Si la lumière incidente était plus forte, la lumière réfléchie le sera évidemment elle aussi. Le diaphragme de la caméra devra alors couper une partie de lumière pour ne pas que le capteur soit saturé. Voilà le problème: de quel facteur l'avons-nous coupée? L'albédo du sujet était-il le même qu'au printemps? Il faudrait savoir quelle est l'intensité de lumière infrarouge qui parvenait du Soleil et faire le rapport avec celle qui est réfléchie. Avec une même référence, l'on peut s'apercevoir que le terrain n'émet pas dans le même rapport l'intensité réfléchie sur l'intensité incidente. Il y a donc eu évolution et dans ce cas, plus de chlorophylle produite, ce qui peut être un bon signe de l'état de santé des végétaux.

L'objectif de ce projet de maîtrise est donc de concevoir à partir du système actuel de vidéographie aérienne multispectrale, un réflectomètre imageur. C'est à dire, un appareil permettant de mesurer la réflectance de la cible, soit le rapport entre l'intensité de lumière réfléchie par le terrain et l'intensité de lumière incidente. Il s'agit d'amener un point lumineux d'intensité proportionnelle à celle de la lumière incidente disponible sur l'image. L'intensité de ce point devra par après varier de manière proportionnelle au reste de l'image. Xu et al. (1993) mentionnent qu'utiliser un capteur de lumière incidente pour convertir la radiance de la cible en réflectance apparente est une méthode de traitement d'image pertinente et faisable.

II

CONTEXTE THÉORIQUE

2.1 Facteurs influençant l'éclairage incident

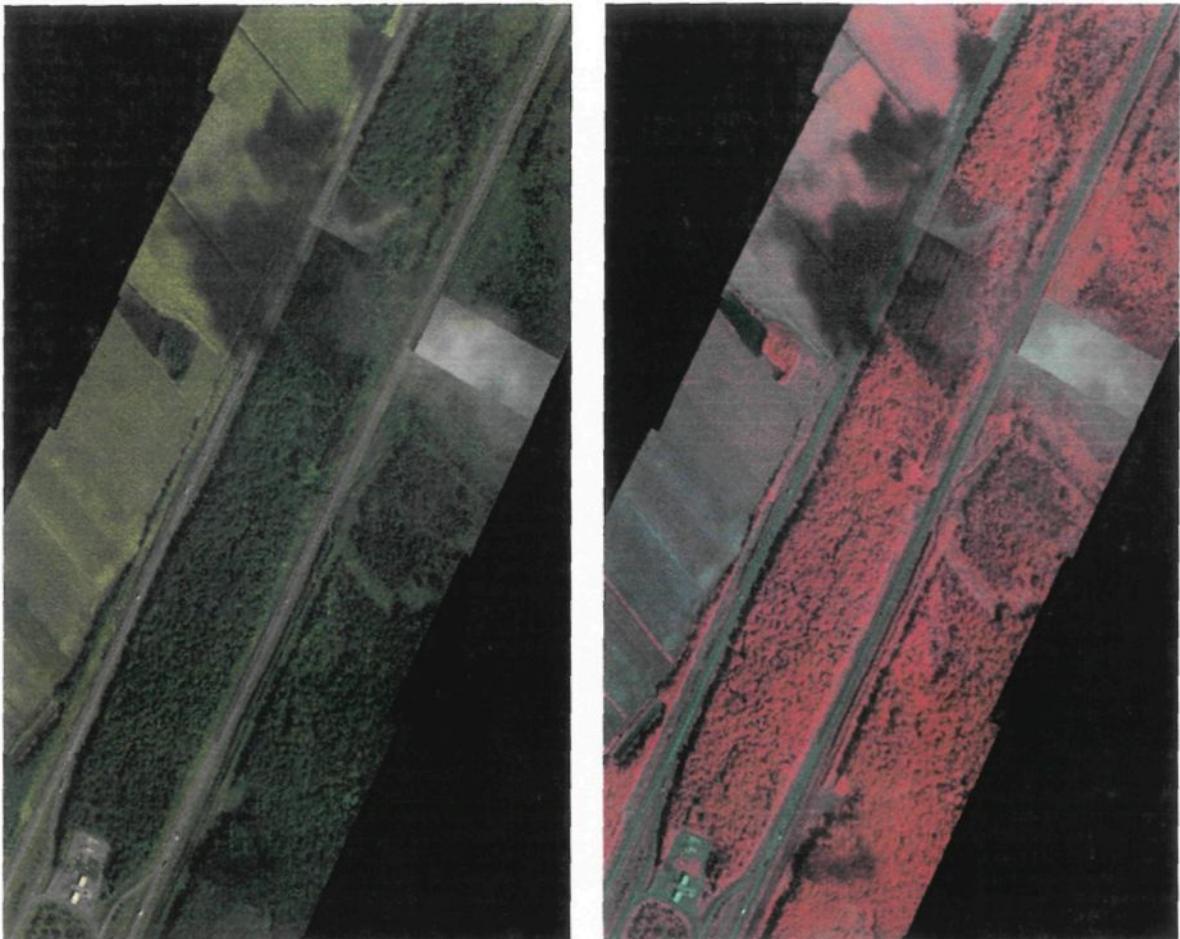
Il était objet dans l'introduction que l'intensité et le contenu spectral de la lumière solaire varient en fonction de plusieurs facteurs. Voyons de quelle manière ils agissent.

2.1.1 Le couvert nuageux

Comme on l'observe presque tous les jours à l'œil nu, le contenu spectral et l'intensité de la lumière dépendent beaucoup du couvert nuageux. Par exemple, il fait beaucoup plus sombre à l'extérieur lors d'une journée nuageuse et les couleurs semblent plus ternes que lors d'une belle journée ensoleillée. Les nuages ont donc pour premier effet d'atténuer, du moins dans la partie visible du spectre, l'intensité de la lumière incidente. Les nuages ont donc un albédo élevé dans la région visible du spectre. Ils réfléchissent une grande partie de la lumière qu'ils reçoivent vers l'espace. Le vrai problème réside dans le fait qu'ils n'ont pas exactement le même albédo pour toutes les longueurs d'onde du spectre.

Pour contrer ce fait, il est simple de dire que nous n'avons qu'à faire les survols de télédétection lors de belles journées ensoleillées. C'est d'ailleurs ce qui se fait, dans la

mesure du possible. Par contre, on ne dispose pas assez souvent de journées pleinement ensoleillées pour faire tous les survols d'un contrat dans la même période. Il faut parfois faire des compromis et faire des survols lorsqu'il y a un peu de nuages, ou encore attendre qu'une zone se dégage pour la survoler.

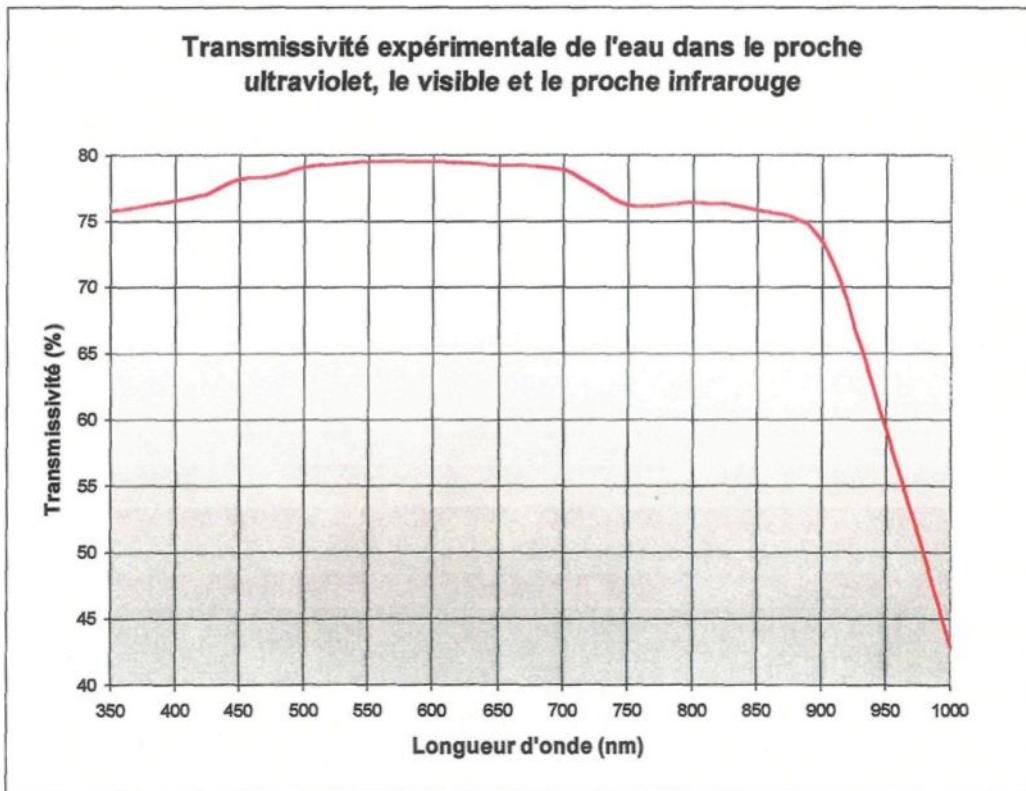


Images 2.1 et 2.2: Mosaïques de l'autoroute Félix-Leclerc (40) dans le secteur de Lavaltrie, en couleurs naturelles et en infrarouge fausses couleurs. On peut y apercevoir un cumulus de basse altitude et l'effet de ce dernier sur la zone forestière et agricole. Deux endroits très semblables physiquement sont très différents sur des images si l'un d'eux a été capté durant un moment où il se trouvait dans l'ombre.

Les cumulus de basse altitude font des ombres au sol qui sont facilement

observables de par la quantité de lumière reçue et par conséquent, réfléchie par le sol qui est de beaucoup moindre que lorsqu'il n'y a pas d'obstacles. Les vols de télédétection aérienne doivent par conséquent être exécutés de manière à ce que ces nuages soient évités le plus possible. Deux endroits très semblables physiquement sont la plupart du temps très différents sur des images si l'un d'eux a été capté durant un moment où il se trouvait dans l'ombre .

2.1.2 L'humidité de l'air



Graphique 2.1: Graphique de la transmissivité expérimentale de l'eau dans le proche ultraviolet, le visible et le proche infrarouge

D'autre part, il y a souvent, lors de journées ensoleillées, des nuages de haute altitude qui ne feront pas d'ombres bien définies au sol. Par contre, ils influenceront à coup

sûr l'intensité spectrale de la lumière incidente (voir le graphique 2.1). Les nuages étant constitués en majeure partie d'eau, ils diffuseront la lumière à la manière caractéristique de l'eau, qui a un spectre d'absorption bien particulier qui varie en fonction de la longueur d'onde et c'est ce qui fait que la lumière n'est pas atténuée uniformément sur toute la largeur du spectre électromagnétique. Le phénomène est le même pour l'humidité répartie dans l'air mais les effets sont constatés à moindre échelle. On sait que l'air chaud peut contenir une plus grande quantité de vapeur d'eau que de l'air froid. L'humidité varie beaucoup d'une journée à l'autre, ce qui peut faire aussi varier la lumière incidente.

2.1.3 L'angle solaire

Il est facile de s'imaginer l'influence de l'angle solaire en comparant deux extrêmes: le Soleil de midi à celui juste avant le coucher. C'est évident qu'il fait plus clair lorsque le Soleil est haut dans le ciel que lorsqu'il est bas. Il est simple d'expliquer que l'angle solaire influe sur la quantité de lumière qui sera incidente à l'objet observé. Des rayons arrivant sur le sol avec un angle d'incidence plus élevé seront plus concentrés. Le schéma qui suit explique le phénomène.

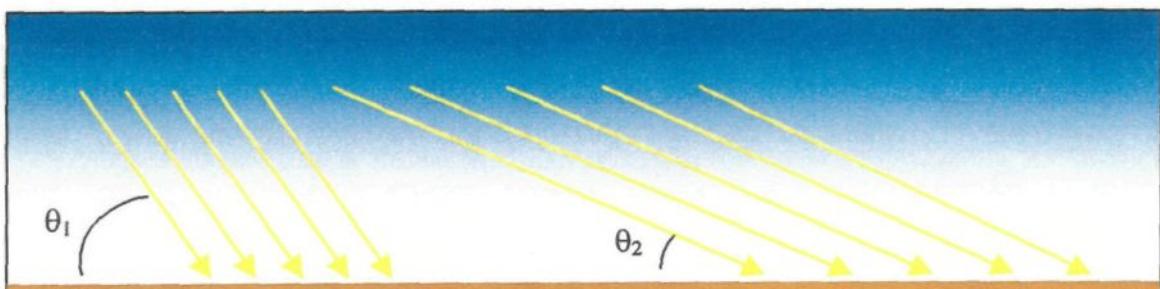


Figure 2.1: Schéma de l'angle d'incidence des rayons solaires à deux périodes différentes d'une journée.

Les rayons dans la partie gauche du schéma sont très concentrés au sol, c'est-à-dire qu'il y

en a une grande quantité par unité de surface. C'est ce qui se produit lorsque le Soleil est haut dans le ciel, vers 12h00. Sur la partie droite par contre, la même quantité de rayons va éclairer une surface plus grande. La surface sera donc moins éclairée. C'est d'ailleurs ce phénomène qui donne lieu aux saisons.

L'angle solaire influencera aussi la quantité d'ombre qui sera projetée au sol par un arbre. L'ombrage est un des facteurs les plus perturbateurs dans la relation réflectance du couvert forestier/efficience d'interception de la lumière (Leblon et al., 1993). En effet, si l'on observe une forêt, l'ombre d'arbres plus grands sur les plus petits influencera beaucoup la quantité de lumière qu'ils réfléchiront (voir figure 2.2). Leblon et al. (1993) expliquent la variabilité dans les relations empiriques entre la réflectance et certains paramètres biologiques ainsi que l'effet, sur cette réflectance, de l'angle de visée et de l'élévation solaire. (Se référer à la section 2.2.2)

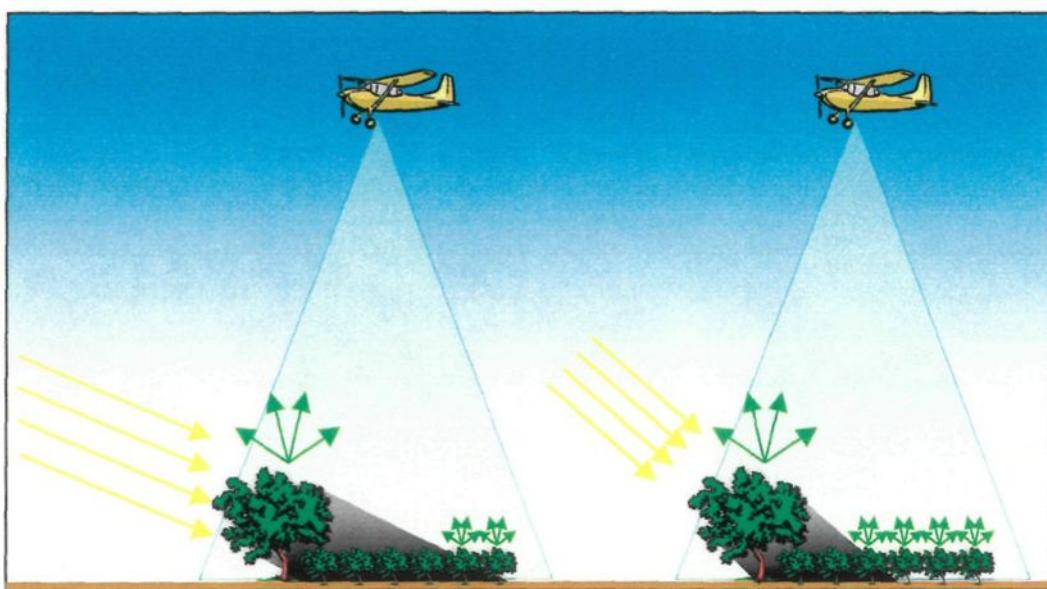


Figure 2.2: Schéma de l'influence de l'ombre d'un arbre à deux périodes différentes d'une journée.

Cela est un problème en télédétection aérienne qui est presque impossible à régler. En effet, lors de qualifications de différents types de végétation, l'ombre sera interprétée comme une classe distincte par un ordinateur. Nous savons pertinemment que cela n'est pas le cas mais il est parfois difficile de classer manuellement ces zones d'ombre. La configuration du terrain ne nous permet pas toujours d'être certain des types de végétaux qui étaient dans l'ombre au moment de la prise de l'information. Ce travail peut donc vite devenir compliqué lorsqu'on est dans une zone où il y a une grande diversité végétale. La solution à ce problème est de toujours voler le plus près de midi possible, mais ceci diminuerait encore les possibilités de faire des vols de télédétection.

2.1.4 La diffusion moléculaire de Rayleigh

Un autre phénomène qui influencera la quantité de lumière incidente est la diffusion moléculaire de Rayleigh. C'est ce phénomène qui fait que le ciel est bleu et que les couchers de Soleil sont rouges. C'est que l'atmosphère de la terre discrimine beaucoup en transmission parmi les différentes longueurs d'ondes que nous envoie le Soleil. On peut facilement s'apercevoir de ce phénomène dans le bleu car cette longueur d'onde est diffusée dans toutes les directions du ciel, ce qui lui donne cette couleur.

La composition chimique de l'atmosphère est directement responsable de la tournure de ce phénomène. À titre de comparaison, l'atmosphère de la planète Mars, qui est composée en grande majorité de CO₂, est rosée et les couchers de Soleil sont bleus. L'effet qu'aura l'atmosphère sur la lumière incidente du Soleil est donc directement relié à la

longueur d'onde de cette dernière.

Par définition, la diffusion moléculaire de Rayleigh est une diffusion élastique de la radiation optique, due au déplacement du nuage électronique faiblement délimité entourant la molécule gazeuse, qui est perturbée par le champ électromagnétique (optique) incident. Ce phénomène est associé avec la diffusion optique où la longueur d'onde de la lumière est beaucoup plus grande que la grandeur physique des éléments diffuseurs (molécules atmosphériques). La diffusion de Rayleigh a été décrite en premier par Lord Rayleigh en 1871, d'où le nom.

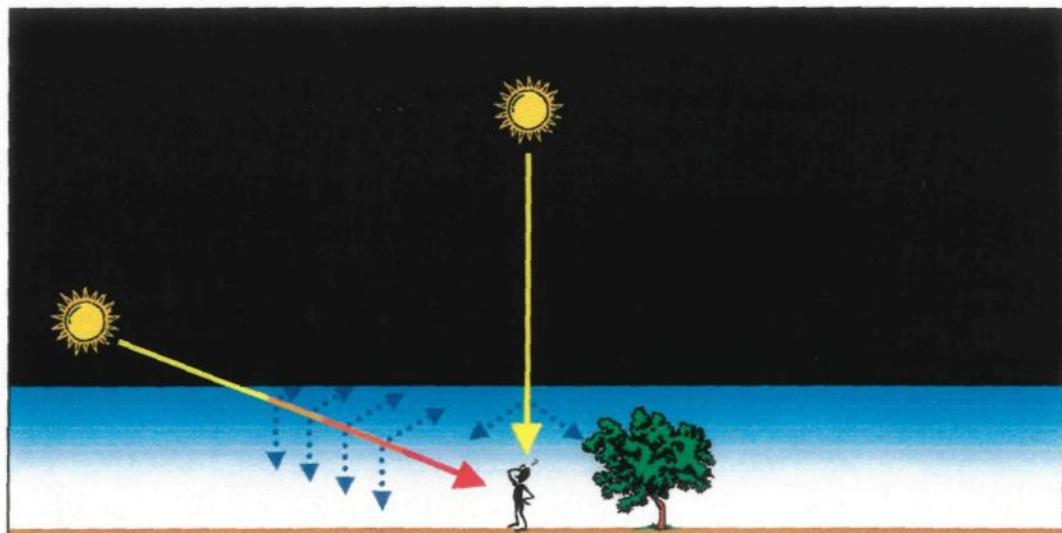


Figure 2.3: Diffusion moléculaire de Rayleigh. Schéma illustrant l'influence sur la lumière incidente au sol de l'épaisseur de la couche d'atmosphère traversée par la lumière solaire.

Cette diffusion, dans le visible, est inversement proportionnelle à la longueur d'onde de la lumière à la quatrième puissance. Prenons par exemple le bleu, avec une longueur d'onde de 450 nm. Si nous comparons sa diffusion dans l'atmosphère à celle du rouge, dont la longueur d'onde est environ une fois et demi celle du bleu, donc 675 nm, la diffusion

moléculaire de Rayleigh sera $(1,5)^4$ fois plus importante pour le bleu que pour le rouge, soit environ un facteur 5. Alors, pour un observateur à la surface de la Terre, dépendamment de l'angle du Soleil avec la surface, un faisceau traversera une épaisseur plus ou moins grande d'atmosphère. Plus le trajet du faisceau sera long dans l'atmosphère et plus la lumière de courte longueur d'onde, comme le bleu, sera retirée en grande partie du spectre incident. Ceci influencera inévitablement ce que réfléchiront les objets au sol car ils ne peuvent évidemment pas réfléchir ce qu'ils ne reçoivent pas.

2.2 Facteurs influençant l'albédo de la végétation

2.2.1 Les stades phénologiques

Les stades phénologiques sont des variations des phénomènes périodiques de la vie végétale et animale en fonction du climat. La plupart du temps, le passage d'un stade à un autre s'associe à une variation de la réflectivité dans le domaine du visible et encore plus dans le proche infrarouge, à cause des variations de la quantité de chlorophylle produite. Voici les stades phénologiques de différents végétaux.

Les Conifères (Gymnospermes)

- Végétatif: Étape phénologique lors de laquelle la plante ne possède aucune structure reproductrice.
- Bourgeons: Étapes lors de laquelle les bourgeons des cônes sont présents, mais non développés.
- Cônes reproducteurs: Étape où les cônes sont matures, prêt à disperser leur pollen (mâle) ou à le recevoir (femelle), mais où la pollinisation n'est pas commencée.

- Sporulation: Étape de dispersion du pollen. Une poudre généralement jaunâtre apparaît au toucher des cônes mâles.
- Maturation des graines: Étape où la pollinisation a été effectuée et où les graines deviennent matures et prêtes à être dispersées. Cependant, chez certains conifères, la dispersion des graines n'aura lieu qu'après le passage d'un feu de forêt.

Les Fougères, Prêles, Lycopodes et groupes affiliés

- Végétatif: Étape phénologique lors de laquelle la plante ne possède aucune structure reproductrice.
- Sore: Étape du développement des organes de reproduction. Les spores ou les strobiles sont bien définies, mais non matures (généralement verdâtres); les sporanges des strobiles sont aussi non matures.
- Sporange: Étape où le matériel des sporanges est mature mais non ouvert (jaunes ou orangés).
- Sporulation: Étape de la dispersion des spores. On peut parfois observer des sporanges déchirées. Une poudre généralement jaunâtre apparaît au toucher.

Les plantes à fleurs (Angiospermes)

- Végétatif: Étape phénologique lors de laquelle la plante ne possède aucune structure reproductrice.
- Inflorescence: Étape représentant le tout début de la croissance des structures reproductrices; les bourgeons floraux ne sont pas distincts.

- Bourgeons: Étape lors de laquelle les bourgeons floraux sont distincts; les fleurs n'ont pas débuté leur ouverture.
- Anthèse: Étape lors de laquelle les fleurs sont ouvertes; la pollinisation n'est pas commencée.
- Pleine floraison: Étapes où les fleurs sont matures et où la pollinisation a débuté. Il est possible de distinguer des grains de pollen sur les étamines, ou sur les stigmates des fleurs femelles.
- Fleurs à fruits: Étapes intermédiaires où les fleurs ont été pollinisées et où la transformation de la fleur en fruit a débuté. Les fruits ne sont pas matures.
- Pleine fructification: Étapes lors de laquelle les fruits sont formés, matures et où les graines sont prêtes à être dispersées.

Étant donné que les végétaux en bonne condition vont passer à travers chacun de ces stades durant une année, leur discrimination à l'aide de la télédétection est une manière relativement facile et rapide d'avoir une idée d'ensemble de l'état d'un territoire. Puisque les passages d'un stade à l'autre sont espacés dans le temps, voilà pourquoi il est nécessaire d'avoir un capteur calibré en réflectance.

2.2.2 La réflectance bidirectionnelle

En télédétection, dans le cas de la réflexion du rayonnement solaire par la surface terrestre, les réflexions spéculaires observées sont rares ; il faut en effet que l'élément de surface réfléchissante soit lisse et que sa taille soit au moins celle du pixel (ce qui peut être

le cas sur de l'eau libre), de manière à ce que cet élément puisse réfléchir suffisamment de lumière pour être observable.



Figure 2.4: Représentations schématiques de la différence entre les réflexions spéculaires, lambertienne et non-lambertienne.

Un corps qui donne lieu à une réflexion spéculaire apparaît donc sombre (ou noir) sur les images, sauf si le capteur est exactement dans la direction du rayon réfléchi. Par contre, la plupart des corps à la surface de la terre agissent comme des diffuseurs et on enregistre en général de l'énergie réfléchie diffuse quelle que soit la direction d'observation du capteur.

L'énergie réfléchie par la surface terrestre est fonction: 1° de la direction du Soleil par rapport à l'objet observé. Il s'agit de la direction de l'énergie incidente, caractérisée par les angles θ_i , ϕ_i , ou encore θ_s , ϕ_s la source incidente étant le Soleil); 2° de la direction suivant laquelle le capteur vise l'objet observé. (il s'agit de la direction de l'énergie réfléchie, caractérisée par les angles θ_r , ϕ_r). La réflectance dépendant de 2 directions, celle du Soleil et celle du capteur, on utilise le terme de réflectance bidirectionnelle. Elle est de plus fonction de la longueur d'onde d'observation λ .

On la désigne donc par :

$$\rho_\lambda (\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \pi \cdot L_\lambda (\theta_r, \phi_r) / E_{i\lambda} (\theta_i, \phi_i)$$

avec

$E_{i\lambda}(\theta_i, \phi_i)$: éclairement incident du Soleil suivant la direction (θ_i, ϕ_i)

$L_{\lambda}(\theta_r, \phi_r)$: luminance mesurée dans la direction d'observation (θ_r, ϕ_r) .

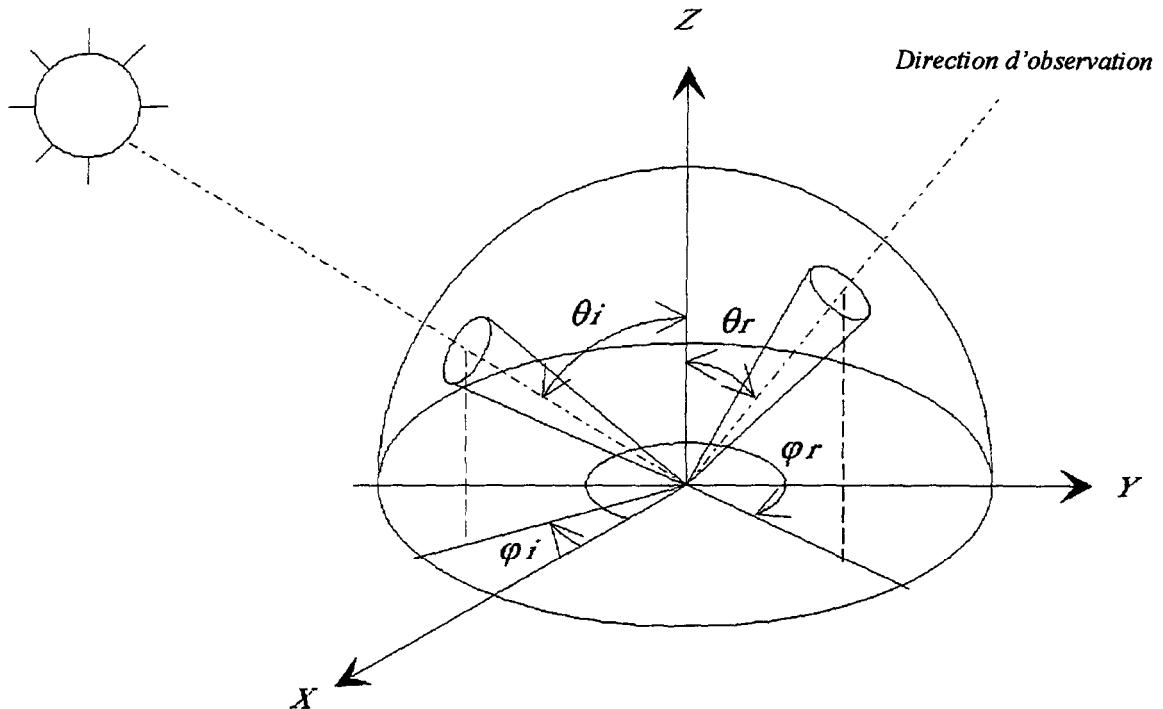


Figure 2.4: Le concept de la réflectance bidirectionnelle

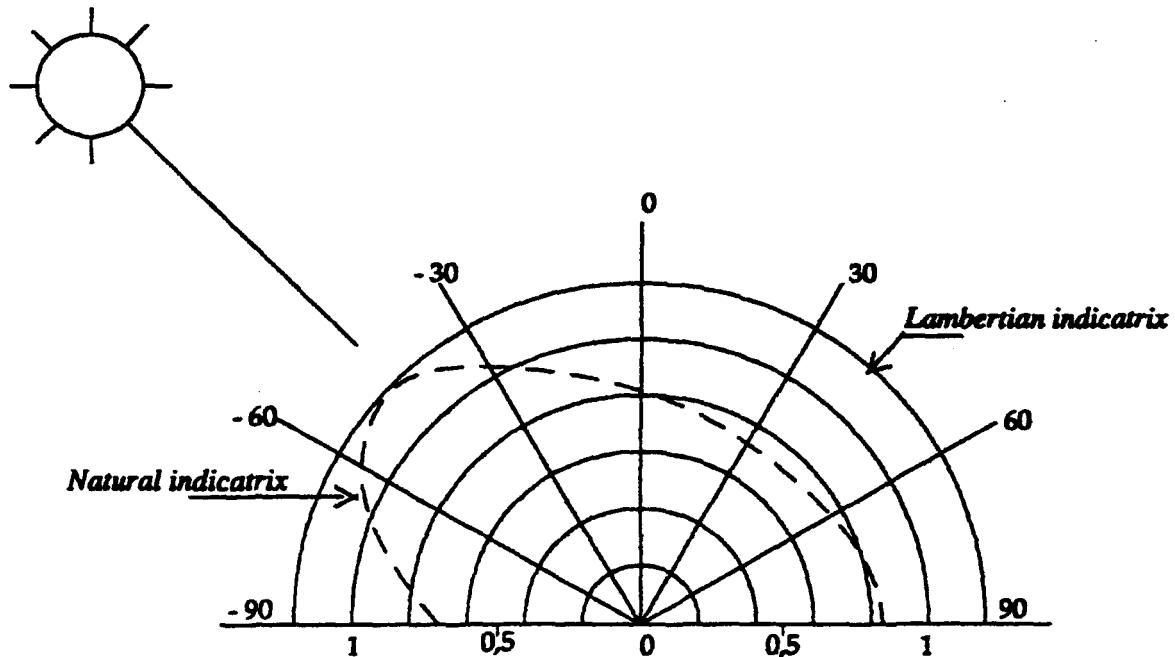
En réalité, du fait de la diffusion du rayonnement solaire par l'atmosphère (voir section 2.1.4 sur la diffusion moléculaire de Rayleigh), l'éclairement reçu par un élément de la surface terrestre $E_{i\lambda}(\theta_i, \phi_i)$ ne provient pas uniquement, comme on l'a déjà vu, de la direction du Soleil (éclairement direct) mais de tout l'hémisphère supérieur (éclairement diffus provenant du ciel, des nuages, de l'environnement proche). On peut alors se poser la question suivante: l'éclairement incident étant intégré sur tout l'hémisphère supérieur,

pourquoi la direction du Soleil est-elle importante? Tout simplement parce que l'énergie de l'éclairement diffus incident, venant de l'hémisphère supérieur, dépend de la hauteur du Soleil; en effet, malgré la diffusion, l'éclairement est plus important lorsque le Soleil est haut dans le ciel que lorsqu'il est bas sur l'horizon, par un simple effet d'incidence: le flux reçu par unité de surface horizontale éclairée suivant θ_i est affecté par le coefficient $\cos \theta_i$ (par nature inférieur à 1), par rapport au flux qui serait reçu par l'unité de surface normale au rayon incident (voir section 2.1.3). De plus, nous avons vu à la section 2.1.4 que la couche d'atmosphère traversée est plus importante dans le cas d'une incidence oblique; il y a donc un phénomène d'atténuation.

Les proportions relatives d'éclairement direct et diffus varient dans la journée (par journée très claire, lors de la culmination du Soleil, on a 90% d'éclairement direct et 10% d'éclairement diffus; en fin de journée, le pourcentage d'éclairement diffus est plus important). Voilà pourquoi la puissance reçue par la surface terrestre (ou éclairement incident), dépend des angles définissant la direction du Soleil, donc sa position : θ_i, ϕ_i .

Du fait que la luminance renvoyée vers le capteur est définie de manière directionnelle alors que l'éclairement reçu par la surface provient de tout l'hémisphère supérieur, on utilise au numérateur, π , comme facteur de normalisation (certains auteurs n'utilisent pas ce facteur π). Dans la plupart des cas, les surfaces naturelles provoquent des réflexions diffuses, réparties dans de nombreuses directions. Si l'énergie renvoyée est exactement la même dans toutes les directions, la surface est dite lambertienne. Dans ce

cas, la luminance et la réflectance sont toutes deux indépendantes des angles de visée θ_r et φ_r .



La figure 2.5 montre une indicatrice de luminance en coordonnées polaires : variation de la luminance mesurée (lue sur le rayon) en fonction de l'angle de visée. Pour une surface parfaitement lambertienne, l'indicatrice de luminance est représentée par un cercle. (Remarque: Dans un plan méridional, entre une position du Soleil dans le méridien, lors de la culmination et un Soleil bas sur l'horizon, l'éclairement varie, mais, pour un même angle de visée, la réflectance d'une surface lambertienne est indépendante de la position du Soleil). Une surface est dite lambertienne si $\rho(\lambda)$ ne dépend d'aucun des 4 paramètres angulaires θ_i , φ_i , θ_r , φ_r de la formule énoncée plus haut définissant la réflectance

bidirectionnelle. En télédétection, dans le cas de la réflectance bidirectionnelle, on utilise souvent la différence angulaire ϕ entre l'azimut du capteur et l'azimut du Soleil :

$$\phi = \Phi_r - \Phi_i$$

Si $\phi = 0^\circ$, on a à faire à une visée dos au Soleil (*backscatter reflectance*) ou en rétrodiffusion (cas du radar latéral).

Si $\phi = 180^\circ$ c'est une visée face au Soleil.

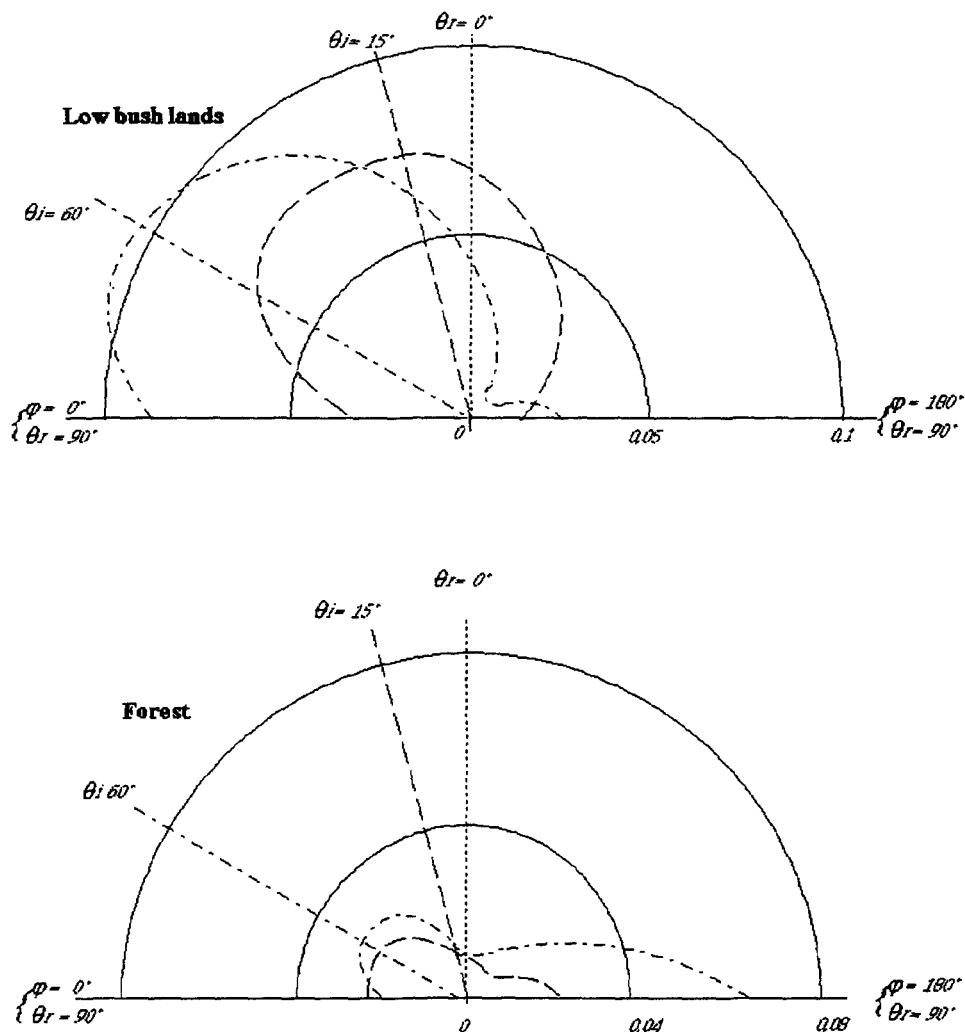


Figure 2.6: Exemples d'indicatrices de réflectance observées dans le plan du Soleil. (Source: voir anonyme)

Les courbes de la figure 2.6 ont été obtenues à partir de mesures radiométriques de terrain. Pour un type d'occupation du sol, on fait varier la position du capteur, représentée par l'angle θ_r . On obtient ainsi une indicatrice de réflectance précisant la direction de diffusion maximale de la surface considérée (surface non-lambertienne). On remarque, en outre, que les effets directionnels sont amplifiés lorsque l'angle zénithal solaire θ_i est grand. On peut définir une réflectance hémisphérique $\rho_\lambda(\theta_i, \phi_i)$ comme le rapport entre l'émittance intégrée sur tout l'hémisphère et l'éclairement suivant la direction (θ_i, ϕ_i) .

On comprend maintenant qu'il y a plusieurs facteurs qui influencent la quantité de lumière qui sera reçue par le capteur. C'est d'ailleurs leur présence qui amène la nécessité de connaître le contenu spectral de la lumière incidente. Puisque toutes ces raisons justifient la mise au point d'un spectromètre imageur, voyons maintenant la manière dont nous nous y prendrons pour y arriver.

III

MÉTHODOLOGIE

3.1 Description du principe de base du système optique

Ce projet de recherche est très expérimental. La première et principale partie consistera à concevoir, à partir du système optique de la VAM (Vidéographie aérienne multispectrale) qui consiste en une version modifiée du capteur vidéographique monocaméra Xybion MSC-02, un nouveau système optique qui pourra intégrer un système capteur de lumière incidente. La simulation se fera à l'aide du logiciel de design optique *ZEMAX*. Ce logiciel est un outil très puissant qui a été développé par la firme *Focus Software inc.* Il devra préalablement y avoir des séances d'apprentissage car ce logiciel a récemment été acquis par le laboratoire de physique et aucun professeur n'a encore enseigné son utilisation.

Le nouveau système optique sera inévitablement plus compliqué que le premier. Il aura en commun avec l'ancien système un objectif principal, une roulette de filtres et un capteur CCD. Par contre, nous devrons y introduire le signal du capteur de lumière incidente (CLI) qui proviendra de la fibre optique. Ce signal, qui sera pourtant relativement simple à capter, sera nettement plus compliqué à intégrer à l'image. En effet, nous devrons introduire à l'intérieur du boîtier de la caméra, deux autres objectifs de

caméra, qui agiront comme système relais. Elles seront identiques et leur fonction sera de prendre l'image primaire de l'objectif principal augmentée du signal du CLI pour ensuite la transférer sur le CCD. Ceci est nécessaire car c'est seulement au point où l'image primaire se fait que l'on pourra introduire le signal de la lumière incidente. Voici un schéma de l'idée générale du système:

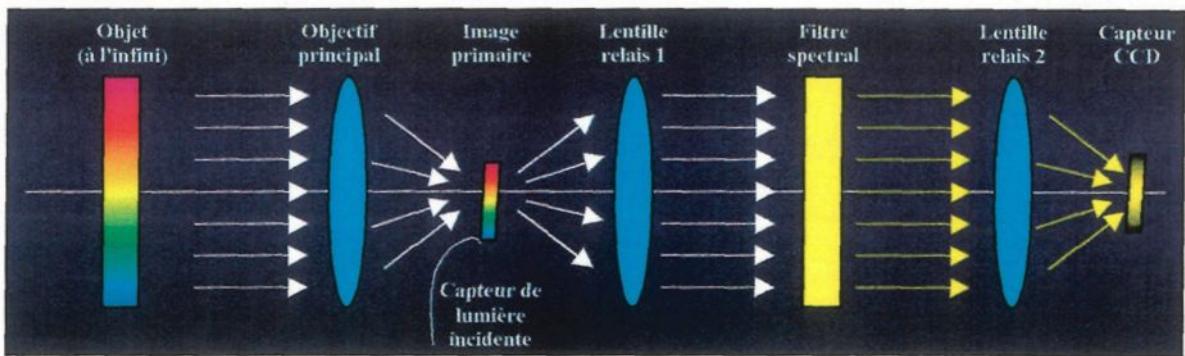


Figure 3.1: Principe général du système optique du réflectomètre imageur.

Comme on peut le voir sur la figure 3.1, l'objectif principal fait une image primaire d'un objet, considéré à toute fin pratique, à l'infini. La fibre optique amène le signal du capteur de lumière incidente au point où se fait l'image primaire de sorte que la lentille relais 1 capte une nouvelle image. C'est celle de l'objet avec en un de ses coins un point lumineux d'intensité proportionnelle à la lumière incidente. La lentille relais 1 redirige le faisceau divergent pour que les rayons sortants soient parallèles entre eux. En faisant passer les rayons à travers les filtres interférentiels ou dichroïques de cette manière, l'épaisseur de ces derniers n'est pas un facteur d'aberration chromatique longitudinale, comme c'était le cas dans l'ancien système. Il sera maintenant inutile de faire des corrections d'épaisseur de filtres comme on devait le faire auparavant, tel qu'expliqué par Verreault (1997). Le filtre spectral ne laissera évidemment passer que les longueurs

d'ondes présentes dans l'image qui correspondent à sa bande passante. Cette nouvelle lumière filtrée sera ensuite recollimée par la lentille relais 2 sur le capteur CCD.

Ceci est un schéma qui explique le principe général du système. Il sera passablement plus compliqué au niveau des éléments optiques de manière à obtenir la meilleure qualité d'image possible. Chacune des lentilles relais sera un objectif commercial de caméra. Ce genre d'optique sera privilégié car ils sont déjà conçus pour donner une qualité d'image optimale. Il faudra tenter d'obtenir de compagnies qui fabriquent ce genre d'objectifs, les caractéristiques de chacune des lentilles qui sont à l'intérieur. Nous aurons besoin pour chacune d'entre elles, des rayons de courbures, des diamètres, des distances qui les séparent, des indices de réfraction et de la dispersion des verres. Toutes ces caractéristiques sont nécessaires afin de nous permettre de simuler le système optique complet avec le logiciel *ZEMAX*.

3.2 Simulation du système optique

3.2.1 Principe de base de la caméra

Le système optique complet sera simulé avec le logiciel *ZEMAX*. Le diagramme 3.1 illustre le système optique représenté à la figure 3.1 qui est une explication du principe de base du réflectomètre.

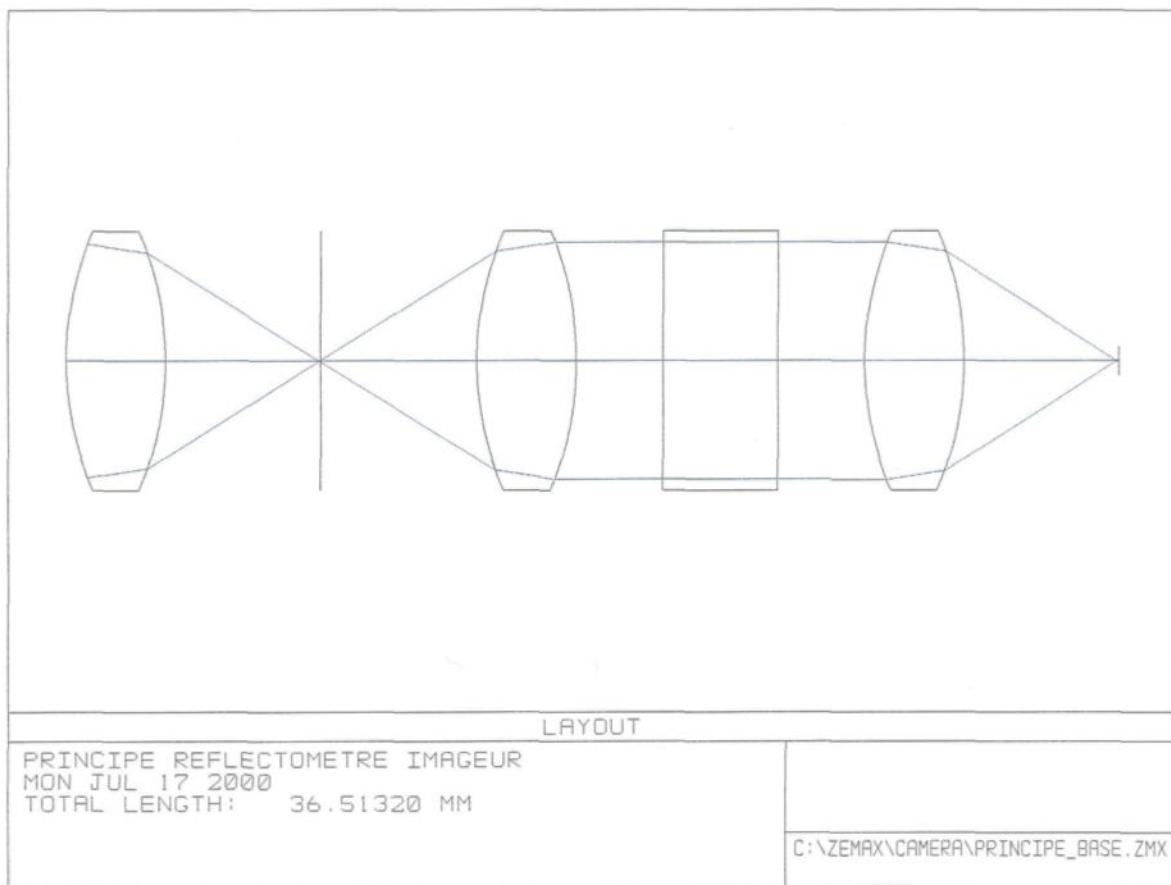


Diagramme 3.1: Représentation du principe du réflectomètre imageur avec le logiciel *ZEMAX*.

Par contre, cette figure a été créée avec le logiciel *ZEMAX*. Le tracé des rayons et des lentilles a été fait à partir de données numériques qui ont été entrées dans un tableau nommé *Lens Data Editor* très semblable à celui-ci:

#	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
Obj	Objet	Infinity	Inifinity		Infinity
1	Lentille 1d	11,3801	3,45	SF5	4,5
2	Lentille 1f	-11,3801	5,4		4,5
3	Image primaire	Infinity	5,4		4,5
sto	Lentille 2d	11,3801	3,45	SF5	4,5
5	Lentille 2f	-11,3801	3		4,5
6	filtre d	Infinity	4	BK7	4,5
7	filtre f	Infinity	3		4,5
8	Lentille 3d	11,3801	3,45	SF5	4,5
9	Lentille 3f	-11,3801	5,4		4,5
ima	Capteur CCD	Infinity			0,5

Tableau 3.1: Tableau des données des lentilles dans le logiciel *ZEMAX*

C'est dans ce tableau que l'on écrit toutes les caractéristiques des lentilles de notre système. Ici, les données qui sont écrites correspondent au système de la figure 3.2. Décortiquons la première ligne:

#	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
Obj	Objet	Infinity	Inifinity		Infinity

Tableau 3.2: Première ligne d'informations du *Lens Data Editor*.

La ligne intitulée "Obj" est celle où l'on introduit les caractéristiques de l'objet. La définition de cet objet peut être écrite par l'utilisateur dans la colonne "Comment". L'objet est plan, son rayon de courbure est donc infini ("infinity" dans la colonne "Radius"). Il est situé à une distance infinie de la première lentille, ce qui est mentionné dans la colonne "Thickness". Comme ce n'est pas une lentille, il n'y a pas de type de verre dans la colonne "Glass". Il a une dimension infinie, alors son "Semi-Diameter" est "infinity". Ce sont des caractéristiques raisonnables pour une caméra aéroportée qui pointe vers le sol. Même si

rien de tout cela n'est réellement infini, l'approximation est très proche de la réalité.

Voyons maintenant la façon de décrire la première lentille du système:

Lens Data editor					
#	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
obj	Objet	Infinity	Inifinity		Infinity
1	Lentille 1e	11,3801	3,45	SF5	4,5
2	Lentille 1s	-11,3801	5,4		4,5
3	Image primaire	Infinity	6,0		4,5

Tableau 3.3: Informations sur la première lentille.

ZEMAX fonctionne avec des surfaces. Une lentille a donc deux surfaces: celle par laquelle la lumière entre et celle par laquelle la lumière sort. Elles sont numérotées ici respectivement 1 et 2. Elles ont été nommées "Lentille 1e" pour « lentille 1 entrée » et "Lentille 1s" pour « lentille 1 sortie ». La première surface a un rayon de courbure de 11,3801 mm. Elle est séparée de l'autre surface par une épaisseur de 3,45 mm de verre de type SF5.

La deuxième surface a un rayon de courbure de même valeur mais dans l'autre sens, ce qui est indiqué par le -11.3801. Ce type de lentille est donc une lentille biconvexe avec la même courbure sur chacune des faces. Le rayon de la lentille est donné dans la colonne appelée "Semi-Diameter" et est donc de 4,5 mm. L'image primaire est située à 5,4 mm derrière la deuxième surface ("Thickness" de la surface 2). Cette dernière est plane ("Radius" = infinity). La prochaine surface est située à 6,0 mm de l'image et ainsi de suite.

3.2.2 Principe de base du capteur de lumière incidente

Xu et al. (1993) ont utilisé un disque plat de téflon monté dans un boîtier spécial dans le toit de l'avion qui transmettait un flux diffus proportionnel à l'irradiance incidente planaire. Une fibre optique transmet le signal, dans leur CASI, à la fente d'entrée, dont l'image est faite sur une région inutilisée du capteur.

Le principe de base de notre système sera tout à fait semblable, mais il sera couplé sur le système de VAM. Nous pensons utiliser un disque de verre dépoli au lieu d'un disque de téflon pour avoir de meilleures propriétés optiques. Tout comme Xu et al. (1993), la distance entre l'entrée de la fibre optique et le verre dépoli sera ajustée précisément de manière à avoir une bonne réponse en irradiance planaire. L'image de la fibre optique sera amenée au système de la caméra à l'aide d'un minuscule prisme fixé à la sortie de la fibre optique.

3.3 Les outils d'évaluation de la performance optique du système

3.3.1 Représentation graphique du système optique de la caméra

Le système qui est représenté au diagramme 3.1 est un système relativement simple. Le fait de travailler avec des rayons qui ne se situent pas nécessairement parallèlement à l'axe optique, en plus d'être polychromatiques complique beaucoup le problème. Il y a plusieurs outils dans *ZEMAX* qui peuvent nous permettre de savoir si un système optique est performant. Prenons par exemple un système optique relativement simple avec une bonne définition pour certains usages, le triplet "Cooke".

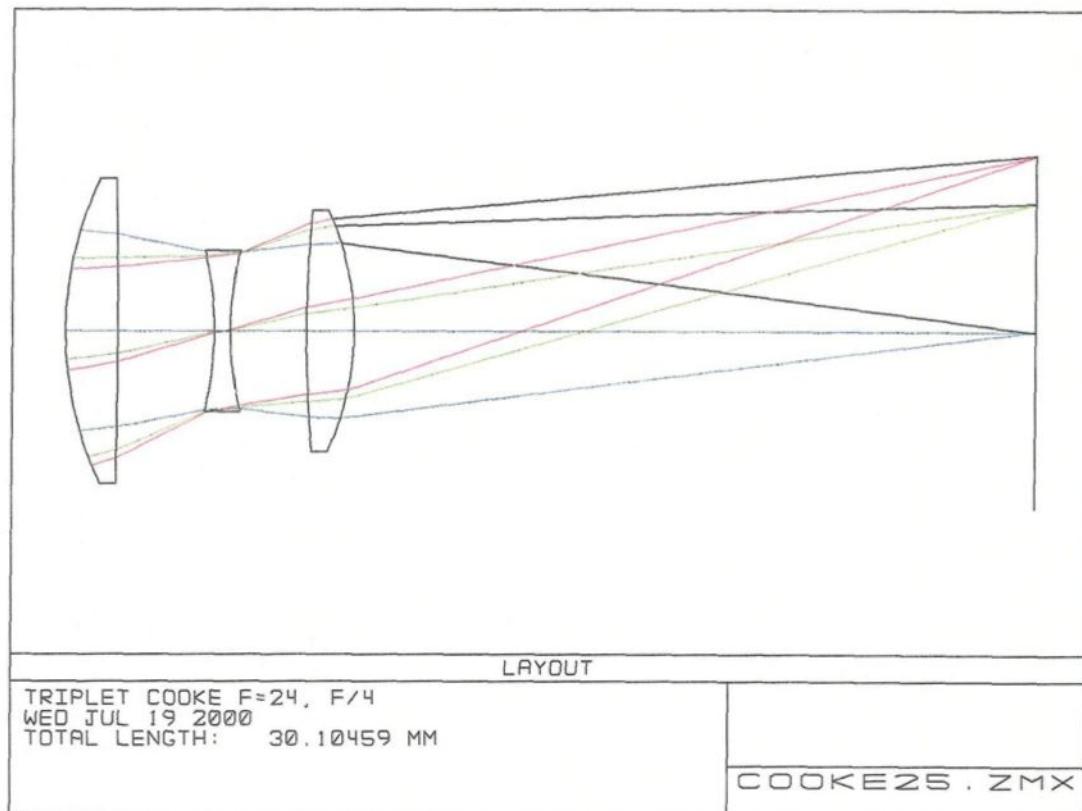


Diagramme 3.2: Le triplet "Cooke"

Sur ce schéma, les rayons arrivent d'un objet ponctuel situé à l'infini à gauche de manière à former sur le plan situé à l'extrême droite, une image de l'objet observé. Ils doivent traverser trois différentes lentilles. Une biconvexe au début, suivie par une biconcave et enfin une autre biconvexe. Les rayons arrivent à des angles calculés de manière à ce qu'ils emplissent le champ d'une caméra CCD de format 2/3".

3.3.2 Diagramme des taches sur le plan image

L'un des outils les plus utiles de *ZEMAX* est sans doute le "Spot Diagram". Il nous permet connaître la netteté des images d'un point objet, en nous donnant la dimension des taches qui résultent de la convergence des rayons sur le plan image.

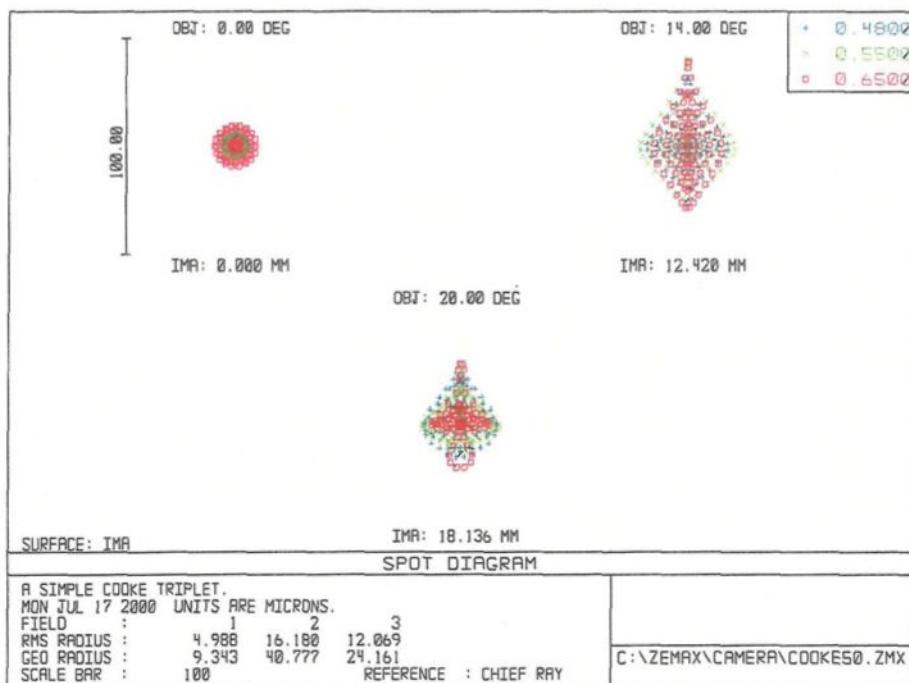


Diagramme 3.3: Le diagramme des taches sur le plan image du triplet Cooke

Nous voulons dans notre cas faire une image du sol sur un capteur CCD de format

2/3". Le capteur a une forme rectangulaire de 6,6 par 8,8 mm. La diagonale est de 11 mm. Le champ que devra couvrir la moitié de la diagonale de l'image, donc de 5,5 mm de chaque côté de l'axe optique. Cela peut sembler très petit mais il faut tout de même que l'image soit très bonne sur toute la surface du CCD. Ceci veut dire pour nous qu'un point situé n'importe où dans le champ de vision de la caméra doit être imaginé sur la surface d'un pixel du CCD. Les pixels dans ce format de caméra ont une dimension de 11 x 13 microns. L'image du point devra donc excéder le moins possible cette dimension, pour garder le plus de piqué possible.

Le triplet est représenté recevant des rayons de l'infini qui vont s'imager à 0, 4 et 5,5 mm par rapport à l'axe optique, sur le plan image. Ils sont respectivement les triplets de rayons bleus, verts et rouges (leur couleur n'a rien à voir avec la longueur d'onde de la lumière utilisée). Ils sont colorés pour permettre de les différencier angulairement. On peut voir qu'ils vont tous converger sur un plan image avec, semble-t-il, une grande précision. C'est ici que le "Spot diagram" intervient. Il nous informe sur la dimension réelle et la forme des points qui iront converger sur le plan image.

Chacun des schémas de taches est une simulation de l'image d'un point à l'endroit où iraient converger des rayons de trois longueurs d'ondes différentes, arrivant à une position particulière sur le plan image. Ces longueurs d'ondes présélectionnées sont dans ce cas, 480, 550 et 650 nm. Il y a une tache pour chacun des trois endroits différents où l'image se forme (0, 4 et 5,5 mm). Ce qui nous intéresse particulièrement est la ligne "RMS

"RADIUS" dans le bas du cadre de la figure. Cette dernière nous indique le rayon des taches en micromètres. Comme on peut le voir, cet objectif n'aurait pas suffisamment de définition pour être utilisé avec un système à capteur CCD. L'image serait un peu floue surtout en dehors du centre de l'image, car un point serait imagé sur plus d'un pixel.

3.3.3 Courbure de champ et distorsion

Un autre outil très utile est le diagramme intitulé "Field Curvature and Distortion" qui nous révèle la courbure de champ, l'astigmatisme et la distorsion de l'image.

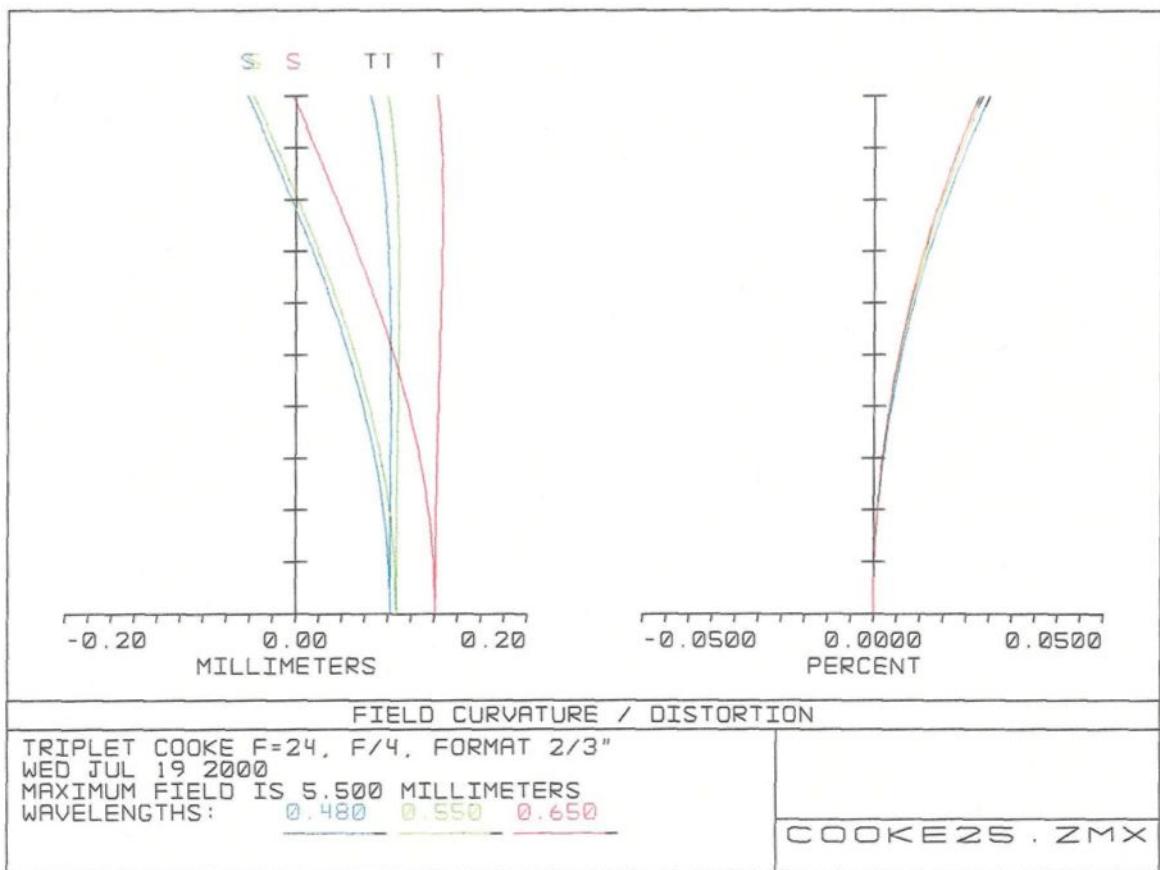


Diagramme 3.4: Graphique de la courbure de champ et de la distorsion du triplet Cooke

Les courbes sur le diagramme de la courbure de champ nous informent sur l'endroit

réel où les rayons d'une longueur d'onde donnée convergent. Ce sont les courbes bleues, vertes et rouges. L'axe vertical représente le plan de l'image, étalé de 0 à 5,5 mm. On différencie les courbes "T" pour tangentiel et "S" pour sagittal représentent l'endroit, par rapport au plan image, où les rayons auraient tendance à se focaliser. La différence entre les deux est que les rayons tangentiels arrivent dans un plan vertical alors que les rayons sagittaux arrivent dans un plan horizontal. Les courbes "tangentielle" sont celles qui nous intéressent ici car elles représentent les rayons qui sont dans un plan incident vertical, comme sur la figure 3.4.

Dans le cas présent, on peut apercevoir sur le graphique que les rayons tangentiels convergent derrière le plan image. Les rayons bleus à 480 nm sont ceux qui se forment le plus près du plan image, à environ 0,08 mm derrière ce dernier. Les rouges se focalisent le plus loin, à environ 0,12 mm. Tous les rayons tangentiels sont défocalisés. D'autre part, les rayons sagittaux sont au point à environ 4,2 mm pour les verts et les bleus, alors que les rouges sont au point à l'extrémité du champ, soit à 5,5 mm. On a dans ce cas ce que l'on appelle de la courbure de champ: très peu pour les rayons tangentiels, mais beaucoup plus pour les rayons sagittaux. Ceci est une défocalisation des rayons qui dépend de l'angle incident. Dans notre système optique, il faudra y avoir le moins de courbure de champ possible. Ceci nous explique la dimension et la forme des points sur le "Spot Diagram".

De plus, le point où les rayons se focalisent pour un même angle n'est pas le même pour toutes les longueurs d'onde. C'est évident de par le fait que les courbes de couleurs

distinctes ne sont pas superposées. Ceci se nomme l'aberration chromatique. Nous aurons la chance d'y revenir sous peu.

Les courbes sagittales et tangentialles représentent les positions vers lesquelles les plans horizontaux et verticaux de rayons convergent, en fonction de l'angle d'incidence. On peut voir que pour une même longueur d'onde, les courbes "S" et "T" ne sont pas du tout superposées. Ce défaut se nomme astigmatisme. C'est aussi un défaut qu'il faudra éviter le plus possible dans le cadre de ce projet de recherche.

À l'aide de la partie de droite du diagramme, on peut constater sur le graphique de distorsion que le triplet "Cooke" n'a pas une grande distorsion. Ceci est le changement de proportion de l'image en fonction de l'angle des rayons. Ici, les rayons les plus marginaux vont se situer environ 0,025 % plus aux extrémités de l'image que sur l'objet réel. C'est le genre de distorsion que tout designer d'optique voudrait obtenir. Ce critère ne sera pas le facteur le plus déterminant pour nous car la distorsion peut se corriger par informatique par un rééchantillonnage des images.

3.3.4 Les aberrations chromatiques longitudinales

Un autre outil très utile est le diagramme "Chromatic Focal Shift". Il nous renseigne sur la variation de la position du plan focal en fonction de la longueur d'onde de la lumière incidente. Voyons comment varie la position du plan focal de notre triplet "Cooke" en fonction de la longueur d'onde. On sait que l'indice de réfraction d'un milieu

varie en fonction de la longueur d'onde de la lumière qui passe dans ce dernier. Autrement dit, des rayons de différentes longueurs d'onde ne seront pas réfractés avec le même angle en passant à travers un même milieu. S'ils viennent de l'infini et passent dans une lentille convergente par exemple, ils ne seront pas focalisés au même point. On l'a vu dans le diagramme "Field Curvature and Distortion". Ceci n'est pas le genre de chose que l'on souhaite en imagerie. On obtiendrait une image nette pour une seule longueur d'onde et toutes les autres seraient floues.

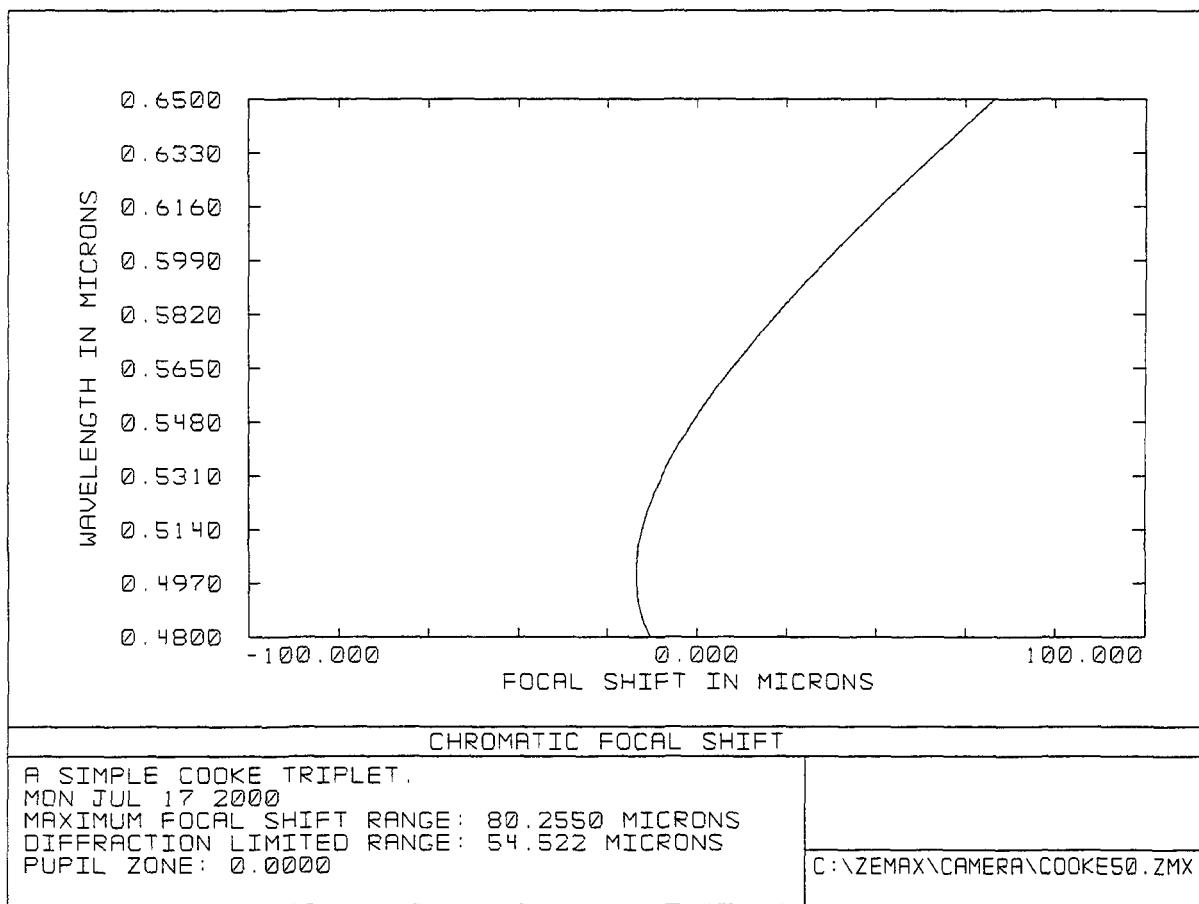


Diagramme 3.5: Décalage chromatique du plan focal du triplet Cooke

La courbe de ce graphique nous révèle que la variation de la position du plan focal

s'étale sur environ 80 micromètres si l'on utilise le triplet de 480 à 650 nm, c'est à dire du bleu au rouge. Supposons que l'on place le plan focal pour que les rayons bleus soient au point. Les rayons cyan à 500 nm se focaliseront devant le plan image alors que ceux de 520 nm seront aussi au point. Tous les autres rayons se focaliseront derrière le plan image. Ce système ne fournit donc pas une grande qualité polychromatique d'image. Il souffre d'aberration chromatique. Voici une représentation d'un cas extrême d'aberration chromatique.

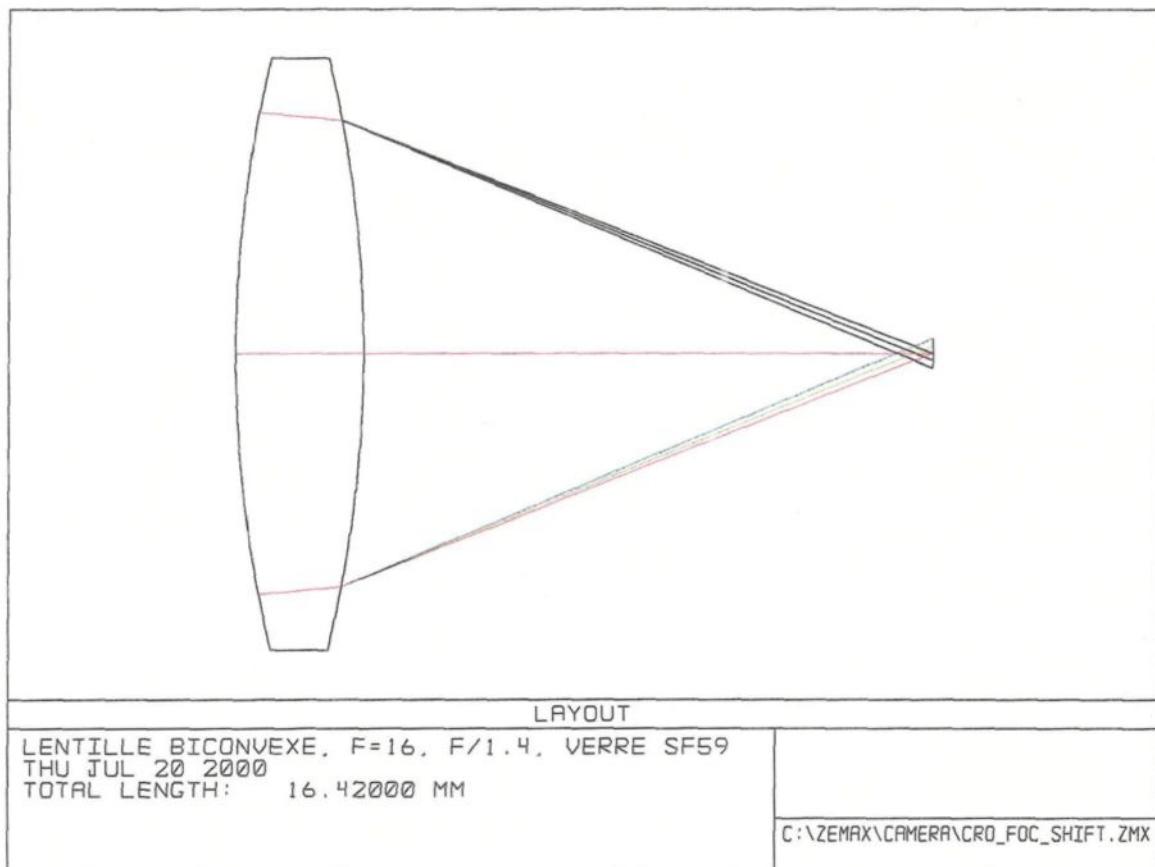


Diagramme 3.6: Représentation physique de l'aberration chromatique

Des rayons de longueurs d'onde de 480, 550 et 650 passent à travers cette lentille. On peut facilement voir que les rayons de chaque longueur d'onde ne sont pas réfractés

avec le même angle. Notre système devra être corrigé pour réduire les aberrations chromatiques au maximum.

3.4 Construction du système

Lorsque le design optique du système sera trouvé, ce qui prendra plusieurs mois, on pourra procéder à la commande du matériel nécessaire à la conception physique du système. Il s'agira alors de monter sur un support solide tout le système optique. Une des parties critiques sera de concevoir ce dernier de manière à ce que l'ensemble soit et reste toujours parfaitement aligné. En effet, le moindre désalignement résultera en une perte significative de la qualité d'image. Nous prévoyons que certaines pièces devront être machinées.

Le système électronique de l'ancien capteur sera conservé. Ce dernier servait entre autres à synchroniser la roulette de filtres avec le signal vidéo de la caméra, de manière à ce qu'il y ait un filtre devant le CCD à chaque fois que la caméra fait une prise d'images.

3.5 Configuration du système d'acquisition

Le capteur vidéo sera configuré pour que trois bandes spectrales soient acquises: le vert à 550 nm, le rouge à 650 nm et enfin, le proche infrarouge à 800 nm. Cette composition spectrale se compare avantageusement à la photographie aérienne traditionnelle infrarouge fausses couleurs, d'autant plus qu'elle nous permet d'utiliser la pleine résolution du système de caméra multispectrale (Mc Laughlin, 1999). Auparavant,

la caméra multispectrale était utilisée avec des filtres d'interférence lumineuse. Ces derniers permettaient d'avoir une bonne discrimination spectrale, ce qui implique des bandes passantes restreintes. Elles étaient de l'ordre de ± 35 nm. Puisque notre système sera plus complexe et comportera plus d'éléments optiques que l'ancien, nous prévoyons qu'il laissera passer une partie moins grande de lumière. Une diminution d'un facteur 2 serait envisageable selon nous. C'est pourquoi des filtres dichroïques seront employés. Ces derniers ont une bande passante aussi large que les filtres d'interférence à large bande passante (broadband interference filters) mais une meilleure transmissivité, ce qui nous permettra de compenser en partie pour la perte de luminosité encourue par le système.

Ces filtres seront montés dans une nouvelle évolution de la roulette de filtres qui nous permettra d'y monter les filtres sans avoir à les coller avec de la résine d'époxy.

3.6 Calibration

Lorsque le capteur sera en fonction, il y aura un travail de calibration à faire pour connaître les différents rapports d'intensité entre le système capteur d'images et le système capteur de lumière incidente. Ceci se fera à toutes les ouvertures numériques du système.

Le principe de base de notre design optique a été pensé de manière à ce que l'ouverture du diaphragme diminue la luminosité du point de lumière incidente du même facteur que le reste de l'image. La calibration à ce niveau sera très importante car elle nous permettra d'obtenir des facteurs de correspondance pour chaque ouverture. Nous aurons

seulement à tenir compte de certains facteurs lors du traitement informatique des images.

Il est certain que tout le travail de calibration ne pourra pas être effectué durant ce projet de maîtrise. C'est un travail qui sera long et qui pourrait facilement constituer à lui seul un gros projet pour un(e) étudiant(e) en fin de baccalauréat en physique. Il y a une multitude de principes optiques à comprendre et aussi une foule de manipulations à effectuer. On se rappellera tout le travail qui avait été nécessaire pour calibrer et modifier l'ancienne caméra lorsqu'elle est arrivée au Laboratoire de télédétection aérienne.

Le traitement des images pourra se faire à l'aide du logiciel *Boréa*. Celui-ci est un logiciel de traitement d'images dont certaines des fonctions le rendent particulièrement adapté à manipuler et traiter de grandes quantités d'images. C'est le cas pour la plupart des projets impliquant la vidéographie aérienne multispectrale (Mc Laughlin, 1999).

La numérisation des images permettra d'extraire les images vidéographiques de la bande magnétoscopique S-VHS et de les sauvegarder en format numérique. La distorsion des images pourra être corrigée avec *Boréa* en faisant un rééchantillonnage de ces dernières. Tous les plans spectraux devront coïncider entre eux, et ce, pour permettre une mise en registre future des images. Ceci se fait en calculant le rapport entre les distances séparant un même couple de points dans les trois plans spectraux. Cette distance sera établie à l'aide du module de mise en registre de *Boréa* qui permet de connaître l'adresse d'un pixel en ligne et colonne. Afin de minimiser l'impact de l'erreur associée au pointage

des repères, ceux-ci seront sélectionnés au voisinage des coins diagonalement opposés d'un plan image (Mc Laughlin, 1999).

3.7 Tests en vol (grandes directions d'un projet futur)

Il faudra idéalement vérifier que le dispositif est fonctionnel lors de séances de vol. La caméra pourrait éventuellement être montée sur un support anti-vibration permettant la mise au niveau en temps réel du capteur. La caméra serait couplée à un marqueur informatisé et un système de positionnement global GPS pour inscrire les coordonnées où chacune des images a été prise. Dans la meilleure des situations, ces séances de vol devraient avoir lieu au-dessus de différents types de végétation pour vérifier l'efficacité du système. Elles devraient être faites à des dates différentes tout en conservant les mêmes sites pour pouvoir vérifier si l'évolution des stades phénologiques des végétaux a été constatée.

Les zones pourraient être, par exemple, des forêts de conifères, de feuillus, mixtes, des zones arbustives et agricoles. Les images prises seraient alors traitées par informatique. Deux images avec une même référence d'intensité lumineuse incidente pourront alors être comparées.

Il y pourrait aussi y avoir une séance de tests de solidité du système. Cette séance serait nécessaire pour détecter tout vice de construction qui pourrait entraîner des conséquences fâcheuses. Le pilote de l'avion simulerait alors à l'aide de ses commandes les

pires conditions que pourrait avoir à supporter le système. Ces conditions arrivent souvent lorsque l'on doit survoler des villes. Des montées d'air chaud causent de la turbulence qui fait osciller l'appareil dans toutes les directions.

La caméra devra aussi être facilement montable et démontable de l'avion, pour pouvoir être éventuellement ramenée au laboratoire pour y effectuer des modifications.

IV

LE SYSTÈME D'ACQUISITION

Le réflectomètre imageur sera construit autour d'une évolution de la caméra Xybion MSC-02 SPL - 4076. Les principales autres composantes de ce système d'acquisition d'imagerie qui sont normalement utilisées durant un survol sont: un récepteur du système de positionnement global (GPS) Trimble TNL 2000 Approach, un marqueur informatisé Compix LP701, un magnétoscope S-VHS Panasonic AG-7400 et enfin, la carte de numérisation Xybion IMCAP-01. La plupart de ces appareils ne seront pas utilisés dans cette recherche puisque le but est de mettre au point un spectromètre imageur et non de faire des études approfondies d'un terrain quelconque avec ce dernier. Jetons maintenant un coup d'œil aux parties conservées de l'ancien capteur.

4.1 Parties conservées du capteur Xybion MSC-02 SPL - 4076

Le capteur vidéographique Xybion MSC-02 SPL - 4076 comporte trois éléments qu'il importe de traiter séparément: son module caméra, sa roulette de filtres et bien sûr, ses filtres.

4.1.1 Le module caméra (adapté de Mc Laughlin, 1998):

Le capteur utilise la caméra à transfert de charges («charge-coupled-device», CCD)

monochrome SONY XC-77 dont le détecteur, de format «2/3 de pouce», se compose d'une matrice de 768 x 494 éléments rectangulaires. Cependant, seulement 752 x 480 éléments servent à former l'imagerie. Malgré que le CCD soit entièrement exposé à tous les 1/60 s, un temps de 1/30 s est nécessaire pour compléter l'ensemble de sa lecture (décharge sur la bande magnétoscopique). Pendant le premier 1/60 s, les lignes impaires du CCD sont déchargées, alors que ses lignes paires le sont dans le 1/60 s suivant. La caméra produit ainsi un signal vidéo monochrome de format RS-170 compatible avec les systèmes usuels d'enregistrement.

Le silicium utilisé comme matériau détecteur est sensible aux ondes électromagnétiques dans le domaine spectral allant de 400 à 1 100 nm. La figure 4.1 illustre sa courbe de réponse spectrale. On y voit que son maximum de sensibilité s'obtient dans le vert, au voisinage de 540 nm. Essentiellement, l'ensemble de la partie visible du spectre électromagnétique a une réponse relative supérieure à 50% du maximum alors que dans la portion proche infrarouge, la sensibilité du détecteur diminue très rapidement au point que le capteur soit difficilement utilisable au-delà de 900 nm.

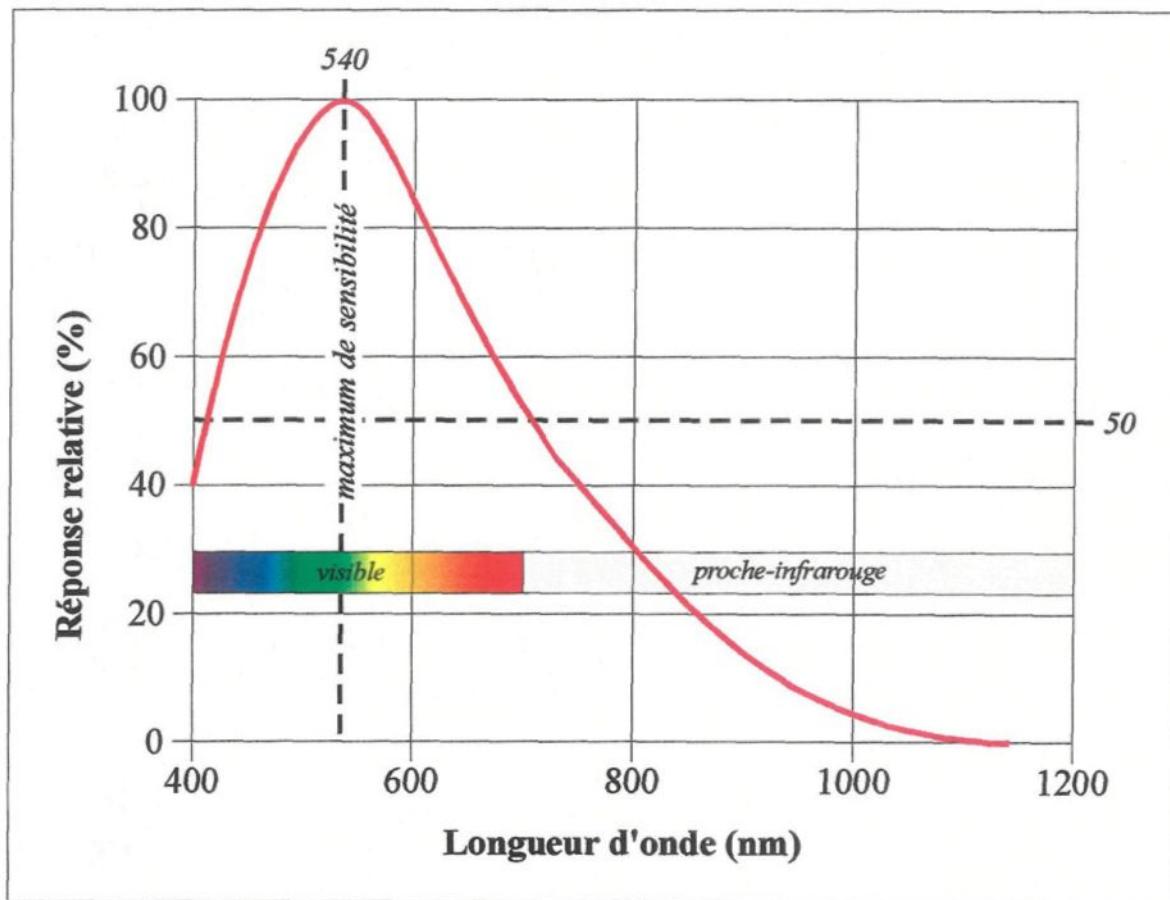


Figure 4.1: Réponse spectrale du CCD du capteur Xybion MSC-02 -SPL - 4076.

Adaptée de: Xybion Electronic Systems Corp., User's Manual, p. 2.

4.1.2 La roulette de filtres (adapté de Mc Laughlin, 1998)

L'originalité de ce capteur réside dans la stratégie adoptée par le manufacturier pour assurer l'acquisition de plusieurs bandes spectrales à partir d'un monocapteur. Une roulette, sur laquelle il est possible de monter jusqu'à six filtres circulaires d'un pouce de diamètre, tourne à 600 révolutions par minute.



Image 4.1: Carte électronique de synchronisation de la roulette de filtres

Une carte électronique de synchronisation permet d'asservir la roulette de filtres à la lecture vidéo assurant ainsi l'acquisition d'une séquence complète de six bandes spectrales en 1/10 s. La vue éclatée de la figure 4.2 montre la structure du capteur et met en évidence la roulette de filtres.

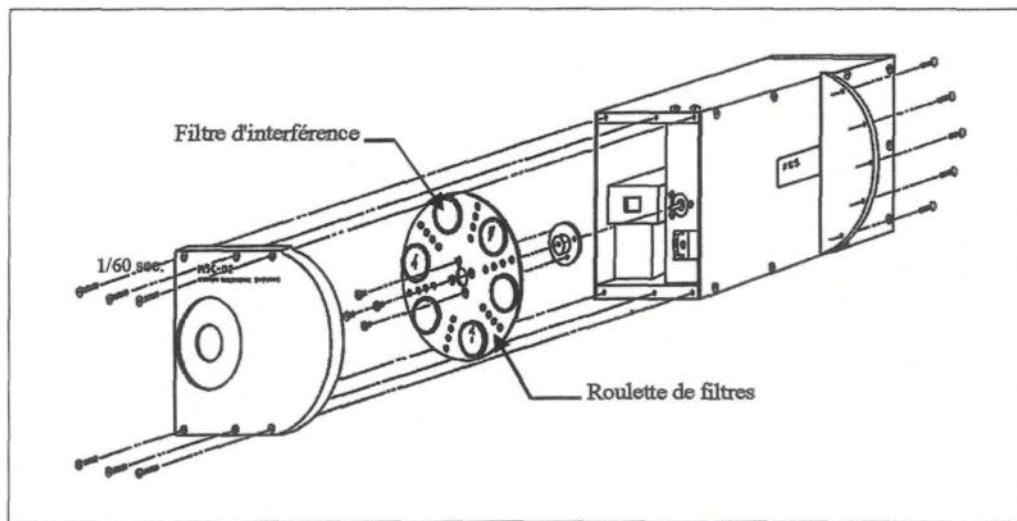


Figure 4.2: Vue éclatée du capteur Xybion MSC-02 SPL - 4076
Adaptée de: Xybion Electronic Systems Corp., User's Manual, p. 32.

4.1.3 Les filtres (adapté de Mc Laughlin, 1998)

L'utilisation de filtres en conjonction avec la roulette de filtres permet l'acquisition de sections bien précises du spectre électromagnétique. Ces filtres ont un diamètre de 2,54 cm (1 po.) et une épaisseur pouvant atteindre 0,64 cm pour certains d'entre eux. Plusieurs manufacturiers rendent disponible ce type de filtres et ce, pour la totalité du domaine spectral auquel est sensible le CCD du capteur vidéographique. Bien que différentes largeurs de bandes passantes soient disponibles pour des filtres d'interférence de même longueur d'onde nominale, l'expérience de l'équipe du Laboratoire de physique de l'UQAC a démontré que, dans les limites de sensibilité du capteur (18 lux), il devient marginal de l'opérer avec des filtres de bandes passantes de l'ordre de 10 nm. Il vaut mieux utiliser des bandes passantes plus larges, de l'ordre de 50 nm et plus.

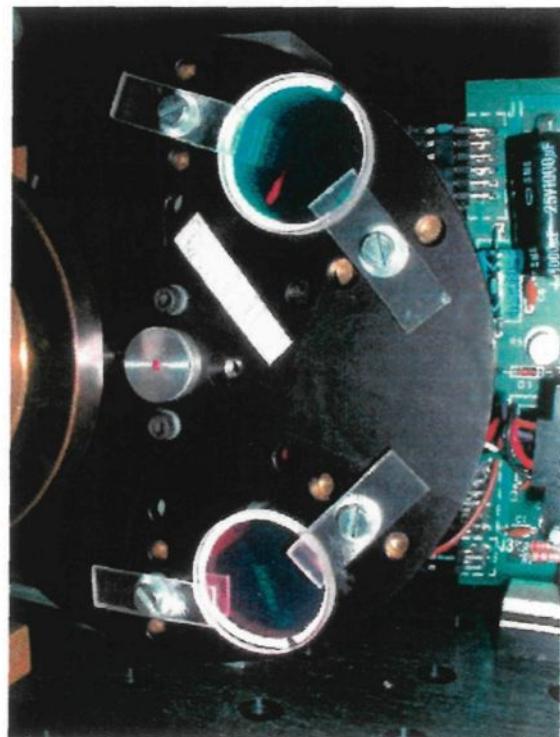


Image 4.2: Gros plan de la roulette de filtres. On y aperçoit deux filtres dichroïques maintenus mécaniquement.

Durant ce projet de recherche, des filtres dichroïques de *Edmund Industrial Optics* étaient montés dans la roulette de filtres. Il s'agit d'un autre type de filtres qui sont fait d'un substrat sur lequel on a déposé un film mince de manière à obtenir certaines caractéristiques de réflexion et de transmission spectrales. Ils sont quelque peu sensibles à l'angle des rayons qui les traversent mais sont tout de même beaucoup plus permissifs à ce niveau que les filtres d'interférence. La raison majeure qui a motivé notre choix d'utiliser ce type de filtres était la transmissivité. En effet, la transmissivité typique d'un filtre d'interférence est de 60% alors que celle d'un filtre dichroïque tourne autour de 90%.

La gamme de filtres utilisée lors de cette expérimentation permettait de se rapprocher de la photographie aérienne traditionnelle soit: un filtre vert centré à 535 nm dont la largeur de bande passante est de 75 nm, un filtre rouge, centré sur 650 nm avec une bande passante allant de 600 nm jusque dans l'infrarouge, et enfin, un filtre proche infrarouge centré sur 850 nm dont la largeur de bande passante est de 150 nm.

L'un des problèmes lorsque l'on utilise des filtres dichroïques est que les filtres du visible laissent passer l'infrarouge alors que les filtres de l'infrarouge laissent passer un peu de rouge. C'est pourquoi, chacun des filtres visibles a été couplé avec un « hot mirror ». Comme son nom l'indique, ce miroir réfléchit les longueurs d'ondes de l'infrarouge. D'autre part, le filtre infrarouge utilisé était un « cold mirror ». Puisqu'il laisse passer une certaine quantité de rouge, nous l'avons couplé à un filtre bleu pour l'empêcher de laisser passer de la lumière visible. Tous ces filtres ont été montés dans une

roulette de filtres à l'aide d'une nouvelle technique, mécanique cette fois-ci. C'est une innovation car auparavant, les filtres étaient collés à l'aide de colle de résine d'époxy. Maintenant, il suffit de desserrer deux vis et on a accès au filtre voulu.

4.1.4 La calibration de la roulette de filtres

Dans les sections précédentes, nous avons vu que plusieurs facteurs influencent la qualité de l'imagerie vidéographique. Pour l'aspect radiométrie, nous avons discuté de la courbe de réponse du capteur, de la transmissivité des filtres d'interférence, de la sensibilité globale du module de caméra ainsi que du réglage unique de l'obturation. Au moment d'aborder les aspects relatifs à la correction de cette radiométrie, il faut considérer l'ensemble de ces facteurs.

Il est possible, en intervenant sur la roulette de filtres, de normaliser le signal venant des différentes bandes spectrales et conséquemment, d'appliquer une correction radiométrique globale au capteur. Afin de réaliser cette normalisation, il a été prévu, dans le design du système, d'affecter la réponse des filtres, et du même coup celle du capteur, en masquant une partie plus ou moins grande de leur surface. À proximité des orifices de la roulette de filtres, on retrouve des repères angulaires calibrés qui permettent de guider l'étape de masquage. Une procédure établie par Xybion Corp. System et corrigée par le Laboratoire de physique de l'UQAC, permet d'intégrer la longueur d'onde du filtre, sa bande passante, sa transmissivité et la réponse du capteur afin d'établir l'angle de masquage approprié. Cette stratégie est fonctionnelle mais demande beaucoup de manipulations et de

temps pour être mise en œuvre. Conséquemment, cette correction doit se faire en laboratoire, ce qui interdit tout changement de dernière minute. Il va de soi que masquer une partie de la surface des filtres diminue leur transmissivité, et dans le contexte où le capteur est peu sensible, son opération en est d'autant limitée.

4.2 L'objectif principal



Image 4.1: Objectif Fujinon CF25L $f/0,85$

Le capteur est utilisé avec un objectif à focale fixe Fujinon CF25L, de focale 25 mm, $f/0,85$. Contrairement à des capteurs plus évolués pour lesquels il est possible de régler le signal acquis en affectant, par logiciel, le gain respectif de chacune des bandes spectrales utilisées, ce réglage, pour le capteur vidéographique, s'effectue par le contrôle de l'obturation de sa lentille. Cette situation restreint le réglage du signal à une seule et même

obturation pour les trois bandes acquises. La marge de manœuvre est donc très mince et la minutie accordée à la calibration de la roulette de filtres est d'autant plus importante.

Les caractéristiques de chacune des lentilles qui sont contenues à l'intérieur de cet objectif, c'est à dire, les rayons de courbures, les types de verre et les distances entre les lentilles ont été trouvées sur le site Internet des brevets d'inventions américains. La simulation de cet objectif a alors pu être faite avec le logiciel ZEMAX.

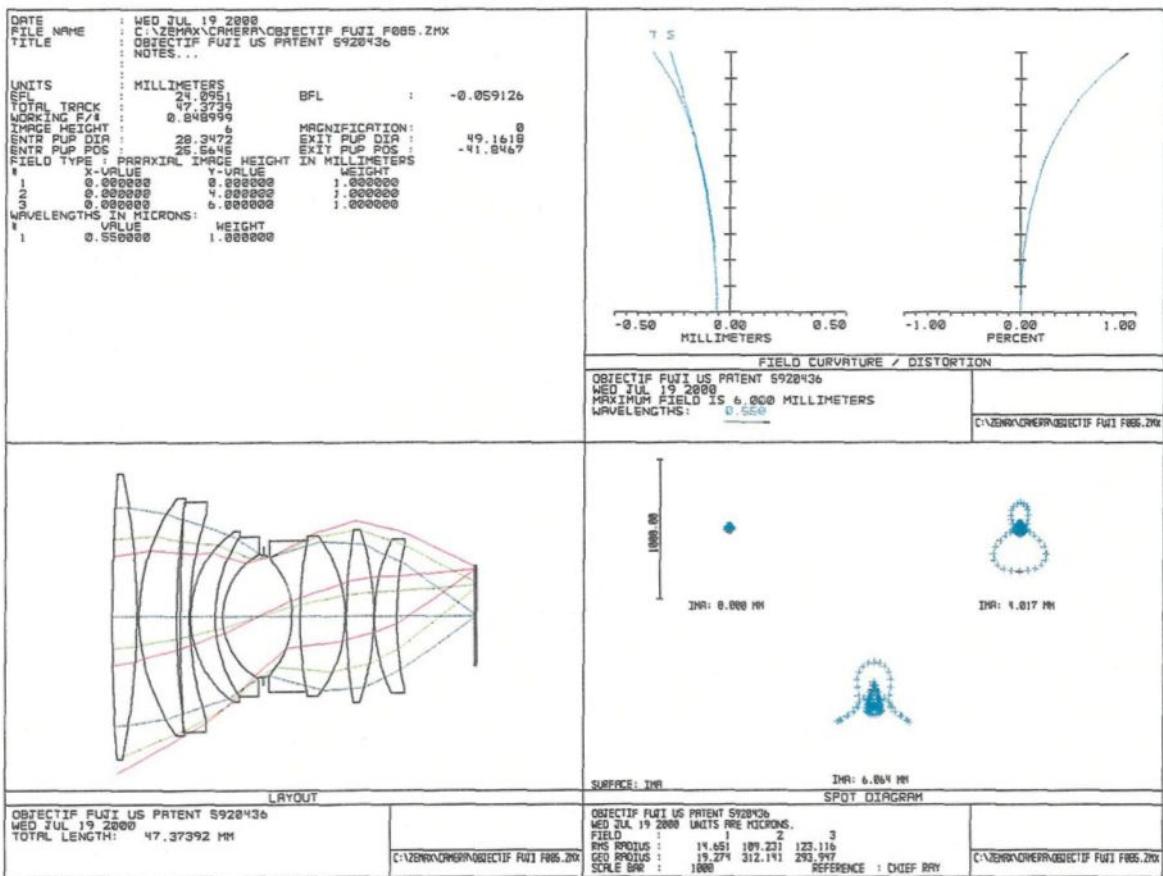


Diagramme 4.1: Caractéristiques de l'objectif Fujinon CF25L, à ouverture maximale.

Une des particularités de cet objectif est qu'il peut avoir une ouverture numérique très grande de $f/0,85$. Ceci signifie que le rapport entre la distance focale de la lentille sur l'ouverture de son diaphragme est de 0,85. Cela est considéré comme un objectif adapté pour l'observation en contexte de faible luminosité car les bons objectifs standards n'ont la plupart du temps qu'une ouverture allant à $f/1,4$. La plaque de verre à l'extrême droite du diagramme de l'objectif est la lamelle protectrice devant le capteur CCD.

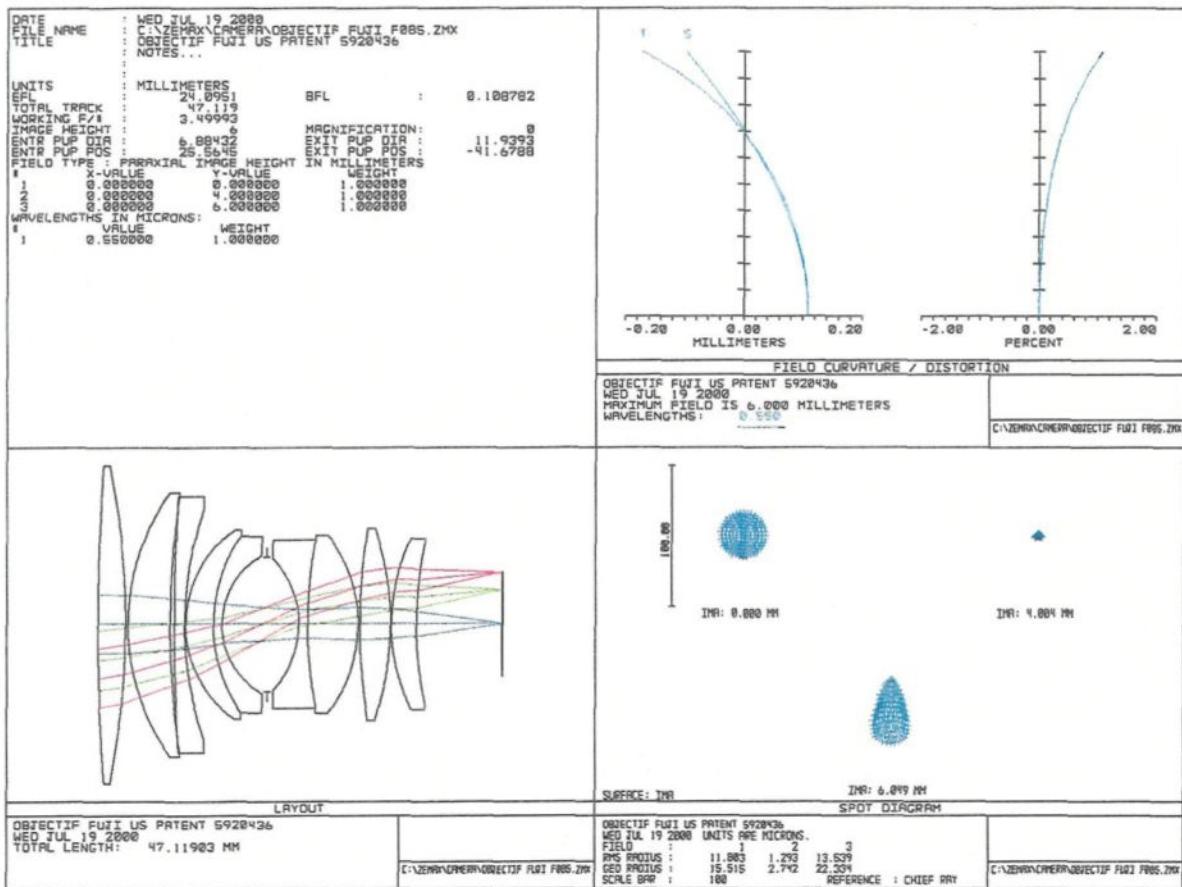


Diagramme 4.2: Caractéristiques de l'objectif Fujinon CF25L, à ouverture $f/3,5$.

Nos calculs nous révèlent que cet objectif ne sera pas utilisé à ouverture maximale, d'autant plus qu'il n'a pas une excellente résolution à cette ouverture, comme on peut le voir

sur le diagramme des taches. Par contre, lorsqu'il est utilisé à des ouvertures plus raisonnables pour nos usages, aux environs de $f/3.5$, le piqué est nettement supérieur.

On peut aussi voir d'après le graphique de la courbure de champ qu'il n'y a presque pas d'astigmatisme. Ceci peut être vu par les courbes représentant la courbure de champ des faisceaux tangentiels et sagittaux qui sont à peu près confondues sur la majorité du champ. L'astigmatisme ne dépend pas de l'ouverture de l'objectif. Remarquons que l'échelle horizontale a diminué d'un facteur 2,5. Ceci explique que la courbure semble plus prononcée qu'à l'ouverture maximale. La distorsion n'est pas très grande non plus, de l'ordre de 1,6%.

4.3 Les accessoires et instruments périphériques du système d'acquisition d'imagerie

4.3.1 L'enregistreur vidéo:

Le magnétoscope AG7400 S-VHS de la compagnie Panasonic est utilisé pour effectuer les tâches d'enregistrement de l'imagerie produite avec le système. L'utilisation d'un enregistreur de type S-VHS est justifiée afin de recueillir le maximum de résolution possible. Bien que ce magnétoscope analogique ait une résolution horizontale de plus de 400 lignes vidéo, il constitue un des maillons faibles du système de l'UQAC et un des facteurs limitants vers l'utilisation d'un module caméra à plus haute résolution. Deux canaux audio sont disponibles pour documenter les opérations d'acquisition d'imagerie (lignes de vol en cours, altitude, température, vitesse, direction...).

4.3.2 Le système informatique:

Les systèmes informatiques étant courants et très changeants, nous traiterons strictement de deux aspects spécifiques et essentiels à la réalisation des opérations d'acquisition d'imagerie. Premièrement, la carte d'acquisition numérique (ADC) IMCAP-01, gérée à l'aide du logiciel *XICAS* de Xybion, permet l'extraction des images de la bande magnétoscopique à des résolutions (horizontale x verticale) allant jusqu'à 752 x 480 pixels.

Pendant le déroulement d'une prise d'image, le logiciel *XICAS* permet l'affichage, en temps réel, des histogrammes des bandes spectrales en cours d'acquisition, ainsi que la mesure radiométrique de cibles bien précises dans l'image. Il est donc l'outil qui permet l'ajustement du diaphragme de la lentille du capteur.

V

RÉSULTATS**5.1 Système optique de la caméra théorique****5.1.1 La frontière entre simulation et pratique**

Le système optique qui est ressorti de toutes les simulations est semblable à celui que nous avions investigué au départ. Il comporte en effet un système de lentilles relais et une lentille de champ. Il nous est apparu que les lentilles relais pourraient être les mêmes que l'objectif principal du système. On introduit de cette manière moins d'aberrations de toutes sortes qui sont caractéristiques à chaque objectif. Ceci est aussi venu du fait qu'il n'était pas facile d'obtenir les caractéristiques des lentilles contenues dans les objectifs commerciaux. Les compagnies sont plutôt réticentes à nous révéler leur secrets.

Quoi qu'il en soit, les caractéristiques de l'objectif que nous avons utilisé, le Fujinon CF25L, avaient soit disant été trouvées sur le site Internet des US patents. La raison pour laquelle les caractéristiques des éléments de cet objectif se trouvait sur ce site était sûrement que cet objectif se distingue des autres. Sa grande ouverture maximale de $f/0,85$ lui conférait quelque chose de particulier qui a fait que les gens de Fujinon ont voulu faire breveter ce design. Par contre, à notre grande surprise et déception, les trois objectifs que nous avons reçus ne correspondaient pas du tout à ceux qui avaient été décrits sur le site

Internet des US Patents. Ce moment fut l'un des tournants majeurs de ce projet puisque tout le travail avait été basé sur une caméra comportant 3 de ces objectifs. Les nouveaux objectifs reçus ont alors dû être démontés. Toutes les caractéristiques de chaque lentille ou de chaque groupe de lentilles ont alors dû être mesurées expérimentalement. L'intégration de ces données dans le logiciel *ZEMAX* a permis d'optimiser ces données et d'obtenir un objectif qui se rapproche sûrement beaucoup de la réalité physique. Plusieurs problèmes entraient en ligne de compte comme l'impossibilité de connaître le rayon de courbure des surfaces collées d'un doublet. Aussi, il était impossible de connaître l'indice de dispersion des verres. Le logiciel *ZEMAX* a alors été configuré pour faire une recherche dans les types de verres du catalogue Sumita japonais. Voici le diagramme de l'objectif qui avait été simulé avec les informations du site des US patents, comparé à celui qui correspond aux mesures physiques qui ont été effectuées en démontant l'objectif que nous avons reçu.

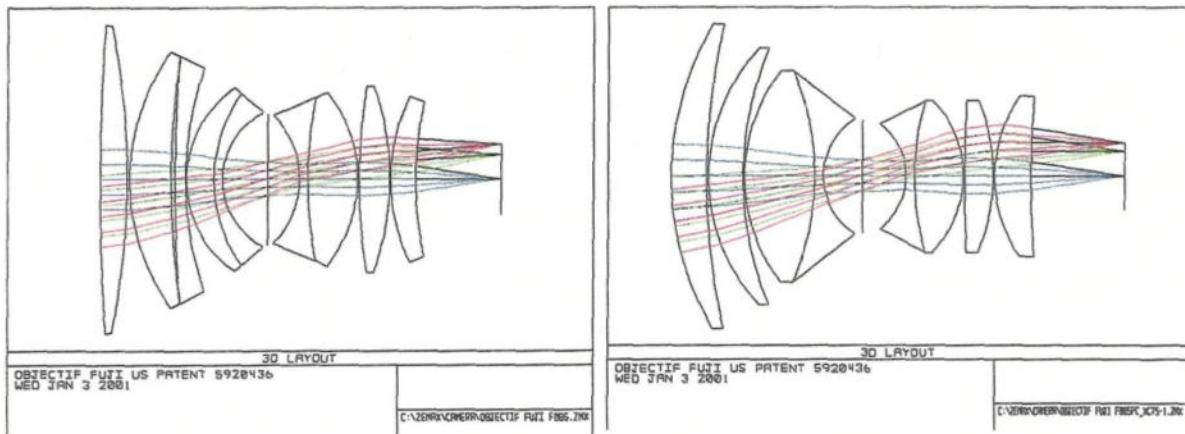


Diagramme 5.1: Comparaison des objectifs brevetés (gauche) et réels (droite).

Voici maintenant le diagramme des différentes caractéristiques de l'objectif réel. On y retrouve les caractéristiques et le schéma de l'objectif, le diagramme de taches, de la

courbure de champ et de la distorsion. On peut s'apercevoir que cet objectif souffre de plus d'astigmatisme que l'original. Par contre, il offre un très bon piqué.

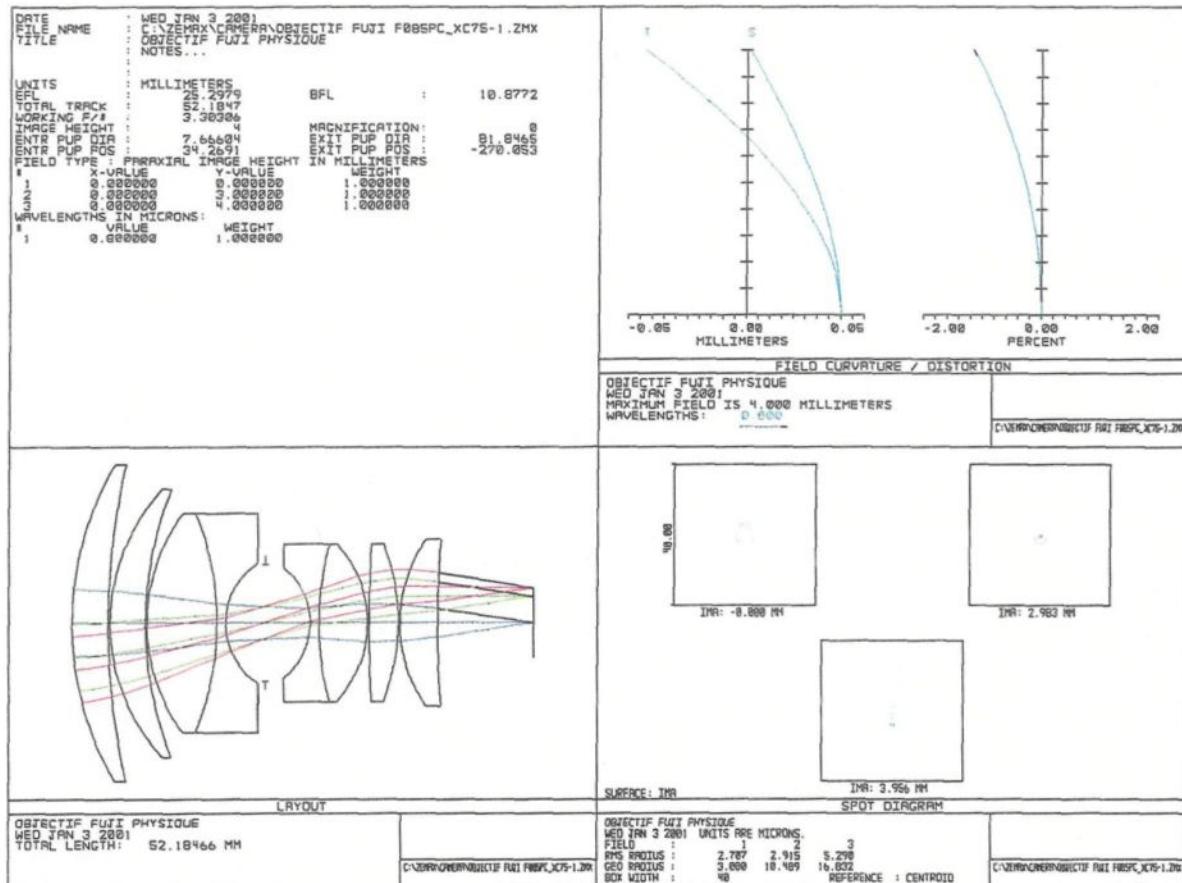


Diagramme 5.2: Caractéristiques de l'objectif fujinon CF25L physique.

La différence entre cet objectif et celui qui avait été simulé pour le système complet n'a eu d'autres conséquences que de nous obliger à reconcevoir le système. Cette surprise nous aura coûté beaucoup de temps. Voyons tout de même le résultat idéal que nous aurions obtenu si l'objectif Fujinon CF25L avait été le même que celui que nous avions simulé à partir des données brevetées.

5.1.2 Le système optique simulé:

Les objectifs Fujinon CF25L utilisés dans le système, ont de par leur configuration nécessité l'utilisation d'une autre lentille dite "de champ". Elle est ni plus ni moins qu'une lentille plan concave qui sert à rediriger les rayons qui sortent de l'objectif primaire. C'est aussi dans cette région, située directement sur le plan image primaire, que l'extrémité de la fibre du capteur de lumière incidente vient se positionner.

Il y a eu environ 32 systèmes optiques différents qui ont été conçus et évalués avant d'arriver à ce système. Beaucoup d'idées ont vu le jour et ont été abandonnées quelques temps après. L'optique est une science de compromis. À chaque fois qu'une caractéristique de l'objectif était améliorée, cela se faisait au détriment d'une autre.

Un design final avait été trouvé. Il permettait d'avoir une bonne qualité d'image mais il comportait des lentilles qui devaient être construites sur mesure. On alors appris que les compagnies d'optique ne font des lentilles sur mesure que lorsque la demande en quantité vaut la peine qu'ils doivent se donner pour les construire. Un système alternatif a alors dû être créé, et ce dernier ne comporte que des lentilles et objectifs qui sont disponibles comme éléments optiques standard sur le marché.

L'évolution 33 a été considérée comme la meilleure que l'on ne puisse jamais atteindre avec le matériel disponible. Elle est constituée d'un objectif principal, suivi d'une lentille plan concave et de la roulette de filtres qui a finalement été placée à cet endroit

plutôt qu'entre les deux lentilles relais puisque la qualité d'image était meilleure ainsi. Le système relais est alors positionné derrière la roulette et est constitué de deux autres objectifs Fujinon face à face, entre lesquels se trouve le diaphragme principal du système. Il ne reste plus que la caméra CCD qui est placée derrière. Le capteur CCD a dû être remplacé par un autre plus petit (1/3"), dont le champ est de 4 mm mais qui conserve la même résolution. L'ancien format était trop grand et ne permettait pas d'obtenir une bonne qualité d'image sur tout le capteur. Voici donc le diagramme du système optique théorique final.

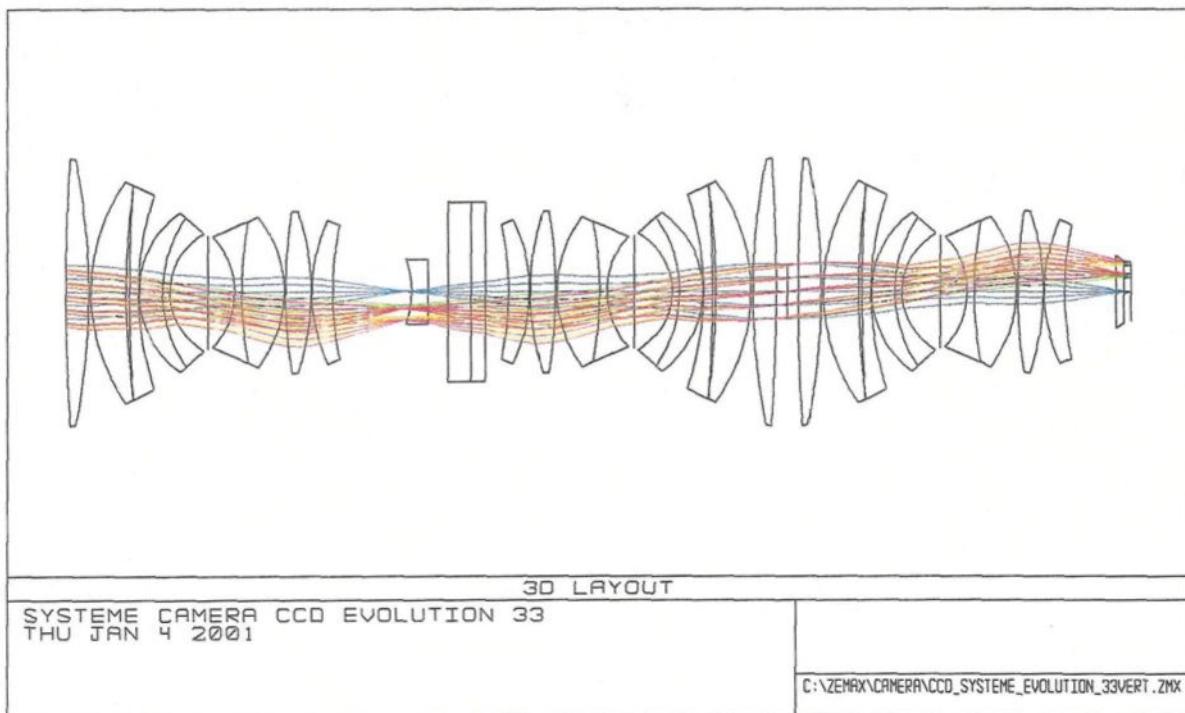
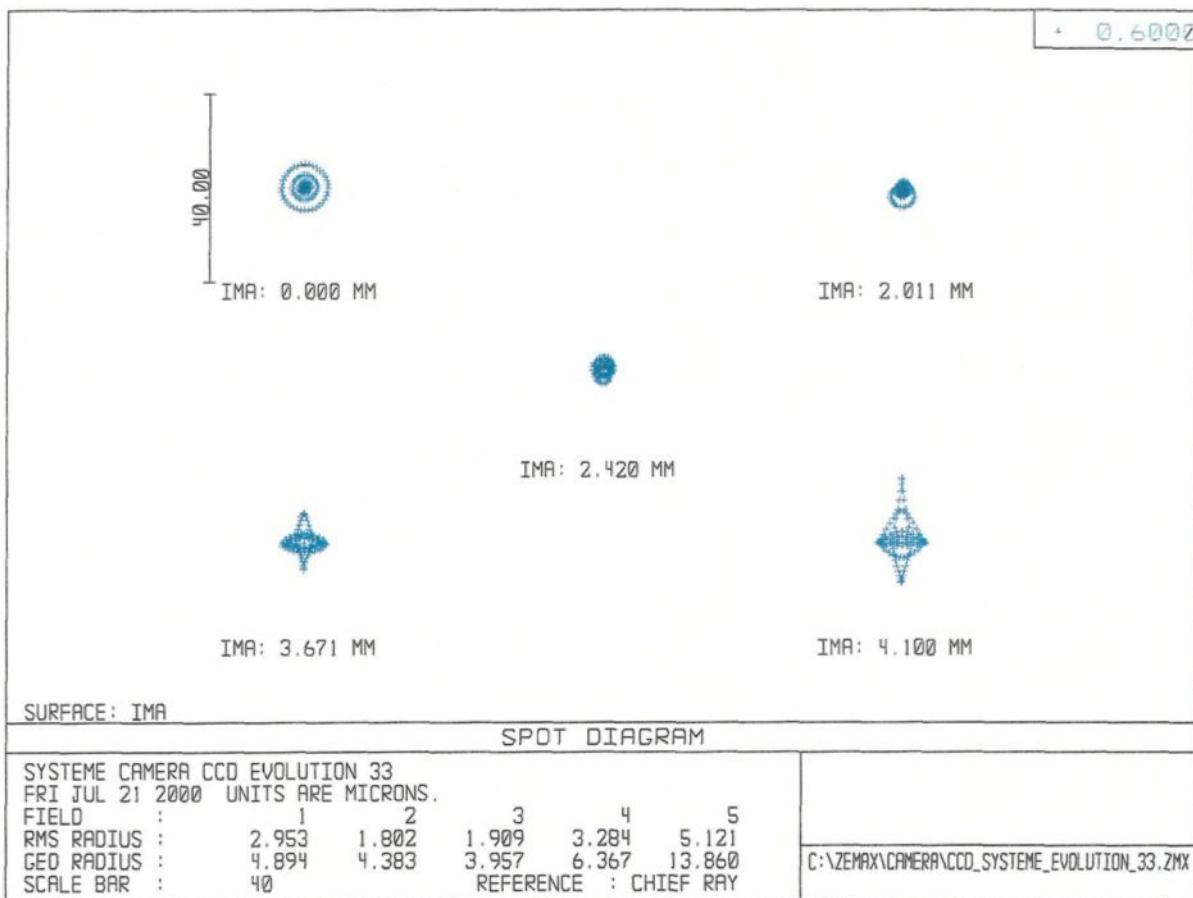


Diagramme 5.3: Système optique du réflectomètre imageur

Malgré le fait que ce système comporte plusieurs éléments optiques (on parle d'au moins 60 surfaces), il permet d'obtenir une qualité optique très impressionnante, du moins, en simulation. En fait, les objectifs combinés de cette manière permettent d'obtenir une

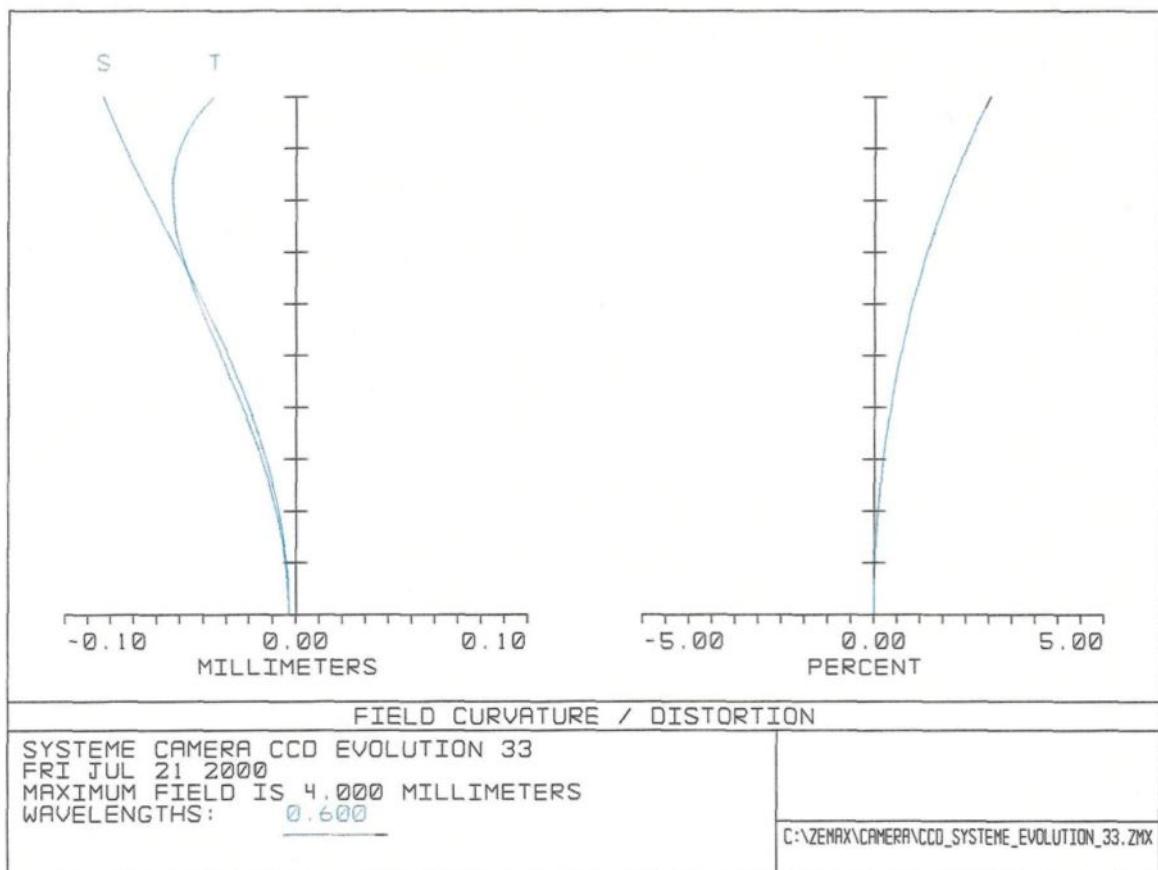
meilleure qualité d'image que s'il y en avait qu'un seul. Ceci se fait bien sûr au détriment de la luminosité qui sera moindre, arrivée au capteur. La caméra d'origine Xybion fonctionnait typiquement à des ouvertures de $f/5.6$ à $f/8$ pour un bon contraste sans saturer le capteur. Elle fonctionnera maintenant à des ouvertures de $f/2.8$ à $f/4$. Voici le diagramme des taches à l'ouverture $f/3.3$.



Comme mentionné plus haut, le nouveau capteur est de format $1/3"$, mais il a la même résolution, ce qui implique que les pixels du CCD doivent être plus petits. En effet, la caméra SONY XC-75 a des pixels de $8,4 \times 9,8$ microns. Les rayons des taches qui sont

donnés ici sur le diagramme, sont ceux qui sont simulés, sans tenir compte des tolérances de conception des objectifs, des lentilles et de la monture du système. La dimension des taches est facilement 2 fois plus grande en pratique que ce que nous avons ici, ce qui donne tout de même une excellente résolution. La pire tache à 5,1 microns est celle qui est à l'extrême du champ, donc dans les coins de l'image. Ces parties sont souvent sacrifiées dans le processus du mosaïquage.

Diagramme 5.5: Courbure de champ et distorsion du système optique du réflectomètre imageur



D'après le diagramme de la courbure de champ et de la distorsion, on constate que le système a aussi un peu de courbure de champ. Elle s'étale sur environ 0,1 mm, ce qui n'est pas critique. Le système souffre d'astigmatisme seulement dans le dernier quart de son

champ. Ce résultat est aussi très intéressant. À l'extrémité du champ, il y a un décalage entre les rayons tangentiels et sagittaux d'environ 0,06 mm. Le problème se situe plutôt au niveau de la distorsion. Elle est d'environ +2,5% à l'extrémité du champ. Ceci causera une image qui n'aura pas la forme rectangulaire, mais plutôt une forme de coussinet. Les coins de l'image sembleront donc être étirés.

5.2 Le système optique expérimental

5.2.1 Vue d'ensemble

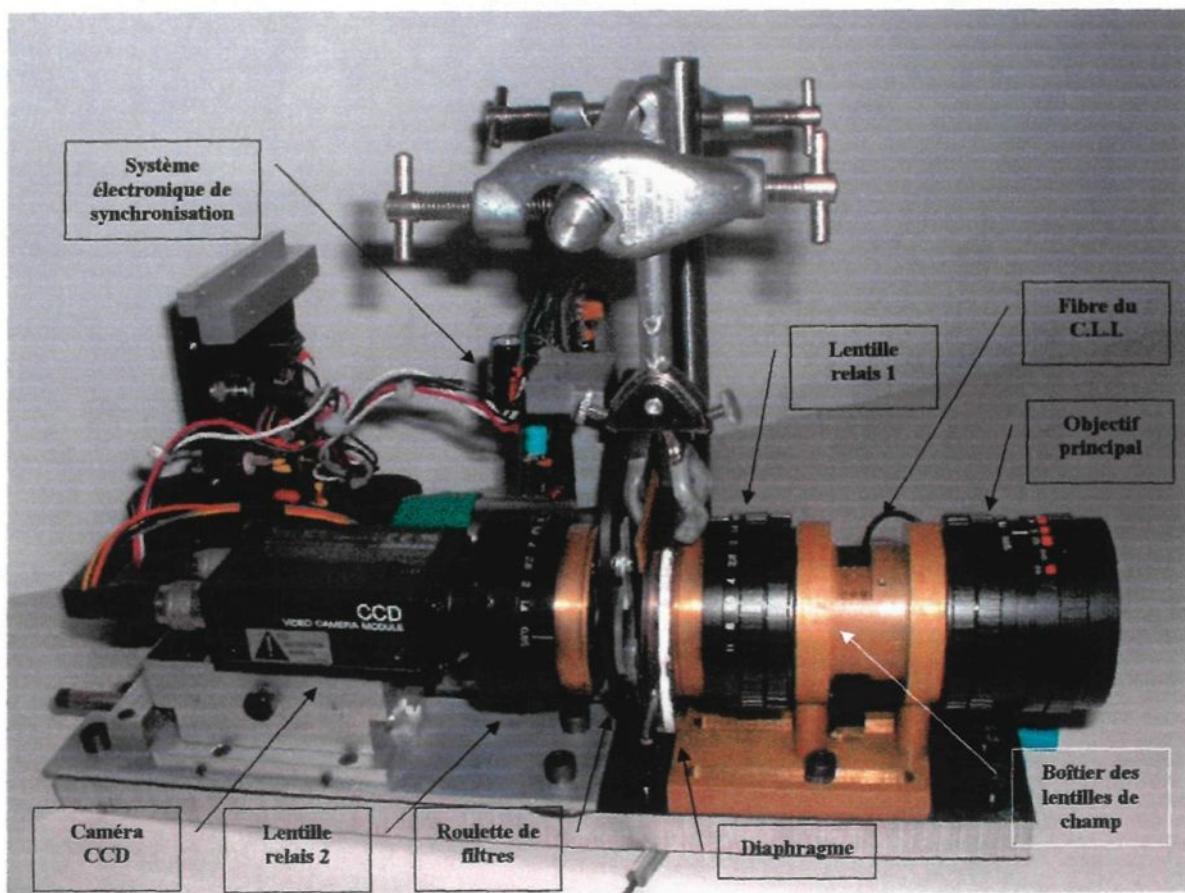


Image 5.1: Vue d'ensemble du spectromètre imageur

Comme il a été dit plus haut, l'élément optique principal de ce système, soit l'objectif Fujinon CF25L que l'on utilisait trois fois, s'est avéré ne pas être celui des spécifications que nous avions trouvées. On a alors dû corriger notre tir et reprendre les simulations, à partir du nouvel objectif. Après plusieurs semaines d'adaptation, le système final ressemble encore quelque peu à notre système idéal mais il y a quelques différences.

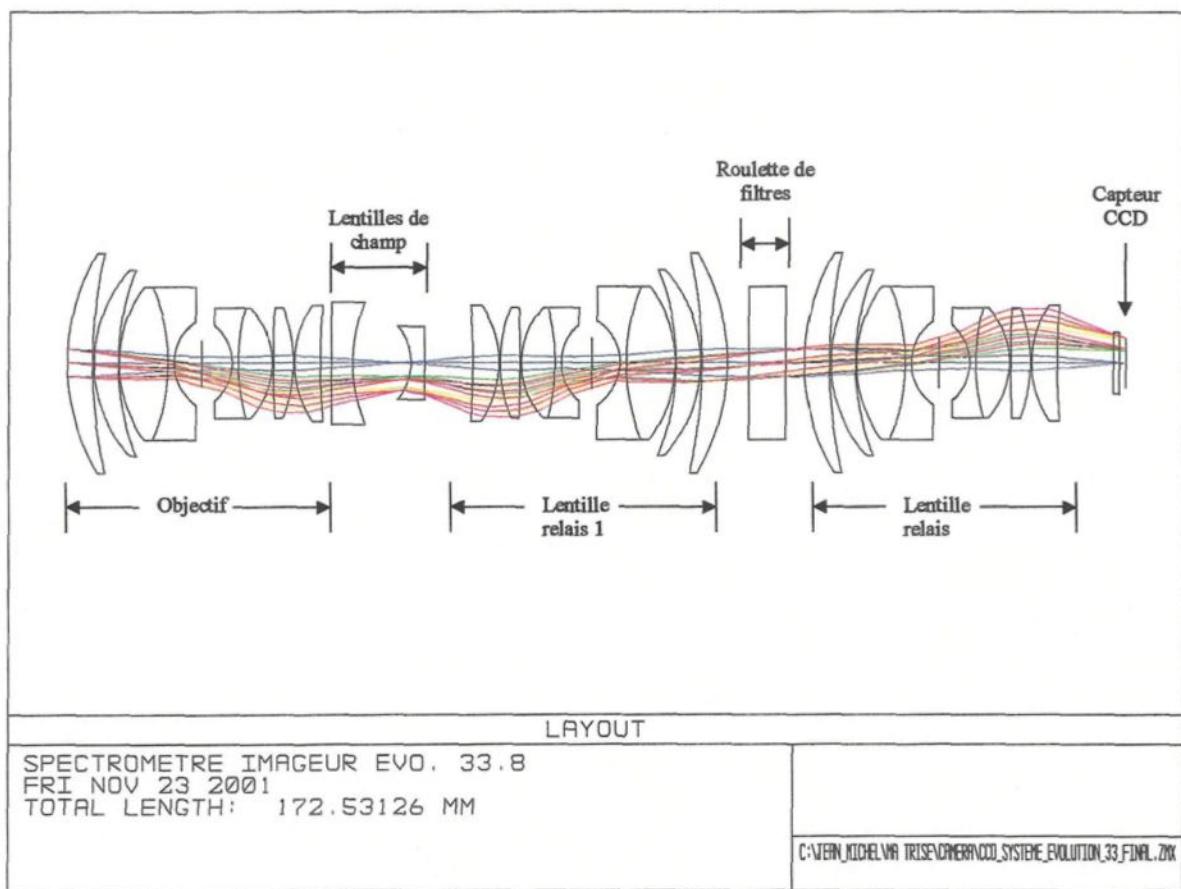


Diagramme 5.6: Système optique avec objectifs réels

La première se situe au niveau du système de lentille de champ. Puisque comme nous l'avons mentionné plus haut, il est impossible d'obtenir des lentilles construites sur mesure, on a dû se résigner à concevoir notre système avec des lentilles déjà existantes. Cette fois-ci, il a fallu en introduire deux au lieu d'une pour obtenir une qualité d'image raisonnable.

Elles ont été simulées avant l'achat grâce à leurs caractéristiques tirées du catalogue de Edmund Industrial Optics. L'autre différence se situe au niveau de la position de la roulette de filtres. Elle est de nouveau positionnée entre les deux lentilles relais. On réussissait à obtenir une meilleure qualité d'image avec cette configuration. On verra que la qualité de l'image de cette nouvelle caméra n'est pas aussi bonne que celle du système avec les objectifs dont on avait trouvé les caractéristiques sur le site des US Patents. Hélas, on n'a eu d'autre choix que de nous adapter.

Comme on peut le voir sur le diagramme 5.6, le système contient les nouveaux objectifs. L'extrémité de la fibre du capteur de lumière incidente sur laquelle est collé un microprisme vient s'insérer dans le système entre les lentilles de champ, où l'on peut remarquer que les rayons convergent. Elle arrive perpendiculairement à l'axe optique et c'est pourquoi un prisme y est collé. Il permet d'introduire le signal de la fibre optique dans le système.

L'objectif, les lentilles relais, et la première lentille de champ sont tous fixés sur un même support de laiton. Le choix du matériau s'est fait en fonction de la facilité relative à machiner ce métal avec les outils disponibles au laboratoire de physique. Ce dispositif permet de conserver le meilleur alignement possible de ces composantes du système, en plus de favoriser une excellente rigidité.

C'est immédiatement après la première lentille relais que l'on retrouve le diaphragme (Non représenté sur le diagramme 5.6, mais visible sur l'image 5.2). Il permettra de régler

la quantité de lumière qui se rendra jusqu'au capteur. Ceci fait partie d'une des innovations fondamentales du système : en étant placé à cet endroit, le diaphragme coupe autant la lumière provenant du capteur de lumière incidente que celle provenant de l'objet observé. L'on retrouve ensuite la roulette de filtres.

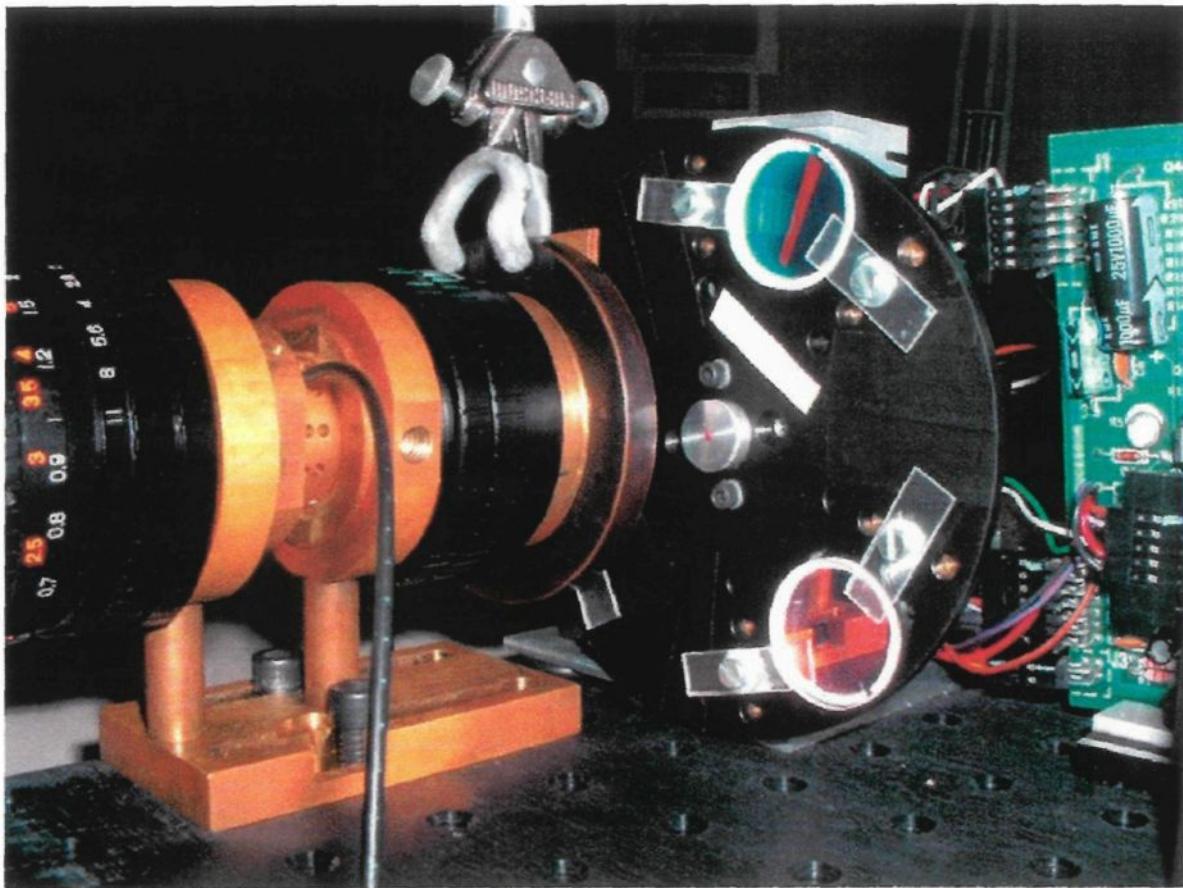


Image 5.2: Vue de l'objectif principal, du support, de la fibre du capteur de lumière incidente, de la lentille relais 1, du diaphragme, de la roulette de filtres et d'une partie du système électronique.

Comme il a été vu à la section 4.1.3, l'ancien dispositif de roulette de filtres a été conservé. Par contre, des filtres dichroïques ont été utilisés au lieu des filtres d'interférence dans le souci de conserver la plus grande quantité de lumière possible jusqu'au capteur. Le dernier objectif fixé directement sur le support fileté de la caméra

CCD fait converger enfin les rayons sur le capteur.

5.2.2 Caractéristiques optiques

Comme nous l'avons vu à la section 3.2.1, un système optique est décrit selon plusieurs paramètres soit : le diamètre des lentilles, leurs rayons de courbures, leur épaisseur, leur type de verre d'indice de réfraction et de dispersion donné ainsi que la distance qui les sépare. Toutes ces données sont contenues à l'intérieur du tableau *Lens Data Editor* de ZEMAX. En voici une reproduction révélant toutes les caractéristiques du spectromètre imageur. Toutes les données qui y sont contenues sont en millimètres.

#	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
Obj	Objet	Infinity	Inifinity		Infinity
1		35,54	4,14	LAKSKN1	18
2		82,25	0,23		18
3		22,61	4	TAF4	15,2
4		41,14	0,15		15,2
5		21	7,9779	LAFN7	12,5
6		-33,0892	1,0004	FD13	12,5
7		8,3	4,5		6,85
8		Infinity	4,9735		3,6816
9		-8,13	1,0042	SF59	6,25
10		35,1084	5,5116	TAFD43	9
11		-13,23	0,19		9
12		194,4	3,26	VC78	9
13		-24,58	0,18		9
14		16,95	4,23	LAFN23	9,5
15		123,5	1,7523		9,5
16	lentille 1	Infinity	3,5	BK7	10
17	entre 2	25,84	9,5		10
18	lentille 2	-9,42	2,2	SF11	6
19		Infinity	7,8491		6
20		-123,5	4,23	LAFN23	9,5
21		-16,95	0,18		9,5

22		24,58	3,26	VC78	9
23		-194,4	0,19		9
24		13,23	5,5116	TAFD43	9
25		-35,1084	1,0042	SF59	9
26		8,13	4,9735		6,25
27		1	4,5		4,1372
28		-8,3	1,0004	FD13	6,85
29		33,0892	7,9779	LAFN7	12,5
30		-21	0,15		12,5
31		-41,14	4	TAF4	15,2
32		-22,61	0,23		15,2
33		-82,25	4,14	LAKSN1	18
34		-35,54	3,5		18
35	Diaphragme	Infinity	6	BK7	12,5
36		Infinity	3		12,5
STO		35,54	4,14	LAKSN1	18
38		82,25	0,23		18
39		22,61	4	TAF4	15,2
40		41,14	0,15		15,2
41		21	7,9779	LAFN7	12,5
42		-33,0892	1,0004	FD13	12,5
43		8,3	4,5		6,85
44		Infinity	4,9735		4,0765
45		-8,13	1,0042	SF59	6,25
46		35,1084	5,5116	TAFD43	9
47		-13,23	0,19		9
48		194,4	3,26	VC78	9
49		-24,58	0,18		9
50		16,95	4,23	LAFN23	9,5
51		123,5	9,1873		9,5
52	verre protecteur	Infinity	1	BK7	5
53	verre protecteur	Infinity	1		4,5275
IMA		Infinity			4

Tableau 5.1: Caractéristiques des éléments optiques du spectromètre imageur.

Évidemment, nous allons faire l'analyse des caractéristiques optiques du nouveau système de caméra expérimental. Commençons par le diagramme des taches.

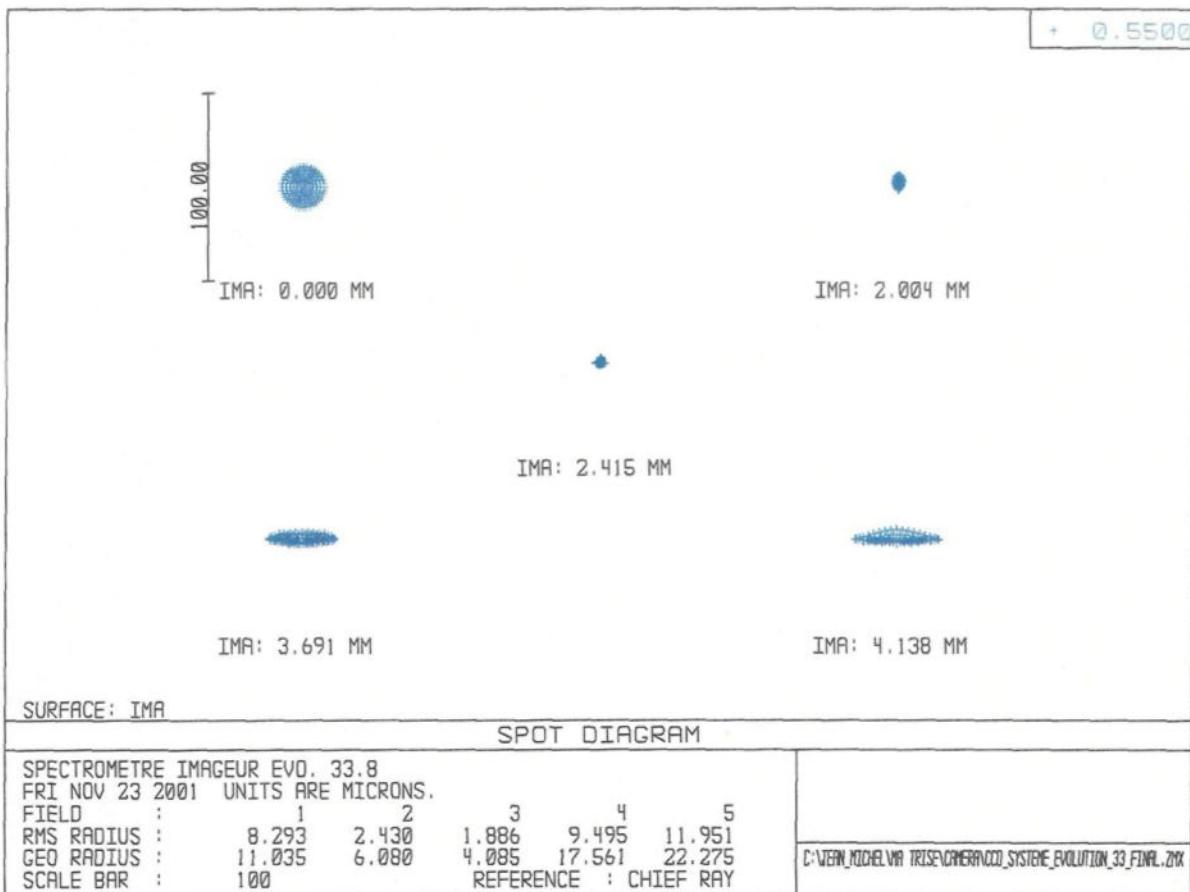


Diagramme 5.7: Diagramme des taches du réflectomètre imageur expérimental.

Comme on peut le constater en analysant le diagramme des taches, la qualité du piqué de ce système est moins intéressante que celle du système théorique. Par contre, il faut se rappeler que ce système est conçu exclusivement avec des optiques commerciales, contrairement à l'objectif théorique. D'autre part, la courbure de champ est à peine moins intéressante que celle obtenue par l'objectif théorique. On peut remarquer que les rayons tangentiels et sagittaux croisent presque au même endroit le plan image environ au centre du champ. Encore une fois, la distorsion est importante et même plus que dans le cas de la caméra théorique. Elle frôle les 4% ce qui aura pour effet de distordre les images à la

forme d'un coussinet. La distorsion du système théorique était de 2,5%. Comme mentionné à la section 3.3.3, ce défaut peut être annulé complètement par rééchantillonnage informatique ce qui fait que ce n'est pas un problème réellement important.

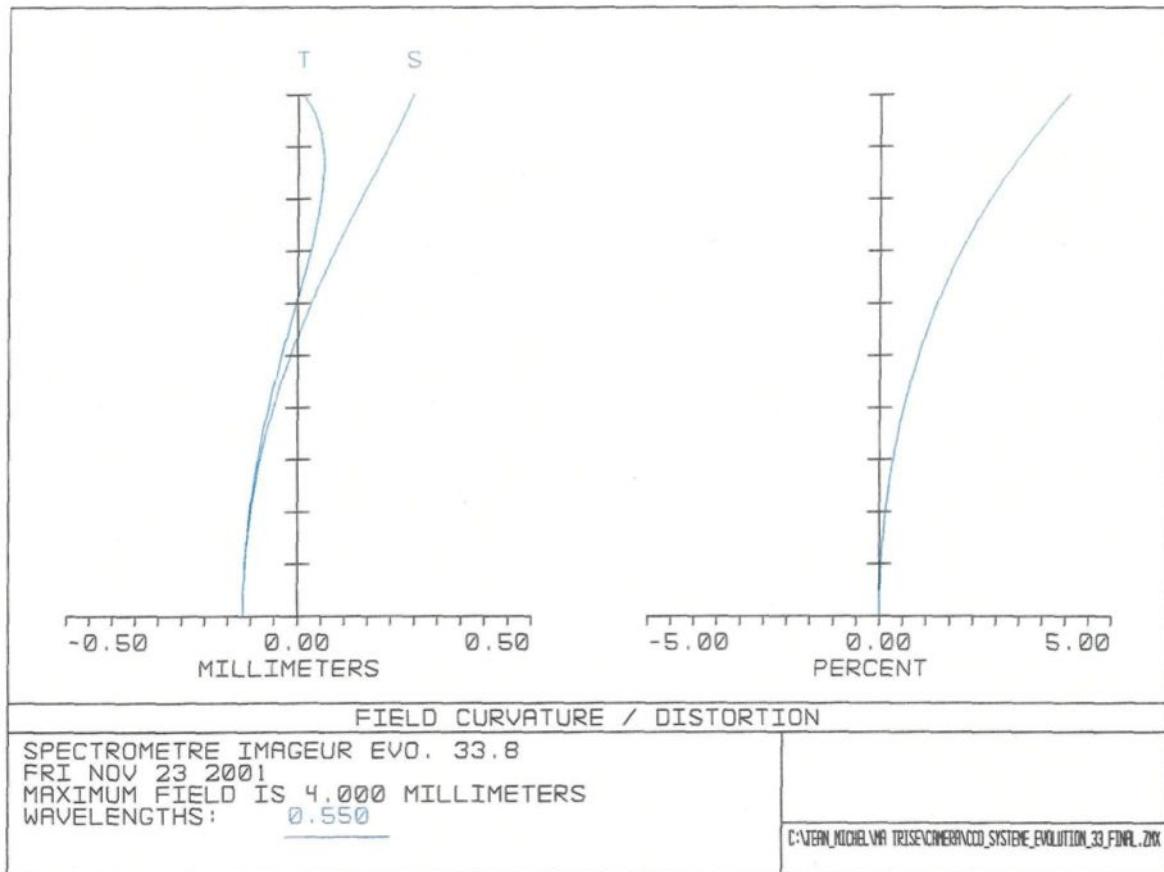


Diagramme 5.8: Diagramme des taches du réflectomètre imageur expérimental.

On peut tout de même mentionner que les performances de ce système sont remarquables compte-tenu de la complexité de ce dernier. Il est possible que certains systèmes optiques soient plus performants que celui-ci mais l'intérêt de ce dernier est qu'il agit en tant que spectromètre imageur, et cela lui confère une gamme d'usages que les autres ne peuvent combler.

5.2.3 Système optique du capteur de lumière incidente (CLI)

La lumière incidente est captée par deux disques de verre dépoli (faits de "soda lime") superposés de 6 mm de diamètre et de 1,6 mm d'épaisseur qui sont montés dans un support spécial. La fibre optique est positionnée en dessous du deuxième disque de manière à capter le plus possible de signal par rapport à son angle d'entrée spécifique de 56°. La lumière est alors amenée au niveau de la caméra à l'aide de la fibre optique.

Il s'agit d'une fibre acrylique ESKA développée et manufacturée par Mitsubishi. Le noyau de la fibre est fait de polymère acrylique (polymethyl-methacrylate) enveloppé dans une mince couche de polymère de fluorine d'indice de réfraction moins élevé que le noyau. Elle a un diamètre intérieur de 1 mm et extérieur de 2,20 mm en comptant la gaine de polyéthylène noire.

Spécifications de la fibre « COMMUNICATION GRADE »			
Indice de réfraction du noyau	1,492	Angle d'acceptation ($2 \cdot \sin^{-1}$ (Ouv. Num.))	56°
Indice de réfraction de la couche externe	1,417	Température d'opération (°C)	-55 à +85
Ouverture numérique	0,47±0,03	Rayon de courbure minimum	20 x le diamètre externe
Atténuation (dB par km)	180 à 250	Gaine	Polyéthylène noir

Tableau 5.2 : Caractéristiques physiques de la fibre optique du C.L.I.

Adaptée de: Edmund Industrial Optics Catalog 2000, p.227.

Un prisme miniature de 1 mm de coté (SFL11, $n=1,785$) a été fixé sur l'extrémité de la fibre à l'aide d'une colle optique (Norland optical adhesive #68) durcissant à l'ultraviolet. De cette manière, l'introduction du signal à l'intérieur du système optique se fait au niveau

de la lentille de champ qui est située directement derrière l'objectif principal. C'est à ce point que se forme l'image primaire faite par l'objectif principal.

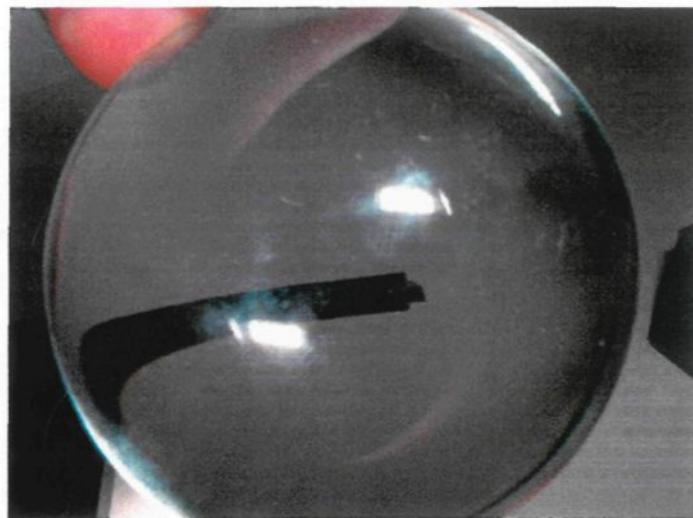
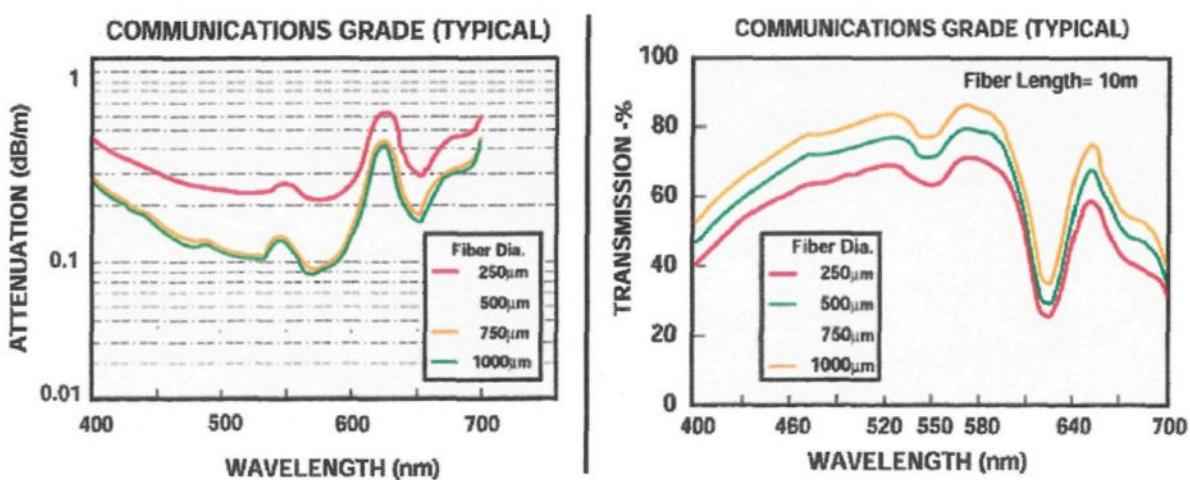


Image 5.3: Vue agrandie à travers une loupe du microprisme fixé à l'extrémité de la fibre du CLI.

Voici les graphiques des transmissivités typiques des fibres de différentes dimensions qui nous ont été fournis par la compagnie. Nous nous intéressons plus particulièrement à la courbe verte car elle correspond à la fibre de 1 mm de diamètre:



Graphiques 5.1: Transmissivité de la fibre optique du capteur de lumière incidente.

Adapté de: Edmund Industrial Optics Catalog 2000, p.227.

On peut facilement remarquer sur ces graphiques qu'il semble y avoir une baisse de la transmissivité à partir de 580 nm. Il est dommage que ces graphiques ne rendent pas compte des données allant jusqu'au proche infrarouge.

5.3 Essais préliminaires du système

5.3.1 Calibration à l'aide du spectrophotomètre

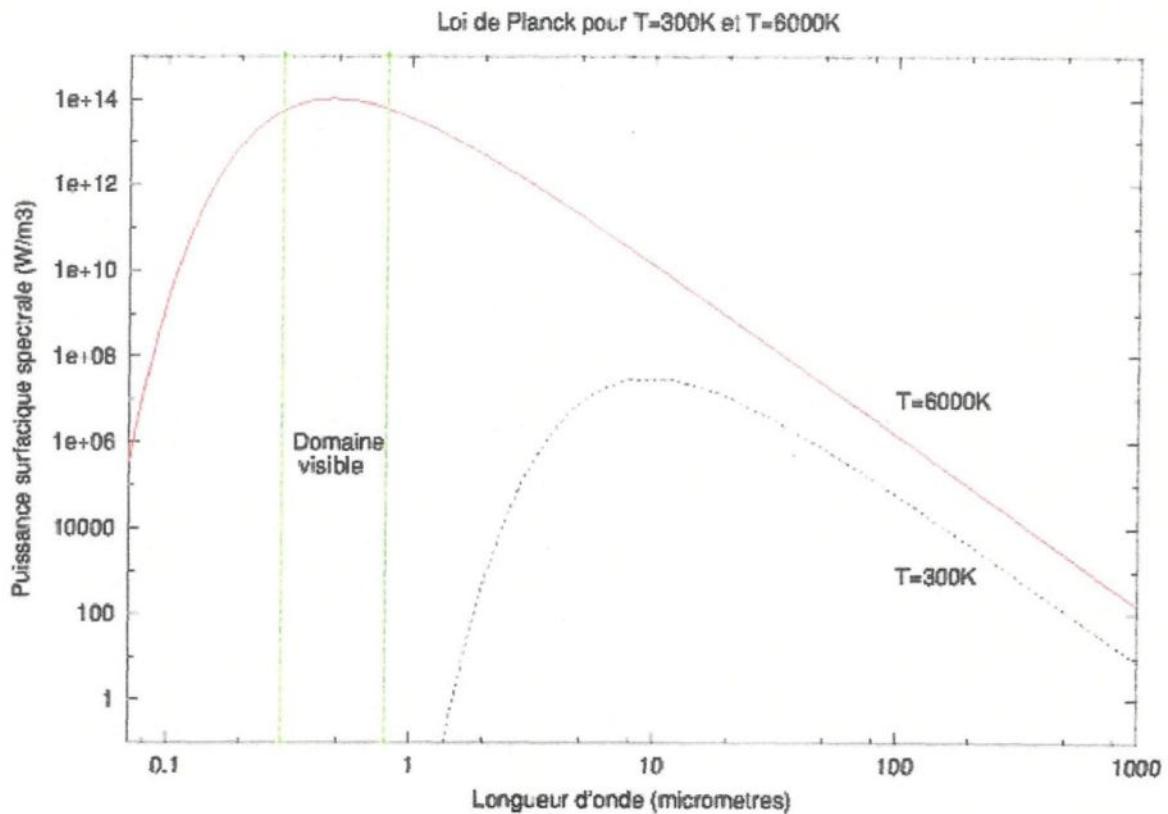
Plusieurs tests de réponse des capteurs de lumière incidente et réfléchie ont été effectués à l'aide du spectrophotomètre du laboratoire de physique. Il s'agit d'un appareil de la compagnie Carl Zeiss qui permet de comparer la transmissivité d'un objet par rapport à une référence.



Image 5.4: Le spectrophotomètre du laboratoire de physique.

L'appareil est muni d'une source lumineuse à incandescence émettant dans un large spectre de longueurs d'ondes allant du proche ultraviolet au proche infrarouge. Un système de prismes et de fentes permet d'obtenir de la lumière de longueur d'onde et d'intensité

calibrée. On appelle cette partie de l'instrument le monochromateur. À la sortie du monochromateur, il y a un compartiment dans lequel on peut placer un échantillon dont on veut mesurer la transmissivité. Un capteur situé après le compartiment à échantillon permet de mesurer l'intensité de lumière reçue. Lorsque l'appareil est utilisé, on doit d'abord ajuster le capteur de manière à indiquer 100% lorsqu'il y a absence d'échantillon. Un sélecteur permet alors de placer l'échantillon devant la même source et le même capteur pour comparer sa transmissivité avec celle en l'absence d'échantillon. C'est de cette manière qu'a été mesurée la transmissivité de l'eau dont on peut voir le graphique à la section 2.1. Puisque le même capteur est utilisé tout au long du processus, les données ne dépendent pas de la sensibilité du capteur. L'on doit calibrer l'appareil à chaque mesure où l'on n'utilise pas la même longueur d'onde ou ouverture de fente (donc intensité lumineuse). Cette ouverture doit être réglée puisque la source n'émet pas uniformément dans le spectre. C'est un filament chauffant qui émet dans un spectre continu selon les lois du rayonnement d'un corps noir de Planck, c'est à dire qu'un objet émettra dans un spectre continu dont on aura un maximum d'émissivité dans une longueur d'onde proportionnelle à sa température. Les courbes d'émission typiques de corps noirs respectivement à 6000 et 300 °K sont illustrées au graphique 5.2.

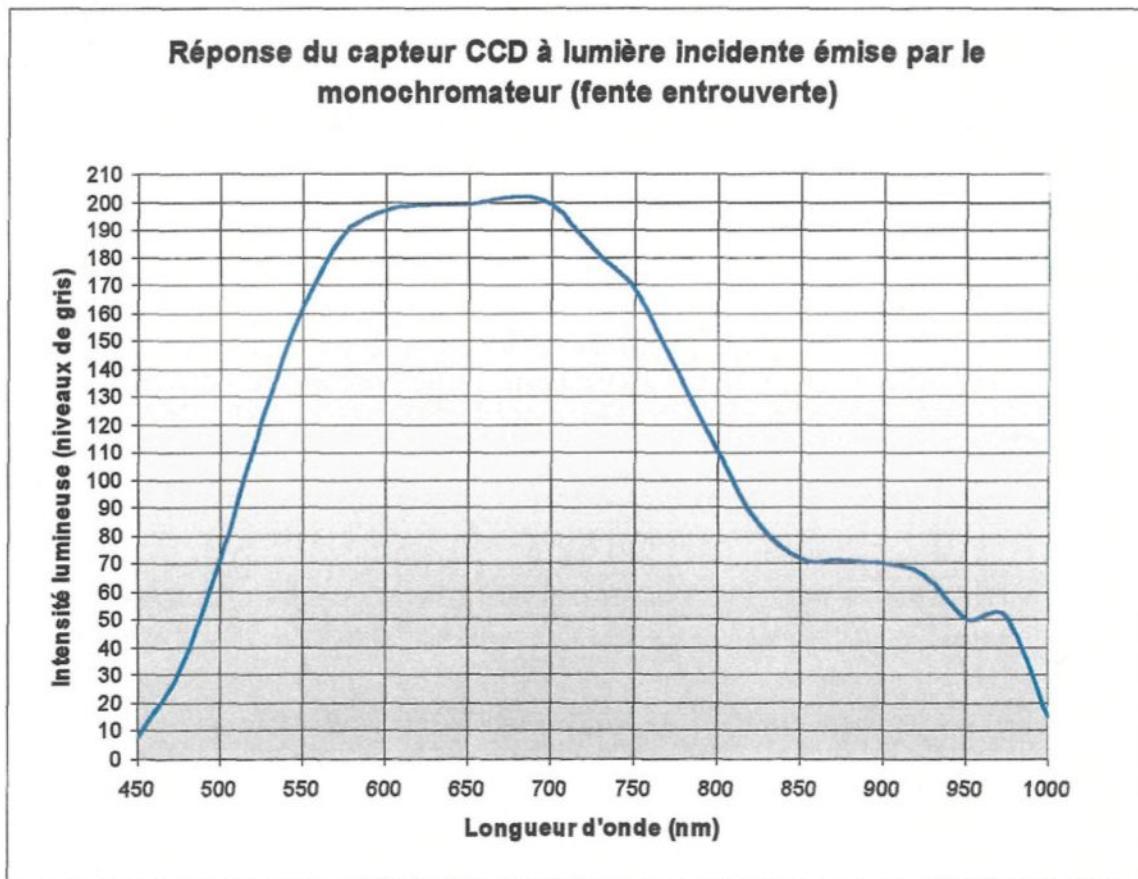


Graphique 5.2: Représentation de la loi du rayonnement d'un corps noir de Planck.

5.2.2 Calibration des capteurs de lumière incidente et réfléchie

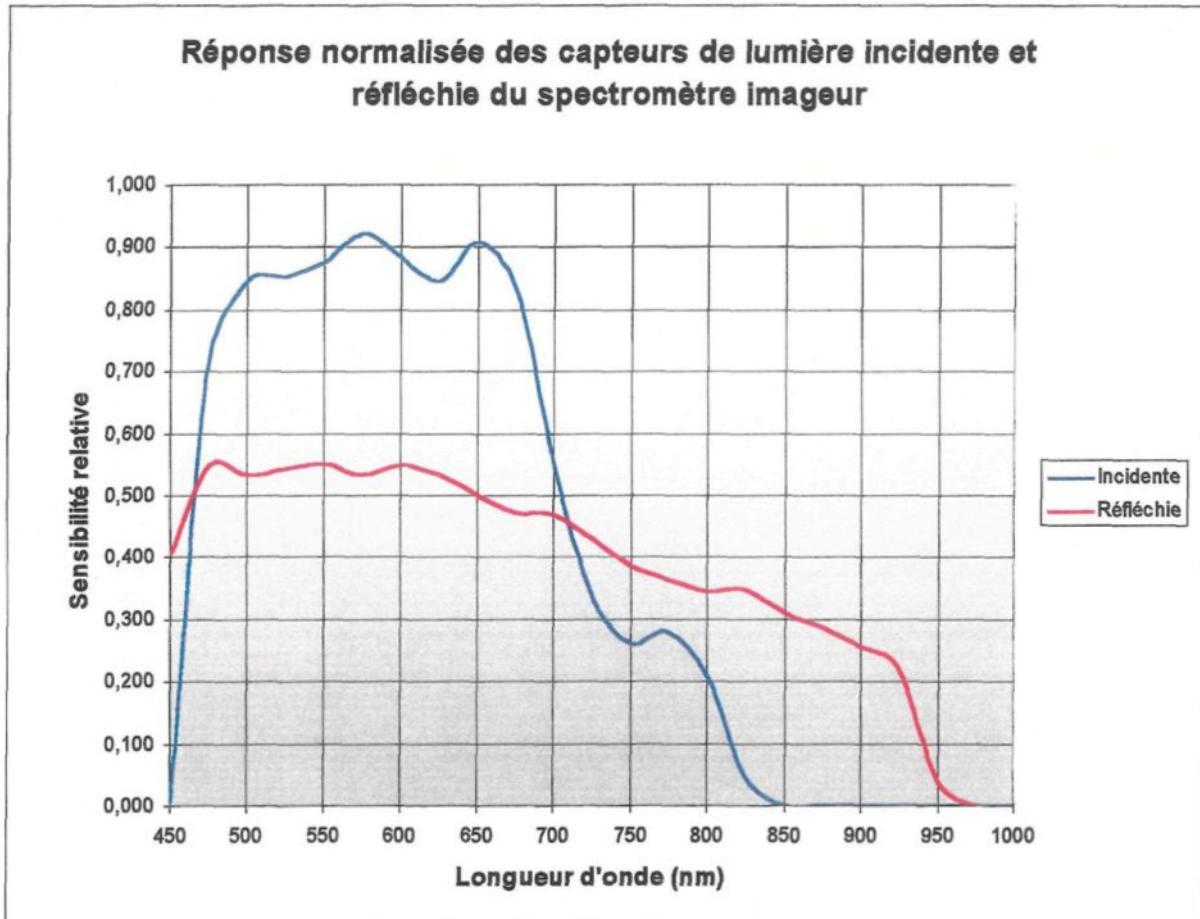
Le système du spectromètre imageur a été calibré à l'aide du monochromateur en réflectance. Ceci a été effectué en n'utilisant que le monochromateur, dont le faisceau de lumière sur un bloc de poudre de magnésie. Ce matériau a la particularité d'avoir à peu près le même pouvoir réflecteur pour toutes les longueurs d'ondes du visible et du proche infrarouge. Le monochromateur y imageait un faisceau d'environ 2,5 cm de côté. On plaçait alors le capteur de lumière incidente dans un des bords du faisceau et on observait l'ensemble à l'aide du spectromètre imageur. Pour connaître la réponse du capteur de lumière incidente par rapport à celle de la caméra, il est important pour cela de calibrer le

capteur CCD. Comme il a été mentionné plus haut, le monochromateur émet de la lumière selon la loi de Planck avec un pic d'émissivité situé à quelque part dans l'infrarouge thermique. Il ne faut pas oublier que le capteur a aussi sa propre réponse spectrale avec un maximum situé dans le vert à 540 nm (voir figure 4.1). Il est donc important d'évaluer la réponse du capteur CCD au signal du monochromateur. Ces valeurs vont ensuite servir pour évaluer la réponse spectrale comparée du capteur CCD et du capteur de lumière incidente. Voici donc la courbe de la réponse du capteur en fonction de la longueur d'onde de lumière issue du monochromateur.



Graphique 5.1: Réponse du capteur CCD en fonction de la longueur d'onde du monochromateur.

Lorsqu'on évalue les réponses comparées des capteurs de lumière incidente et réfléchie, on divise tous les résultats obtenus par un facteur proportionnel à la réponse du CCD au signal du monochromateur et ce, pour une longueur d'onde donnée. Voici le résultat.



Graphique 5.2: Réponse normalisée du capteur de lumière incidente et réfléchie

L'on peut tout de suite remarquer que le capteur de lumière incidente ne transmet aucune information au-delà de 850 nm. Ceci ne constitue pas un problème majeur puisqu'il est rare que l'on veuille obtenir de l'information dans ces bandes. Cette réponse du capteur

de lumière incidente semble correspondre à celle de la fibre optique (graphiques 5.1) qui a été achetée de chez Edmund Industrial Optics.

5.2 Tests du spectromètre imageur sur le terrain

5.3.1 Première série de tests



Image 5.5: Tests du spectromètre imageur sur le terrain, le 1^{er} août 2001.

Plusieurs séries de tests ont été effectuées avec le spectromètre imageur. L'une des premières tâches a été de calibrer les filtres de manière à ce qu'ils ne sur- ou sous-exposent pas le capteur CCD. Ceci s'est fait à la manière traditionnelle décrite à la section 4.1.4.

Une fois ce travail terminé, les expérimentations consistaient à faire des

observations d'un même sujet dans différentes bandes spectrales. Il s'agissait en grande partie de mesurer la variation d'intensité spectrale reçue aux capteurs de lumière incidente et réfléchie, en fonction de l'heure de la journée, donc de l'angle solaire. Ceci peut se faire aisément à l'aide du logiciel *XICAS* avec lequel on peut avoir l'intensité d'un pixel quelconque dont l'adresse est connue. Dans ces cas, on pouvait considérer que les angles θ_r et φ_r (voir section 2.2.1) entre l'observateur et le sol étaient constants puisque ce sont toutes des observations à partir d'un support fixe qui ont été faites sur un sujet fixe.

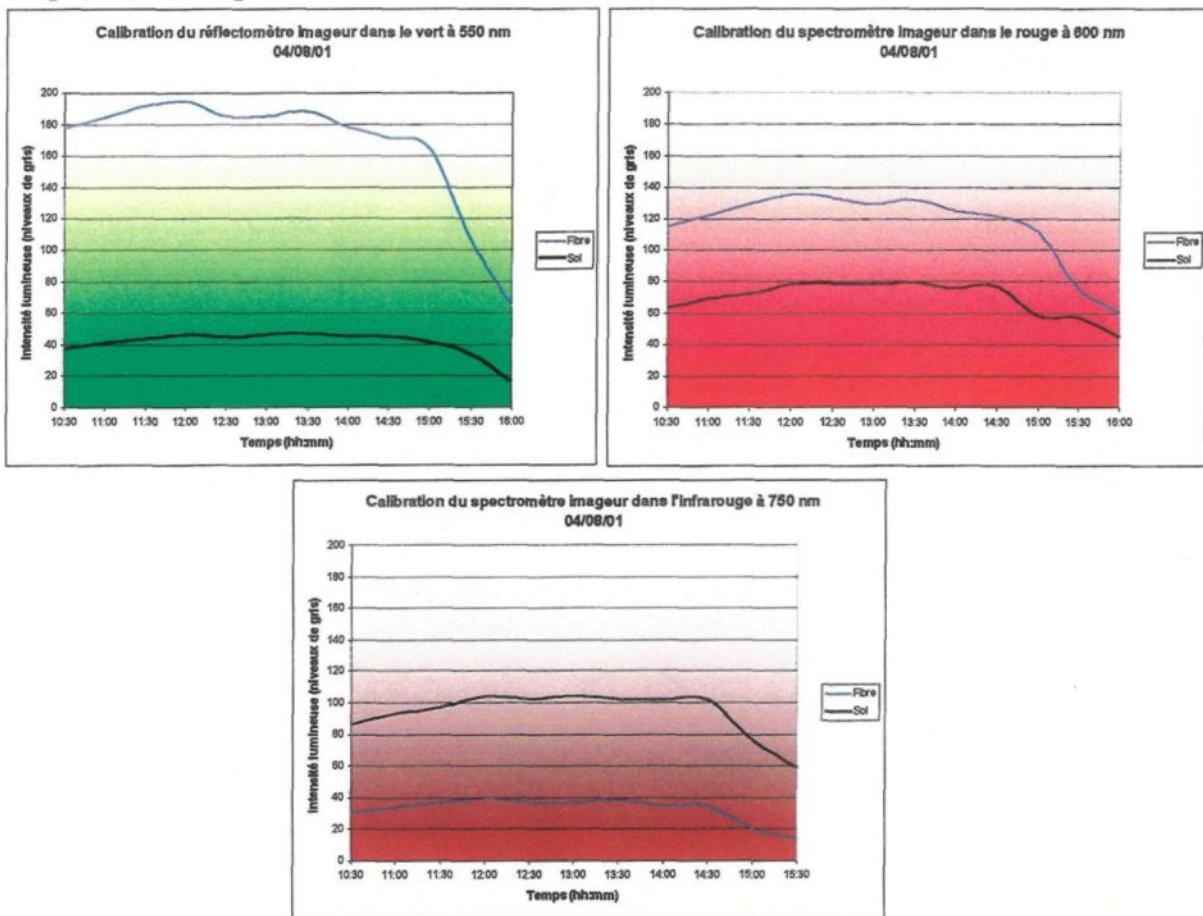
Une première série de données ont étées prises à tous les 20 minutes entre 12h40 et 14h20, le 1^{er} août 2001 sur une surface gazonnée près d'un boisé et d'une maison (voir image 5.5). Les résultats de cette première partie s'avèrent déjà être relativement concluants. En effet, les intensités des capteurs de lumière incidente et réfléchie ont bel et bien varié temporellement. Par contre, cette première série de mesure a aussi permis de conclure avec certitude qu'il n'était pas approprié de mesurer l'intensité d'un seul pixel. En effet, il semble que les parties individuelles du terrain étaient relativement petites par rapport au pixel. Un mouvement infime du brin d'herbe observé pouvait résulter en un gros écart de luminosité. D'autre part, les ombres des arbres apparemment situés trop près sont venus diminuer le temps de prise de mesures, ceci a aussi dû être corrigé en changeant d'emplacement pour une prochaine série de tests.

Avec les conclusions de la première série de mesures, il était alors devenu évident qu'il fallait définir à l'aide du logiciel *XICAS* deux plages de pixels, dont on allait mesurer

l'intensité moyenne. L'une était une mesure de l'intensité moyenne d'une région du sol et l'autre, du point de lumière étant l'image du capteur de lumière incidente. De cette manière, une variation ponctuelle n'a pas une grande influence sur le signal de l'ensemble de la région. Une deuxième série de données a été prise le 4 août 2001. Le choix de l'emplacement de l'expérimentation s'est fait sur le même terrain mais dans un lieu plus loin de la forêt. L'une des conclusions qui a pu être tirée de la deuxième série de données est que le système de capteur de lumière incidente semble moins influencé par les petites variations du niveau de lumière ambiante. Il est à noter que ce système doit être augmenté d'un filtre neutre de densité 0,3 pour obtenir un signal dans la gamme d'intensités du capteur.

Il semble que la réflectivité du sol varie plus rapidement que la lumière incidente. Ceci semble concorder avec la théorie de la réflectance bidirectionnelle. Les brins d'herbe sont majoritairement orientés face au Soleil de midi ce qui leur confère une réflectance maximale lorsque le Soleil est perpendiculaire à leur surface. Lorsque le Soleil redescend dans le ciel, le signal du sol dans le vert s'estompe plus rapidement que la lumière ambiante dans la même bande. Par contre, la chute drastique du signal que l'on observe sur ces graphiques aux alentours de 15 h est attribuable à de l'ombre causée par un grand arbre. Les données à partir de ce point ne peuvent être analysées car les sujets observés se trouvaient au milieu de fluctuations lumineuses dues à l'ombre du feuillage de ce dernier. On peut l'apercevoir sur les graphiques qui suivent. La proximité d'une maison dont les murs étaient blancs a assurément eu un effet sur les mesures mais il est difficile de juger de

son ampleur avec exactitude. En effet, une certaine quantité de lumière a été réfléchie par ce mur d'une manière difficile à quantifier et cela a eu pour effet d'éclairer plus le sujet et le CLI. Idéalement, les tests de calibration auraient dû être faits au beau milieu d'une zone comme un champ par exemple. Le problème à ce niveau est de trouver l'alimentation électrique nécessaire pour le fonctionnement des appareils et c'est d'ailleurs la raison pour laquelle cela n'a pas été fait.



Graphiques 5.3, 5.4 et 5.5: Comparaisons des signaux du capteur de lumière réfléchie et incidente.

Une troisième série de données ont été prises à l'UQAC le 17 septembre 2001. Nous avions obtenu une permission spéciale du service l'immeuble et équipement pour effectuer nos essais à partir de la passerelle entre le pavillon principal et le pavillon des

humanités. Le sol sous une grande partie de la passerelle est gazonné et c'est ce dernier qui a servi de sujet. Cet endroit a été choisi du fait qu'il était facilement accessible à partir du laboratoire de physique et qu'il permettait d'observer le sol d'une certaine hauteur estimée à 6 mètres. Le gazon a cet endroit n'était pas des plus verts à cause du piétinement par les usagers de l'université. Le ciel était dégagé au début des tests, puis il est devenu ensoleillé avec de fréquents passages nuageux. Ceci a eu pour effet de limiter la durée des essais mais on peut quand même tirer plusieurs conclusions intéressantes des données recueillies. De toutes les séries de tests, ce sont uniquement ces dernières qui ont été effectuées en la présence de M. Verreault.

	Heure hh:mm	CLI Niveaux de gris	Deviation Niveaux de gris	Sol Niveaux de gris	Déviation Niveaux de gris	Sol/CLI
Vert	12:00	203,09	2,14	127,77	22	0,629
	13:00	193,2	2,56	120,3	22,26	0,623
	14:00	181,17	2,87	110,38	24,93	0,609
Rouge	12:00	134,55	2,84	152,5	19,7	1,133
	13:00	126,7	2,73	142,08	19,69	1,121
	14:00	116,72	6,42	137,6	23,74	1,179
Infrarouge	12:00	58,22	1,68	121,98	12,01	2,095
	13:00	54,05	1,59	116,23	12,41	2,150
	14:00	50,27	1,64	107,16	13,4	2,132

Tableau 5.3: Intensités lumineuses du sol versus CLI pour les tests du 17 septembre 2001

Somme toute, les tests que nous avons effectués à partir de cet endroit se sont avérés être les plus intéressants. Comme on peut l'apercevoir sur le tableau 5.3, on retrouve les intensités lumineuses du capteur de lumière incidente (CLI) et du sol pour différentes heures et bandes spectrales. Les colonnes intitulées « Déviation » représentent l'écart d'intensités des pixels de toute la plage évaluée. On s'attend à ce que cet écart ne soit pas important pour le CLI et c'est bien ce qui se produit. Ceci signifie que la plage du CLI

dans l'image était uniforme en luminosité. On peut remarquer qui y a eu une diminution du signal reçu pour les plages évaluées et dans toutes les bandes entre 12:00 et 14:00. Ceci signifie que l'angle solaire diminuait et par conséquent, que la quantité de lumière disponible diminuait aussi. Le CLI a bel et bien mesuré cette diminution.

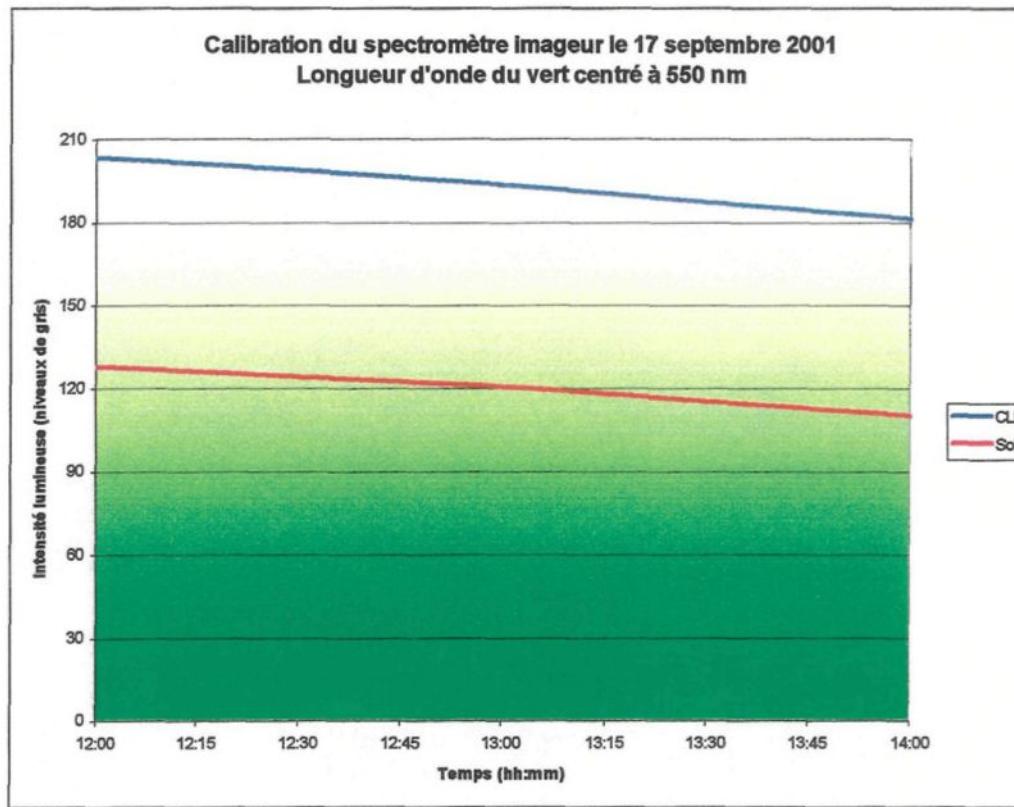
Attirons maintenant notre attention sur la dernière colonne intitulée Sol/CLI. Elle représente le rapport entre le signal reçu du sol et celui du CLI. Ce n'est pas la grandeur de ces facteurs qui est importante à vérifier comme la régularité temporelle de ces derniers pour une longueur d'onde donnée. On peut voir que ces facteurs sont relativement près les uns des autres dans chacune des longueurs d'ondes. Typiquement, on observe une variation de ce facteur de l'ordre de 2%. Ceci signifie que le CLI mesure une variation de luminosité ambiante qui correspond à celle observée en lumière réfléchie par le sol. Ce résultat est précisément celui auquel nous voulions arriver.

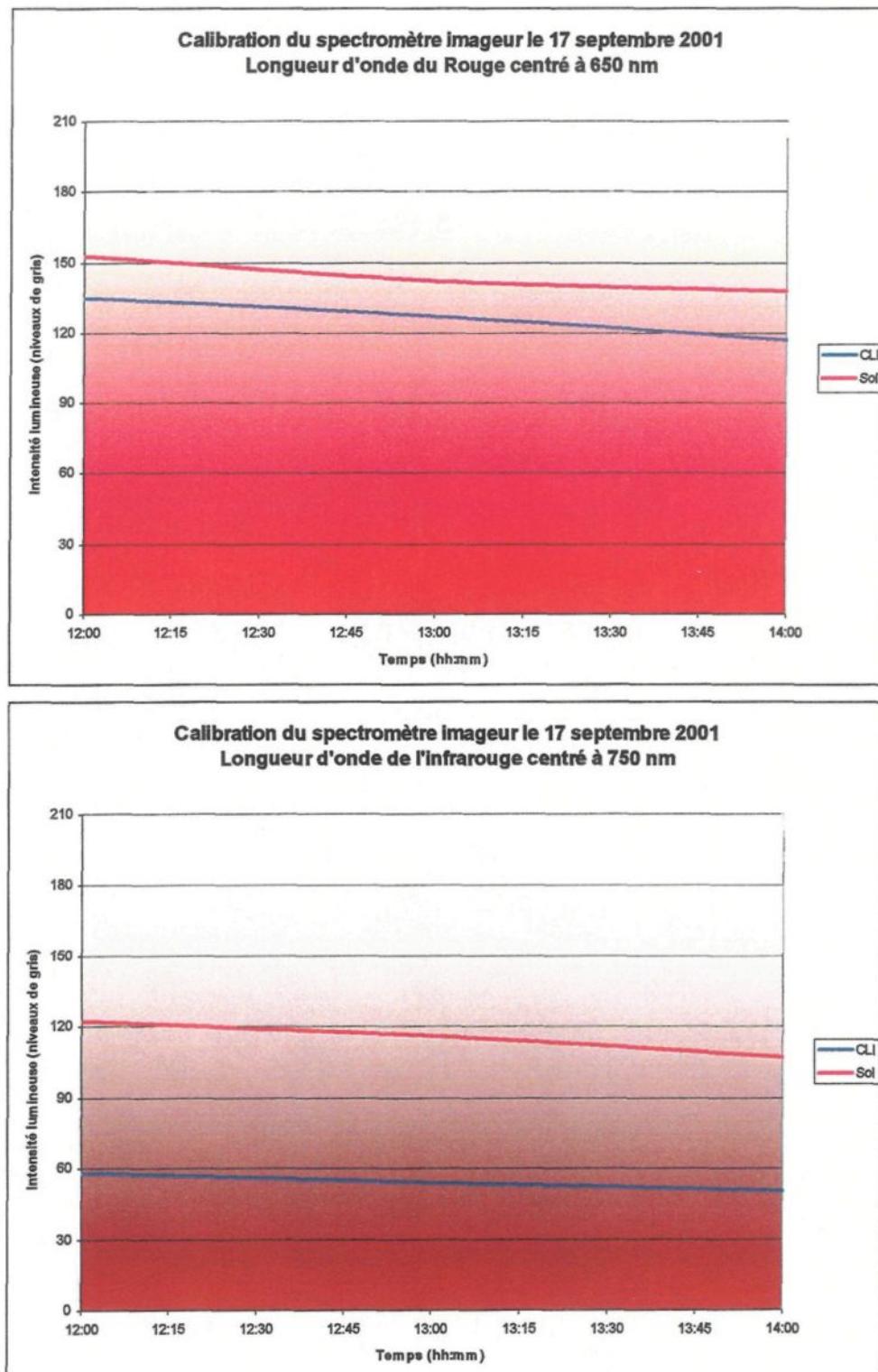
Par contre, il est difficile de tirer des conclusions sur le 2% d'écart entre ces valeurs advenant le fait que cet écart n'est jamais le même pour chacune des longueurs d'ondes à un temps donné. Ce n'est donc pas une erreur systématique.

D'autre part, il est intéressant de noter que la déviation sur l'aire d'intérêt au sol pour les trois longueurs d'onde a augmenté en fonction de l'heure. Ceci signifie que plus le Soleil est bas, plus il y a de parcelles de terrain qui réagissent de manière différente à ce changement. Ceci semble quelque peu s'apparenter avec un effet d'ombrage similaire à ce

qui était représenté à la figure 2.2, p.11. Une quantité d'ombre plus grande donnera à une région une plus grande déviation de luminosité entre ses régions les plus lumineuses et celles qui le sont le moins.

Visualisons la tendance des données à l'aide de graphiques pour chaque longueur d'onde. Ces graphiques sont tracés à partir des données du tableau 5.3. La courbe en bleu sur chacun des graphiques représente la variation du signal reçu par le capteur de lumière incidente alors que la courbe en rouge représente le signal moyen reçu du sol. On peut remarquer que sur chacun des graphiques, les deux courbes ont une pente qui est très semblable. Ceci est un résultat très important puisqu'il est la preuve qu'un spectromètre imageur a bel et bien été mis au point.





Graphiques 5.6, 5.7 et 5.8: Variations des intensités mesurées par les capteurs de lumière incidente et réfléchie, lors d'une séance d'essais effectuée sur la passerelle de l'UQAC, le 17 septembre 2001.

Il est évident que ces résultats ne sont pas la preuve que le spectromètre imageur est prêt à être utilisé pour faire de l'imagerie aérienne. Le but de cette recherche était de mettre au point un appareil qui pourrait faire des mesures en réflectance du sol et c'est exactement ce qui a été fait. Les premières séries de données révélées par le système permettent de conclure que le système fonctionne bel et bien comme nous l'avions espéré. Il y a encore tout un travail de calibration à faire pour permettre aux futurs utilisateurs d'interpréter les données qui seront fournies par ce nouvel appareil. Ce qui est important de constater, c'est que l'ancien système VAM est maintenant muni d'un appareil permettant d'inclure à chaque image des données concernant la lumière disponible au moment de la prise de l'image. Les principes théoriques qui ont été discutés au chapitre 2, selon lesquels la lumière incidente varie selon plusieurs facteurs incontrôlables, sont bel et bien présents, mais ils pourront dorénavant être considérés dans l'analyse des images. Le spectromètre imageur ouvre maintenant les portes à une multitude d'études d'évolution temporelle de la végétation. Ceci devient alors un bel outil d'investigation des ressources renouvelables comme la forêt boréale dont il est souvent question à l'Université du Québec à Chicoutimi. Il faut aussi savoir que ce système peut servir à détecter n'importe lequel changement dans la réflectance spectrale d'un objet observé.

VI**CONCLUSION**

Le but de ce projet de recherche qui était de mettre au point un spectromètre imageur à partir de la vidéographie aérienne multispectrale a été atteint. En effet, les tests préliminaires du nouveau système qui a été créé ont été concluants.

Ceci ne s'est pas fait sans difficulté. Une quantité énorme de connaissances a dû être assimilée pour permettre de mener à bien ce projet de recherche qui, à première vue, pouvait sembler plutôt simple. En fait, le contexte théorique révélant qu'il y avait impossibilité de faire un suivi temporel d'une zone de végétation par photographie aérienne, sans préalablement connaître l'intensité et le contenu spectral de la lumière disponible était facile à admettre et à comprendre. Le principe général d'un appareil permettant de tenir compte de cet aspect était lui aussi, relativement facile à maîtriser. Par contre, il s'est avéré que la conception d'un tel appareil sur le plan optique était beaucoup plus compliqué que je n'avais osé l'espérer.

L'optique est une science de compromis. Ce n'est peut-être pas quelque chose qui est évident au niveau du baccalauréat de par la nature des cours qui sont plutôt théoriques et sans véritable application expérimentale. La facette du design optique m'était inconnue

avant de commencer cette recherche et j'avoue que je ne pouvais m'imaginer que cela serait aussi complexe. Il y a tellement de variables dans un système optique et chacune d'elles peut faire une différence significative sur la qualité de l'image qu'on obtiendra à l'autre extrémité du système.

Pour faire un résumé du cheminement qui a été suivi durant cette recherche, nous allons commencer par l'apprentissage du logiciel *ZEMAX*. Ceci se faisait de manière relativement aisée pour manipuler les principes de base du logiciel. Par contre, l'une des choses les plus complexes à maîtriser était les différents outils pour évaluer les performances optiques d'un système. Jamais il n'avait été question dans notre formation de niveau baccalauréat de rayons tangentiels et sagittaux, de courbure de champ, d'astigmatisme, d'aberrations chromatiques, de piqué, d'ouverture numérique, ni de distorsion en bâillet ou en coussinets. Évidemment, les méthodes pour faire diminuer ceux d'entre eux qui sont des défauts étaient aussi inconnues. Cette matière a été assimilée au fur et à mesure que la complexité du système augmentait. Les conclusions auxquelles nous sommes arrivées ne sont pas tombées du ciel et nous avons travaillé fort pour en arriver à ces résultats. En fait, il serait faux de dire que les premières évolutions du système du spectromètre imageur étaient aussi compliquées que le système final.

Au début, nous espérions trouver un design performant avec le moins de systèmes optiques complexes possibles. Par contre, il s'est avéré qu'un système optique performant est un système complexe et c'est précisément ce que le spectromètre imageur est devenu.

L'un des tournants majeurs on le sait, est le moment où nous croyions avoir trouvé le design du système final, mais que les objectifs de caméra que l'on avait commandés ne correspondaient aucunement aux objectifs que nous avions simulés à l'aide des données qui avaient été brevetées. Une fois que les mesures qu'il était possible de faire sur les différentes composantes optiques des objectifs eurent été prises, M. Verreault a optimisé le système jusqu'à obtenir une simulation d'objectif se rapprochant sûrement beaucoup de la réalité. Les évolutions de caméra subséquentes ont révélé qu'il fallait modifier de manière plutôt drastique l'ancien modèle simulé. On a tout de même fini par obtenir un système relativement performant avec ce qu'il nous était possible d'acquérir. Une fois les simulations considérées satisfaisantes, la construction du système a pu commencer. Heureusement, plusieurs parties de la VAM ont pu être conservées. On parle entre autres du système électronique de synchronisation de la roulette de filtres, du moteur et de la roulette de filtres. Le système a été monté façon semi-permanente de manière à pouvoir exécuter des tests de performance du système. Ceci a été fait dans des conditions plus ou moins favorables mais surtout incontrôlables. Suffisamment d'essais ont été effectués pour permettre de conclure que le système fonctionne comme nous l'avions espéré.

D'autre part, il reste encore tout un travail de calibration de l'appareil à faire. Ceci pourrait facilement constituer un projet pour le cours de physique expérimentale IV d'un étudiant en fin de baccalauréat en physique. Plusieurs mesures devraient être prises pour quantifier les différentes caractéristiques et réponses du spectromètre imageur. Aussi, lorsque cela aura été fait de manière satisfaisante, il faudra créer un boîtier rigide dans

lequel le système pourra être fixé de manière permanente. Il faudra garder en ligne de compte que l'appareil est conçu pour être utilisé à l'intérieur d'un avion et par conséquent qu'il subira toutes sortes de contraintes physiques.

Pour conclure, j'aimerais mentionner que l'expérience s'est révélée être très enrichissante tant au niveau théorique qu'expérimental. Les choses décrites dans ce mémoire sont maintenant des choses que je considère maîtrisées et je sais que mon enseignement futur en sera gratifié. Nous sommes fiers du résultat que nous avons obtenu et j'espère que l'avenir du département de physique garantira qu'il y aura de futurs étudiants qui continueront ce long travail dont la première étape est maintenant complétée.

BIBLIOGRAPHIE

Andover Corporation, *Optical Filter Guide*.

Anonyme: Les bases physiques de la télédétection, chapitre 5. 5.2 *Notions de réflectance*. Site internet:

http://ceos.cnes.fr:8100/cdrom-97/ceos1/science/baphygb/chap5/ch52_f.htm

Babey, S. K., Anger, C. D., S. B. Achal, T. Ivanco, A. Moise, P. R. Costella et J. Deblieck, 1999. *Development of a next generation compact airborne spectrographic imager: CASI 2*, Proceedings of the fourth International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition/21st Canadian Symposium on Remote Sensing. June 24th 1999, Ottawa, Ontario, I-229 to I-238.

Bannari, A., P. M. Teillet et G. Richardson, 1998. *Nécessité de l'étalonnage radiométrique et standardisation des données de télédétection*, Actes du 20^{ieme} Colloque sur la Télédétection, Calgary, Canada, 10-13 mai 1998.

Benson, H., 1999, *Physique, Ondes, Optique et Physique Moderne*. Éditions du renouveau pédagogique, p175-177

Brevet d'invention : Patent 5920436 objectif fuji CF25L f/85: Site Internet:

<http://164.195.100.11/netacgi/nphParser?Sect1=PTO2&Sect2=HITOFF&p=1&u=/net/ahtml/searchbool.html&r=13&f=G&l=50&co1=AND&d=pall&s1=cctv.PPDB.&s2=1ens.PPDB.&OS=SPEC/cctv+AND+SPEC/lens&RS=SPEC/cctv+AND+SPEC/lens>

CASI 2 Homepage: <http://www.itres.com>

Edmund Industrial Optics 2000, *Optics and optical instruments catalog*.

Frost, P. A., 1990. *Discrimination and classification with Xybion multispectral video systems*. 19th International Congress on High Speed Photography and Photonics, Cambridge, England, 16-21 September.

Herbier Marie-Victorin, *Phénologie des plantes*.

http://www.irbv.umontreal.ca/francais/herbier/confection/phenologie_des_plantes.htm

Leblon, B., H Granberg et F. Bonn., 1993. *Utilisation de mesures radiométriques dans le visible et le proche infrarouge sur des couverts forestiers: étude de l'influence de l'ombre*, Acte du 16^e Symposium canadien de télédétection, Sherbrooke, Québec, 7-10 juin, pp. 835-839.

- Leblon, B., H Granberg C. Ansseau et A. Royer, 1993. *A semi-empirical model to estimate the biomass production of forest canopies from spectral variables. Part 1:Relationship between spectral variables and light interception efficiency*, Remote Sensing Reviews, p.7.
- Marian F. Baurngardner, 1969. *Aerospace science and agricultural developpment*. American society of agronomymeting (1969, Detroit Michigan)
- Mc Laughlin, Stephan, 199. *Évaluation de la densité (tiges/ha.) et caractérisation de la défoliation d'un territoire forestier boréal à l'aide de la vidéographie aérienne multispectrale (VAM)*, Mémoire de l'Université du Québec à Chicoutimi.
- Melles Griot, *Catalogue 1997-98*.
- Neale, C. M. U., J. Qi, M. S. Moran, P. J. Pinter Jr., S. Sundaraman et R. H. Amhed, 1995. *Methods of radiometric calibration and reflectance determination from airborne multispectral video imagery*, Actes du 15th Biennal Workshop on Videography & Color Photography in Ressource Assessment, Terre Haute, Indiana, 1-3 May 1995, pp. 87-99.
- Niedrauer, T., 1991. *A coastal survey with a multispectral video system*, International Symposium on Optical Engineering and Photonics in Aerospace Sensing, Orlando, Fl, April 1-5.
- Oriel Instruments, 1999. *The Book Of Photon Tools*.
- SONY XC-77/77CE ccd b/w videocamera module service manual.
- Verreault, R., G.H. Lemieux et S. Mc Laughlin., 1993. *La vidéographie aérienne multispectrale (VAM) appliquée au monitoring de la régénération forestière*, Acte du 16^e Symposium canadien de télédétection, Sherbrooke, Québec, 7-10 juin, pp. 647-651.
- Verreault, R., 1997. *An efficient method of correcting chromatic aberrations of multispectral video systems in the spectral range 400-1100 nm**, Proceedings of the third International Airborne Remote Sensing Conference and exhibition, Copenhagen, Denmark, 7-10 juillet, pp. II-781-788.
- Witherspoon, N. H. et Holloway, J. H. Jr., 1992. *Video based multispectral detection of landmines, a technology applicable for use in law enforcement*, Multispectral Imaging Technical Data, Xybion Electronic systems corporation.

Xu, Q.F., N.T. O'Neill, A. Royer, D.J. Williams et A. Tarussov., 1993. *Reflectance extraction over a forestry site using the compact airborne spectrographic imager*, Acte du 16^e Symposium canadien de télédétection, Sherbrooke, Québec, 7-10 juin, pp. 851-856.