



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Département de Physique

**Dispositif de mesure de la
distribution de luminance du ciel
basé sur des techniques d'imagerie
numérique: développement et
validation expérimentale**

Mémoire du Travail Pratique de Diplôme

présenté par **Marilyne ANDERSEN - THYS**



Responsable: Prof. Jean-Louis SCARTEZZINI
Assistant : M. Laurent MICHEL

Février 1998

Table des matières

Résumé	4
Introduction	5
Chapitre I: Eléments théoriques. Composants du sky-scanner	8
I.1 Caméra CCD	8
I.1.1 Fonctionnement - Paramètres	8
I.1.2 Sensibilité spectrale	11
I.2 Miroir sphérique	12
I.2.1 Approche géométrique	12
<i>I.2.1.1 Propriétés de la projection sphérique</i>	12
<i>I.2.1.2 Principes d'optique géométrique</i>	13
<i>I.2.1.3 Relation entre les coordonnées d'un objet et celles de son image après réflexion</i>	14
I.2.2 Approche physique	16
<i>I.2.2.1 Réflexion d'une onde électromagnétique sur un miroir</i>	16
<i>I.2.2.2 Détermination de la couche métallique dont il faut recouvrir la sphère</i>	17
<i>I.2.2.3 Réflectivité spectrale du miroir sphérique</i>	19
I.3 Support du sky-scanner	21
I.4 Notions de radiométrie et de photométrie	22
I.5 Eléments théoriques relatifs aux calibrations spectrale et photométrique	24
I.5.1 Correction spectrale.....	24
<i>I.5.1.1 Filtres optiques</i>	24
<i>I.5.1.2 Principe de recherche des filtres correcteurs</i>	26
I.5.2 Prévision analytique de la relation pixel-luminance.....	27

Chapitre II: Calibrations du système	28
II.1 Propriétés et applications des appareils utilisés	28
II.1.2 Sources lumineuses	28
II.1.2 Monochromateur	30
II.1.3 Spectrophotomètre	31
II.1.4 Simulateur de lumière diffuse (ciel artificiel à balayage)	32
II.2 Etude de la réponse de la caméra	34
II.2.1 Préchauffage de la caméra pour une réponse stable	34
II.2.2 Variation de la réponse de la caméra avec la température	36
II.3 Calibration géométrique	39
II.3.1 Etude de la déformation géométrique	39
II.3.1.1 <i>Déformation géométrique due au système objectif + caméra</i>	39
II.3.1.2 <i>Déformation géométrique due à la réflexion sur le miroir</i>	41
II.3.2 Relation entre les positions dans l'espace et sur l'image	43
II.3.2.1 <i>Relation entre les positions d'un point dans l'espace et celles du pixel correspondant</i>	43
II.3.2.2 <i>Incertitude sur la position d'un point</i>	45
II.4 Uniformité de la réponse du système	49
II.4.1 Réponse du système en fonction de la position sur l'image	49
II.4.1.1 <i>Uniformité de la réponse pour la caméra seule</i>	49
II.4.1.2 <i>Uniformité de la réponse pour le système caméra + miroir</i>	50
II.4.2 Problèmes causés par la présence du support sur l'image	51
II.4.2.1 <i>Proportion de la voûte céleste obstruée à cause du support</i>	51
II.4.2.2 <i>Influence d'un masque sur les valeurs de luminance obtenues dans les parties visibles</i>	53
II.4.2.2 <i>Positionnement de la caméra par rapport au miroir</i>	54
II.5 Calibration spectrale	56
II.5.1 Calibration radiance vs niveaux de gris	56
II.5.2 Réponse spectrale de la caméra	59
II.5.3 Recherche des filtres photopiques adéquats	61
II.5.4 Sensibilité spectrale corrigée	63
II.6 Calibration photométrique	66
II.6.1 Dispositif expérimental et prise de mesures	66
II.6.2 Résultats et erreurs	67
II.6.3 Elaboration du protocole de calibration	70
II.7 Discussion sur les calibrations du système	71
Chapitre III: Mise en fonctionnement et validation du système	73
III.1 Procédure d'acquisition et de traitement des images	73
III.1.1 Traitements préliminaires	74
III.1.1.1 <i>Détermination de la ligne d'horizon</i>	74
III.1.1.2 <i>Détermination des contours des parties visibles des 145 zones</i>	74
III.1.1.3 <i>Enregistrement des courbes de calibration</i>	75

III.1.2 Déroulement des opérations.....	76
<i>III.1.2.1 Description des étapes</i>	76
<i>III.1.2.2 Boîte de dialogue pour le pilotage de sky-scanner et résultat graphique dans le cas d'une discrétisation en 145 zones</i>	79
III.2 Validation du système	81
III.2.1 Dispositif expérimental et prise de mesures	81
III.2.2 Résultats de la validation et estimation des erreurs	82
<i>III.2.2.1 Résultats graphiques</i>	82
<i>III.2.2.1 Résultats numériques</i>	83
III.3 Synthèse des résultats obtenus	90
Conclusion	92
Références bibliographiques	94
Annexes	98

Résumé

Dispositif de mesure de la distribution de luminance du ciel basé sur des techniques d'imagerie numérique : développement et validation expérimentale.

Dans ce projet, on cherchera à calibrer un nouveau modèle d'urano-tomographe, - dit sky-scanner -, dont le principe essentiel repose sur l'utilisation d'un miroir sphérique sur lequel l'image de la voûte céleste est projetée, de manière à en obtenir une projection fish-eye. Cette projection est mise en image par une caméra CCD placée au-dessus du miroir, et dont le raccord à un ordinateur permet un traitement approprié de l'image ainsi qu'un pilotage automatisé des différents composants de la caméra vidéo. La relation entre les niveaux de gris des pixels de la caméra et les luminances qui leur sont associées permet de faire de ce système un luminance-mètre vidéo.

Il s'agira donc plus précisément d'effectuer les calibrations géométrique, d'uniformité de la réponse, spectrale et photométrique de ce sky-scanner, ainsi que d'optimiser les procédures d'acquisition et de traitement des images.

La distribution des luminances de la voûte céleste sera déterminée de manière quasi-continue, avec une valeur en chaque pixel. Pour permettre une validation sous le simulateur de lumière diffuse, nous adapterons la procédure de traitement des images à une discrétisation du ciel en 145 zones circulaires.

Introduction

Pour mesurer les valeurs de luminance, on utilise traditionnellement un luminance-mètre, mais ce type d'appareil présente le désavantage de ne mesurer qu'une seule valeur à la fois. Cette restriction rend impossible une évaluation correcte du champ visuel, et qui plus est, de la distribution de luminance de la voûte céleste.

Or pour les estimations de facteur lumière du jour, par exemple, il apparaît fort utile, voire indispensable, de connaître de façon quantitative cette distribution, afin de préciser, avec plus d'acuité que ne le permettent les données météorologiques ou une appréciation personnelle de la voûte céleste, les conditions sous lesquelles les mesures sont réalisées.

Il faut donc trouver un moyen de connaître les caractéristiques lumineuses du ciel avec précision et objectivité. Les conditions d'une mesure pourront alors être définies exactement et les valeurs de facteur lumière du jour comparées entre elles. Cela permettra également d'étendre les mesures de FLJ à des situations de ciel non couvert; dans des pays particulièrement ensoleillés comme la Grèce par exemple, il est en effet difficile d'atteindre les conditions de ciel couvert CIE indispensables à une mesure de facteur lumière du jour, et les résultats sont de plus très peu significatifs, puisqu'une telle situation présente justement un caractère exceptionnel.

C'est pourquoi on a cherché à développer un système capable de mesurer simultanément les valeurs de luminance d'un grand nombre de zones. D'après les résultats actuels des recherches, il semble que la caméra vidéo CCD soit la plus adaptée à cet effet, la photographie entraînant par exemple de grandes erreurs dues au développement...

Jusqu'ici, plusieurs modèles de photomètres vidéo avec capteurs CCD ont été développés, dont pratiquement aucun n'a encore été commercialisé.

Les applications de ces appareils sont principalement de quatre types [4]:

- la mesure des *performances visuelles à l'intérieur de bâtiments*, que permet par exemple le seul photomètre vidéo commercialisé, appelé « CapCalc » et développé au Canada, dont une nouvelle version a été développée sous le nom de « IQCam » [42].
- l'étude de l'*éclairage pour les transports*, où les appareils peuvent être placés sur des véhicules ou servir à évaluer la visibilité des piétons, le bruit visuel ...

- la *photogoniométrie*, qui mesure les paramètres lumineux selon différents angles, et dont les appareils cherchent par exemple à évaluer les coefficients de réflexion et de transmission bidirectionnels.
- enfin, l'étude de l'*éclairage naturel*, qui est l'application visée dans ce projet.

Concernant ce dernier domaine, les principes de sky-scanners sont assez variés, mais on retrouve souvent l'utilisation d'un objectif fish-eye pour la caméra CCD [4] [3] [12] [46]. Ce dernier permet de prendre une image instantanée du ciel avec un angle d'ouverture important, mais pas de 180°.

En effet, le marché ne propose ce type d'objectif qu'avec des caractéristiques adaptées à des appareils photographiques 24 x 36 ou à des caméras de cinéma 16mm (Super8), mais pas à un capteur CCD. On pourrait placer un verre dépoli derrière un objectif fish-eye et filmer l'image transmise, mais elle serait de très mauvaise qualité; une autre alternative serait la construction d'un objectif fish-eye adapté à un capteur CCD, mais le coût que cela représenterait est démesuré. Cet objectif ne peut donc, à prix raisonnable du moins, proposer un champ de vision de 180° avec une qualité optique suffisante.

Une caméra CCD (capteur de diagonale $\frac{2}{3}$ de pouce) a été expérimentée comme photomètre vidéo [4] en la combinant avec un objectif fish-eye pour caméra 16mm, ce qui a permis d'atteindre un angle d'ouverture de 160° ; cette valeur semble être un maximum avec la combinaison objectif fish-eye et caméra CCD.

Notons que parmi les autres systèmes étudiés, on trouve le PRC Sky Scanner, développé en Allemagne, qui est un photomètre mesurant par balayage la distribution de luminance du ciel en 145 angles solides égaux, chacun d'une ouverture de 10° [37]; aux Pays-Bas a été développé un système de mesure d'irradiation spatiale, faisant également appel à un échantillonnage partiel de la radiation dans des sections célestes fixées, et qui fonctionne avec un ensemble de détecteurs photoélectriques statiques [31]. Les principes de dispositifs utilisant un ensemble de cellules photo multiples ou une cellule simple mobile – avec un système de fibres optiques associé - sont également mentionnés, mais ne sont pas

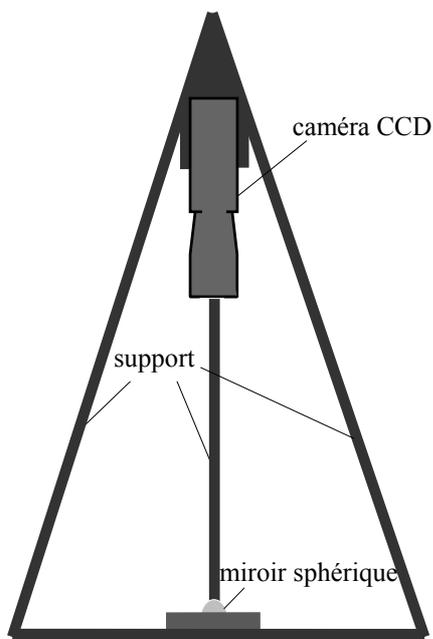


figure 0.a: Schéma du sky-scanner

expérimentés [29]. Le groupe allemand TechnoTeam [48] a, quant à lui, développé un système vidéo de mesure de luminance se basant sur une caméra CCD - même modèle que le nôtre - modifiée: filtre $v(\lambda)$, traitement spécial du signal d'entrée...; cet appareil, appelé LMK96, présente un angle d'ouverture horizontal d'environ 40° et un temps de mesure variant entre 0.5 et 10 secondes, selon le temps d'intégration de la caméra.

Le principe du sky-scanner étudié ici (figure 0.a) repose sur une projection fish-eye de la voûte céleste mais se différencie des autres systèmes existants par l'utilisation, non pas d'une lentille objective particulière, mais d'un miroir sphérique sur lequel la lumière du ciel est réfléchi et renvoyée vers la caméra CCD située au-dessus de lui et reliée à un ordinateur. Il existe une relation entre les niveaux de gris rendus par la caméra et les luminances correspondantes, ce qui permet de faire de ce système un luminance-mètre vidéo.

Cette nouvelle technique propose un angle d'ouverture d'environ 180°, avantage majeur par rapport aux systèmes précurseurs ; par contre, il inclut la visualisation du support de la caméra sur l'image, ce qui pourrait être une des faiblesses de ce système, et demande un étalonnage plus complexe.

Les objectifs fixés dans ce travail sont donc de calibrer le sky-scanner de manière à ce qu'il donne des résultats fiables, dont on peut évaluer l'erreur, avec comme points de comparaison les résultats du ciel artificiel.

Les calibrations à effectuer sont les suivantes:

- une calibration *géométrique*, qui donne la déformation géométrique due au système, ainsi que la position d'un objet dans l'espace en fonction de sa position sur l'image.
- une calibration *d'uniformité de la réponse*, qui permet de corriger les variations des résultats selon la position sur l'image, en particulier les écarts de la réponse entre le centre et les bords de l'image.
- une calibration *spectrale*, qui vise à rendre la sensibilité spectrale de la caméra aussi proche que possible de celle de l'oeil humain, à savoir la courbe photopique $v(\lambda)$ illustrée plus loin, à la figure I.4.a. Pour y parvenir, il faudra mesurer cette sensibilité, et déterminer les filtres photopiques à ajouter pour la corriger et la rendre semblable à $v(\lambda)$.
- enfin, une calibration *photométrique*, qui permet de trouver la relation entre les niveaux de gris des pixels, notés sur une échelle de 0 à 255, et les luminances associées, exprimées en Candela par mètre carré. Cette relation sera dépendante du temps d'intégration de la caméra, il y aura donc une courbe de calibration pour chaque temps d'intégration, les autres paramètres étant maintenus constants.

Ce système sera alors prêt à être utilisé en urano-tomographe, ceci par un traitement approprié et automatisé des images, réalisé à l'aide du logiciel *Image Pro Plus*. Suivra enfin la validation de ses performances, réalisée à l'aide du simulateur de lumière diffuse.