



# Analyse et exploitation des observations de passages du Soleil à partir de l'astrolabe de Danjon équipé d'une caméra CCD

Victor Sinceac

## ► To cite this version:

Victor Sinceac. Analyse et exploitation des observations de passages du Soleil à partir de l'astrolabe de Danjon équipé d'une caméra CCD. Planète et Univers [physics]. Observatoire de Paris, 1998. Français. ⟨NNT : 1998OBSP0081⟩. ⟨tel-02158119⟩

**HAL Id: tel-02158119**

**<https://hal.science/tel-02158119v1>**

Submitted on 17 Jun 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization



Corrigé

ECOLE DOCTORALE D'ASTRONOMIE ET D'ASTROPHYSIQUE D'ÎLE-DE-FRANCE

## THESE DE DOCTORAT

ASTRONOMIE FONDAMENTALE, MÉCANIQUE CÉLESTE, GÉODÉSIE

de

VICTOR SINCEAC

### ANALYSE ET EXPLOITATION DES OBSERVATIONS DE PASSAGES DU SOLEIL A PARTIR DE L'ASTROLABE DE DANJON EQUIPE D'UNE CAMERA CCD

présentée à l'Observatoire de Paris

le 14 mai 1998

Composition du jury :

Président :	NICOLE CAPITAINÉ	Observatoire de Paris
Rapporteurs :	ALEXANDRE H. ANDREI JULIEN BORGNINO	Observatório Nacional Rio de Janeiro Université de Nice
Examineurs :	FRANCIS LACLARE ZADIG MOURADIAN	Observatoire de la Côte d'Azur Observatoire de Paris - Meudon
Directeur :	FERNAND CHOLLET	Observatoire de Paris



ECOLE DOCTORALE D'ASTRONOMIE ET D'ASTROPHYSIQUE D'ÎLE-DE-FRANCE

(043)

sin

## THESE DE DOCTORAT

ASTRONOMIE FONDAMENTALE, MÉCANIQUE CÉLESTE, GÉODÉSIE

de

VICTOR SINCEAC

### ANALYSE ET EXPLOITATION DES OBSERVATIONS DE PASSAGES DU SOLEIL A PARTIR DE L'ASTROLABE DE DANJON EQUIPE D'UNE CAMERA CCD

présentée à l'Observatoire de Paris

le 14 mai 1998



Composition du jury :

Président :	NICOLE CAPITAINÉ	Observatoire de Paris
Rapporteurs :	ALEXANDRE H. ANDREI JULIEN BORGNINO	Observatório Nacional Rio de Janeiro Université de Nice
Examineurs :	FRANCIS LACLARE ZADIG MOURADIAN	Observatoire de la Côte d'Azur Observatoire de Paris - Meudon
Directeur :	FERNAND CHOLLET	Observatoire de Paris



*"There are more things in heaven and earth,  
Horatio, than are dreamt of in your philosophy."*

*( "Il y a plus de choses dans le ciel et sur la terre,  
Horatio, que n'en rêve votre philosophie." )*

WILLIAM SHAKESPEARE (1564 - 1616)

*Hamlet, I, 5, Hamlet.*

## Remerciements...

*... tout d'abord à Fernand Chollet pour l'immense soutien qu'il m'a apporté tout au long de mes années de thèse, pour son enthousiasme et sa patience sans lesquels je me serais senti perdu devant mon projet ;*

*... à Francis Laclare qui m'a transmis une bonne partie de son expérience de plus de vingt ans dans le domaine des mesures du diamètre solaire, ainsi qu'à ses collaborateurs Christian Delmas et Jean-Pierre Coin pour leur aide précieuse et sans réserve ;*

*... à François Mignard et Daniel Bonneau pour leur accueil chaleureux à l'Observatoire de Calern et leur soutien ;*

*... aux astronomes de Rio de Janéiro, Sao Paolo et San Fernando qui, travaillant aussi avec des astrolabes solaires, m'ont beaucoup soutenu dans mon travail ;*

*... à toute l'équipe "Astrolabes et Systèmes de Référence" de l'Observatoire de Paris ;*

*... au Soleil pour sa générosité !*







# SOMMAIRE

INTRODUCTION . . . . .	- vii
CHAPITRE I – L’ASTROLABE SOLAIRE . . . . .	I - 1
I.1 L’astrolabe de Danjon . . . . .	I - 1
I.1.1 La méthode des hauteurs égales . . . . .	I - 1
I.1.2 Le principe de l’instrument . . . . .	I - 2
I.2 L’astrolabe solaire . . . . .	I - 5
I.2.1 Le principe de l’instrument . . . . .	I - 6
I.2.2 Les prismes . . . . .	I - 9
I.2.3 Le filtre solaire . . . . .	I - 10
I.2.4 Le bain de mercure . . . . .	I - 12
I.3 Conclusions . . . . .	I - 12
CHAPITRE II – OBSERVATIONS SOLAIRES A L’ASTROLABE . II - 1	
II.1 Le principe de l’observation . . . . .	II - 1
II.1.1 Observations visuelles . . . . .	II - 1
II.1.2 Observations CCD . . . . .	II - 2
II.2 Equation fondamentale . . . . .	II - 5
II.2.1 La distance zénithale . . . . .	II - 5
II.2.2 L’angle horaire . . . . .	II - 6
II.2.3 L’équation générale . . . . .	II - 6
II.3 Les facteurs qui affectent les mesures . . . . .	II - 8
II.3.1 La polarisation de la lumière par le Wollaston . . . . .	II - 8
II.3.2 Le déplacement du foyer . . . . .	II - 9
II.4 Inconvénients des observations visuelles . . . . .	II - 9
II.4.1 L’erreur systématique des observations visuelles . . . . .	II - 10
II.4.2 L’œil humain et l’œil électronique . . . . .	II - 10
II.4.3 L’archéologie des observations . . . . .	II - 10
II.5 Conclusions . . . . .	II - 11



<b>CHAPITRE III – L’ASTROLABE SOLAIRE A CCD</b>	<b>III - 1</b>
<b>III.1 La caméra CCD</b>	<b>III - 1</b>
III.1.1 La matrice CCD	III - 1
III.1.2 Les images CCD analogiques	III - 2
III.1.3 Les images CCD numériques	III - 3
<b>III.2 L’astrolabe équipé d’une caméra CCD</b>	<b>III - 4</b>
III.2.1 La méthode d’acquisition numérique	III - 7
<b>III.4 Conclusions</b>	<b>III - 8</b>
<b>CHAPITRE IV – SUR LE BORD DU SOLEIL</b>	<b>IV - 1</b>
<b>IV.1 Le point d’inflexion d’une section</b>	<b>IV - 2</b>
IV.1.1 Le nettoyage des images	IV - 2
IV.1.2 La méthode par dissection	IV - 3
IV.1.3 La dérivation numérique	IV - 4
IV.1.4 Approximation polynômiale	IV - 6
IV.1.5 Les modèles du bord solaire	IV - 9
<b>IV.2 Les facteurs perturbateurs</b>	<b>IV -12</b>
IV.2.1 La profondeur optique de l’atmosphère solaire	IV - 13
IV.2.2 La turbulence atmosphérique	IV - 16
IV.2.3 La diffraction	IV - 19
<b>IV.3 Un bord solaire mathématique</b>	<b>IV -20</b>
IV.3.1 Approximation parabolique	IV - 20
IV.3.2 Un point par image : le ”sommet”	IV - 21
<b>IV.4 Conclusions</b>	<b>IV -21</b>
<b>CHAPITRE V – LA REDUCTION DES OBSERVATIONS CCD</b>	<b>V - 1</b>
<b>V.1 Le calcul du demi-diamètre solaire</b>	<b>V - 1</b>
V.1.1 Le UT de passage de chaque bord par le cercle de hauteur	V - 2
V.1.2 Le demi-diamètre et les corrections à la position du Soleil	V - 3
<b>V.2 La campagne d’observations CCD 1996-1997</b>	<b>V - 5</b>
V.2.1 Instruments et méthodes d’acquisitions des images	V - 5
V.2.2 La réduction des mesures	V - 7
V.2.3 Les paramètres de réduction	V - 8
V.2.4 Les résultats	V - 9
<b>V.3 Conclusions</b>	<b>V - 14</b>

<b>CHAPITRE VI – ANALYSE DES RESULTATS</b>	<b>VI - 1</b>
<b>VI.1 Analyse des mesures</b>	<b>VI - 1</b>
VI.1.1 Sur l’homogénéité des mesures	VI - 1
VI.1.2 Effets observationnels	VI - 4
<b>VI.2 Comparaison avec d’autres résultats</b>	<b>VI -15</b>
<b>VI.3 Interprétation des résultats</b>	<b>VI -17</b>
<b>VI.4 Conclusions</b>	<b>VI -19</b>
 <b>CHAPITRE VII – CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES</b>	 <b>VII -1</b>
<b>VII.1 Conclusions</b>	<b>VII -1</b>
<b>VII.2 Perspectives</b>	<b>VII -2</b>
 <b>ANNEXES</b>	 <b>A - 1</b>
A.1 Les caméras CCD utilisées	A - 3
A.2 Mise au point de l’astrolabe solaire CCD	A - 4
A.3 Programmes d’acquisitions numériques	A - 7
A.4 Procédure DISSECTION (images complètes)	A - 10
A.5 La correction d’inclinaison de la CCD	A - 13
A.6 Le calcul des paramètres des mesures	A - 15
 <b>BIBLIOGRAPHIE GENERALE</b>	 <b>B - 1</b>
B.1 Bibliographie – Ordre alphabétique	B - 3
B.2 Bibliographie – Ordre chronologique	B - 15





## INTRODUCTION

Le diamètre solaire apparent est mesuré d'une manière quasi continue depuis le XVII-ème siècle. Les mesures anciennes, par leur faible précision et les erreurs mal connues qui les affectent, sont très difficilement interprétables, et les résultats des nombreuses analyses globales qui leurs ont été dédiées sont assez contradictoires. On peut citer, par exemple, l'étude des mesures de passages au méridien effectuées à Greenwich à partir de 1836, qui annonçait une diminution séculaire du demi-diamètre solaire de l'ordre de 1"/siècle (Eddy & Boornazian, 1979). D'autres études des mesures anciennes ont "calmé" le débat, en mettant en cause les incertitudes liées à ces observations (Rösch et al. 1987). Parmi les plus récentes analyses des mesures anciennes, l'étude de M. Toulmonde ne trouve aucune variation séculaire significative dans le diamètre solaire entre 1650 et nos jours, et donne une valeur moyenne du demi-diamètre apparent de  $960',0 \pm 0',1$  (Toulmonde 1995, 1997). Pourtant, le problème reste ouvert et les résultats des études des variations à long terme du diamètre solaire apparent ne sont pas définitifs.

Heureusement, les techniques observationnelles ont beaucoup évolué ce dernier quart de siècle, et actuellement les mesures du demi-diamètre solaire apparent sont obtenues avec une précision relative de l'ordre de  $10^{-5}$ . Lorsque la quantité et la durée des mesures sera suffisante, cela permettra de mettre en évidence des oscillations de petite amplitude, de l'ordre de  $0',01$ , voire plus petites.

L'un des paramètres principaux définissant les modèles solaires est le rayon solaire. Suite aux incertitudes, liées d'une part à d'autres paramètres, et d'autre part à la théorie de la structure stellaire, ces modèles doivent être construits avec des valeurs du rayon choisies dans un intervalle assez large. Mais, cela a des implications directes sur les paramètres mal connus et surtout sur la structure stellaire qui en résulte. Ainsi, une application la plus directe des mesures de précision du rayon solaire serait de fournir une meilleure valeur pour construire les modèles solaires. Cela permettrait par contrecoup d'améliorer les autres paramètres moins accessibles aux observations, et de préciser les théories de la structure stellaire. Encore faut-il **disposer d'une définition précise du rayon observé**, ce qui n'est pas aisé. D'une manière générale, le rayon observé est assimilé à la distance radiale au point d'inflexion de la courbe d'intensité lumineuse du bord solaire. Pour les modèles solaires, l'une des définitions possibles du rayon est la distance radiale d'une surface de profondeur optique 1. Or, le bord solaire observé correspond à une surface de profondeur optique différente de 1 (suivant la longueur d'onde), se situant au-dessus de celle de définition du rayon (Vigouroux 1996, Antia 1998).

Dans le cas de l'astrolabe, qui n'est pas prévu pour observer en lumière monochromatique, il est très difficile d'estimer à quelle profondeur optique on observe les points du bord solaire. Ce défaut sera bientôt corrigé sur la version moderne de l'astrolabe, DORaySol, qui sera muni de filtres à bandes passantes étroites, pour observer à plusieurs longueurs d'onde. La calibration des observations avec les mesures des futures



missions spatiales, sera possible. Concernant les mesures visuelles, même en lumière monochromatique, rien ne garantit que la réponse de l'observateur soit stable. C'est le principal atout des capteurs CCD, que de fournir une réponse stable en temps (ou, au moins, de variabilité non décelable pour l'instant). La mesure du rayon solaire observé dans ces conditions correspond donc aux besoins astrophysiques, car elle est précise et stable, et répond à une définition physique claire.

Selon le modèle d'atmosphère solaire utilisé, la position exacte de la surface optique qui définit le rayon varie, mais moins que l'erreur actuelle du rayon observé ; il est de même pour la définition prenant en compte la température effective (Antia 1998). En conclusion, il faut augmenter la précision des mesures. Quant à la précision de l'observation à l'astrolabe CCD, elle sera sûrement améliorée : la valeur de  $0,01''$  a été atteinte avec un instrument expérimental, qui est loin d'être parfait. De plus, le traitement des images numériques, qui fait l'objet de plusieurs études en cours, augmentera également la précision et la fiabilité des résultats, tout en fournissant d'autres résultats relatifs à l'atmosphère terrestre.

**La variabilité du rayon solaire** est une autre question à laquelle les mesures pourraient répondre. La principale cause de variabilité du Soleil est son champ magnétique, et les travaux théoriques ont montré que son effet prédominant est un effet de surface (Spruit 1994). La théorie de la structure stellaire prévoit que les variations du rayon associées à l'activité magnétique sont de l'ordre de  $10^{-7}$ , quantité non-mesurable (Spruit 1991, 1994). Du point de vue théorique, le rayon solaire est une quantité qui, au niveau actuel de précision des observations, dépend uniquement de la physique de base (Spruit 1994). Or les variations apparentes du rayon observé sont beaucoup plus grandes, d'environ  $0,4''$  sur un cycle d'activité magnétique, soit  $4 \cdot 10^{-4}$  (Laclare et al. 1996). Il est très difficile d'interpréter ces mesures, car on ne sait pas si les variations observées reflètent de réelles variations du rayon solaire, ou bien sont l'effet d'autres phénomènes, moins connus. Les variations peuvent aussi provenir du fait que le bord réellement observé appartient à l'atmosphère solaire, milieu très fluide, qui peut être sujet à de grandes variations de densité et/ou de température par exemple, ou encore aux effets de marée. Mais, si une variation réelle du rayon s'avère être à l'origine, au moins en partie, des variations observées, de sérieuses contraintes seront posées à la théorie de la structure stellaire. Il est donc indispensable d'améliorer les techniques d'observations, pour pouvoir répondre plus précisément à ces questions. Conjointement, les autres phénomènes qui peuvent avoir un effet sur les mesures du rayon solaire, doivent être mieux étudiés. Il s'agit ici de variabilité des paramètres de l'atmosphère terrestre et solaire, des instruments, phénomènes très complexes et dont les interactions restent encore mal connues.

**L'aplatissement solaire.** En 1966, les résultats annoncés d'une série de mesures de l'aplatissement solaire, faites à Princeton, étaient de nature de remettre en cause la théorie de la relativité générale d'Einstein. Ces mesures montraient une différence  $\Delta r = 0,0866 \pm 0,0066''$  entre le rayon polaire et le rayon équatorial, soit un moment quadripolaire  $J_2 = 2,47 \pm 0,23 \cdot 10^{-5}$  (Dicke & Goldenberg 1967, 1974, Hill 1981). L'avance du périhélie de l'orbite de Mercure est l'un des plus intéressants tests de la relativité générale, et il est aussi lié à l'aplatissement du Soleil. Or, le moment quadripolaire trouvé par les observations



rendait compte d'une accélération du périhélie différente de celle que la relativité générale pouvait expliquer (Dicke & Goldenberg 1967).

Le grand débat déclenché par ces résultats a ouvert la voie à d'autres expériences, destinées aux mesures de l'aplatissement solaire. Ces expériences ont trouvé des valeurs bien plus modérées pour l'aplatissement, infirmant les premières mesures (Hill & Stebbins 1975, Dicke et al. 1987, Sofia et al. 1994, Rösch et al. 1996). Ainsi, les observations faites avec *Solar Disk Sextant* ont donné une valeur  $J_2 = 1,8 \cdot 10^{-7}$ , qui, toutes incertitudes prises en compte, restait compatible avec les prévisions de la relativité générale (Lydon & Sofia 1996). Des analyses très récentes des données héliosismiques obtenues par le satellite **SOHO** (Solar Heliospheric Satellite), confirment ces dernières valeurs, obtenues à partir des mesures directes de l'aplatissement solaire.

L'analyse de toutes les séries de mesures de l'aplatissement montre aussi une variabilité avec le cycle solaire, mais aussi avec la méthode de mesure. Ces variations semblent conformes à celles du rayon observé à l'astrolabe solaire (Laclare et al. 1996, Rozelot & Rösch 1996). Les mesures à l'astrolabe solaire ont aussi mis en évidence un rayon dépendant de la latitude héliographique, soit un aplatissement du Soleil. Cet instrument peut donc servir à ce genre de mesures, à condition que ses performances soient encore améliorées. Pour donner des mesures fiables concernant les mesures de variabilité de l'aplatissement solaire, il est indispensable de faire des campagnes d'observations denses et de longue durée, avec plusieurs instruments et méthodes.

Enfin, notons que les nombreuses études destinées aux mesures anciennes et modernes ont montré que la variabilité solaire a une **influence sur le climat terrestre** (Ribes et al. 1989). Ainsi, de très bonnes corrélations ont été trouvées entre les variations de la durée du cycle solaire et des anomalies de température de l'Hémisphère Nord de la Terre, et aussi entre la variation des valeurs mesurées du Carbone 14 et la variation du nombre de taches solaires (Damé 1998). Une relation a été trouvée entre la variabilité du diamètre solaire et les vents stratosphériques, à une période de 1000 jours. Cela montre que la variabilité solaire induit d'une part les changements du rayon observé, et d'autre part force la circulation des vents stratosphériques (Labitzke et al. 1988, Ribes et al. 1989). Prochainement, le projet spatial PICARD (voir chapitre VII) permettra d'établir la relation constante solaire - diamètre, et une surveillance à long terme, de nature purement géométrique est envisageable (Damé 1998).

**En conclusion, mesurer le rayon solaire s'avère indispensable.** Les résultats des observations ont des implications multiples en astrophysique, en mécanique céleste, en théorie d'évolution solaire et stellaire. Un programme de suivi de la variabilité du rayon et de détection de l'aplatissement du Soleil doit répondre aux exigences suivantes :

- **Précision.** A la distance de 1 UA, 1'' du rayon apparent correspond à environ 725 km sur le rayon solaire, les mesures fournissant actuellement une résolution d'environ 7 km. Mais, pour atteindre une meilleure précision dans les calculs de modèles solaires, une plus grande résolution reste nécessaire. L'erreur relative de la mesure doit s'approcher de  $10^{-6}$ , et cela devrait être possible, tenant compte des avantages techniques actuels.



- **Durée.** La durée des observations doit s'accorder avec les périodes de la variabilité solaire, soit au moins plusieurs cycles solaires. Cela n'est possible qu'au sol, les satellites n'ayant pas de missions si longues, ou bien en installant des observatoires sur la Lune... (voir la citation de J. Rösch à la fin de cette Introduction), ce qui présenterait de nombreux avantages.
- **Stabilité.** La durée nécessaire impose également une grande stabilité instrumentale, ce qui n'est possible qu'en employant les techniques les plus modernes. Dans le cas de l'astrolabe solaire, le remplacement du prisme transparent classique en verre par des prismes réflecteurs en zéro-dur, et de l'observateur par des capteurs CCD, représente un réel progrès. De nouvelles combinaisons optiques plus simples et plus performantes sont aussi à l'étude en France, Pologne et Roumanie (Chollet 1998, Kurzynska 1998, Popescu 1998).
- **Définition.** Les modèles solaires emploient des constructions théoriques pour définir le rayon (densité, potentiel de gravité, luminosité, ou bien profondeur optique), or le demi-diamètre *apparent* du Soleil a une définition propre à la technique, et même au lieu d'observation. Il est donc nécessaire, et de la plus grande importance, de relier ces diamètres mesurés, rigoureusement définis, aux paramètres correspondants des théories, pour que les résultats puissent être interprétés. Dans le cas des mesures CCD, les études en cours sont en bonne voie (Chollet & Sinceac 1998).

Les méthodes CCD numériques d'acquisition et de réduction des observations du diamètre solaire constituent le premier pas vers l'automatisation complète de l'astrolabe. Durant l'été 1998 auront lieu à l'Observatoire de Calern les premiers essais d'un nouveau instrument automatisé, **DORaySol** : **D**éfinition et **O**bservation du **R**ayon **S**olaire (Laclare 1997). Conjointement, le projet spatial **PICARD** (d'après le nom de l'astronome français qui fit les premières mesures de précision du diamètre solaire), destiné aux mesures du diamètre, de la rotation différentielle, de la constante solaire et de leur variabilité, est à l'étude. Il est prévu que cet instrument soit testé et calibré sur le site de Calern, en 2003 ; après son lancement, les mesures de DORaySol et PICARD seront constamment comparées, ce qui permettra de mieux comprendre et de quantifier l'influence des facteurs d'origine terrestre sur les mesures au sol (Damé 1998).

★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★

Entre  $\alpha\sigma\tau\rho\lambda\alpha\beta\omicron\zeta$  (*le preneur d'étoiles* – Ptolémée II-ème siècle) et **DORaySol**, il y a presque vingt siècles d'histoire de l'astronomie. Les premiers astrolabes, que l'on peut encore admirer dans les grands musées du monde en tant qu'objets d'art, n'ont apparemment rien en commun avec leurs héritiers d'aujourd'hui, sauf leur finalité, l'astrométrie.

A partir du début du XIX-ème siècle, quand Gauss et Delambre ont conçu la méthode des hauteurs égales, l'évolution de ces instruments devient spectaculaire. Vers



1880, Chandler eut l'idée d'un instrument qu'il appelle *almucantar* et qui utilise la méthode de Gauss-Delambre. Presque en même temps, Beck construit le *nadirinstrument* et imagine le principe de l'astrolabe à prisme. Entre 1900 et 1905, Claude et Driencourt ont mis au point le prototype de l'astrolabe à prisme, qui est ensuite étudié et modifié par plusieurs astronomes : Nušl et Frič en 1901, Reeves en 1921, Backer en 1930, Svoboda en 1935. En 1921, Baillard imagine même un astrolabe à prisme avec enregistrement sur plaque photographique des passages d'étoiles (Débarbat & Guinot 1970).

Tous ces astrolabes avaient le même défaut, lié à l'optique de l'instrument (mauvais réglage de l'oculaire), qui donnait une erreur systématique à laquelle s'ajoutait l'erreur personnelle de l'observateur. Couderc et Danjon, Chandon et Gougenheim et d'autres astronomes font des études dédiées à ce problème. Finalement c'est Danjon qui, à partir de l'astrolabe à prisme de Claude et Driencourt, a imaginé dès 1938 un instrument doté d'un prisme biréfringent de Wollaston : ce prisme, tout en constituant un micromètre impersonnel, éliminait le défaut optique et minimisait ainsi les erreurs personnelles (Débarbat & Guinot 1970, Galmiche 1986).

L'astrolabe de Danjon sous sa variante de série (la firme française OPL en a fabriqué plus de 40 exemplaires!) est devenu l'un des meilleurs instruments pour l'astronomie de position, à partir de 1953 (Danjon 1958, Guinot 1958). Utilisé au début pour l'étude de la rotation de la Terre, cet instrument a connu depuis sa mise en service plusieurs transformations, afin de l'adapter à l'observation d'objets autres que les étoiles. Toutes les études menées ont montré sa polyvalence. Cette possibilité d'observer des objets du système solaire et en même temps des étoiles, font de l'astrolabe un bon instrument pour le raccordement des systèmes de référence dynamique et stellaire, ou stellaire et extragalactique (indirectement dans ce dernier cas, par observations des étoiles radio).

Les mesures de position du Soleil ont fait l'objet d'une étude à part, menée surtout par F. Laclare à l'Observatoire de Calern en collaboration avec F. Chollet de l'Observatoire de Paris (Laclare 1975, Laclare et al. 1980, Chollet 1981, Leister 1989). L'astrolabe de Danjon, l'astrolabe solaire tel qu'il a été utilisé à Calern, ainsi que d'autres modèles, seront décrits dans le premier chapitre de ce travail ("*L'astrolabe solaire*").

Aujourd'hui, alors que les satellites, les yeux grands ouverts, espionnent de plus en plus en détail tous les corps du système solaire, s'occuper des vieux instruments astrométriques au sol pour observer le Soleil, paraît désuet. Il y a déjà longtemps, la sonde spatiale SOHO a commencé à bombarder les ordinateurs avec des milliers d'images du Soleil, et il faudra encore plus longtemps pour dépouiller ces images de toutes les informations qu'elles contiennent. En ce qui concerne les observations des étoiles, le satellite Hipparcos a battu tous les records en matière de catalogues stellaires : plus de 100 000 étoiles avec une précision de 0,001'' pour le catalogue Hipparcos, et pas moins d'un million d'étoiles avec une précision de 0,025'' pour le catalogue Tycho, le tout allant jusqu'à des magnitudes 12,4.

L'expérience de plus de vingt ans d'observations visuelles du Soleil à l'astrolabe solaire de Calern donne toute confiance à cet instrument. En dehors de ses avantages de stabilité et de fidélité, on doit noter que les mesures effectuées sont des mesures de



zéro : coïncidence de 2 images d'un même objet. Depuis 1989, F. Laclare a adapté un système CCD analogique à son instrument et a poursuivi en parallèle les deux séries de mesures (visuelles et analogiques) (Lacare & Merlin 1991). La très bonne cohérence de ces séries a déterminé ce travail : *étude des acquisitions numériques en vue de l'automatisation de l'astrolabe solaire*.

Dans le deuxième chapitre, ("*Observations du Soleil à l'astrolabe*"), je présenterai les problèmes spécifiques posés par l'observation du Soleil et je ferai l'analyse des nouvelles méthodes d'acquisition numérique des images dans le chapitre III ("*Les observations CCD*"). L'acquisition numérique, telle que nous l'avons conçue à l'Observatoire de Paris pour les instruments de Calern, est présentée dans le même chapitre.

Dans le cadre de mon travail je me suis occupé, dans un premier temps, d'une série d'images CCD expérimentales (enregistrées en juin 1995 sur l'astrolabe solaire à prisme d'angle variable de Calern), en analysant les méthodes possibles de définition du bord solaire. Les résultats de cette étude, ainsi que d'autres considérations concernant ce problème, font l'objet du chapitre IV ("*Sur le bord du Soleil*").

Ensuite, le chapitre V ("*La réduction des observations CCD*") analyse les méthodes de réduction des mesures et le calcul du demi-diamètre solaire apparent à partir des acquisitions numériques. Il s'agit ici des méthodes employées pour réduire les mesures des campagnes d'observations solaires CCD, que j'ai effectuée à Calern en 1996 et 1997 avec deux astrolabes différents. A la fin de ce chapitre je présenterai les résultats obtenus. L'analyse détaillée des résultats sera faite dans le chapitre VI ("*Analyse des résultats*"), ainsi que la comparaison avec d'autres séries de mesures. Cela permettra d'interpréter les observations solaires à l'astrolabe, pour ce qui concerne le demi-diamètre apparent du Soleil.

Pour l'avenir des astrolabes, les astronomes sont partagés : des merveilles technologiques comme SOHO ou Hipparcos font évidemment rêver les observateurs. Ainsi, les instruments MDI (*Michelson Doppler Imager*) et LOI (*Luminosity Oscillation Imager*), embarqués à bord du satellite SOHO, permettraient d'obtenir des mesures indirectes du demi-diamètre solaire, mais avec une faible résolution (Vigouroux 1996). L'instrument LOI, qui effectue un nombre impressionnant de mesures (2 diamètres chaque minute, avec une précision de 0,001 sur une journée), observe à une longueur d'onde proche de celle des astrolabes solaires, et pourrait nous aider à calibrer les mesures au sol (Appourchaux et al. 1997). Mais, comme on verra dans ce travail, la détermination des éventuelles variations du diamètre solaire impose des séries de mesures bien plus longues que la durée d'une mission satellitaire. Pour ce genre de mesures, les instruments au sol (tel que l'astrolabe solaire et l'héliomètre), restent indispensables. Mais, il faut encore améliorer leurs performances, et c'est l'un des objectifs de cette thèse.

De même, le travail fait avec Hipparcos est spectaculaire, mais l'effet des erreurs sur les mouvements propres des étoiles feront qu'au bout de dix ans après les observations, la précision du catalogue obtenu ne sera plus que de quelques centièmes de seconde. Enfin, le coût de telles missions spatiales est fort supérieur à celui des programmes d'observations au sol, ce qui n'est (malheureusement...) pas un facteur négligeable. On ne peut ici que



citer Jean Rösch qui, en 1962, pensait que les observatoires lunaires remplaceraient très bientôt les mesures au sol : *"Mais je ne veux pas prolonger cette allocution. Nous n'avons pas de temps à perdre. Car une solution radicale au problème du choix des sites menace d'enlever tout intérêt à nos travaux : on nous annonce déjà que les premiers hommes se poseront sur la Lune en 1971 ou 1972, et alors, plus d'atmosphère terrestre pour gêner les observations, plus de problème de choix de sites terrestres. Je sais bien qu'il faudra quelques années de plus pour que soient installés de grands observatoires lunaires ; je sais bien aussi que les véhicules n'atteignent pas toujours la Lune comme prévu, et qu'il y a quelquefois des retards"* (Rösch 1962).

Pour conclure, on tentera, dans le dernier chapitre (VII, *"Conclusions et Perspectives"*), de faire le point sur le sujet et de donner un aperçu des projets futurs et des perspectives qui s'ouvrent aux mesures de diamètre solaire, à l'astrolabe en particulier.

## REFERENCES

- ANTIA H.M., 1998, *"Estimate of solar radius from f-mode frequencies"*, *Astronomy and Astrophysics*, **330**, p. 336
- APPOURCHAUX T., ANDERSEN B.N., FRÖHLICH C., JIMÉNEZ A., TELLJOHANN U., WEHRLI C., 1997, *"In-flight performance of the VIRGO luminosity oscillations imager aboard SOHO"*, *Solar Physics*, **170**, p. 27
- CHOLLET F., 1981, *"Observations du Soleil à l'astrolabe"*, Thèse de Doctorat, L'Université Pierre et Marie Curie – Paris
- CHOLLET F., 1998, *Communication personnelle*
- CHOLLET F., SINCEAC V., 1998, *"Emploi d'un modèle sémi-empirique des images du bord solaire pour la détermination de son diamètre"*, *Astronomy and Astrophysics*, article en préparation
- DAMÉ L., 1998, *"PICARD"*, Proposition faite à L'ESA, Organisme proposant : Institut Pierre-Simon Laplace
- DANJON A., 1958, *"L'astrolabe impersonnel modèle O.P.L."*, *Bulletin Astronomique*, **21**, p. 323
- DÉBARBAT S., GUINOT B., 1970, *"La méthode des hauteurs égales en astronomie"*, Gordon & Breach – Paris
- DICKE R.H., GOLDENBERG H.M., 1967, *"Solar oblateness and general relativity"*, *Physical Review Letters*, **18/9**, p. 313
- DICKE R.H., GOLDENBERG H.M., 1974, *"The oblateness of the Sun"*, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, **241**, p. 131
- DICKE R.H., KUHN J.R., LIBBRECHT K.G., 1987, *"Is the solar oblateness variable ? Measurements of 1985."*, *The Astrophysical Journal*, **318**, p. 451
- EDDY J.A., BOORNAZIAN A.A., 1979, *"Secular Decrease in the Solar Diameter, 1863-1953"*, *Bulletin of the American Astronomical Society*, **11/2**, p. 437
- GALMICHE J., 1986, *"Temps et latitude fournis par la station Astrolabe de de Paris"*, Thèse de Doctorat – L'Université Pierre et Marie Curie
- GUINOT B., 1958, *"L'astrolabe impersonnel A. Danjon, modèle O.P.L., de l'Observatoire de Paris. Etude des résultats d'une année d'observations"*, Thèse de Doctorat – Faculté des Sciences de l'Université de Paris
- HILL H.A., STEBBINS R.T., 1975, *"The intrinsic visual oblateness of the Sun"*, *The Astrophysical Journal*, **200**, p. 471

- HILL H.A., 1981, "Solar astrometry", dans "Solar instrumentation : What's next ?" – Sacramento Peak National Observatory – Sunspot, New Mexico
- KURZYNSKA K., 1998, *Communication personnelle*
- LABITZKE K., VANLOON H., 1988, "Associations between the 11-year solar cycle and the atmosphere.", *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, **50/3**, p. 197
- LACLARE F., 1975, "Sur les observations du Soleil faites avec l'astrolabe de Danjon", *Comptes Rendus Academie des Sciences Paris, Série II*, **280**, p. 13
- LACLARE F., DEMARCQ J., CHOLLET F., 1980, "Sur la réalisation d'un astrolabe solaire au CERGA", *Comptes Rendus Academie des Sciences Paris, Série B*, **291**, p. 189
- LACLARE F., MERLIN G., 1991, "L'astrolabe solaire impersonnalisé par l'emploi d'une caméra CCD Application à la mesure du diamètre solaire", *Comptes Rendus Academie des Sciences Paris, Série II*, **313**, p. 323
- LACLARE F., DELMAS C., COIN J.P., IRBAH A., 1996, "Measurements and variations of the solar diameter", *Solar Physics*, **166**, p. 211
- LACLARE F., 1997, *Communication personnelle*
- LEISTER N., 1989, "Orientação do sistema fundamental de referência. Observações do Sol com o astrolábio de Valinhos", Tese de Doutorado – Instituto Astronômico e Geofísico – São Paulo
- LYDON T.J., SOFIA S., 1996, "A measurement of the shape of the solar disk : the solar quadrupole moment, the solar octopole moment, and the advance of perihelion of the planet Mercury", *Physical Review Letters*, **76/2**, p. 177
- POPESCU R., 1998, "Adaptation des caméras CCD aux instruments astrométriques de l'Observatoire de Bucarest. Application à l'astrolabe de Danjon", Thèse de Doctorat (en cours) – Observatoire de Bucarest & Observatoire de Paris
- RIBES E., MERLIN P., RIBES J.C., BARTHALOT R., 1989, "Absolute periodicities in the solar diameter derived from historical and modern data", *Annales Geophysicae*, **7/4**, p. 321
- RÖSCH J., 1962, "Allocution d'ouverture", dans "Site Testing" – IAU Symposium 19 – Rome
- RÖSCH J., YERLE R., NOËNS J.C., 1987, "Variations de la géométrie globale du Soleil", *Journal des Astronomes Français*, **31**, p. 10
- RÖSCH J., ROZELOT J.P., DESLANDES H., DESNOUX V., 1996, "A new estimate of the quadrupole moment of the Sun", *Solar Physics*, **165**, p. 1
- ROZELOT J.P., RÖSCH J., 1996, "Le Soleil change-t-il de forme ?", *Comptes Rendus Academie des Sciences Paris, Série II b*, **322**, p. 637
- SOFIA S., HEAPS W., TWIGG L.W., 1994, "The solar diameter and oblateness measured by the solar disk sextant on the 1992 september 30 balloon flight", *The Astrophysical Journal*, **427**, p. 1048
- SPRUIT H.C., 1991, "Theory of luminosity and radius variations", dans "The Sun in time" – University of Arizona Press - Tucson, AZ
- SPRUIT H.C., 1994, "Theories of radius and luminosity variations", dans "The solar engine and its influence on terrestrial atmosphere and climate" – Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- TOULMONDE M., 1995, "Etude comparative de diamètres solaires observés à partir d'instruments astrométriques", Thèse de Doctorat – Observatoire de Paris
- TOULMONDE M., 1997, "The diameter of the Sun over the past three centuries", *Astronomy and Astrophysics*, **325**, p. 1174
- VIGOUROUX A., 1996, "Etude de la variabilité solaire à long terme", Thèse de Doctorat – Université de Nice



# CHAPITRE I – L’ASTROLABE SOLAIRE

## I.1 – L’ASTROLABE DE DANJON

### I.1.1 – La méthode des hauteurs égales

Cette méthode est apparue au début du XIX-ème siècle et elle est basée sur les idées de Gauss. En 1808, il présentait une formulation permettant d’obtenir le temps et la latitude à partir de l’observation du passage de deux étoiles de positions connues, à des hauteurs différentes. Gauss a imaginé aussi le cas de l’observation de trois étoiles à la même hauteur, ce qui donne trois équations et permet de déterminer trois inconnues : latitude, longitude et distance zénithale d’observation. Knorre en 1832, puis Perrin en 1888 ont généralisé la méthode de Gauss pour le cas de plus de trois étoiles, ce qui donne plus de trois équations pour les mêmes trois inconnues et nécessite l’utilisation de méthodes statistiques (Débarbat & Guinot 1970).

L’observation consiste à noter l’instant du passage des objets sur le ciel, par un même cercle de hauteur (donc à la même distance zénithale). Cet instant est la seule donnée expérimentale de l’observation. Dans le triangle de position PZA de l’astre A (fig. I.1) on peut écrire les trois relations suivantes :

$$(I.1) \quad \begin{cases} \cos z = + \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos H \\ \sin a \sin z = + \cos \delta \sin H \\ \sin z \cos a = - \cos \varphi \sin \delta + \sin \varphi \cos \delta \cos H \end{cases}$$

où  $\delta, H, z$  représentent la déclinaison, l’angle horaire et la distance zénithale de l’astre et  $a, \varphi$  l’azimut et la latitude du lieu d’observation.

On peut aussi écrire (Débarbat & Guinot 1970) :  $H = C + E - \alpha$ , où  $E$  représente la date d’observation,  $\alpha$  l’ascension droite de l’astre et  $C$  la correction de l’horloge :  $C = \frac{1}{k}[UT0 - UTC]$  (avec  $k$  le rapport entre le temps universel et le temps sidéral, et si l’horloge est en UTC). A part les coordonnées de l’astre,  $\alpha$  et  $\delta$ , supposées connues dans une première approximation, de manière générale les trois inconnues que la méthode se propose de calculer sont :

- la correction de l’horloge :  $C = UT0 - UTC$ ,
- la latitude du lieu d’observation :  $\varphi$ ,
- la distance zénithale instrumentale :  $z$ .

Si on dispose de valeurs approchées  $C_o, \varphi_o, z_o$  pour ces trois inconnues, il reste à déduire les corrections à appliquer à ces valeurs, c’est à dire :

$$\Delta C = C - C_o,$$

$$\Delta \varphi = \varphi - \varphi_o,$$

$$\Delta z = z - z_o.$$

En différenciant les formules (I.1), on obtient finalement *l'équation de condition réduite* suivante (Débarbat & Guinot 1970) :

$$(I.2) \quad x \sin a_o + y \cos a_o + R = \delta h,$$

avec les notations :

$$\begin{aligned} x &= \cos \varphi_o \Delta C, \\ y &= \Delta \varphi, \\ R &= -\Delta z, \\ \delta h &= -\sin a_o \cos \varphi_o \Delta E. \end{aligned}$$

(on suppose ici que  $\Delta\alpha = \Delta\delta = 0$ , ce qui ne sera pas le cas lors de l'écriture des équations relatives aux observations du Soleil). Pour chaque observation on obtient une équation de condition de la forme (I.2), donc il s'agit de résoudre un système de  $n$  équations ( $n$  passages d'étoiles), à trois inconnues. La solution des équations (I.2) exige trois passages d'étoiles au moins. Une étude complète de ce problème a été faite (Débarbat & Guinot 1970).

En ce qui concerne les corrections propres aux observations du Soleil, elles ont été étudiées par divers auteurs (Laclare et al. 1980, Chollet 1981, Bougeard 1982, Leister 1989, Laclare & Merlin 1991) et seront présentées plus en détail dans le chapitre II.

### I.1.2 – Le principe de l'instrument

L'astrolabe à prisme est utilisé depuis 1900 sous sa forme simple, qu'il soit construit spécialement ou bien qu'il constitue un montage spécial sur un théodolite. La figure I.2, supposée tracée dans le vertical d'un astre, montre son principe de fonctionnement : un prisme de verre P, dont la section droite est un triangle équilatéral, est placé devant une lunette horizontale d'objectif L, la face arrière étant perpendiculaire à l'axe optique, et les arêtes horizontales. Un miroir de mercure M est placé en avant de l'appareil. Si une étoile se trouve à la distance zénithale de  $30^\circ$ , ses deux images provenant, l'une par entrée directe du faisceau dans le prisme, l'autre par réflexion préalable sur le mercure, sont confondues dans le plan focal F. Si la distance zénithale est différente de  $30^\circ$ , les images sont distinctes (Débarbat & Guinot 1970).

L'observateur doit noter l'instant de la coïncidence des images de l'astre observé, d'après l'horloge dont il se propose de déterminer la correction. Les défauts de la géométrie du prisme apportant des erreurs, les tolérances à fixer aux opticiens pour construire de bons prismes sont assez étroites : erreurs de moins de  $2''$  sur les angles et de moins de  $10''$  pour l'angle entre une arête et la face opposée (Débarbat & Guinot 1970).

En dehors des défauts optiques, l'astrolabe à prisme avait un autre défaut majeur, dû à la mise au point de l'instrument : les faisceaux direct et réfléchi n'étant pas confondus, l'observateur qui regarderait des images extra-focales les verrait séparées à l'instant où elles sont confondues dans le plan focal (fig. I.3). Il résulte que la distance zénithale instrumentale varie avec la mise au point (Débarbat & Guinot 1970).



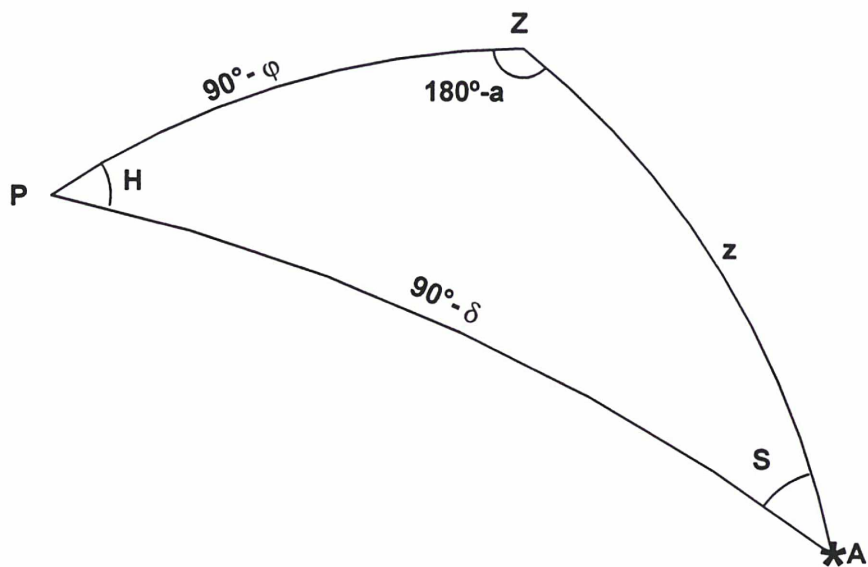


Fig. I.1. Triangle de position

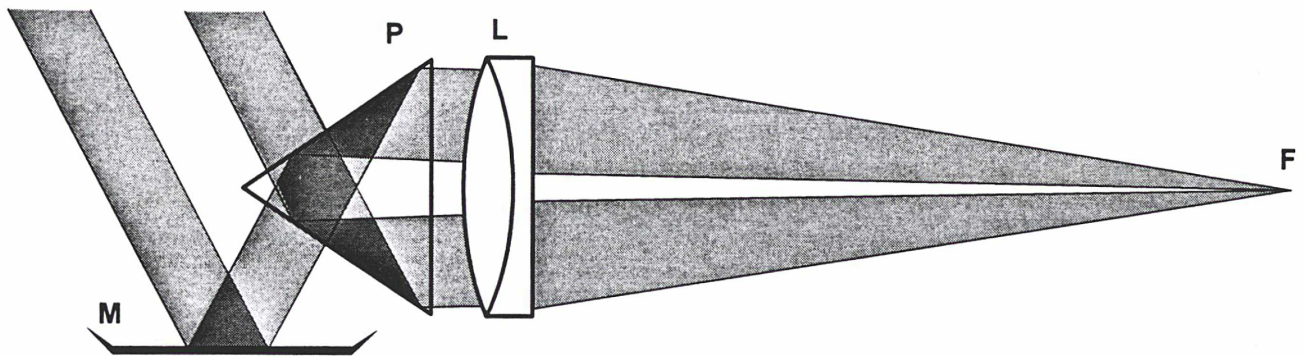


Fig. I.2. Principe de l'astrolabe à prisme.

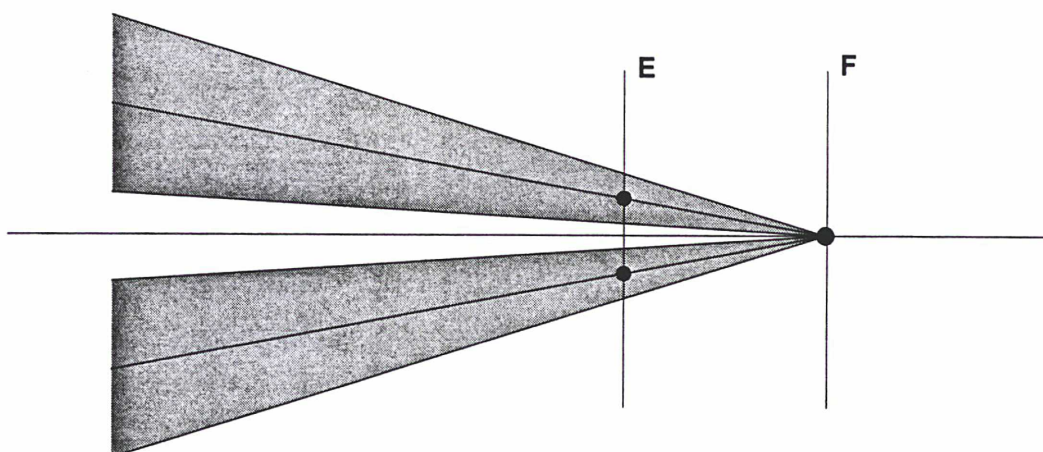


Fig. I.3. Erreur due aux images extra-focales.

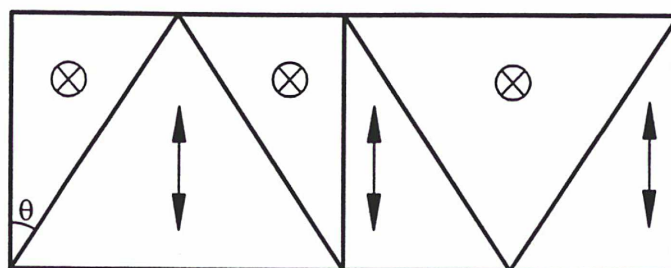


Fig. I.4. Coupe schématique du prisme biréfringent de Wollaston.

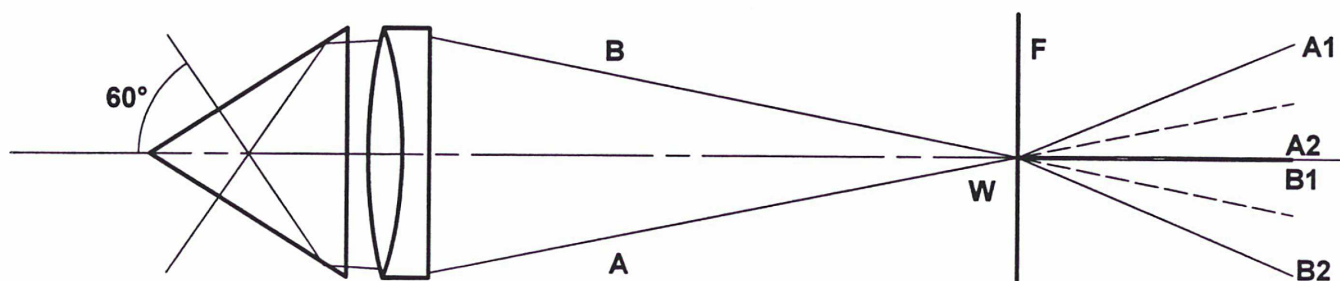


Fig. I.5. Compensation de l'erreur de mise au point.

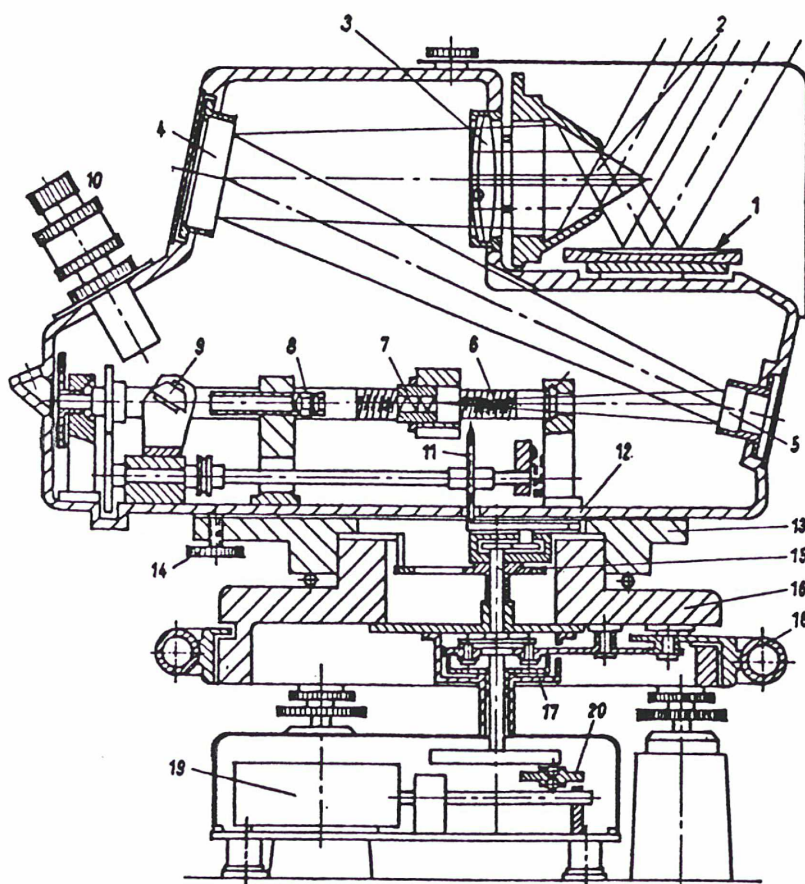


Fig. I.6. Coupe de l'astrolabe de Danjon modèle OPL

1 bain de mercure 2 prisme 3 objectif 4 grand miroir 5 petit miroir 6 vis micrométrique 7 Wollaston 8 transporteur d'image 9 prisme de renvoi 10 oculaire 11 galet 12 disque 13 plateau 14 vis de pointage 15 engrenage de La Hire 16 socle 17 différentiel 18 volant du différentiel 19 moteur 20 variateur de vitesse



A. Danjon eut le mérite d'imaginer un système fiable pour contourner ce défaut : il a adapté un micromètre biréfringent à l'astrolabe de Claude et Driencourt, constitué d'un prisme de Wollaston double symétrique (fig. I.4). Le Wollaston placé dans le plan focal, chaque faisceau incident donne naissance à deux faisceaux émergents polarisés ; si on élimine les deux images  $A_1$  et  $B_2$  (fig. I.5) avec un diaphragme et on observe les deux autres, lorsque les images focales sont confondues, les images extra-focales  $A_2$  et  $B_1$  le sont aussi, ce qui élimine le défaut de mise au point. De plus, si on translate ce micromètre au voisinage du foyer, on parvient à compenser le mouvement vertical normal des deux images, en augmentant ainsi la durée apparente de la coïncidence. En transmettant ce mouvement à une roue de contacts qui envoie les signaux à un chronographe, l'instant de passage observé est donné par la moyenne d'une vingtaine de contacts, après les corrections nécessaires. Noter qu'ici encore le micromètre est censé à suivre l'astre, ce qui ne sera pas le cas du CCD.

Le prototype du nouvel astrolabe impersonnel de A. Danjon a été réalisé par J. Texereau en 1951, à l'Observatoire de Paris, et il est entré en service régulier en 1953. Les résultats obtenus (des écarts-types de 0<sup>s</sup>009 sur les mesures de temps et de 0<sup>'</sup>10 sur les mesures de latitude), ont prouvé la qualité de l'instrument. Suite aux nombreuses demandes d'astrolabes, la société Optique et Précision de Levallois (OPL) s'est chargée de la construction d'une série perfectionnée de plusieurs instruments. Les observations avec le premier astrolabe OPL ont commencé à l'Observatoire de Paris en 1956, et B. Guinot annonce des résultats excellents après une année et demi d'observations : des écarts-types de 0<sup>s</sup>0043 sur le temps et de 0<sup>'</sup>050 sur la latitude (Guinot 1958).

L'instrument a été complètement décrit par A. Danjon lui-même (Danjon 1954, 1958). La figure I.6 montre les principales composantes de cet instrument.

## I.2 – L'ASTROLABE SOLAIRE

F. Laclaire a réalisé en 1974, au CERGA (l'actuel Observatoire de Calern), les premières observations du Soleil avec un astrolabe de Danjon. Au début, il a utilisé le prisme équilatéral d'origine, qui permettait l'observation des passages du bord solaire à 30° de distance zénithale. Cette première expérience a mis en évidence les principaux problèmes liés à ce type particulier d'observations, et a permis d'envisager les développements ultérieurs.

Installé à une latitude de 44° N, l'instrument, doté de ce seul prisme au départ, avait un handicap majeur : il ne permettait l'observation du Soleil que pour des déclinaisons supérieures à 14°, c'est à dire moins de trois mois par an. La condition nécessaire pour qu'un objet traverse le cercle de hauteur défini par l'instrument est :

$$\varphi - z \leq \delta \leq \varphi + z$$

où  $\varphi$  et  $z$  représentent la latitude et la distance zénithale d'observation de l'instrument, et  $\delta$  la déclinaison de l'astre observé (Chollet 1981). On observe deux bords (inférieur et supérieur) pour un passage. L'unique prisme ne permettait d'effectuer que 4 mesures par jour, à l'Est puis à l'Ouest, et donc seulement un passage complet du Soleil.



Le prisme d'origine, en verre optique de grande qualité, n'était pas prévu pour observer le Soleil. Sa stabilité thermique n'était pas suffisante et la distance zénithale variait, ce qui aurait nécessité des mesures de l'angle du prisme équilatéral pour en déduire les corrections à appliquer. Enfin, il permettait uniquement les observations à 30° de distance zénithale. L'avancement de la technologie a permis d'envisager l'utilisation d'autres matériaux, et l'astrolabe solaire s'est enrichi de plusieurs prismes en vitrocéramique, travaillant en réflexion. Ainsi, le choix de distances zénithales différentes devient possible. L'utilisation de ces prismes avait trois avantages majeurs :

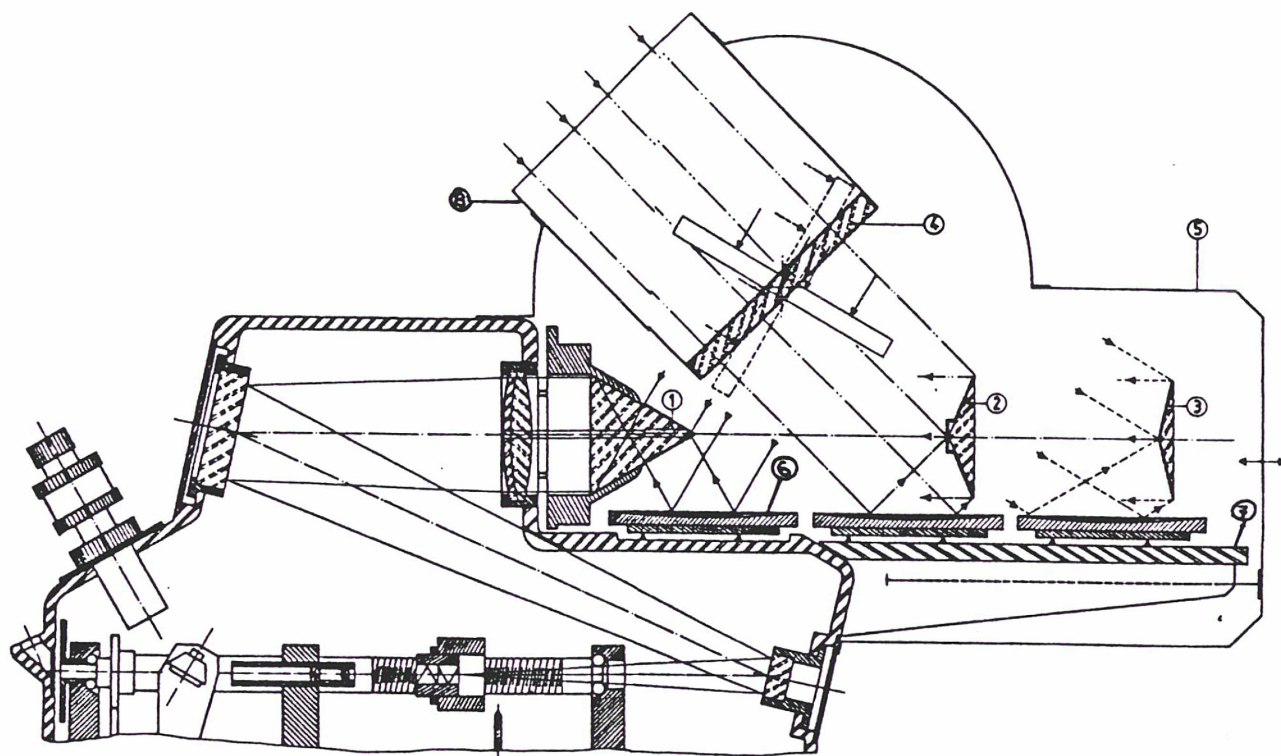
- la disparition relative des variations de distance zénithale ;
- la possibilité de couvrir une période de temps d'observations plus grande dans l'année ;
- observer dans la journée un nombre de passages égal à deux fois le nombre de prismes.

### I.2.1 – Le principe de l'instrument

Sur la figure I.7 on donne une coupe de l'astrolabe solaire tel qu'il a fonctionné au CERGA à partir de 1978, avec trois prismes d'angles de 60°, 135° et 150°, ce qui correspond à 30°, 45° et 60° de distance zénithale. Il a gardé, dans un premier temps, le prisme transparent équilatéral, mais qui permettait des mesures de variation d'angle grâce à un traitement par multi-couches diélectriques. On peut remarquer sur la figure que le fait d'utiliser des prismes travaillant en réflexion oblige à décaler l'azimut de l'instrument de 180°, et en même temps à inverser le sens de déplacement du micromètre. Chaque prisme est posé sur un support trait-point-plan qui assure une bonne stabilité à la mise en place ; l'alignement vertical des images directe et réfléchie se fait avec une vis agissant sur l'inclinaison de l'arête des prismes. L'orientation se fait par autocollimation sur des petits prismes supplémentaires, dont les faces sont parallèles à la face arrière du prisme d'observation ; pendant l'observation, ces prismes d'autocollimation sont occultés par le diaphragme de l'objectif de la lunette.

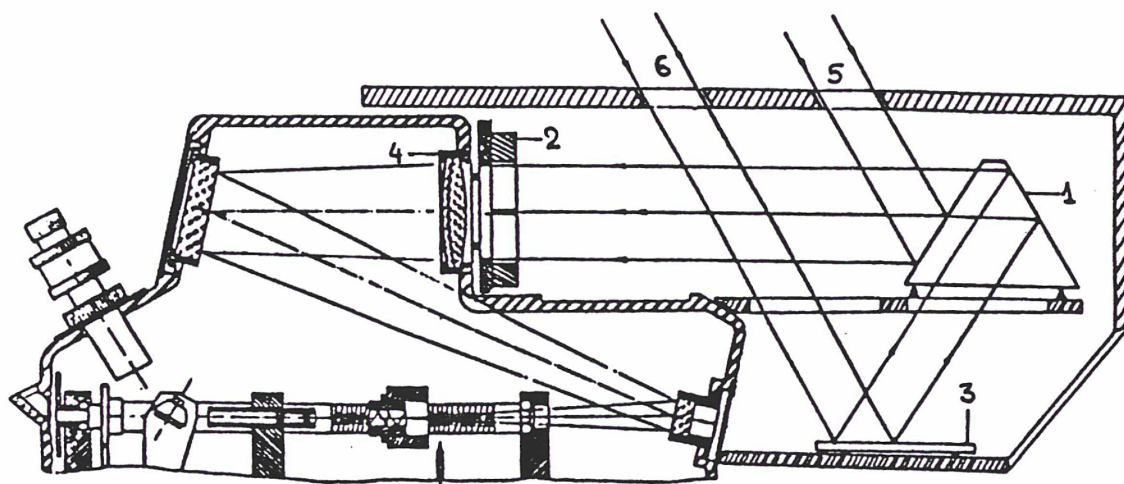
Le filtre solaire en silice est constitué d'une lame plan parallèle recouverte, sur une de ses faces, d'un revêtement en Chrome-Nickel. D'une densité d'environ 5.5, ce filtre réduit la magnitude du Soleil à une valeur voisine de celle de la Lune. Sa surface couvrant les faisceaux en provenance du Soleil pour tous les prismes, il suffit d'une rotation autour d'un axe horizontal pour le positionner dans un plan normal à la direction d'observation du prisme choisi. Dans cette configuration, l'astrolabe a permis d'observer le Soleil sur un arc d'orbite d'environ 9 mois (à la latitude de 44° N) (Laclare et al. 1980, Chollet 1981).

Un deuxième modèle d'astrolabe, dit *astrolabe à pleine pupille*, utilise une équerre optique à la place des prismes (Billaud & Guinot 1971). Les deux rayons direct et réfléchi ne sont plus séparés dans les demi-pupilles, d'où son nom (fig. I.8). Construit en CER-VIT, ce prisme qui travaille en transparence et en réflexion équipe certains astrolabes (en particulier l'astrolabe photoélectrique, destiné aux observations des étoiles), qui peuvent observer aussi bien le Soleil, des étoiles et des planètes (Sánchez 1991).



**Fig. I.7. Coupe de l'astrolabe solaire du CERGA (modèle 1978).**

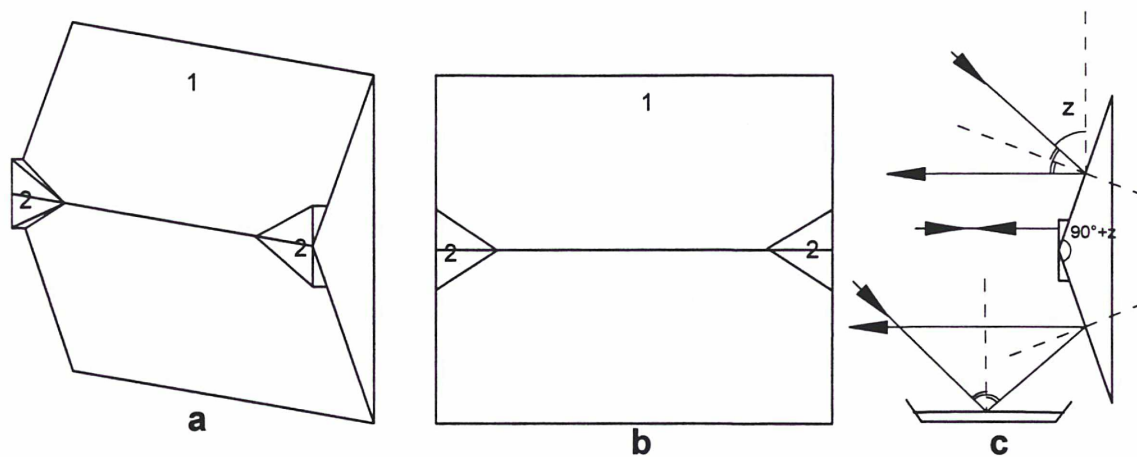
1 prisme équilatéral 2 prisme réflecteur  $135^\circ$  3 prisme réflecteur  $150^\circ$  4 lame réfléchissante 5 protecteur amovible 6 bain de mercure mobile 7 platine 8 tube d'entrée



**Fig. I.8. Coupe de l'astrolabe à équerre optique**

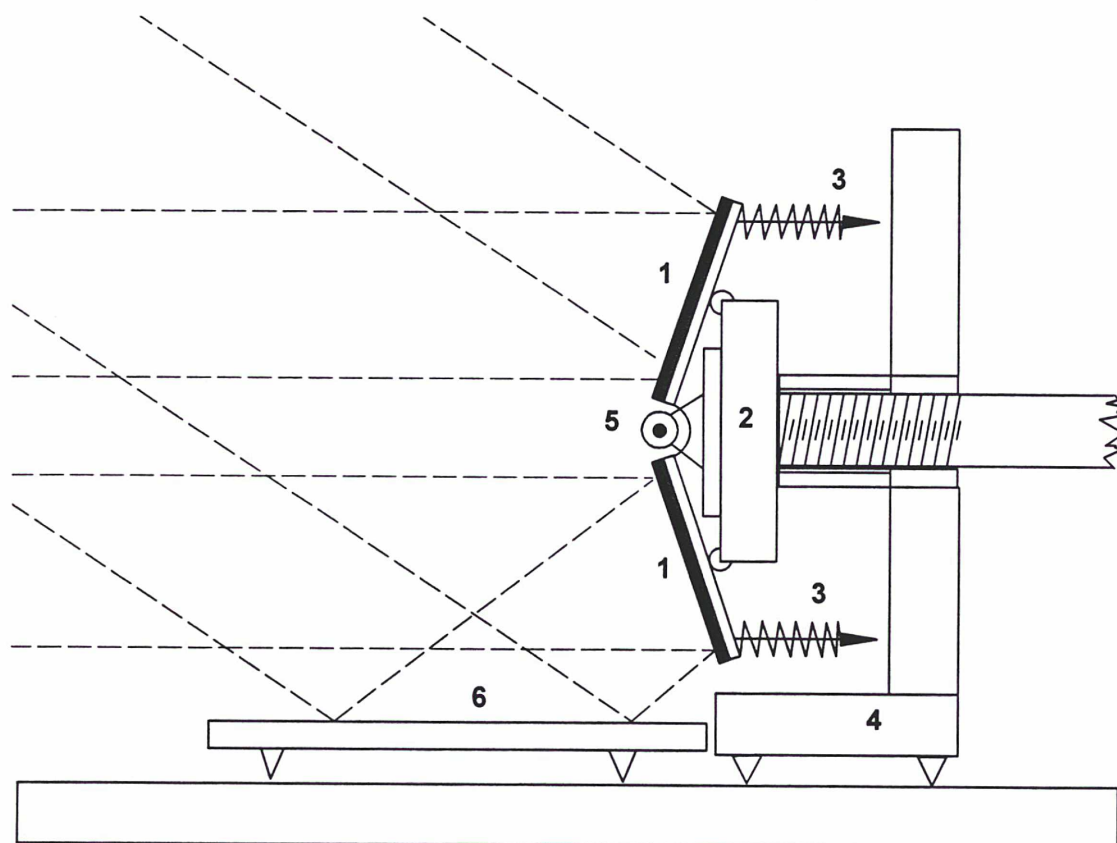
1 équerre optique 2 filtre solaire 3 bain de mercure 4 objectif 5 entrée faisceau direct 6 entrée faisceau réfléchi





**Fig. I.9. Prisme réflecteur en vitro-céramique.**

**a** vue d'ensemble **b** vue de face **c** vue de profil **1** prisme d'observations **2** prismes d'autocollimation



**Fig. I.10. Prisme d'angle variable.**

**1** lames réfléchissantes **2** vérin pousseur **3** ressort de tension **4** support **5** axe de rotation **6** bain de mercure

Les particularités de l'équerre optique imposent le positionnement du filtre solaire en face de l'objectif, à cause du grand écartement des faisceaux (Sánchez 1991, Sánchez et al. 1993).

### I.2.2 – Les prismes

Le *prisme classique équilatéral* travaillant en transparence, utilisé pour la distance zénithale de  $30^\circ$ , a été longuement étudié par divers auteurs (Chollet 1981, Mangombi 1986). L'orientation du prisme dans l'axe optique de l'instrument se fait par autocollimation sur la face normale à l'axe optique. Dans le cas d'observations du Soleil, les faces d'entrée du prisme ont été traitées par un revêtement multi-couches diélectriques, qui permet l'observation des étoiles et du Soleil, et en même temps des mesures d'autocollimation pour positionnement ou variation de distance zénithale. Le fait que le coefficient de dilatation du borosilicate qui constitue ce prisme n'est pas négligeable, induit des variations de distance zénithale. Cela a nécessité des études de la stabilité de ces prismes (Chollet 1981).

Les nouveaux *prismes en vitro-céramique (zéro-dur)*, proposés dès 1967 par D.V. Thomas, travaillent en réflexion et assurent une très bonne stabilité de la distance zénithale instrumentale, grâce au coefficient de dilatation pratiquement nul de ces matériaux (Thomas 1967). Le problème de l'orientation de ces prismes a été résolu : cela se fait aisément par autocollimation sur des petits prismes supplémentaires dont les faces sont parallèles à la face arrière du prisme d'observation. L'objectif de l'astrolabe est muni d'un diaphragme d'entrée qui occulte les rayons provenant des petits prismes. En retirant le diaphragme, on peut faire une mesure d'autocollimation avant et après chaque observation. La forme de ces prismes et leur montage optique montrent aisément la liaison entre l'angle du prisme et la distance zénithale d'observation  $z$  (fig. I.9).

Actuellement, l'astrolabe solaire de Calern est muni de 11 de ces prismes, permettant donc d'observer 22 passages du Soleil par les distances zénithales de  $30^\circ$ ,  $34^\circ$ ,  $37,5^\circ$ ,  $41,5^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $49^\circ$ ,  $52,5^\circ$ ,  $56,5^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $65^\circ$ ,  $70^\circ$ . La longue série de mesures effectuées montre la très bonne stabilité de ces prismes, ce qui fait que d'autres astrolabes dans le monde se sont équipés avec le même type de prisme.

En 1986, F. Laclare imagine un *prisme réflecteur d'angle variable*, destiné initialement à la mise au point d'un nouvel astrolabe CCD (fig I.10). Pour faire la mise au point d'un astrolabe destiné aux observations du Soleil, la possibilité de modifier à volonté la distance zénithale instrumentale est d'un très grand avantage (Laclore & Merlin 1991).

Contrairement à ce que l'on attendait, les mesures ont montré une bonne stabilité de l'angle de ce prisme entre le passage des deux bords du Soleil (pendant environ 3 minutes), ce qui le recommandait pour des mesures de diamètre solaire, où la distance zénithale d'observation ne demande pas à être connue, mais seulement stable (Laclore & Merlin 1991). En plus, ce type de prisme s'adapte très bien à l'automatisation. Construites en zéro-dur, les deux faces réfléchissantes de ce prismes peuvent pivoter autour d'un axe, l'arête du prisme résultant restant perpendiculaire à l'axe optique et horizontale ; le support



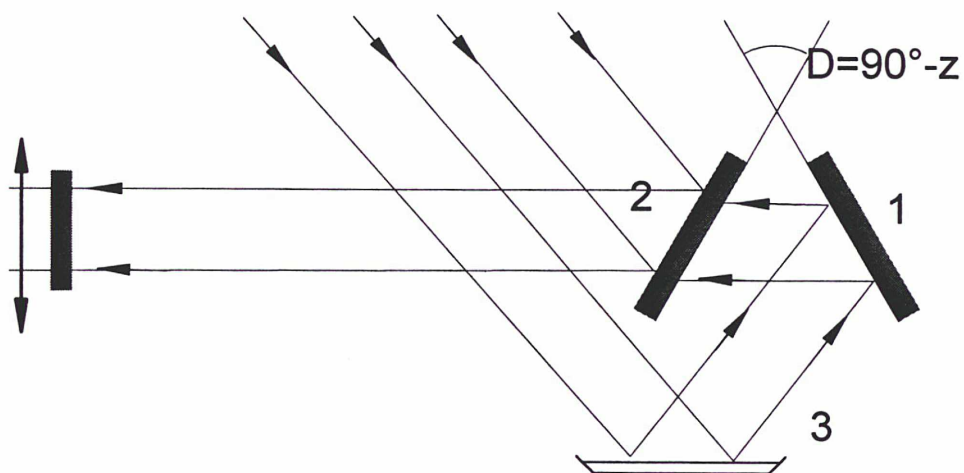
trait-point-plan, du même type que celui des prismes d'angle fixe, assure une bonne stabilité et des réglages simples. Un moteur pas-à-pas, avec possibilité de commande à distance, commande l'ouverture ou la fermeture de l'angle. Plusieurs modèles ont été testés, le problème des ressorts de rappel restant un des plus délicats. Le bain de mercure doit avancer ou reculer selon l'angle du prisme, ou bien doit avoir une surface assez grande pour couvrir la plage des distances zénithales d'observation. Les mesures visuelles faites par F. Laclare à partir de 1986 et celles CCD que j'ai faites en 1996 ont qualifié ce prisme, qui sera certainement utilisé sur les nouveaux astrolabes destinés aux mesures du diamètre solaire. En tout cas, il reste la meilleure solution pour la mise au point des instruments.

Un autre type de prisme, destiné aux astrolabes à pleine pupille, est *l'équerre optique*. Construit en vitro-céramique, il est constitué de deux lames, une réfléchissante fournissant l'image réfléchie, et l'autre semi-transparente qui renvoie l'image directe et laisse passer l'image réfléchie. Les deux faisceaux direct et réfléchi se superposent et couvrent entièrement la pupille d'entrée de la lunette. Quand la distance zénithale de l'objet est le complément de l'angle  $D$  de l'équerre optique, les deux images se confondent (fig. I.11). Ses particularités géométriques imposent une deuxième platine, en dessous de la platine de l'équerre optique, pour supporter le bain de mercure. Les équerres optiques équipent l'astrolabe photoélectrique de Calern (actuellement au Brésil), ainsi que l'astrolabe polyvalent de l'Observatoire de San Fernando (Sánchez 1991).

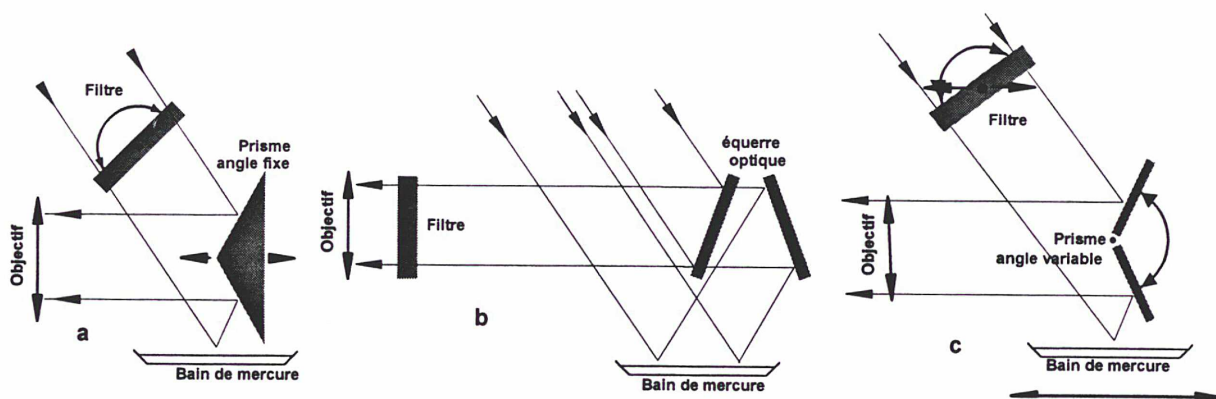
### I.2.3 – Le filtre solaire

Paradoxalement, l'étoile la plus proche de la Terre est aussi l'objet le plus difficile à observer. L'utilisation d'un instrument optique pour des observations du Soleil impose avant tout d'atténuer l'énergie incidente. Dans le cas de l'astrolabe de Danjon, le prisme qui définit la distance zénithale d'observation et le micromètre de Wollaston sont les principales pièces optiques à protéger de l'énergie solaire. Pour cela il y avait deux systèmes possibles : mettre un filtre *en avant de l'objectif* du télescope, de la même taille que l'ouverture de ce dernier, ou *en avant du prisme*, d'une taille couvrant les deux faisceaux entrants.

Construits en silice (grande stabilité thermique), les filtres solaires adoptés sont constitués d'une lame plan-parallèle dont la face extérieure porte un revêtement Chrome-Nickel de densité voisine de 5,5. Une telle lame doit être parfaitement plan-parallèle : dans le cas contraire, elle change la distance zénithale d'observation, si le filtre est positionné avant le prisme. Sans influence sur les mesures de diamètre solaire, ce défaut rend plus incertaines les mesures de position du Soleil. Le montage en avant du prisme est assez difficile à réaliser techniquement, à cause des grandes dimensions du filtre et du fait qu'il doit être perpendiculaire aux faisceaux qui, dans certains cas, peuvent être relativement éloignés l'un de l'autre. Par contre, si on pose le filtre juste en avant de l'objectif, le défaut de non-parallélisme des faces de la lame n'influe plus les mesures. Son diamètre reste petit (identique à celui de l'objectif), et il est très facile de le positionner à la place du miroir d'autocollimation. Mais, dans ce cas, le prisme reste exposé à l'énergie solaire. Il n'y a pas donc de solution absolue, et les deux montages ont été adoptés, en fonction des objectifs des programmes d'observations.



**Fig. I.11. Schéma et principe de l'équerre optique.**  
 1 lame réfléchissante 2 lame semi-transparente 3 bain de mercure



**Fig. I.12. Filtres solaires.**

**a** monture en avant du prisme **b** monture en avant de l'objectif **c** monture en avant du prisme d'angle variable



A Calern, F. Laclare a opté pour un filtre épais en silice, placé en avant des prismes, qui a deux degrés de liberté : une rotation autour d'un axe horizontal perpendiculaire aux rayons incidents (pour le positionner), et une rotation de  $180^\circ$  autour d'une axe perpendiculaire à son centre. Cette deuxième rotation pourrait compenser le défaut présenté, si on tourne le filtre entre les observations des bords supérieur et inférieur d'un même passage, mais induit des erreurs impossibles à éliminer dans la mesure du diamètre solaire (Leister 1989). F. Chollet a adopté un filtre en zéro-dur transparent en avant de l'objectif sur l'astrolabe de l'Observatoire de Paris, qui est installé actuellement à Malatya (Turquie) et donne des résultats très satisfaisants (Chollet 1997). Les astrolabes solaires utilisant une équerre optique sont aussi munis d'un filtre monté sur l'objectif du télescope. C'est le cas de l'astrolabe de San Fernando (Espagne), dont le filtre est en zéro-dur spécial. Sa couleur orange supprime presque totalement le fond du ciel, et on doit en tenir compte dans le calcul de la réfraction. Enfin, à Calern, un troisième type de filtre, **rectangulaire**, mis en avant du prisme, est utilisé par F. Laclare sur un astrolabe muni d'un prisme à angle variable. Toujours en silice, ce prisme épais doit translater le long d'un axe parallèle à l'axe optique et en même temps tourner pour suivre l'angle d'ouverture du prisme (Lacare et al. 1980, Chollet 1981, Leister 1989, Lacare & Merlin 1991, Sánchez 1991).

Les trois modèles de filtres présentés ci-dessus sont schématisés sur la figure **I.12**.

#### **I.2.4 – Le bain de mercure**

Le miroir de mercure constitue, avec le prisme, le référentiel instrumental de l'astrolabe : si le prisme définit la distance zénithale d'observation, le bain de mercure matérialise le plan horizontal. Solidaire du socle de l'instrument, le bain de mercure nécessite un support secondaire stable. Pour chaque prisme utilisé, le bain de mercure doit renvoyer les rayons incidents vers la face inférieure du prisme, et sa surface doit couvrir une plage de distances zénithales la plus étendue possible. A Calern, un nouveau type de bain de mercure de forme ellipsoïdale est à l'étude, capable de couvrir la plage d'ouverture d'un prisme d'angle variable. Un tel bain de mercure, qui reste fixe pendant une journée d'observations, peut être utilisé sur un astrolabe automatique : centré dans l'axe vertical de rotation de l'instrument, il permet même le filtrage automatique du mercure, entre les observations.

### **I.3 – CONCLUSIONS**

Comme on n'observe pas le centre du disque solaire, mais deux bords opposés, une nouvelle inconnue intervient dans les réductions, le demi-diamètre du Soleil. Cette inconnue est déterminée avec une précision satisfaisante pour une mesure au sol, car on observe à une distance zénithale constante (donc à réfraction constante, excepté les variations dues aux gradients de température et pression atmosphérique).

Jusqu'au 1987, on utilisait la valeur de  $961''.2$  du demi-diamètre du Soleil pour l'astrométrie, et de  $959''.63$  pour les calculs des éclipses ou passages de Mercure,

valeurs obtenues à partir des mesures anciennes. Une correction de 1'',55 nommée *correction d'irradiation* était ajoutée (à une précision du centième de seconde de degré !), pour laquelle on ne donnait pas une explication claire (Allen 1963). Il s'agit d'un effet physiologique, qui affecte l'observation de jour d'un objet brillant étendu sur un fond plus opaque. Depuis 1987, on utilise uniquement la valeur de 959'',63, qu'on déduit de la parallaxe et du rayon solaire en Km. La valeur de 959'',42 obtenue par F. Laclare est plus petite, mais elle dépend entre autres de la définition que l'on donne au bord solaire, comme les autres mesures (LacLare et al. 1996).

Les premiers résultats obtenus à Calern ont suscité un intérêt croissant pour les mesures du diamètre solaire, ce qui a déterminé à continuer le programme de suivi des éventuelles variations de ce dernier. Des travaux d'améliorations des instruments existants ont été menés à Calern, puis aussi au Brésil, Chili, Espagne et Turquie. L'idée la plus novatrice est d'éliminer toute erreur personnelle de l'observateur, en le remplaçant avec une caméra CCD, ce qui permet aussi de préciser la définition du bord solaire.

En 1996, F. Laclare a commencé la construction d'un instrument CCD complètement automatisé, DORaySol, dédié aux mesures du demi-diamètre solaire (LacLare 1997).

## REFERENCES

- ALLEN C.W., 1963, *"Astrophysical quantities"*, The Athlone Press – University of London
- BILLAUD G., GUINOT B., 1971, *"Un astrolabe à pleines pupilles"*, *Astronomy and Astrophysics*, **11**, p. 241
- BOUGEARD M., 1982, *"Analyse des observations du Soleil à l'astrolabe du CERGA. Extension aux observations incomplètes"*, Mémoire présenté à l'Observatoire de Paris
- CHOLLET F., 1981, *"Observations du Soleil à l'astrolabe"*, Thèse de Doctorat, L'Université Pierre et Marie Curie – Paris
- CHOLLET F., 1997, *Communication personnelle*
- DANJON A., 1954, *"L'astrolabe impersonnel de l'Observatoire de Paris"*, *Bulletin Astronomique*, **18**, p. 251
- DANJON A., 1958, *"L'astrolabe impersonnel modèle OPL"*, *Bulletin Astronomique*, **21**, p. 323
- DÉBARBAT S., GUINOT B., 1970, *"La méthode des hauteurs égales en astronomie"*, Gordon & Breach – Paris
- GUINOT B., 1958, *"L'astrolabe impersonnel A. Danjon, modèle OPL, de l'Observatoire de Paris. Etude des résultats d'une année d'observations"*, Thèse de Doctorat – Faculté des Sciences de l'Université de Paris
- LACLARE F., DEMARCQ J., CHOLLET F., 1980, *"Sur la réalisation d'un astrolabe solaire au CERGA"*, *Comptes Rendus Academie des Sciences Paris, Série B*, **291**, p. 189
- LACLARE F., MERLIN G., 1991, *"L'astrolabe solaire impersonnalisé par l'emploi d'une caméra CCD Application à la mesure du diamètre solaire"*, *Comptes Rendus Academie des Sciences Paris, Série II*, **313**, p. 323
- LACLARE F., 1997, *Communication personnelle*
- LEISTER N., 1989, *"Orientação do sistema fundamental de referência. Observações do Sol com o astrolábio de Valinhos"*, Tese de Doutorado – Instituto Astronômico e Geofísico – São Paulo



MANGOMBI I., 1986, "*Contribution à la mise au point d'un astrolabe solaire à l'Observatoire de Paris. Corrections aux observations*", Thèse de Doctorat – Observatoire de Paris

SÁNCHEZ M., 1991, "*Nuevo astrolabio polivalente del ROA*", Thèse de Doctorat – Facultad de Física – Barcelona

SÁNCHEZ M., MORENO F., PARRA F., SOLER M., 1993, "*Modification de l'astrolabe du ROA. Campagne expérimentale d'observation du Soleil en 1991*", *Astronomy and Astrophysics*, **280**, p. 333

THOMAS D.V., 1967, "*A proposal for a reflecting astrolabe*", *Monthly Notes of the Astronomical Society of South Africa*, **26/1-2**, p. 2

## CHAPITRE II – OBSERVATIONS SOLAIRES A L’ASTROLABE

### II.1 – LE PRINCIPE DE L’OBSERVATION

Comme on a vu au chapitre I, une mesure à l’astrolabe consiste à noter l’instant où l’astre observé passe par le cercle de hauteur défini par l’instrument. L’oculaire est muni d’un réticule, quatre fils horizontaux et quatre verticaux, qui fournissent un système de référence pratique et commode pendant l’observation.

Pour *le cas des étoiles*, qui donnent des images ponctuelles dans l’oculaire, la figure II.1 présente l’aspect d’une observation typique. Le sens du mouvement des images est donné par les flèches. Lorsque les images se trouvent sur une parallèle aux fils horizontaux, l’observateur embraye le micromètre et maintient les deux images sur cette droite à l’aide d’un correcteur différentiel ; un chronographe enregistre les instants des contacts électriques (ouverture ou fermeture d’un circuit) dont la moyenne, calculée après vingt contacts, représente l’instant de passage brut (avant les corrections de courbure de l’almucantarat) (Débarbat & Guinot 1970).

Lors des observations d’objets du système solaire (planètes ou Soleil), l’image de l’objet observé n’est plus ponctuelle. Prenons *le cas du Soleil*. Evidemment, le champ de l’instrument n’étant pas suffisant, l’image entière ne peut être observée, et le centre du disque solaire est, de toutes façons, inaccessible. L’observation consiste alors à enregistrer l’instant de passage par le cercle de hauteur de points particuliers du bord du disque solaire, que l’on choisit diamétralement opposés. L’instrument est sensible aux variations de distance zénithale. On observe donc les points du bord solaire à tangente horizontale : L’instant de passage du centre du Soleil est le même que celui du bord, en remarquant que lorsque le bord passe à la distance zénithale  $z_0$  définie par l’instrument, celle du centre, au même instant, est  $z_0 \pm d$  (où  $d$  est le demi-diamètre solaire apparent). Les instants notés doivent être corrigés des effets dus à la courbure de l’almucantarat et du parallèle décrit par le Soleil. La figure II.2 schématise un passage solaire par le cercle de hauteur de distance zénithale  $z$  définie par l’instrument : on note les deux instants où le bord du Soleil tangente le cercle de hauteur aux points  $T_1$  et  $T_2$  (Laclare 1983).

#### II.1.1 – Observations visuelles

Dans le cas des observations solaires visuelles, le passage d’un bord du Soleil se passe comme pour les étoiles, si on assimile les points de tangence des deux images du Soleil aux deux images d’une étoile (fig. II.3 a et c). Comme pour les étoiles, l’observateur doit maintenir la tangence des deux images du bord observé sur une parallèle aux fils horizontaux du réticule, à l’aide du différentiel. Les flèches indiquent les trajectoires des images dans le champ de l’oculaire. Avant le passage du centre du Soleil (fig. II.3 b) les deux images se rapprochent, pour s’éloigner ensuite. L’image b est obtenue par une légère



rotation en azimut, et le décalage horizontal que l'on peut observer entre les deux images indique une inclinaison de l'arête du prisme en plan vertical.

Dès que les images entrent dans le champ, avant l'instant de leur tangence, l'observateur dispose de quelques secondes pour aligner les images par rapport au système défini par le réticule de l'oculaire. Les réglages à faire en ce moment sont schématisés sur la figure **II.4** :

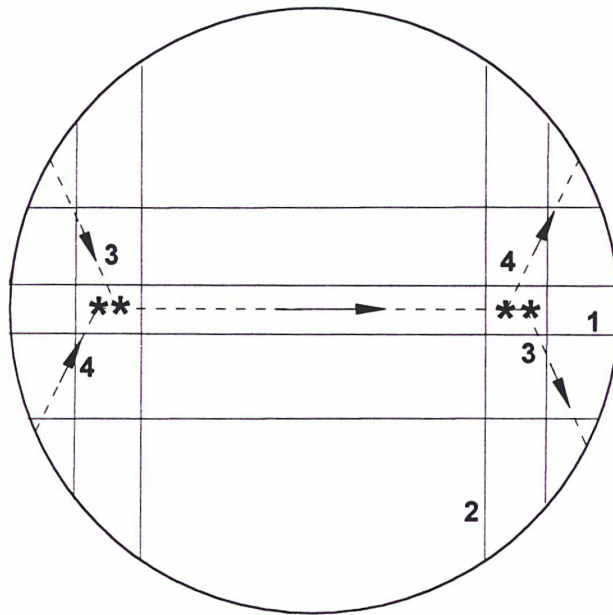
- une légère rotation de l'instrument en azimut, pour déplacer l'ensemble des deux images par rapport à l'axe vertical (**a**) ;
- l'inclinaison de la lunette en plan vertical autour d'un axe perpendiculaire à l'axe optique (la monture de la lunette peut basculer afin de réaliser ce réglage), pour déplacer l'ensemble des deux images par rapport à l'axe horizontal (**b**) ;
- l'inclinaison de l'arête du prisme pour symétriser les deux images par rapport à l'axe horizontal (**c**).

## II.1.2 – Observations CCD

Dans le cas des observations CCD, le principe reste le même, avec quelques particularités :

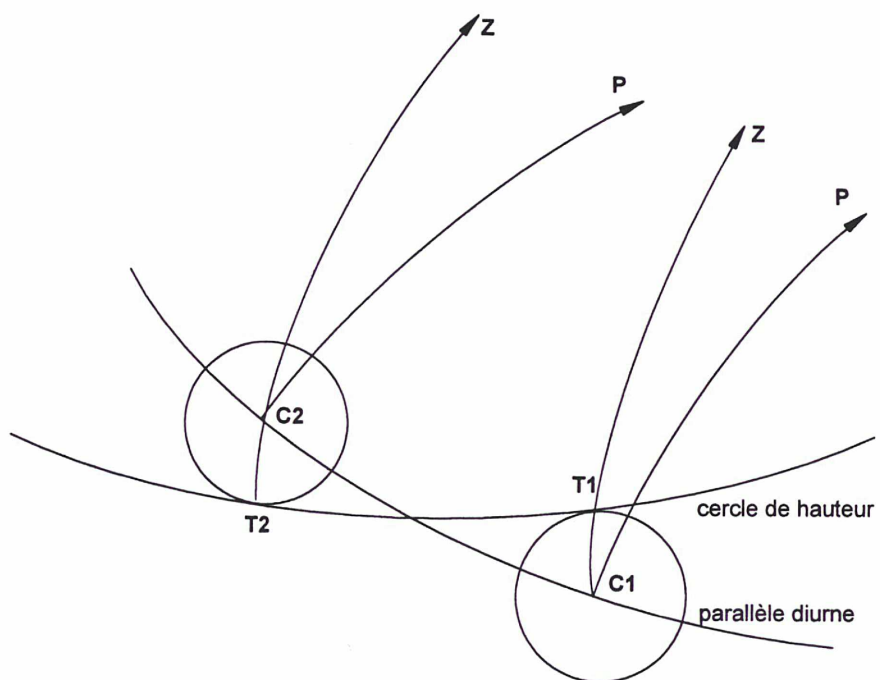
- L'oculaire est remplacé par une matrice CCD, qui envoie les images captées sur un moniteur vidéo et dans un ordinateur d'acquisition ;
- La matrice des pixels CCD prend la place du réticule de l'oculaire en tant que système de référence pour les images ; des repères sont tracés dans un plan graphique sur le moniteur vidéo ;
- Au lieu d'enregistrer l'instant de passage du bord du Soleil, on enregistre une série d'images CCD numériques (le Wollaston restant fixe), pendant la durée de la traversée du champ de la CCD par les deux images du bord solaire. Chaque image est datée précisément avec une carte chronomètre et enregistrée ensuite sur le disque dur d'un ordinateur ;
- Les trajectoires des deux images sont reconstituées ultérieurement à partir des images numérisées. Leur intersection détermine l'instant où les sommets de chaque image sont sur la même colonne (horizontale) de la matrice CCD, d'où l'instant de passage du bord solaire par le cercle de hauteur, à quelques corrections près.

Les trois réglages **a**, **b**, **c** (fig. **II.4**) restent les mêmes que pour les observations visuelles, mais au lieu de mettre en marche le moteur du Wollaston au moment de la tangence des images, on déclenche l'acquisition des images CCD dès que les réglages sont faites. En effet, le Wollaston ne sert plus de micromètre, mais il a été conservé pour corriger l'écartement angulaire des faisceaux. Juste avant que les images du bord solaire sortent du champ, on arrête l'acquisition et on prépare l'observation du bord suivant.



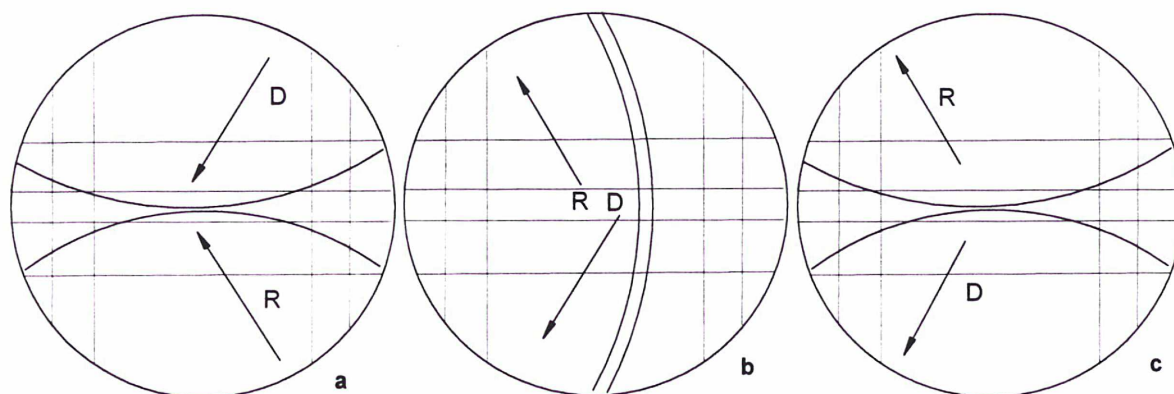
**Fig. II.1. Observation d'un passage d'étoile.**

1 fil réticulaire horizontal 2 fil réticulaire vertical 3 image directe 4 image réfléchie



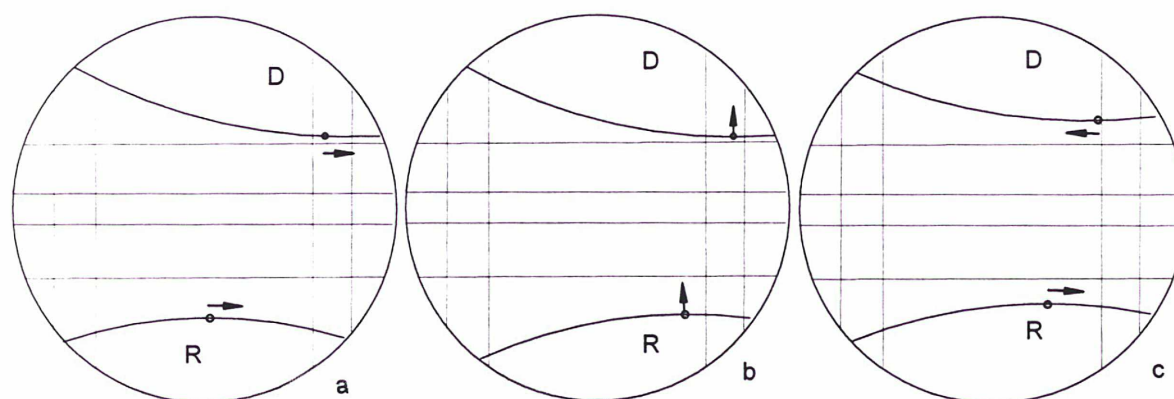
**Fig. II.2. Trajectoire apparente du Soleil lors du passage par un cercle de hauteur.**





**Fig. II.3. L'aspect des images du Soleil en passage l'Est.**

**a** passage du premier bord **b** passage approximatif du centre **c** passage du deuxième bord **D** image directe  
**R** image réfléchie



**Fig. II.4. Les trois réglages pour les observations solaires.**

## II.2 – EQUATION FONDAMENTALE

Dans ce chapitre on présente les résultats des travaux sur la réduction des observations solaires (Chollet 1981, Laclare 1983, Sánchez 1991). La méthode de base reste celle des hauteurs égales (Débarbat & Guinot 1970).

L'observation consiste à noter l'instant de passage par le cercle de hauteur, défini par l'instrument, d'un point du bord solaire tel que la tangente à ce point soit horizontale. On observe donc l'instant de passage du centre solaire à une distance zénithale  $z'$ , qui est la distance zénithale instrumentale  $z_o$  augmentée ou diminuée de la valeur du demi-diamètre solaire  $d_o$  (selon le bord observé). Le principe de la réduction des observations est de trouver la différence entre les instants calculés et observés du passage du centre solaire par la distance  $z'$ . Par différenciation totale de la première des relations I.1, on obtient :

$$(II.1) \quad \begin{aligned} -\sin z dz = & -\cos \varphi \cos \delta \sin H dH + (\cos \varphi \sin \delta - \cos \delta \sin \varphi \cos H) d\varphi \\ & + (\sin \varphi \cos \delta - \cos \varphi \sin \delta \cos H) d\delta, \end{aligned}$$

avec  $z$  la distance zénithale d'observation,  $\varphi$  la latitude du lieu, et  $\delta, H$  la déclinaison et l'angle horaire du centre du Soleil. Les valeurs des  $dz, dH, d\varphi, d\delta$  seront remplacées par les différences entre les valeurs observées ( $_o$ ) et calculées ( $_c$ ) :

$$(II.2) \quad \begin{cases} \Delta z = z_o - z_c \\ \Delta H = H_o - H_c \\ \Delta \delta = \delta_o - \delta_c \\ \Delta \varphi = \varphi_o - \varphi_c \end{cases}$$

Les inconnues se calculent à partir des valeurs approchées, en tenant compte des corrections spécifiques aux observations à l'astrolabe. En général, ces corrections ont pour but de diminuer la grandeur des valeurs brutes des inconnues (il s'agit de minimiser l'effet des termes d'ordre supérieur).

### II.2.1 – La distance zénithale

Dans les relations (II.2), la distance zénithale d'observation du passage du centre du Soleil s'écrit :

$$(II.3) \quad z_o = z_{io} + R_o \pm d_o + A + B,$$

où interviennent la distance zénithale définie par l'instrument  $z_{io}$ , la réfraction  $R_o$ , le demi-diamètre solaire apparent  $d_o$ , la correction due à la courbure du cercle de hauteur  $A$ , et de la trajectoire du Soleil  $B$ . Les corrections  $A$  et  $B$  sont déduites des conditions d'observations (Débarbat & Guinot 1970). Le signe du demi-diamètre est fonction du bord observé : plus pour un bord supérieur, moins pour un bord inférieur.



En ce qui concerne la distance zénithale calculée, on peut l'écrire :

$$(II.4) \quad z_c = z_{ic} + \overline{R_i} \pm d_c,$$

où  $\overline{R_i}$  représente une valeur moyenne pour la réfraction (qui varie très peu entre le passage des deux bords successifs), et  $d_c$  est la valeur calculée du demi-diamètre solaire apparent corrigée de la parallaxe. Si on applique à l'expression de  $z_c$  une correction de réfraction  $R_c - \overline{R_i}$  et les corrections  $A$  et  $B$  (comme pour II.3), et si on note  $\Delta z_o = (z_i - z_{io}) + (R_o - R_c)$ , on obtient finalement :

$$(II.5) \quad \Delta z = \Delta z_o \pm \Delta d$$

### II.2.2 – L'angle horaire

L'inconnue  $\Delta H$  peut encore s'écrire :  $\Delta H = \Delta T - \Delta \alpha$ , où  $\Delta T$  et  $\Delta \alpha$  représentent les différences entre les valeurs observées et calculées du temps sidéral local et de l'ascension droite du centre du Soleil. La correction au temps sidéral local est :

$$(II.6) \quad \Delta T = \Delta T_G + \Delta L,$$

où  $L$  est la longitude de la station.  $\Delta T_G$ , la correction au temps sidéral de Greenwich s'écrit :

$$(II.7) \quad \Delta T_G = \frac{1}{k} (UT0_o - UT0_c)$$

La valeur observée  $UT0_o$  du temps de passage est corrigée des décalages entre le chronomètre et l'horloge, et entre l'horloge et le Temps Universel Coordonné  $UTC$ .  $k$  est le rapport entre le temps universel et le temps sidéral.

### II.2.3 – L'équation générale

Avec les expressions (II.5), (II.6), (II.7) et le groupe de relations (I.1), l'équation (II.1) prend la forme :

$$(II.8) \quad \begin{aligned} -\delta h = & 15 \sin a \cos \varphi \left[ \frac{1}{k} (UT0 - UTC) - \Delta \alpha - \Delta L \right] \\ & + \Delta \varphi \cos a + \Delta \delta \cos S + \Delta z_o \pm \Delta d, \end{aligned}$$

qui représente **l'équation générale**.  $\delta h$ , exprimé en secondes de degré, est la partie calculable de l'équation générale déduite des valeurs des temps observés et calculés.

Le lecteur intéressé trouvera dans les références bibliographiques le calcul des **corrections supplémentaires** pour la réfraction, l'autocollimation et le demi-diamètre

apparent du Soleil, ainsi que les coordonnées apparentes de la station (Chollet 1981). D'autres erreurs instrumentales seront étudiées plus loin.

Après toutes ces modifications, l'équation (II.8) donne une **équation de condition** pour chaque mesure de passage de bord solaire, de la forme :

$$(II.9) \quad C = -15 \sin a \cos \varphi \Delta\alpha + \Delta\delta \cos S + \Delta z \pm \Delta d,$$

avec :

$$(II.10) \quad C = -\delta h - 15 \sin a \cos \varphi \left[ \frac{1}{k} (UT0 - UTC) - \Delta L \right] - \Delta\varphi \cos a$$

Le signe de  $\Delta d$  est positif pour un bord solaire supérieur et négatif pour un bord solaire inférieur, et le signe de  $\Delta\alpha$  est positif à l'Est et négatif à l'Ouest. La valeur de  $(UT0 - UTC)$ , ainsi que la partie de  $\Delta\varphi$  due au mouvement du Pôle viennent des données du IERS.

Avec ces changements de signe, les quatre observations de passages possibles dans une journée (pour une même distance zénithale) donnent quatre équations de la forme II.9 :

$$(II.11) \quad \begin{cases} C_1 = -15 \sin a_1 \cos \varphi \Delta\alpha + \Delta\delta \cos S_1 + \Delta z + \Delta d & \text{(BSE)} \\ C_2 = -15 \sin a_2 \cos \varphi \Delta\alpha + \Delta\delta \cos S_2 + \Delta z - \Delta d & \text{(BIE)} \\ C_3 = 15 |\sin a'_2| \cos \varphi \Delta\alpha + \Delta\delta \cos S'_2 + \Delta z - \Delta d & \text{(BIO)} \\ C_4 = 15 |\sin a'_1| \cos \varphi \Delta\alpha + \Delta\delta \cos S'_1 + \Delta z + \Delta d & \text{(BSO)} \end{cases}$$

Les notations BSE, BIE, BIO, BSO signifient, dans l'ordre chronologique des observations : passage du Bord Supérieur à l'Est, du Bord Inférieur à l'Est, du Bord Inférieur à l'Ouest et du Bord Supérieur à l'Ouest.

Dans ces quatre équations, le fait que les variations de  $\cos S_i$  et  $\sin a_i$  sont très faibles, entraîne que les inconnues  $\Delta z$  et  $\Delta\delta$  ne sont pas séparables dans le système (II.11). On les regroupe donc dans une même inconnue,  $y$  :

$$(II.12) \quad y = \Delta z + \Delta\delta \overline{\cos S},$$

où  $\overline{\cos S}$  est une valeur moyenne pour les cosinus des angles à l'astre du centre du Soleil. En procédant ainsi, une série journalière de quatre observations fournit un système de quatre équations à trois inconnues  $\Delta\alpha, y, \Delta d$ , que l'on détermine séparément pour chacune des distances zénithales :

$$(II.13) \quad \begin{cases} C_1 = -15 \sin a_1 \cos \varphi \Delta\alpha + y + \Delta d & \text{(BSE)} \\ C_2 = -15 \sin a_2 \cos \varphi \Delta\alpha + y - \Delta d & \text{(BIE)} \\ C_3 = 15 |\sin a_2| \cos \varphi \Delta\alpha + y - \Delta d & \text{(BIO)} \\ C_4 = 15 |\sin a_1| \cos \varphi \Delta\alpha + y + \Delta d & \text{(BSO)} \end{cases}$$

Chaque prisme supplémentaire fournit un autre système de la forme (II.13), dans lequel les inconnues  $\Delta z$  et donc  $y$  sont différentes, à cause du changement de prisme, et donc de distance zénithale.



## II.3 – LES FACTEURS QUI AFFECTENT LES MESURES

Les mesures sont bien évidemment affectées d'erreurs instrumentales que l'on doit corriger au mieux, qu'il s'agisse des observations de position ou du demi-diamètre du Soleil. La non-perpendicularité du filtre solaire au faisceaux incidents, par exemple, ne modifie pas la distance zénithale d'observations dans les mesures de diamètre solaire, mais affecte les mesures de position. Quant au non-parallélisme de ses deux faces, il affecte directement la distance zénithale d'observation (chapitre I.2.3).

L'alignement vertical imparfait des deux images du bord solaire dans le système du réticule de l'oculaire (suite aux trois réglages de la figure II.4), ainsi que les effets dus à l'astigmatisme, à la polarisation de la lumière, et surtout à la position de la CCD dans l'axe optique de l'instrument, seront étudiés plus loin, dans les chapitres IV et V. Dans le chapitre IV sera discutée l'influence de l'assombrissement centre-bord du disque solaire.

La turbulence atmosphérique est l'un des facteurs les plus importants qui affectent les observations à l'astrolabe et tout particulièrement dans le cas d'observations du Soleil, ce qui est valable d'ailleurs pour toute observation optique effectuée au sol. Il reste la solution des instruments à optique adaptative, mais la mise en œuvre d'un tel système sur un astrolabe n'est pas envisageable dans le présent. Si la turbulence atmosphérique à haute fréquence donne une image dentelée du bord solaire, fait qui ne modifie pas trop la position des points de tangence des deux bords, ce n'est pas le cas de la turbulence à basse fréquence, qui produit des translations de l'image entière.

L'effet de la turbulence atmosphérique (surtout à basses fréquences) sur les observations visuelles du Soleil à l'astrolabe est impossible à évaluer, et c'est l'une des raisons pour laquelle la matrice CCD remplacera l'observateur humain. Effectivement, la numérisation des images du bord solaire donne accès à certains paramètres concernant l'évaluation de la turbulence. Ce sujet sera détaillé dans le chapitre V, où il s'agit des observations CCD.

Comme pour la turbulence atmosphérique, l'effet de la diffraction de l'optique de l'instrument sur les images ne peut pas être déterminé dans le cas des observations visuelles du Soleil. Seule l'étude de l'image du bord solaire que l'on observe pourrait nous donner des informations sur l'effet de la diffraction, et la numérisation des images observées avec une caméra CCD permet d'envisager une telle étude. Dans le chapitre IV.2 seront discutés les problèmes liés au changement de la position du point d'inflexion du bord solaire sur les images CCD, dû à la fonction d'assombrissement centre-bord combinée avec la turbulence atmosphérique et la diffraction.

### II.3.1 – La polarisation de la lumière par le Wollaston

A la sortie du prisme biréfringent de Wollaston, les deux faisceaux qui forment les deux images du Soleil sont polarisés à  $90^\circ$ , introduisant ainsi un biais dans la mesure du diamètre solaire.

Les deux faisceaux restant parallèles après la sortie du Wollaston à l'instant de la tangence des deux bords, la polarisation n'affecte pas l'instant observé. Mais, en lumière polarisée, la forme du Soleil dépend de la direction d'observation par rapport à son équateur, et on observe un Soleil aplati sur une direction parallèle au plan du polariseur. Ce phénomène a été étudié par H. Sadsaoud, qui montre que le biais ainsi introduit dans les mesures du diamètre solaire reste pourtant négligeable. Si dans le spectre continu la polarisation au voisinage du bord du disque solaire est de l'ordre de  $10^{-4}$  (Pecker & Schatzman 1959), il a été montré que le biais maximal est d'un ordre de grandeur plus petit, soit environ 0,01 dans le cas limite où les deux rayons observés pour la mesure du diamètre apparent sont perpendiculaires (Sadsaoud 1986).

Par construction, l'ensemble objectif-Wollaston-transporteur donne un spectre secondaire minimal au voisinage du passage (la matrice CCD couvrant environ 3' de la trajectoire du Soleil avant et après le passage). En plus, la CCD est précédée d'un filtre.

Notre intention est de trouver un montage optique qui permette de s'affranchir du Wollaston, et des travaux de recherche sont en cours (Popescu 1998).

### II.3.2 – Le déplacement du foyer

Dans le cas des observations du Soleil, des variations thermiques à l'intérieur de l'astrolabe sont créées, provoquant un déplacement du plan focal, donc des variations de la distance zénithale instrumentale. Pour déterminer ces variations, une mesure du  $V_o$  est faite, avant et après chaque observation. La position  $V_o$  du Wollaston est déterminée par autocollimation sur un miroir placé devant l'objectif. On obtient une correction destinée à "borner" l'erreur éventuelle (Débarbat & Guinot 1970), et qui s'applique à la distance zénithale observée :

$$(II.14) \quad \Delta z = k(V_o - V_m),$$

où interviennent la valeur du tour de vis  $k$ , caractéristique à chaque astrolabe, et les positions observée et moyenne du Wollaston,  $V_o$  et  $V_m$  (pour l'astrolabe de Calern,  $k = 25'',85$ ).  $\Delta z$  prend des valeurs inférieures à 1'' et s'obtient avec une erreur inférieure à 0,01. La mesure de cette correction, qui s'ajoute à la correction de réfraction décrite plus haut, doit se faire avec le plus grand soin.

## II.4 – INCONVENIENTS DES OBSERVATIONS VISUELLES

L'astrolabe solaire a bien fait la preuve de ses qualités, au travers des campagnes d'observations visuelles effectuées en France, Brésil, Turquie, Chili et Espagne. La longue série d'observations de Calern, qui s'étale sur plus de vingt ans pour un seul observateur, a toujours servi comme base de référence pour les autres séries. Quant aux séries d'observations faites par plusieurs observateurs, on ne peut pas les traiter de la même façon : chaque observateur a sa manière de *voir* le Soleil et d'apprécier l'instant de la mesure, d'où les doutes sur les résultats globaux. Pour cette raison, on pense avoir accès aux *variations*



du diamètre solaire plutôt qu'à sa valeur réelle. Et même dans ces conditions, on se pose la question : *Est-ce que la manière d'observer d'un observateur reste stable dans le temps ?*

#### II.4.1 – L'erreur systématique des observations visuelles

Le problème principal qui se pose aux observations visuelles du Soleil est lié à la définition du bord solaire observé. Il est difficile de répondre à la question : *Quel bord solaire l'œil humain observe ?*, et encore *Est-ce qu'on observe toujours le même point du bord solaire ?* A part les inconnues liées à l'étalement de l'image, les observations visuelles en apportent une nouvelle, la définition du bord solaire. De plus, l'œil doit apprécier l'instant où les images des deux bords se tangentent, et les deux images n'ont pas les mêmes intensités : l'image réfléchie est toujours plus faible que l'image directe.

Chaque mauvaise interprétation du bord solaire ou de la tangence de deux bords se traduit par un faux instant de passage, donc par des résultats erronés. Le fait que les mesures visuelles soient éphémères rend impossible l'analyse *a posteriori* des mesures douteuses, qui sont éliminées par des méthodes statistiques. Mais si ces erreurs sont systématiques, elles ne peuvent être éliminées que très difficilement.

#### II.4.2 – L'œil humain et l'œil électronique

Les mesures de F. Laclare, qui a effectué en parallèle des observations visuelles et CCD sur un même astrolabe, pendant plusieurs années, laissent espérer que l'observateur apprécie en moyenne le voisinage du point d'inflexion de la fonction d'étalement du bord solaire. Ce fait est valable au moins pour l'observateur Laclare et pour la définition du bord solaire qu'il a adopté pour les images CCD (il s'agit ici des mesures CCD analogiques dont le principe sera décrit dans le chapitre III) (Lacare & Merlin 1991).

Cependant en visuel on n'observe pas un seul bord solaire comme pour les observations CCD, mais la tangence des deux images d'un même bord. Il s'agit donc de la convolution de deux fonctions d'étalement, et le fait que l'œil humain observe le même diamètre solaire que la caméra CCD ne peut être qu'une coïncidence. De même, deux caméras différentes (réponse spectrale, gain, etc.) observeront deux diamètres différents, comme dans le cas de deux observateurs.

En conséquence, chaque observateur possède sa propre définition du bord solaire, la caméra CCD ouvrant l'accès aux paramètres de cette définition, contrairement à l'observateur humain. Ce sujet sera repris dans le chapitre VI.

#### II.4.3 – L'archéologie des observations

Une observation visuelle du Soleil à l'astrolabe fournit, comme données, le temps de

passage brut (enregistré sur papier par le chronographe), les mesures météo pour la réfraction, et quelques notes personnelles concernant l'alignement des images dans le champ et la "qualité" des images. A part les données météo, tous les paramètres enregistrés sont susceptibles de contenir des appréciations subjectives, d'où l'impossibilité de reconstituer objectivement les mesures qu'ils accompagnent. En ce qui concerne le diamètre solaire, les travaux de reconstitution des mesures anciennes ont toujours été difficiles, à cause justement de cette grande inconnue : ***la subjectivité de telles observations*** (Gilliland 1981, Ribes et al. 1991, Toulmonde 1995).

Un instrument automatique, basé sur un astrolabe solaire équipé d'une caméra CCD, est capable d'enregistrer les mesures dans leur totalité, donc d'archiver tous les paramètres des observations qui pourraient être utiles aux réductions et analyses ultérieures. Les images, ainsi que les paramètres instrumentaux et météorologiques seront dépourvus de tout effet personnel, car leur enregistrement est automatique. Cet aspect sera discuté en détail dans les chapitres consacrés aux acquisitions CCD.

## II.5 – CONCLUSIONS

Malgré l'impersonnalisation de l'astrolabe grâce à l'ajout du dispositif micrométrique de A. Danjon, les mesures visuelles restent affectées par des erreurs personnelles. A part les longues séries d'observations visuelles effectuées par un seul observateur, une analyse globale des mesures provenant de plusieurs observateurs reste très difficile, à cause des incertitudes personnelles. L'analyse globale des mesures CCD est dépourvue des effets personnels et, en plus, les acquisitions CCD donnent accès aux corrections inaccessibles aux observations visuelles.

L'homogénéité des mesures CCD doit permettre d'atteindre de meilleures précisions qu'en visuel, à condition d'obtenir des bonnes images et de choisir la bonne méthode d'acquisition et de réduction. De nombreuses configurations de l'instrument et de la méthode d'acquisition ont été essayées, comme on verra dans les chapitres suivants. En effet, il faut d'abord fixer ces paramètres, pour pouvoir ensuite parler de mesures homogènes.

Par la quantité d'informations emmagasinées, les observations CCD permettent de tester de nombreuses méthodes d'analyse : nettoyage des images, déconvolution et surtout définition du bord solaire. Une fois la meilleure méthode de traitement de données choisie, elle pourra être appliquée rétroactivement aux mesures archivées. Au contraire, *les résultats des mesures visuelles sont figés, et les éventuelles erreurs d'interprétation non décelables.*

## REFERENCES

CHOLLET F., 1981, "*Observations du Soleil à l'astrolabe*", Thèse de Doctorat, L'Université Pierre et Marie Curie – Paris



- DÉBARBAT S., GUINOT B., 1970, *"La méthode des hauteurs égales en astronomie"*, Gordon & Breach – Paris
- GILLILAND R.L., 1981, *"Solar radius variations over the past 265 years"*, *The Astrophysical Journal*, **248**, p. 1144
- LACLARE F., 1983, *"Astrolabe measurements of the solar diameter"*, *Astronomy and Astrophysics*, **125**, p. 200
- LACLARE F., MERLIN G., 1991, *"L'astrolabe solaire impersonnalisé par l'emploi d'une caméra C.C.D. Application à la mesure du diamètre solaire"*, *Comptes Rendus Academie des Sciences Paris, Série II*, **313**, p. 323
- PECKER J.C., SCHATZMAN E., 1959, *"Astrophysique générale"*, Masson et Cie. – Paris
- POPESCU R., 1998, *"Adaptation des caméras CCD aux instruments astrométriques de l'Observatoire de Bucarest. Application à l'astrolabe de Danjon"*, Thèse de Doctorat (en cours) – Observatoire de Bucarest & Observatoire de Paris
- RIBES E., BEARDSLEY B., BROWN T.M., DELACHE PH., LACLARE F., KUHN J.R., LEISTER N.V., 1991, *"The variability of the solar diameter"*, dans *"The Sun in time"* – University of Arizona Press - Tucson, AZ
- SADSAOUD H., 1986, *"Etude des variations du diamètre du Soleil observé à l'astrolabe solaire du C.E.R.G.A."*, Thèse de Doctorat – Université de Nice
- SÁNCHEZ M., 1991, *"Nuevo astrolabio polivalente del ROA"*, Thèse de Doctorat – Facultad de Física – Barcelona
- TOULMONDE M., 1995, *"Etude comparative de diamètres solaires observés à partir d'instruments astrométriques"*, Thèse de Doctorat – Observatoire de Paris

## CHAPITRE III – L’ASTROLABE SOLAIRE A CCD

### III.1 – LA CAMERA CCD

Apparues dans les années 80, les caméras CCD (*Charge-Coupled Device*), ont, dans bien des cas, remplacé la plaque photographique utilisée sur des instruments astronomiques. La plaque photographique peut avoir un champ très grand, de plusieurs degrés carrés ; ce n’est pas encore le cas des capteurs CCD. Dans les références bibliographiques on trouvera une description complète des divers types de caméras CCD, ainsi que leur utilisation en astronomie (Buil 1986, Martinez & Klotz 1994).

Les astrolabes solaires sont, jusqu’à présent, équipés de caméras CCD au standard vidéo noir et blanc. Ces caméras ont été choisies pour leur facilité d’emploi et leur faible coût. Le signal vidéo est numérisé sur 8 bits par un convertisseur analogique-numérique, qui donne en sortie des images numérisées sur 256 niveaux de gris. Ces caméras devraient être remplacées prochainement par des caméras à sortie numérique (qui sont maintenant d’un prix plus abordable), pour éviter justement la chaîne de conversions numérique-analogique-numérique. Ces conversions successives, propres aux caméras vidéo, sont nécessaires à l’obtention des images au standard TV et pour l’accès à l’information numérique brute.

#### III.1.1 – La matrice CCD

Un capteur CCD est constitué d’un circuit électronique intégré dont la surface est composée d’une matrice d’éléments sensibles à la lumière (ou *pixels*), carrés ou rectangulaires, et juxtaposés. Dans le cas de l’astrolabe solaire il faut choisir des matrices CCD sans obturateur électro-mécanique, qui ne résisterait pas au rythme imposé par l’acquisition des images (rafales de jusqu’à 120 images dans l’intervalle de  $\sim 25^s$  que dure un passage). En même temps, pour définir au mieux l’instant de la mesure, le temps de pose doit être plus petit de 20 ms, et il est nécessaire surtout qu’il soit constant. Les matrices CCD utilisées sont donc à **transfert de trame** ou à **transfert interligne**. Ce transfert est beaucoup plus rapide, car on n’a plus de cycles d’horloges horizontales entre chaque cycle d’horloges verticales, comme dans le cas des matrices **pleine trame**, et en même temps, il fait office d’obturateur électronique. On évite l’obturateur non-électronique pour des raisons mécaniques.

Le nombre de pixels de la matrice CCD fixe la quantité d’information spatiale contenue dans l’image, définie par le rapport entre le champ couvert par la CCD et sa résolution. Les caractéristiques physiques de la CCD, avec la focale de l’instrument  $f$ , fixent **l’échantillonnage spatial des pixels ESP**, donc la dimension du pixel exprimée



en "/pixel, ainsi que le champ couvert par la matrice  $ChM$  :

$$(III.1) \quad \begin{cases} ESP = \arctan(\frac{dP}{f}) \\ ChM = \arctan(\frac{dM}{f}) \end{cases}$$

$dP$ ,  $dM$  représentant les dimensions du pixel et de la matrice CCD, supposés carrés ici pour simplifier. Comme les pixels et la matrice CCD sont généralement rectangulaires, il faut déterminer ces grandeurs dans les deux dimensions.

La première caméra utilisée sur l'astrolabe solaire de Calern est une COHU 4710, à transfert de trame, avec  $512 \times 512$  pixels en sortie vidéo numérisé sur 8 bits. Avec un pixel de  $9.2 \times 8.4 \mu m$ , l'échantillonnage spatial des pixels est de  $\sim 0''.74$ /pxl sur la direction horizontale et de  $\sim 0''.56$ /pxl sur la direction verticale, pour la distance focale de  $\sim 3.5$  m de l'astrolabe (télescope + transporteur d'image). Le champ couvert par la matrice CCD est de  $\sim 6''.3$  sur la direction horizontale et de  $\sim 4''.8$  sur la direction verticale.

Une autre caméra, utilisée pendant la campagne d'observations CCD de 1996 est une PULNIX TM6EX, avec des dimensions de la matrice CCD presque identiques à celles de la COHU, mais avec un temps de pose réglable entre  $1^s/60$  et  $1^s/10000$ . La matrice CCD de cette caméra est à transfert interligne.

La bande de sensibilité spectrale est centrée vers 700 nm pour la COHU et vers 570 nm pour la PULNIX, et sa largeur impose l'utilisation d'un filtre coupant l'infra-rouge (pour d'autres des détails techniques des caméras CCD utilisées, voir l'annexe A.1).

### III.1.2 – Les images CCD analogiques

La méthode d'acquisition consiste à :

- observer le passage du point du bord solaire à tangente parallèle aux colonnes de la CCD
- déduire la rotation à effectuer pour rendre les lignes de la CCD horizontales
- reconstituer les trajectoires des images

Normalement, l'acquisition de l'image vidéo numérisée se fait via une carte vidéo pilotée par l'ordinateur. Cela nécessite un ordinateur doté d'au moins 8 Mo de mémoire vive (RAM) et d'un microprocesseur cadencé à 33 MHz au minimum. Comme à l'époque des premiers essais on ne disposait pas de tels moyens, une solution purement électronique (dite **analogique**), a été développée afin de détecter le point d'inflexion du bord solaire sur chaque ligne de l'image. Une ligne à retard a été utilisée pour décaler le signal d'un nombre entier de pixels, le long des lignes. La différence entre le signal direct et le signal décalé donne la dérivée première de la fonction numérique qui représente le bord solaire ; la dérivée seconde est issue d'un dérivateur capacitif, et l'abscisse où elle s'annule donne la position du point d'inflexion de cette fonction pour la ligne analysée, dans le repère défini par la matrice CCD. A la fin de la détection on obtenait, pour chaque image, 128

points d'inflexion reconstituant le bord du disque solaire (uniquement une ligne sur quatre était analysée). Chaque image, datée par une carte chronographe, était ainsi réduite à un tableau de 128 valeurs représentant les coordonnées des points d'inflexion dans le repère de la matrice CCD. Enregistrées au fur et à mesure dans la mémoire RAM de l'ordinateur, les images, datées et réduites à leur contour, étaient sauvegardées sur une disquette à la fin du passage (Laclare & Merlin 1991).

Malgré l'impersonnalisation apportée par cette méthode, les images obtenues restent toujours éphémères : on les voit défiler sur un moniteur vidéo, mais, à la fin du passage, seules les positions de quelques points d'inflexion sont conservées. C'est presque le cas des observations visuelles, il est impossible de revenir en arrière pour corriger la détection du bord solaire ou pour en perfectionner la définition.

Toutefois, l'expérience analogique a prouvé que le capteur CCD est capable de remplacer avantageusement l'observateur pour les observations du Soleil à l'astrolabe, et ce avec de très bons résultats. Entre 1989 et 1994, des mesures visuelles et CCD du demi-diamètre solaire, effectuées en parallèle sur le même astrolabe, on conduit aux résultats moyens suivants :  $959',42 \pm 0',01$  pour les mesures visuelles et  $959',40 \pm 0',01$  pour les mesures CCD analogiques (Laclare et al. 1996). L'expérience des mesures CCD analogiques a pris fin en 1996, quand ont commencé les séries de mesures CCD numériques.

### III.1.3 – Les images CCD numériques

Le seul moyen d'étudier *a posteriori* les images du bord solaire est de faire l'acquisition et la sauvegarde de ces images et, idéalement, sous forme numérique. L'idéal serait d'avoir un accès direct aux valeurs numériques des pixels qui forment l'image, mais, pour ces débuts, on s'est contenté d'une image numérisée en standard vidéo (pour des raisons de rapidité et... de prix). Mais, *a contrario*, la conversion du signal initial en standard vidéo provoque une perte d'information.

Lors de l'acquisition d'une image, le signal vidéo est envoyé de la matrice CCD vers une carte d'acquisition qui se trouve dans l'ordinateur de commande. Via cette carte, l'ordinateur déclenche l'acquisition d'une image, à l'instant désiré, qui est ensuite stockée dans une mémoire-tampon de la carte. Lorsque l'acquisition est terminée, l'image est transférée vers la mémoire RAM de l'ordinateur, afin de libérer la mémoire de la carte vidéo. Après ce transfert, la carte vidéo est prête pour l'acquisition de l'image suivante. En fin d'acquisition d'une série, les images sont stockées sur le disque dur de l'ordinateur. Le transfert direct carte vidéo - disque dur n'est pas possible, à cause de la lenteur des opérations d'écriture sur ce dernier.

Enregistrées sur le disque dur de l'ordinateur, ces images restent disponibles pour un traitement ultérieur ou pour archivage. Chaque image est constituée d'un tableau à deux dimensions dont chaque élément contient une valeur entière comprise entre 0 et 255 (représentant l'un des 256 niveaux d'intensité lumineuse). Dans ce tableau, chaque élément représente un pixel de l'image, et ses deux dimensions sont les axes de coordonnées horizontales et verticales de la matrice CCD. L'instant d'acquisition de chaque image, lu



sur une carte chronomètre électronique, est archivé avec celle-ci. On notera ici que l'instant réel de la mesure devrait être corrigé de l'intervalle de temps séparant l'instant du milieu de la pose de celui de la lecture de l'heure (soit 30 ms). Cet effet systématique n'a aucune influence sur les mesures du diamètre du Soleil (voir aussi le chapitre V.1).

Lors des premières expériences CCD faites à Calern, A. Irbah a effectué une étude sur le temps de pose des images solaires dans le cas de l'astrolabe. La conclusion des essais faits avec une caméra CCD rapide (temps de pose de 4, 8, 12 et 16 ms) est que le temps de pose devrait être de 16 ms pour une matrice CCD de type COHU (Bouzaria & Moussaoui 1996). Le temps de pose (figé à 20 ms) de la caméra utilisé dans le présent travail respecte donc à peu près cette condition.

Comme seule la composante en distance zénithale du déplacement des images du bord solaire sur la CCD est pertinente (colonnes, coordonnée Y), une ligne sur deux est enregistrée. Cela pour des raisons d'économie de temps et d'espace-mémoire (une seule trame du signal vidéo est numérisée), et de précision (l'acquisition d'une trame se fait en 20 ms, deux trames imposent 40 ms de traînée). On procède aussi, par ce biais, à une division par 2 de l'échelle des X, d'où un accroissement apparent de la courbure du bord solaire.

Pour les mêmes raisons, nous avons commencé par enregistrer des fenêtres à l'intérieur des images entières, en ne gardant que la partie utile contenant le bord solaire (fig. III.1). Dans cette méthode, une seule des deux images du bord solaire apparaît à un instant donné dans le champ de l'objectif, un obturateur tournant masquant l'autre (voir aussi l'annexe A.3.1). Une méthode d'acquisition des images entières, avec les deux images du bord solaire simultanées dans le champ (donc sans obturateur tournant), a aussi été testée (fig. III.2), et elle est utilisée actuellement sur l'astrolabe solaire de Rio de Janeiro. Cette deuxième méthode (annexe A.3.2), a pour avantage de supprimer l'obturateur tournant, seule pièce mécanique en mouvement pendant l'observation. Les images complètes donnent accès à plus d'information, mais posent des problèmes pour la détermination du bord solaire au voisinage de l'instant de passage : entre 2 et 5 images sont éliminées, dans le calcul du bord solaire par dérivation numérique (chapitre IV.1.3). Le modèle du bord solaire qui est à l'étude à Paris (chapitre IV.1.5), est mieux défini sur les images complètes, sans perte d'information, donc la méthode sans obturateur tournant sera retenue pour les développements futurs. Enfin, noter que la méthode avec obturateur tournant fournit environ 5 Mo d'information pour une mesure de demi-diamètre solaire, contre environ 15 Mo pour la deuxième méthode (annexe A.3).

Dans ce travail, les résultats obtenus avec les deux méthodes d'acquisition seront analysés.

### III.2 – L'ASTROLABE EQUIPE D'UNE CAMERA CCD

Deux astrolabes solaires CCD sont disponibles à Calern, équipés l'un d'un prisme d'angle variable, l'autre de 11 prismes d'angles fixes. La méthode d'acquisition a été testée et mise au point sur l'astrolabe à prisme d'angle variable, puis a été implantée



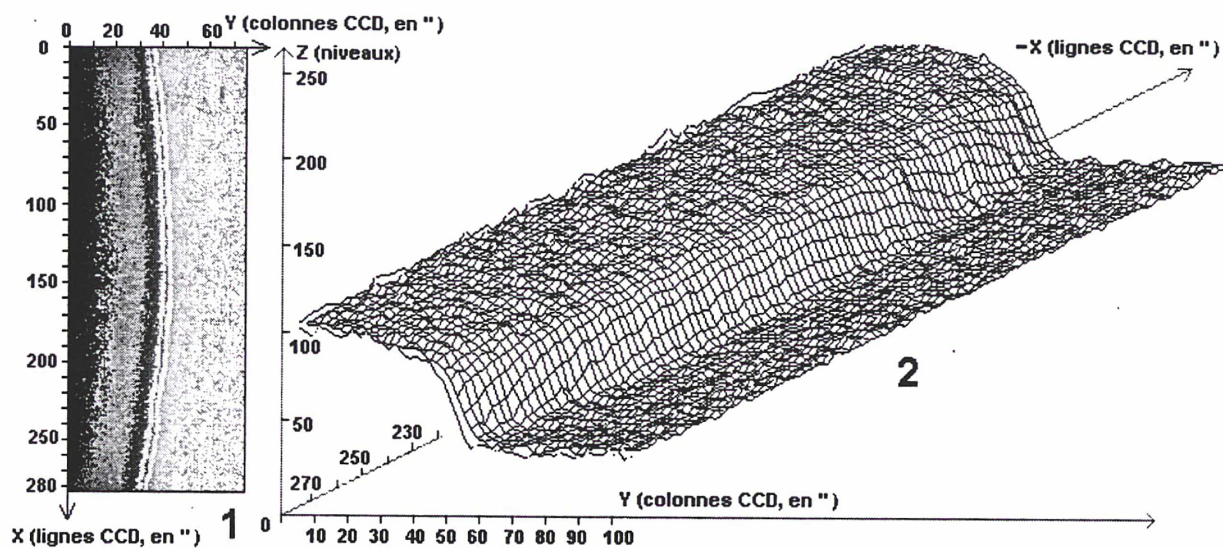


Fig. III.1. Image CCD numérique (256 lignes  $\times$  101 colonnes).

1 représentation en deux dimensions X lignes, Y colonnes 2 représentation en trois dimensions X lignes, Y colonnes, Z niveaux (le niveau maximal est 256, suite à la numérisation sur 8 bits)

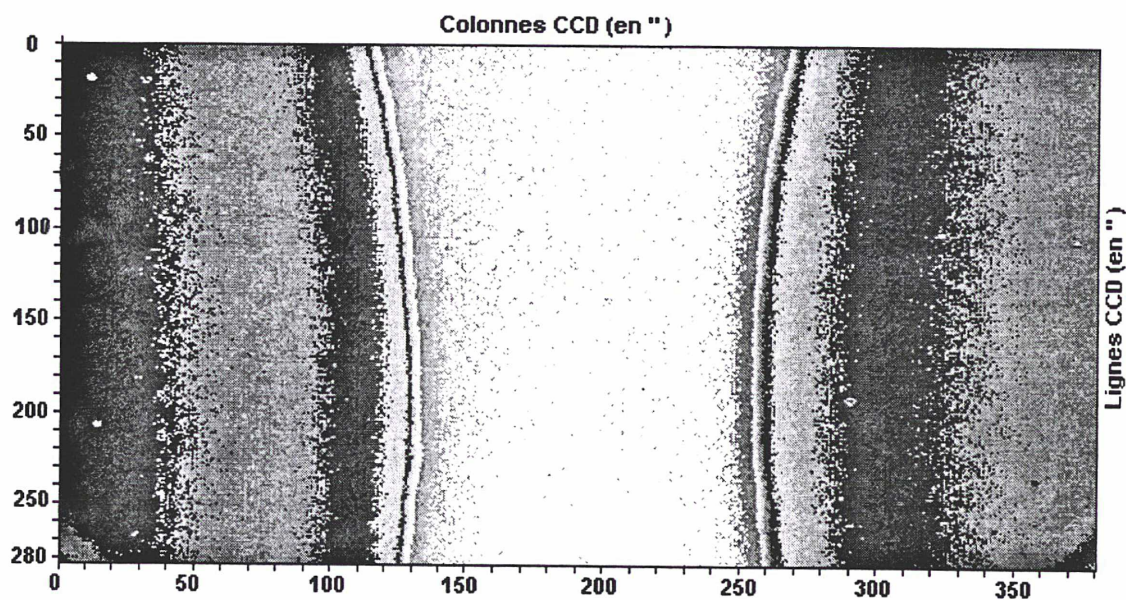


Fig. III.2. Image CCD numérique (256 lignes  $\times$  512 colonnes).



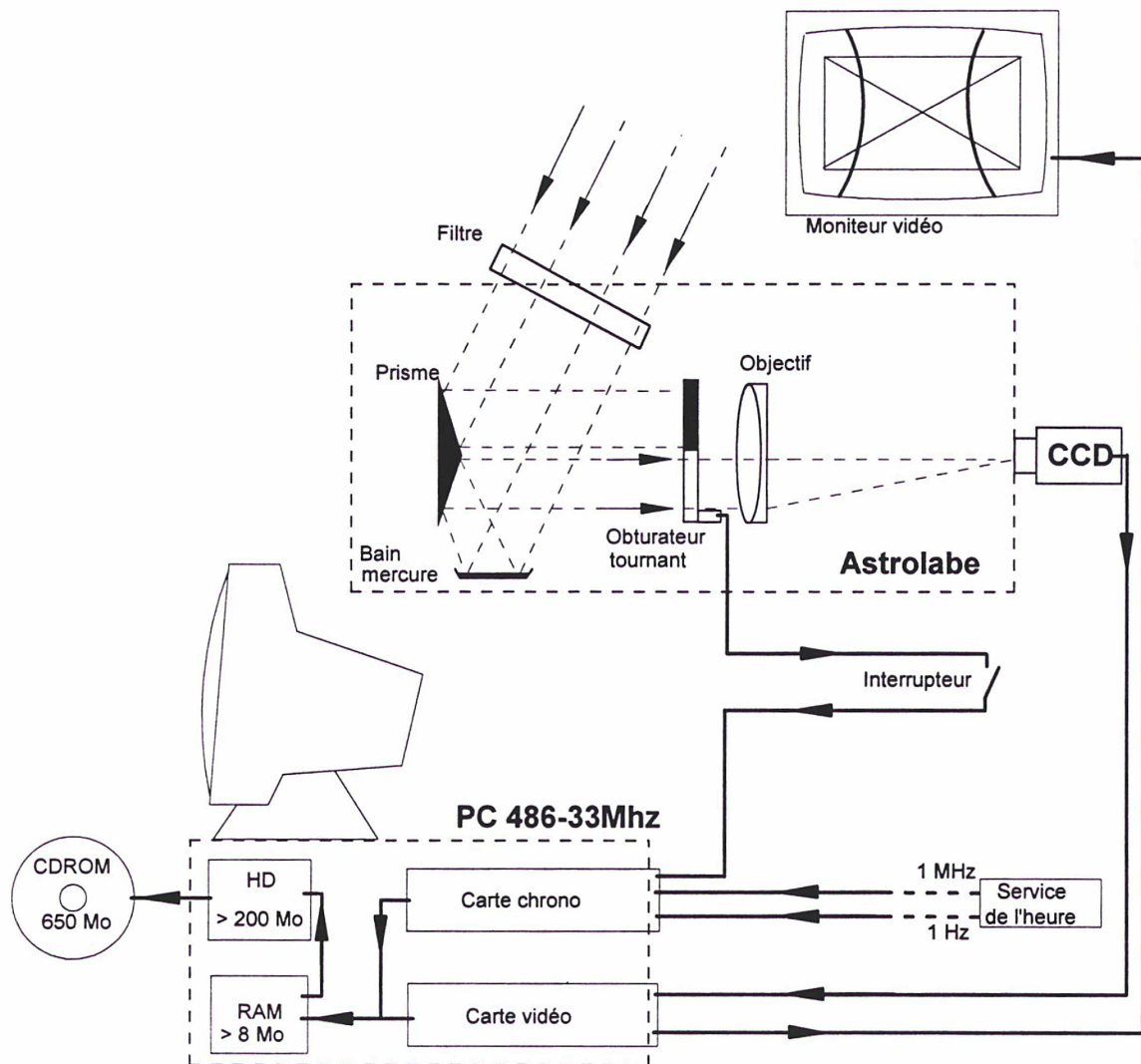


Fig. III.3. Schéma de principe des acquisitions CCD.

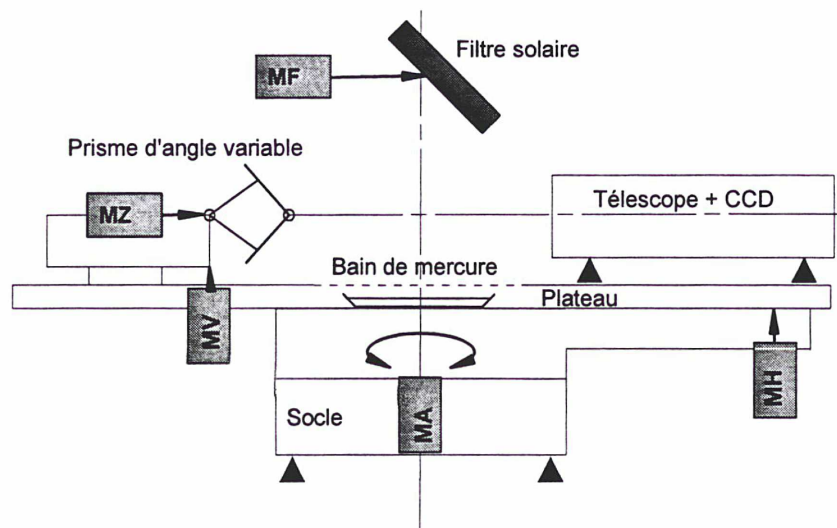


Fig. III.4. Schéma de principe de DORaySol.

MA moteur azimut MZ moteur ouverture prisme MF moteur position filtre MV moteur inclinaison arête prisme MH moteur inclinaison axe optique

sur l'astrolabe à prismes d'angles fixes. Ce dernier a été utilisé jusque-là pour des observations visuelles et CCD analogiques. Depuis juillet 1996, les acquisitions analogiques ont été remplacées par la méthode numérique, sans supprimer la possibilité d'observer en visuel. La caméra CCD est installée sur une platine coulissante qui permet alternativement des observations visuelles et CCD. Les observations visuelles restent possibles afin de préserver leur continuité et de procéder à d'utiles comparaisons visuel-CCD.

### III.2.1 – La méthode d'acquisition CCD numérique

Le principe des méthodes d'acquisition CCD, que ce soit numériques ou analogiques, est de garder la trace de la trajectoire du sommet de l'image du bord solaire dans le champ de l'objectif. Idéalement, le sommet est défini comme le point pour lequel la tangente au bord solaire est parallèle à l'horizon. Comme il y a deux images du même bord, l'une directe et l'autre réfléchie sur le bain de mercure, l'instant de l'intersection des deux trajectoires  $Y = f(t)$ , est celui où les sommets de deux images se trouvent sur la même horizontale. En fait, à quelques corrections près (calculables), les colonnes de la CCD matérialisent des parallèles à l'horizon. On obtient donc aisément l'instant de passage par le cercle de hauteur. De plus, les corrections instrumentales (inclinaison des colonnes CCD sur l'horizon, courbure des trajectoires, etc...) peuvent être effectuées à partir des mêmes images. La CCD est un repère à 2 dimensions dans le plan local.

En procédant de cette façon, le temps de passage obtenu devient objectif, car l'appréciation subjective de l'observateur (concernant la définition du bord solaire et la tangence des deux bords) n'intervient plus. L'observation de l'arc de parallèle décrit par le bord solaire ne nécessite plus la translation du micromètre qui permettait de compenser le mouvement en distance zénithale. Le moteur qui entraîne la vis micrométrique devient inutile, il suffit de maintenir le Wollaston dans le plan où le dédoublement des images est nul.

L'observation consiste à laisser défiler sur le plan de la matrice CCD les images directes et réfléchies du bord solaire, pendant qu'il traverse le cercle de hauteur. Les images se recouvrent la moitié du temps durant l'observation, et de ce fait elles ne sont bien définies que sur leur demi-trajectoires. La variation du flux lumineux éclairant le champ induit une variation du contraste, qui pourrait être préjudiciable à la qualité des images (risque de saturation de la CCD). Pour supprimer ces inconvénients, F. Laclare a choisi d'implanter un obturateur placé en avant et centré sur l'objectif (Laclore & Merlin 1991).

Cet obturateur est constitué d'un demi-disque en rotation autour de l'axe optique. Une cellule photoélectrique détecte la position de ce secteur tournant et déclenche l'acquisition des images formées successivement par la demi-pupille supérieure et inférieure de l'instrument. Fixé à la place du miroir d'autocollimation, cet ensemble comprend le moteur assurant la rotation du demi-disque et le codeur de position pilotant les acquisitions (Laclore & Merlin 1991). On remarquera que l'obturateur tournant reste la seule pièce mécanique en mouvement pendant l'observation du passage d'un bord solaire.

Pour dater ces acquisitions, une carte chronomètre a été élaborée à l'Obser-



vatoire de Paris. Pilotée par les fréquences provenant du service de l'heure, cette carte est un compteur de secondes et fractions de secondes, qu'il suffit de lire lorsque survient un contact en provenance de l'obturateur tournant de l'astrolabe (ou d'un interrupteur quelconque). La carte, insérée dans l'un des slots d'extensions de l'ordinateur (comme d'ailleurs la carte d'acquisitions vidéo), est gérée par ce dernier. L'ensemble instrumental est présenté figure **III.3**.

La mise au point de l'instrument est assez délicate, car l'astrolabe n'était pas destiné à travailler avec une caméra CCD. Les réglages nécessaires à la mise en place de la caméra CCD sont décrits dans l'annexe A.2. On notera que le système n'est que semi-automatique, la mise en position, les réglages et le déclenchement des acquisitions restent du ressort de l'observateur.

### III.3 – CONCLUSIONS

Un très lourd travail d'informatique et de programmation a été fait pour trouver une bonne méthode d'acquisition des images. Les acquisitions faites pendant la campagne de 1996 ont vite montré la nécessité de trouver un support d'archivage autre que les disques durs ou les bandes magnétiques, trop petits pour la grande quantité d'information qu'un astrolabe travaillant à plein temps est capable de produire.

Un autre problème est posé par la carte d'acquisition : la carte vidéo Cyclope qui a été utilisée jusqu'ici n'est plus en fabrication, d'où la nécessité de s'orienter vers des acquisitions numériques ou de construire une nouvelle carte. Les deux possibilités sont en étude en ce moment au sein du groupe Astrolabes à l'Observatoire de Paris.

Les expériences faites montrent que l'investissement est rentable et ouvrent la voie de l'automatisation complète de l'astrolabe solaire, telle que F. Laclare l'a prévue pour son instrument DORaySol (Définition et Observations du Rayon Solaire). Cet instrument, dont le schéma de principe est présentée figure **III.4**, est doté de 5 moteurs destinés à effectuer les réglages nécessaires (chapitre III.2.3).

Entièrement télécommandés, ces moteurs seront pilotés par un programme d'acquisition similaire à celui présenté plus haut. A partir des données des éphémérides, le programme commande les trois moteurs d'orientation en azimut, d'ouverture du prisme d'angle variable et de positionnement du filtre solaire. Juste avant l'instant calculé du début de l'acquisition, le programme analyse les images qui sont déjà dans le champ, pour déterminer les dernières corrections à faire, effectue ces corrections (en azimut, inclinaison de l'axe optique et de l'arête du prisme et en distance zénithale), et déclenche l'acquisition. Aucune de ces actions ne demandant l'intervention humaine, l'instrument devient ainsi complètement autonome.

Enfin, en Pologne et en Roumanie, deux expériences d'acquisitions de mesures de position d'étoiles sont en cours, sur des astrolabes de Danjon modifiés. L'équipe polonaise annonce déjà la possibilité d'observer à pleine pupille des étoiles de magnitudes 7.5 avec une caméra CCD refroidie. Sur l'astrolabe de Bucarest, les programmes d'acquisition des images solaires développés à Paris ont été modifiés pour observer à pleine pupille, avec

un nouveau type de prisme (Chollet 1997, Popescu 1998). Ce prisme affranchit complètement l'instrument de l'usage du prisme de Wollaston.

## REFERENCES

- BOUZARIA M., MOUSSAOUI R., 1996, "*Analyse en ondelettes des images du Soleil prises à l'astrolabe*", Mémoire présenté à l'Université des Sciences et de la Technologie d'Alger
- BUIL C., 1986, "*Astronomie CCD*", Société d'Astronomie de Toulouse
- CHOLLET C., 1997, *Communication personnelle*
- LACLARE F., MERLIN G., 1991, "*L'astrolabe solaire impersonnalisé par l'emploi d'une caméra C.C.D. Application à la mesure du diamètre solaire*", *Comptes Rendus Academie des Sciences Paris, Série II*, **313**, p. 323
- LACLARE F., DELMAS C., COIN J.P., IRBAH A., 1996, "*Measurements and variations of the solar diameter*", *Solar Physics*, **166**, p. 211
- MARTINEZ P., KLOTZ A., 1994, "*Le guide pratique de l'astronomie CCD*", Adagio – Toulouse
- POPESCU R., 1998, "*Adaptation des caméras CCD aux instruments astrométriques de l'Observatoire de Bucarest. Application à l'astrolabe de Danjon*", Thèse de Doctorat (en cours) – Observatoire de Bucarest & Observatoire de Paris





## CHAPITRE IV – SUR LE BORD DU SOLEIL

L'un des problèmes les plus difficiles à résoudre, pour toute mesure de diamètre du Soleil, est la définition de son bord. Mathématiquement, les points du bord d'une source de lumière étendue d'intensité constante, coïncident avec les points d'inflexion du bord de l'image de cette source diffractée par l'instrument d'observation. Autrement dit, le bord coïncide avec le maximum des dérivées premières calculées le long du bord de l'image (ou avec les zéros des dérivées secondes).

Si l'on considère, sur le bord d'un **disque d'éclairement uniforme**, des sections de l'image par des plans parallèles à l'axe optique, les courbes de lumière sont symétriques autour de leurs points d'inflexion, ces derniers s'en déduisant facilement. En principe, l'œil humain (qui détecte les contrastes), trouvera le même point d'inflexion, pour une courbe donnée, que la dérivation classique. Il reste quand-même des différences entre un observateur et un autre, et les observations des étoiles à l'astrolabe ont montré l'existence d'effets personnels pouvant atteindre 0',5 (Laclare 1983).

Cela n'est malheureusement plus vrai dans le cas du **disque solaire** : le Soleil est une boule de gaz et, sur sa surface apparente, l'intensité décroît du centre vers le bord (Allen 1963). En visuel, cela se traduit par un bord flou, et on ne sait pas très bien quel est le point observé sur la courbe de lumière. Dans le cas de l'astrolabe et toujours en visuel, l'œil n'observe pas un bord solaire, mais la tangence des deux images du même bord. A cela s'ajoutent les effets perturbateurs de l'atmosphère terrestre.

L'acquisition d'images numériques donne la possibilité d'étudier et, peut-être, de mieux définir le bord solaire observé. On peut espérer corriger quelques effets nuisibles comme ceux induits par l'assombrissement centre-bord et la turbulence atmosphérique. En particulier, **on cherche à déterminer d'abord les bords solaires sur les images, sans se préoccuper de leur tangence** (qui est donnée, dans une première approximation, par l'instant  $t$  où les 2 points des trajectoires  $y = at + b$  sont à la même ordonnée).

Le profil  $I$  obtenu le long d'une ligne  $l$  de la matrice CCD est la convolution du signal du bord solaire réel  $S$  par l'assombrissement centre-bord  $C$ , la réponse atmosphérique  $A$  et la diffraction optique de l'instrument  $D$  :

$$(IV.1) \quad I[l] = S[l] \cdot C[l] \cdot A[l] \cdot D[l]$$

Dans le domaine visible, le signal est fortement bruité, et sa déconvolution reste très difficile. Il faut citer ici les travaux de A. Irbah, qui avait étudié ce problème sur le signal du bord solaire obtenu sur une barrette de photodiodes, installée au foyer du télescope Coudé de l'Observatoire de Nice (Irbah 1986). Une étude de déconvolution est en cours et elle pourra être appliquée à tout moment aux images archivées, pour de nouvelles réductions (Bouzaria & Moussaoui 1996, Irbah 1997).

En ce qui concerne le présent travail, on a utilisé le signal brut, sans déconvolution.



## IV.1 – LE POINT D'INFLEXION D'UNE SECTION

La méthode **analogique** donnait la position d'un point d'inflexion, par double dérivation du signal analogique sur les lignes de la matrice CCD. Le résultat était la position de ce point sur la matrice CCD, avec une résolution d'un pixel (donnée par les limites du système électronique).

En acquisition **numérique**, le même principe a été appliqué : on cherche le point d'inflexion d'une courbe de lumière le long d'une ligne de la matrice CCD par diverses méthodes, qui seront détaillées dans ce chapitre.

### IV.1.1 – Le nettoyage des images

Les images CCD brutes du Soleil sont affectées par des taches parasites (impuretés de l'optique), et du bruit (bruit photonique, bruit thermique). Pour augmenter le rapport signal/bruit, les images sont d'abord lissées. Plusieurs méthodes susceptibles de nettoyer au mieux les images ont été essayées. Finalement nous avons opté pour la méthode la plus simple, un calcul de moyenne glissante le long des lignes : la moyenne des niveaux d'un nombre de points adjacents donne le niveau du point milieu de ce groupe. On a trouvé qu'une moyenne glissante sur 3 et 5 points donnait les meilleurs résultats, en restant suffisamment rapide. C'est surtout la très grande quantité d'information à traiter qui a influencé ce choix. En 1985, A. Irbah avait fait des essais de nettoyage du signal du bord solaire par utilisation de la transformation de Fourier, et par convolution par une fonction triangle, mais ces méthodes ont été abandonnées pour les mêmes raisons (Irbah 1986).

La figure **IV.1** montre les courbes de lumière obtenues le long d'une ligne de la matrice CCD, sur une fenêtre de 101 colonnes  $\times$  256 lignes contenant une image du disque solaire, avec et sans lissage. L'échelle des intensités (axe vertical) est donnée par la numérisation du signal sur 8 bits (niveaux entre 0 et 255). Le bruit et l'effet de l'assombrissement centre-bord du disque solaire s'observent très bien (on remarque aisément que la courbe n'est pas symétrique autour de son point d'inflexion).

D'autres filtres ont été essayés, notamment des matrices de convolution  $3 \times 3$ , par exemple celle de coefficients :

$$(IV.2) \quad \begin{bmatrix} \frac{1}{16} & \frac{1}{8} & \frac{1}{16} \\ \frac{1}{8} & \frac{1}{4} & \frac{1}{8} \\ \frac{1}{16} & \frac{1}{8} & \frac{1}{16} \end{bmatrix}$$

A cause de la spécificité du traitement des images solaires (travail sur les lignes) et de la lenteur de ces méthodes ( $\sim 20^s$  pour une image  $101 \times 256$ !), on a préféré d'appliquer une simple moyenne glissante. Pour comparaison, le filtrage des 200 images d'une mesure de diamètre solaire prend  $\sim 10^s$  pour une moyenne glissante sur 3 points, et  $\sim 1^h$  avec la matrice de convolution  $3 \times 3$  ! De plus, un filtrage plus poussé des images ne change pas de

manière significative les résultats finaux. Les éventuelles taches sur les images ne sont pas éliminées par ces filtrages, mais il est possible d'éviter ces zones lors les calculs.

Grâce à une coopération entre l'Observatoire de la Côte d'Azur et l'Observatoire de Bouzareah (Algérie), un nettoyage des images solaires par une méthode d'analyse en ondelettes a été testée, et les premiers résultats sont très encourageants (Bouzaria & Moussaoui 1996). Permettant en principe la séparation, sur les images, des fréquences propres à l'image du Soleil des autres fréquences, elle paraît très intéressante pour l'étude des effets atmosphériques. Malheureusement, cette méthode souffre elle aussi d'une certaine lenteur pour l'instant, mais il est envisageable de l'utiliser sur les images solaires dont on dispose déjà, dès qu'elle sera opérationnelle.

En ce qui concerne donc les résultats présentés dans ce travail, avant toute autre analyse, les images ont été lissées par des moyennes sur trois points le long des lignes. Il est vrai que, au moment du calcul de la position du bord solaire sur chaque ligne, l'influence des lignes adjacentes n'est pas prise en compte, mais ensuite, l'utilisation de la méthode des moindres carrés pour l'ajustement d'une parabole sur tous les points trouvés corrige cet inconvénient. La figure **IV.2** montre l'effet d'un tel lissage sur une ligne CCD (la même que sur la figure **IV.1**). Sous la ligne brute (1), il y a les résidus après lissage (5). On observe que l'opération ne modifie pas le signal de manière significative au voisinage du point d'inflexion (les résidus sont minimaux), donc l'opération n'agit pas sur la position de ce dernier.

Pour la méthode de calcul par dérivation numérique (chapitre IV.1.3), le lissage sur trois points assure une meilleure définition du sommet de la dérivée. En effet, sans ce lissage, d'une part entre 10% et 20% des lignes analysées sont rejetées par le programme de calcul, et d'une autre part la dispersion moyenne des points sur les paraboles peut passer du simple au double, ce qui influe finalement sur la dispersion des mesures. Pour les modèles du bord solaire en test à Paris (chapitre IV.1.5), le lissage n'est plus nécessaire mais, pour l'instant, il est utilisé pour simplifier les programmes de calcul.

### IV.1.2 – La méthode par dissection

Une méthode la plus expéditive pour trouver le point d'inflexion de la courbe de lumière est la dissection. On se sert du fait que la courbe a la plus grande pente au voisinage du point d'inflexion. La procédure prend une ligne de l'image et cherche simplement l'abscisse correspondant à l'intervalle de plus grande pente. Cela se fait par comparaison des différences de niveaux, sur des intervalles de plus en plus petits, et cinq à six itérations suffisent. Le résultat n'est pas exact ( $\pm 2$  pixels, soit  $\pm 1''/4$ ), et beaucoup affecté par les défauts présents sur les lignes, mais l'abscisse ainsi obtenue représente une bonne approximation et peut être employée comme point de départ pour d'autres méthodes plus précises.

En utilisant ce résultat approché, on peut restreindre l'intervalle de recherche de telle façon que les zones très bruitées et éloignées du point d'inflexion soient éliminées. La procédure plus précise de détection du point d'inflexion (qui suit la dissection dans les



programmes), se limite ainsi à un intervalle de 15 à 25 pixels centré sur le point approché, le temps de calcul s'en trouvant fortement réduit. Ceci est valable pour la dérivation numérique (chapitre IV.1.3), mais pas pour les modèles du bord solaire (chapitre IV.1.5), qui utilisent tout le signal disponible.

Le problème se complique dans le cas d'observations réalisées sans obturateur tournant. Dans ce cas, les deux images directes et réfléchies du Soleil sont présentes sur la matrice CCD. A part la recherche de deux points approximatifs d'inflexion sur chaque ligne, le programme doit déterminer à laquelle des deux images correspond chacun d'entre eux. La procédure applicable aux images complètes (256 lignes  $\times$  512 colonnes) est exposée en détail dans l'annexe A.4.

### IV.1.3 – La dérivation numérique

Tout d'abord, il s'agit d'une approximation : ce n'est pas une dérivée que l'on calcule, mais une *différence première* qui approxime la dérivée, et que l'on continuera d'appeler *dérivée* par la suite. Dans cette méthode, pour une ligne donnée, l'abscisse du point d'inflexion de la courbe de lumière est celle pour laquelle sa dérivée passe par un extremum. La valeur de la dérivée en un point d'abscisse  $c$  (colonne) sur la ligne étudiée est donnée par la relation :

$$(IV.3) \quad I'_{[c]} = \frac{I_{[c-n]} - I_{[c+n]}}{2n}$$

Comme le dénominateur reste toujours constant, en pratique il est pris égal à 1, car uniquement l'abscisse du sommet de la dérivée est importante pour la suite des calculs. Si l'image n'est pas trop bruitée et préalablement lissée, on obtient une dérivée lisse pour  $n = 1$ . Mais, suite au fait que dans la majorité des cas le bruit ne nous donne pas accès à son sommet, on calcule la dérivée pour  $n = 2$ . Les essais faits ont montré que cela ne change pas de manière significative les résultats : différences aléatoires inférieures à 0'',01 entre les positions des sommets des paraboles approximant le bord solaire, trouvées pour  $n = 1$  et pour  $n = 2$ . Pour  $n = 1$ , l'erreur moyenne obtenue sur cette position est d'environ 0'',08, et inférieure à 0'',07 pour  $n = 2$ . A remarquer que à Calern, pour la méthode CCD analogique, on a trouvé également que la meilleure définition du sommet de la dérivée première est donnée pour  $n = 2$  (Laclare 1997).

On prend le carré de la dérivée normalisée à 100 :  $I'^2_{100} = 100 \cdot I'^2 / I'^2_{max}$ , afin de toujours travailler sur des maxima et surtout d'améliorer le rapport signal/bruit. De cette manière, il est possible de sélectionner une bande assez étroite autour du point d'inflexion approché par dissection, sans lui modifier la position. Les essais faits en prenant la dérivée élevée au carré et en valeur absolue ont montré une définition meilleure de son sommet dans le premier cas. Pour la dérivée en valeur absolue, les pics parasites présents autour du sommet rendent incertaine la détermination de la position de ce dernier.

Comme on peut remarquer sur la figure IV.3, la position du maxima n'est pas toujours bien définie. La position du point d'inflexion sur la ligne est alors donnée par le

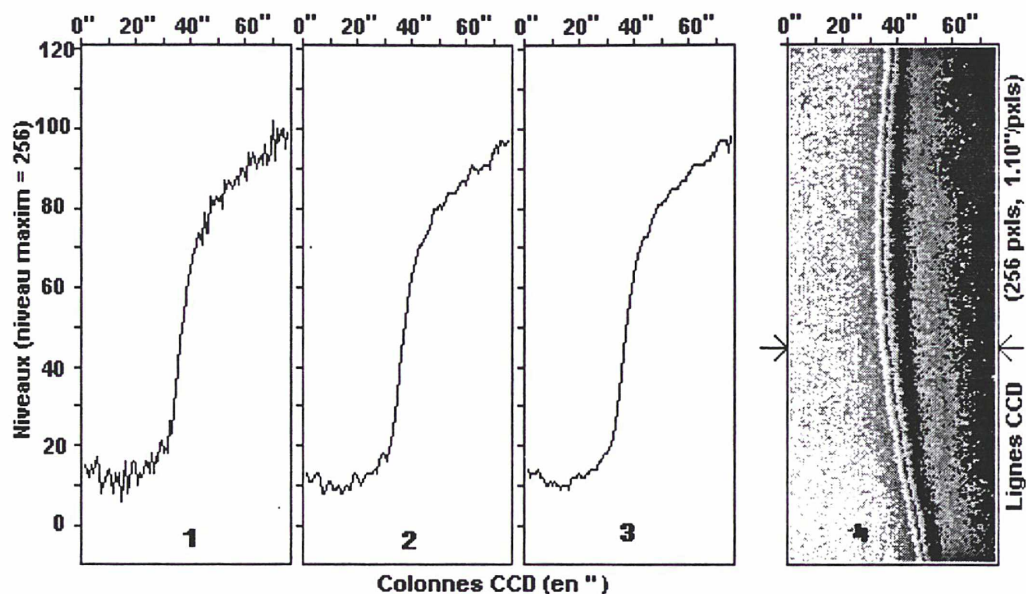


Fig. IV.1. Courbe de lumière le long d'une ligne.

1 signal brut 2 signal lissé (moyenne glissante sur 3 points) 3 signal lissé (moyenne glissante sur 5 points)  
4 image non lissée (les traits indiquent la ligne de la section)

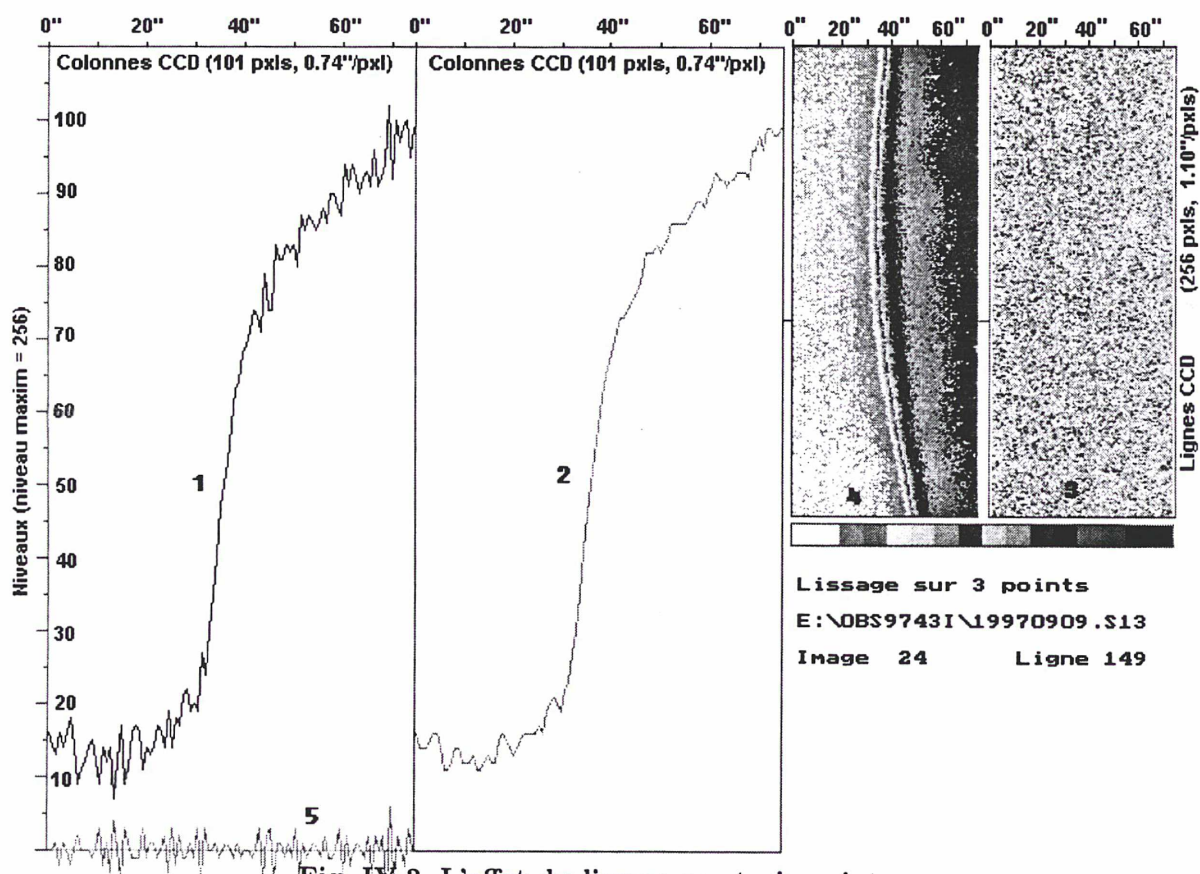


Fig. IV.2. L'effet du lissage sur trois points.

1 signal brut 2 signal lissé (moyenne glissante sur 3 points) 3 résidus sur l'image 4 image brute 5 résidus sur la ligne



barycentre des valeurs de la dérivée dépassant un certain seuil. Après de nombreux essais, un seuil de 75% a été adopté, de façon à toujours disposer d'un nombre convenable de points (trois au minimum) pour le calcul du barycentre (ce seuil correspond à un seuil de 87% sur la dérivée réelle  $I'$ ). Sur la figure **IV.10** (chapitre IV.2.2) est montré que l'erreur ainsi introduite sur la position du sommet de la dérivée est systématique, et consiste en un retrait du point d'inflexion d'environ 0,025. Avec la définition barycentrique du sommet de la dérivée, le demi-diamètre apparent calculé du Soleil sera donc plus petit (de 0,025), que si on avait accès à la position exacte du sommet.

Par la même occasion, la largeur de la dérivée à demi-hauteur est évaluée, ce qui constitue, comme on le verra plus loin, un facteur important pour apprécier la qualité des mesures : elle donne des informations sur l'étalement de l'image, donc sur l'état de l'atmosphère. Pour l'astrolabe à prismes d'angles fixes, la largeur de la dérivée à mi-hauteur prend des valeurs entre 6'' et 8,5'', avec une valeur moyenne de 7,1''. Pour le calcul du barycentre, on peut aussi travailler avec un seuil proportionnel à la largeur de la dérivée, mais les essais n'ont pas montré d'amélioration significative des résultats.

Cette méthode est simple à programmer et rapide. Sur un ordinateur moyen, le temps de calcul est inférieur à 0,5 s pour une image contenant un seul bord solaire (101 colonnes  $\times$  256 lignes). La dispersion moyenne des points obtenus sur les paraboles qui approximent le bord solaire (qui seront étudiées plus loin), pour les images prises à l'astrolabe à prismes d'angles fixes, est d'environ 0,7''.

L'aspect de quelques courbes de lumière obtenues sur des images du Soleil prises à l'astrolabe à prismes d'angles fixes ( $\lambda = 550$  nm) est illustré sur la figure **IV.3**, ainsi que de leurs dérivées élevées au carré. Chaque ligne, lissée sur trois points, contient 101 pixels de 0,74'' chacun (sur la direction des Y), soit  $\sim 75''$ .  $Y_0$  représente l'abscisse approximative du point d'inflexion trouvé par dissection,  $Y$  la valeur finale donnée par le sommet de la dérivée, et  $L$  la largeur de la dérivée à demi-hauteur, en pixels. Les deux droites horizontales représentent le seuil pris pour le calcul du barycentre (75%) et de la largeur à mi-hauteur (25% à cause du fait que la dérivée est élevée au carré).

L'équipe du Héliomètre du Pic du Midi a trouvé une autre méthode pour déterminer le sommet de la dérivée, mais elle n'est pas utilisable dans le cas de nos images, qui ont une résolution beaucoup plus faible (Deslandes 1994).

#### IV.1.4 – Approximation polynômiale

La détermination de la position du sommet de la dérivée est rendue malaisée surtout à cause du bruit qui l'affecte. Lors d'un premier essai, la possibilité d'approximer la courbe de lumière le long d'une ligne par un polynôme a été étudiée (Sinceac 1995) ; la dérivée première de ce polynôme (dont les coefficients sont obtenus par la méthode des moindres carrés), est ensuite facile à calculer. Le calcul de l'abscisse du sommet de la dérivée ne pose pas de problème, comme dans le cas de la dérivée numérique. La fonction intensité

lumineuse  $I$  est représentée par un polynôme de degré  $k$ , sous la forme :

$$(IV.4) \quad I_{[c]} = \sum_{n=0}^{n=k} a_n \cdot c^n,$$

où  $c$  représente la position du pixel sur la ligne, donc son abscisse (sa colonne), et  $a$  les coefficients du polynôme. Ces derniers sont déterminés par moindres carrés, en partant des équations de condition écrites pour chaque pixel d'abscisse  $n$  de la ligne. On a  $k + 1$  inconnues,  $k$  représentant le degré du polynôme. La méthode fournit les coefficients  $a$ , qui servent ensuite au calcul de la dérivée première. Elle s'écrit :

$$(IV.5) \quad I'_{[c]} = \sum_{n=1}^{n=k} a_n \cdot n \cdot c^{n-1},$$

et la position de son extremum sur la ligne donne l'abscisse du point d'inflexion.

Le polynôme est calculé sur un intervalle limité autour du point d'inflexion, comme pour la méthode précédente, surtout pour diminuer le temps de calcul, qui est bien plus important ici que pour les autres méthodes. La convergence des résultats entre la dérivée numérique et polynômiale montre qu'on doit calculer des polynômes de degré 7 au moins, ce qui prend beaucoup de temps pour la grande quantité d'information à traiter. Par contre, si les images sont de bonne qualité ou si leur bruit a été correctement minimisé, la méthode de la dérivation numérique, très rapide, donnera les meilleurs résultats (Bouzaria & Moussaoui 1996).

On trouvera, sur la figure IV.4, le profil d'une ligne de l'image CCD, ainsi que la courbe polynômiale qui l'approxime, pour plusieurs degrés du polynôme. Un polynôme de degré élevé s'adapte mieux à la courbe de lumière, mais il a la tendance à intégrer également le bruit de l'image. Pour des degrés moins élevés, le polynôme se comporte comme un super-lissage, et le point d'inflexion obtenu ne coïncide plus avec celui de la courbe de lumière. Sur la figure, le polynôme est calculé sur toute la longueur de la ligne, et le point d'inflexion obtenu par sa dérivation est encadré par deux traits.

Cette méthode a été abandonnée essentiellement à cause du temps de calcul qui reste prohibitif, mais elle pourra être réutilisée et améliorée dans le futur (par exemple, les formules de calcul des déterminants de type Vandermonde pourraient accélérer les programmes), et si l'on dispose d'ordinateurs plus rapides. Comme le sommet de la dérivée est bien défini par l'emploi d'une approximation polynômiale, cette méthode permet l'obtention de la position des points d'inflexion avec une précision meilleure que dans le cas de la dérivation numérique. On trouvera une étude plus approfondie de cette méthode dans (Sinceac 1995), où il est montré que, pour des images expérimentales du Soleil, le gain en précision sur la position du sommet du bord solaire est d'environ 0'',02, mais avec une augmentation considérable du temps de calcul.



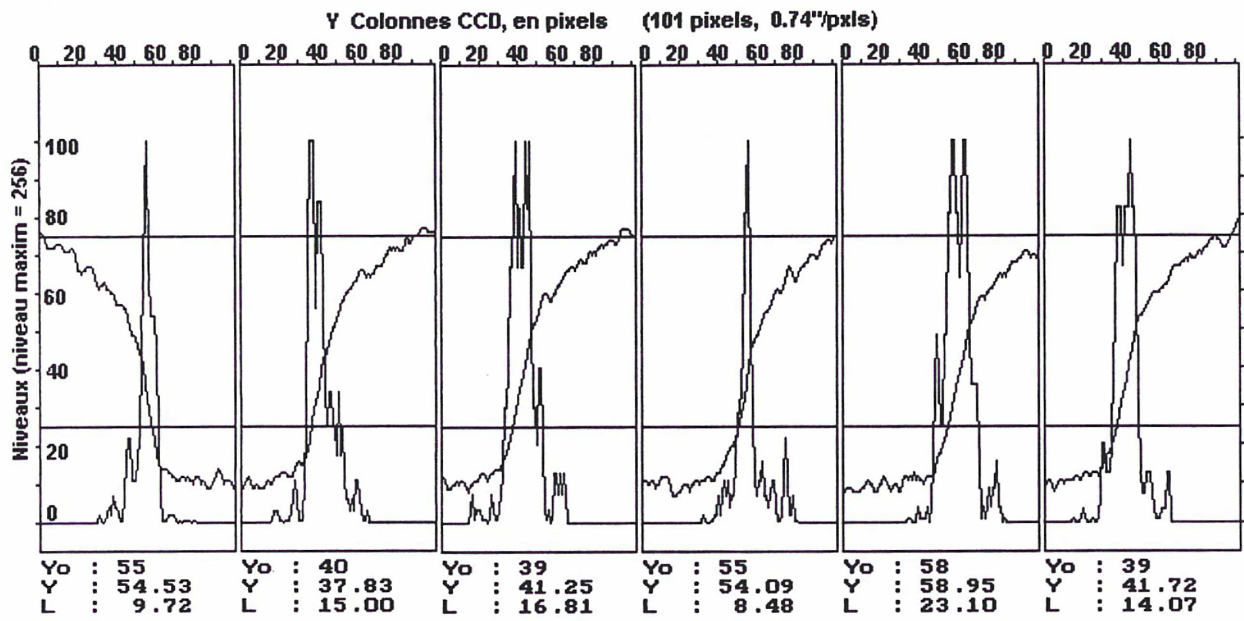


Fig. IV.3. Courbes de lumière et leurs dérivées.

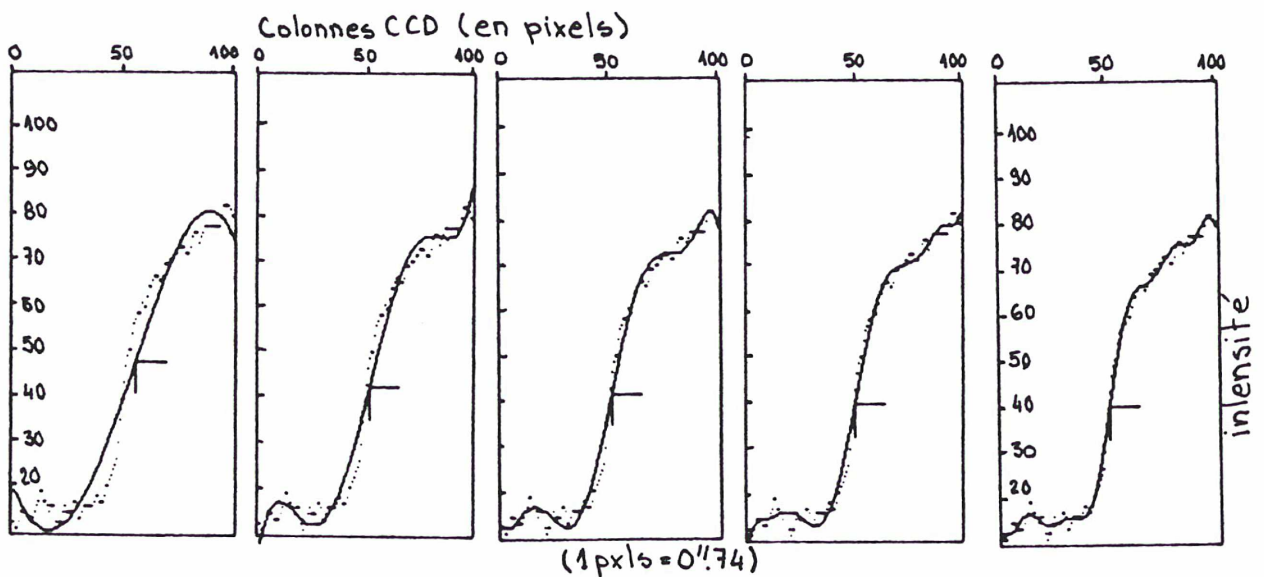


Fig. IV.4. Approximation polynômiale de divers degrés.

1 polynôme de degré 4 ; 2 degré 5 ; 3 degré 7 ; 4 degré 9 ; 5 degré 13

## IV.1.5 – Les modèles de bord solaire

La modélisation du bord solaire peut fournir des informations nécessaires à l'élimination des effets perturbateurs présents sur les images et susceptibles de modifier la position du bord solaire observé (chapitre IV.2). De nombreux modèles ont été testés, mais chacun est propre à l'instrument solaire utilisé et à la méthode d'obtention du bord solaire. L'interprétation des résultats obtenus avec ces modèles reste délicate, à cause de leur dépendance à des facteurs qui ne sont pas encore très bien connus. Par exemple, la méthode FFTD (*Finite Fourier Transform Définition*), appliquée aux mesures photoélectriques de SCLERA (USA) ainsi qu'aux mesures en ballon de S. Sofia (*Solar Disk Sextant*), reste tributaire de la fonction d'assombrissement centre-bord, mal connue (Hill & Stebbins 1975, Bourgès 1992, Sofia et al. 1994). A. Irbah a effectué des premiers essais d'approximation du bord solaire par une **combinaison linéaire d'exponentielles**, qui donnait des bons résultats, mais qui a été abandonnée pour des méthodes plus expéditives (Irbah 1986).

Pour les images solaires obtenues sur l'astrolabe de Calern, plusieurs modèles sont actuellement en test à Paris. Le dernier et le plus prometteur, encore en étude, a été imaginé par F. Chollet et est basé sur une **tangente hyperbolique modifiée** (Bidart 1997, Chollet & Sinceac 1998). Cette fonction décrit bien l'effet de la diffraction sur la courbe de lumière d'un **disque d'éclairement uniforme**, qui consiste en un étalement plus ou moins prononcé de cette courbe. Pour cela, ce modèle a besoin de quatre paramètres : l'abscisse  $x_o$  de son point d'inflexion, le niveau bas  $c$ , la demi-amplitude  $a$  (ou le niveau haut) et la pente en  $x_o$  (qui définit l'étalement de l'image). L'abscisse  $x_o$  de son point d'inflexion (la courbe étant symétrique autour de ce point en ce cas) déterminera, par définition, le bord. Dans le **cas du Soleil**, la courbe de lumière est d'abord atténuée par l'effet d'assombrissement centre-bord (qui sera décrit plus loin), avant d'être étalée par l'atmosphère terrestre, et enfin la diffraction. Il faut donc appliquer une fonction d'atténuation au modèle initial, ce qui nécessite des paramètres supplémentaires. Dans ces conditions, la courbe de lumière le long d'une ligne de l'image CCD est approchée (par moindres carrés) par une fonction de la forme suivante :

$$(IV.6) \quad I_{(x)} = c + 2 \cdot a \cdot U \cdot A, \quad \text{avec} \quad U = \frac{X^2}{1 + X^2} \quad \text{et} \quad X = e^{b(x-x_o)},$$

où  $a$  et  $c$  représentent la demi-amplitude et le niveau bas du signal,  $x$  l'abscisse du point courant sur la ligne CCD et  $A$  est une fonction d'atténuation. La pente  $P$  du modèle en  $x_o$ , abscisse du point d'inflexion du modèle initial non-affecté par l'atténuation  $A$ , est définie par le paramètre  $b$ , par la relation  $P_{x_o} = ab$ . Les premiers essais avaient été réalisés avec la fonction d'assombrissement centre-bord solaire, décrite par C.W. Allen (voir aussi le chapitre IV.2.1) :

$$(IV.7) \quad A_{(x)} = 1 - u - v + u \cdot \cos \theta + v \cdot \cos^2 \theta,$$

avec les coefficients  $u = 0.905$  et  $v = -0.205$  pour  $\lambda = 550$  nm, et  $\theta$  l'angle entre la direction centre du Soleil - observateur et le rayon vecteur du point observé (Allen 1963). L'angle  $\theta$



s'exprime en fonction de l'abscisse  $x$  (en ") du point courant de la ligne considérée :

$$(IV.8) \quad \sin \theta = 1 - \frac{x - x_o}{R},$$

avec  $R \approx 959,5$  le demi-diamètre solaire (figure **IV.5**). Malheureusement, cette fonction d'assombrissement, bien connue vers le centre du disque solaire, est très mal définie au voisinage du bord et **ne peut pas aller au-delà**. Or, pour le modèle du bord solaire choisi, l'effet de l'assombrissement centre-bord influe sur la forme de la figure de diffraction dans tous les points, inclusivement sur ceux situés à l'extérieur du Soleil. Sur les images CCD, le bord solaire se trouve étalé sur environ  $20''$  (soit  $\sim 1\%$  du diamètre solaire), et la zone la plus intéressante pour la définition du point  $x_o$  couvre un intervalle de  $40''$  centré sur ce dernier. Les essais faits ont montré que cette fonction d'assombrissement, habituellement utilisée pour modéliser l'effet centre-bord, ne peut pas être employée sur les images CCD de l'astrolabe.

Le bruit le plus important d'une image intervenant juste sur la partie située à l'intérieur du disque solaire, toute tentative d'adopter une fonction plus fine d'assombrissement centre-bord est hasardeuse, car le signal se trouve noyé dans le bruit. Nous testions et avons obtenu de premiers résultats sur un modèle d'atténuation  $A$  de la même forme que  $U$ , à la seule différence que  $b$  est remplacé par un paramètre  $p$  de l'ordre de  $b/10$  à  $b/20$ , et telle que  $A_{(x_o)} = 1$ . Ainsi, la fonction d'atténuation  $A$  de la relation IV.6 devient :

$$(IV.9) \quad A = \frac{2Y^2}{1 + Y^2}, \quad \text{avec } Y = e^{p(x-x_o)},$$

où  $x$  et  $x_o$  ont la même signification que dans la relation IV.6, et  $p$  définit la pente de la fonction  $A_{(x_o)}$  (en  $x_o$ , la pente a la valeur  $a \cdot p$ ). La pente totale en  $x_o$  de la fonction IV.6 sera donc  $a \cdot (b + p)$ , fonction de l'effet de l'assombrissement et de l'atmosphère ( $p$ ), et de la diffraction ( $b$ ) (Chollet & Sinceac 1998).

L'ajustement par moindres carrés du modèle IV.9 sur les points d'une ligne donne, au bout de 2-3 itérations, les valeurs des paramètres  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $p$  et de l'abscisse  $x_o$  du point d'inflexion cherché. Ce modèle est dynamique et, par ses quatre paramètres, il décrit bien l'aspect de chaque ligne de l'image. La figure **IV.6** montre les résultats de la modélisation du bord solaire avec la fonction IV.6 et la fonction d'atténuation IV.9. Il s'agit d'une même ligne de l'image CCD, à gauche pour une image directe, et à droite pour une image réfléchie (méthode d'acquisition avec obturateur tournant). Les valeurs représentent les abscisses (en pixels sur les colonnes CCD), du sommet de la dérivée numérique de la courbe de lumière, et du point  $x_o$  obtenu par modélisation. Le trait vertical matérialise la position du point  $x_o$  du modèle.

Il faut souligner ici que  $x_o$  **représente l'abscisse du point d'inflexion du modèle IV.6 affranchi de l'effet de l'assombrissement centre-bord et de l'atmosphère terrestre**, donc d'un signal affecté uniquement par la diffraction de l'instrument. L'abscisse du sommet de la dérivée numérique ne correspond pas au point  $x_o$ , mais au sommet de la dérivée du modèle représenté par les relations IV.6 et IV.9.

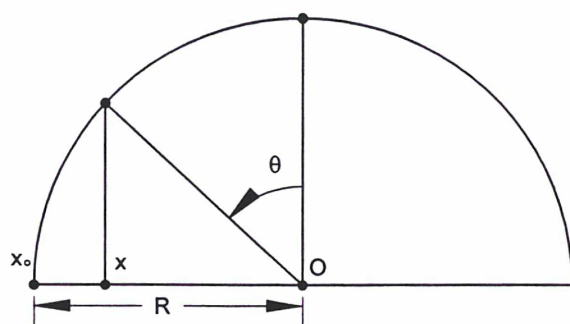


Fig. IV.5. Liaison entre l'angle  $\theta$  et l'abscisse du point observé.

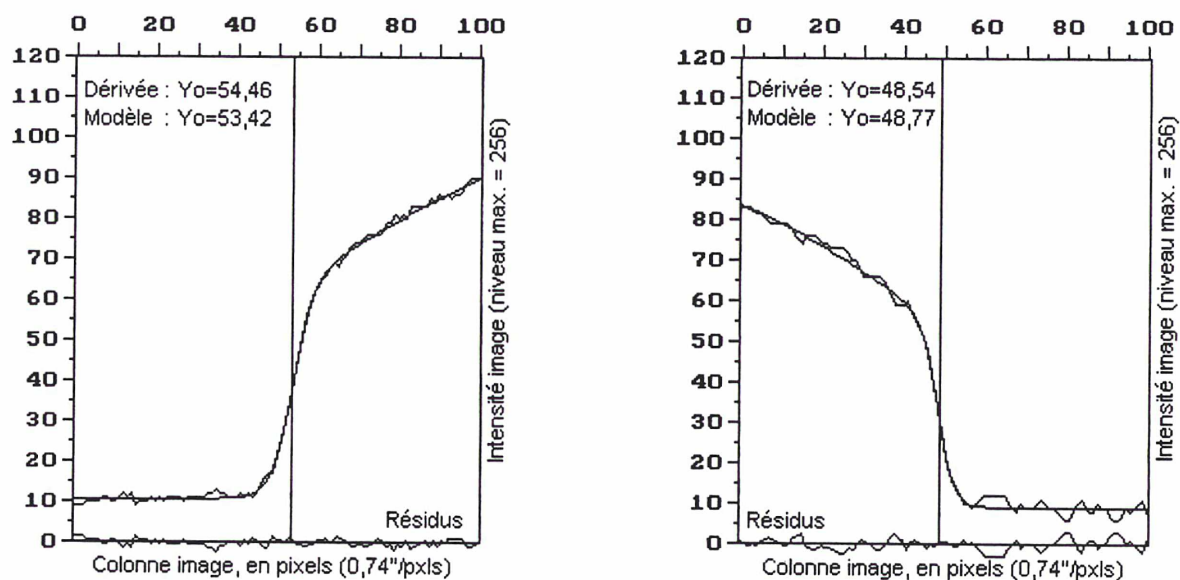


Fig. IV.6. Modélisation du bord solaire

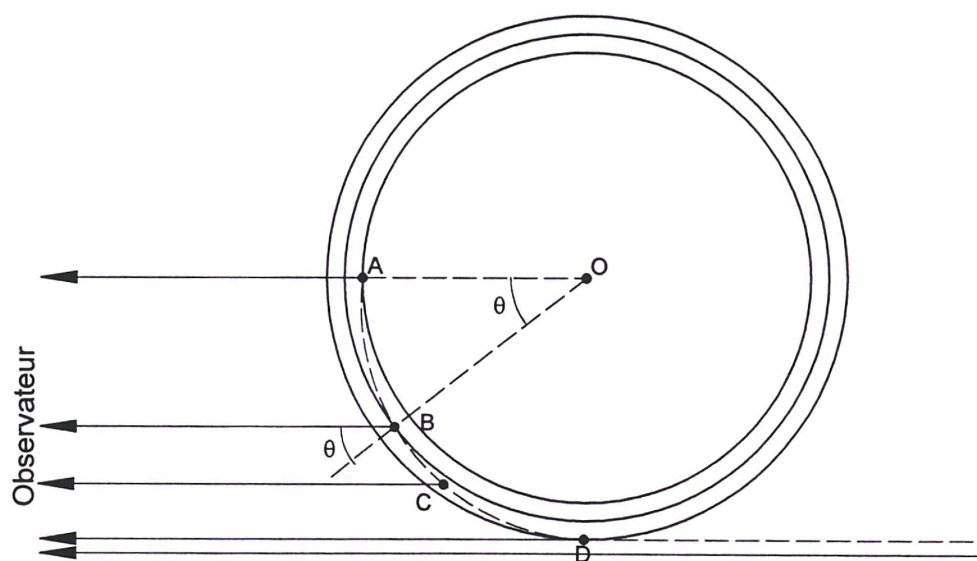


Fig. IV.7. Variation centre-bord du "niveau" observé de la photosphère.



Ce fait remarquable nous a permis d'estimer l'erreur introduite par la fonction d'assombrissement centre-bord et l'atmosphère terrestre, sur la position du point d'inflexion trouvé par la dérivation numérique. Ainsi, l'abscisse du sommet de la dérivée du modèle se trouve en léger retrait par rapport à l'abscisse du point  $x_0$ . En moyenne, ce retrait est d'environ  $0,2''$  et cet effet se traduit par un demi-diamètre solaire apparent diminué de la même quantité, pour la méthode par dérivation numérique (chap. IV.1.3). Cela est valable pour toute méthode qui définit le bord solaire comme point d'inflexion d'une fonction qui approxime sa courbe de lumière (l'approximation polynômiale par exemple, chapitre IV.1.4). La dispersion moyenne des points observés sur le modèle est inférieure à une unité d'intensité lumineuse, et descend jusqu'à 0.4 unités dans le cas des images de très bonne qualité (l'amplitude totale du signal est de 50 à 120 unités, sur 256 possibles). Les valeurs initiales des inconnues sont données par une analyse des niveaux le long de la ligne, ce qui s'avère un problème extrêmement délicat, car la méthode des moindres carrés est très sensible à ces valeurs. En effet, la convergence des résultats est assurée uniquement pour des valeurs initiales assez proches. Enfin, ce modèle devrait permettre de travailler directement sur les images brutes, car le lissage n'est plus nécessaire, comme pour les autres méthodes présentées.

## IV.2 – LES FACTEURS PERTURBATEURS

A part le bruit de l'image (bruit thermique et bruit électronique), présent sur toute image CCD, les images solaires numériques sont affectées par les mêmes effets que les observations visuelles du Soleil, c'est-à-dire **l'assombrissement centre-bord**, **l'agitation atmosphérique** et **l'étalement du bord solaire**. Le temps de pose étant très court (20 ms), les effets du bruit propre à la caméra ne sont pas de nature à changer la position du point d'inflexion de la courbe de lumière, contrairement aux trois autres effets beaucoup plus gênants. Il faut préciser que les images CCD utilisées dans ce travail sont brutes, elles ne sont pas corrigées du point de vue photométrique. L'acquisition des images CCD de "*flat-field*" (plage de lumière uniforme), est une opération très délicate en général (Newberry 1996), et encore plus difficile dans le cas de l'astrolabe solaire. En effet, pour réaliser une correction photométrique rigoureuse des images CCD, l'acquisition des images de flat-field devrait être faite séparément pour le passage de chaque bord solaire. Des études dans ce sens sont en cours à Sao Paulo (Leister 1997), et pour le futur instrument DORaySol de Calern il est prévu d'appliquer ces corrections (Laclare 1997).

Si apparemment les défauts de l'optique (taches de toute sorte sur les surfaces optiques), n'affectent pas la capacité de l'œil à intégrer le bord solaire, ils posent de gros problèmes dans le cas des images CCD. Un nettoyage des images par analyse en ondelettes, par exemple (chapitre IV.1.1), pourrait minimiser les conséquences de ces défauts.

En ce qui concerne les trois effets cités plus haut, la numérisation des observations permettra d'en déduire la grandeur et aussi de les modéliser, voire de les éliminer.



## IV.2.1 – La profondeur optique de l’atmosphère solaire

Le long d’une ligne de visée, les points lumineux de la photosphère solaire ne peuvent pas nous envoyer leur lumière, à partir d’une profondeur donnée. Cette profondeur est limitée par l’opacité de l’épaisseur d’atmosphère solaire placée entre le point émetteur considéré et l’observateur (en vertu du principe du retour inverse, l’observateur émettant la même quantité de lumière ne peut pas éclairer ce point). Suite à l’absorption de cette couche, on “voit” plus profondément vers le centre du disque solaire que vers son bord. L’angle  $\theta$  que fait la ligne de visée vers un point de la surface du Soleil avec le rayon solaire aboutissant au même point est plus grand dans ce dernier cas. L’effet de ce phénomène, connu sur le nom d’**assombrissement centre-bord**, est illustré sur la figure IV.7 (Pecker & Schatzman 1959, Allen 1963).

La modélisation théorique du phénomène, consistant à trouver une fonction  $I_{(0,\cos\theta)}/I_{(0,1)}$  qui approxime au mieux les valeurs fournies par des mesures, à fait l’objet de nombreuses études. La difficulté de l’intégration mathématique au voisinage du bord solaire, ainsi que le manque de données observationnelles pour des valeurs petites de  $\cos\theta$ , font que jusqu’ici on ne dispose pas d’un modèle satisfaisant de l’assombrissement centre-bord. A ces difficultés s’ajoute l’effet de “rugosité” de la surface solaire (fluctuations de température et/ou densité dans les couches, conséquence de la présence des taches et facules sur la zone observée), qui peut changer localement l’angle  $\theta$ , et dont les théoriciens ne peuvent pas en tenir compte (Pecker & Schatzman 1959, Allen 1963, Vigouroux 1996).

En ce qui concerne les images CCD obtenues sur l’astrolabe, l’utilisation des modèles existants est très délicate, car au voisinage du bord solaire ces fonctions deviennent incertaines (ou impossible à calculer), or c’est justement le domaine qui nous intéresse. Les paramètres de la fonction d’assombrissement de C.W. Allen, que l’on a testée à Paris (relation IV.7), varient avec la longueur d’onde d’observation  $\lambda$ , ce qui fait que le diamètre observé dépend aussi de  $\lambda$  (à  $\lambda$  plus grand correspond un diamètre observé plus grand). La figure IV.8 montre l’assombrissement centre-bord du disque solaire pour trois longueurs d’onde différentes (Pecker & Schatzman 1959)

Suite à cet effet, la dérivée de la courbe de lumière le long d’une ligne de l’image n’est plus symétrique, comme dans le cas d’un disque d’éclairement uniforme, mais plus pentue vers l’extérieur du Soleil. L’assymétrie sera présente dans tous les cas où on utilise une dérivée pour définir le bord solaire (dérivée numérique, approximation polynômiale, dérivation d’un modèle). L’abscisse du sommet de cette dérivée est, suite à l’effet d’assombrissement centre-bord, en léger retrait par rapport à la position du “vrai” bord solaire. En comparant la position du point d’inflexion obtenue par étude du modèle présenté dans le chapitre précédent avec l’abscisse du sommet de sa dérivée, on confirme les résultats des études faites par divers auteurs (Sadsaoud 1986, Rösch et al. 1996, Rozelot 1996) : **le diamètre solaire déduit de la mesure de la position des extrema de la dérivée première sera toujours plus petit que le diamètre réel**. Cet effet est d’autant plus gênant que l’atmosphère terrestre (par son agitation au voisinage du bord solaire), peut très fréquemment modifier ce phénomène.



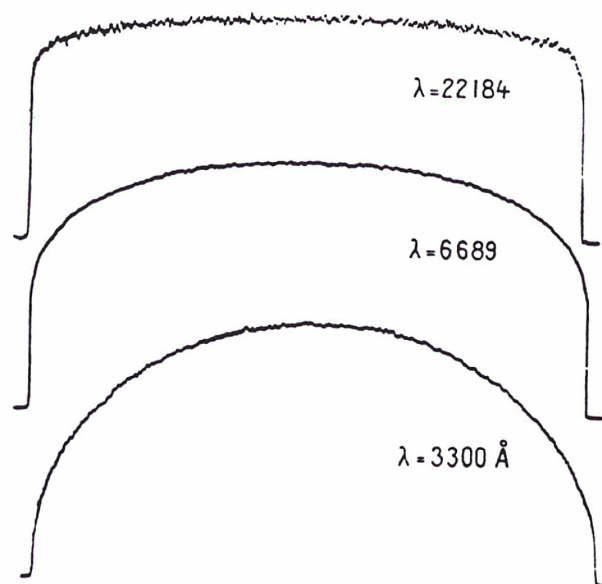


Fig. IV.8. Assombrissement du disque solaire en rayonnement monochromatique

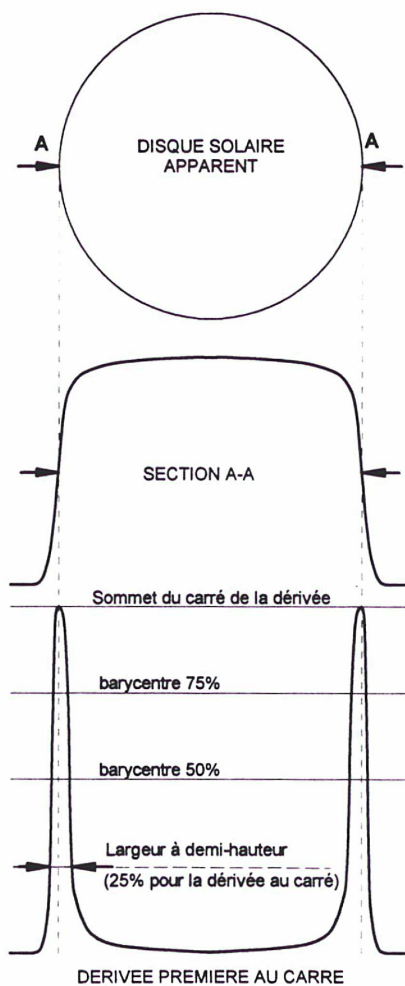


Fig. IV.9. Asymétrie de la dérivée numérique et retrait du point d'inflexion

Le seul moyen d'éliminer ces effets est de déterminer un modèle dynamique du bord solaire, qui les intègre en temps réels, contenant la position "vraie" du point d'inflexion comme l'un des paramètres à déterminer, et le travail sur ces questions est en bonne voie à l'Observatoire de Paris (Chollet & Sinceac 1998).

Dans le cas de la dérivée numérique (chapitre IV.1.3), dont la position du sommet n'est pas accessible directement (à cause du bruit de l'image), le fait de calculer le barycentre des points autour du sommet entraîne aussi un petit retrait du bord, qui s'ajoute au précédent. En effet, plus on prend des points dans le barycentre, plus on diminue le diamètre observé. Ce fait est schématiquement illustré sur la figure IV.9. On remarque que pour un seuil donné il y a, autour du sommet, plus de points de la dérivée vers l'intérieur du Soleil que vers l'extérieur, donc l'abscisse du barycentre des points au-dessus de ce seuil sera en retrait par rapport à celle du sommet, ce qui augmente l'effet de l'assombrissement centre-bord. La valeur du retrait varie également avec la largeur à mi-hauteur de la dérivée (soit avec l'étalement de l'image), pouvant atteindre 0,07 pour un barycentre pris à 50%. La variation de ce retrait avec le seuil du barycentre et la largeur de la dérivée est illustrée sur la figure IV.10, et on remarque que le seuil de 75% choisi pour les réductions analysées dans ce travail constitue un bon compromis (erreur minimale et nombre suffisant de points).

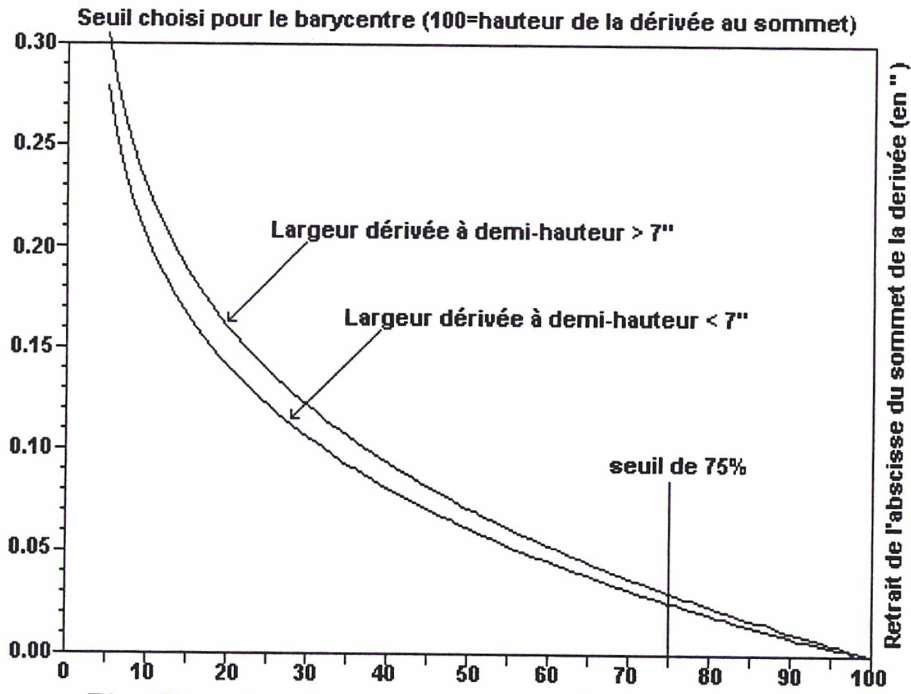


Fig. IV.10. Retrait de l'abscisse du point d'inflexion



## IV.2.2 – La turbulence atmosphérique

Fait bien connu, la turbulence atmosphérique reste le handicap majeur de toute observation astronomique depuis le sol. Dans le cas des observations du Soleil, les effets de la turbulence sont encore plus importants puisque l'on observe au voisinage de l'auteur principal de ces effets. Ce problème a donné lieu à de nombreuses études, qui ont permis de quantifier la turbulence atmosphérique (Irbah 1986, Irbah et al. 1993, 1994).

On distingue une turbulence atmosphérique à basse fréquence (**BF**), à haute fréquence (**HF**) et à très haute fréquence (**THF**). L'amplitude des déformations observées sur les images solaires varie, en fonction de la fréquence de la turbulence, de  $1''$  à  $5''$  (THF et HF, fréquences supérieures à 50 Hz) et peut dépasser  $10''$  (BF, fréquences inférieures à 30 Hz). Sur la figure IV.11 on remarque l'effet de la turbulence HF et THF sur le bord solaire. La turbulence BF donne des effets de pulsation ou même de déplacement du disque entier, qui ne peuvent pas être mis en évidence sur une image isolée et qui sont très préjudiciables aux mesures du diamètre solaire. À part la déformation du bord solaire, la turbulence atmosphérique contribue aussi à l'étalement de l'image, comme on peut remarquer sur la figure.

Les observations du Soleil ont mis en évidence un comportement différent de l'allure du bord solaire, suivant les conditions d'observations, et cet effet est attribué à l'entraînement des couches turbulentes par le vent. Ainsi, lorsque le vent est parallèle à l'image du bord, on observe souvent un déplacement d'ondes (dont l'amplitude peut dépasser  $10''$ ), se propageant dans la direction du vent. Sur l'image du bord perpendiculaire à la direction du vent, les mouvements sont chaotiques. Les couches turbulentes responsables de ces ondes seraient situées entre 1 et 7 km de hauteur (Irbah 1986).

Une série de mesures CCD expérimentales a été réalisée en 1990 avec l'astrolabe solaire de Calern, et une méthode permettant d'estimer le **domaine d'isoplanétisme des angles d'arrivée** a été mise au point (l'angle d'arrivée est celui formé par la normale à la surface d'onde et la normale à la pupille du télescope) (Irbah et al. 1993). Utiles surtout pour l'optique adaptative des instruments à grande résolution spatiale, qui doit corriger en temps réel l'effet de la turbulence atmosphérique, ces études ont permis d'apprécier l'emplacement des couches turbulentes. D'après ces résultats, l'origine de la turbulence BF se trouve dans une couche mince d'atmosphère localisée à moins de 100 m au-dessus du sol, et la turbulence HF est engendrée à plus de 1000 m de hauteur. Cela signifie que la turbulence BF, la plus nuisible aux mesures de diamètre solaire, est directement influencée par la végétation et les structures environnant l'instrument (système de convection forcée) : c'est la raison pour laquelle certains instruments solaires sont implantés au sommets de tours (Irbah 1986).

L'effet de la turbulence sur la mesure est évidemment impossible à évaluer dans le cas des observations visuelles. L'analyse des images CCD donne accès à certaines informations sur la qualité de l'atmosphère à l'instant de l'observation. Comme la trajectoire du Soleil est intégrée sur environ  $25^\circ$ , cela agit comme un lissage sur les effets de la turbulence atmosphérique. Seul l'effet sur l'étalement du bord donne une erreur systématique sur la



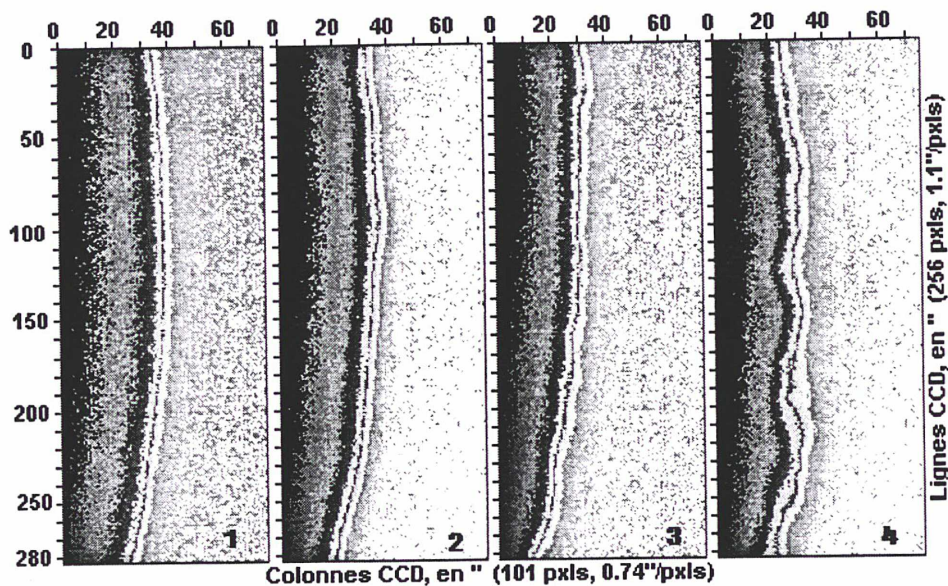


Fig. IV.11. Effet de la turbulence atmosphérique

De gauche à droite : 1 conditions quasi idéales 2 turbulence BF 3 turbulence BF et HF 4 turbulence HF et THF

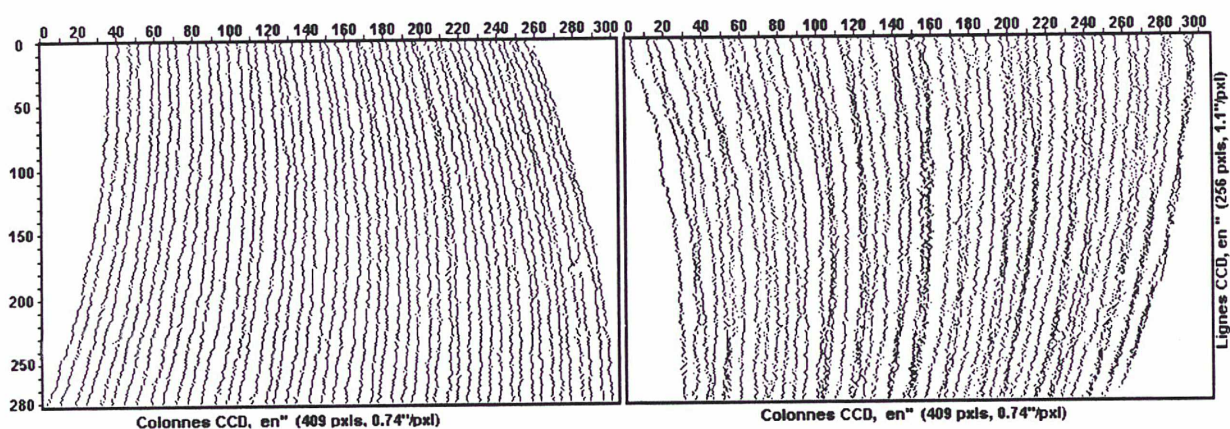


Fig. IV.12. Effet de la turbulence atmosphérique.

à gauche conditions atmosphériques très bonnes à droite conditions atmosphériques mauvaises



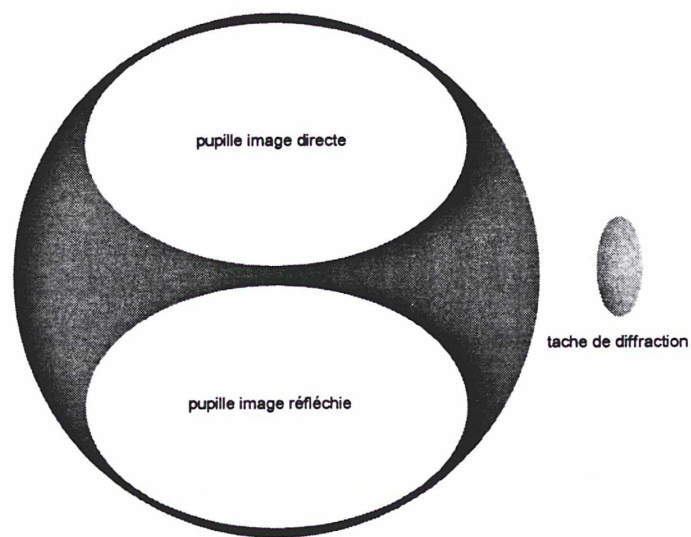


Fig. IV.13. Pupilles d'entrée et tache de diffraction.

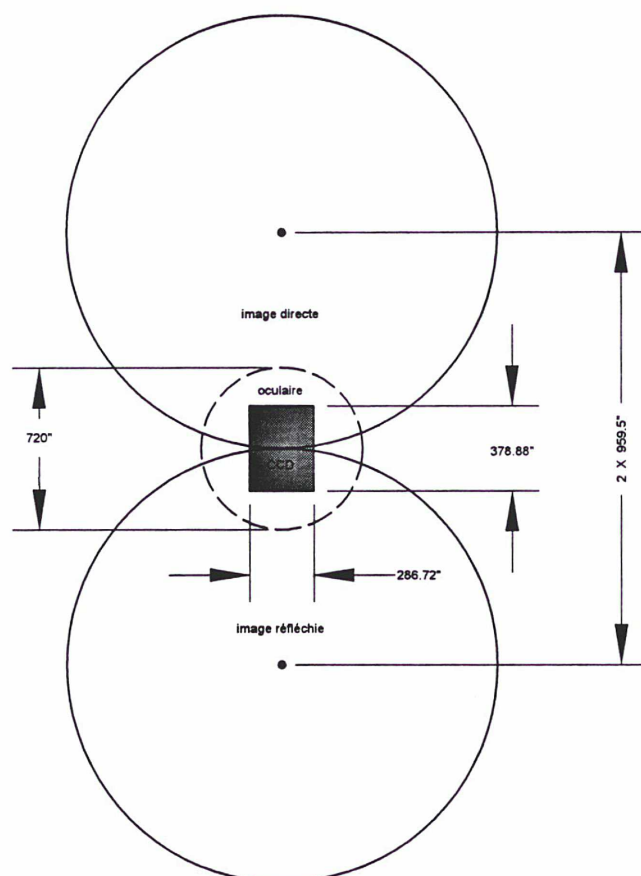


Fig. IV.14. Disque solaire et champ de la matrice CCD.

position des points d'inflexion (donc sur le diamètre), et cette composante est présente dans tous les types de turbulence atmosphérique. La turbulence HF et THF augmente la dispersion des points d'inflexion le long du bord solaire, pendant que la turbulence BF joue sur la dispersion des points sur la trajectoire du sommet du bord du Soleil. Une turbulence BF à très grande amplitude provoque des translations du disque entier et, dans ces conditions, il vaut mieux de ne pas observer. La figure **IV.12** montre les points d'inflexion des images directes pour deux passages : l'un dans des bonnes conditions atmosphériques, l'autre dans des conditions de turbulence atmosphérique. Dans le deuxième cas on remarque la dispersion plus grande de ces points, ainsi que l'effet de la turbulence BF (certaines images ont subi des translations). On imagine donc aisément qu'une analyse, tant du bord solaire que des trajectoires suivies par chaque image, puisse apporter des informations capitales sur les effets de la turbulence atmosphérique.

L'effet de la turbulence sur l'étalement du bord est mis en évidence en calculant la largeur de la dérivée première à mi-hauteur, et l'effet sur la dispersion en position des points caractéristiques du bord solaire permet l'évaluation du paramètre de Fried ( $R_0$ ). Ce dernier, qui représente le diamètre de l'aire de cohérence du front d'onde entrant dans l'objectif de l'instrument, est calculé d'après les formules proposées par A. Irbah (Irbah et al. 1994). Le détail des calculs de ces paramètres est donné dans l'annexe A.6. Enfin, l'analyse des résidus des trajectoires devrait conduire à des études sur les phénomènes de turbulence BF. Tout ceci en supposant que les phénomènes de turbulence de l'atmosphère solaire sont suffisamment lointains pour être négligeables...

### IV.2.3 – La diffraction

La diffraction est une fonction de l'instrument qui provoque un étalement de l'image du bord solaire (déjà affecté par les deux premiers effets). Dans le cas des astrolabes solaires, la caméra CCD étant munie d'un filtre, la longueur d'onde de la lumière ne varie pas et la tache de diffraction reste une constante instrumentale.

L'image d'une source ponctuelle est une série d'anneaux dont le premier a pour rayon  $1,22 \cdot \lambda/D$ , avec  $\lambda = 550$  nm la longueur d'onde et  $D$  le diamètre de la pupille d'entrée. Comme la pupille d'entrée est quasi elliptique, la tache de diffraction présente les deux demi-axes de dimensions :  $2''7$  sur une direction et  $1''4$  sur l'autre. La tache de diffraction sera donc elliptique, le grand axe étant vertical dans le plan focal. La figure **IV.13** montre la position des lunules de l'objectif de l'astrolabe, avec l'orientation relative de la tache de diffraction. En réalité, la pupille n'est pas elliptique, mais constituée de deux cercles sécants de rayon 5 cm, centrés l'un au centre de l'objectif, l'autre à l'une des extrémités d'un diamètre vertical du premier.

Si la diffraction existait seule (sans effet centre-bord du à l'atmosphère solaire au départ et sans atmosphère terrestre agitée), la dérivée première serait symétrique, quel que soit l'instrument. Le diamètre instrumental n'a pour effet que d'élargir la dérivée : plus il est grand, plus la largeur de la dérivée est petite, d'où la course aux diamètres très grands des télescopes. Mais, la diffraction n'introduit pas de dissymétrie de la dérivée.



## IV.3 – UN BORD SOLAIRE MATHEMATIQUE

Après le calcul des points d'inflexion, chaque image solaire est ainsi réduite à 256 points appartenant au bord, repérés dans le système de coordonnées attaché à la matrice CCD. La figure **IV.12** présente l'aspect des bords solaires ainsi réduits, pour les images directes d'un passage. Cette étape, décisive dans la définition du demi-diamètre solaire, est aussi la plus longue et la plus délicate.

Il faut ensuite définir un point caractéristique du bord solaire pour chaque image, l'ensemble de ces points matérialisant finalement la trajectoire des images à travers le champ de la matrice CCD.

### IV.3.1 – Approximation parabolique

Même si un aplatissement solaire existe, la portion d'image du Soleil observée n'est pas en mesure de le mettre en évidence (il s'agit de quelques millièmes de seconde d'arc). Le bord solaire peut donc *a priori* être approximé par un arc de cercle sur les images CCD, mais la figure apparente semblait être proche plutôt d'une conique, et cela pour plusieurs raisons :

- la forme de la tache de diffraction de l'astrolabe, qui, pour une source ponctuelle, est elliptique, donne une parabolisation de l'image du disque solaire (voir aussi la figure **IV.13**) ;
- les défauts optiques de l'objectif vers la périphérie du plan focal, conjugués avec la turbulence atmosphérique, donnent le même effet ;
- les sections prises pour déterminer les points d'inflexion ne sont pas radiales, mais parallèles aux lignes CCD.
- le temps de pose est de 20 ms et l'effet de traînée n'est pas nul dans la composante azimutale (environ 0'',22 au maximum).

Toutes ces raisons nous conduisent à ***approcher le bord solaire par une parabole***. La matrice CCD couvre moins de 5% de la circonférence du disque solaire, et le bord solaire présente une courbure très peu prononcée. La figure **IV.14** montre les proportions réelles qui existent entre l'image du Soleil donnée par l'optique de l'astrolabe, le champ de l'oculaire et la matrice CCD.

L'étape suivante de la réduction est donc de représenter les points d'inflexion obtenus le long du bord solaire par une parabole, afin de détecter le point à tangente parallèle aux colonnes de la CCD de ce bord. Cette détection se fait par la méthode des moindres carrés, chaque parabole étant définie par 256 points d'inflexion au plus, donc avec une bonne précision. En moyenne, la dispersion des points sur la parabole est de l'ordre de 0'',7 (la taille d'un pixel), et descend en dessous de 0'',5 dans de bonnes conditions atmosphériques (méthode par dérivation numérique). Pour le modèle présenté dans le chapitre IV.1.5, les premiers résultats montrent une dispersion moyenne des points sur les paraboles d'environ 0'',45.

### IV.3.2 – Un point par image : le "sommet"

Le bord solaire de chaque image étant modélisé par une parabole dont les paramètres sont connus, la tangente au sommet de la parabole est parallèle aux colonnes de la CCD, elles-mêmes parallèles au cercle de hauteur défini par l'ensemble prisme - bain de mercure (annexe A.6). Ce dernier parallélisme est assuré par des réglages instrumentaux, les observations permettant le calcul des écarts éventuels (détails dans l'annexe A.5).

Les points choisis pour représenter l'une des extrémités du diamètre sur le bord solaire, sont donc **les sommets des paraboles**. L'équation de la parabole donne aisément accès, avec une bonne précision, à la position de chaque sommet dans le système de coordonnées de la matrice CCD, en  $x$  (lignes), et en  $y$  (colonnes). Pour la méthode par dérivation numérique, l'erreur moyenne sur la position des sommets est d'environ 0.1 pixel en  $y$  (0'07), et de 0.4 pixel en  $x$  (0'44), et varie selon la qualité des images et de l'atmosphère. Les variations de  $y$  sont le reflet des variations de distance zénithale du Soleil, quantité mesurée, donc c'est la seule coordonnée prise en compte ensuite. La seconde (en  $x$ ), exprime les déplacements du Soleil en azimut et est employée uniquement pour le calcul des corrections dues au défaut de non-parallélisme signalé plus haut. Une troisième coordonnée, l'heure UT de l'acquisition de l'image, est associée à chaque image, donc à chaque sommet. L'ensemble des sommets, repérés en  $x, y$  et datés, plus les paramètres instrumentaux et atmosphériques de chaque observation, sont conservés et utilisés ensuite à la reconstitution des trajectoires du Soleil sur la CCD (Sinceac et al. 1998).

## IV.4 – CONCLUSIONS

L'emploi de la matrice CCD à deux dimensions (récepteur et repère spatial à la fois) sur l'astrolabe, permet observations et mesures de constantes instrumentales simultanées. Pour tirer un meilleur parti de ces avantages, il faudrait revoir, dans le futur, la dimension du pixel : la condition dite *de Shannon* impose d'avoir au moins deux éléments sensibles pour une résolution de l'instrument. Concernant la mesure du demi-diamètre du Soleil, l'astrolabe solaire fournit une résolution d'environ 0'3 or l'échantillonnage spatial du pixel actuel est de 0'7. Pour augmenter les performances des nouveaux instruments (tel DORaySol), il est donc impératif d'atteindre un échantillonnage spatial de 0'15/pixel, voire meilleur. Pour comparaison, l'échantillonnage spatial du pixel de l'héliomètre à balayage du Pic du Midi est  $\sim 0'1$  (Deslandes 1994). Il est clair toutefois qu'un compromis reste à trouver entre l'augmentation de la résolution et celle du bruit, auquel s'ajoutera la diminution du champ d'observation. Concernant le bruit, une nouvelle méthode d'analyse en ondelettes des images pourrait diminuer cet inconvénient (Bouzaria & Moussaoui 1996).

Les images CCD mettent en évidence l'effet d'assombrissement centre-bord solaire. L'étalement de l'image dû à cet effet provoque le retrait des points d'inflexion (par dissymétrie de la dérivée première), d'où un diamètre solaire apparent plus petit. Trois facteurs sont déterminants :

- l'effet centre-bord solaire (fixe, produit la dissymétrie et l'élargissement de la



dérivée première) ;

- la turbulence atmosphérique (variable, augmente l'élargissement de la dérivée première ;
- la diffraction (fixe, élargit d'avantage la dérivée première).

En conclusion, la mesure du demi-diamètre solaire obtenue sur un instrument est directement dépendante de ces phénomènes. L'élaboration du modèle dynamique du bord solaire (chapitre IV.1.5), à l'Observatoire de Paris, laisse espérer de nouvelles possibilités d'analyses plus précises.

Les divers résultats secondaires du calcul du bord solaire permettent une analyse, pour l'instant sommaire, des effets atmosphériques à toutes fréquences. Grâce à la méthode complètement numérique présentée ici, le calcul des positions du Soleil sera affranchi des effets systématiques présents pour d'autres méthodes. Enfin, un modèle satisfaisant et le choix d'une définition précise du bord du Soleil permettront d'élaborer une définition absolue du diamètre solaire (Chollet & Sinceac 1998).

Il faut remarquer que l'instrument **procède par mesure de zéro** et l'effet des constantes instrumentales est très diminué (pour ne pas dire supprimé), et en ce sens, les mesures obtenues sont elles aussi absolues.

## REFERENCES

- ALLEN C.W., 1963, "*Astrophysical quantities*", The Athlone Press – University of London
- BIDART P., 1997, "*Modèle du limbe solaire*", Rapport de stage de D.E.A. – Observatoire de Paris
- BOURGÈS L., 1992, "*Extension à des images bi-dimensionnelles des méthodes de détermination du limbe solaire*", Rapport de stage de D.E.A. – Université de Nice
- BOUZARIA M., MOUSSAOUI R., 1996, "*Analyse en ondelettes des images du Soleil prises à l'astrolabe*", Mémoire présenté à l'Université des Sciences et de la Technologie d'Alger, Algérie
- CHOLLET F., SINCEAC V., 1998, "*Emploi d'un modèle sémi-empirique des images du bord solaire pour la détermination de son diamètre*", *Astronomy and Astrophysics*, article en préparation
- DESLANDES H., 1994, "*Héliomètre à balayage*", Rapport de stage – Observatoire de la Côte-d'Azur
- HILL H.A., STEBBINS R.T., 1975, "*The intrinsic visual oblateness of the Sun*", *The Astrophysical Journal*, **200**, p. 471
- IRBAH A., 1986, "*Mesure des paramètres atmosphériques qualifiant les images en astronomie solaire*", Thèse de Doctorat – Université de Nice
- IRBAH A., BORGNINO J., LACLARE F., MERLIN G., 1993, "*Isoplanatism and high spatial resolution solar imaging*", *Astronomy and Astrophysics*, **276**, p. 663
- IRBAH A., LACLARE F., BORGNINO J., MERLIN G., 1994, "*Solar diameter measurements with Calern Observatory astrolabe and atmospheric turbulence effects*", *Solar Physics*, **149**, p. 213
- IRBAH A., 1997, *Communication personnelle*
- LACLARE F., 1983, "*Astrolabe measurements of the solar diameter*", *Astronomy and Astrophysics*, **125**, p. 200
- LACLARE F., 1997, *Communication personnelle*
- LEISTER N.V., 1997, *Communication personnelle*

- NEWBERRY M.V., 1996, "*Pursuing the ideal flat-field*", *CCD Astronomy*, **Winter**, p. 18
- PECKER J.C., SCHATZMAN E., 1959, "*Astrophysique générale*", Masson et Cie. – Paris
- RÖSCH J., ROZELOT J.P., DESLANDES H., DESNOUX V., 1996, "*A new estimate of the quadrupole moment of the Sun*", *Solar Physics*, **165**, p. 1
- ROZELOT J.P., 1996, "*Aplatissement solaire*", Séminaire – Observatoire de Calern/Grasse
- SADSAOUD H., 1986, "*Etude des variations du diamètre du Soleil observé à l'astrolabe solaire du CERGA*", Thèse de Doctorat – Université de Nice
- SINCEAC V., 1995, "*Astrométrie à l'astrolabe équipé d'une caméra CCD ; Analyse d'images en vue des déterminations des temps de passage*", Rapport de stage de D.E.A. – Observatoire de Paris
- SINCEAC V., CHOLLET F., LACLARE F., DELMAS C., 1998, "*Méthode nouvelle pour la mesure CCD du diamètre solaire avec un astrolabe*", *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, **128**, p. 605
- SOFIA S., HEAPS W., TWIGG L.W., 1994, "*The solar diameter and oblateness measured by the solar disk sextant on the 1992 september 30 balloon flight*", *The Astrophysical Journal*, **427**, p. 1048
- VIGOUROUX A., 1996, "*Etude de la variabilité solaire à long terme*", Thèse de Doctorat – Observatoire de Nice





## CHAPITRE V – LA REDUCTION DES OBSERVATIONS CCD

Suite au calcul des points du bord solaire présenté dans le chapitre précédent, les fichiers des images sont transformés en fichiers de points d’inflexion, qui seront ensuite utilisés au calcul des temps de passage de chaque bord. Enfin, un fichier spécial, contenant aussi bien les résultats principaux et secondaires des calculs que les paramètres de chaque mesure, est archivé. C’est ce fichier qui sera utilisé par le programme de calcul du demi-diamètre solaire, qui y ajoute les résultats trouvés.

Précisons que la valeur du demi-diamètre apparent observé est réduite, en fin des calculs, à la distance de 1 unité astronomique. Dans ce chapitre et les suivants, nous désignerons par *demi-diamètre solaire*, ou bien *rayon solaire* observé, la même grandeur, c’est à dire **le demi-diamètre solaire apparent réduit à 1 UA**, en fait.

### V.1 – Le calcul du demi-diamètre solaire

L’ensemble des sommets des bords des images solaires, repérés en  $x$ ,  $y$  et  $t$ , permet de calculer des trajectoires des images directes et réfléchies. Bien entendu, les résultats sont propres à la méthode employée pour obtenir les points d’inflexion, et à son paramétrage. Deux équations indépendantes  $x = x(t)$  et  $y = y(t)$  sont obtenues, ainsi évidemment que la relation  $y = y(x)$ . Par définition instrumentale, la variation de  $y$  en fonction de temps représente la variation de position du bord solaire en distance zénithale. On se préoccupera donc des trajectoires  $y(t)$  qui permettent de définir l’instant de passage. La carte chronomètre conduit à une datation des images pratiquement sans erreur (résolution de  $10\ \mu\text{s}$  pour un signal de 1 MHz et une référence de 1 Hz). Rappelons que la datation des images doit être diminué de 30 ms de manière systématique, à cause du système d’acquisition CCD en mode vidéo et de la trame choisie, car :

- le temps de pose d’une trame est de 20 ms ;
- l’acquisition de l’image par la carte vidéo s’effectue après la trame paire, la lecture de l’heure sur la carte chronographe se faisant aussitôt après ;
- c’est la trame impaire qui est conservée et datée, afin de limiter les effets de trame.

En procédant ainsi, la datation de chaque image correspond à l’instant milieu de l’intervalle de temps de pose. Cette erreur systématique n’a pas d’influence sur la détermination du demi-diamètre solaire (obtenu finalement par des différences de temps de passage), et peut être facilement corrigée *a posteriori* dans le cas des détermination des corrections à la position du Soleil.

L’équation de la trajectoire peut toujours s’écrire sous la forme d’un développement en série :

$$(V.1) \quad y = \sum_{k=0}^n a_k \cdot t^k,$$

où  $a_k$  sont les inconnues et  $n$  est choisi à l’avance. Les coefficients de l’équation sont



obtenus par la méthode des moindres carrés avec une bonne précision, car on dispose d'environ 50 points (sommets des bords) pour définir les trajectoires de chaque image, directe et réfléchi. En pratique, le calcul des effets de la courbure des trajectoires montre que les termes d'ordre 2 sont négligeables : les essais faits en modélisant les trajectoires avec des paraboles n'ont pas donné de meilleurs résultats. Le champ de la CCD étant environ deux fois plus petit que celui de l'oculaire, la courbure de la trajectoire est pratiquement indéterminable. Les trajectoires sont donc assimilées à des droites.

### V.1.1 – Le UT de passage de chaque bord par le cercle de hauteur

Les calculs se simplifient donc et, pour chaque passage, on obtient les trajectoires sous la forme de deux droites, d'indice  $d$  ou  $r$  suivant l'image :

$$(V.2) \quad \begin{cases} y = y_d + a_1 \cdot (t - t_0) \\ y = y_r - a_1 \cdot (t - t_0) \end{cases}$$

L'égalité en valeur absolue des coefficients de  $t$ , dans les équations V.2, n'est valable que dans le cas idéal, où la matrice CCD est parfaitement positionnée (colonnes parallèles à l'horizon). Avec ces prémisses, à l'instant  $t_0$ , les sommets des images directes et réfléchies se trouvent respectivement aux ordonnées  $y_d$  et  $y_r$ . L'instant  $t_m$ , où les deux sommets ont la même ordonnée, se calcule simplement :

$$(V.3) \quad t_m = t_0 + \frac{y_r - y_d}{2a_1}$$

On ne détermine pas l'instant du contact des 2 images, comme dans le cas des observations visuelles, mais celui où les sommets de chaque image sont à la même ordonnée. Comme, en pratique, les colonnes de la CCD ne sont jamais parfaitement horizontales, il faut déterminer cette inclinaison et corriger en conséquence. Pour cela, les trajectoires  $x(t)$ , représentant le déplacement en azimuth du bord solaire, sont aussi calculées. Ce calcul fournit une correction à appliquer au temps de passage  $t_m$  calculé plus haut, et en même temps corrige l'effet produit par le non-alignement vertical des images (annexe A.5). Cette correction est petite, de l'ordre de 4-5 ms, pour une inclinaison moyenne des lignes de la CCD d'environ 20' et un écartement moyen en  $x$  des images d'environ 20 pixels (22").

La figure V.1 montre les trajectoires des images, matérialisées par les sommets des bords solaires. L'échelle des  $x$  et des  $y$  est en pixels correspondants, le temps  $t$  s'exprimant en secondes. On y remarque la grande dispersion des points sur les trajectoires  $x(t)$ , due surtout à la faible précision des coordonnées  $x$  des sommets des paraboles, qui définissent les bords (chapitre IV.3.2). L'écartement des images est aussi mis en évidence (pour un écartement nul, les deux trajectoires  $x(t)$  seraient superposées). La dispersion moyenne des points sur les droites  $y(t)$  est de moins de deux pixels (1''/2) et inférieure au pixel sous de bonnes conditions d'observation. L'erreur moyenne sur le temps de passage  $t_m$  ainsi obtenu est d'environ 13 ms et peut descendre jusqu'à 5 ms pour les meilleures mesures.

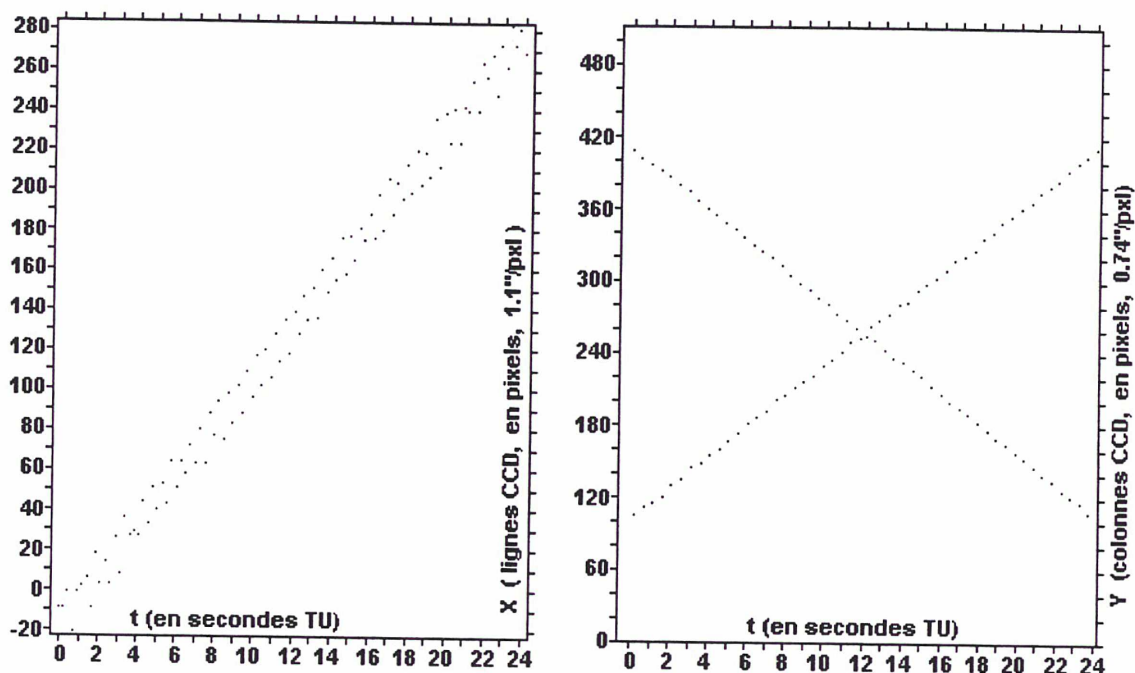


Fig. V.1. Trajectoires des images.

à gauche trajectoires des images en  $x(t)$  à droite trajectoires en  $y(t)$ ; Chaque point représente le sommet d'un bord solaire.

### V.1.2 – Le demi-diamètre et les corrections à la position du Soleil

Dans le cadre du présent travail, seul le demi-diamètre solaire a été évalué. Le calcul des corrections à la position du Soleil nécessite de plus longues campagnes, et les mesures CCD archivées seront utilisées ultérieurement dans ce but. Toutefois de premiers résultats, bruts, concernant ces paramètres seront présentés plus loin.

A ce stade, les données d'observation se trouvent réduites à un instant de passage pour chaque bord du Soleil. L'étape suivante consiste à comparer les temps de passage observés et prédits pour obtenir directement une détermination de la correction au demi-diamètre solaire apparent. La relation II.8 (chapitre II.2.3), qui représente une observation, s'écrira à présent :

$$(V.4) \quad \delta h = -p \cdot \Delta \alpha \cos \varphi | \sin a | + \Delta \delta \cos S + \delta z + p \cdot b \cdot \Delta d,$$

$p$  prends la valeur  $-1$  (Est) ou  $+1$  (Ouest) selon le passage, et  $b$  vaut  $-1$  (premier bord) ou  $+1$  (second bord) selon le bord observé.

Chaque prisme d'angle fixe fournit, pour les deux observations à l'Est et à l'Ouest, un système de quatre équations à trois inconnues, sous la forme II.11 (chapitre



II.2.3) :

$$(V.5) \quad \begin{cases} \delta h_1 = + \Delta\alpha \cos \varphi \sin a + Y + \Delta d \\ \delta h_2 = + \Delta\alpha \cos \varphi \sin a + Y - \Delta d \\ \delta h_3 = - \Delta\alpha \cos \varphi \sin a + Y - \Delta d \\ \delta h_4 = - \Delta\alpha \cos \varphi \sin a + Y + \Delta d \end{cases}$$

L'inconnue  $Y = \Delta z + \Delta\delta \cos S$  réunit les inconnues  $\Delta\delta$  et  $\Delta z$ , qui sont inséparables. La configuration de ce système, où la matrice des équations normales est diagonale, permet de trouver les solutions de manière optimale. Pour obtenir les corrections à la position du Soleil, les quatre équations (fournissant une seule mesure de demi-diamètre) sont nécessaires, mais cela n'est intéressant que si on fait de plus longues campagnes d'observations, et uniquement en utilisant un astrolabe muni de prismes d'angles fixes. Ceci a été fait en partie pour les longues séries de mesures visuelles (des durées de plusieurs années et un nombre suffisant de passages complets), et les résultats obtenus ont fait l'objet de nombreuses analyses (Leister 1989, Noël 1994, Kolesnik 1995, Penna et al. 1997, Poppe et al. 1996). Concernant les mesures CCD numériques (qui n'ont pas une bonne distribution temporelle et surtout ne couvrent pas une période assez longue), les inconnues  $Y$ ,  $\Delta\alpha$  et  $\Delta d$  ont été calculées uniquement pour évaluer la précision des mesures. A cause de mauvaises conditions météorologique et du fait que, pour une grande partie des mesures CCD, un prisme d'angle variable a été employé, uniquement 72 passages complets ont été observés.

Pour ce qui concerne la mesure du demi-diamètre, celui-ci peut être déterminé à partir de chaque paire de bords observés, que ce soit à l'Est, ou à l'Ouest (on obtient directement  $2 \cdot \Delta d$  par simple soustraction des équations (1,2) ou (3,4) du système V.5). En procédant ainsi, l'évaluation de la précision des mesures se fait uniquement par comparaison des résultats successifs, mais on dispose de deux fois plus de déterminations. Comme on le verra plus loin dans la discussion des résultats, d'éventuels écarts dus à des effets Est - Ouest peuvent être mis en évidence. Mais les conditions météorologiques du site de Calern fournissent une autre justification à ce choix : en règle générale, les observations à l'Ouest sont très difficiles ou de faible qualité.

Le calcul des corrections à la position et au demi-diamètre du Soleil a été réalisé dans le système J2000, d'après la Théorie des Planètes VSOP87 du Bureau des Longitudes (Bretagnon & Francou 1988). En ce qui concerne les coordonnées de la station, le site de Calern présentait d'excellentes conditions pour leur détermination : il y a deux astrolabes voisins (l'astrolabe photoélectrique et l'astrolabe solaire), plus les lasers Terre-Lune et Terre-Satellite. Dans le calcul du demi-diamètre solaire apparent, les coordonnées de la station sont corrigées des inégalités de la rotation de la Terre et des mouvements du Pôle (publiés par le Bureau Central de l'IERS). Cela est de peu d'importance pour le demi-diamètre, mais est crucial dans la recherche des corrections à la position du Soleil.

Enfin, il faut préciser que les calculs de demi-diamètre apparent incluent la correction de distance finie (environ 0''01 pour une distance Terre - Soleil de 1 UA), et que la correction due à la déviation gravitationnelle de la lumière a été négligée. En effet, il

a été calculé que la valeur de cette dernière correction n'est pas la moitié de la déviation Einsteinienne (qui atteint  $1''75$  dans le voisinage immédiat du Soleil), mais qu'elle est égale à  $0''004$ , quantité négligeable pour nos mesures (Wittmann 1980).

## V.2 – La campagne d'observations CCD 1996 - 1997

Entre 25 mai 1996 et 12 septembre 1997 j'ai effectuée plusieurs séries d'acquisitions de mesures CCD numériques, sur les astrolabes solaires du Plateau de Calern. Cela a été possible grâce à la collaboration de longue durée entre le groupe Astrolabes Solaires de l'Observatoire de Calern (conduit par F. Laclare) et le groupe Astrolabes et Systèmes de Référence de l'Observatoire de Paris (conduit par F. Chollet). Les programmes d'acquisitions et de réductions des mesures ont été conçus à l'Observatoire de Paris (à l'aide de quelques mesures expérimentales faites en 1995 à Calern) et mis au point à l'Observatoire de Calern, pendant les observations. Deux astrolabes solaires ont été utilisés pour des observations CCD :

- **Astrolabe V** (astrolabe solaire à prisme d'angle variable),
- **Astrolabe F** (astrolabe solaire à prismes d'angles fixes),

et les observations ont été réalisés en utilisant deux méthodes d'acquisition des images :

- **AO** (avec obturateur tournant, fenêtres CCD de  $101 \times 256$  pixels contenant l'une des deux images - programme d'acquisition décrit dans l'annexe A.3.1) ;
- **SO** (sans obturateur tournant, images complètes CCD de  $512 \times 256$  pixels contenant les deux images - programme d'acquisition décrit dans l'annexe A.3.2).

Dans ce chapitre je ferai une présentation succincte des instruments et méthodes d'acquisitions, de la réduction des mesures et des résultats obtenus. Une analyse plus détaillée des résultats sera faite dans le chapitre VI.

### V.2.1 – Instruments et méthodes d'acquisitions des images

Les besoins des premiers essais et de la mise au point de la nouvelle méthode CCD d'observation, plus la nécessité d'une période d'apprentissage pour l'observateur, ont conduit au montage de **l'astrolabe V**. C'est un astrolabe de Danjon modifié afin d'observer le Soleil, comme l'astrolabe **F**. Muni d'un prisme d'angle variable (chapitre I.2.2, figure I.10), qui facilitait considérablement l'apprentissage et les réglages instrumentaux, cet instrument a permis également de préparer la construction de l'instrument DORaySol (en projet dès 1995). Il a été installé à quelques mètres seulement de l'astrolabe **F**, dans le pavillon qui accueillera DORaySol en 1998. Cette première expérience devait en même temps tester le prisme (réalisé au Laboratoire Optique du CNRS), qui sera installé sur DORaySol, ainsi d'ailleurs que le filtre neutre. Il faut dire ici que, à la précision exigée par les observations astrométriques, la stabilité de l'angle du prisme ne peut pas être vérifiée en laboratoire (Jilinski 1997).



L'astrolabe **V** autorisait des observations pour des distances zénithales comprises entre 29° et 60°, limites imposées par la mécanique du prisme. Deux caméras CCD ont été utilisées sur cet instrument : COHU 4710 et PULNIX TM6EX (annexe A.1). Leur sensibilité différente a imposé de tester deux filtres solaires et plusieurs filtres et densités placés devant la matrice CCD. La meilleure combinaison trouvée est un filtre à 850 nm pour la COHU, auquel s'ajoute une densité dans le cas de la PULNIX. L'astrolabe **V** s'est avéré très efficace pour les réglages de la CCD (annexe A.2), mais il présente un inconvénient : l'orientation correcte de l'arête du prisme n'est pas possible pendant les observations, aucune méthode d'autocollimation n'ayant été prévue. Ceci n'est, pour encore une fois, que de peu d'importance pour les mesures du demi-diamètre solaire, seules possibles sur ce type d'instrument.

Seule la méthode **AO** d'acquisition (annexe A.3) a été utilisée sur cet astrolabe **V**. Concernant les données météorologiques, l'enregistrement des valeurs de la température, l'humidité de l'air et de la pression atmosphérique n'a pas été fait systématiquement pour chaque mesure. En effet, les particularités de l'astrolabe **V** demandent de faire un nombre de mesures le plus grand possible dans un court intervalle de temps. De même, les variations de la position  $V_0$  du Wollaston n'ont pas été mesurées, en considérant qu'elle reste stable entre les passages de deux bords successifs. Les nombreuses essais et réglages qui ont été faits pendant cette première expérience, ainsi que la multitude de configurations optiques testées font que cette série d'observations n'est pas homogène. Toutefois, comme on le verra plus loin, les objectifs fixés pour l'astrolabe **V** ont été largement atteints.

En juillet 1997, avec l'expérience acquise, une nouvelle série d'observations a été commencée, sur *l'astrolabe F* (chapitre I.2.1). Cet astrolabe, muni de dix prismes d'angles fixes, est celui sur lequel les observations visuelles du Soleil ont été réalisées depuis 1978.

Le but de cette nouvelle série de mesures était de prouver la faisabilité et les avantages de la méthode CCD et de l'acquisition numérique, en analysant les résultats obtenus sur un instrument rigoureusement vérifié (plus de vingt ans de mesures visuelles). En plus, sur ce même instrument, des mesures visuelles ont été faites alternativement avec les mesures CCD, afin de calibrer ces dernières. Seule la caméra COHU 4710 a été utilisée sur cet astrolabe, avec un filtre à 550 nm.

Les deux méthodes d'acquisition **AO** et **SO** ont été employées alternativement sur l'astrolabe **F** (annexe A.3). Contrairement à la série précédente, l'enregistrement des données météo, de la position  $V_0$  du Wollaston, ainsi que l'orientation des prismes ont été faits de manière rigoureuse, pour chaque prisme. Cette série comprend 72 mesures complètes (passages Est et Ouest pour le même prisme), permettant le calcul des corrections à la position du Soleil.

Un total de 919 mesures CCD de demi-diamètre solaire ont été faites entre 21 mai 1996 et 12 septembre 1997, en 85 jours d'observations (astrolabes **V** et **F**). Cela représente environ 160000 images fenêtrées (méthode **AO**) et 14000 images complètes (méthode **SO**), soit 5.6 Giga octets de données, qui ont été archivées sur 10 CD-ROM.



## V.2.2 – La réduction des mesures

La réduction des observations CCD a été effectuée en plusieurs étapes :

**1). Enregistrement des fichiers des images et des fichiers de données.** Les fichiers de données contiennent, à ce niveau, la date d'observation, les caractéristiques de l'instrument (nom, caméra CCD, filtre), le nom de la station de l'instrument et les mesures météo (avant, après et pendant le passage). L'enregistrement des fichiers se fait d'abord sur le disque dur de l'ordinateur d'acquisition. A la fin d'une journée, on obtient un répertoire d'images portant la date comme nom et qui contient autant de fichiers d'images que de passages de bords solaires observés, et un seul fichier de données. Ces répertoires sont ensuite archivés, au fur et à mesure, sur des CD-ROM.

**2). Calcul des points d'inflexion des bords solaires et enregistrement des fichiers contenant leur position sur la CCD.** La méthode utilisée est la dérivation numérique le long des lignes de la CCD (chapitre IV.1.3). Cette étape, la plus longue (50<sup>s</sup> à 80<sup>s</sup> pour la totalité des images du passage d'un bord), peut s'effectuer à la fin de chaque journée d'observations, ou bien *a posteriori*, à partir des fichiers archivés. Le temps total de calcul dépend également de la puissance de l'ordinateur utilisé ; comme l'ordinateur d'acquisition est de faible puissance, les calculs ont été faits après l'archivage, sur un autre ordinateur plus puissant. A titre d'exemple, sur un PC de bureau Pentium 120, le calcul des points d'inflexion pour l'ensemble de 919 mesures CCD dure environ 24<sup>h</sup>. Cette étape produit un fichier de points d'inflexion (pour chaque passage d'un bord solaire), repérés en coordonnées CCD et temps universel. En même temps, le fichier de données est complété par les résultats de ce calcul (la largeur de la dérivée, annexe A.6).

**3). Calcul des temps de passage.** Un nouveau programme utilise le répertoire contenant les fichiers obtenus précédemment (programme décrit dans le chapitre V.1.1). Le calcul est rapide, moins d'une seconde pour le passage de chaque bord observé, cette étape peut donc s'effectuer à tout moment (~25<sup>m</sup> pour l'ensemble de 919 mesures CCD). Il s'agit du calcul des sommets des paraboles du bord solaire sur chaque image, et de l'instant de l'intersection des fonctions représentant les variations de la distance zénithale de ces points, sur le repère CCD. Ces temps sont corrigés des erreurs dues au mauvais positionnement éventuel de la caméra. Le programme produit un unique fichier de données, par réunion des fichiers de données de chaque jour d'observation obtenus en 2). A ce fichier sont ajoutés les résultats de cette étape pour le passage de chaque bord observé : le temps de passage (en secondes UT) avec son erreur (chapitre V.1.1), la courbure moyenne des paraboles et la dispersion moyenne des points d'inflexion, la dispersion moyenne des sommets des paraboles sur les trajectoires, l'inclinaison moyenne des colonnes de la CCD sur l'horizon et le décalage vertical moyen des images (annexes A.5 et A.6).

**4). Calcul du demi-diamètre solaire.** Ici enfin, les résultats obtenus précédemment sont repris et le programme de calcul ajoute ses résultats au fichier de données final : la date julienne complète, le demi-diamètre solaire avec son erreur, l'angle à l'astre, l'azimut et la distance zénithale (chapitre V.1.2), la latitude héliographique, le paramètre de Fried et la valeur de la réfraction atmosphérique (annexe A.6). Ce calcul



rapide (moins de 0,5 pour chaque mesures, soit environ 7<sup>m</sup> pour les 919 mesures CCD), peut s'effectuer à tout moment, à condition que l'on dispose des données IERS concernant les inégalités de la rotation de la Terre et du mouvement du Pôle pour chaque jour d'observation.

**5). Calcul des corrections à la position du Soleil.** Le calcul des paramètres  $\Delta\alpha$ ,  $Y$  et  $\Delta d$  (chapitre V.1), est possible pour chaque passage complet (passage Est et Ouest à la même distance zénithale dans le même jour). Mais ce n'est qu'après avoir couvert plusieurs orbites de la Terre que l'analyse des  $\Delta\alpha$  et  $Y$  successifs peut donner les corrections aux éléments de l'orbite. A ce niveau, une correction de 30 ms doit être appliquée au temps de passages obtenus à l'étape 3, pour les raisons présentées dans l'introduction du chapitre V.1.

### V.2.3 – Les paramètres de réduction

Il a été tout d'abord décidé d'éliminer les observations douteuses, de préférence avant et, dans certains cas précis, après la réduction des mesures, dans les cas suivants :

- mauvais réglages instrumentaux (manque d'expérience de l'observateur),
- mauvaises conditions atmosphériques (nuages, brouillard),
- données d'observations manquantes en trop grand nombre (données météo,  $V_0$ ),
- défaillances du matériel (obturateur tournant, signaux horaires, ordinateur),
- trop peu de points pour reconstituer les trajectoires (au moins 5), après élimination par moindres carrés des points trop dispersés ( $2,57 \cdot \sigma$ ).

Toutefois les réductions conduisant à des résultats aberrants ou bien trop imprécis ont obligé à supprimer quelques observations supplémentaires. Après la période d'apprentissage, l'acquisition des images a pu être faite dans des bonnes conditions, et leur contrôle manuel n'a plus été nécessaire.

Chacune des 5 étapes de la réduction impose le choix de plusieurs paramètres décisifs. Comme cela a été vu au chapitre IV, chaque paramètre utilisé dans le calcul des points d'inflexion a des implications sur la définition du bord solaire, soit du demi-diamètre mesuré. Plusieurs combinaisons de paramètres ont été testées, et une série de résultats a été obtenue pour chacune d'elles. Les valeurs optimales de ces paramètres ont été décidées après l'analyse de tous ces séries.

Les images CCD ont d'abord été lissées sur trois points le long des lignes (chap. IV.1.1). Au niveau du calcul des points d'inflexion, l'abscisse du sommet de la première dérivée (élevée au carré), a été calculée comme barycentre des points qui ont des valeurs plus grandes que 75% de la valeur maximale (chapitre IV.1.3). La dérivation ( $n = 2$  dans la relation IV.3), a été faite sur 19 points autour du point approché par dissection (chap. IV.1.2). Les lignes pour lesquelles la procédure de dissection ne trouve pas un bon point approximatif d'inflexion, ont été éliminées. Ainsi, pour la méthode **SO**, au voisinage du point d'inflexion, la pente de la courbe de lumière doit avoir des valeurs absolues comprises entre 0,23 et 0,59.

Dans les cas ci-après, les divers filtres logiques des programmes de réduction ont éliminé (de manière automatique), à l'intérieur de chaque observation, les images défectueuses :

- Images avec une amplitude du signal ( $I_{max} - I_{min}$ ) inférieure à 30 sur 256 niveaux possibles (brouillard, passage nuageux, mauvais choix des filtres), ou bien saturées (filtrage trop faible, mauvais fonctionnement du gain de la CCD).
- Images avec trop de défauts optiques (taches ou impuretés sur les surfaces optiques, mauvais réglage du diaphragme devant la CCD).
- Images du bord solaire mal encadrées sur la matrice CCD (méthode **SO**), ou sur les fenêtres (méthode **AO**).
- Images qui donnent une mauvaise définition du bord solaire. Le calcul par moindres carrés des paraboles représentant le bord se charge d'éliminer les points aberrants ( $2,57 \cdot \sigma$ ) et vérifie que le nombre de points restants est suffisant (au moins 100).
- Images pour lesquelles le sommet du bord solaire se trouve à plus de 25 pixels à l'extérieur de la matrice CCD (position obtenue par extrapolation des points de la parabole).
- Images complètes dont la distance trouvée entre les deux sommets est inférieure à 10 pixels (méthode **SO**).
- Images prises pendant un mauvais fonctionnement de l'obturateur tournant (méthode **AO**).

## V.2.4 – Les résultats

Après élimination d'environ 1% d'observations défectueuses, les 919 observations réalisées entre 21 mai 1996 et 12 septembre 1997 ont été réduites. Nous présentons ici l'ensemble des résultats obtenus, en précisant qu'il s'agit de **résultats bruts**. L'analyse des mesures brutes permet de corriger d'autres effets, par exemple l'effet de distance zénithale. Cela sera fait dans le chapitre suivant.

Le tableau **V.1** résume le nombre de mesures effectuées durant chaque période d'observations, qui se distingue par l'instrument et la méthode utilisée. Le tableau **V.2** présente les valeurs moyennes du demi-diamètre solaire, obtenues séparément pour chaque instrument et chaque méthode d'observation.

Les valeurs individuelles du demi-diamètre solaire, obtenues pour toutes les mesures CCD, sont représentées en fonction de la date julienne sur la figure **V.2**. Les cercles blancs représentent les passages Est et les cercles noirs les passages Ouest.

La figure **V.3** est une représentation graphique des valeurs moyennes journalières du demi-diamètre solaire pour toutes les mesures CCD (avec leurs barres d'erreurs), en fonction de la date julienne. Les mêmes valeurs sont listées dans le tableau **V.3**. Dans les moyennes journalières (ou entrent des observations en passage Est et Ouest), les mesures dont la dispersion est supérieure à  $2,57 \cdot \sigma$  ont été éliminées.



**TABLEAU V.1 : PERIODES D'OBSERVATION EN 1996 ET 1997**  
**lignes 1 à 8 : mesures CCD, observateur Victor Sinceac**  
**ligne 9 : mesures visuelles, observateur Francis Laclare**

	<i>a</i> *	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>	<i>i</i>
1	21.05.1996 - 24.05.1996	2	<b>V</b>	C	850	<b>AO</b>	15	6	21
2	29.05.1996 - 10.07.1996	17	<b>V</b>	P	850	<b>AO</b>	237	130	367
3	16.07.1996 - 01.08.1996	8	<b>F</b>	C	550	<b>AO</b>	38	22	60
4	11.09.1996 - 06.10.1996	13	<b>F</b>	C	550	<b>SO</b>	53	16	69
5	22.05.1997 - 28.06.1997	16	<b>F</b>	C	550	<b>AO</b>	122	50	172
6	02.08.1997 - 12.08.1997	7	<b>F</b>	C	550	<b>SO</b>	43	9	52
7	13.08.1997 - 12.09.1997	22	<b>F</b>	C	550	<b>AO</b>	140	38	178
8	<b>TOTAL</b>	<b>CCD</b>	85	-	-	-	648	271	919
9	18.01.1996 - 09.10.1997	113	<b>F</b>	VIS	550	-	557	149	706

*a*\* : Période d'observation  
*b* : Nombre effectif de jours d'observations  
*c* : Astrolabe utilisé ; prisme d'angle variable (V) ou fixe (F)  
*d* : Caméra CCD utilisée ; COHU (C) ou PULNIX (P) ou visuel (VIS)  
*e* : Longueur d'onde d'observation  $\lambda$  (nm)  
*f* : Méthode d'observation ; avec (AO) ou sans obturateur (SO)  
*g* : Nombre d'observations en passage à l'Est  
*h* : Nombre d'observations en passage à l'Ouest  
*i* : Nombre total d'observations (passages Est et Ouest)

**TABLEAU V.2 : DIAMETRE MOYEN EN 1996 ET 1997**  
**lignes 1 à 4 : mesures CCD, observateur Victor Sinceac**  
**ligne 5 : mesures visuelles, observateur Francis Laclare**

	<i>a</i> *	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>	<i>i</i>
1	<b>CCD-V</b>	850	<b>AO</b>	19	<b>E</b>	252	0'',312	959'',382	0'',020
					<b>W</b>	136	0'',304	959'',224	0'',026
					<b>E+W</b>	388	0'',320	959'',325	0'',016
2	<b>CCD-F</b>	550	<b>AO</b>	46	<b>E</b>	300	0'',254	959'',454	0'',015
					<b>W</b>	110	0'',265	959'',470	0'',025
					<b>E+W</b>	410	0'',257	959'',458	0'',013
3	<b>CCD-F</b>	550	<b>SO</b>	20	<b>E</b>	96	0'',298	959'',428	0'',031
					<b>W</b>	25	0'',349	959'',405	0'',070
					<b>E+W</b>	121	0'',308	959'',423	0'',028
4	<b>CCD-F</b>	550	<b>AO+SO</b>	66	<b>E</b>	396	0'',262	959'',450	0'',013
					<b>W</b>	135	0'',282	959'',458	0'',024
					<b>E+W</b>	531	0'',269	959'',450	0'',012
5	<b>VIS-F</b>	550	-	113	<b>E</b>	557	0'',270	959'',496	0'',012
					<b>W</b>	149	0'',327	959'',520	0'',027
					<b>E+W</b>	706	0'',280	959'',504	0'',011

*a*\* : Observations (CCD ou VISuel) et astrolabe (F ou V)  
*b* : Longueur d'onde d'observation  $\lambda$  (m)  
*c* : Méthode d'observation ; avec (AO) ou sans obturateur (SO)  
*d* : Nombre total de jours d'observations  
*e* : Observations en passage Est (E), Ouest (W) ou toutes les passages (E+W)  
*f* : Nombre d'observations  
*g* : Dispersion par rapport à la moyenne  
*h* : Demi-diamètre moyen  
*i* : Erreur de la valeur moyenne du demi-diamètre

Figure U.2 : DEMI-DIAMETRE SOLAIRE, MESURES INDIVIDUELLES  
(astrolabes F et U, méthode A0 et S0, passages E+W)  
919 mesures CCD entre 21.05.1996 et 12.09.1997

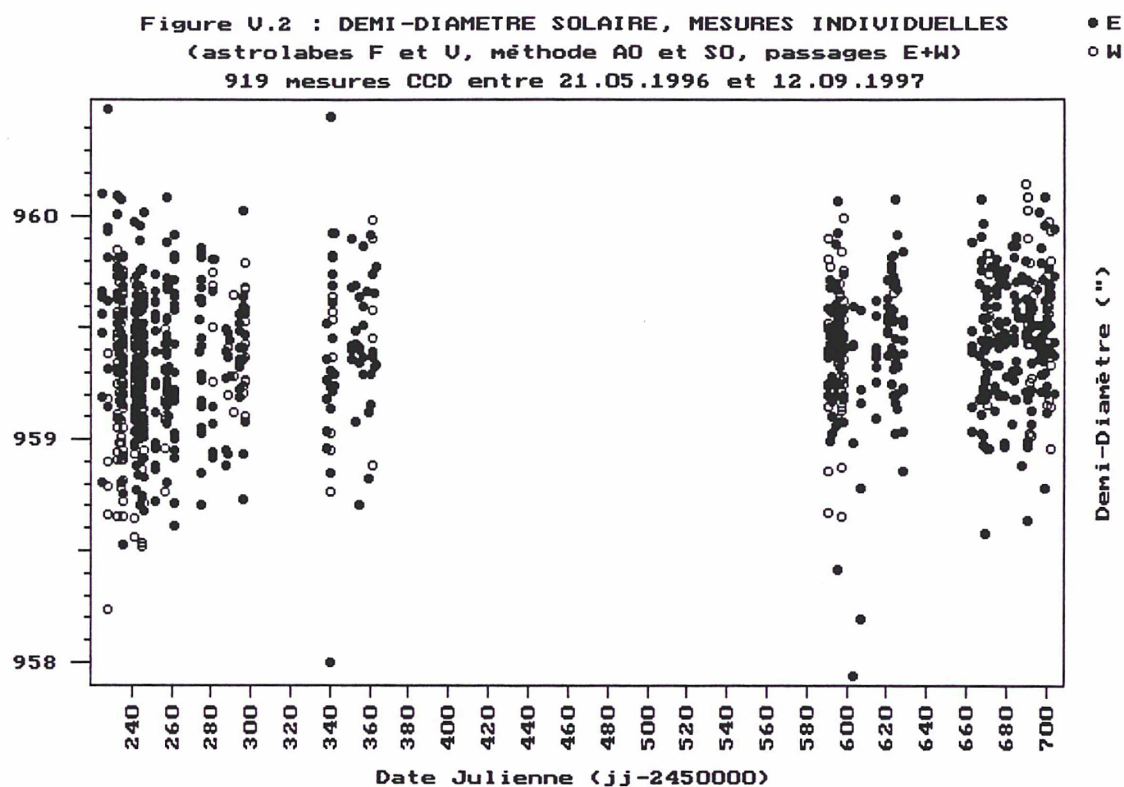
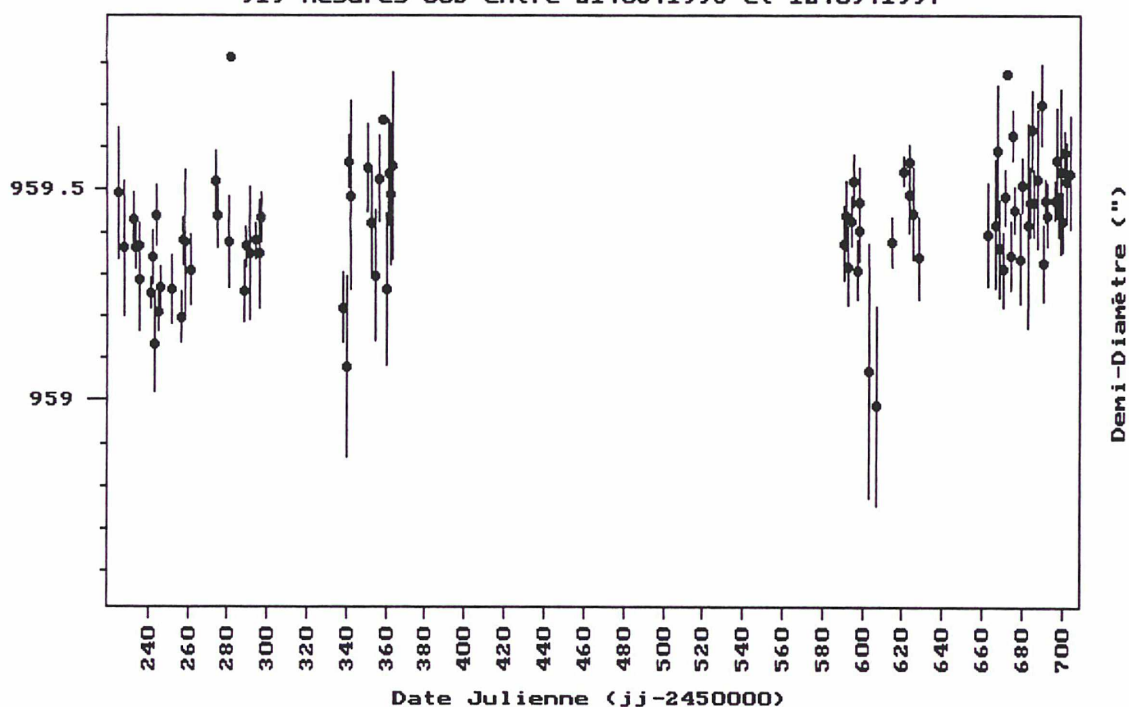


Figure U.3 : DEMI-DIAMETRE SOLAIRE, MOYENNES JOURNALIERES  
(astrolabes F et U, méthode A0 et S0, passages E+W)  
919 mesures CCD entre 21.05.1996 et 12.09.1997





**TABLEAU V.3 : RESULTATS DEMI-DIAMETRE SOLAIRE**  
**Moyennes Journalières Mesures CCD, observateur V. Sinceac**

	<i>a</i> <sup>*</sup>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>		<i>i</i>
1	21.05.1996	<b>V</b>	P	<b>AO</b>	850	7	0'',407	959'',491	±	0'',154
2	24.05.1996	<b>V</b>	P	<b>AO</b>	850	14	0'',599	959'',360	±	0'',160
3	29.05.1996	<b>V</b>	C	<b>AO</b>	850	30	0'',340	959'',430	±	0'',062
4	30.05.1996	<b>V</b>	C	<b>AO</b>	850	29	0'',275	959'',364	±	0'',051
5	31.05.1996	<b>V</b>	C	<b>AO</b>	850	36	0'',336	959'',364	±	0'',056
6	01.06.1996	<b>V</b>	C	<b>AO</b>	850	11	0'',411	959'',287	±	0'',124
7	06.06.1996	<b>V</b>	C	<b>AO</b>	850	38	0'',216	959'',253	±	0'',036
8	07.06.1996	<b>V</b>	C	<b>AO</b>	850	20	0'',287	959'',339	±	0'',064
9	08.06.1996	<b>V</b>	C	<b>AO</b>	850	5	0'',252	959'',134	±	0'',113
10	09.06.1996	<b>V</b>	C	<b>AO</b>	850	18	0'',305	959'',440	±	0'',072
11	10.06.1996	<b>V</b>	C	<b>AO</b>	850	43	0'',294	959'',209	±	0'',045
12	11.06.1996	<b>V</b>	C	<b>AO</b>	850	34	0'',292	959'',267	±	0'',050
13	17.06.1996	<b>V</b>	C	<b>AO</b>	850	17	0'',338	959'',264	±	0'',082
14	22.06.1996	<b>V</b>	C	<b>AO</b>	850	12	0'',207	959'',197	±	0'',060
15	23.06.1996	<b>V</b>	C	<b>AO</b>	850	26	0'',278	959'',378	±	0'',055
16	24.06.1996	<b>V</b>	C	<b>AO</b>	850	3	0'',298	959'',373	±	0'',172
17	27.06.1996	<b>V</b>	C	<b>AO</b>	850	21	0'',383	959'',308	±	0'',084
18	09.07.1996	<b>V</b>	C	<b>AO</b>	850	3	0'',123	959'',520	±	0'',071
19	10.07.1996	<b>V</b>	C	<b>AO</b>	850	21	0'',340	959'',437	±	0'',074
20	16.07.1996	<b>F</b>	C	<b>AO</b>	550	10	0'',345	959'',375	±	0'',109
21	17.07.1996	<b>F</b>	C	<b>AO</b>	550	1	—	959'',812	±	—
22	23.07.1996	<b>F</b>	C	<b>AO</b>	550	11	0'',233	959'',259	±	0'',070
23	24.07.1996	<b>F</b>	C	<b>AO</b>	550	3	0'',082	959'',365	±	0'',047
24	26.07.1996	<b>F</b>	C	<b>AO</b>	550	3	0'',269	959'',349	±	0'',155
25	29.07.1996	<b>F</b>	C	<b>AO</b>	550	9	0'',130	959'',379	±	0'',043
26	31.07.1996	<b>F</b>	C	<b>AO</b>	550	9	0'',388	959'',347	±	0'',129
27	01.08.1996	<b>F</b>	C	<b>AO</b>	550	14	0'',219	959'',432	±	0'',059
28	11.09.1996	<b>F</b>	C	<b>SO</b>	550	6	0'',206	959'',220	±	0'',084
29	13.09.1996	<b>F</b>	C	<b>SO</b>	550	9	0'',642	959'',080	±	0'',214
30	14.09.1996	<b>F</b>	C	<b>SO</b>	550	14	0'',228	959'',565	±	0'',061
31	15.09.1996	<b>F</b>	C	<b>SO</b>	550	3	0'',386	959'',484	±	0'',223
32	24.09.1996	<b>F</b>	C	<b>SO</b>	550	5	0'',232	959'',552	±	0'',104
33	26.09.1996	<b>F</b>	C	<b>SO</b>	550	4	0'',252	959'',420	±	0'',126
34	28.09.1996	<b>F</b>	C	<b>SO</b>	550	5	0'',351	959'',296	±	0'',157
35	30.09.1996	<b>F</b>	C	<b>SO</b>	550	5	0'',224	959'',525	±	0'',100
36	02.10.1996	<b>F</b>	C	<b>SO</b>	550	1	—	959'',662	±	—
37	03.10.1996	<b>F</b>	C	<b>SO</b>	550	5	0'',403	959'',262	±	0'',180
38	04.10.1996	<b>F</b>	C	<b>SO</b>	550	8	0'',352	959'',538	±	0'',124
39	05.10.1996	<b>F</b>	C	<b>SO</b>	550	2	0'',233	959'',488	±	0'',165
40	06.10.1996	<b>F</b>	C	<b>SO</b>	550	2	0'',313	959'',554	±	0'',221
41	22.05.1997	<b>F</b>	C	<b>AO</b>	550	15	0'',337	959'',372	±	0'',087
42	23.05.1997	<b>F</b>	C	<b>AO</b>	550	8	0'',231	959'',438	±	0'',082
43	24.05.1997	<b>F</b>	C	<b>AO</b>	550	7	0'',249	959'',319	±	0'',094
44	26.05.1997	<b>F</b>	C	<b>AO</b>	550	15	0'',233	959'',425	±	0'',060
45	27.05.1997	<b>F</b>	C	<b>AO</b>	550	19	0'',254	959'',520	±	0'',060
46	28.05.1997	<b>F</b>	C	<b>AO</b>	550	16	0'',281	959'',308	±	0'',070
47	29.05.1997	<b>F</b>	C	<b>AO</b>	550	10	0'',258	959'',470	±	0'',082

TABLEAU V.3 (suite)

	<i>a</i> <sup>*</sup>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>	<i>i</i>
48	30.05.1997	F	C	AO	550	9	0'',218	959'',404	± 0'',073
49	03.06.1997	F	C	AO	550	5	0'',673	959'',072	± 0'',301
50	07.06.1997	F	C	AO	550	5	0'',526	958'',989	± 0'',235
51	15.06.1997	F	C	AO	550	8	0'',163	959'',377	± 0'',058
52	21.06.1997	F	C	AO	550	9	0'',099	959'',543	± 0'',033
53	23.06.1997	F	C	AO	550	19	0'',168	959'',565	± 0'',038
54	24.06.1997	F	C	AO	550	8	0'',252	959'',488	± 0'',089
55	25.06.1997	F	C	AO	550	10	0'',341	959'',442	± 0'',108
56	28.06.1997	F	C	AO	550	9	0'',291	959'',339	± 0'',097
57	02.08.1997	F	C	SO	550	6	0'',296	959'',395	± 0'',121
58	06.08.1997	F	C	SO	550	3	0'',264	959'',418	± 0'',153
59	07.08.1997	F	C	SO	550	7	0'',403	959'',590	± 0'',152
60	08.08.1997	F	C	SO	550	8	0'',326	959'',361	± 0'',115
61	09.08.1997	F	C	SO	550	14	0'',323	959'',310	± 0'',086
62	10.08.1997	F	C	SO	550	13	0'',234	959'',483	± 0'',065
63	12.08.1997	F	C	SO	550	1	—	959'',771	± —
64	13.08.1997	F	C	AO	550	5	0'',181	959'',344	± 0'',081
65	14.08.1997	F	C	AO	550	9	0'',177	959'',626	± 0'',059
66	15.08.1997	F	C	AO	550	8	0'',152	959'',451	± 0'',054
67	18.08.1997	F	C	AO	550	8	0'',298	959'',336	± 0'',105
68	19.08.1997	F	C	AO	550	7	0'',166	959'',512	± 0'',063
69	22.08.1997	F	C	AO	550	3	0'',413	959'',414	± 0'',239
70	23.08.1997	F	C	AO	550	7	0'',217	959'',470	± 0'',082
71	24.08.1997	F	C	AO	550	8	0'',264	959'',639	± 0'',093
72	25.08.1997	F	C	AO	550	3	0'',137	959'',468	± 0'',079
73	27.08.1997	F	C	AO	550	5	0'',365	959'',523	± 0'',163
74	29.08.1997	F	C	AO	550	11	0'',311	959'',698	± 0'',094
75	30.08.1997	F	C	AO	550	14	0'',342	959'',326	± 0'',091
76	31.08.1997	F	C	AO	550	14	0'',184	959'',474	± 0'',049
77	01.09.1997	F	C	AO	550	10	0'',230	959'',440	± 0'',073
78	04.09.1997	F	C	AO	550	6	0'',109	959'',473	± 0'',045
79	05.09.1997	F	C	AO	550	7	0'',317	959'',569	± 0'',120
80	06.09.1997	F	C	AO	550	7	0'',141	959'',441	± 0'',053
81	07.09.1997	F	C	AO	550	6	0'',474	959'',540	± 0'',194
82	08.09.1997	F	C	AO	550	10	0'',219	959'',423	± 0'',069
83	09.09.1997	F	C	AO	550	14	0'',195	959'',585	± 0'',052
84	10.09.1997	F	C	AO	550	11	0'',291	959'',520	± 0'',088
85	12.09.1997	F	C	AO	550	5	0'',297	959'',538	± 0'',133

- a*<sup>\*</sup> : Date  
*b* : Astrolabe utilisé ; prisme d'angle variable (V) ou fixe (F)  
*c* : Caméra CCD utilisée ; COHU (C) ou PULNIX (P)  
*d* : Méthode d'observation ; avec (AO) ou sans obturateur (SO)  
*e* : Longueur d'onde d'observation  $\lambda$  (nm)  
*f* : Nombre total d'observations dans la journée  
*g* : Dispersion par rapport à la moyenne  
*h* : Demi-diamètre journalier moyen  
*i* : Erreur de la valeur moyenne du demi-diamètre



On notera que tous ces résultats bruts restent compris entre 959',08 et 959',77. La dispersion de ces valeurs est donc de l'ordre de 0',27, en bon accord avec celles figurant en colonne *g*.

Concernant l'astrolabe **V**, un effet Est - Ouest a été remarqué (voir le tableau **V.2**), et il sera analysé dans le chapitre suivant.

Les histogrammes de toutes les séries de mesures (CCD et visuelles) effectuées à Calern entre 1996 et 1997 sont présentés sur les figures de **V.4** à **V.11**. Pour l'astrolabe **V**, les mesures ont été analysées séparément en passages Est et Ouest. L'interprétation des histogrammes sera faite dans le chapitre suivant, où d'autres facteurs seront pris en compte.

Enfin, le tableau **V.4** montre les résultats obtenus pour le calcul des corrections à la position du Soleil (chapitre V.1.2), fait à partir des 72 passages complets disponibles dans la série des mesures CCD (astrolabe **F**).

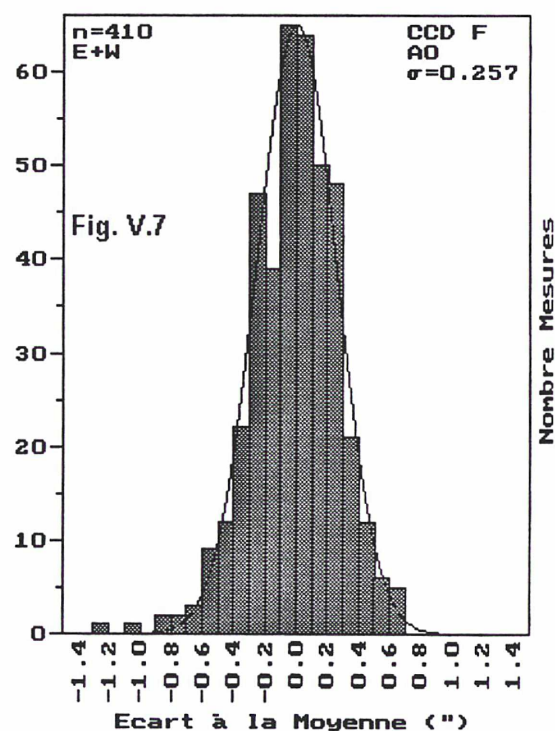
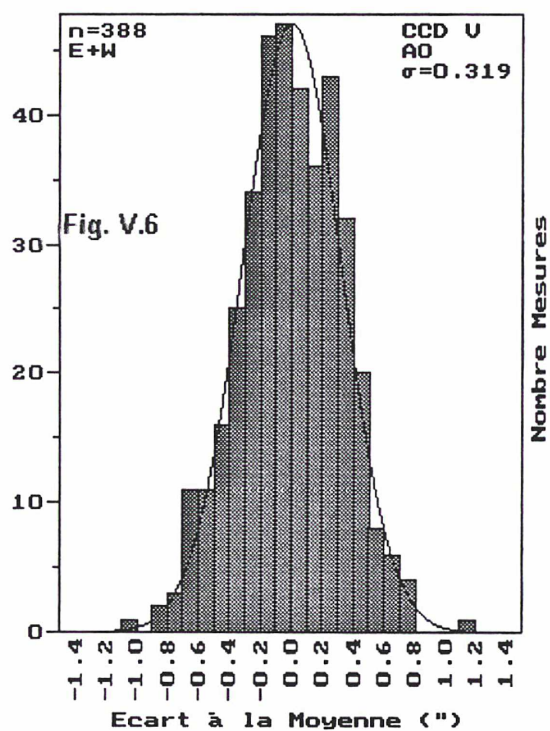
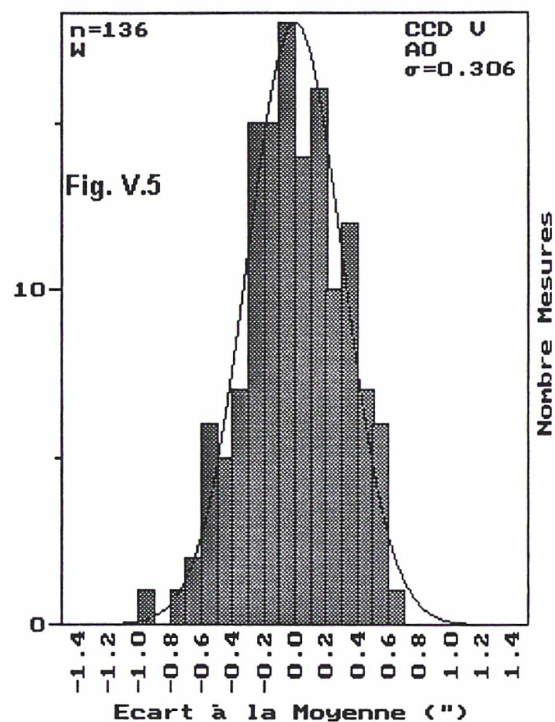
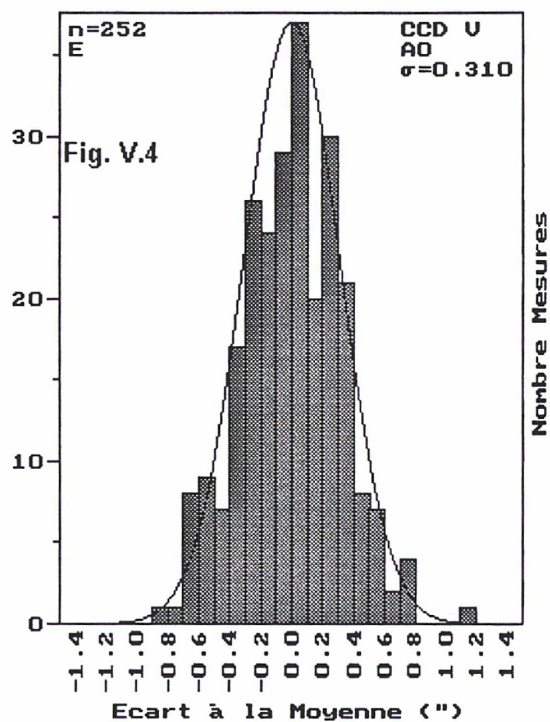
Pour les personnes intéressées par les mesures individuelles, notons que les résultats des toutes les mesures CCD numériques que j'ai effectuées à Calern en 1996 et 1997, sont disponibles sur le site Internet de l'Observatoire de la Côte d'Azur, à l'adresse : "<http://www.obs-nice.fr/radius/sinceac.html>".

### V.3 – Conclusions

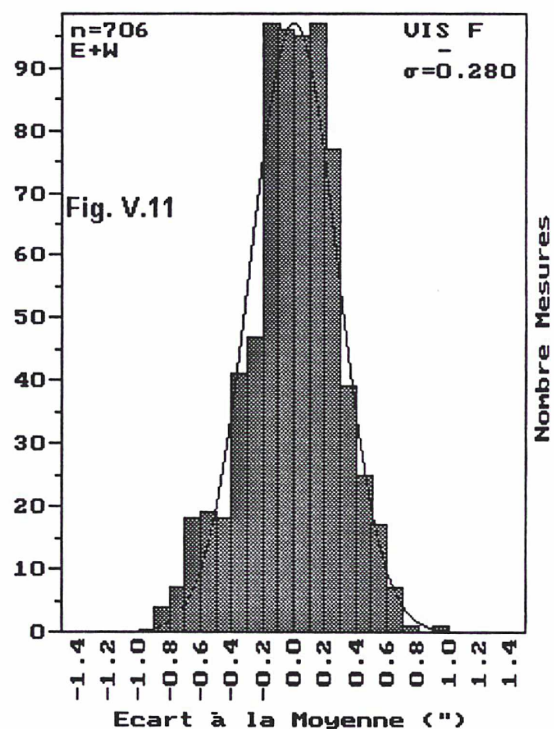
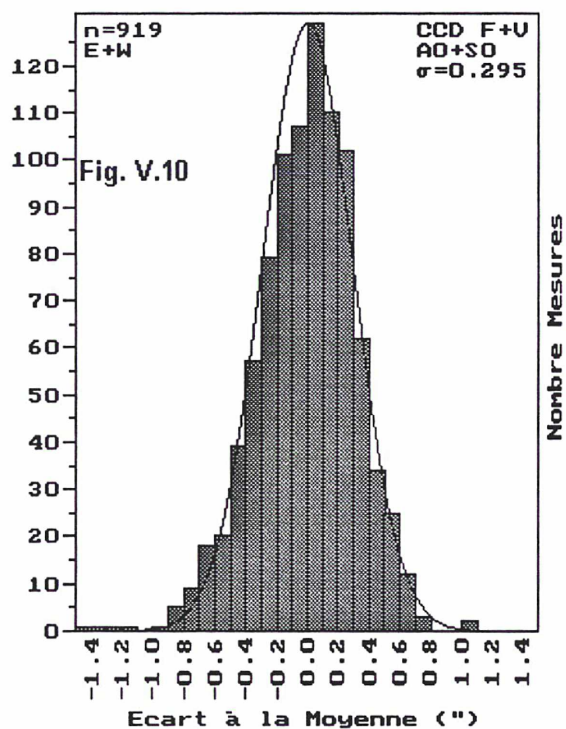
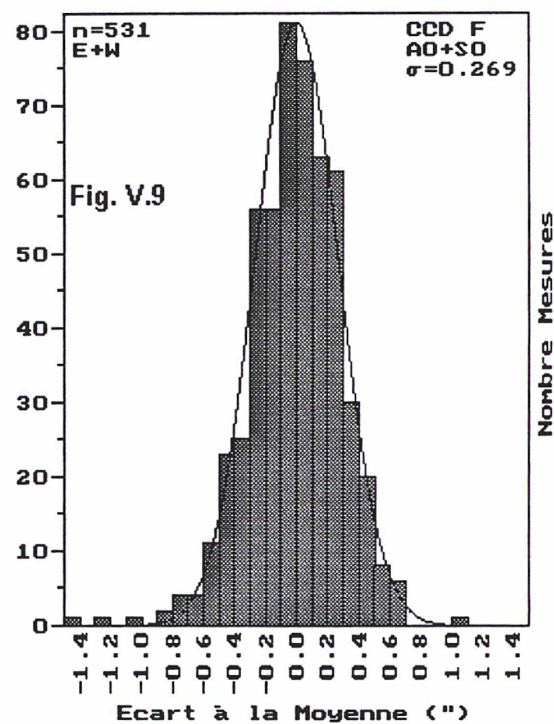
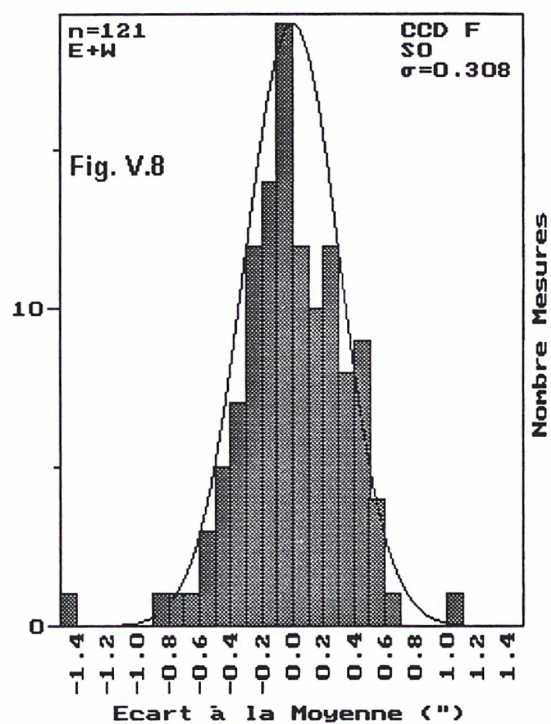
Cette première campagne de mesures CCD numériques a été destinée à la mise au point de la nouvelle méthode d'observation et de traitement des données. En conclusion, pour l'expérience CCD, les méthodes et les instruments d'observations sont non-homogènes, et quelques disparités dans les mesures ne sont pas à exclure (par exemple entre l'astrolabe **F** et **V**, entre la méthode AO et SO). Mais les résultats sont instructifs et permettent de conclure partiellement sur le choix de la meilleure méthode.

Les histogrammes présentées (figures de **V.4** à **V.11**) montrent que, entre les observations effectuées sur l'astrolabe **F**, la série CCD AO a la plus petite dispersion, légèrement meilleure que la série VIS (0',257 contre 0',280), et cela malgré plusieurs inconvénients :

- Les mesures CCD ont un caractère expérimental, contrairement à la série VIS, qui est très homogène.
- L'échantillon des mesures VIS comporte environ 706 mesures, contre 410 pour la série CCD (dont une partie ont été effectuées dans des mauvaises conditions météo...).
- En visuel, 21% de mesures sont en passage Ouest, contre 37% dans le cas de mesures CCD. Les particularités météorologiques du site de Calern font que les mesures en passage Ouest sont de faible qualité par rapport aux mesures en pas-







**TABLEAU V.4 : CORRECTIONS A LA POSITION DU SOLEIL**

**Mesures CCD, instrument F, méthodes AO et SO**

$jj^*$	$BSE$	$BIE$	$BIO$	$BSO$	$\Delta\alpha$	$\sigma_{\Delta\alpha}$	$\Delta Y$	$\sigma_{\Delta Y}$	$D$	$\sigma_D$	$\sigma_{obs}$
<b>PRISME 34°,0</b>											
280.9856	-2.529	-1.106	-1.325	-1.601	0.0193	0.0309	-1.640	0.286	959.213	0.286	0.572
595.9795	-0.413	-1.230	-0.183	-0.148	0.0353	0.0213	-0.494	0.197	959.860	0.197	0.395
<b>PRISME 37°,5</b>											
590.9792	-0.529	0.273	0.935	-0.055	0.0294	0.0050	0.156	0.048	959.191	0.048	0.097
595.9795	-0.126	0.089	-0.900	-0.789	-0.0420	0.0084	-0.431	0.083	959.619	0.083	0.166
<b>PRISME 41°,5</b>											
295.9858	-0.574	-0.002	-0.144	-1.006	-0.0147	0.0073	-0.432	0.072	959.281	0.072	0.143
590.9792	-0.095	0.388	0.074	-0.223	-0.0109	0.0046	0.036	0.047	959.448	0.047	0.093
595.9795	-1.041	-0.257	-0.135	-0.376	0.0192	0.0132	-0.452	0.135	959.385	0.135	0.271
<b>PRISME 45°,0</b>											
287.9859	-0.959	-0.408	-0.013	-0.351	0.0242	0.0051	-0.433	0.053	959.419	0.053	0.105
295.9858	-1.254	-0.776	0.625	-0.183	0.0608	0.0083	-0.397	0.084	959.318	0.084	0.168
340.9782	0.287	-0.091	1.347	0.519	0.0713	0.0543	0.516	0.312	959.532	0.312	0.624
590.9792	-1.107	-0.321	-0.480	-0.738	0.0050	0.0127	-0.661	0.132	959.381	0.132	0.264
595.9795	-0.958	0.161	-0.419	-0.409	-0.0007	0.0269	-0.406	0.282	959.364	0.282	0.565
690.9818	-0.587	0.356	0.020	-0.735	-0.0147	0.0059	-0.237	0.048	959.216	0.048	0.097
691.9815	-0.993	-0.611	0.767	-0.484	0.0582	0.0274	-0.330	0.221	959.233	0.221	0.443
692.9813	-0.407	-0.153	-0.664	-0.777	-0.0276	0.0047	-0.501	0.037	959.552	0.037	0.074
699.9797	-0.868	0.041	-0.283	-0.372	0.0066	0.0294	-0.370	0.204	959.393	0.204	0.409
700.9795	-1.186	-0.895	-0.404	-0.335	0.0496	0.0125	-0.704	0.085	959.589	0.085	0.170
<b>PRISME 49°,0</b>											
287.9859	-1.252	-0.920	0.272	-0.611	0.0432	0.0130	-0.628	0.138	959.336	0.138	0.276
340.9781	0.622	0.268	1.179	1.161	0.0487	0.0131	0.808	0.097	959.729	0.097	0.194
590.9792	-1.138	-0.275	0.034	0.358	0.0424	0.0279	-0.255	0.296	959.509	0.296	0.593
594.9795	-0.358	-0.478	-0.116	-0.270	0.0105	0.0064	-0.305	0.069	959.636	0.069	0.137
595.9795	-1.241	-0.833	0.909	0.205	0.0746	0.0070	-0.240	0.075	959.363	0.075	0.150
689.9820	-1.524	-1.183	-0.797	-0.287	0.0445	0.0231	-0.947	0.211	959.687	0.211	0.422
690.9817	-0.499	-0.471	0.584	0.511	0.0569	0.0015	0.032	0.014	959.619	0.014	0.028
691.9815	-0.159	-0.061	1.067	0.785	0.0577	0.0054	0.408	0.049	959.549	0.049	0.098
699.9797	-0.362	0.694	0.928	1.098	0.0519	0.0369	0.590	0.303	959.422	0.303	0.606
700.9795	-0.025	-0.136	1.024	0.619	0.0556	0.0165	0.371	0.133	959.571	0.133	0.266
701.9792	0.063	0.035	-0.503	-0.160	-0.0238	0.0101	-0.142	0.081	959.738	0.081	0.161
<b>PRISME 52°,5</b>											
296.9857	-0.413	-0.252	0.082	-0.992	-0.0058	0.0215	-0.394	0.228	959.331	0.228	0.456
339.9784	-0.002	0.991	0.633	-0.205	-0.0165	0.0047	0.354	0.040	959.185	0.040	0.080
340.9781	0.240	0.147	0.833	0.628	0.0321	0.0091	0.462	0.076	959.617	0.076	0.153
590.9792	-0.094	0.459	1.576	-0.004	0.0281	0.0239	0.484	0.257	959.105	0.257	0.514
594.9795	-1.106	0.073	-0.719	-1.062	-0.0173	0.0194	-0.703	0.209	959.259	0.209	0.418
595.9795	-0.188	-0.703	-0.958	-1.105	-0.0272	0.0153	-0.738	0.165	959.738	0.165	0.330
689.9820	-0.391	-0.707	0.255	-0.189	0.0301	0.0198	-0.258	0.191	959.612	0.191	0.382
690.9817	0.015	0.044	0.924	0.081	0.0246	0.0213	0.266	0.204	959.425	0.204	0.408
691.9815	-0.360	-0.187	0.621	-0.109	0.0277	0.0147	-0.009	0.140	959.417	0.140	0.280
692.9813	-0.833	0.297	0.996	0.998	0.0669	0.0297	0.365	0.281	959.360	0.281	0.562
699.9797	-0.700	-0.482	1.023	0.053	0.0630	0.0213	-0.026	0.191	959.346	0.191	0.382
700.9794	-0.741	-0.969	-0.614	-0.698	0.0112	0.0089	-0.755	0.079	959.681	0.079	0.158
701.9792	-0.280	-0.273	0.619	-0.754	0.0117	0.0390	-0.172	0.342	959.298	0.342	0.684

(tournez la page s.v.p.....)



TABLEAU V.4 (suite)

$jj^*$	$BSE$	$BIE$	$BIO$	$BSO$	$\Delta\alpha$	$\sigma_{\Delta\alpha}$	$\Delta Y$	$\sigma_{\Delta Y}$	$D$	$\sigma_D$	$\sigma_{obs}$
<b>PRISME 56°5</b>											
296.9857	-1.172	-1.048	0.537	0.300	0.0711	0.0027	-0.346	0.029	959.553	0.029	0.058
339.9784	0.086	0.744	1.072	-0.320	-0.0022	0.0199	0.396	0.183	959.129	0.183	0.367
340.9781	-0.428	-0.051	0.983	0.409	0.0513	0.0057	0.229	0.052	959.406	0.052	0.103
595.9796	-0.472	-0.027	0.044	-1.103	-0.0129	0.0162	-0.389	0.176	959.242	0.176	0.351
689.9819	-1.119	-1.091	-1.692	-0.920	-0.0099	0.0198	-1.206	0.200	959.833	0.200	0.400
690.9817	0.613	0.481	0.756	0.345	0.0002	0.0135	0.549	0.136	959.575	0.136	0.271
691.9815	0.019	0.216	-0.115	-0.348	-0.0175	0.0009	-0.057	0.009	959.536	0.009	0.017
692.9813	-0.876	0.148	1.172	1.300	0.0805	0.0288	0.436	0.286	959.419	0.286	0.572
700.9794	-1.139	-0.621	0.078	-0.840	0.0263	0.0106	-0.631	0.101	959.283	0.101	0.202
<b>PRISME 60°0</b>											
340.9781	-0.526	-0.465	0.242	0.085	0.0343	0.0026	-0.166	0.025	959.590	0.025	0.050
360.9734	0.445	1.005	1.361	2.025	0.0611	0.0380	1.210	0.302	959.671	0.302	0.604
594.9795	-1.076	-1.536	-0.110	-0.709	0.0414	0.0245	-0.858	0.265	959.610	0.265	0.530
595.9796	-0.384	-0.025	-0.700	-0.722	-0.0234	0.0078	-0.458	0.085	959.548	0.085	0.169
689.9819	-1.538	-1.186	-0.090	-0.378	0.0545	0.0015	-0.798	0.015	959.483	0.015	0.030
690.9817	-1.619	-0.257	-0.292	-0.585	0.0242	0.0258	-0.688	0.267	959.227	0.267	0.533
691.9815	-0.655	-0.769	0.104	-0.003	0.0371	0.0055	-0.330	0.056	959.647	0.056	0.112
700.9794	-1.338	-1.397	-0.625	-0.609	0.0379	0.0012	-0.992	0.012	959.664	0.012	0.024
701.9792	-0.872	-0.950	-0.493	0.088	0.0360	0.0127	-0.556	0.125	959.811	0.125	0.249
<b>PRISME 65°0</b>											
296.9857	-0.586	0.523	0.338	-0.400	0.0000	0.0086	-0.031	0.093	959.176	0.093	0.185
360.9734	0.174	0.674	2.766	3.271	0.1455	0.0275	1.723	0.245	959.646	0.245	0.490
594.9795	-2.167	-1.756	0.702	-0.401	0.0980	0.0160	-0.905	0.172	959.261	0.172	0.345
690.9817	-1.828	0.179	1.698	0.485	0.0904	0.0187	0.134	0.198	958.832	0.198	0.395
691.9815	-0.851	-0.700	0.981	0.710	0.0767	0.0029	0.035	0.031	959.539	0.031	0.062
700.9794	-1.928	-1.449	-0.841	-0.175	0.0573	0.0277	-1.098	0.285	959.692	0.285	0.570
701.9792	-0.741	-0.758	2.640	2.016	0.1497	0.0159	0.790	0.163	959.492	0.163	0.326
<b>PRISME 70°0</b>											
296.9857	-0.097	0.253	-0.528	-0.237	-0.0214	0.0148	-0.152	0.160	959.630	0.160	0.320
340.9781	0.776	0.563	2.876	2.193	0.0892	0.0216	1.602	0.225	959.527	0.225	0.451
360.9734	0.754	0.579	4.095	4.000	0.1762	0.0075	2.359	0.072	959.665	0.072	0.145
594.9795	-0.960	-0.916	0.852	0.415	0.0738	0.0091	-0.152	0.097	959.523	0.097	0.195
691.9815	-0.206	0.705	0.592	0.451	0.0127	0.0179	0.386	0.192	959.379	0.192	0.384
700.9794	-0.849	-0.883	0.802	0.647	0.0751	0.0045	-0.070	0.048	959.615	0.048	0.096

$jj^*$  : Date julienne modifiée = jour julien - 2450000.0

$BSE$  : résidus Bord Supérieur Est

$BIE$  : résidus Bord Inférieur Est

$BIO$  : résidus Bord Inférieur Est

$BSO$  : résidus Bord Supérieur Ouest

sages Est (discussions dans le chapitre VI).

- Des études sont en cours à Paris (modélisation du bord solaire) et Alger (nettoyage des images par traitement en ondelettes). Les premiers résultats montrent que la précision des mesures CCD peut être améliorée, par rapport à la méthode actuelle de réduction (dérivation numérique).

## REFERENCES

- BRETAGNON P., FRANCOU G., 1988, "Planetary theories in rectangular and spherical variables. VSOP 87 solutions", *Astronomy and Astrophysics*, **202**, p. 309
- JILINSKI E., 1997, *Communication personnelle*
- KOLESNIK Y.B., 1995, "Analysis of modern observations of the Sun and inner planets", *Astronomy and Astrophysics*, **294**, p. 874
- LEISTER N., 1989, "Orientação do sistema fundamental de referência. Observações do Sol com o astrolábio de Valinhos", Tese de Doutorado – Instituto Astronômico e Geofísico – São Paulo
- NOËL F., 1994, "Observations of the Sun during 1993 with the astrolabe of Santiago", *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, **106**, p. 327
- PENNA J.L., BENEVIDES-SOARES P., ANDREI A.H., LACLARE F., 1997, "Discussion of the results from solar astrolabes", *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, **123**, p. 403
- POPPE P.C.R., LEISTER N.V., LACLARE F., 1996, "Corrections to the FK5 reference frame from the Sun's observations with the astrolabes at Abrahão de Moraes (1988-1994) and Calern (1988-1991) Observatories", *Astronomy and Astrophysics*, **315**, p. 633
- WITTMANN A., 1980, "The solar limb darkening function at 512 Å and its possible variations", *Astronomy and Astrophysics*, **83**, p. 312





## CHAPITRE VI – ANALYSE DES RESULTATS

### VI.1 – Analyse des mesures

Dans ce chapitre, nous essaierons de faire l'analyse des résultats en fonction de tous les paramètres rendus accessibles par l'emploi de la méthode numérique d'acquisition des mesures. Les mesures numériques (**CCD**) effectuées sur l'astrolabe **F**, à l'aide de deux méthodes **AO** et **SO** seront prises en compte, en les comparant constamment aux mesures visuelles (**VIS**), réalisées pendant la même période et sur le même instrument. Les résultats des mesures de Calern, autres que CCD numériques, m'ont été communiqués par F. Laclare en 1997, auquel je ferai implicitement référence chaque fois qu'ils seront utilisés. Les mesures CCD et VIS ne sont pas simultanées, et nous avons pris en compte, pour ces dernières, une période plus large que celle des mesures CCD. Les résultats comparatifs de cette période, couvrant entièrement les années 1996 et 1997, sont présentés sur les figures de **VI.1** à **VI.3**. Pour des détails concernant chaque série de mesures, on se reportera au chapitre V.

#### VI.1.1 – Sur l'homogénéité des mesures

La série de mesures CCD numériques effectuées à Calern n'est pas homogène, si on considère le fait que plusieurs méthodes ont été employées, ainsi que deux instruments très différents, pour l'acquisition des images. Il faut prendre en compte le fait qu'il s'agit essentiellement de mesures expérimentales, qui doivent prouver la faisabilité de la méthode. Pour ces raisons, les résultats de telles observations ne peuvent pas être analysés de la même façon que ceux obtenus visuellement à Calern. La série visuelle a été construite de manière rigoureuse, avec une très bonne répartition temporelle, et sans changements apparents de la manière d'observer. Le but de la série CCD numérique était de trouver la meilleure combinaison entre l'instrument et la méthode d'acquisition des images. La diversité des expériences faites dans ce but, ainsi que la faible extension temporelle des observations, rend incertaine l'interprétation scientifique des résultats. Toutefois, au vu de ces mêmes résultats, on montrera que bien de recherches autrefois inabordables pourront être valablement entreprises, dans des domaines aussi différents que la mécanique céleste et l'étude de l'atmosphère terrestre, par exemple.

La totalité des mesures individuelles du demi-diamètre solaire (figure **VI.1**), met en évidence les périodes d'observation CCD et VIS (les observations ne sont pas possibles durant 3 mois, en hiver). On remarquera le bon accord entre les deux types de mesures. Les valeurs moyennes journalières du demi-diamètre solaire sont présentées aussi (figure **VI.2**), et montrent le même accord relatif. Enfin, figure **VI.3**, les valeurs moyennes du demi-diamètre du Soleil, obtenues sur des paquets d'environ 40 mesures (ce qui correspond à peu près à une période mensuelle des observations visuelles). Ces dernières valeurs se situent dans un intervalle de  $0'',27$ , tandis que les barres d'erreurs restent comprises entre  $\pm 0'',02$  et  $\pm 0'',05$ . Le graphique suivant (figure **VI.4**), a été réalisé



Figure VI.1 : DEMI-DIAMETRE SOLAIRE, MESURES INDIVIDUELLES  
 (astrolabe F, CCD (A0+S0), passages E+W)  
 1237 mesures entre 18.01.1996 ET 09.10.1997

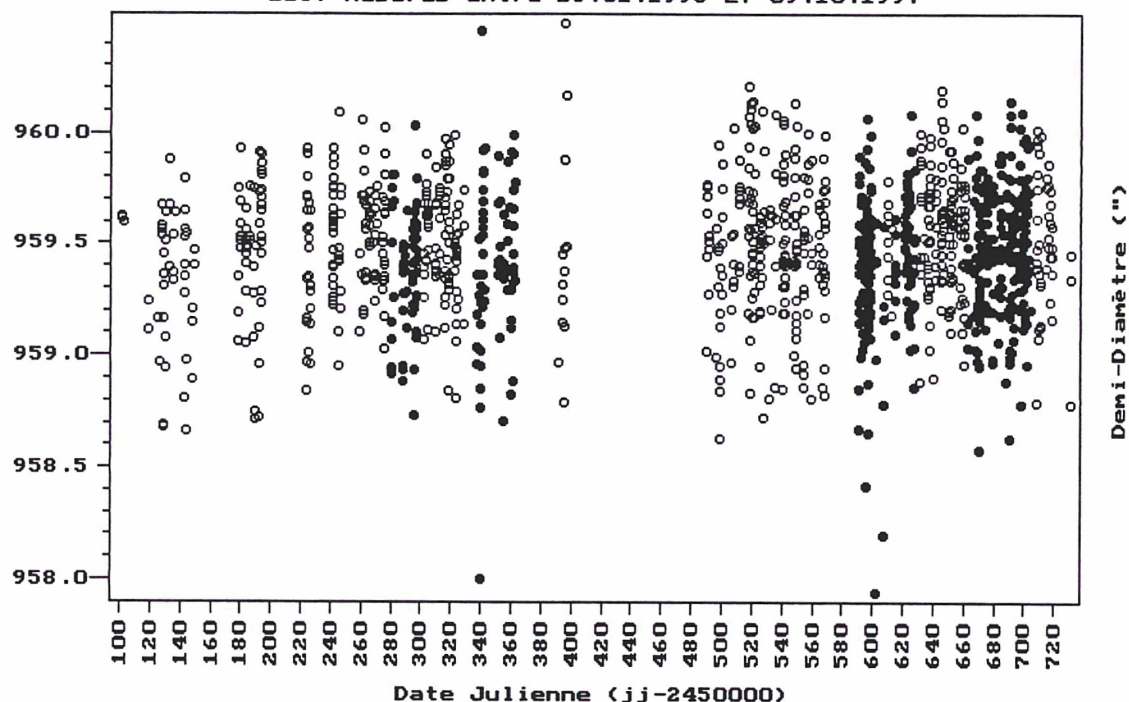


Figure VI.2 : DEMI-DIAMETRE SOLAIRE, MOYENNES JOURNALIERES  
 (astrolabe F, CCD (A0+S0) et VIS, passages E+W)  
 1237 mesures entre 18.01.1996 et 09.10.1997

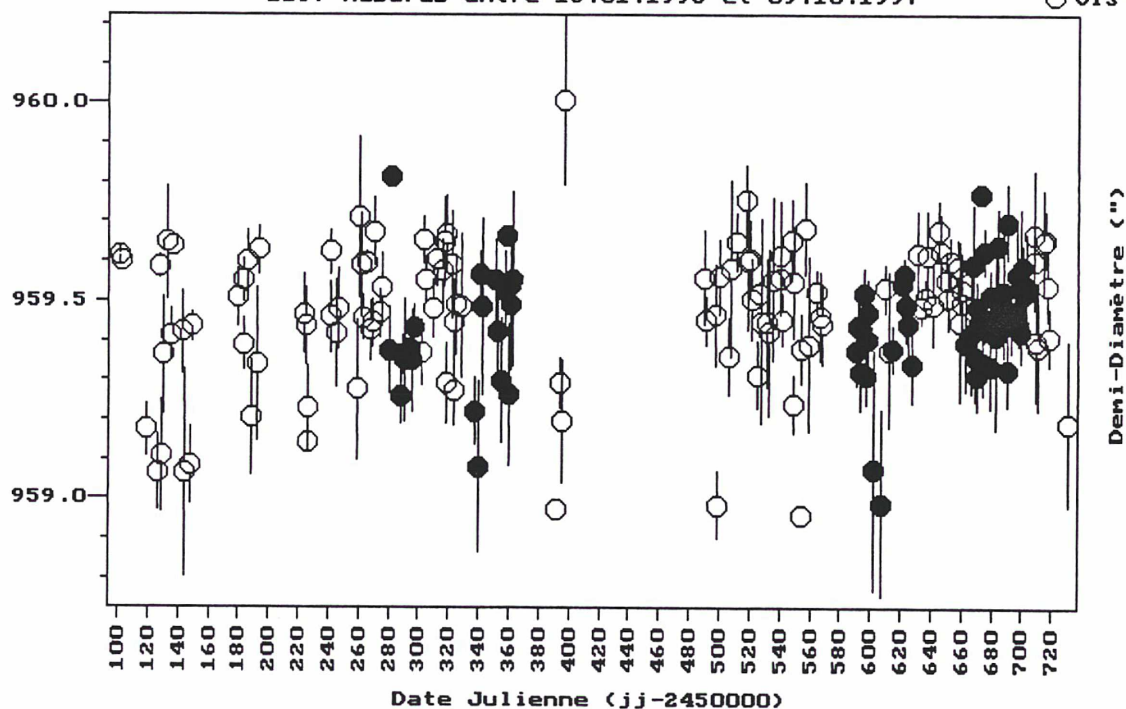


Figure VI.3 : DEMI-DIAMETRE SOLAIRE, MOYENNES 40 MESURES  
(astrolabe F, CCD (AO+S0) et UIS, passages E+W)  
1237 mesures entre 18.01.1996 et 09.10.1997

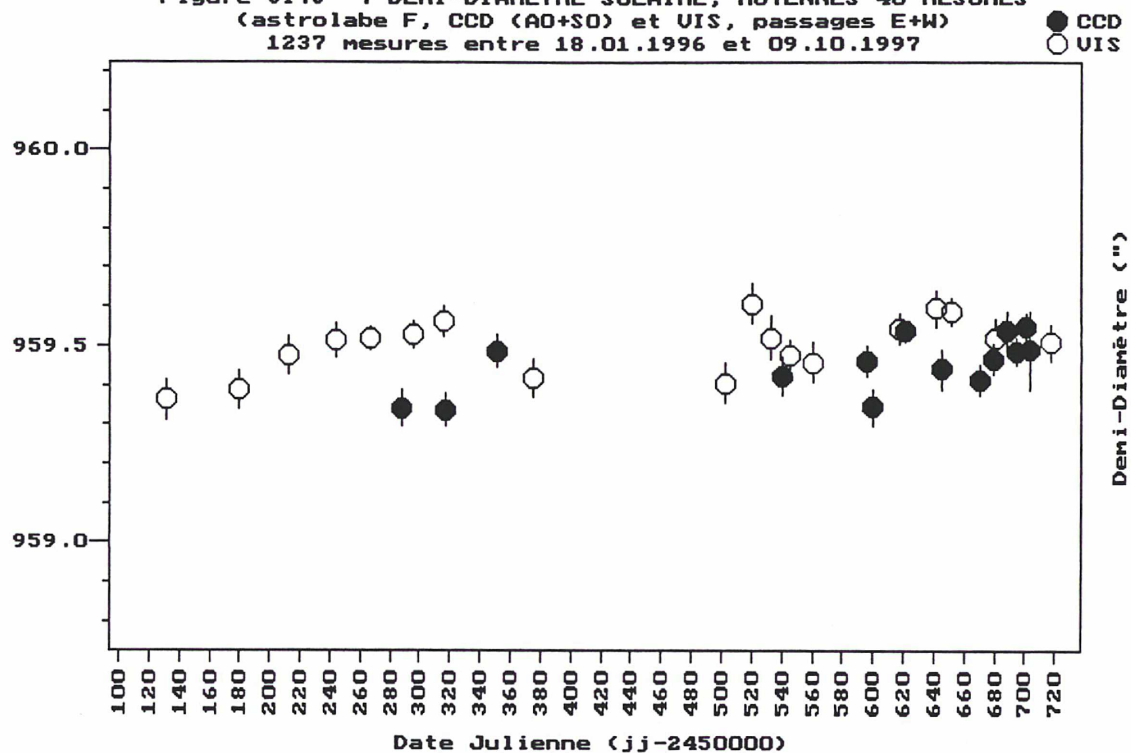
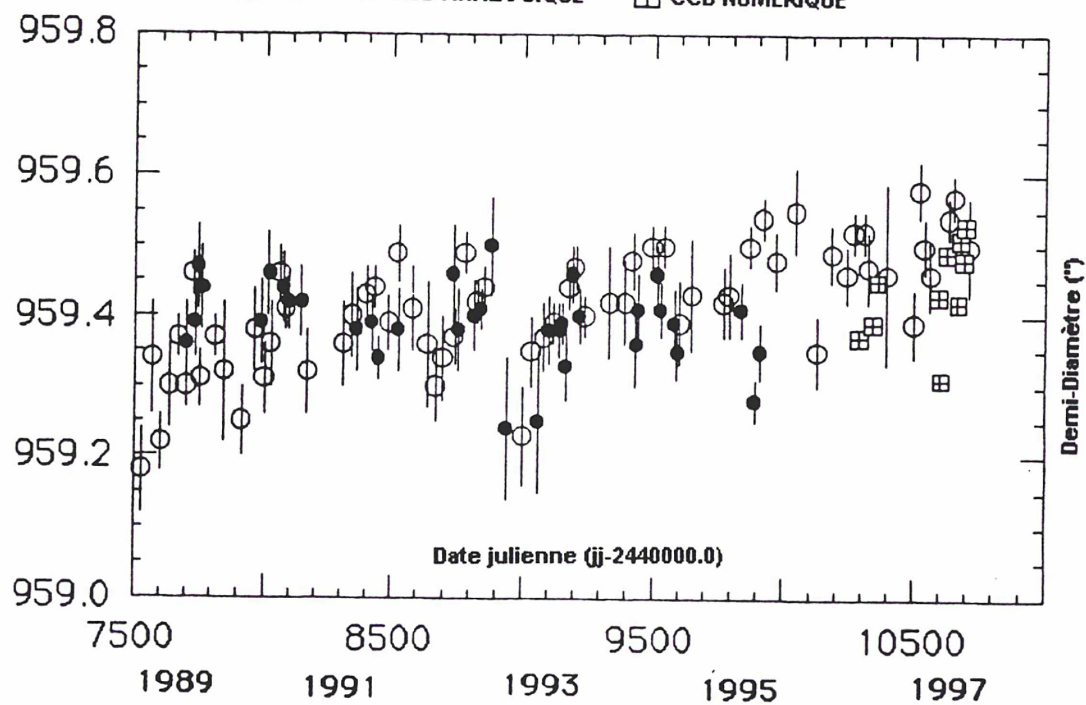


Figure VI.4 : DEMI-DIAMETRE SOLAIRE, MOYENNES QUASI MENSUELLES  
○ VIS ● CCD ANALOGIQUE □ CCD NUMERIQUE





à Calern pendant les observations, et concerne des résultats préliminaires, toujours en moyennes quasi mensuelles (Laclare 1997). Ils couvrent une période plus longue, qui comprend également les résultats des mesures CCD analogiques (faites entre 1989 et 1995).

La distribution temporelle des mesures CCD numériques montre clairement que l'interprétation des résultats n'est pas aisée. Les figures **VI.5** et **VI.6** présentent la distribution des mesures en fonction de la distance zénithale et de la latitude héliographique d'observation, pour les deux séries de mesures. On y remarquera que la distribution des mesures CCD est convenable en distances zénithales, mais plus défavorable sur les latitudes héliographiques. Cela rend très malaisée l'analyse des résultats en fonction de ce dernier paramètre, et en particulier la recherche d'un éventuel aplatissement solaire. Même les mesures visuelles ont de mauvaises distributions, pour l'échantillon de deux ans choisi (cela n'est plus vrai si on étudie l'ensemble des 22 années d'observations).

Pour l'instant, on peut conclure que les mesures CCD numériques ne se prêtent pas encore à des analyses trop détaillées. De telles analyses pourront être entreprises lorsque les observations rempliront les conditions nécessaires de densité et d'homogénéité, et couvriront une plus grande plage temporelle. Nous essayerons dans ce qui suit de mettre en évidence quelques effets, liés plutôt à l'atmosphère terrestre et à l'instrument, qu'au Soleil lui-même. Nous pensons toutefois que, à quelques 0''01 près, les valeurs moyennes du demi-diamètre obtenues ici sont correctes (tableaux **V.2** et **V.3**). L'astrolabe est en effet l'un des seuls, sinon le seul, instrument d'astrométrie qui (rappelons-le), procède par mesure de zéro, ce qui du point de vue purement instrumental, le rend "*absolu*".

## VI.1.2 – Effets observationnels

Il faut noter en effet que la précision et la stabilité de l'instrument à CCD auront permis d'élaborer une définition claire et non ambiguë du demi-diamètre solaire observé. Il reste nécessaire de bien définir les phénomènes qui contribuent à la construction de l'image afin, si possible, d'éliminer ceux qui perturbent la mesure, ou d'étudier les plus intéressants d'entre eux. Dans les deux chapitres précédents nous avons souligné la dépendance de la définition du bord solaire aux conditions d'observation. Si, en visuel on ne peut pas, faute d'informations, définir le bord observé, l'usage de la caméra CCD permet de disposer de paramètres, calculés pour chaque observation (Annexes A.5, A.6), dont l'influence peut par conséquent être étudiée. **Une définition satisfaisante du bord solaire peut alors être élaborée.** Les inhomogénéités de la série CCD rendent cette analyse assez difficile et, toutes précautions prises, seules des dépendances linéaires ont été cherchées. Les analyses doivent être faites séparément pour les observations Est (**E**) et Ouest (**W**), d'abord en raison de la distribution des mesures, et ensuite du fait que les conditions météorologiques sont nettement différentes en passage E et W. Excepté la série de mesures CCD sur l'astrolabe V qui permet jusqu'à 20 mesures par heure, les autres séries contiennent moins de 30% d'observations en passage W, en général de qualité moindre.

**Concernant l'astrolabe V, un effet Est-Ouest a été remarqué**, tant pour les mesures CCD que pour les mesures visuelles de contrôle (que F. Laclare a effectuée en parallèle



sur cet astrolabe) : Le demi-diamètre solaire observé est souvent plus grand en passage E qu'en passage W. Pour les 252 passages E, le demi-diamètre moyen obtenu est de  $959''382 \pm 0''020$  tandis qu'il n'est que de  $959''224 \pm 0''026$  pour les 136 passages W, soit une différence significative  $D_E - D_W = 0''158 \pm 0''033$ . Pour toutes les autres séries analysées, les deux valeurs sont égales à la précision des mesures près (voir le tableau V.2, chapitre V.2.4). Cet effet, qui semble systématique, pourrait vraisemblablement être dû aux caractéristiques techniques du prisme d'angle variable (fig. I.10, chapitre I.2.2). Ce dernier est muni de ressorts qui maintiennent sous tension les deux faces du prisme, dont l'angle d'ouverture est commandé par un vérin-poussoir. Si la tension des ressorts est trop grande, l'angle des faces peut se fermer et donc modifier la distance zénithale d'observation. La fermeture de l'angle du prisme entre le passage de deux bords successifs peut expliquer l'effet remarqué, pour la raison suivante (les indices 0 correspondent aux valeurs que l'on obtenait sans cette erreur) :

- **Passage à l'Est** : On observe le passage du bord supérieur à la distance zénithale  $z_0$ , et le bord inférieur à  $z_0 - \Delta z$ . On enregistre donc un temps de passage  $t_0 + \Delta t$  pour le deuxième bord, et le demi-diamètre solaire observé  $D_0 + \Delta D$  sera plus grand.
- **Passage à l'Ouest** : La situation s'inverse, le bord inférieur est observé à la distance  $z_0$  et le bord supérieur à  $z_0 - \Delta z$ . On enregistre le temps de passage  $t_0 - \Delta t$  pour le deuxième bord, et le demi-diamètre solaire observé  $D_0 - \Delta D$  sera plus petit.

Cette explication qualitative ne permet pas de déterminer  $\Delta z$ , qui par essence n'est pas constant (car les ressorts n'ont pas une réponse linéaire), et n'est sûrement pas de même grandeur en E et en W. Noter enfin que les résultats obtenus sur l'astrolabe à CCD de Rio de Janeiro, doté d'un prisme d'angle variable d'une construction un peu différente, montraient un effet E-W de signe contraire (Jilinski et al. 1997), mais qui semble s'amortir après une année (Jilinski 1997).

Pour les séries d'observations CCD et VIS sur l'astrolabe F, le tableau VI.1 donne les valeurs moyennes des paramètres qui nous informent sur la qualité des mesures. On y remarquera que, en passage E, toutes les valeurs sont de meilleure qualité qu'en passage W. Les deux tableaux suivants donnent les corrélations trouvées entre la mesure du demi-diamètre solaire et les divers paramètres (tableau VI.2), et entre la largeur de la dérivée à mi-hauteur ( $L_d$ ) et les autres paramètres (tableau VI.3). Pour la droite de régression de  $L_d$  en fonction de  $z$ , les coefficients ont des signes opposés pour les observations en passage Est et Ouest. Cette inversion des signes vient du fait que l'ordre chronologique des observations correspond à une décroissance de  $z$  à l'Est et inversement à l'Ouest. Dans les mesures CCD numériques, les 5 paramètres les plus importants qui peuvent définir la qualité des mesures sont :

- La largeur de la dérivée ( $L_d$ ).
- La dispersion des points sur les paraboles représentant le bord solaire ( $\sigma_p$ ).
- La dispersion des points sur les trajectoires ( $\sigma_t$ ).
- L'erreur du demi-diamètre solaire mesuré ( $E_D$ ).
- Le paramètre de Fried ( $R_0$ ), calculé à partir des précédents.



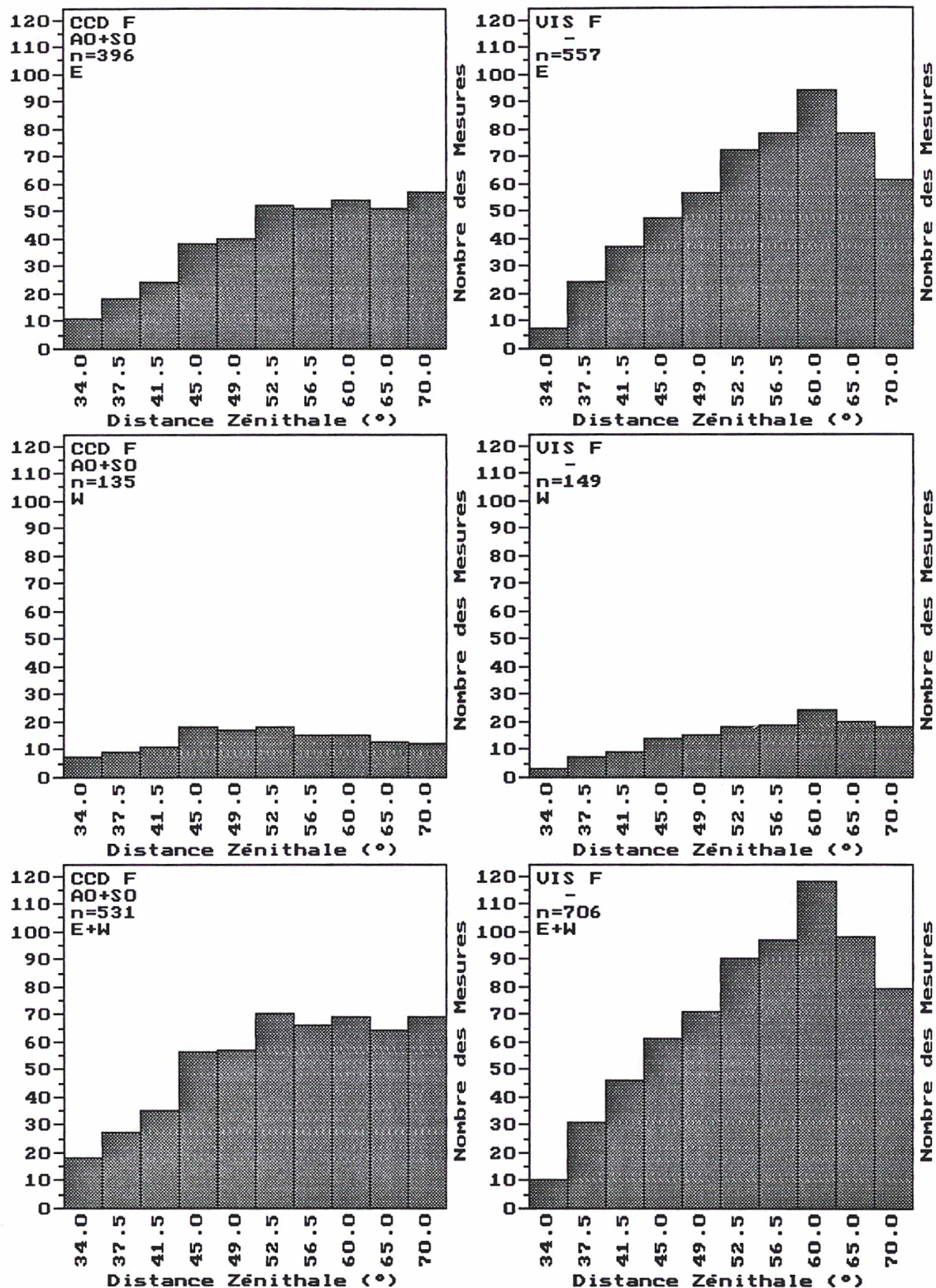


Fig. VI.5. La distribution des mesures en fonction des prismes.

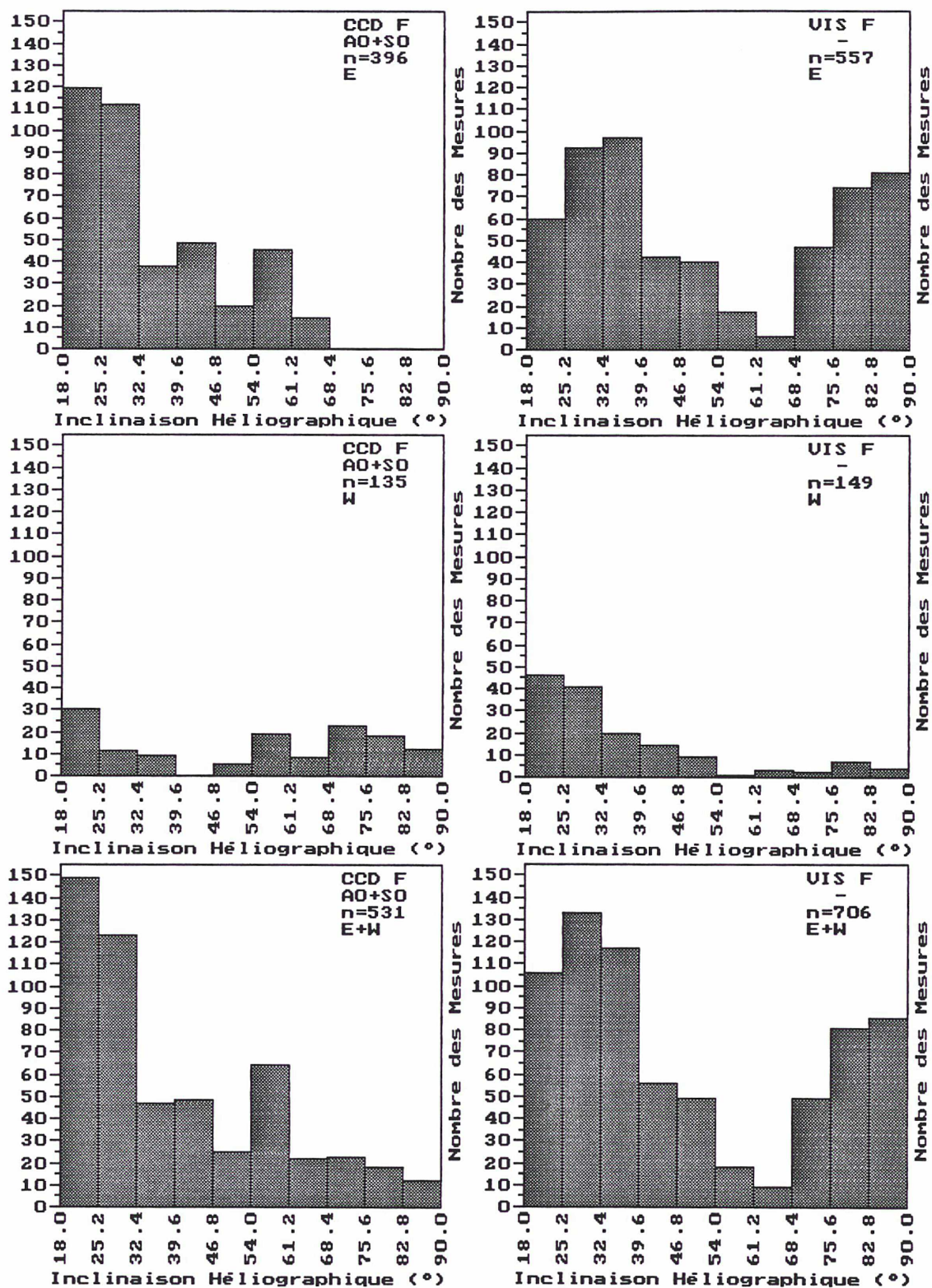


Fig. VI.6. La distribution des mesures en fonction de la latitude héliographique.



**La dégradation de la qualité des mesures de l'Est à l'Ouest** est clairement visible sur les valeurs des 5 paramètres déterminés (tableau VI.1), ce qui était prévisible pour ce site. Le plateau de Calern, à l'altitude de 1300 m, est entouré de grandes vallées ; plusieurs chaînes montagneuses de plus de 3000 m ferment l'horizon au Nord, et la mer Méditerranée est à moins de 50 km au Sud. La Vallée du Rhône ne se trouvant pas très loin à l'Ouest, le mistral souffle souvent sur le plateau, à des vitesses qui peuvent atteindre 150 km/heure. Les conditions météorologiques sont en général nettement meilleures le matin que l'après-midi. Dans la matinée, très régulièrement, des nuages de convection se forment dans les vallées, pour monter au-dessus du plateau en milieu de la journée. L'après-midi, suivant la direction et la vitesse du vent, le plateau se trouve dans le brouillard, ou bien le ciel est couvert. En début de soirée le vent se calme, et les nuages retournent dans les vallées, pour recommencer le même cycle le lendemain...

Mais curieusement, si l'on examine séparément les mesures CCD E et W, on constate que **la qualité des mesures s'améliore durant la journée**. Les valeurs de la pente de la droite de régression de  $L_d$  en fonction de  $z$  (tableau VI.3), et les quatre autres paramètres qui suivent la même tendance, le montrent bien. Seule la largeur de la dérivée a été considérée ici, car c'est une mesure très directe de l'étalement de l'image. L'épaisseur de l'atmosphère terrestre que les rayons du Soleil traversent est fonction de la distance zénithale d'observation, et de ce point de vue, à l'Est, l'effet observé est conforme aux prévisions : la qualité des mesures s'améliore du matin à midi, en même temps que  $z$  décroît.

**TABLEAU VI.1 : PARAMETRES OBSERVATIONNELS - MOYENNES**

A	Meth	Pass	$E_D$	$L_d$	$\sigma_p$	$\sigma_t$	$R_0$
V	AO	E	0.114±0.000	8.064±0.049	1.563±0.017	1.518±0.016	65.440±0.433
V	AO	W	0.129±0.000	8.279±0.073	1.499±0.024	1.741±0.019	59.233±0.427
V	AO	E+W	0.119±0.000	8.139±0.041	1.541±0.014	1.595±0.013	63.155±0.344
F	AO	E	0.093±0.000	7.130±0.027	0.692±0.008	1.259±0.018	43.209±0.392
F	AO	W	0.117±0.000	7.178±0.039	0.946±0.021	1.555±0.033	38.700±0.540
F	AO	E+W	0.100±0.000	7.137±0.022	0.762±0.010	1.347±0.018	41.799±0.325
F	SO	E	0.091±0.000	7.145±0.041	0.662±0.013	1.304±0.028	42.191±0.507
F	SO	W	0.110±0.000	7.265±0.091	0.871±0.046	1.545±0.048	38.400±0.868
F	SO	E+W	0.094±0.000	7.170±0.038	0.700±0.015	1.354±0.026	41.395±0.461
F	AO+SO	E	0.092±0.000	7.130±0.023	0.681±0.007	1.270±0.015	42.964±0.322
F	AO+SO	W	0.116±0.000	7.194±0.036	0.932±0.019	1.539±0.026	38.537±0.458
F	AO+SO	E+W	0.098±0.000	7.144±0.019	0.745±0.008	1.335±0.014	41.671±0.270

A : Astrolabe utilisé ; prisme d'angle variable (V) ou fixe (F)  
Meth : Méthode d'observation ; avec (AO) ou sans obturateur (SO)  
Pass : Observations en passages Est (E), Ouest (W) ou Est et Ouest (E+W)  
 $E_D$  : valeur moyenne des erreurs des mesures individuelles du demi-diamètre (en ")  
 $L_d$  : la largeur de la dérivée à mi-hauteur (en ")  
 $\sigma_p$  : la dispersion des points sur les paraboles (en ")  
 $\sigma_t$  : la dispersion des points sur les trajectoires (en ")  
 $R_0$  : le paramètre de Fried (en mm)

**TABLEAU VI.2 : REGRESSION LINEAIRE – DEMI-DIAMETRE OBSERVE**

Pass	$z$	$E_D$	$1/R_0$	$\sigma_p$	$\sigma_t$	$L_d$	$JJ$
410 Mesures CCD (300 E, 110 W), astrolabe F, méthode AO							
E	+ 2.7±1.4	- 1.4±0.5	- 7.9± 3.8	- 214.8± 89.0	- 65.9± 40.8	- 51.0±30.0	+ 0.4± 0.1
W	+ 3.4±2.4	- 2.3±1.0	-15.6± 6.5	- 290.5± 98.2	-163.9± 72.4	- 3.9±60.2	+ 0.3± 0.2
E+W	+ 2.8±1.2	- 1.2±0.4	- 7.2± 3.1	- 167.6± 54.2	- 59.0± 33.6	- 46.0±26.6	+ 0.4± 0.1
121 Mesures CCD (96 E, 25 W), astrolabe F, méthode SO							
E	- 0.6±3.5	- 3.6±1.2	-21.7± 9.6	- 340.2±228.9	-244.3±100.8	- 98.7±66.9	+ 0.1± 0.2
W	+ 3.6±8.1	- 6.6±3.1	-52.5±24.5	- 650.8±228.7	-715.4±268.6	-626.8±96.3	+ 2.3± 0.5
E+W	+ 0.5±3.2	- 3.8±1.1	-24.4± 8.6	- 385.9±152.9	-284.4± 91.0	-296.7±58.2	+ 0.1± 0.2
531 Mesures CCD (396 E, 135 W), astrolabe F, méthode AO+SO							
E	+ 2.3±1.3	- 1.9±0.4	-10.6± 3.5	- 230.6± 83.7	-120.5± 38.2	- 55.8±27.5	+ 0.3± 0.1
W	+ 2.7±2.5	- 2.7±0.9	-19.0± 6.5	- 337.2± 95.9	-211.1± 72.1	-127.5±55.2	+ 0.3± 0.2
E+W	+ 1.9±1.1	- 1.8±0.4	-10.9± 3.0	- 186.4± 51.9	-113.5± 32.3	- 79.9±24.8	+ 0.3± 0.1
706 Mesures VIS (557 E, 149 W), astrolabe F							
E	- 6.4±1.2						+ 0.2± 0.1
W	- 2.3±2.7						+ 0.2± 0.2
E+W	- 6.0±1.1						+ 0.2± 0.1

**TABLEAU VI.3 : REGRESSION LINEAIRE – LARGEUR DE LA DERIVEE**

Pass	$z$	$E_D$	$1/R_0$	$\sigma_p$	$\sigma_t$	$P$	$T_A$
410 Mesures CCD (300 E, 110 W), astrolabe F, méthode AO							
E	+11.6±2.7	+12.0±0.7	+85.9± 4.8	+2064.6±120.9	+ 941.2± 49.0	- 60.3± 6.5	-96.0± 7.5
W	- 6.1±3.8	+ 4.5±1.4	+43.8± 8.7	- 49.3±152.5	+ 620.1± 95.4	- 41.0±13.4	-71.8±14.3
E+W		+10.3±0.6	+72.4± 4.2	+ 841.7± 81.3	+ 818.7± 43.0	- 57.1± 5.8	-52.2± 5.8
121 Mesures CCD (96 E, 25 W), astrolabe F, méthode SO							
E	+ 2.3±4.2	+12.6±1.2	+95.2± 9.9	+1315.4±219.5	+1026.6± 96.2	- 28.0± 9.7	-12.2± 9.1
W	-18.2±9.7	+ 5.0±4.3	+67.7±31.8	+ 669.0±389.8	+ 830.3±359.2	- 61.0±20.0	-12.9±21.3
E+W		+12.9±1.1	+90.9± 9.2	+1196.8±171.2	+1014.0± 91.9	- 36.1± 8.8	- 6.7± 7.8
531 Mesures CCD (396 E, 135 W), astrolabe F, méthode AO+SO							
E	+ 7.7±2.2	+12.1±0.6	+88.6± 4.2	+1893.2±107.5	+ 959.7± 72.2	- 45.9± 5.2	-54.3± 6.1
W	- 8.2±3.4	+ 4.4±1.3	+45.0± 8.9	+ 35.2±141.9	+ 637.5± 92.5	- 46.9±10.8	-45.2±11.2
E+W		+10.7±0.5	+75.2± 3.8	+ 965.1± 79.1	+ 852.5± 38.5	- 49.2± 4.8	-33.8± 4.7

*Pass* : Observations en passages Est (E), Ouest (W) ou Est et Ouest (E+W)

**Les valeurs représentent le coefficient angulaire de la régression linéaire du diamètre (en 0'',001 tableau VI.2) et de la largeur de la dérivée à mi-hauteur (en 0'',001 tableau VI.3), en fonction des paramètres observationnels suivants :**

$z$  : la distance zénithale d'observation (en °)

$E_D$  : valeur moyenne des erreurs des mesures individuelles du demi-diamètre (en 0'',001)

$1/R_0$  : le paramètre de Fried ( $R_0$  en m)

$\sigma_p$  : la dispersion des points sur les paraboles (en ")

$\sigma_t$  : la dispersion des points sur les trajectoires (en ")

$L_d$  : la largeur de la dérivée à mi-hauteur (en ")

$JJ$  : la date julienne (en jours juliens)

$P$  : la pression atmosphérique réduite (en mm col. Hg)

$T_A$  : la température de l'air dans l'astrolabe (en °C)



Mais, à l'Ouest, ce phénomène devrait varier en sens inverse, contrairement aux résultats trouvés. Cela pourrait s'expliquer par le fait que l'échantillon des mesures en passage W est bien plus dispersé que les mesures E, les résultats W étant donc plus incertains. Sinon, il faut chercher une explication dans les conditions particulières du site de Calern, mais cela nécessite une étude spéciale : ce plateau est en calcaire et les roches sont couvertes par une très faible couche de végétation. L'effet des courants d'air montant du plateau, conjugué à l'effet des vents plus ou moins laminaires, plus d'autres effets de haute atmosphère, pourraient créer une inversion de l'effet de l'épaisseur de l'atmosphère, pour les mesures en passage W.

**L'étalement de l'image du bord solaire entraîne le retrait du point d'inflexion**, lorsque ce bord est défini comme le maximum de la dérivée le long d'une ligne CCD. Les 5 paramètres définis plus haut sont tous des indicateurs de la qualité des images solaires, et l'analyse des valeurs du demi-diamètre en fonction de ces paramètres (tableau VI.2) le montre. Par exemple, quand  $L_d$  croît (donc quand le bord est plus étalé), le demi-diamètre observé décroît. Ce résultat est conforme aux conclusions d'autres auteurs (Rösch & Yerle 1983, Neckel 1995), et l'effet est lié au fait que le profil du bord observé est affecté par l'assombrissement centre-bord solaire, auquel s'ajoute certainement un effet de l'atmosphère terrestre (chapitre IV.2). Lorsqu'on évalue la largeur de la dérivée à mi-hauteur, on constate que pour des valeurs de  $5''7$  à  $8''8$  de  $L_d$ , le demi-diamètre observé moyen décroît, de manière quasi linéaire, d'environ  $0''080$  par  $1''$ . Ainsi, pour une valeur moyenne de  $L_d$  de  $7''16$ , la valeur du demi-diamètre moyen est de  $959''447 \pm 0''012$ , avec une dispersion de  $0''267$ . Les valeurs moyennes du demi-diamètre ramené aux valeurs idéales, c'est à dire nulles, des paramètres perturbateurs, seraient ainsi :

- $960''019 \pm 0''012$  pour  $L_d = 0$
- $959''707 \pm 0''012$  pour  $1/R_0 = 0$

La première valeur correspond à un bord solaire idéal (disque d'intensité lumineuse uniforme), la deuxième à des images du bord solaire réel (affecté par l'assombrissement centre-bord), mais sans l'influence de la turbulence atmosphérique. Les deux valeurs sont obtenues par extrapolation des droites de régression en dehors des valeurs mesurées. Si on calcule  $L_d$  à partir de la valeur extrapolée du rayon pour un paramètre de Fried idéal ( $1/R_0 = 0$ ), on retrouve la valeur  $L_d = 3''9$ , plus petite que la valeur minimale trouvée par les observations ( $5''7$ ). Cette valeur devrait correspondre à la largeur de la dérivée pour des images affranchies des effets atmosphériques, autrement dit, avec un instrument placé dans des conditions spatiales. Enfin, des résultats très récents d'une nouvelle analyse des mesures de rayon solaire faites à Boulder (USA) avec l'instrument "*Solar Diameter Monitor*", donnent une valeur moyenne de  $959''680 \pm 0''018$ , pour la période 1981 - 1987 (Brown & Christensen-Dalsgaard 1998). A noter que, par la méthode utilisée, les mesures de Boulder sont affranchies (en grande partie) des effets de turbulence atmosphériques. Le résultat obtenu est pratiquement égal à celui de Calern extrapolé pour un paramètre de Fried infini.

En ce qui concerne les mesures visuelles, pour lesquelles ces paramètres ne sont pas accessibles, **une dépendance de la mesure avec la distance zénithale  $z$  a été**



**constatée** (tableau VI.2). Cet effet serait dû à l'œil de l'observateur, qui est sensible aux contrastes. Suite à l'absorption du flux solaire par l'atmosphère terrestre, et si le niveau de détection de l'œil est constant, le point observé à une grande distance zénithale se trouverait en retrait par rapport à celui observé à des petites distance zénithales (Irbah et al. 1994). Ramené à une distance zénithale nulle ( $z = 0$ ), le demi-diamètre moyen des mesures visuelles serait de  $959,831 \pm 0,010$ . Pour les mesures CCD, aucune dépendance en  $z$  des mesures n'a pu être mise en évidence. On suppose que le capteur CCD est moins sensible que l'œil, aux effets de variations de longueur d'onde dues à l'épaisseur de l'atmosphère. Les figures VI.7 et VI.8 présentent ces variations pour les mesures CCD et VIS. Ces valeurs sont des moyennes par prisme ou par groupe de prisme. Les mêmes variations, que l'on peut remarquer pour cet échantillon de deux ans, existent pour toute la série VIS (Laclare et al. 1996, Laclare 1997).

**Les mesures visuelles, présentent aussi une variation en fonction de la latitude héliographique du diamètre observée.** Cela a été mis en évidence aussi bien sur l'échantillon de deux ans (figure VI.9), que sur toute la série visuelle de F. Laclare (figure VI.10). Les mesures CCD ne permettent pas encore une telle analyse (figure VI.6). La variation des mesures VIS avec la latitude héliographique a été analysée par l'auteur des observations : les résultats semblent indiquer que le rayon solaire est le plus grand dans la zone royale (autour de  $45^\circ$ ) et plus petit vers  $75^\circ$ , l'effet ayant une amplitude d'environ  $0,08$  (Laclare et al. 1996). L'interprétation de cet effet en termes d'aplatissement solaire ou de changements globaux de la géométrie du Soleil est difficile, du fait que les mesures ne sont pas simultanées, et que les barres d'erreurs sont assez grandes (Laclare et al. 1996).

La figure VI.11 montre les résultats des mesures CCD et VIS du demi-diamètre solaire obtenus à Calern, et aussi **les résultats des observations de trois autres paramètres solaires** (ces derniers à des échelles arbitraires) :

- **Le nombre de taches solaires**, en valeurs moyennes mensuelles (petits cercles pleins réunis par une ligne continue, Données Sun spots 1998)
- **Le nombre de facules**, en valeurs moyennes mensuelles (petits cercles vides, réunis par une ligne en pointillé, Données Facules 1988)
- **L'irradiance solaire totale**. Les petites croix représentent des valeurs journalières enregistrées avec ACRIM II (Données Irradiance 1988)

Sur la figure VI.12 est représentée la variation du nombre de taches solaires pour le dernier cycle solaire et prévu pour celui qui vient de commencer (le rectangle correspond à la période des mesures CCD, analysée sur la figure précédente). La figure VI.11 montre, à l'échelle de 2 ans, une corrélation apparente entre les variations des mesures analysées. Concernant la corrélation de la variation du demi-diamètre observé avec le nombre de taches solaires, le même effet a été remarqué pour les mesures de l'astrolabe de Santiago pour la période 1990 - 1995 (Noël 1998), ainsi que pour les mesures de "*Mount Wilson Magnetograph*", 1982 - 1994 (Ulrich & Bertello 1995). Au contraire, sur une période plus longue (1978 - 1995), la variation du demi-diamètre apparent issu des mesures VIS de Calern semble anticorrélé avec le nombre de taches solaires (Laclare et al. 1996). Cette dernière étude montre aussi une corrélation étrange avec de flux de neutrino, qui n'a pas encore été expliquée.



Figure VI.7 : DEMI-DIAMETRE SOLAIRE, MOYENNES PRISME  
(astrolabe F, CCD (AO+SO) et UIS, passages E+W)  
1237 mesures entre 16.07.1996 et 12.09.1997

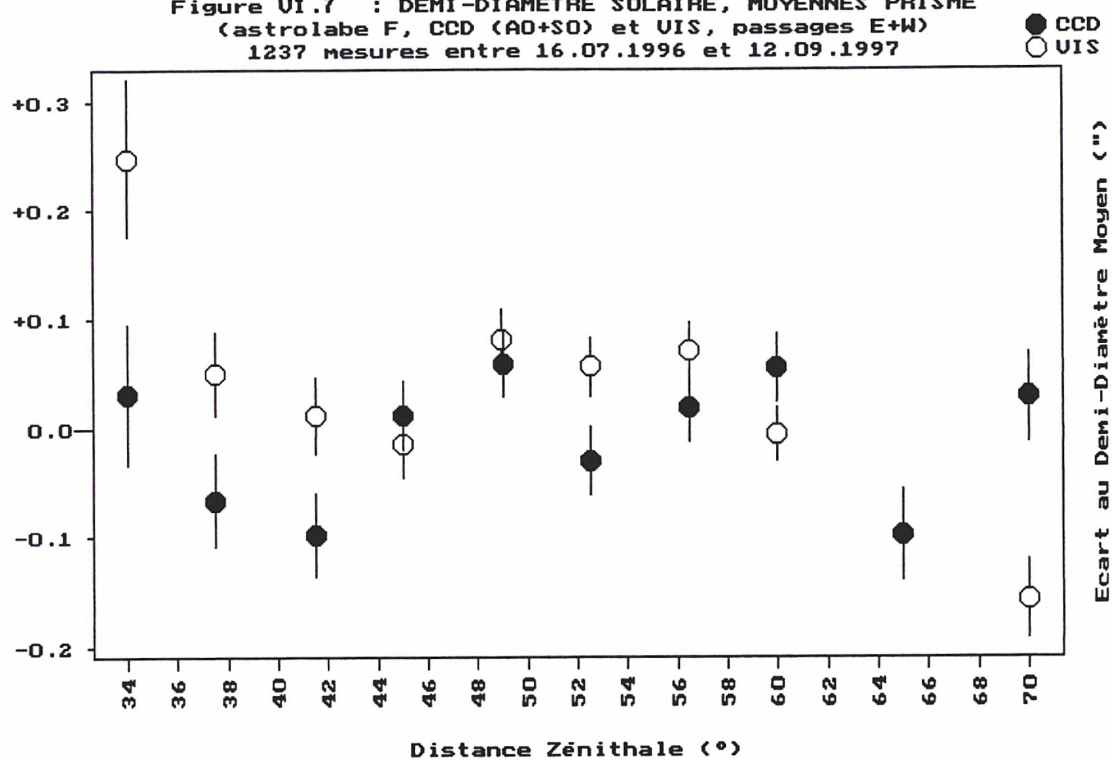


Figure VI.8 : DEMI-DIAMETRE SOLAIRE, MOYENNES CLASSES DIST.ZEN.  
(astrolabe F, CCD (AO+SO) et UIS, passages E+W)  
1237 mesures entre 16.07.1996 et 12.09.1997

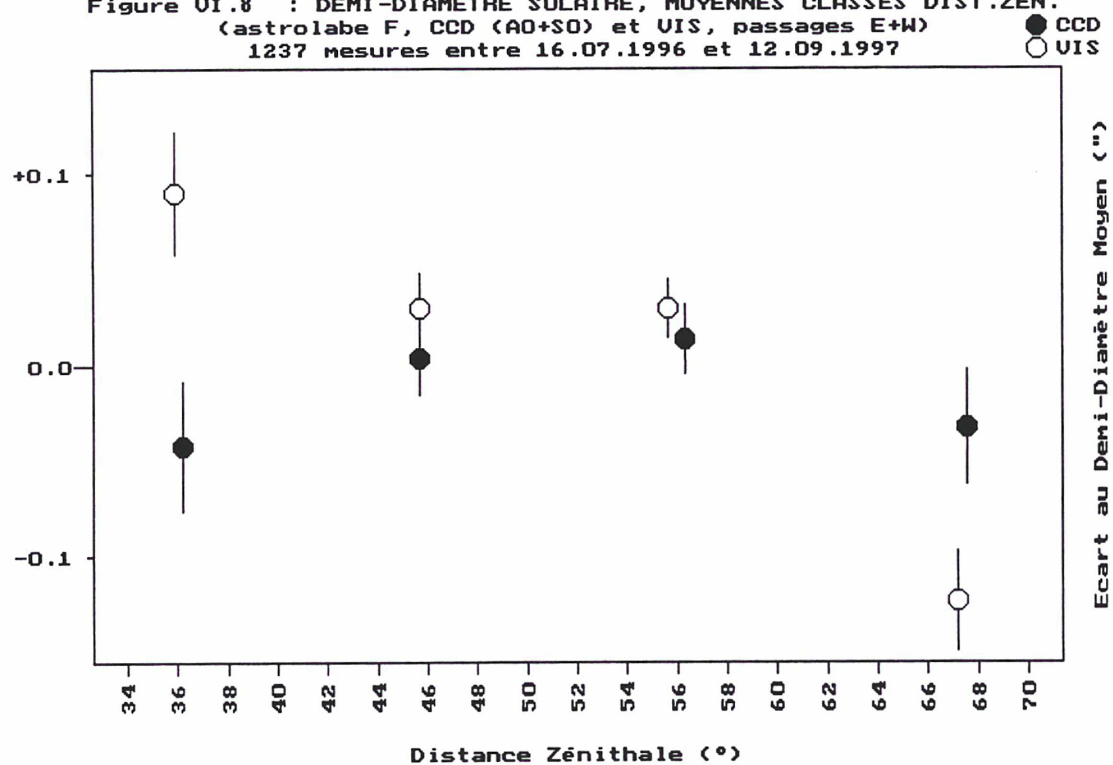


Figure VI.9 : DEMI-DIAMETRE SOLAIRE, MOYENNES CLASSES LAT.HELIO.  
(astrolabe F, CCD (A0+S0) et UIS, passages E+W)  
1237 mesures entre 16.07.1996 et 12.09.1997

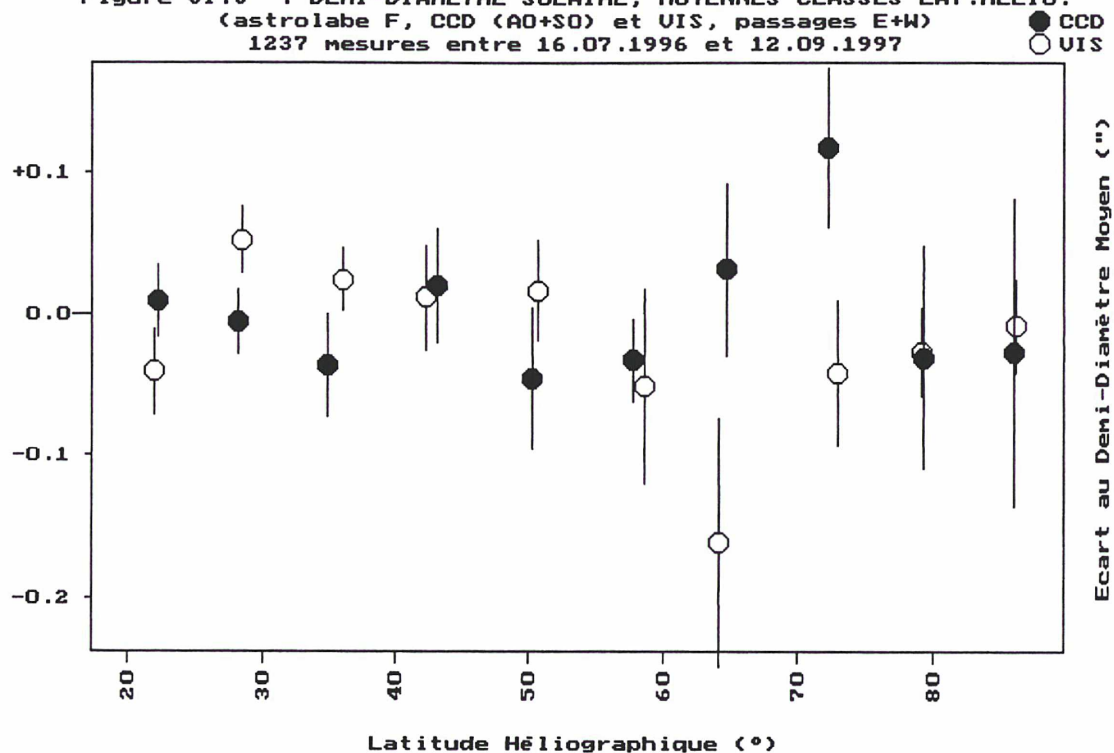


Figure VI.10 : MESURES VIS (1980-1997), ECARTS AU DEMI-DIAMETRE MOYEN  
(valeurs moyennes pour 10 classes de latitude héliographique)

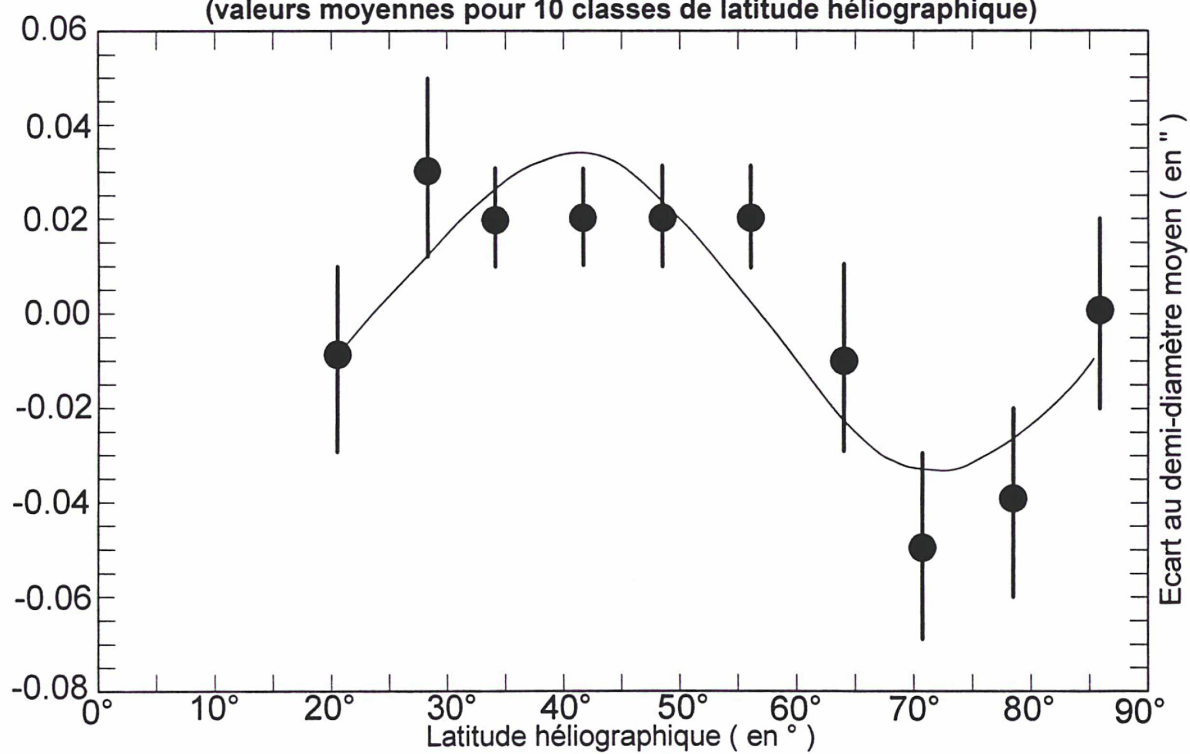




Figure VI.11 : DEMI-DIAMETRE SOLAIRE, MOYENNES 40 MESURES  
(astrolabe F, CCD (A0+S0) et UIS, passages E+W)  
1237 mesures entre 18.01.1996 et 09.10.1997

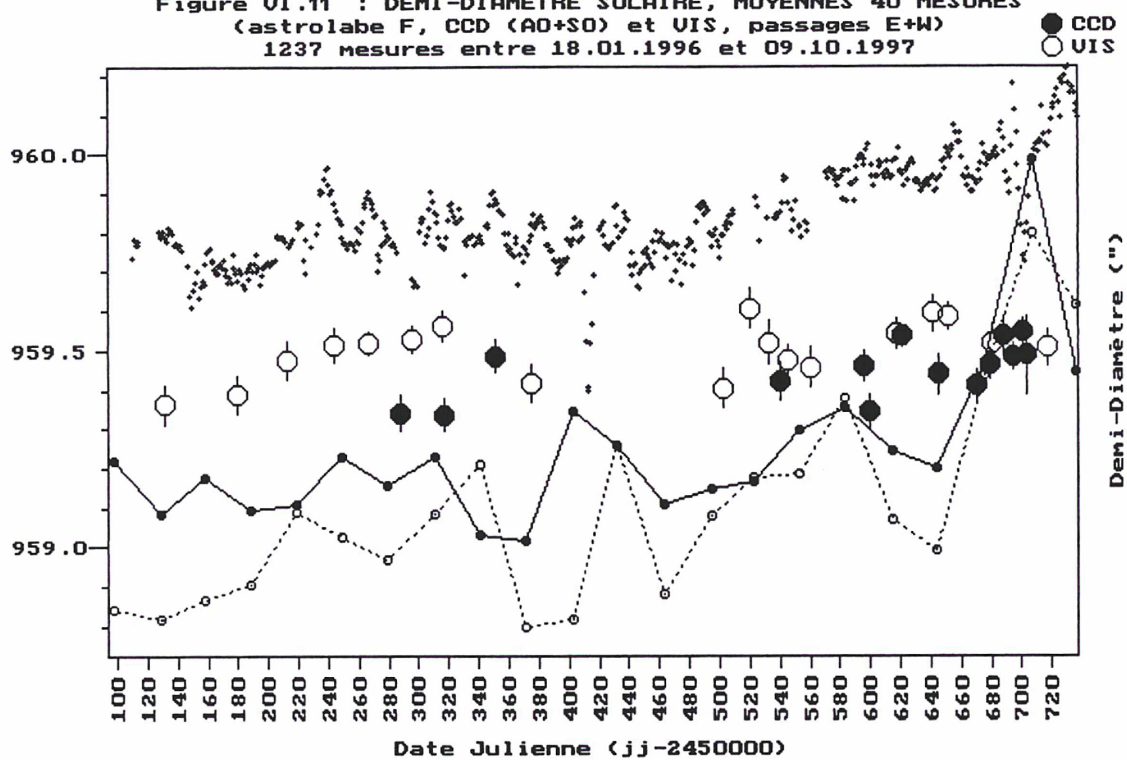
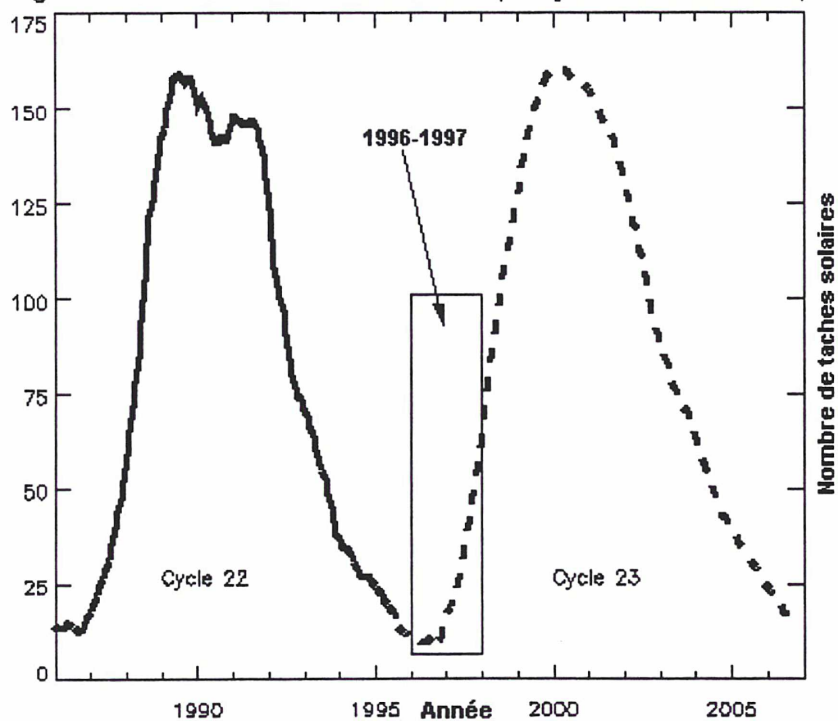
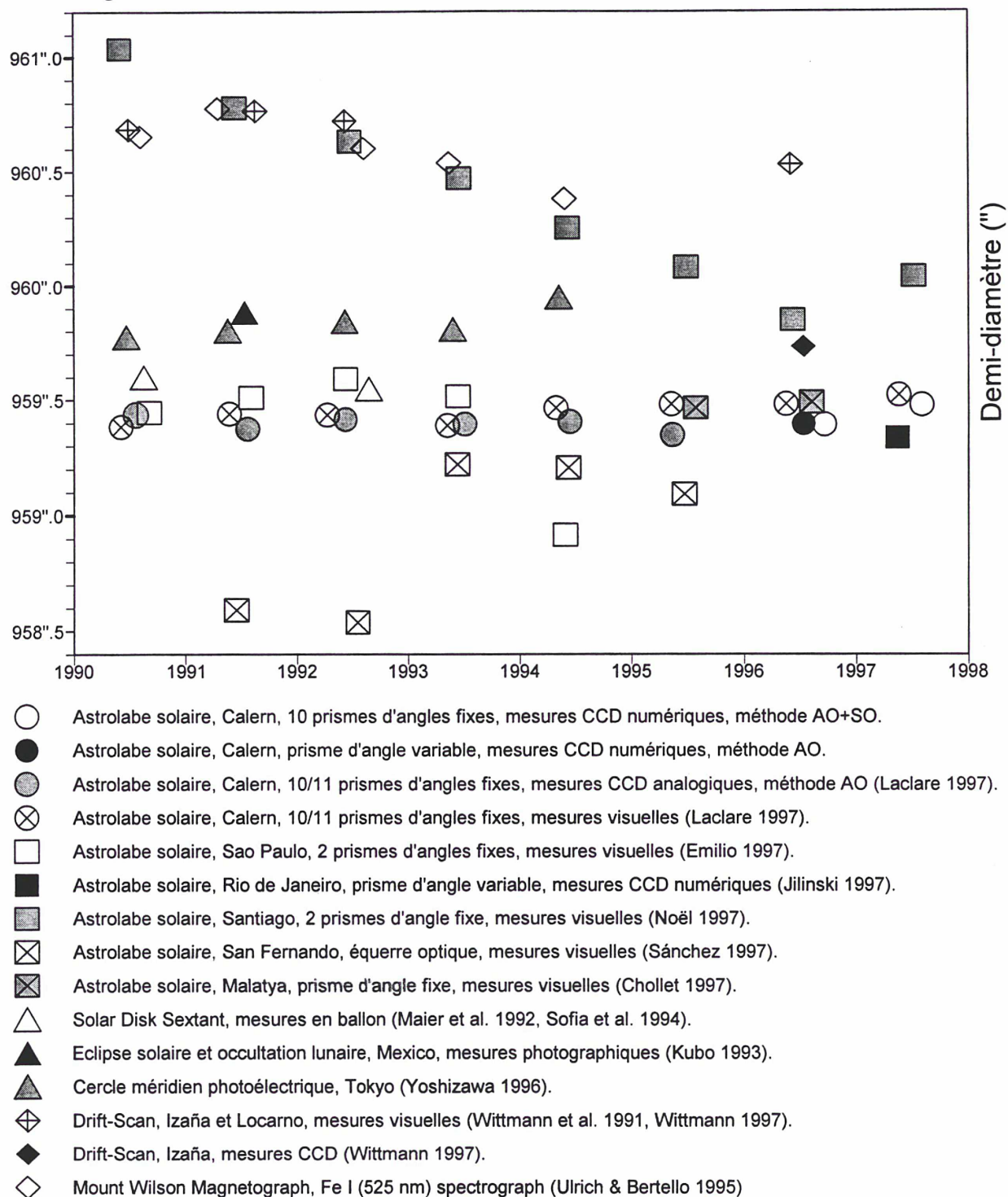


Figure VI.12 : NOMBRE DE TACHES SOLAIRES (les cycles solaires 22 et 23)



**Figure VI.13 : DEMI-DIAMETRE(S) SOLAIRE(S) ENTRE 1990 ET 1998**



## VI.2 – Comparaison avec d'autres résultats

La figure VI.13 représente les résultats disponibles des mesures de demi-diamètre solaire, faites avec des instruments au sol ou en ballon entre 1990 et 1998. Les valeurs sont des moyennes annuelles dans la plupart des cas, ou encore des moyennes sur des campagnes d'observation (c'est le cas des mesures "Solar Disk Sextant" et "Drift-Scan").



Les résultats qui m'ont été communiqués personnellement sont souvent des résultats préliminaires.

Deux des astrolabes solaires ont des résultats qui s'écartent des autres : l'astrolabe de Santiago et de San Fernando (les résultats de Santiago sont définitifs, tandis que ceux de San Fernando sont très préliminaires). Le premier utilise deux prismes d'angles fixes ( $z = 30^\circ$  et  $z = 60^\circ$ ), du même type que ceux de Calern, le deuxième est muni de deux équerres optiques ( $z = 45^\circ$  et  $z = 60^\circ$ ). Une caractéristique commune à ces deux astrolabes est que le filtre solaire est monté devant l'objectif (contrairement aux autres astrolabes), les prismes restant exposés à l'énergie solaire pendant l'observation (Sánchez et al. 1993, Noël 1998). On retrouve la même monture du filtre sur l'astrolabe de Malatya qui, situé dans un très bon site, n'a pas encore été utilisé de manière systématique (les deux valeurs représentées sont des moyennes de deux séries, d'environ 15 mesures visuelles chacune) (Chollet 1998).

Les résultats analysés ici montrent en général la même tendance (croissance du demi-diamètre apparent sur la période observée), à l'exception des mesures de Santiago, de Mount Wilson et de "*Drift-Scan*". L'instrument "*Mount Wilson Magnetograph*" donne des mesures du rayon solaire dans la ligne spectrale  $\text{Fe}_I$ , mais sur le disque solaire en entier, contrairement aux mesures des astrolabes, qui observent un diamètre défini par son inclinaison héliographique (Ulrich & Bertello 1995). Les mesures de "*Drift-Scan*" pourraient être affectées par des erreurs provenant des variations de distance focale : il s'agit d'un télescope Grégory-Coudé de grande distance focale ( $f=25.0$  m), l'optique de l'instrument n'étant pas protégée de l'énergie solaire. Enfin, la méthode utilisée ne fournit pas une mesure de zéro, comme dans le cas des astrolabes. Depuis 1996, des mesures CCD sont effectuées avec cette méthode (Wittmann 1997), mesures qui semblent se rapprocher de nos résultats.

Les mesures visuelles de Sao Paulo ont été effectuées par plusieurs observateurs, et les discordances qui apparaissent dans cette série peuvent être la conséquence des équations personnelles. Depuis 1994, cet instrument est en cours de modernisation, une caméra CCD a été installée, mais la série d'observations a été interrompue (LacLare 1997). Toujours au Brésil, l'astrolabe solaire de Rio de Janeiro a été modernisé ; équipé d'un prisme d'angle variable depuis maintenant plus d'une année, il fournit des mesures CCD numériques de diamètre solaire. Les résultats sont obtenus avec les mêmes programmes d'acquisition et de réduction que ceux élaborés à l'Observatoire de Calern, suite à une très bonne collaboration avec ce dernier.

L'instrument "*Solar Disk Sextant*" a été utilisé à deux reprises en ballon, avec d'excellents résultats, et un projet satellitaire a été proposé à la NASA ("*EUDOSSO*"), mais sans succès pour l'instant (Sofia et al. 1994, Paternò & Sofia. 1994).

En conclusion, cette comparaison succincte montre que, malgré la diversité des méthodes et des instruments utilisés pour ces observations, les résultats des mesures du demi-diamètre solaire sont cohérents (à quelques exceptions près). On remarquera qu'une bande de largeur de  $0,3$  contient les résultats des séries de mesures des astrolabes solaires de Calern, Sao Paulo, Rio de Janeiro et Malatya, et de "*Solar Disk Sextant*". Ces résultats



ne peuvent pas être analysés de manière globale, car chaque instrument et méthode a sa propre définition du rayon solaire observé. Au contraire, si on s'intéresse aux variations de la mesure, on remarque que des instruments et méthodes très différents (par exemple l'astrolabe solaire visuel de Calern et le cercle méridien photoélectrique de Tokyo), donnent des résultats équivalents. Pour éliminer les doutes concernant l'influence de l'atmosphère terrestre sur les mesures au sol, les mesures faites en dehors de cette atmosphère restent indispensables. Les instruments LOI et MDI embarquées sur le satellite SOHO peuvent fournir des mesures indirectes du rayon solaire, mais les erreurs instrumentales sont grandes et on ne dispose pas encore de résultats fiables (Appourchaux 1998, Sherrer 1998).

### VI.3 – Interprétation des résultats

L'interprétation des mesures du rayon solaire doit être faite avec beaucoup de prudence, à cause de quelques facteurs dont l'influence sur les résultats n'est pas bien connue. Ainsi, pour les instruments autres que l'astrolabe, les variations de focale instrumentale peuvent avoir des effets impossibles à déterminer sur les mesures. **La grande qualité des astrolabes solaires est qu'ils fournissent une mesure de zéro**, et en ce sens l'instrument est par construction de qualité métrologique, comme l'instrument Hipparcos d'ailleurs. En plus, du fait que l'observation des deux bords solaires successifs se fait à la même distance zénithale, l'influence d'une modélisation incomplète de la réfraction atmosphérique est minimisée.

Les analyses des mesures visuelles faites à l'astrolabe solaire de Calern, mettent en évidence la variation du demi-diamètre solaire apparent dans le temps. Ces études font apparaître plusieurs périodes : une période principale de 11 ans, liée au cycle solaire, ainsi que d'autres périodes secondaires de 1000, 300, 250, 27 jours (Laclare et al. 1996, Emilio 1997). La période de 1000 jours, qui reste inexplicable et qui avait une grande amplitude au début des mesures, semble s'amortir ces dernières années. Présente aussi dans la série de mesures de Sao Paulo, elle pourrait être un battement avec d'autres périodes constatées, ou bien avec la période de 80 ans de Gleissberg, insuffisamment connue (Frick et al. 1997). Approximativement les mêmes périodes apparaissent dans d'autres séries de mesures de diamètre solaire, de flux de neutrino, de luminosité solaire, de modes  $g$  (Emilio 1997). La variation du demi-diamètre solaire apparent semble corrélée avec d'autres paramètres d'observation ou phénomènes solaires :

- la latitude héliographique du diamètre observé (Laclare et al. 1996, Vigouroux 1996, Emilio 1997)
- la distance zénithale d'observation (Laclare et al. 1996, Emilio 1997, Noël 1998)
- l'activité solaire (opposition de phase avec le nombre de taches solaires), (Delache et al. 1993, Laclare et al. 1996)
- le flux de neutrino (Laclare et al. 1996)
- le décalage des fréquences acoustiques (modes  $p$ ), (Delache et al. 1993)

Comme les diverses séries de mesures de diamètre solaire apparent donnent des résultats assez différents, les variations de ce dernier restent un problème très controversé. Corrélativement se pose aussi le problème de l'existence d'un aplatissement du Soleil et de



ses variations avec le cycle solaire. A part une dilatation globale du Soleil en période de minimum d'activité, les mesures visuelles de Calern, ainsi que celles du Pic du Midi (héliomètre), semblent montrer une dilatation des zones royales (latitude héliographique  $45^\circ$ ), et une déplétion vers les zones de latitude  $80^\circ$ . Pour ces deux séries d'observations, l'étude des erreurs sur les mesures en fonction de la turbulence atmosphérique locale (paramètre de Fried), conduit à la même loi exponentielle. Ce fait serait une preuve que les variations trouvées ne sont pas d'origine atmosphérique, les deux sites étant bien distincts (Rozelot & Rösch 1996). Plus récent, F. Noël a analysé les mesures visuelles effectuées à Santiago (Chili), entre 1993 et 1997, et a trouvé la même variation du rayon apparent avec la latitude héliographique, que pour les mesures de Calern (Noël 1998).

D'autres phénomènes atmosphériques pourraient avoir des influences sur les mesures au sol, et en particulier de grandes oscillations stratosphériques, "*Quasi-Biennial Oscillations*" (QBO), qui semblent avoir des périodes proches de celles des mesures visuelles à l'astrolabe. L'étude des corrélations entre QBO et les variations du rayon solaire observé n'a pas fourni une réponse claire à cette question, à cause surtout de la difficulté d'une telle analyse (Sechaud 1994, Ribes et al. 1991). De même, des périodes allant de 50 jours jusqu'à 10 ans ont été trouvées dans l'évolution d'autres phénomènes atmosphériques ou géophysiques, qui semblent corrélées avec l'activité solaire (Djurovic et al. 1994, Kurbasova et al. 1997). Mais, la même variabilité apparente du rayon solaire observé a été obtenue, à partir de plusieurs instruments et méthodes d'observation, et dans des sites très éloignés l'un de l'autre (par exemple les séries de mesures de Calern, Tokyo et Sao Paulo).

Parmi les mesures modernes de diamètre solaire, la seule assez longue et homogène, est la série des observations visuelles de Calern. Pour résoudre les divers problèmes qui se posent, il faudrait d'abord pouvoir modéliser la réponse de l'unique observateur, ce qui est impossible. Comme c'est l'œil qui définit le bord solaire, il faut être prudent quant à l'origine solaire des variations observées du diamètre. Dans le cas de l'astrolabe, l'origine instrumentale de ces variations est à exclure, grâce à la méthode utilisée et à la stabilité de l'instrument. De plus, la très bonne corrélation (en opposition de phase), avec le cycle solaire reste troublante, et ne pourrait pas s'expliquer uniquement par des effets variables propres à l'observateur et/ou à l'instrument. Il faut noter ici qu'une autre longue série de mesures, celle de Mount Wilson, montre une bonne corrélation en phase avec le cycle solaire (Ulrich & Bertello 1995).

Le rayon et la luminosité du Soleil sont liés par la théorie, et comme les mesures d'irradiance montrent une variation avec le cycle solaire, le rayon devrait aussi varier. Mais, l'ordre de grandeur des variations observées du rayon laisse penser que d'autres processus, différents de l'évolution nucléaire, doivent être impliqués (Vigouroux 1996). Ainsi, si le bord observé se trouvait non pas sur la photosphère, mais un peu au dessus, dans les basses couches de l'atmosphère solaire, une influence de marée, par exemple suite à l'attraction de Jupiter, pourrait se faire sentir dans les mesures du rayon. N'oublions pas que l'orbite de Jupiter a aussi une période de 11 ans, et que **les marées de l'atmosphère solaire** pourraient être non négligeables.

Les granules et les facules qui se forment sur la photosphère peuvent aussi avoir une certaine influence sur le diamètre apparent. Comme la luminosité et la température



de la surface solaire influent sur la définition du bord observé, **une variation radiale des granules**, par exemple, pourrait certainement avoir des conséquences sur les résultats des mesures. Une variation en surface des granules avec le cycle solaire a été observée (amplitude d'environ  $0,1''$ ), mais on ne dispose pas encore d'informations sur une éventuelle variation radiale (Muller 1987).

Une autre question qui se pose, dans le cas des longues séries de mesures, est liée aux **phénomènes de dérive instrumentale**. Il a été remarqué sur la plupart des instruments astrométriques, en début d'une série de mesures, une période de durée variable durant laquelle les composants optiques et mécaniques se stabilisent. Ceci pourrait être le cas de la série de mesures visuelles de Calern mais, encore une fois, il n'y a pas de raison que la variation des mesures du diamètre, induite par une éventuelle dérive instrumentale, soit corrélée au cycle solaire. Il faut noter aussi **la possibilité d'existence d'une période d'apprentissage** pour l'observateur ; dans le cas des observations visuelles à l'astrolabe solaire, assez complexes, cette période peut être longue. Ainsi, on peut remarquer figure **VI.13**, que les mesures des astrolabes de San Fernando et Santiago convergent progressivement vers les résultats de Calern, ce qui pourrait s'interpréter en termes de dérive instrumentale et de période d'apprentissage. Il en a été de même, mais de façon moins nette, à Malatya (Chollet 1998).

## VI.4 – Conclusions

Les mesures CCD numériques du diamètre solaire ont été expérimentées pendant deux ans sur l'astrolabe solaire de Calern, et depuis plus d'une année sur celui de Rio de Janeiro. Utilisée sur l'astrolabe à prismes d'angles fixes de Calern, cette nouvelle méthode a donné également, avec une bonne précision, des résultats préliminaires de corrections à la position du Soleil (chapitre V.2.4, tableau V.4). Les écarts-types moyens, obtenus pour les 72 mesures CCD disponibles en double-passage, sont :

- $\sigma_{\Delta\alpha} = 0,014$
- $\sigma_{\Delta Y} = 0,140$
- $\sigma_{\Delta D} = 0,145$
- $\sigma_{obs} = 0,290$

Ces résultats, issus de mesures expérimentales, sont nettement meilleurs que ceux obtenus par ailleurs (par exemple ceux de Simeiz, Kolesnik 1995), et comparables aux résultats des mesures visuelles de Calern. Des calculs de correction aux éléments de l'orbite seront possibles, dès que les observations auront, comme dans le cas de la série de mesures visuelles, couvert un laps de temps suffisant.

Les résultats des mesures du rayon solaire apparent présentés ici, montrent que les observations CCD numériques peuvent fournir la précision astrométrique nécessaire aux applications astrophysiques. Cette expérience n'est qu'à son début, et de multiples améliorations sont envisageables, tant du point de vue technique que dans la réduction des mesures. L'instrument DORaySol, qui sera opérationnel en fin d'année à Calern, utilisera toute l'expérience acquise en deux ans de mesures CCD numériques. D'autres astrolabes



solaires dans le monde sont (ou seront bientôt) équipés de caméras CCD, et plusieurs campagnes d'observations du diamètre solaire sont en cours.

Les paramètres rendus accessibles par la méthode utilisée, fournissent des informations sur les effets de l'atmosphère terrestre (sur les mesures), et rendent possible leur élimination. Dans ce sens, une calibration des observations au sol avec d'autres mesures, faites hors-atmosphère, est nécessaire, et plusieurs projets spatiaux en cours permettront de le faire. Toutefois, les difficultés liées à l'interprétation de ces résultats ne sont pas négligeables. Pour cela, les mesures de diamètre et/ou aplatissement solaire doivent être poursuivies sur de longues périodes de temps, et avec des instruments et méthodes aussi différents que possible. Ainsi, les doutes qui existent aujourd'hui quant aux origines des variations observées dans les mesures, pourront peut-être être résolus.

L'étude des effets observationnels montre clairement (comme d'ailleurs toutes les analyses des observations au sol), que les instruments astrométriques devraient se trouver hors-atmosphère... Mais, dans le cas précis de la recherche des éventuelles variations du rayon et/ou aplatissement solaire, les observations doivent se poursuivre au sol (pour les raisons présentées dans le chapitre "*Introduction*" de ce travail).

## REFERENCES

- APPOURCHAUX T., 1998, *Communication personnelle*
- BROWN T.M., CHRISTENSEN-DALSGAARD J., 1998, "Accurate Determination of the Solar Photospheric Radius", *The Astrophysical Journal*, Lettre, proposé le 9 mars
- CHOLLET F., 1997, 1998, *Communication personnelle*
- DELACHE P., GAVRYUSEV V., GAVRYUSEVA E., LACLARE F., RÉGULO C., ROCA CORTÉS T., 1993, "Time correlation between solar structural parameters : *p*-mode frequencies, radius, and neutrino flux", *The Astrophysical Journal*, **407**, p. 801
- DJUROVIC D., PÂQUET P., BILLIAU A., 1994, "New indications for the solar origin of the 50-day cycle in the atmospheric circulation and Earth's rotation", *Astronomy and Astrophysics*, **288**, p. 335
- EMILIO M., 1997, "Estudo das variações do semi diâmetro solar", Tese de Doutorado - Instituto Astronômico e Geofísico - São Paulo
- FRICK P., GALYAGIN D., HOYT D.V., NESME-RIBES E., SCHATTEN K.H., SOKOLOFF D., ZACHAROV V., 1997, "Wavelet analysis of solar activity recorded by sunspot groups", *Astronomy and Astrophysics*, **328**, p. 670
- IRBAH A., LACLARE F., BORGNINO J., MERLIN G., 1994, "Solar diameter measurements with Calern Observatory astrolabe and atmospheric turbulence effects", *Solar Physics*, **149**, p. 213
- JILINSKI E., 1997, *Communication personnelle*
- JILINSKI E.G., PULIAEV S.P., PENNA J.L., ANDREI A.H., SINCEAC V., CHOLLET F., DELMAS C., 1997, "Solar Diameter Observations with Astrolabe at Observatório Nacional - Rio de Janeiro", *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, article accepté en novembre
- KOLESNIK Y.B., 1995, "Analysis of modern observations of the Sun and inner planets", *Astronomy and Astrophysics*, **294**, p. 874
- KUBO Y., 1993, "Position and radius of the Sun determined by solar eclipses in combination with lunar occultations", *Publications of The Astronomical Society of Japan*, **45**, p. 819

- KURBASOVA G.S., KORSUN A.A., RYAKHOVA L.V., RYBALOVA M.N., SHLIKAR G.N., 1996, "Statistical correlation between 10 - year variations of annual mean geodynamical, geophysical and heliophysical data", *Astronomy Reports*, **41/1**, p. 128
- LACLARE F., DELMAS C., COIN J.P., IRBAH A., 1996, "Measurements and variations of the solar diameter", *Solar Physics*, **166**, p. 211
- LACLARE F., 1997, *Communication personnelle*
- MAIER E., TWIGG L., SOFIA S., 1992, "Preliminary results of a balloon flight of the Solar Disk Sextant", *The Astrophysical Journal*, **389**, p. 447
- MULLER R., 1987, "Variabilité du Soleil", *Journal des Astronomes Français*, **31**, p. 7
- NECKEL H., 1995, "The solar radius derived from limb-darkening scans obtained in 1981 and from 1986 to 1990", *Solar Physics*, **156**, p. 7
- NOËL F., 1997, 1998, *Communication personnelle*
- PATERNÒ L., SOFIA S., 1994, "EUDOSSO : a space project for solar oscillations and long term variability relevant to climatic changes", *Solar Physics*, **152**, p. 303
- RIBES E., BEARDSLEY B., BROWN T.M., DELACHE PH., LACLARE F., KUHN J.R., LEISTER N.V., 1991, "The variability of the solar diameter", dans "The Sun in time" - University of Arizona Press - Tucson, AZ
- RÖSCH J., YERLE R., 1983, "Solar diameter(s)", *Solar Physics*, **82**, p. 139
- ROZELOT J.P., RÖSCH J., 1996, "Le Soleil change-t-il de forme ?", *Comptes Rendus Academie des Sciences Paris, Série II b*, **322**, p. 637
- SÁNCHEZ M., MORENO F., PARRA F., SOLER M., 1993, "Modification de l'astrolabe du R.O.A. Campagne expérimentale d'observation du Soleil en 1991", *Astronomy and Astrophysics*, **280**, p. 333
- SÁNCHEZ M., 1997, *Communication personnelle*
- SCHERRER P., 1998, *Communication personnelle*
- SECHAUD N., 1994, "Analyse des relations possibles entre les variations du diamètre solaire et l'atmosphère", Rapport de stage de DEA - Observatoire de Paris
- SOFIA S., HEAPS W., TWIGG L.W., 1994, "The solar diameter and oblateness measured by the solar disk sextant on the 1992 september 30 balloon flight", *The Astrophysical Journal*, **427**, p. 1048
- ULRICH R.K., BERTELLO L., 1995, "Solar-cycle dependence of the Sun's apparent radius in the neutral iron spectral line at 525 nm", *Nature*, **377**, p. 214
- VIGOUROUX A., 1996, "Etude de la variabilité solaire à long terme", Thèse de Doctorat - Université de Nice
- WITTMANN A.D., ALGE E., BIANDA M., 1991, "Recent results on the solar diameter", *Solar Physics*, **135**, p. 243
- WITTMANN A.D., 1997, "CCD - drift scan measurements of the solar diameter : methods and first results", *Solar Physics*, **171**, p. 231
- YOSHIZAWA M., 1996, "Solar semi-diameter variations observed with the Tokyo photoelectric meridian circle for the years from 1985 to 1994", dans "New Observational Techniques, Catalogues and Astrometry" - IAU Colloquium 165, Poland
- \*\*\* Données Facules : University Observatory Göttingen, 1998.  
Adresse Web <http://www.neptun.uni-sw.gwdg.de/sonne/results.html>
- \*\*\* Données Irradiance : NASA Earth Science (ACRIM II), 1998.  
Adresse Web <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/solar/irradiance/>



\*\*\* Données Sun spots : *IPS Radio & Space Services (Sydney)*, 1998.  
Adresse Web [http ://www.ips.gov.au/papers/richard/ssnpred.html](http://www.ips.gov.au/papers/richard/ssnpred.html)

## CHAPITRE VII – CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La publication des résultats des observations de Dicke (Dicke & Goldenberg 1967), qui remettait en cause la théorie de la relativité générale, a déclenché de vives passions. Ainsi, ces mesures ont motivé la naissance de multiples expériences dédiées aux mesures du rayon solaire. Une bibliographie abondante existe déjà, et elle continue à s'enrichir presque tous les jours, les dernières missions satellitaires fournissant une quantité impressionnante d'informations. De nombreuses séries de mesures au sol sont en cours, et l'analyse détaillée de leur résultats ne fait que commencer. En ce qui concerne le présent travail, nous serons obligés de nous limiter aux parutions bibliographiques antérieures au 12 mars 1998.

### VII. – Conclusions

Par son principe, l'astrolabe est l'un des instruments astrométriques les plus précis : il fournit une mesure de zéro, qui minimise toute erreur instrumentale. Par la méthode des hauteurs égales utilisée, les effets d'une modélisation incomplète de la réfraction atmosphérique sont également très limités. Dans sa variante solaire, l'astrolabe a fourni la plus longue et la plus homogène série d'observations du diamètre apparent du Soleil, à Calern en France, ainsi que d'autres séries, moins longues, dans le monde. Ces mesures ont fait l'objet de nombreuses analyses, mais l'interprétation des résultats obtenus a toujours été difficile, et cela pour au moins deux raisons :

- Le bord solaire observé n'avait pas une définition bien précise, et la stabilité de la réponse de l'observateur était incertaine.
- L'étude des effets des divers phénomènes (atmosphériques, instrumentaux) sur les mesures était malaisée, à cause du manque d'informations.

Nous avons présenté, dans ce travail, une nouvelle méthode CCD numérique d'observation du demi-diamètre solaire à l'astrolabe. Les résultats présentés ici montrent que, malgré le caractère expérimental des deux campagnes d'observations CCD, cette méthode peut, très avantageusement, remplacer les mesures visuelles. En plus d'une définition rigoureuse du bord solaire observé, la nouvelle méthode apporte des informations, inaccessibles aux mesures visuelles. Les qualités métrologiques du capteur CCD, ainsi que la stabilité de sa réponse, assurent les conditions nécessaires à la détection d'éventuelles variations du rayon solaire observé. Grâce aux paramètres observationnels rendus accessibles, les effets d'origines autres que solaire, pourront être évalués directement à partir des observations. Cela résoudrait les incertitudes liées aux causes non-solaires de la variabilité apparente du rayon observé. C'est cette possibilité qui a initié les travaux en cours à Paris, où un modèle du bord solaire, dépendant de paramètres physiques, commence à fonctionner (Chollet & Sinceac 1998).

Nous estimons que la faisabilité de la nouvelle méthode a été démontrée : la précision des mesures expérimentales du rayon solaire apparent est parmi les meilleures que l'on puisse atteindre à partir des observations au sol. Le faible coût de l'instrumentation



nécessaire, la possibilité d'automatisation complète, ainsi que l'existence d'un réseau global d'astrolabes solaires, font de cette méthode le candidat idéal pour mesurer le diamètre solaire. La multitude d'informations que les mesures CCD fournissent, peut nous aider à mieux comprendre non seulement des phénomènes solaires, mais aussi terrestres. Ainsi, l'analyse détaillée des images CCD rend possible l'étude de variations éventuelles dans l'atmosphère terrestre, conjointement à l'analyse des phénomènes solaires.

## VII.2 – Perspectives

La nouvelle méthode CCD numérique de mesure du demi-diamètre solaire apparent est à présent au point, et on peut envisager de démarrer des programmes d'observations, sur les astrolabes solaires qui existent dans le monde. Les logiciels d'acquisition et de traitement des images CCD, que j'ai présenté dans ce travail, sont déjà utilisés sur plusieurs astrolabes. La méthode de détermination des points du bord solaire sur les images est en cours de modification : le modèle développé à l'Observatoire de Paris est testé actuellement sur les observations de Calern de 1996 - 1997, et il sera décrit prochainement dans un article. Des résultats préliminaires montrent que ce modèle prend en compte les effets de l'atmosphère terrestre, ainsi que les effets indésirables induites par la méthode par dérivation (chapitres IV.1.5, IV.2.1, Chollet & Sinceac 1998). Ainsi, pour un échantillon de 400 mesures faites avec obturateur tournant sur l'astrolabe F, le demi-diamètre moyen calculé avec le modèle est plus grand de  $0''.18$  par rapport au résultat de la dérivation. A remarquer que ce résultat correspond à la valeur moyenne du diamètre, obtenu par dérivation et extrapolé à un paramètre de Fried idéal (chapitre VI.1.2, page VI-10).

Plusieurs séries de mesures CCD sont déjà en cours, d'autres commenceront bientôt :

- **Calern (France)** : deux campagnes d'observations CCD ont été faites en 1996 et 1997 à l'astrolabe solaire à 10 prismes d'angles variables. Elles seront probablement continuées, en parallèle avec les mesures visuelles. Les premiers essais du prototype de l'instrument DORaySol auront lieu durant l'été 1998 (Lalare 1998).
- **Feira de Santana (Brésil)** : récemment installé, un astrolabe solaire devrait commencer une série de mesures CCD numériques en 1998 (Poppe 1997).
- **Malatya (Turquie)** : l'astrolabe solaire est en cours de déménagement, et il sera modernisé (caméra CCD), une fois installé sur le nouveau site (Chollet 1998).
- **Rio de Janeiro (Brésil)** : une série d'observations a démarré en mars 1997, à l'Observatoire National, avec un astrolabe à prisme d'angle variable. L'acquisition et la réduction des mesures se font avec les programmes développés à Paris et Calern, et les premiers résultats sont très encourageants (Jilinski et al. 1997).
- **San Fernando (Espagne)** : des observations CCD se font depuis 1995, avec un astrolabe à équerre optique, et les mesures sont en cours de réduction à l'Observatoire de Paris (Sánchez 1998).
- **Santiago (Chili)** : des observations CCD sont en cours d'expérimentation, avec un astrolabe à 2 prismes d'angles fixes, similaire à celui de Malatya (Nöel 1998).
- **Sao Paulo (Brésil)** : l'étude d'une méthode CCD numérique d'acquisition et traitement d'image est en cours, et une série de mesures devrait commencer très



bientôt (Leister 1997).

- **Simeiz (Russie)** : un astrolabe solaire à prisme transparent est utilisé pour des observations visuelles, et des études de modernisation sont en cours (Kolesnik 1996).

- **Tamanraset (Algérie)** : un astrolabe solaire équipé d'une caméra CCD devrait être installé en 1998 sur ce site (Irbah 1997).

La liste ci-dessus n'est pas exhaustive : d'autres astrolabes de Danjon existent dans le monde, et plusieurs équipes s'orientent vers leur transformations afin d'observer le Soleil. Suite aux travaux de F. Chollet et F. Laclare, la bonne répartition géographique de ces instruments a fait naître l'idée d'un réseau international d'astrolabes solaires (Working Group Astrolabes, Commission 8 de l'UAI). Grâce à la méthode mise au point, le traitement centralisé et la comparaison des observations devient possible : des discussions ont eu lieu, dans ce sens, à la dernière Rencontre Brésilienne d'Astronomie Fondamentale (Rio de Janeiro, novembre 1997). Les observations simultanées du rayon solaire, avec des instruments similaires et avec la même méthode d'observation, deviennent ainsi possibles. L'influence des effets d'origine terrestre sera plus aisément mise en évidence, et des mesures de calibration faites hors-atmosphère pourraient apporter (si elles sont disponible), des informations supplémentaires. L'instrument DORaySol de Calern a été prévu pour observer à plusieurs longueurs d'onde, afin de préserver la compatibilité avec les mesures de futures missions satellitaires ; cet instrument est compact, et il a été conçu comme un instrument itinérant. Si les essais qui auront lieu cet été donnent de bons résultats, l'utilisation de DORaySol sur plusieurs sites devient envisageable.

Plusieurs études sont en cours, afin d'améliorer les performances actuelles de l'instrument à CCD. A l'Observatoire de Paris est à l'étude la construction d'une carte d'acquisition des images numériques, qui donnera l'accès directement à l'information des pixels physiques de la CCD, sans passer par le signal vidéo (ce qui augmentera la qualité des images). Plusieurs équipes étudient la faisabilité d'un prisme à une image, dont l'utilisation apporterait un gain important de résolution aux images numériques. De tels prismes sont déjà utilisés pour des observations des étoiles, en Pologne et en Roumanie, avec de bons résultats (Kurzinska 1998, Popescu 1998). Le modèle prototype du prisme d'angle variable, utilisé à Calern et à Rio de Janeiro, sera amélioré, et équipera plusieurs astrolabes solaires à CCD (Lacare 1998).

Conjointement aux améliorations techniques, de nouvelles méthodes de traitement des images du Soleil se développent. En Algérie, une méthode de nettoyage des images par traitement en ondelettes est à l'étude, et sera appliquée aux images de Calern dès que possible (Irbah 1997). A Paris, un modèle nouveau de bord solaire sur les images CCD, capable de corriger les effets de l'atmosphère terrestre, est en essais actuellement (Chollet & Sinceac 1998). Enfin, l'équipe de Sao Paulo développe indépendamment une méthode originale d'acquisition et de traitement des images (Leister 1997).

Le Soleil est actuellement l'un des corps célestes les plus étudiés en astrométrie et, grâce à l'avance technique et scientifique des dernières décennies, nous entrons dans une époque où beaucoup de mesures à haute résolution seront disponibles. Pour répondre aux diverses questions que les résultats des mesures posent, des études simultanées de tous les



paramètres solaires accessibles aux observations seront nécessaires. Plusieurs programmes d'observations, présents ou futurs, peuvent collaborer à de telles analyses :

- **PSPTP**, un programme d'observation photométrique à haute résolution de l'irradiance solaire totale a été mis en place, "*Precision Solar Photometric Telescope Program*", et il sera constitué à terme de trois télescopes, installés sur des sites différents (Vigouroux 1996).
- Le télescope **THEMIS** ("*Télescope Héliographique pour l'Etude du Magnétisme et des Instabilités Solaires*", Observatoire de Tenerife - Canaries), fournit depuis 1996 des observations des structures fines du champ magnétique solaire.
- L'instrument **MDI** ("*Michelson Doppler Imager*"), à bord de SOHO, enregistre depuis 1996 des mesures de brillance du limbe solaire, et de la fonction d'assombrissement centre-bord (Kuhn et al. 1996). Des résultats très récents ont permis de mettre en évidence une variation latitudinale de 1.5°K de la température de la surface du Soleil, qui semble corrélée avec le cycle magnétique (Kuhn et al. 1998). Par comparaison des fréquences des modes  $f$  observées et théoriques, cet instrument permet également de réévaluer le paramètre rayon des modèles solaires (Schou et al. 1997). Enfin, MDI donne des mesures différentielles du rayon solaire, mais la taille des pixels utilisés (1'',98), ainsi que des difficultés de calibration de l'instrument, font que ces mesures sont peu fiables pour l'instant (Scherer 1998).
- **LOI** ("*Luminosity Oscillations Imager*"), est un instrument qui fait partie de l'expérience **VIRGO** ("*Variability of Solar IRadiance and Gravity Oscillations*"), à bord de SOHO. Son objectif scientifique est la détection des modes  $p$  et  $g$  du Soleil, ainsi que l'étude de la variabilité de l'irradiance, due aux régions actives et à d'autres phénomènes (Appourchaux et al. 1997). Une mesure indirecte du rayon solaire est également disponible, mais, comme dans le cas du MDI, les résultats sont affectés par des erreurs instrumentales difficiles à évaluer (Appourchaux 1998).
- **SENEX**, un projet satellitaire d'observations de l'irradiance et du rayon solaire a été proposé à la NASA en 1996, mais les détails de ce programme n'ont pas encore été rendus publics (Vigouroux 1996, communication personnelle).
- **PICARD**, un autre projet de mission satellitaire, a été proposé à l'ESA, et sa réalisation est en bonne voie (Damé 1998, Laclare 1998). Il s'agit d'un télescope 12 cm × 4 cm × 2.5 m, muni d'un capteur CCD 2000 × 2000 pixels (mesures de flux en UV et diamètre solaire), et de deux radiomètres (mesures d'irradiance). Les mesures du diamètre solaire, calculé à partir des images du disque complet ( $\lambda = 220$  nm), pourraient être utilisées pour calibrer les mesures au sol fournies par l'instrument DORaySol. L'instrument PICARD devrait être lancé dans 5 ans, quand DORaySol sera complètement opérationnel (Laclare 1998).

Le dernier projet, PICARD, est prévu de fonctionner conjointement aux mesures au sol effectuées avec l'instrument automatisé DORaySol. La précision annoncée des mesures de diamètre solaire (de l'ordre de 0'',0001), permettra la reconstruction totale du limbe, ce qui en fera un instrument capable de déterminer le moment quadripolaire solaire, dont la valeur reste encore imprécise (Damé 1998). Avant son lancement, une campagne de comparaison



des mesures de PICARD, de DORaySol et de l'astrolabe solaire à prismes d'angles variables, est prévue sur le site de l'Observatoire de Calern (Damé 1998, Laclare 1998). Cela permettra de raccorder les mesures au sol avec les mesures spatiales, étendant ainsi le champ d'analyse vers les mesures passées par élimination de la signature atmosphérique. Les mesures simultanées de diamètre, rotation différentielle et constante solaire, effectuées avec PICARD, permettront une caractérisation complète de l'activité solaire. En même temps, la relation constante solaire - diamètre pourra être établie, et une surveillance à long terme de la constante solaire, de nature purement géométrique, est envisageable (Damé 1998). Les modes  $g$ , que les instruments de SOHO n'ont pas encore mis en évidence, pourront, grâce à leur signature photosphérique non nulle, être identifiés par PICARD, qui se propose cela comme objectif sismologique principal.

Concernant les mesures de l'aplatissement solaire (qui nécessitent des instruments de métrologie fine), l'**HELIOMETRE**, installé au Pic du Midi, fournit d'excellents résultats depuis 1993 (Rozelot & Rösch 1997). L'instrument **SOLAR DISK SEXTANT** (mesures du diamètre et de l'aplatissement du Soleil), après quelques missions en ballon, a été proposé pour une mission satellitaire (**EUDOSSO**), mais sans résultat pour l'instant (Paternò & Sofia 1994). Enfin, les autres séries de mesures au sol seront continuées. A part les astrolabes solaires, qui font des mesures absolues de rayon solaire, d'autres méthodes d'observations ont adopté la méthode CCD numérique. Par exemple, la série de mesures **DRIFT-SCAN** utilise, depuis 1994, des acquisitions numériques, en parallèle aux mesures visuelles (Wittmann 1997).

## REFERENCES

- APPOURCHAUX T., ANDERSEN B.N., FRÖHLICH C., JIMÉNEZ A., TELLJOHANN U., WEHRLI C., 1997, "*In-flight performance of the VIRGO luminosity oscillations imager aboard SOHO*", *Solar Physics*, **170**, p. 27
- APPOURCHAUX T., 1998, *Communication personnelle*
- CHOLLET F., 1998, *Communication personnelle*
- CHOLLET F., SINCEAC V., 1998, "*Emploi d'un modèle sémi-empirique des images du bord solaire pour la détermination de son diamètre*", *Astronomy and Astrophysics*, article en préparation
- DAMÉ L., 1998, "*PICARD*", *Proposition faite à L'ESA*, Organisme proposant : Institut Pierre-Simon Laplace
- DICKE R.H., GOLDENBERG H.M., 1967, "*Solar oblateness and general relativity*", *Physical Review Letters*, **18/9**, p. 313
- IRBAH, 1997, *Communication personnelle*
- JILINSKI E.G., PULIAEV S.P., PENNA J.L., ANDREI A.H., SINCEAC V., CHOLLET F., DELMAS C., 1997, "*Solar Diameter Observations with Astrolabe at Observatório Nacional - Rio de Janeiro*", *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, article accepté en novembre
- KOLESNIK Y.B., 1996, "*Three campaigns of solar observations with an astrolabe at Simeiz*", *Dynamics, Ephemerides and Astrometry of the Solar System – Symposium no. 172 de l'U.A.I. - Paris*



- KUHN J.R., BOGART R., BUSH R.I., SÀ L., SCHERRER P., SCHEICK X., 1996, "*Precision solar astrometry from SOHO/MDI*", dans "*Sounding Solar and Stellar Interiors*" – IAU Symposia 181, France
- KUHN J.R., BUSH R.I., SCHEICK X., SCHERRER P., 1998, "*The Sun's Shape and Brightness*", *Nature*, article à paraître prochainement
- KURZINSKA K., 1998, *Communication personnelle*
- LACLARE F., 1998, *Communication personnelle*
- LEISTER N.V., 1997, *Communication personnelle*
- NOËL F., 1998, *Communication personnelle*
- PATERNÒ L., SOFIA S., 1994, "*EUDOSSO : a space project for solar oscillations and long term variability relevant to climatic changes*", *Solar Physics*, **152**, p. 303
- POPESCU R., 1998, "*Adaptation des caméras CCD aux instruments astrométriques de l'Observatoire de Bucarest. Application à l'astrolabe de Danjon*", Thèse de Doctorat (en cours) – Observatoire de Bucarest & Observatoire de Paris
- POPPE P.C.R., 1997, *Communication personnelle*
- ROZELOT J.P., RÖSCH J., 1997, "*An upper bound to the solar oblateness*", *Solar Physics*, **172**, p. 11
- SÁNCHEZ M., 1998, *Communication personnelle*
- SCHERRER P., 1998, *Communication personnelle*
- SCHOU J., KOSOVICHEV A.G., GOODE P.R., DZIEMBOWSKI W.A., 1997, "*Determination of the Sun's seismic radius from the SOHO Michelson Doppler Imager*", *The Astrophysical Journal*, **489**, p. L197
- VIGOUROUX A., 1996, "*Etude de la variabilité solaire à long terme*", Thèse de Doctorat – Université de Nice
- WITTMANN A.D., 1997, "*CCD - drift scan measurements of the solar diameter : methods and first results*", *Solar Physics*, **171**, p. 231

# ANNEXES





## A.1 – LES CAMERAS CCD UTILISEES

1). **LA CAMERA COHU 4710** a été utilisée sur l'astrolabe à prisme d'angle variable (pour les premiers deux jours d'essais), puis en exclusivité sur l'astrolabe à prismes d'angles fixes. C'est la même caméra qui a été employée pour les mesures analogiques de F. Laclare. D'autres astrolabes solaires qui font des mesures CCD sont équipés du même modèle de caméra (à Rio de Janeiro, San Fernando, Santiago). C'est une caméra vidéo robuste, à *transfert de trame* (qui fait office d'obturateur électronique), avec les caractéristiques techniques suivantes :

- dimensions de la matrice CCD :  $6,4 \times 4,8$  mm (standard 1/2 inch)
- nombre de pixels :  $699(H) \times 576(V)$
- dimensions des pixels :  $9,2 \mu m(H) \times 8,4 \mu m(V)$
- sensibilité : 0,04 Lux (avec contrôle automatique du gain)
- contrôle automatique du gain : 6 dB gain variable
- rapport signal/bruit : 56 dB (gamma 1, gain 0 dB), non-pondéré, largeur de bande 8 MHz
- échelle de gris : résolution TV EIA 1956
- résolution TV :  $525(H) \times 415(V)$  lignes TV
- temps de pose pour une demi-trame : 20 ms

2). **LA CAMERA PULNIX TM6EX** a été utilisée uniquement sur l'astrolabe à prisme d'angle variable. C'est une caméra vidéo à *transfert interligne*, munie d'un "shutter" électronique qui permet le choix du temps de pose. Pour pouvoir utiliser les plus courts temps de pose, chaque pixel est muni d'une micro-lentille, ce qui accroît leur sensibilité. Le contrôle du gain peut être automatique ou manuel. Ci-dessous, les caractéristiques techniques de cette caméra :

- dimensions de la matrice CCD :  $6,4 \times 4,8$  mm (standard 1/2 inch)
- nombre de pixels :  $752(H) \times 582(V)$
- dimensions des pixels :  $8,6 \mu m(H) \times 8,3 \mu m(V)$
- éclaircissement minimal : 1 Lux
- contrôle automatique du gain : 16 dB standard, 32 dB maximum
- gamma : 1 ou 0,45
- rapport signal/bruit : 50 dB (gain 0 dB)
- échelle de gris : résolution TV EIA 1956
- résolution TV :  $560(H) \times 420(V)$  lignes TV
- temps de pose :  $1^s/60$ ,  $1^s/125$ ,  $1^s/250$ ,  $1^s/500$ ,  $1^s/1000$ ,  $1^s/2000$ ,  $1^s/4000$ ,  $1^s/10000$

La figure **A.1** montre la sensibilité spectrale des deux caméras CCD, et sur la figure **A.2** il y a la transmission des filtres utilisés avec les deux caméras (850 nm sur l'astrolabe **V** et 535 nm sur l'astrolabe **F**).



## A.2 – MISE AU POINT DE L'ASTROLABE SOLAIRE CCD

1). **LE CALAGE HORIZONTAL** de l'astrolabe nécessite une attention spéciale, et se fait à l'aide de trois vis de calage qui soutiennent le corps de l'instrument. En effet, si l'ensemble instrumental ne tourne pas dans un plan horizontal, la rotation de l'astrolabe en azimut entraîne le dérèglement de l'orientation du prisme (que l'on fait avant chaque passage d'un premier bord). Après le passage d'un premier bord, l'astrolabe doit changer d'azimut pour observer le passage du deuxième bord. L'utilisation normale de l'astrolabe peut dégrader en temps ce réglage, qui doit être vérifié au moins au début des campagnes annuelles d'observations (un niveau thorique est prévu à cet effet).

2). **LA MISE EN PLACE DE LA CAMERA CCD** est assez délicate : la matrice CCD doit se trouver dans le plan focal, centrée sur l'axe optique de l'instrument, et avec ses colonnes parallèles aux repères horizontaux du réticule de l'oculaire. La méthode la plus précise est d'utiliser les images du bord solaire quand il se trouve près du méridien, et son passage dans le champ de l'instrument dure plus longtemps. Sinon, il faut utiliser une lunette d'autocollimation (placé sur la platine du prisme), mais comme l'instrument n'est pas prévu pour un tel réglage, cette méthode est assez fastidieuse. Il fallait donc trouver quelque chose de plus expéditif. Pour obtenir la même orientation de la matrice CCD dans l'axe optique que celle du réticule de l'oculaire, je me suis servi des défauts optiques du Wollaston. En repérant l'un de ces défauts dans le réticule de l'oculaire, on oriente la CCD de tel façon que le défaut ait la même position dans le repère de la matrice. A cause du fait que la platine qui soutient la caméra et l'oculaire n'a pas une position fixe (pour chaque passage on doit permuter l'oculaire avec la CCD), il faut vérifier périodiquement ce réglage. La figure **A.3** schématise le principe de ce réglage. Les flèches indiquent le sens de la rotation ou translation nécessaire de la matrice CCD.

3). **DIAPHRAGME**. A cause des multiples réflexions subies par le faisceau entrant dans l'objectif (Wollaston, transporteur d'image, prisme de renvoi...), il est nécessaire de diaphragmer le faisceau sortant. En effet, si on fait entrer un faisceau laser dans l'objectif, on obtient à la sortie de l'oculaire un nuage de points, suite aux réflexions incontrôlables. Un diaphragme circulaire d'ouverture d'environ 7 mm a été placé à  $\sim 25$  mm devant la matrice CCD, son positionnement demandant également beaucoup de patience. La figure **A.4** montre, sur une image complète, les conséquences d'un mauvais positionnement du diaphragme.

4). **FILTRAGE**. Enfin, la lumière doit être filtrée, et un filtre coupant le rouge a été placé devant le capteur CCD. Sur l'astrolabe à prisme d'angle variable a été utilisée un filtre à 850 nm, et sur l'astrolabe à prismes d'angles fixes a été utilisé un filtre à 535 nm, les deux filtres ayant une large bande passante. La longueur d'onde résultante est le produit des transmissions du filtre solaire (qui n'est pas neutre), de l'optique de l'astrolabe, du filtre de la caméra et de la réponse de la matrice CCD (fig. **A.2**). Ainsi, les bandes passantes sont centrées vers 550 nm pour l'astrolabe à prismes d'angles fixes, et vers 800 nm pour l'astrolabe à prisme variable. La différence provient surtout de la transmission des filtres solaires utilisés.

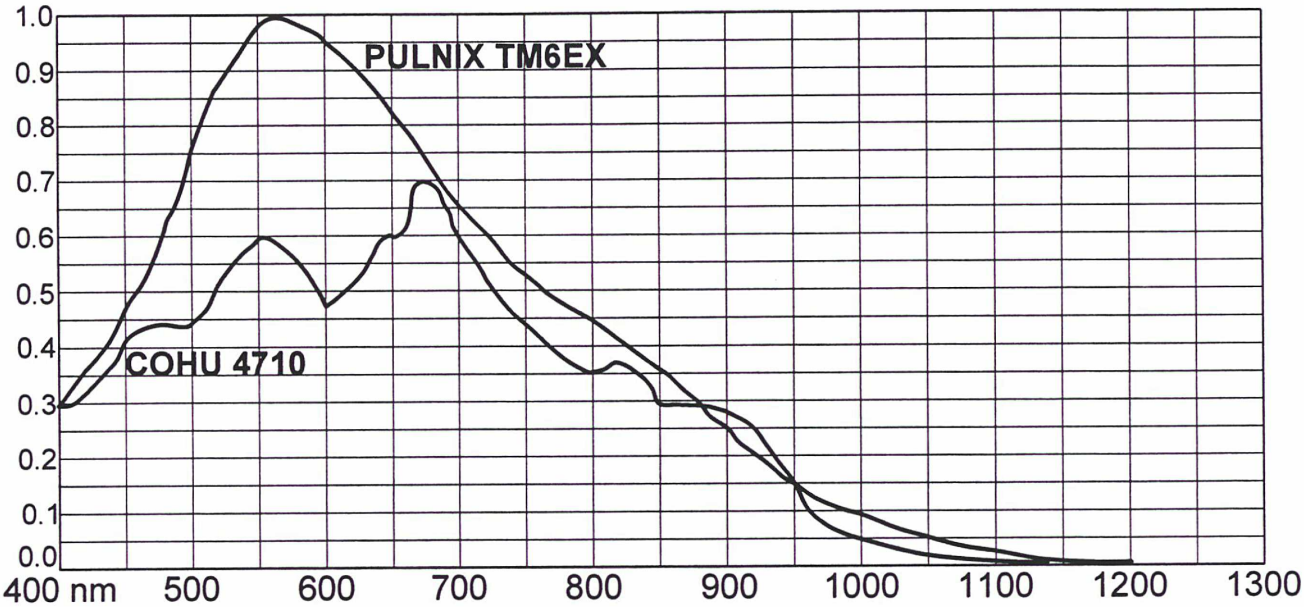


Fig. A.1. Sensibilité spectrale des caméras CCD utilisées.

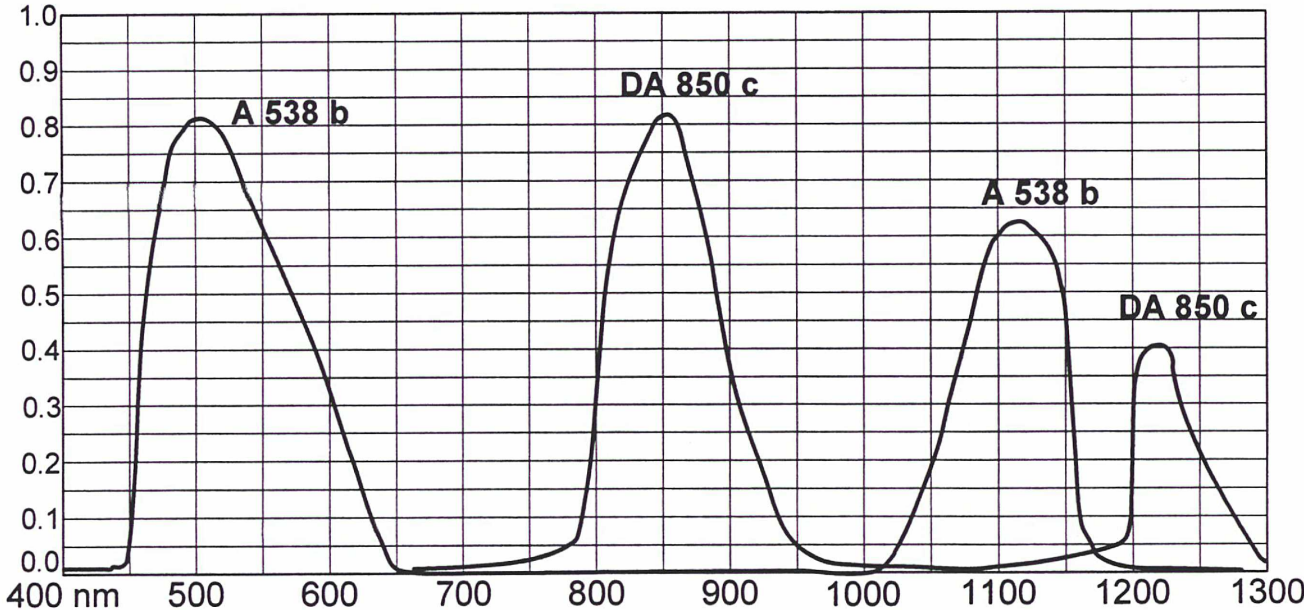
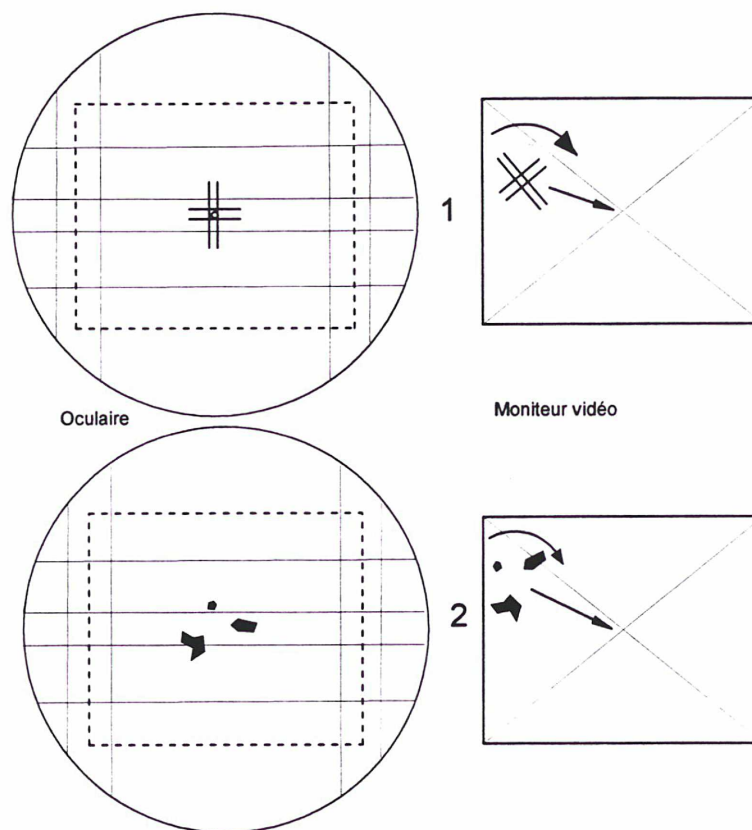


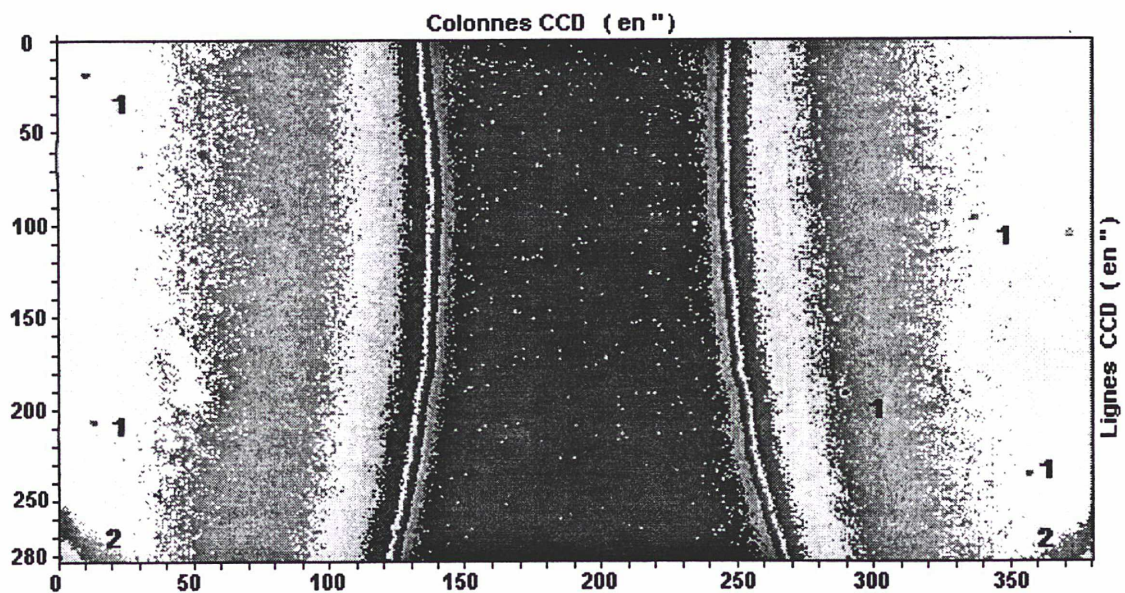
Fig. A.2. Transmission des filtres utilisés avec les caméras CCD.





**Fig. A.3. Positionnement de la caméra CCD.**

**1** image du réticule de la lunette d'autocollimation dans l'oculaire et sur la matrice CCD **2** image d'un défaut du Wollaston dans l'oculaire et sur la matrice CCD



**Fig. A.4. Défauts optiques sur une image complète.**

**1** tâches sur le Wollaston ou sur la matrice CCD **2** le diaphragme mal positionné

## A.3 – PROGRAMMES D'ACQUISITIONS NUMERIQUES

L'ordinateur utilisé à Calern pour les acquisitions est un PC 486/DX-33 MHz, avec 8 Mo de mémoire vive. Les programmes, écrites en langage Pascal, sont utilisés sous l'environnement MS-DOS 6.22, après compilation avec Borland Pascal 7. Ici, le fonctionnement des deux variantes des programmes d'acquisition sont présentés :

- **Programme ACQIMG0.PAS** (acquisition des images fenêtrées 256×101 pixels, avec obturateur tournant).
- **Programme ACQIMG1.PAS** (acquisition des images complètes 256×512 pixels, sans obturateur tournant).

A la fin des observations, le disque dur de l'ordinateur contient autant de fichiers d'images que de bords observés. Pour éviter les pertes d'informations et faciliter leur utilisation ultérieure, les images ne sont pas compressées. Dans le cas des images fenêtrées, chaque image fait 25.3 Ko, donc on a besoin de 5.9 Mo libres sur le disque dur pour un passage du Soleil par chaque distance zénithale (pour 120 images/bord). Les images complètes sont encore plus encombrantes (chacune fait 128 Ko), mais elles contiennent les deux images directes et réfléchies du bord solaire. Dans ce cas 15 Mo libres sont nécessaires pour chaque distance zénithale (pour 60 images/bord).

Avec l'astrolabe à 11 prismes d'angles fixes de Calern on peut mesurer jusqu'à 22 passages par jour, qui nécessitent environ 130 Mo dans le premier cas et 330 Mo dans le deuxième. Le prisme d'angle variable permet d'observer jusqu'à 60 passages par jour, soit 354 Mo ou 900 Mo d'informations seront stockées sur le disque dur de l'ordinateur. Cela impose le vidage du disque dur, qui doit être disponible pour le jour suivant : les acquisitions sont archivées sur un autre support, pour être ensuite analysées. Actuellement, l'archivage se fait sur des CDROM de 650 Mo (ils peuvent donc contenir environ 100 observations de passages du Soleil chacun).

1). **LE PROGRAMME ACQIMG0** a été utilisée sur les deux astrolabes solaires. La carte chronomètre reçoit les signaux de 1 MHz et de 1 Hz en provenance de l'horloge à césium du service de l'heure de l'observatoire, ce qui assure une résolution de 10  $\mu$ s dans la datation des images (d'après la documentation de la carte).

Les programme vérifie d'abord que toutes les connections sont faites (carte chrono, carte vidéo, caméra CCD) et initialise les deux cartes (synchronisation de la carte vidéo, adressage des mémoires, etc). Ensuite, la date de l'ordinateur est mise à jour par l'observateur. C'est cette date, suivie d'un numéro d'ordre, qui donnera le nom des fichiers des images.

L'opération suivante est la mise à l'heure de la carte chrono, à partir d'une horloge de référence. Une fois cette opération accomplie, la carte chrono doit suivre l'horloge de référence pendant le déroulement des observations, jusqu'à l'arrêt du programme. Pour vérifier son bon fonctionnement, la lecture de la carte peut se faire à tout moment, même entre deux passages.

A ce moment, le programme nettoie le disque dur virtuel, et entre dans une



boucle répétitive, à l'attente d'un signal d'acquisition. A chaque début de boucle, une procédure lit les registres de la carte chrono, et garde la valeur lue en mémoire. L'heure donnée par la carte chrono ne peut être lue qu'à travers une interface matérielle, constituée de registres où la carte inscrit l'heure, dans deux cas bien précis :

- quand un circuit électrique change d'état
- un programme spécial force l'inscription

Lorsque le programme d'acquisition est en attente, l'heure lue sur les registres ne change pas, sauf si un contact est envoyé à partir de l'interrupteur placé sur l'astrolabe (qui commande le début des acquisitions), ou de l'obturateur tournant (qui commande l'acquisition de chaque image).

Dans la même boucle, le programme calcule la position du bord solaire à l'instant lu, et aussi les composantes en azimuth et distance zénithale de son mouvement apparent :

$$\begin{cases} \frac{dz}{dT} = \cos \varphi \sin a = \cos \delta \sin S \\ \frac{da}{dT} = \sin \varphi + \cos \varphi \cot z \cos a = \frac{\cos \delta \cos S}{\sin z} \end{cases}$$

La distance zénithale  $z$  et l'azimut  $a$  sont calculés à partir de la théorie planétaire VSOP87 de P.Bretagnon et des coordonnées de l'astrolabe,  $S$  représente l'angle à l'astre.

L'obturateur tournant permet l'acquisition d'une image chaque 0<sup>s</sup>24, on peut donc calculer le trajet des deux images dans le champ de la matrice CCD durant cet intervalle de temps. Ainsi, l'acquisition des images directes et réfléchies est réalisée alternativement et deux positions successives de la même image sont séparées par un intervalle de 0<sup>s</sup>48. On doit aussi en déduire le temps nécessaire pour traverser la matrice CCD et prévoir la position de début et de fin du bord solaire sur chaque trajectoire. On peut donc positionner la première image de façon à ce que l'intersection des deux trajectoires se situe au plus près du centre de la matrice CCD. La composante azimuthale de la trajectoire des images est parallèle aux colonnes CCD (X), et la composante zénithale est parallèle aux lignes (Y). Evidemment, ce calcul se fait en pixels, donc on doit utiliser l'échantillonnage des pixels calculé sur les deux directions (relations III.1, chap. III.1.1). La figure **A.5** montre le détail de la trajectoire de l'une des deux images du bord solaire, décomposée suivant les deux directions.

Ce calcul fait, le programme dessine sur le moniteur un réticule qui repère la direction des lignes, des colonnes et le centre de la matrice CCD, ainsi que la trajectoire calculée des images.

Après les réglages présentés au chapitre II.1.2 et la mise en place de la caméra CCD, le moniteur montre les images du bord solaire superposées au réticule graphique, et l'acquisition est déclenchée lorsque la position correcte des images est obtenue. L'ordinateur ne peut pas savoir laquelle des deux lunules est cachée par le secteur tournant de l'obturateur ; pour cela, deux fenêtres symétriques sont enregistrées chaque 0<sup>s</sup>24, à chaque contact. L'une des fenêtres, centrée en Y sur la position calculée du sommet du bord solaire, contiendra l'image du Soleil, la symétrique sera vide. Les deux séries d'images sont envoyées

sur le disque dur virtuel, dans deux fichiers différents. Chaque image contient également le temps (en secondes UT), ainsi que les coordonnées du coin gauche de la fenêtre (pour se repérer sur la matrice CCD). L'acquisition se termine au bout de  $N$  images ( $N$  choisi à l'avance). A la fin, le programme cherche dans quel fichier se trouvent les images du Soleil : en comparant les niveaux d'une petite zone de la partie gauche et droite d'une image, on obtient une différence presque nulle pour les images vides. Quelques secondes sont nécessaires ensuite pour sauvegarder les bonnes images dans un fichier sur le disque dur.

Ceci représente l'acquisition complète du passage du premier bord solaire par le cercle de hauteur défini par l'astrolabe, et le déroulement de l'acquisition des images du deuxième bord est identique. Lorsque l'acquisition des images de l'un des deux bords est manquée (nuages, accident technique, observateur distrait...), le fichier correspondant à l'autre bord est supprimé. On trouvera, sur la figure **A.6**, un schéma logique de ce programme.

**2). LE PROGRAMME ACQIMG1.PAS.** A la fin de la campagne d'observations de 1996, en vue de simplifier les méthodes, nous avons réalisé des acquisitions d'images complètes. Le programme ACQIMG1.PAS fonctionne de la même manière le précédent, avec quelques particularités :

- Les images complètes de 256 lignes et 512 colonnes doivent être coupées en quatre, à cause du grand espace de mémoire qu'elles occupent. Chaque image sera donc formée de quatre enregistrements de 32776 octets chacun, (131104 o/image), mais elle contiendra les deux images (directe et réfléchi) du bord solaire.
- Le calcul de la position apparente du Soleil se fait uniquement pour mieux centrer les deux trajectoires sur la matrice CCD, car le problème du fenêtrage et de la séparation des images vides ne se pose plus.
- L'obturateur tournant a été supprimé ; le début des acquisitions est signalé par un simple interrupteur, et l'acquisition de chaque image se fait sur un intervalle de temps programmable.

Cela avait l'avantage de supprimer l'obturateur tournant et de permettre l'acquisition des deux images du bord au même instant. En effet, le secteur tournant restait la seule pièce mécanique en mouvement pendant l'acquisition et, placé sur l'axe optique de l'instrument, il devait être positionné très précisément pour éviter toute lumière parasite.

Par contre, l'acquisition d'image complète introduit une perte d'informations au moment de la superposition des deux images. Si en numérique on peut extraire le bord solaire à partir de deux images superposées (après la tangence, pour un premier bord, ou avant pour un deuxième), cela était impossible dans le cas des acquisitions analogiques (Laclare & Merlin 1991).



## A.4 – PROCEDURE DISSECTION (IMAGES COMPLETES)

Sur la figure **A.7** on trouve l'allure d'une section le long de la ligne centrale des images prises pendant le passage d'un premier bord (figure **a**), et d'un deuxième bord (figure **b**). Pour le premier bord, les images sont séparées avant le passage et superposées après, et inversement pour le deuxième bord. Les flèches indiquent le sens du déplacement des images. On remarque que, autour du point d'inflexion de la courbe de lumière, la pente d'une image donnée (D ou R), garde son signe pendant tout le passage. Le gain automatique de la caméra CCD empêche la saturation des pixels quand les deux images se superposent.

La courbe de lumière n'est pas symétrique autour du point d'intersection des images, à cause du fait que l'image directe a toujours des niveaux plus grands que l'image réfléchie sur le bain de mercure. Cela donne des pentes plus grandes pour l'image directe que pour l'image réfléchie.

Pour les images complètes, la procédure qui trouve les positions approximatives des points d'inflexion, cherche en effet les deux intervalles de 10 pixels sur lesquels les pentes sont les plus grandes. Les centres des deux intervalles ainsi trouvées représentent les positions approximatives des points d'inflexion cherchés. L'expérience a prouvé que le bord solaire a des pentes comprises entre 25% et 65%. Cela constitue un filtre, qui sert à éliminer les lignes où le signal du bord est trop bruité par des taches parasites.

La recherche se fait à partir du point central de la ligne, dans les deux sens. Si les deux images ne sont pas symétriques par rapport à ce centre, pour les lignes suivantes la recherche commence à partir de la position moyenne des deux points trouvés pour la première ligne. Cela intervient dans le cas d'un mauvais réglage (inclinaison de l'axe optique).

Malheureusement, au voisinage du point de tangence des deux bords, les points d'inflexion représentant les bords sont inaccessibles, à cause de la superposition des signaux provenant des deux images. Les lignes sur lesquelles la distance entre les deux points d'inflexion trouvés est trop petite, seront donc éliminées. Par contre, si au voisinage du point d'inflexion d'une image, le signal superposé provenant de l'autre image est quasi-linéaire, cela ne change en rien la position en abscisse de ce point d'inflexion, mais son niveau. Ceci est le cas de deux bords superposés qui ont les points d'inflexion séparés de plus de 10 pixels (sur la même ligne). Pour reconstituer le bord solaire, uniquement les abscisses des points d'inflexion sont prises en compte (les ordonnées sont données directement par les numéros des lignes).

En tenant compte du bord observé, du fait qu'il se trouve à l'Est ou à l'Ouest, et de la pente de la courbe de lumière (ascendante ou descendante), on peut facilement attribuer chaque point d'inflexion trouvé à l'image correspondante (directe ou réfléchie). Sans cela, au voisinage de l'instant du passage, les points d'inflexion provenant des deux images apparaissent mélangés.

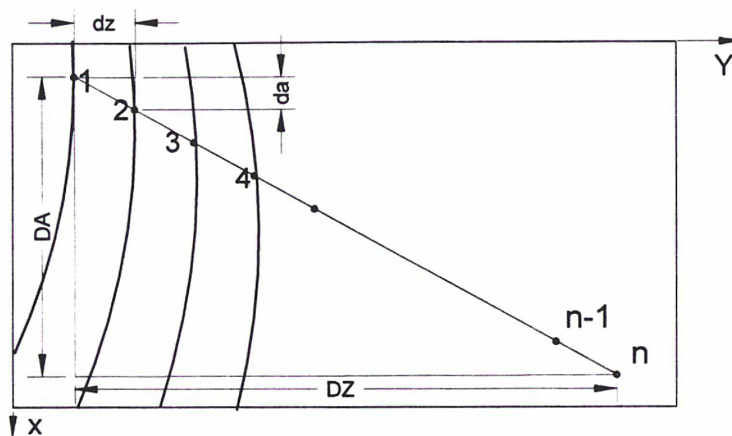


Fig. A.5. Mouvement apparent du Soleil sur la CCD (image directe).

$da$  déplacement en azimut en  $0^{\circ},48$   $dz$  déplacement en distance zénithale en  $0^{\circ},48$   $DA$  déplacement total en azimut  $DZ$  déplacement total en distance zénithale  $X$  lignes CCD ;  $Y$  colonnes CCD 1,2,3... positions des images successives

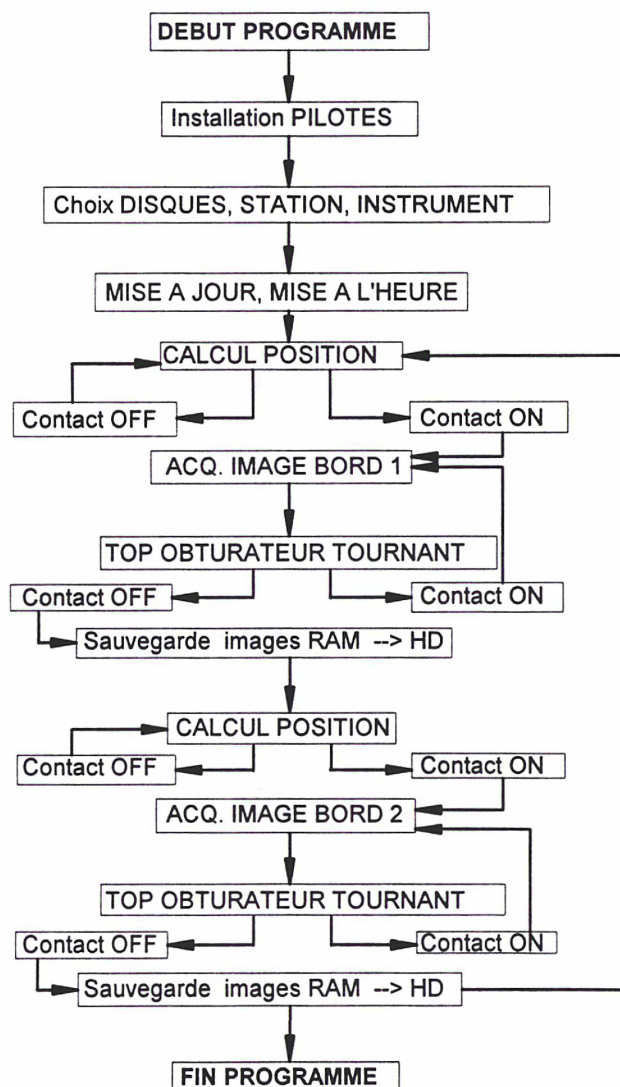
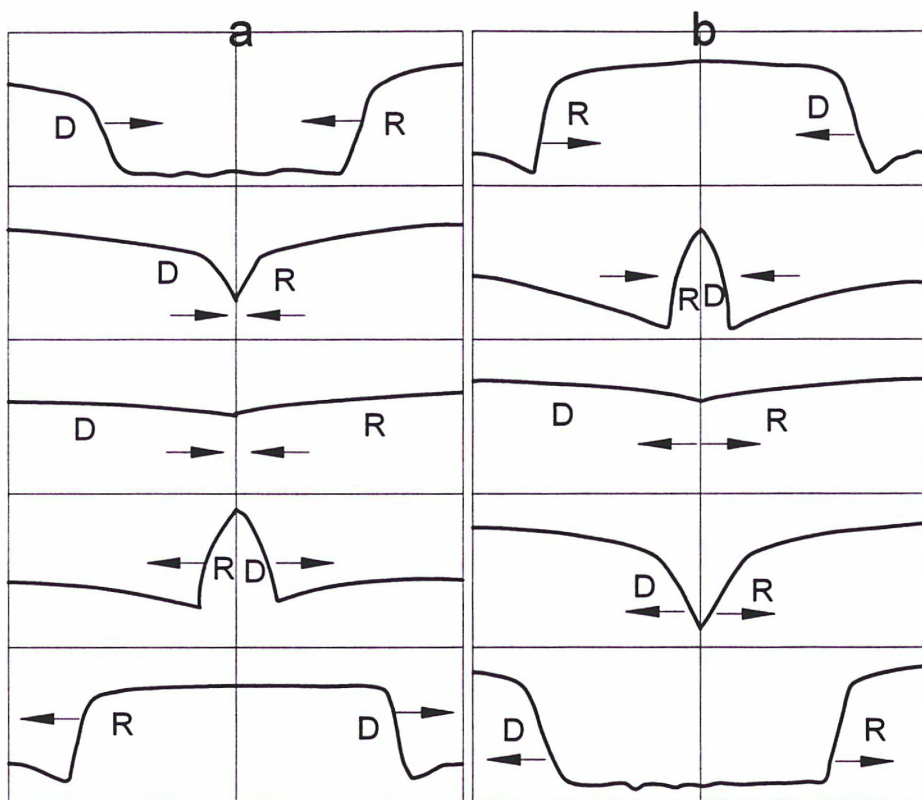


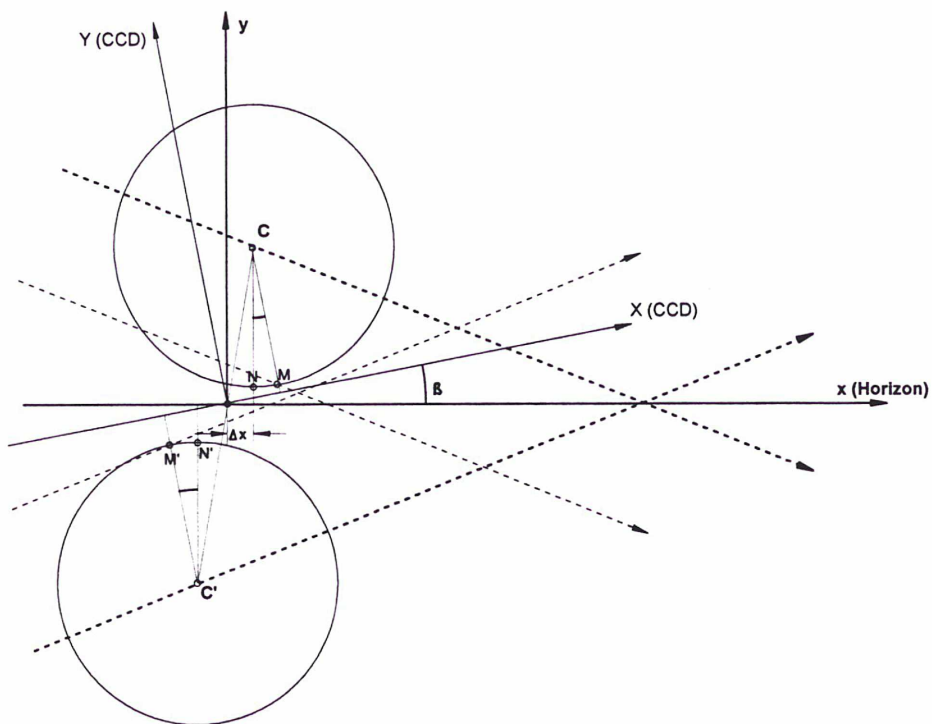
Fig. A.6. Schéma logique du programme ACQ\_IMG0.PAS.





**Fig. A.7. Sections sur des images complètes.**

**a** passage d'un bord premier **b** passage d'un second bord **D** image directe **R** image réfléchie



**Fig. A.8. Géométrie de l'acquisition sur le repère CCD.**

**en pointillé** trajectoires des images **C,C'** centre de l'image directe et réfléchie **(x,y)** repère instrumental **(X,Y)** repère CCD  $\beta$  angle de rotation de la CCD  $\Delta x$  écartement des images **M,M'** points de tangence des images dans le repère CCD **N,N'** points de tangence des images dans le repère instrumental

## A.5 – LA CORRECTION D'INCLINAISON DE LA CCD

L'expression théorique qui donne la variation de distance zénithale d'un astre en fonction du temps s'écrit, en se limitant aux termes d'ordre 1 :

$$z - z_0 = 15 \sin a \cos \varphi \cdot (t - t_0) = 15 \cos \delta \sin S \cdot (t - t_0),$$

où  $a$  est l'azimut de l'astre compté depuis le Sud vers l'Ouest,  $\varphi$  est la latitude du lieu d'observation,  $\delta$  la déclinaison de l'objet et  $S$  l'angle à l'astre. Les paramètres sont comptés en secondes de degré pour  $z$  et en secondes de temps pour  $t$ . Réduite au premier terme, cette relation implique que  $(t - t_0)$  reste petit. C'est le cas de l'astrolabe puisque la durée d'un passage n'excédant pas 40<sup>s</sup>, la quantité  $(t - t_0)$  ne dépasse pas 20<sup>s</sup>, soit 5' ou  $1,5 \cdot 10^{-3}$  rad. L'équation correspondante en azimut s'écrit :

$$a - a_0 = \frac{15 \cos \delta \cos S \cdot (t - t_0)}{\sin z}$$

Ramenées à un système de coordonnées  $x, y$  sur la CCD, supposée parfaitement réglée, les relations précédentes deviennent (voir aussi la figure **A.8**) :

$$\begin{cases} e_x \cdot (x - x_0) = 15 \cos \delta \cos S \cdot (t - t_0) \\ e_y \cdot (y - y_0) = 15 \cos \delta \sin S \cdot (t - t_0) \end{cases}$$

où  $e_x$  et  $e_y$  sont les échantillonnages spatiaux des pixels dans les directions horizontales et verticales, en "/pixel. Le diviseur  $\sin z$  disparaît, le rayon de courbure du cercle de hauteur étant égal à  $\sin z$ .

Les mêmes relations s'écrivent pour l'image réfléchie, à la différence près que  $S$  doit être changé en  $-S$ . On introduit le non-alignement vertical des images en écrivant que le sommet de l'image directe se trouve au point  $(x_0 + \Delta x, y_0)$  tandis que le sommet de l'image réfléchie sera au point  $(x_0 - \Delta x, y_0)$ . Ce paramétrage implique que  $t_0$  est l'instant du passage cherché, puisque lorsque  $t = t_0$ , les ordonnées des deux sommets sont égales.

Si au contraire, les colonnes de la CCD sont inclinées d'un angle  $\beta$  sur l'horizon, une rotation du même angle appliquée aux coordonnées précédentes donne les coordonnées relatives à la CCD réelle  $(X, Y)$  des sommets des images directes et réfléchies du Soleil. Pour le sommet de l'image directe, ces coordonnées s'écrivent :

$$\begin{cases} X = 15(t - t_0) \cos \delta \cos(S - \beta) + e_x(x_0 + \Delta x) \cos \beta + y_0 \cdot e_y \sin \beta + bpR \sin \beta \\ Y = 15(t - t_0) \cos \delta \sin(S - \beta) - e_x(x_0 + \Delta x) \sin \beta + y_0 \cdot e_y \cos \beta + bpR(\cos \beta - 1) \end{cases}$$

Les paramètres  $b$  et  $p$  désignent par leur valeur (-1 ou +1) le bord observé et le passage Est ou Ouest, tandis que  $R$  est le demi-diamètre du Soleil. Le terme en  $R$  apparaît parce que le sommet du bord solaire n'est pas le même point suivant que la CCD est ou n'est pas



parfaitement réglée. Ces équations ont exactement la même forme pour le sommet réfléchi, à ceci près que les signes de  $\beta$ , de  $S$ , de  $\Delta x$  et du produit  $bp$  changent :

$$\begin{cases} X = +15(t - t_0) \cos \delta \cos(S + \beta) + e_x(x_0 - \Delta x) \cos \beta + y_0 \cdot e_y \sin \beta - bpR \sin \beta \\ Y = -15(t - t_0) \cos \delta \sin(S + \beta) - e_x(x_0 - \Delta x) \sin \beta + y_0 \cdot e_y \cos \beta - bpR(\cos \beta - 1) \end{cases}$$

La pente  $\frac{dY}{dt}$ , suivant que l'on considère l'image directe ou réfléchie, est égale à  $\sin(S - \beta)$  ou à  $-\sin(S + \beta)$ . Connaissant la valeur de l'angle à l'astre avec une précision surabondante, il est alors possible de trouver la valeur de  $\beta$  et de l'échantillonnage  $e_y$ .

Ces équations sont aussi celles qui permettent de calculer un instant de passage mesuré (mais approché)  $t_m$ , et de donner son expression en fonction de  $t_0$  et des termes d'erreur. On en tire aussi  $t_0$ , instant vrai du passage :

$$t_0 = t_m - \Delta x \cdot e_x \frac{\tan \beta}{15 \cos \delta \sin S} - bpR \frac{1 - \cos \beta}{15 \cos \delta \sin S}$$

La valeur observée de  $t$ ,  $t_m$  doit être corrigée des effets de l'écartement des images,  $\Delta x$ , et d'un terme dépendant du demi-diamètre solaire. Cette correction provient du fait que le point observé est le sommet **relativement à la CCD** et que l'on doit en fait observer le sommet **relativement à l'horizontale**. Mais, dès que l'angle  $\beta$  est connu, plutôt que d'appliquer la formule précédente, une rotation d'angle  $-\beta$  permet de replacer les points des deux trajectoires dans un système horizontal. Pour l'image directe, les coordonnées  $(x, y)$  deviennent alors :

$$\begin{cases} x \cdot e_x = (x_0 + \Delta x)e_x + bpR \sin \beta + 15 \cdot (t - t_0) \cos \delta \cos S \\ y \cdot e_y = y_0 \cdot e_y + bpR \cdot (1 - \cos \beta) + 15 \cdot (t - t_0) \cos \delta \sin S \end{cases}$$

Les coordonnées du sommet de l'image réfléchie ont la même forme et s'écrivent :

$$\begin{cases} x \cdot e_x = (x_0 - \Delta x)e_x - bpR \sin \beta + 15 \cdot (t - t_0) \cos \delta \cos S \\ y \cdot e_y = y_0 \cdot e_y - bpR \cdot (1 - \cos \beta) - 15 \cdot (t - t_0) \cos \delta \sin S \end{cases}$$

L'instant du passage est encore défini comme celui où les ordonnées des sommets des images directes et réfléchies sont égales, mais cette fois dans un repère horizontal. D'où l'instant  $t_0$  que l'on tire de  $t_m$  corrigé :

$$t_0 = t_m + bpR \cdot \frac{1 - \cos \beta}{15 \cos \delta \sin S}$$

On notera le changement de signe de l'erreur, par rapport au résultat brut, qui s'explique par le changement de système de référence. Cette rotation supprime aussi tout effet produit par le non-alignement vertical des images. De même, on sait que  $\sin S$  change de signe avec le passage et est négatif en passage Est, comme le paramètre  $p$ . La formule resterait donc exacte en supprimant  $p$  et en remplaçant  $\sin S$  par sa valeur absolue.

Après la détermination de l'angle  $\beta$ , la correction ci-dessus a été systématiquement appliquée au temps de passage brut donné par  $t_m$  afin d'obtenir une évaluation correcte de  $t_0$ , temps de passage vrai.

## A.6 – LE CALCUL DES PARAMETRES DES MESURES

La richesse des informations que les images CCD enregistrent nous donne accès à des paramètres importants des observations, qualifiant chaque mesure. Ils peuvent être déterminés grâce au micromètre à deux dimensions que matérialise la matrice CCD. Dans cette annexe est présenté le calcul de ces paramètres, qui permettent une analyse très détaillée des résultats des mesures.

### A.6.1 – PARAMETRES OBTENUS DES MESURES

**1). LA LARGEUR DE LA DERIVEE A MI-HAUTEUR.** Dans ce travail, la méthode retenue pour le calcul des points d'inflexion constituant le bord solaire est la dérivation numérique (chapitre IV.1.3). Les calculs permettent d'obtenir aussi la largeur de chaque dérivée à mi-hauteur, pour chaque ligne de l'image analysée, en même temps que les fichiers des points d'inflexion. En pratique, ce paramètre est calculé à une hauteur qui correspond à 25% de la hauteur maximale de la dérivée (celle-ci étant élevée au carré). Chaque ligne fournit une valeur pour cette largeur, et sur une image on obtient une valeur moyenne sur les 256 lignes analysées. L'erreur de cette moyenne est d'environ 0.06 pixel (0'',04), pour une dispersion d'environ 1 pixel (0'',74), suivant la qualité des images. Pour des images très bruitées, l'erreur de la moyenne et la dispersion peuvent doubler. Pour un passage donnée, on calcule une valeur moyenne de la largeur de la dérivée pour les images directes, et une autre pour les images réfléchies (les deux images ne sont pas identiques), à partir des valeurs obtenues pour chacune des images. Ce paramètre est important pour définir la qualité des images, voire de l'atmosphère et de l'optique de l'instrument : la largeur de la dérivée à mi-hauteur est une mesure très directe de l'étalement de l'image du bord solaire. En règle générale, les bords solaires sont moins étalés sur les images directes que sur les images réfléchies, qui subissent une réflexion de plus sur le bain de mercure. En plus, les deux images ont des trajets optiques différents dans l'optique de l'instrument.

**2). LES PARABOLES ET LEURS SOMMETS.** Le choix de la parabole comme modèle du disque solaire sur les images CCD a été présenté dans le chapitre IV.3.1. Après la première étape de la réduction, les points d'inflexion de chaque bord sont obtenus en coordonnées CCD,  $(x_i, y_i)$ . Les équations de condition suivantes :

$$y_i = ax_i^2 + bx_i + c,$$

écrites pour les 256 points d'inflexion d'une image, permettent de déterminer (par moindres carrés) les coefficients  $a, b, c$  avec une très bonne précision. Le coefficient  $a$ , qui donne la courbure des paraboles, prend des valeurs entre  $70 \cdot 10^{-5}$  et  $75 \cdot 10^{-5}$ , avec une erreur d'environ  $8 \cdot 10^{-6}$  suivant la dispersion des points sur la parabole. Pour minimiser les erreurs, les points d'inflexion qui ont des écarts plus grands que  $2.57 \cdot \sigma$  sont éliminés. Les sommets des paraboles (voir chapitre IV.3.2) sont obtenus aisément, et ils ont pour coordonnées :

$$x_n = \frac{-b_n}{2a_n}, \quad y_n = \frac{-b_n^2 + 4a_n c_n}{4a_n},$$



avec  $n$  le numéro de l'image. A ce niveau, les calculs fournissent deux paramètres intéressants, qui serviront ensuite aux analyses globales des résultats. Ces paramètres, enregistrés en valeur moyenne sur chaque bord pour les images directes et réfléchies, sont :

- le coefficient moyen  $a$  des paraboles ;
- la dispersion moyenne des points sur les paraboles.

**3). LES TRAJECTOIRES ET LE UT DE PASSAGE.** Le calcul des trajectoires, qui a été présenté dans le chapitre V.1.1, fournit un autre paramètre, la dispersion moyenne des sommets des paraboles sur la droite de régression pour chaque bord, séparément pour les images directes et réfléchies. Les calculs donnent également l'erreur du UT de passage, l'inclinaison des colonnes de la CCD sur l'horizon et le décalage des images.

**4). LE PARAMETRE DE FRIED.** La dispersion des points sur les trajectoires donne accès au paramètre de Fried, qualifiant la turbulence atmosphérique. A. Irbah propose des formules de calcul du  $r_0$  pour le cas concret des observations CCD du Soleil à l'astrolabe solaire, à partir de la dispersion des points sur les trajectoires (Fried 1966, Irbah et al. 1994). Ce paramètre est relié à l'aire de cohérence du front d'onde qui entre dans l'instrument, après distorsion par la turbulence atmosphérique. Les trajectoires du bord solaire présentent des fluctuations spatiales ( $\sigma_s$ ), qui peuvent s'interpréter comme des fluctuations de l'angle d'arrivée du front d'onde. Ainsi, une estimation du paramètre de Fried (en m) peut être calculée avec la formule suivante (Irbah et al. 1994) :

$$r_0 = 8,25 \cdot 10^5 \cdot D^{-1/5} \cdot \lambda^{6/5} \cdot (\sigma_s^2)^{-3/5}$$

où  $D$  est le diamètre de la pupille d'entrée (0,05 m),  $\lambda$  est la longueur d'onde d'observation ( $850 \cdot 10^{-9}$  m ou  $550 \cdot 10^{-9}$  m à Calern), et  $\sigma$  est la dispersion des sommets des bords sur les trajectoires (en "). Ce paramètre de "seeing",  $r_0$ , peut être déduit des observations et associé à chaque diamètre observé (comme moyenne des deux valeurs obtenues pour les deux trajectoires).

## A.6.2 – PARAMETRES AUXILIAIRES

**1). LA REFRACTION** se calcule à partir de la formule classique de Laplace (Danjon 1980), en considérant les termes jusqu'à l'ordre 5. On introduit aussi des corrections supplémentaires dues à la vapeur d'eau atmosphérique, car si ce terme est négligeable pour les observations des étoiles (à cause de sa relative constance pendant l'observation d'un groupe), il devient important dans le cas du Soleil. En effet, entre les passages Est et Ouest il peut y avoir un intervalle de plusieurs heures pendant lequel les conditions atmosphériques évoluent. La réfraction est donné par la formule de Laplace (Danjon 1980) :

$$R = \alpha_o(1 - \beta_o) \tan z_o + \alpha_o\left(\frac{\alpha_o}{2} - \beta_o\right) \tan^3 z_o + 3\alpha_o\left(\frac{\alpha_o}{2} - \beta_o\right)^2 \tan^5 z_o + \dots,$$

où  $\alpha_o = n_o - 1$  ( $n_o$  est l'indice de l'air),  $z_o$  est la distance zénithale instrumentale, et  $\beta_o$  représente le rapport entre la hauteur de l'atmosphère à pression constante et le rayon de

courbure terrestre au lieu d'observation.  $\alpha_o$  s'écrit encore :

$$\alpha_o = (\bar{n} - 1) \frac{273.16}{760} \frac{P}{T} - 5.5 \cdot 10^{-8} \frac{273.16}{T} p,$$

avec :

$$10^7(\bar{n} - 1) = 2876.04 + \frac{16.288}{\lambda^2} + \frac{0.136}{\lambda^4},$$

et :

$$P = H(1 - 26.4 \cdot 10^{-5} \cos 2\varphi - 19.6 \cdot 10^{-8} h - 16.3 \cdot 10^{-5} \theta)$$

$P$  représente la pression atmosphérique réduite (mm col. Hg),

$T$  la température absolue de l'air ( $^{\circ}\text{C}$ ),

$p$  la pression partielle de la vapeur d'eau,

$\lambda$  la longueur d'onde ( $\mu\text{m}$ ),

$H$  la hauteur barométrique lue (mm col. Hg),

$\varphi$  la latitude de la station,

$h$  l'altitude de la station (m),

$\theta$  la température du baromètre ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Avec une erreur sur  $\beta_o$  qui induit une erreur sur  $R$  plus petite de 0,0005, on peut prendre, pour la France (Chollet 1981) :

$$\beta_o = 4.5054 \cdot 10^{-6} T$$

Pour une lecture  $f$  de l'hygromètre, en pourcentage d'humidité, la pression partielle de la vapeur d'eau pour la température  $t$  de l'air se calcule avec la relation :

$$p = \frac{f}{100} F(t),$$

avec :

$$F(t) = 4.581 \cdot \exp(0.07292 \cdot t - 0.000284 \cdot t^2),$$

qui est une formule d'interpolation de la pression de la vapeur saturante d'eau en fonction de la température, à partir des données publiées dans l'Annuaire du Bureau des Longitudes (Chollet 1981). En remplaçant les expressions de  $\alpha_o$  et  $\beta_o$  dans la formule de Laplace, on obtient finalement la valeur de la réfraction qui affecte le calcul de la distance zénithale observée  $z_o$  et calculée  $z_c$  (chapitre II.2.1, relations II.3 et II.4).

**2). LA LATITUDE HELIOGRAPHIQUE** est donnée par la relation :

$$L = 90^{\circ} - (C + S),$$

où  $C$  est l'angle de position de l'axe du Soleil et  $S$  est l'angle à l'astre (figure **A.9**, d'après Danjon 1980 et Sadsaoud 1986). L'angle  $S$ , compté positivement pour les passages à l'Est, est calculé en même temps que le diamètre, et l'angle  $C$  est donnée par les formules de la théorie de la rotation du Soleil (Danjon 1980). Avec les notations de la figure **A.9**, on a  $C = \chi + \psi$ . On peut calculer  $\chi$  et  $\psi$  avec les relations :

$$\begin{cases} \cos \odot = \cos \alpha \cdot \cos \delta \\ \tan \psi = -\tan \epsilon \cdot \cos \odot \\ \tan \chi = -\tan i \cdot \cos(\odot - \Omega) \end{cases}$$



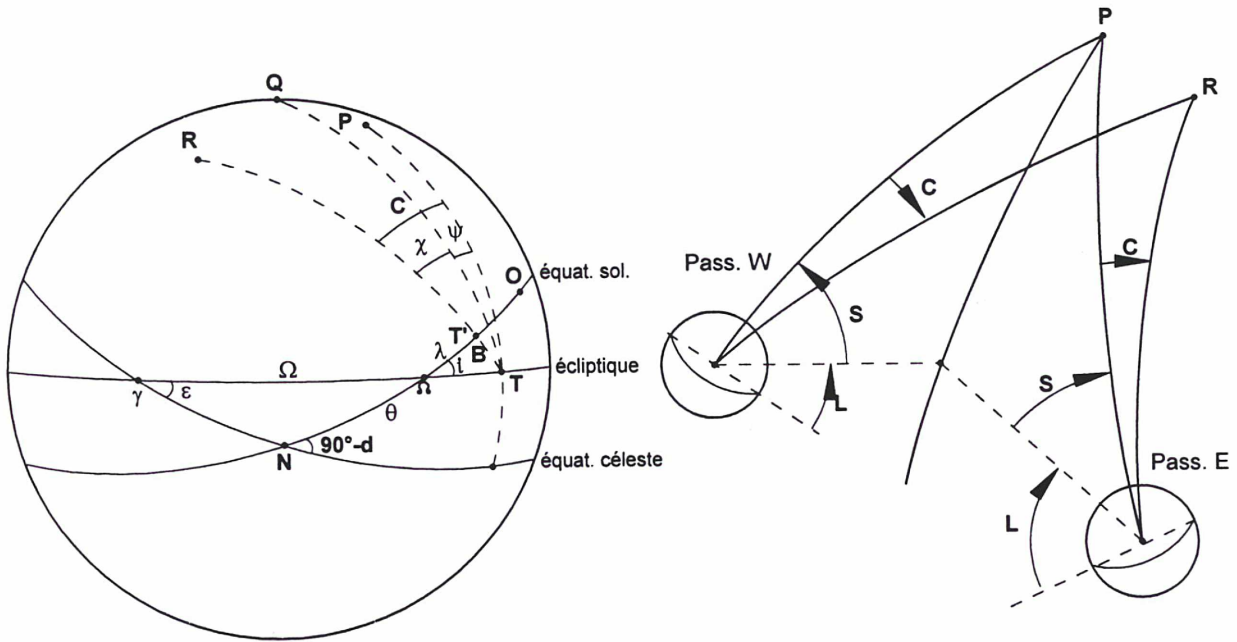


Fig. A.9. Calcul de la latitude héliographique.

Ces formules sont expéditives, et on néglige la latitude du Soleil.  $\odot$  est la longitude céleste du Soleil,  $\alpha$  et  $\delta$  ses coordonnées équatoriales apparentes,  $\Omega$  est la longitude du nœud ascendant,  $i$  et  $\epsilon$  l'inclinaison de l'équateur solaire et céleste sur le plan de l'écliptique. Enfin,  $\epsilon$ ,  $i$  et  $\Omega$  se calculent pour l'époque  $t$  de l'observation avec les relations :

$$\begin{cases} \epsilon = 23^{\circ}446 - 0^{\circ}00013 \cdot (t - 1950,0) \\ i = 7^{\circ}252 + 0^{\circ}00002 \cdot (t - 1950,0) \\ \Omega = 74^{\circ}962 + 0^{\circ}01295 \cdot (t - 1950,0) \end{cases}$$

## REFERENCES

- CHOLLET F., 1981, "Observations du Soleil à l'astrolabe", Thèse de Doctorat, L'Université Pierre et Marie Curie – Paris
- DANJON A., 1980, "Astronomie Générale", Blanchard – Paris
- FRIED D.L., 1966, "Optical Resolution Through a Randomly Inhomogeneous Medium for Very Long and Very Short Exposures", *Journal of the Optical Society of America*, **56/10**, p. 1372
- IRBAH A., LACLARE F., BORGNINO J., MERLIN G., 1994, "Solar diameter measurements with Calern Observatory astrolabe and atmospheric turbulence effects", *Solar Physics*, **149**, p. 213
- LACLARE F., MERLIN G., 1991, "L'astrolabe solaire impersonnalisé par l'emploi d'une caméra C.C.D. Application à la mesure du diamètre solaire", *Comptes Rendus Academie des Sciences Paris, Série II*, **313**, p. 323
- SADSAOUD H., 1986, "Etude des variations du diamètre du Soleil observé à l'astrolabe solaire du CERGA", Thèse de Doctorat – Université de Nice

# BIBLIOGRAPHIE GENERALE

Les pages suivantes contiennent une bibliographie générale concernant l'astronomie de position, l'astrolabe de Danjon et ses variantes, l'étoile Soleil et ses oscillations, la mesure du rayon solaire et sa variabilité, les images solaires CCD et leur traitement. Loin d'être complète, cette bibliographie m'a beaucoup aidé à approfondir les problèmes qui se posent dans le domaine des mesures de diamètre du Soleil. L'abondance des ressources bibliographiques dans ce domaine interdisciplinaire m'a obligé à limiter cette liste aux articles les plus récents (entre 1954 et avril 1998). Je pense aider, par ce moyen, les personnes intéressées par le sujet de ma thèse, dans leurs recherches bibliographiques.

La première partie présente les articles dans l'ordre alphabétique des noms des auteurs (pages B-3 – B-14) et la deuxième dans l'ordre chronologique de l'apparition, année par année (pages B-15 – B-26).





## BIBLIOGRAPHIE – ORDRE ALPHABETIQUE

- ALLEN C.W., 1963, *"Astrophysical quantities"*, The Athlone Press – University of London
- ALTROCK R.C., CANFIELD R.C., 1972, *"Observations of the variation of temperature with latitude in the upper solar photosphere"*, The Astrophysical Journal, **171**, p. L71
- ANDREI A.H., 1982, *"Observações de estrelas com astrolábio no Rio de Janeiro"*, Dissertação de Maestrado – Instituto Astronômico e Geofísico – São Paulo
- ANTIA H.M., 1998, *"Estimate of solar radius from f-mode frequencies"*, Astronomy and Astrophysics, **330**, p. 336
- APPOURCHAUX T., ANDERSEN B.N., FRÖHLICH C., JIMÉNEZ A., TELLJOHANN U., WEHRLI C., 1997, *"In-flight performance of the VIRGO luminosity oscillations imager aboard SOHO"*, Solar Physics, **170**, p. 27
- BASU S., 1997, *"Effects of errors in the solar radius on helioseismic inferences"*, Monthly Notices Royal Astronomical Society (preprint)
- BARLETTI R., CEPPATELLI G., PATERNÒ L., RIGHINI A., SPERONI N., 1977, *"Astronomical site testing with balloon borne radiosondes : results about atmospheric turbulence, solar seeing and stellar scintillation"*, Astronomy and Astrophysics, **54**, p. 649
- BENEVIDES-SOARES P., CLAUZET L.B.F., 1984, *"Astrolabe zenith distance variation"*, Astronomy and Astrophysics, **134**, p. 338
- BENEVIDES-SOARES P., TEIXEIRA R., 1992, *"On the relationship between conventional an overlap reduction techniques in positional astronomy"*, Astronomy and Astrophysics, **253**, p. 307
- BIDART P., 1997, *"Elaboration d'un modèle du bord solaire et test sur des images CCD obtenues au CERGA"*, Rapport de stage de DEA – Observatoire de Paris
- BILLAUD G., 1970, *"Analyse des observations faites à Paris avec le prototype de l'astrolabe DANJON 1953 – 1957"*, Astronomy and Astrophysics, **7**, p. 367
- BILLAUD G., 1986, *"A new astrolabe"*, dans *"Astrometric Techniques"* – IAU Symposia 109, USA
- BILLAUD G., GUINOT B., 1971, *"Un astrolabe à pleines pupilles"*, Astronomy and Astrophysics, **11**, p. 241
- BORGNINO J., AZOUIT M., BARLETTI R., CEPPATELLI G., PATERNÒ L., RIGHINI A., SPERONI N., VERNIN J., 1979, *"Turbulence around a solar telescope as deduced from angle of arrival statistics. A comparaison with microthermal measurements"*, Astronomy and Astrophysics, **79**, p. 184
- BORGNINO J., CEPPATELLI G., RICORT G., RIGHINI A., 1982, *"Lower atmosphere and solar seeing : an experiment of simultaneous measurements of nearby turbulence by thermal radiosondes, by angle of arrival statistics and image motion observation"*, Astronomy and Astrophysics, **107**, p. 333
- BOUET J., 1991, *"Essai de mise en évidence de l'ellipticité du disque solaire à l'aide des durées des passages de Mercure sur le Soleil"*, Revue des Questions Scientifiques, **162-4**, p. 407
- BOUGEARD M., 1982, *"Analyse des observations du Soleil à l'astrolabe du CERGA Extension aux observations incomplètes"*, Mémoire présenté à l'Observatoire de Paris
- BOUGEARD M., CHOLLET F., LACLARE F., 1983, *"Analyse des observations du Soleil à l'astrolabe du CERGA"*, Astronomy and Astrophysics, **126**, p. 161
- BOURGÈS L., 1992, *"Extension à des images bi-dimensionnelles des méthodes de détermination du limbe solaire"*, Rapport de stage de DEA – Université de Nice
- BOUZARIA M., MOUSSAOUI R., 1996, *"Analyse en ondelettes des images du Soleil prises à l'astrolabe"*, Mémoire présenté à l'Université des Sciences et de la Technologie d'Alger



- BRANDT P.N., MAUTER H.A., SMARTT R., 1987, "*Day-time seeing statistics at Sacramento Peak Observatory*", *Astronomy and Astrophysics*, **188**, p. 163
- BRETAGNON P., 1982, "*Théorie du mouvement de l'ensemble des planètes. Solution VSOP82*", *Astronomy and Astrophysics*, **114**, p. 278
- BRETAGNON P., FRANCOU G., 1988, "*Planetary theories in rectangular and spherical variables. VSOP 87 solutions*", *Astronomy and Astrophysics*, **202**, p. 309
- BROWN T.M., STEBBINS R.T., HILL H.A., 1978, "*Long-period oscillations of the solar diameter : Observations*", *The Astrophysical Journal*, **223**, p. 324
- BROWN T.M., 1982, "*Seeing-independent definitions of the solar limb position*", *Astronomy and Astrophysics*, **116**, p. 260
- BROWN T.M., ELMORE D.F., LACEY L., HULL H., 1982, "*Solar Diameter Monitor : an instrument to measure long-term changes*", *Applied Optics*, **21-19**, p. 3588
- BROWN T.M., CHRISTENSEN-DALSGAARD J., 1998, "*Accurate Determination of the Solar Photospheric Radius*", *The Astrophysical Journal* (preprint)
- BUIL C., 1986, "*Astronomie CCD*", Société d'Astronomie de Toulouse
- BURNS D., BALDWIN J.E., BOYSEN R.C., HANIFF C.A., LAWSON P.R., MACKAY C.D., ROGERS J., SCOTT T.R., WARNER P.J., WILSON D.M.A., YOUNG J.S., 1997, "*The Surface Structure and Limb Darkening Profile Of Betelgeuse*", *Monthly Notices Royal Astronomical Society* (preprint)
- CHANIN M.L., KECKHUT P., HAUCHECORNE A., LABITZKE K., 1989, "*The solar activity – QBO effect in the lower atmosphere*", *Annales Geophysicae*, **7/5**, p. 463
- CHIU H.Y., 1984, "*Evaluation of the Solar Disk Sextant concept*", *Applied Optics*, **23-8**, p. 1226
- CHIU H.Y., MAIER E., SCHATTEN K.H., SOFIA S., 1984, "*Solar Disk Sextant optical configuration*", *Applied Optics*, **23-8**, p. 1230
- CHOLLET F., 1981, "*Observations du Soleil à l'astrolabe*", Thèse de Doctorat, L'Université Pierre et Marie Curie – Paris
- CHOLLET F., DÉBARBAT S., 1986, "*Objets accessibles aux astrolabes de haute précision : étoiles et radioétoiles brillantes, planètes, Soleil*", dans "*Astrometric techniques*" – IAU Symposia 109, USA
- CHOLLET F., NOËL F., 1993, "*Le nouvel astrolabe de Santiago du Chili. Description de l'instrument et premiers résultats*", *Astronomy and Astrophysics*, **276**, p. 655
- CHOLLET F., 1993, "*Une méthode globale d'analyse des observations à l'astrolabe*", *Astronomy and Astrophysics*, **280**, p. 675
- CHRÉTIEN H., 1959, "*Calcul des combinaisons optiques*", J.R.Sennac – Paris
- CHRISTENSEN-DALSGAARD J., 1996, "*Effects of convection on the mean solar structure*", dans "*Solar Convection and Oscillations and their Relationship*" – Proc. SCORE'96 – Pijpers, Christensen-Dalsgaard, Rosenthal
- CLAUZET L.B.F., 1976, "*Statistical analysis of the Danjon astrolabe at São Paulo*", *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, **25**, p. 55
- CLAUZET L.B.F., 1982, "*Contribuição ao sistema fundamental de referência. Catálogos astrolábio de Valinhos*", Tese de Doutorado – Instituto Astronômico et Geofísico – São-Paulo
- DANJON A., 1954, "*L'astrolabe impersonnel de l'Observatoire de Paris*", *Bulletin Astronomique*, **18**, p. 251
- DANJON A., 1958, "*L'astrolabe impersonnel modèle O.P.L.*", *Bulletin Astronomique*, **21**, p. 323
- DANJON A., 1980, "*Astronomie Générale*", Blanchard – Paris
- DÉBARBAT S., GUINOT B., 1970, "*La méthode des hauteurs égales en astronomie*", Gordon & Breach – Paris
- DÉBARBAT S., LACLARE F., 1990, "*Which reference frame for the sun ?*", *Acta Astronomica*, **40-3**, p. 313

- DELACHE P., LACLARE F., SADSAOUD H., 1985, "Long period oscillations in solar diameter measurements", *Nature*, **317**, p. 416
- DELACHE P., GAVRYUSEV V., GAVRYUSEVA E., LACLARE F., RÉGULO C., ROCA CORTÉS T., 1993, "Time correlation between solar structural parameters : *p*-mode frequencies, radius, and neutrino flux", *The Astrophysical Journal*, **407**, p. 801
- DELACHE P., KROLL R.J., 1994, "Panel discussion on solar diameter variations", dans "The solar engine and its influence on terrestrial atmosphere and climate" – Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- DESLANDES H., 1994, "Héliomètre à balayage", Rapport de stage – Observatoire de la Côte-d'Azur
- DICKE R.H., 1976, "Evidence for a solar distorsion rotating with a period of 12.2 days", *Solar Physics*, **47**, p. 475
- DICKE R.H., GOLDENBERG H.M., 1967, "Solar oblateness and general relativity", *Physical Review Letters*, **18/9**, p. 313
- DICKE R.H., GOLDENBERG H.M., 1974, "The oblateness of the Sun", *The Astrophysical Journal Supplement Series*, **241**, p. 131
- DICKE R.H., KUHN J.R., LIBBRECHT K.G., 1987, "Is the solar oblateness variable ? Measurements of 1985.", *The Astrophysical Journal*, **318**, p. 451
- DJUROVIC D., PÂQUET P., BILLIAU A., 1994, "New indications for the solar origin of the 50-day cycle in the atmospheric circulation and Earth's rotation", *Astronomy and Astrophysics*, **288**, p. 335
- DOMINGO V., 1990, "The space-based Solar and Heliospheric Observatory SOHO and its relation to ground-based observatories", Joint Organisation for Solar Observations, **Annual Report**, p. 22
- DUVALL T.L., JONES H.P., 1981, "Solar radius measurements", dans "Solar instrumentation : What's next ?" – Sacramento Peak National Observatory – Sunspot, New Mexico
- EDDY J.A., BOORNAZIAN A.A., 1979, "Secular Decrease in the Solar Diameter, 1863-1953", *Bulletin of the American Astronomical Society*, **11/2**, p. 437
- ELSWORTH Y., HOWE R., ISAAK G.R., MCLEOD C.P., NEW R., 1990, "Variation of low-order acoustic solar oscillation over the solar cycle", *Nature*, **345**, p. 322
- EMILIO M., 1997, "Estudo das variações do semi diâmetro solar", Tese de Doutorado – Instituto Astronômico e Geofísico – São Paulo
- ENDAL A.S., TWIGG L.W., 1982, "The effect of perturbation of convective energy transport on the luminosity and radius of the Sun", *The Astrophysical Journal*, **260**, p. 342
- ENDAL A.S., SOFIA S., TWIGG L.W., 1985, "Changes of solar luminosity and radius following secular perturbations in the convective envelope", *The Astrophysical Journal*, **290**, p. 748
- ESPAGNET O., MULLER R., ROUDIER T., MEIN P., MEIN N., MALHERBE J.M., 1996, "Spatial relation between the 5-minute oscillations and granulation patterns", *Astronomy and Astrophysics*, **313**, p. 297
- FIALA A.D., DUNHAM D.W., SOFIA S., 1994, "Variation of the solar diameter from solar eclipse observations, 1715 – 1991", *Solar Physics*, **152**, p. 97
- FLEURY P., MATHIEU J.P., 1968, "Images Optiques", Eyrolles – Paris
- FOSSAT E., HARVEY J., HAUSMAN M., SLAUGHTER C., 1977, "Apparent solar oscillations and fluctuations in the Earth's atmosphere", *Astronomy and Astrophysics*, **59**, p. 279
- FOUKAL P., VERNAZZA J., 1979, "The effect of magnetic fields on solar luminosity", *The Astrophysical Journal*, **234**, p. 707
- FOUKAL P., 1990, "Le Soleil : une étoile variable", *Pour la Science*, **150**, p. 32
- FRIED D.L., 1966, "Optical Resolution Through a Randomly Inhomogeneous Medium for Very Long and Very Short Exposures", *Journal of the Optical Society of America*, **56/10**, p. 1372
- FRICK P., GALYAGIN D., HOYT D.V., NESME-RIBES E., SCHATTEN K.H., SOKOLOFF D., ZACHAROV V., 1997, "Wavelet analysis of solar activity recorded by sunspot groups", *Astronomy and Astrophysics*, **328**, p. 670



- FRÖHLICH C., ANDERSEN B.N., APPOURCHAUX T., BERTHOMIEU G., CROMMELYNCK A., DOMINGO V., FICHOT A., FINSTERLE W., GÓMEZ M., GOUGH D., SCHERRER P., ANDERSEN B.N., BOGART R., BUSH R., FINSTERLE W., JIMÉNEZ A., LEIFSEN T., LOMBAERTS M., PAP J.M., PROVOST J., ROCA CORTÉS T., ROMERO J., ROTH H., SEKII T., TELLJOHANN U., TOUTAIN T., WEHRLI C., 1997, "*First results from VIRGO, the experiment for heliosismology and solar irradiance monitoring on SOHO*", Solar Physics, **170**, p. 1
- GABRIEL M., 1998, "*On velocity and intensity line asymmetries*", Astronomy and Astrophysics, **330**, p. 359
- GALMICHE J., 1986, "*Temps et latitude fournis par la station Astrolabe de de Paris*", Thèse de Doctorat – L'Université Pierre et Marie Curie
- GAVRYUSEV V., GAVRYUSEVA E., DELACHE P., LACLARE F., 1994, "*Periodicities in solar radius measurements*", Astronomy and Astrophysics, **286**, p. 305
- GELLY B., FOSSAT E., GREC G., 1988, "*New analysis of the solar p-mode frequency change from 1980 to 1986*", Astronomy and Astrophysics, **200**, p. L29
- GILLILAND R.L., 1981, "*Solar radius variations over the past 265 years*", The Astrophysical Journal, **248**, p. 1144
- GOODE P.R., KUHN J.R., 1990, "*Consistency in trends in helioseismic data and photospheric temperature data through the solar cycle*", The Astrophysical Journal, **356**, p. 310
- GOODE P.R., STROUS L.H., RIMMELE T.R., STEBBINS R.T., 1998, "*On the origin of solar oscillations*", The Astrophysical Journal, **495**, p. L27
- GOUGH D., 1988, "*Deep roots of solar cycles*", Nature, **336**, p. 618
- GREVE A., NECKEL H., 1996, "*On the consistency of solar limb darkening observations at UV wavelengths (2000-3300 Å)*", Astronomy and Astrophysics Supplement Series, **120**, p. 35
- GUINOT B., 1958, "*L'astrolabe impersonnel A. Danjon, modèle O.P.L., de l'Observatoire de Paris. Etude des résultats d'une année d'observations*", Thèse de Doctorat – Faculté des Sciences de l'Université de Paris
- HEMPELMANN A., DONAHUE R.A., 1997, "*Wavelet analysis of stellar differential rotation*", Astronomy and Astrophysics, **322**, p. 835
- HILL H.A., STEBBINS R.T., 1975, "*The intrinsic visual oblateness of the Sun*", The Astrophysical Journal, **200**, p. 471
- HILL H.A., STEBBINS R.T., OLESON J.R., 1975, "*The Finite Fourier Transform Definition of an edge on the solar disk*", The Astrophysical Journal, **200**, p. 484
- HILL H.A., 1981, "*Solar astrometry*", dans "*Solar instrumentation : What's next ?*" – Sacramento Peak National Observatory – Sunspot, New Mexico
- HILL H.A., 1985, "*Detection and classification of resolved multiplet members of the solar 5 minute oscillations through solar diameter-type observations*", The Astrophysical Journal, **290**, p. 765
- HIRZBERGER J., VÁZQUEZ M., BONET J.A., HANSLMEIER A., SOBOTKA M., 1997, "*Time series of solar granulation images. Differences between small and large granules in quiet regions*", The Astrophysical Journal, **480**, p. 406
- HOEKZEMA N.M., RUTTEN R.J., 1998, "*Small-scale topology of solar atmosphere dynamics*", Astronomy and Astrophysics, **329**, p. 725
- HOU J., 1996, "*The Development of Atmospheric Turbulence Theory and Its Impact on Ground-Based Astronomical Observations*", dans "*Ground-Based Astronomy in Asia*" – N. Kaifu – Tokyo
- IRBAH A., 1986, "*Mesure des paramètres atmosphériques qualifiant les images en astronomie solaire*", Thèse de Doctorat – Université de Nice
- IRBAH A., BORGNINO J., LACLARE F., MERLIN G., 1993, "*Isoplanatism and high spatial resolution solar imaging*", Astronomy and Astrophysics, **276**, p. 663
- IRBAH A., LACLARE F., BORGNINO J., MERLIN G., 1994, "*Solar diameter measurements with Calern Observatory astrolabe and atmospheric turbulence effects*", Solar Physics, **149**, p. 213

- JILINSKI E.G., PULIAEV S.P., PENNA J.L., ANDREI A.H., SINCEAC V., CHOLLET F., DELMAS C., 1998, "*Solar Diameter Observations with Astrolabe at Observatório Nacional - Rio de Janeiro*", Astronomy and Astrophysics Supplement Series (preprint)
- JIMÉNEZ-REYES S.J., RÉGULO C., PALLÉ P.L., ROCA CORTES T., 1998, "*Solar activity cycle frequency shifts of low-degree p-modes*", Astronomy and Astrophysics, **329**, p. 1119
- JOURNET A., LACLARE F., 1984, "*Observations du Soleil à l'astrolabe du CERGA*", Astronomy and Astrophysics, **141**, p. L7
- JOURNET A., 1986, "*Analyse des observations du Soleil à l'astrolabe*", Astronomy and Astrophysics, **164**, p. 222
- KERR A.R., 1987, "*Sunspot-weather correlation found*", Science, **238**, p. 479
- KIEPENHEUER K.O., 1962, "*Solar site testing*", dans "*Site Testing*" – IAU Symposium 19, Rome
- KNIGHT C.K., GATEWOOD G.D., KIPP S.L., BLACK D., 1977, "*Atmospheric turbulence and the apparent instantaneous diameter of the Sun*", Astronomy and Astrophysics, **59**, p. L27
- KOBANOV N.I., GRIGORYEV V.M., 1997, "*An integral method for measuring solar limb darkening*", Solar Physics, **171**, p. 225
- KOLESNIK Y.B., DAVILA H., 1994, "*The second Quito astrolabe catalogue*", Astronomy and Astrophysics Supplement Series, **103**, p. 427
- KOLESNIK Y.B., 1995, "*Analysis of modern observations of the Sun and inner planets*", Astronomy and Astrophysics, **294**, p. 874
- KOLESNIK Y.B., 1995, "*Three campaigns of solar observations with an astrolabe at Simeiz*", dans "*Dynamics, Ephemerides and Astrometry of the Solar System*" – IAU Symposium 172, Paris
- KOUTCHMY S., KOUTCHMY O., KOTOV V., 1977, "*Mesures d'assombrissement du limbe solaire dans le domaine de 1 à 4  $\mu\text{m}$* ", Astronomy and Astrophysics, **59**, p. 189
- KOVALEVSKY J., 1990, "*Astrométrie moderne*", Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- KROLL R.J., 1994, "*Latitudinal variation of the solar limb-darkening function*", Solar Physics, **152**, p. 105
- KROLL R.J., 1994, "*The observed spatial non-uniformity and temporal variability of the solar limb-darkening function*", dans "*The solar engine and its influence on terrestrial atmosphere and climate*" – Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- KUBO Y., 1993, "*Position and radius of the Sun determined by solar eclipses in combination with lunar occultations*", Publications of The Astronomical Society of Japan, **45**, p. 819
- KUHN J.R., LIBBRECHT K.G., DICKE R.H., 1985, "*Observations of a solar latitude-dependent limb brightness variation*", The Astrophysical Journal, **290**, p. 758
- KUHN J.R., LIBBRECHT K.G., 1991, "*Nonfacular solar luminosity variations*", The Astrophysical Journal, **381**, p. L35
- KUHN J.R., BOGART R., BUSH R.I., SÀ L., SCHERRER P., SCHEICK X., 1996, "*Precision solar astrometry from SOHO/MDI*", dans "*Sounding Solar and Stellar Interiors*" – IAU Symposia 181, France
- KUHN J.R., BUSH R.I., SCHEICK X., SCHERRER P., 1998, "*The Sun's Shape and Brightness*", Nature (preprint)
- KURBASOVA G.S., KORSUN A.A., RYAKHOVA L.V., RYBALOVA M.N., SHLIKAR G.N., 1997, "*Statistical correlation between 10 - year variations of annual mean geodynamical, geophysical, and heliophysical data*", Astronomy Reports, **41/1**, p. 128
- LABITZKE K., VANLOON H., 1988, "*Associations between the 11-year solar cycle and the atmosphere.*", Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, **50/3**, p. 197
- LABONTE B.J., HOWARD R., 1981, "*Mount Wilson solar diameter measurements*", dans "*Solar instrumentation : What's next ?*" – Sacramento Peak National Observatory – Sunspot, New Mexico
- LACLARE F., 1975, "*Sur les observations du Soleil faites avec l'astrolabe de Danjon*", Comptes Rendus Academie des Sciences Paris, Série II, **280**, p. 13



- LACLARE F., DEMARCO J., CHOLLET F., 1980, "*Sur la réalisation d'un astrolabe solaire au CERGA*", Comptes Rendus Academie des Sciences Paris, Série B, **291**, p. 189
- LACLARE F., GLENTZLIN M., LEISTER N., CHOLLET F., 1982, "*Observations du Soleil en 1980 à l'astrolabe du CERGA*", Astronomy and Astrophysics Supplement Series, **48**, p. 371
- LACLARE F., 1983, "*Astrolabe measurements of the solar diameter*", Astronomy and Astrophysics, **125**, p. 200
- LACLARE F., 1984, "*Observations du Soleil en 1982 à l'astrolabe du CERGA*", Astronomy and Astrophysics Supplement Series, **57**, p. 281
- LACLARE F., JOURNET A., SADSOU H., 1985, "*Measurements of the solar diameter using the CERGA astrolabe*", Comptes Rendus Academie des Sciences Paris, Série II, **301**, p. 383
- LACLARE F., 1987, "*Sur les variations du diamètre du Soleil observées à l'astrolabe solaire du CERGA*", Comptes Rendus Academie des Sciences Paris, Série II, **305**, p. 451
- LACLARE F., JOURNET A., 1987, "*CERGA astrolabe observations of the Sun between 1984-1985*", Astronomy and Astrophysics Supplement Series, **69**, p. 77
- LACLARE F., JOURNET A., 1989, "*Observations du Soleil en 1986 à l'astrolabe du CERGA*", Astronomy and Astrophysics Supplement Series, **77**, p. 131
- LACLARE F., 1990, "*Le diamètre solaire est-il variable ?*", Joint Organisation for Solar Observations, **Annual Report**, p. 29
- LACLARE F., MERLIN G., 1991, "*L'astrolabe solaire impersonnalisé par l'emploi d'une caméra C.C.D. Application à la mesure du diamètre solaire*", Comptes Rendus Academie des Sciences Paris, Série II, **313**, p. 323
- LACLARE F., DELMAS C., COIN J.P., IRBAH A., 1996, "*Measurements and variations of the solar diameter*", Solar Physics, **166**, p. 211
- LAKHAL L., 1995, "*Simulation numérique des effets de la turbulence atmosphérique sur les observations du bord solaire*", Rapport d'activité – Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique – Alger
- LANTOS P., 1990, "*Tout feu, tout flammes*", Ciel et Espace, **243**, p. 28
- LEISTER N., 1989, "*Orientação do sistema fundamental de referência. Observações do Sol com o astrolábio de Valinhos*", Tese de Doutorado – Instituto Astronômico e Geofísico – São Paulo
- LESUEUR D., 1988, "*Les fièvres du Soleil*", Ciel et Espace, **222**, p. 56
- LIBBRECHT K.G., KUHN J.R., 1984, "*A new measurement of the facular contrast near the solar limb*", The Astrophysical Journal, **277**, p. 889
- LIBBRECHT K.G., KUHN J.R., 1985, "*On the facular contrast near the solar limb*", The Astrophysical Journal, **299**, p. 1047
- LIBBRECHT K.G., WOODARD M.F., 1990, "*Solar-cycle effects on solar oscillation frequencies*", Nature, **345**, p. 779
- LOULERGUE M., 1995, "*Le Soleil, notre étoile*", dans "*Le monde des étoiles*" – Hachette Supérieur – Paris
- LOYER C., 1995, "*L'aplatissement solaire : définition, mesures et difficultés*", Rapport de stage – Observatoire de la Côte-d'Azur
- LYDON T.J., SOFIA S., 1996, "*A measurement of the shape of the solar disk : the solar quadrupole moment, the solar octopole moment, and the advance of perihelion of the planet Mercury*", Physical Review Letters, **76/2**, p. 177
- MAIER E., TWIGG L., SOFIA S., 1992, "*Preliminary results of a balloon flight of the Solar Disk Sextant*", The Astrophysical Journal, **389**, p. 447
- MAGAIN P., COURBIN F., SOHY S., 1997, "*Deconvolution with Correct Sampling*", The E.S.O. Messenger, **88**, p. 28

- MANGOMBI I., 1986, "*Contribution à la mise au point d'un astrolabe solaire à l'Observatoire de Paris. Corrections aux observations*", Thèse de Doctorat – Observatoire de Paris
- MARTIN V.A.F., BOCZKO R., BENEVIDES-SOARES P., LEISTER N.V., 1996, "*Système de référence stellaire : effets systématiques*", Astronomy and Astrophysics Supplement Series, **118**, p. 525
- MARTIN V.A.F., LEISTER N.V., 1997, "*Absolute declinations from astrolabe data*", Astronomy and Astrophysics Supplement Series, **126**, p. 169
- MARTINEZ P., KLOTZ A., 1994, "*Le guide pratique de l'astronomie CCD*", Adagio – Toulouse
- MASSETTI S., STORINI M., 1996, "*Spacetime modulation of solar neutrino flux : 1970 – 1992*", The Astrophysical Journal, **472**, p. 827
- McKECHNIE T.S., 1992, "*Atmospheric turbulence and the resolution limits of large ground-based telescopes*", Journal of the Optical Society of America, **9/11**, p. 1937
- MOREL P., PROVOST J., BERTHOMIEU G., 1997, "*Updated solar models*", Astronomy and Astrophysics, **327**, p. 349
- MORRISON L.V., STEPEHENSON F.R., PARKINSON J., 1988, "*Diameter of the Sun in AD 1715*", Nature, **331**, p. 421
- MORRISON D.R.O., 1992, "*Updated review of solar models and solar neutrino experiments*", International Journal of Modern Physics, **1/2**, p. 281
- MOURADIAN Z., 1993, "*La rotation solaire*", L'Astronomie, **107**, p. 74
- MULLER R., 1987, "*Variabilité du Soleil*", Journal des Astronomes Français, **31**, p. 7
- NAJID N.E., 1994, "*Analyse des données d'observation de l'astrolabe de Paris effectuées entre 1962 et 1982. Tests et applications de nouvelles méthodes*", Thèse de Doctorat – Université Hassan II
- NECKEL H., 1995, "*The solar radius derived from limb-darkening scans obtained in 1981 and from 1986 to 1990*", Solar Physics, **156**, p. 7
- NESME-RIBES E., FRICK P., SOKOLOFF D., ZACHAROV V., RIBES J.C., VIGOUROUX A., LACLARE F., 1995, "*Wavelet analysis of the Maunder minimum as recorded in solar diameter data*", Comptes Rendus Academie des Sciences Paris, Série II, **321**, p. 525
- NESME-RIBES E., BALIUNAS S.L., SOKOLOFF D., 1996, "*Sunspot cycles – on other stars – are helping astronomers study the sun's variations and the ways they might affect the Earth*", Scientific American, **275/2**, p. 31
- NEWBERRY M.V., 1994, "*The Signal to Noise connection*", CCD Astronomy, **Summer**, p. 34
- NEWBERRY M.V., 1994, "*The Signal to Noise connection. Part II*", CCD Astronomy, **Fall**, p. 12
- NEWBERRY M.V., 1995, "*Recovering the signal*", CCD Astronomy, **Spring**, p. 18
- NEWBERRY M.V., 1995, "*Dark frames*", CCD Astronomy, **Summer**, p. 12
- NEWBERRY M.V., 1996, "*Pursuing the ideal flat-field*", CCD Astronomy, **Winter**, p. 18
- NISHIKAWA J., 1994, "*On the cause of total irradiance variations observed by the CCD solar surface photometer*", Solar Physics, **152**, p. 125
- NOËL F., CZUIA K., GUERRA P., 1974, "*First astrolabe catalogue of Santiago*", Astronomy and Astrophysics Supplement Series, **18**, p. 135
- NOËL F., 1994, "*Observations of the Sun during 1993 with the astrolabe of Santiago*", Astronomy and Astrophysics Supplement Series, **106**, p. 327
- NOËL F., 1997, "*Variations of the apparent solar semidiameter observed with the astrolabe of Santiago*", Astronomy and Astrophysics, **325**, p. 825
- O'DELL C.R., VAN HELDEN A., 1987, "*How accurate were seventeenth-century measurements of solar diameter ?*", Nature, **330**, p. 629
- PARKER E., 1996, "*Something stirs under the Sun*", Nature, **379**, p. 209



- PATERNÒ L., SOFIA S., 1994, "*EUDOSSO : a space project for solar oscillations and long term variability relevant to climatic changes*", Solar Physics, **152**, p. 303
- PATERNÒ L., SOFIA S., DI MAURO M.P., 1996, "*The rotation of the Sun's core*", Astronomy and Astrophysics, **314**, p. 940
- PECKER J.C., SCHATZMAN E., 1959, "*Astrophysique générale*", Masson et Cie. – Paris
- PECKER J.C., 1984, "*Sous l'étoile Soleil*", Fayard – Paris
- PECKER J.C., 1994, "*The Sun : a synoptic view*", Vistas in Astronomy, **38**, p. 111
- PEIZHEN L., TONGQI X., 1996, "*Optical position and proper motion radio stars obtained at Shanghai Observatory*", Astronomy and Astrophysics Supplement Series, **115**, p. 311
- PELLETIER J.D., 1996, "*Variations in solar luminosity from timescales of minutes to months*", The Astrophysical Journal, **463**, p. L41
- PENNA J.L., 1995, "*Observações do Sol : determinação dos planos Fundamentais e elementos da órbita*", Tese de Doutorado, Observatorio Nacional – Rio de Janeiro
- PENNA J.L., BENEVIDES-SOARES P., ANDREI A.H., LACLARE F., LEISTER N.V., 1996, "*Results from the solar observation with astrolabes*", Astronomy and Astrophysics, **310**, p. 1036
- PENNA J.L., BENEVIDES-SOARES P., ANDREI A.H., LACLARE F., 1997, "*Discussion of the results from solar astrolabes*", Astronomy and Astrophysics Supplement Series, **123**, p. 403
- PETRO L.D., FOUKAL P.V., ROSEN W.A., KURUCZ R.L., PIERCE A.K., 1984, "*A study of solar photospheric limb-darkening variations*", The Astrophysical Journal, **283**, p. 426
- PEŠEK I., 1992, "*Almucantar deformations in the method of equal altitudes*", Astronomy and Astrophysics, **262**, p. 621
- PEŠEK I., VONDRÁK J., CHOLLET F., NOËL F., 1993, "*Systematic deformations of the apparent almucantar as derived from Danjon astrolabes in Paris and Santiago de Chile*", Astronomy and Astrophysics, **274**, p. 621
- PIJPERS F.P., 1998, "*Helioseismic determination of the solar gravitational quadrupole moment*", Monthly Notices Royal Astronomical Society (preprint)
- POPESCU R., 1998, "*Adaptation des caméras CCD aux instruments astrométriques de l'Observatoire de Bucarest. Application à l'astrolabe de Danjon*", Thèse de Doctorat – Observatoire de Bucarest & Observatoire de Paris (en cours)
- POPPE P.C.R., LEISTER N.V., LACLARE F., 1996, "*Corrections to the FK5 reference frame from the Sun's observations with the astrolabes at Abrahão de Moraes (1988-1994) and Calern (1988-1991) Observatories*", Astronomy and Astrophysics, **315**, p. 633
- RAST M.P., 1995, "*On the nature of exploding granules and granule fragmentation*", The Astrophysical Journal, **443**, p. 863
- RIBES E., RIBES J.C., BARTHALOT R., 1987, "*Evidence for a larger Sun with a slower rotation during the seventeenth century*", Nature, **326**, p. 52
- RIBES E., MERLIN P., RIBES J.C., BARTHALOT R., 1989, "*Absolute periodicities in the solar diameter derived from historical and modern data*", Annales Geophysicae, **7/4**, p. 321
- RIBES E., BEARDSLEY B., BROWN T.M., DELACHE PH., LACLARE F., KUHN J.R., LEISTER N.V., 1991, "*The variability of the solar diameter*", dans "*The Sun in time*" – University of Arizona Press - Tucson, AZ
- RIBES J.C., NESME-RIBES E., 1993, "*The solar sunspot cycle in the Maunder minimum AD 1645 to AD 1715*", Astronomy and Astrophysics, **276**, p. 579
- RODDIER F., 1981, "*The effects of atmospheric turbulence in optical astronomy*", North-Holland
- RODRÍGUEZ HIDALGO I., COLLADOS M., VÁZQUEZ M., 1994, "*Variations of properties of the quiet photosphere along the equator and the central meridian : spectroscopic results*", Astronomy and Astrophysics, **283**, p. 263

- RÖSCH J., YERLE R., 1981, "Solar dimeter measurements, a new approach", dans "Solar instrumentation : What's next ?" – Sacramento Peak National Observatory – Sunspot, New Mexico
- RÖSCH J., YERLE R., 1983, "Solar diameter(s)", Solar Physics, **82**, p. 139
- RÖSCH J., YERLE R., NOËNS J.C., 1987, "Variations de la géométrie globale du Soleil", Journal des Astronomes Français, **31**, p. 10
- RÖSCH J., 1990, "La granulation photosphérique vue du Pic-du-Midi (1943-1989)", L'Astronomie, **104**, p. 99 (première partie) et 293 (deuxième partie)
- RÖSCH J., ROZELOT J.P., DESLANDES H., DESNOUX V., 1996, "A new estimate of the quadrupole moment of the Sun", Solar Physics, **165**, p. 1
- ROSEN W.A., FOUKAL P.V., KURUCZ R.L., PIERCE A.K., 1982, "Variations in photospheric limb darkening as a diagnostic of changes in solar luminosity", The Astrophysical Journal, **253**, p. L89
- ROUDIER T., ESPAGNET O., MULLER R., VIGNEAU J., 1994, "Peculiar interactions between granules and network bright points in the solar photosphere", Astronomy and Astrophysics, **287**, p. 982
- ROZELOT J.P., 1995, "On the chaotic behaviour of the solar activity", Astronomy and Astrophysics, **297**, p. L45
- ROZELOT J.P., 1996, "Aplatissement solaire", Séminaire – Observatoire de Calern/Grasse
- ROZELOT J.P., 1996, "Measurements of the oblateness of the Sun", Joint Organisation for Solar Observations, **Annual Report**, p. 80
- ROZELOT J.P., RÖSCH J., 1996, "Le Soleil change-t-il de forme ?", Comptes Rendus Academie des Sciences Paris, Série II b, **322**, p. 637
- ROZELOT J.P., RÖSCH J., 1997, "An upper bound to the solar oblateness", Solar Physics, **172**, p. 11
- SADSAOUD H., 1986, "Etude des variations du diamètre du Soleil observé à l'astrolabe solaire du CERGA", Thèse de Doctorat – Université de Nice
- SÁNCHEZ M., 1991, "Nuevo astrolabio polivalente del ROA", Thèse de Doctorat – Facultad de Física – Barcelona
- SÁNCHEZ M., MORENO F., PARRA F., SOLER M., 1993, "Modification de l'astrolabe du R.O.A. Campagne expérimentale d'observation du Soleil en 1991", Astronomy and Astrophysics, **280**, p. 333
- SCHMIDT W., KNOLKER M., WESTENDORP PLAZA C., 1994, "Limb observations of the He I 1083.0 nm line", Astronomy and Astrophysics, **287**, p. 229
- SCHOU J., KOSOVICHEV A.G., GOODE P.R., DZIEMBOWSKI W.A., 1997, "Determination of the Sun's seismic radius from the SOHO Michelson Doppler Imager", The Astrophysical Journal, **489**, p. L197
- SECHAUD N., 1994, "Analyse des relations possibles entre les variations du diamètre solaire et l'atmosphère", Rapport de stage de DEA – Observatoire de Paris
- SEIDELMAN P.K., 1994, "Explanatory supplement to the Astronomical Almanac", University Science Books – U.S.A.
- SINCEAC V., 1995, "Astrométrie à l'astrolabe équipé d'une caméra CCD ; Analyse d'images en vue des déterminations des temps de passage", Rapport de stage de D.E.A. – Observatoire de Paris
- SINCEAC V., CHOLLET F., LACLARE F., DELMAS C., 1998, "Méthode nouvelle pour la mesure CCD du diamètre solaire avec un astrolabe", Astronomy and Astrophysics Supplement Series, **128**, p. 605
- SOFIA S., CHIU H.Y., MAIER E., SCHATTEN K.H., MINOTT P., ENDAL A.S., 1984, "Solar Disk Sextant", Applied Optics, **23-8**, p. 1235
- SOFIA S., HEAPS W., TWIGG L.W., 1994, "The solar diameter and oblateness measured by the solar disk sextant on the 1992 september 30 balloon flight", The Astrophysical Journal, **427**, p. 1048
- SOLANKI S.K., UNRUH Y.C., 1998, "A model of the wavelength dependence of solar irradiance variations", Astronomy and Astrophysics, **329**, p. 747
- SPRUIT H.C., 1991, "Theory of luminosity and radius variations", dans "The Sun in time" – University of



Arizona Press - Tucson, AZ

SPRUIT H.C., 1994, "Theories of radius and luminosity variations", dans "The solar engine and its influence on terrestrial atmosphere and climate" – Springer-Verlag Berlin Heidelberg

STENFLO J.O., BIANDA M., KELLER C.U., SOLANKI S.K., 1997, "Center-to-limb variation of the second solar spectrum", *Astronomy and Astrophysics*, **322**, p. 985

TALON S., ZAHN J.P., 1998, "Towards a hydrodynamical model predicting the observed solar rotation profile", *Astronomy and Astrophysics*, **329**, p. 315

THOMAS D.V., 1967, "A proposal for a reflecting astrolabe", *Monthly Notes of the Astronomical Society of South Africa*, **26/1-2**, p. 2

TINSLEY B.A., BROWN G.M., SCHERRER P.H., 1989, "Solar activity, the QBO, and tropospheric responses", dans "Middle Atmosphere Program" – Volume 29 – SCOSTEP University of Illinois – Urbana, Illinois

TOBIAS S.M., 1997, "The solar cycle : parity interactions and amplitude modulation", *Astronomy and Astrophysics*, **322**, p. 1007

TONER C.G., JEFFERIES S.M., 1993, "Accurate measurement of the geometry for a full-disk solar image and estimation of the observational point spread function", *The Astrophysical Journal*, **415**, p. 852

TONER C.G., JEFFERIES S.M., DUVAL T.L., 1997, "Restoration of long-exposure full-disk solar intensity images", *The Astrophysical Journal*, **478**, p. 817

TOULMONDE M., 1995, "Etude comparative de diamètres solaires observés à partir d'instruments astrométriques", Thèse de Doctorat – Observatoire de Paris

TOULMONDE M., 1997, "The diameter of the Sun over the past three centuries", *Astronomy and Astrophysics*, **325**, p. 1174

TOUTAIN T., APPOURCHAUX T., BAUDIN F., FRÖHLICH C., GABRIEL A., SCHERRER P., ANDERSEN B.N., BOGART R., BUSH R., FINSTERLE W., GARCÍA R.A., GREC G., HENNEY C.J., HOEKSEMA J.T., JIMÉNEZ A., KOSOVICHEV A., ROCA CORTÉS T., TURCK-CHIÈZE S., ULRICH R., WEHRLI C., 1997, "Tri-phonic heliosismology : comparison of solar p modes observed by the heliosismology instruments aboard SOHO", *Solar Physics* (preprint)

ULRICH R.K., BERTELLO L., 1995, "Solar-cycle dependence of the Sun's apparent radius in the neutral iron spectral line at 525 nm", *Nature*, **377**, p. 214

VASILYEV O.B., MAKAROV V.I., 1996, "On the 22-year oscillations. I. Hysteresis of the solar diameter", *Solar Physics*, **163**, p. 249

VIGOUROUX A., 1996, "Etude de la variabilité solaire à long terme", Thèse de Doctorat – Université de Nice

VIGOUROUX A., 1996, "Variations of the observed solar diameter", *Forum Themis – Observatoire de Paris-Meudon*

VIZOSO G., BALLESTER J.L., 1990, "The north-south asymmetry of sunspots", *Astronomy and Astrophysics*, **229**, p. 540

VONDRÁK J., RON C., PEŠEK I., 1997, "Earth rotation in the Hipparcos reference frame", *Astronomy and Astrophysics* (preprint)

WAN L., ZHAO J., CHU Z., WANG R., TAN Z., ZHAO G., CHENG Z., 1990, "Determination of correction to the standard solar radius", *Chinese Astronomy and Astrophysics*, **14/2**, p. 213

WILLSON R.C., HUDSON H.S., 1991, "The Sun's luminosity over a complete solar cycle", *Nature*, **351**, p. 42

WITTMANN A., 1973, "The solar diameter at 5000 Å and H $\alpha$  from photoelectric drift scans", *Solar Physics*, **29**, p. 333

WITTMANN A., 1977, "The diameter of the Sun", *Astronomy and Astrophysics*, **61**, p. 225

WITTMANN A., 1980, "The solar limb darkening function at 512 Å and its possible variations", *Astronomy and Astrophysics*, **83**, p. 312

WITTMANN A., DÉBARBAT S., 1990, "Le diamètre du Soleil est-il variable ?", *L'Astronomie*, **104**, p. 8

- WITTMANN A.D., ALGE E., BIANDA M., 1991, *"Recent results on the solar diameter"*, Solar Physics, **135**, p. 243
- WITTMANN A.D., ALGE E., BIANDA M., 1993, *"Detection of a significant change in the solar diameter"*, Solar Physics, **145**, p. 205
- WITTMANN A.D., NECKEL H., 1996, *"On relation between the Sun's (geocentric) angular-diameter and the observed (topocentric) drift time"*, Solar Physics, **163**, p. 1
- WITTMANN A.D., 1997, *"CCD - drift scan measurements of the solar diameter : methods and first results"*, Solar Physics, **171**, p. 231
- WOODARD M.F., LIBBRECHT K.G., 1993, *"Solar activity and oscillation frequency splittings"*, The Astrophysical Journal, **402**, p. L77
- XU J., WANG H., LI D., LI Q., WANG Z., ZHAO G., ZHANG J., WANG R., HU H., 1993, *"Modernisation of the photoelectric astrolabe in China and primary results"*, Astronomy and Astrophysics, **271**, p. 360
- YERLE R., 1981, *"Solar oscillations and limb darkening fluctuations"*, Astronomy and Astrophysics, **100**, p. L23
- YERLE R., 1988, *"Periodical asymmetry of solar limb darkening"*, dans *"Seismology of the Sun and Sun-like stars"* – ESA Annual Reports 1988
- YOSHIZAWA M., 1996, *"Solar semi-diameter variations observed with the Tokyo photoelectric meridian circle for the years from 1985 to 1994"*, dans *"New Observational Techniques, Catalogues and Astrometry"* – IAU Colloquium 165, Poland
- ZHUGZHDA Y., STIX M., 1997, *"Comments on the analytic theory of p modes by Dzhililov and Staude"*, Astronomy and Astrophysics, **322**, p. 982



## BIBLIOGRAPHIE – ORDRE CHRONOLOGIQUE

1954

DANJON A. : "*L'astrolabe impersonnel de l'Observatoire de Paris*", Bulletin Astronomique, **18**, p. 251

1958

DANJON A. : "*L'astrolabe impersonnel modèle O.P.L.*", Bulletin Astronomique, **21**, p. 323

GUINOT B. : "*L'astrolabe impersonnel A. Danjon, modèle O.P.L., de l'Observatoire de Paris. Etude des résultats d'une année d'observations*", Thèse de Doctorat – Faculté des Sciences de l'Université de Paris

1959

CHRÉTIEN H. : "*Calcul des combinaisons optiques*", J.R.Sennac – Paris

PECKER J.C., SCHATZMAN E. : "*Astrophysique générale*", Masson et Cie. – Paris

1962

KIEPENHEUER K.O. : "*Solar site testing*", dans "*Site Testing*" – IAU Symposium 19, Rome

1963

ALLEN C.W. : "*Astrophysical quantities*", The Athlone Press – University of London

1966

FRIED D.L. : "*Optical Resolution Through a Randomly Inhomogeneous Medium for Very Long and Very Short Exposures*", Journal of the Optical Society of America, **56/10**, p. 1372

1967

DICKE R.H., GOLDENBERG H.M. : "*Solar oblateness and general relativity*", Physical Review Letters, **18/9**, p. 313

THOMAS D.V. : "*A proposal for a reflecting astrolabe*", Monthly Notes of the Astronomical Society of South Africa, **26/1-2**, p. 2

1968

FLEURY P., MATHIEU J.P. : "*Images Optiques*", Eyrolles – Paris

1970

BILLAUD G. : "*Analyse des observations faites à Paris avec le prototype de l'astrolabe DANJON 1953 – 1957*", Astronomy and Astrophysics, **7**, p. 367

DÉBARBAT S., GUINOT B. : "*La méthode des hauteurs égales en astronomie*", Gordon & Breach – Paris

1971

BILLAUD G., GUINOT B. : "*Un astrolabe à pleines pupilles*", Astronomy and Astrophysics, **11**, p. 241

## 1972

ALTROCK R.C., CANFIELD R.C. : *"Observations of the variation of temperature with latitude in the upper solar photosphere"*, The Astrophysical Journal, **171**, p. L71

## 1973

WITTMANN A. : *"The solar diameter at 5000 Å and H $\alpha$  from photoelectric drift scans"*, Solar Physics, **29**, p. 333

## 1974

NOËL F., CZUIA K., GUERRA P. : *"First astrolabe catalogue of Santiago"*, Astronomy and Astrophysics Supplement Series, **18**, p. 135

## 1975

HILL H.A., STEBBINS R.T. : *"The intrinsic visual oblateness of the Sun"*, The Astrophysical Journal, **200**, p. 471

HILL H.A., STEBBINS R.T., OLESON J.R. : *"The Finite Fourier Transform Definition of an edge on the solar disk"*, The Astrophysical Journal, **200**, p. 484

LACLARE F. : *"Sur les observations du Soleil faites avec l'astrolabe de Danjon"*, Comptes Rendus Academie des Sciences Paris, Série II, **280**, p. 13

## 1976

CLAUZET L.B.F. : *"Statistical analysis of the Danjon astrolabe at São Paulo"*, Astronomy and Astrophysics Supplement Series, **25**, p. 55

DICKE R.H. : *"Evidence for a solar distortion rotating with a period of 12.2 days"*, Solar Physics, **47**, p. 475

## 1977

BARLETTI R., CEPPATELLI G., PATERNÒ L., RIGHINI A., SPERONI N. : *"Astronomical site testing with balloon borne radiosondes : results about atmospheric turbulence, solar seeing and stellar scintillation"*, Astronomy and Astrophysics, **54**, p. 649

FOSSAT E., HARVEY J., HAUSMAN M., SLAUGHTER C. : *"Apparent solar oscillations and fluctuations in the Earth's atmosphere"*, Astronomy and Astrophysics, **59**, p. 279

KNIGHT C.K., GATEWOOD G.D., KIPP S.L., BLACK D. : *"Atmospheric turbulence and the apparent instantaneous diameter of the Sun"*, Astronomy and Astrophysics, **59**, p. L27

KOUTCHMY S., KOUTCHMY O., KOTOV V. : *"Mesures d'assombrissement du limbe solaire dans le domaine de 1 à 4  $\mu$ m"*, Astronomy and Astrophysics, **59**, p. 189

WITTMANN A. : *"The diameter of the Sun"*, Astronomy and Astrophysics, **61**, p. 225

## 1978

BROWN T.M., STEBBINS R.T., HILL H.A. : *"Long-period oscillations of the solar diameter : Observations"*, The Astrophysical Journal, **223**, p. 324

## 1979

BORGNINO J., AZOUIT M., BARLETTI R., CEPPATELLI G., PATERNÒ L., RIGHINI A., SPERONI N., VERNIN J. : *"Turbulence around a solar telescope as deduced from angle of arrival statistics. A comparison with microthermal measurements"*, Astronomy and Astrophysics, **79**, p. 184



EDDY J.A., BOORNAZIAN A.A. : "*Secular Decrease in the Solar Diameter, 1863-1953*", Bulletin of the American Astronomical Society, **11/2**, p. 437

FOUKAL P., VERNAZZA J. : "*The effect of magnetic fields on solar luminosity*", The Astrophysical Journal, **234**, p. 707

## 1980

DANJON A. : "*Astronomie Générale*", Blanchard – Paris

LACLARE F., DEMARCQ J., CHOLLET F. : "*Sur la réalisation d'un astrolabe solaire au CERGA*", Comptes Rendus Academie des Sciences Paris, Série B, **291**, p. 189

WITTMANN A. : "*The solar limb darkening function at 512 Å and its possible variations*", Astronomy and Astrophysics, **83**, p. 312

## 1981

CHOLLET F. : "*Observations du Soleil à l'astrolabe*", Thèse de Doctorat, L'Université Pierre et Marie Curie – Paris

DUVALL T.L., JONES H.P. : "*Solar radius measurements*", dans "*Solar instrumentation : What's next ?*" – Sacramento Peak National Observatory – Sunspot, New Mexico

HILL H.A. : "*Solar astrometry*", dans "*Solar instrumentation : What's next ?*" – Sacramento Peak National Observatory – Sunspot, New Mexico

GILLILAND R.L. : "*Solar radius variations over the past 265 years*", The Astrophysical Journal, **248**, p. 1144

LABONTE B.J., HOWARD R. : "*Mount Wilson solar diameter measurements*", dans "*Solar instrumentation : What's next ?*" – Sacramento Peak National Observatory – Sunspot, New Mexico

RODDIER F. : "*The effects of atmospheric turbulence in optical astronomy*", North-Holland

RÖSCH J., YERLE R. : "*Solar diameter measurements, a new approach*", dans "*Solar instrumentation : What's next ?*" – Sacramento Peak National Observatory – Sunspot, New Mexico

YERLE R. : "*Solar oscillations and limb darkening fluctuations*", Astronomy and Astrophysics, **100**, p. L23

## 1982

ANDREI A.H. : "*Observações de estrelas com astrolábio no Rio de Janeiro*", Dissertação de Maestrado – Instituto Astronômico e Geofísico – São Paulo

BORGNINO J., CEPPELLI G., RICORT G., RIGHINI A. : "*Lower atmosphere and solar seeing : an experiment of simultaneous measurements of nearby turbulence by thermal radiosondes, by angle of arrival statistics and image motion observation*", Astronomy and Astrophysics, **107**, p. 333

BOUGEARD M. : "*Analyse des observations du Soleil à l'astrolabe du CERGA Extension aux observations incomplètes*", Mémoire présenté à l'Observatoire de Paris

BRETAGNON P. : "*Théorie du mouvement de l'ensemble des planètes. Solution VSOP82*", Astronomy and Astrophysics, **114**, p. 278

BROWN T.M. : "*Seeing-independent definitions of the solar limb position*", Astronomy and Astrophysics, **116**, p. 260

BROWN T.M., ELMORE D.F., LACEY L., HULL H. : "*Solar Diameter Monitor : an instrument to measure long-term changes*", Applied Optics, **21-19**, p. 3588

CLAUZET L.B.F. : "*Contribuição ao sistema fundamental de referência. Catálogos astrolábio de Valinhos*", Tese de Doutorado – Instituto Astronômico et Geofísico – São-Paulo

ENDAL A.S., TWIGG L.W. : "*The effect of perturbation of convective energy transport on the luminosity and radius of the Sun*", The Astrophysical Journal, **260**, p. 342

LACLARE F., GLENTZLIN M., LEISTER N., CHOLLET F. : "*Observations du Soleil en 1980 à l'astrolabe du CERGA*", Astronomy and Astrophysics Supplement Series, **48**, p. 371

ROSEN W.A., FOUKAL P.V., KURUCZ R.L., PIERCE A.K. : "*Variations in photospheric limb darkening as a diagnostic of changes in solar luminosity*", The Astrophysical Journal, **253**, p. L89

### 1983

BOUGEARD M., CHOLLET F., LACLARE F. : "*Analyse des observations du Soleil à l'astrolabe du CERGA*", Astronomy and Astrophysics, **126**, p. 161

LACLARE F. : "*Astrolabe measurements of the solar diameter*", Astronomy and Astrophysics, **125**, p. 200

RÖSCH J., YERLE R. : "*Solar diameter(s)*", Solar Physics, **82**, p. 139

### 1984

BENEVIDES-SOARES P., CLAUZET L.B.F. : "*Astrolabe zenith distance variation*", Astronomy and Astrophysics, **134**, p. 338

CHIU H.Y. : "*Evaluation of the Solar Disk Sextant concept*", Applied Optics, **23-8**, p. 1226

CHIU H.Y., MAIER E., SCHATTEN K.H., SOFIA S. : "*Solar Disk Sextant optical configuration*", Applied Optics, **23-8**, p. 1230

JOURNET A., LACLARE F. : "*Observations du Soleil à l'astrolabe du CERGA*", Astronomy and Astrophysics, **141**, p. L7

LACLARE F. : "*Observations du Soleil en 1982 à l'astrolabe du CERGA*", Astronomy and Astrophysics Supplement Series, **57**, p. 281

LIBBRECHT K.G., KUHN J.R. : "*A new measurement of the facular contrast near the solar limb*", The Astrophysical Journal, **277**, p. 889

PECKER J.C. : "*Sous l'étoile Soleil*", Fayard – Paris

PETRO L.D., FOUKAL P.V., ROSEN W.A., KURUCZ R.L., PIERCE A.K. : "*A study of solar photospheric limb-darkening variations*", The Astrophysical Journal, **283**, p. 426

SOFIA S., CHIU H.Y., MAIER E., SCHATTEN K.H., MINOTT P., ENDAL A.S. : "*Solar Disk Sextant*", Applied Optics, **23-8**, p. 1235

### 1985

DELACHE P., LACLARE F., SADSOUH H. : "*Long period oscillations in solar diameter measurements*", Nature, **317**, p. 416

ENDAL A.S., SOFIA S., TWIGG L.W. : "*Changes of solar luminosity and radius following secular perturbations in the convective envelope*", The Astrophysical Journal, **290**, p. 748

HILL H.A. : "*Detection and classification of resolved multiplet members of the solar 5 minute oscillations through solar diameter-type observations*", The Astrophysical Journal, **290**, p. 765

KUHN J.R., LIBBRECHT K.G., DICKE R.H. : "*Observations of a solar latitude-dependent limb brightness variation*", The Astrophysical Journal, **290**, p. 758

LACLARE F., JOURNET A., SADSOUH H. : "*Measurements of the solar diameter using the CERGA astrolabe*", Comptes Rendus Academie des Sciences Paris, Série II, **301**, p. 383

LIBBRECHT K.G., KUHN J.R. : "*On the facular contrast near the solar limb*", The Astrophysical Journal, **299**, p. 1047

### 1986

BILLAUD G. : "*A new astrolabe*", dans "*Astrometric Techniques*" – IAU Symposium 109, USA



- BUIL C. : *"Astronomie CCD"*, Société d'Astronomie de Toulouse
- CHOLLET F., DÉBARBAT S. : *"Objets accessibles aux astrolabes de haute précision : étoiles et radioétoiles brillantes, planètes, Soleil"*, dans *"Astrometric techniques"* – IAU Symposium 109, USA
- GALMICHE J. : *"Temps et latitude fournis par la station Astrolabe de de Paris"*, Thèse de Doctorat – L'Université Pierre et Marie Curie
- IRBAH A. : *"Mesure des paramètres atmosphériques qualifiant les images en astronomie solaire"*, Thèse de Doctorat – Université de Nice
- JOURNET A. : *"Analyse des observations du Soleil à l'astrolabe"*, *Astronomy and Astrophysics*, **164**, p. 222
- MANGOMBI I. : *"Contribution à la mise au point d'un astrolabe solaire à l'Observatoire de Paris. Corrections aux observations"*, Thèse de Doctorat – Observatoire de Paris
- SADSAOUD H. : *"Etude des variations du diamètre du Soleil observé à l'astrolabe solaire du CERGA"*, Thèse de Doctorat – Université de Nice

## 1987

- BRANDT P.N., MAUTER H.A., SMARTT R. : *"Day-time seeing statistics at Sacramento Peak Observatory"*, *Astronomy and Astrophysics*, **188**, p. 163
- DICKE R.H., KUHN J.R., LIBBRECHT K.G. : *"Is the solar oblateness variable ? Measurements of 1985."*, *The Astrophysical Journal*, **318**, p. 451
- KERR A.R. : *"Sunspot-weather correlation found"*, *Science*, **238**, p. 479
- LACLARE F. : *"Sur les variations du diamètre du Soleil observées à l'astrolabe solaire du CERGA"*, *Comptes Rendus Academie des Sciences Paris, Série II*, **305**, p. 451
- LACLARE F., JOURNET A. : *"CERGA astrolabe observations of the Sun between 1984-1985"*, *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, **69**, p. 77
- MULLER R. : *"Variabilité du Soleil"*, *Journal des Astronomes Français*, **31**, p. 7
- O'DELL C.R., VAN HELDEN A. : *"How accurate were seventeenth-century measurements of solar diameter ?"*, *Nature*, **330**, p. 629
- RIBES E., RIBES J.C., BARTHALOT R. : *"Evidence for a larger Sun with a slower rotation during the seventeenth century"*, *Nature*, **326**, p. 52
- RÖSCH J., YERLE R., NOËNS J.C. : *"Variations de la géométrie globale du Soleil"*, *Journal des Astronomes Français*, **31**, p. 10

## 1988

- BRETAGNON P., FRANCOU G. : *"Planetary theories in rectangular and spherical variables. VSOP 87 solutions"*, *Astronomy and Astrophysics*, **202**, p. 309
- CHANIN M.L., KECKHUT P., HAUCHECORNE A., LABITZKE K. : *"The solar activity – QBO effect in the lower atmosphere"*, *Annales Geophysicae*, **7/5**, p. 463
- GELLY B., FOSSAT E., GREC G. : *"New analysis of the solar p - mode frequency change from 1980 to 1986"*, *Astronomy and Astrophysics*, **200**, p. L29
- GOUGH D. : *"Deep roots of solar cycles"*, *Nature*, **336**, p. 618
- LESUEUR D. : *"Les fièvres du Soleil"*, *Ciel et Espace*, **222**, p. 56
- LABITZKE K., VANLOON H. : *"Associations between the 11-year solar cycle and the atmosphere."*, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, **50/3**, p. 197
- MORRISON L.V., STEPEHENSON F.R., PARKINSON J. : *"Diameter of the Sun in AD 1715"*, *Nature*, **331**, p. 421
- YERLE R. : *"Periodical asymmetry of solar limb darkening"*, dans *"Seismology of the Sun and Sun-like stars"* – ESA Annual Reports 1988

## 1989

- LACLARE F., JOURNET A. : "*Observations du Soleil en 1986 à l'astrolabe du CERGA*", Astronomy and Astrophysics Supplement Series, **77**, p. 131
- LEISTER N. : "*Orientação do sistema fundamental de referência. Observações do Sol com o astrolábio de Valinhos*", Tese de Doutorado – Instituto Astronômico e Geofísico – São Paulo
- RIBES E., MERLIN P., RIBES J.C., BARTHALOT R. : "*Absolute periodicities in the solar diameter derived from historical and modern data*", Annales Geophysicae, **7/4**, p. 321
- TINSLEY B.A., BROWN G.M., SCHERRER P.H. : "*Solar activity, the QBO, and tropospheric responses*", dans "*Middle Atmosphere Program*" – Volume 29 – SCOSTEP University of Illinois – Urbana, Illinois

## 1990

- DÉBARBAT S., LACLARE F. : "*Which reference frame for the sun ?*", Acta Astronomica, **40-3**, p. 313
- DOMINGO V. : "*The space-based Solar and Heliospheric Observatory SOHO and its relation to ground-based observatories*", Joint Organisation for Solar Observations, **Annual Report**, p. 22
- ELSWORTH Y., HOWE R., ISAAK G.R., MCLEOD C.P., NEW R. : "*Variation of low-order acoustic solar oscillation over the solar cycle*", Nature, **345**, p. 322
- FOUKAL P. : "*Le Soleil : une étoile variable*", Pour la Science, **150**, p. 32
- GOODE P.R., KUHN J.R. : "*Consistency in trends in helioseismic data and photospheric temperature data through the solar cycle*", The Astrophysical Journal, **356**, p. 310
- KOVALEVSKY J. : "*Astrométrie moderne*", Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- LACLARE F. : "*Le diamètre solaire est-il variable ?*", Joint Organisation for Solar Observations, **Annual Report**, p. 29
- LANTOS P. : "*Tout feu, tout flammes*", Ciel et Espace, **243**, p. 28
- LIBBRECHT K.G., WOODARD M.F. : "*Solar-cycle effects on solar oscillation frequencies*", Nature, **345**, p. 779
- RÖSCH J. : "*La granulation photosphérique vue du Pic-du-Midi (1943-1989)*", L'Astronomie, **104**, p. 99 (première partie) et 293 (deuxième partie)
- VIZOSO G., BALLESTER J.L. : "*The north-south asymmetry of sunspots*", Astronomy and Astrophysics, **229**, p. 540
- WAN L., ZHAO J., CHU Z., WANG R., TAN Z., ZHAO G., CHENG Z. : "*Determination of correction to the standard solar radius*", Chinese Astronomy and Astrophysics, **14/2**, p. 213
- WITTMANN A., DÉBARBAT S. : "*Le diamètre du Soleil est-il variable ?*", L'Astronomie, **104**, p. 8

## 1991

- BOUET J. : "*Essai de mise en évidence de l'ellipticité du disque solaire à l'aide des durées des passages de Mercure sur le Soleil*", Revue des Questions Scientifiques, **162-4**, p. 407
- KUHN J.R., LIBBRECHT K.G. : "*Nonfacular solar luminosity variations*", The Astrophysical Journal, **381**, p. L35
- LACLARE F., MERLIN G. : "*L'astrolabe solaire impersonnalisé par l'emploi d'une caméra C.C.D. Application à la mesure du diamètre solaire*", Comptes Rendus Académie des Sciences Paris, Série II, **313**, p. 323
- RIBES E., BEARDSLEY B., BROWN T.M., DELACHE PH., LACLARE F., KUHN J.R., LEISTER N.V. : "*The variability of the solar diameter*", dans "*The Sun in time*" – University of Arizona Press - Tucson, AZ
- SÁNCHEZ M. : "*Nuevo astrolabio polivalente del ROA*", Thèse de Doctorat – Facultad de Física – Barcelona
- SPRUIT H.C. : "*Theory of luminosity and radius variations*", dans "*The Sun in time*" – University of Arizona Press - Tucson, AZ



WILLSON R.C., HUDSON H.S. : *"The Sun's luminosity over a complet solar cycle"*, Nature, **351**, p. 42  
 WITTMANN A.D., ALGE E., BIANDA M. : *"Recent results on the solar diameter"*, Solar Physics, **135**, p. 243

## 1992

BENEVIDES-SOARES P., TEIXEIRA R. : *"On the relationship between conventional an overlap reduction techniques in positional astronomy"*, Astronomy and Astrophysics, **253**, p. 307  
 BOURGÈS L. : *"Extension à des images bi-dimensionnelles des méthodes de détermination du limbe solaire"*, Rapport de stage de DEA – Université de Nice  
 MAIER E., TWIGG L., SOFIA S. : *"Preliminary results of a balloon flight of the Solar Disk Sextant"*, The Astrophysical Journal, **389**, p. 447  
 MCKECHNIE T.S. : *"Atmospheric turbulence and the resolution limits of large ground-based telescopes"*, Journal of the Optical Society of America, **9/11**, p. 1937  
 MORRISON D.R.O. : *"Updated review of solar models and solar neutrino experiments"*, International Journal of Modern Physics, **1/2**, p. 281  
 PEŠEK I. : *"Almucantar deformations in the method of equal altitudes"*, Astronomy and Astrophysics, **262**, p. 621

## 1993

CHOLLET F., NOËL F. : *"Le nouvel astrolabe de Santiago du Chili. Description de l'instrument et premiers résultats"*, Astronomy and Astrophysics, **276**, p. 655  
 CHOLLET F. : *"Une méthode globale d'analyse des observations à l'astrolabe"*, Astronomy and Astrophysics, **280**, p. 675  
 DELACHE P., GAVRYUSEV V., GAVRYUSEVA E., LACLARE F., RÉGULO C., ROCA CORTÉS T. : *"Time correlation between solar structural parameters : p-mode frequencies, radius, and neutrino flux"*, The Astrophysical Journal, **407**, p. 801  
 IRBAH A., BORGNINO J., LACLARE F., MERLIN G. : *"Isoplanatism and high spatial resolution solar imaging"*, Astronomy and Astrophysics, **276**, p. 663  
 KUBO Y. : *"Position and radius of the Sun determined by solar eclipses in combination with lunar occultations"*, Publications of The Astronomical Society of Japan, **45**, p. 819  
 MOURADIAN Z. : *"La rotation solaire"*, L'Astronomie, **107**, p. 74  
 PEŠEK I., VONDRÁK J., CHOLLET F., NOËL F. : *"Systematic deformations of the apparent almucantar as derived from Danjon astrolabes in Paris and Santiago de Chile"*, Astronomy and Astrophysics, **274**, p. 621  
 RIBES J.C., NESME-RIBES E. : *"The solar sunspot cycle in the Maunder minimum AD 1645 to AD 1715"*, Astronomy and Astrophysics, **276**, p. 579  
 SÁNCHEZ M., MORENO F., PARRA F., SOLER M. : *"Modification de l'astrolabe du R.O.A. Campagne expérimentale d'observation du Soleil en 1991"*, Astronomy and Astrophysics, **280**, p. 333  
 TONER C.G., JEFFERIES S.M. : *"Accurate measurement of the geometry for a full-disk solar image and estimation of the observational point spread function"*, The Astrophysical Journal, **415**, p. 852  
 WITTMANN A.D., ALGE E., BIANDA M. : *"Detection of a signifiant change in the solar diameter"*, Solar Physics, **145**, p. 205  
 WOODARD M.F., LIBBRECHT K.G. : *"Solar activity and oscillation frequency splittings"*, The Astrophysical Journal, **402**, p. L77  
 XU J., WANG H., LI D., LI Q., WANG Z., ZHAO G., ZHANG J., WANG R., HU H. : *"Modernisation of the photoelectric astrolabe in China and primary results"*, Astronomy and Astrophysics, **271**, p. 360

- DELACHE P., KROLL R.J. : "*Panel discussion on solar diameter variations*", dans "*The solar engine and its influence on terrestrial atmosphere and climate*" – Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- DESLANDES H. : "*Héliomètre à balayage*", Rapport de stage – Observatoire de la Côte-d'Azur
- DJUROVIC D., PÂQUET P., BILLIAU A. : "*New indications for the solar origin of the 50-day cycle in the atmospheric circulation and Earth's rotation*", *Astronomy and Astrophysics*, **288**, p. 335
- FIALA A.D., DUNHAM D.W., SOFIA S. : "*Variation of the solar diameter from solar eclipse observations, 1715 – 1991*", *Solar Physics*, **152**, p. 97
- GAVRYUSEV V., GAVRYUSEVA E., DELACHE P., LACLARE F. : "*Periodicities in solar radius measurements*", *Astronomy and Astrophysics*, **286**, p. 305
- IRBAH A., LACLARE F., BORGNINO J., MERLIN G. : "*Solar diameter measurements with Calern Observatory astrolabe and atmospheric turbulence effects*", *Solar Physics*, **149**, p. 213
- KOLESNIK Y.B., DAVILA H. : "*The second Quito astrolabe catalogue*", *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, **103**, p. 427
- KROLL R.J. : "*Latitudinal variation of the solar limb-darkening function*", *Solar Physics*, **152**, p. 105
- KROLL R.J. : "*The observed spatial non-uniformity and temporal variability of the solar limb-darkening function*", dans "*The solar engine and its influence on terrestrial atmosphere and climate*" – Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- MARTINEZ P., KLOTZ A. : "*Le guide pratique de l'astronomie CCD*", Adagio – Toulouse
- NAJID N.E. : "*Analyse des données d'observation de l'astrolabe de Paris effectuées entre 1962 et 1982. Tests et applications de nouvelles méthodes*", Thèse de Doctorat – Université Hassan II
- NEWBERRY M.V. : "*The Signal to Noise connection*", *CCD Astronomy*, **Summer**, p. 34
- NEWBERRY M.V. : "*The Signal to Noise connection. Part II*", *CCD Astronomy*, **Fall**, p. 12
- NISHIKAWA J. : "*On the cause of total irradiance variations observed by the CCD solar surface photometer*", *Solar Physics*, **152**, p. 125
- NOËL F. : "*Observations of the Sun during 1993 with the astrolabe of Santiago*", *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, **106**, p. 327
- PECKER J.C. : "*The Sun : a synoptic view*", *Vistas in Astronomy*, **38**, p. 111
- PATERNÒ L., SOFIA S. : "*EUDOSSO : a space project for solar oscillations and long term variability relevant to climatic changes*", *Solar Physics*, **152**, p. 303
- RODRÍGUEZ HIDALGO I., COLLADOS M., VÁZQUEZ M. : "*Variations of properties of the quiet photosphere along the equator and the central meridian : spectroscopic results*", *Astronomy and Astrophysics*, **283**, p. 263
- ROUDIER T., ESPAGNET O., MULLER R., VIGNEAU J. : "*Peculiar interactions between granules and network bright points in the solar photosphere*", *Astronomy and Astrophysics*, **287**, p. 982
- SCHMIDT W., KNOLKER M., WESTENDORP PLAZA C. : "*Limb observations of the He I 1083.0 nm line*", *Astronomy and Astrophysics*, **287**, p. 229
- SECHAUD N. : "*Analyse des relations possibles entre les variations du diamètre solaire et l'atmosphère*", Rapport de stage de DEA – Observatoire de Paris
- SEIDELMAN P.K. : "*Explanatory supplement to the Astronomical Almanac*", University Science Books – U.S.A.
- SOFIA S., HEAPS W., TWIGG L.W. : "*The solar diameter and oblateness measured by the solar disk sextant on the 1992 september 30 balloon flight*", *The Astrophysical Journal*, **427**, p. 1048
- SPRUIT H.C. : "*Theories of radius and luminosity variations*", dans "*The solar engine and its influence on terrestrial atmosphere and climate*" – Springer-Verlag Berlin Heidelberg



## 1995

- KOLESNIK Y.B. : "*Analysis of modern observations of the Sun and inner planets*", Astronomy and Astrophysics, **294**, p. 874
- KOLESNIK Y.B. : "*Three campaigns of solar observations with an astrolabe at Simeiz*", dans "*Dynamics, Ephemerides and Astrometry of the Solar System*" – IAU Symposium 172, Paris
- LAKHAL L. : "*Simulation numérique des effets de la turbulence atmosphérique sur les observations du bord solaire*", Rapport d'activité – Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique – Alger
- LOULERGUE M. : "*Le Soleil, notre étoile*", dans "*Le monde des étoiles*" – Hachette Supérieur – Paris
- LOYER C. : "*L'aplatissement solaire : définition, mesures et difficultés*", Rapport de stage – Observatoire de la Côte-d'Azur
- NECKEL H. : "*The solar radius derived from limb-darkening scans obtained in 1981 and from 1986 to 1990*", Solar Physics, **156**, p. 7
- NESME-RIBES E., FRICK P., SOKOLOFF D., ZACHAROV V., RIBES J.C., VIGOUROUX A., LACLARE F. : "*Wavelet analysis of the Maunder minimum as recorded in solar diameter data*", Comptes Rendus Académie des Sciences Paris, Série II, **321**, p. 525
- NEWBERRY M.V. : "*Recovering the signal*", CCD Astronomy, **Spring**, p. 18
- NEWBERRY M.V. : "*Dark frames*", CCD Astronomy, **Summer**, p. 12
- PENNA J.L. : "*Observações do Sol : determinação dos planos Fundamentais e elementos da órbita*", Tese de Doutorado, Observatorio Nacional – Rio de Janeiro
- RAST M.P. : "*On the nature of exploding granules and granule fragmentation*", The Astrophysical Journal, **443**, p. 863
- ROZELOT J.P. : "*On the chaotic behaviour of the solar activity*", Astronomy and Astrophysics, **297**, p. L45
- SINCEAC V. : "*Astrométrie à l'astrolabe équipé d'une caméra CCD ; Analyse d'images en vue des déterminations des temps de passage*", Rapport de stage de D.E.A. – Observatoire de Paris
- TOULMONDE M. : "*Etude comparative de diamètres solaires observés à partir d'instruments astrométriques*", Thèse de Doctorat – Observatoire de Paris
- ULRICH R.K., BERTELLO L. : "*Solar-cycle dependence of the Sun's apparent radius in the neutral iron spectral line at 525 nm*", Nature, **377**, p. 214

## 1996

- BOUZARIA M., MOUSSAOUI R. : "*Analyse en ondelettes des images du Soleil prises à l'astrolabe*", Mémoire présenté à l'Université des Sciences et de la Technologie d'Alger
- CHRISTIENSEN-DALSGAARD J. : "*Effects of convection on the mean solar structure*", dans "*Solar Convection and Oscillations and their Relationship*" – Proc. SCORé'96 – Pijpers, Christensen-Dalsgaard, Rosenthal
- ESPAGNET O., MULLER R., ROUDIER T., MEIN P., MEIN N., MALHERBE J.M. : "*Spatial relation between the 5-minute oscillations and granulation patterns*", Astronomy and Astrophysics, **313**, p. 297
- GREVE A., NECKEL H. : "*On the consistency of solar limb darkening observations at UV wavelengths (2000-3300 Å)*", Astronomy and Astrophysics Supplement Series, **120**, p. 35
- HOU J. : "*The Development of Atmospheric Turbulence Theory and Its Impact on Ground-Based Astronomical Observations*", dans "*Ground-Based Astronomy in Asia*" – N. Kaifu – Tokyo
- KUHN J.R., BOGART R., BUSH R.I., SÀ L., SCHERRER P., SCHEICK X. : "*Precision solar astrometry from SOHO/MDI*", dans "*Sounding Solar and Stellar Interiors*" – IAU Symposia 181, France
- LACLARE F., DELMAS C., COIN J.P., IRBAH A. : "*Measurements and variations of the solar diameter*", Solar Physics, **166**, p. 211
- LYDON T.J., SOFIA S. : "*A measurement of the shape of the solar disk : the solar quadrupole moment*",

*the solar octopole moment, and the advance of perihelion of the planet Mercury*", Physical Review Letters, **76/2**, p. 177

MARTIN V.A.F., BOCZKO R., BENEVIDES-SOARES P., LEISTER N.V. : *"Système de référence stellaire : effets systématiques"*, Astronomy and Astrophysics Supplement Series, **118**, p. 525

MASSETTI S., STORINI M. : *"Spacetime modulation of solar neutrino flux : 1970 - 1992"*, The Astrophysical Journal, **472**, p. 827

NESME-RIBES E., BALIUNAS S.L., SOKOLOFF D. : *"Sunspot cycles - on other stars - are helping astronomers study the sun's variations and the ways they might affect the Earth"*, Scientific American, **275/2**, p. 31

NEWBERRY M.V. : *"Pursuing the ideal flat-field"*, CCD Astronomy, **Winter**, p. 18

PARKER E. : *"Something stirs under the Sun"*, Nature, **379**, p. 209

PATERNÒ L., SOFIA S., DI MAURO M.P. : *"The rotation of the Sun's core"*, Astronomy and Astrophysics, **314**, p. 940

PEIZHEN L., TONGQI X. : *"Optical position and proper motion radio stars obtained at Shanghai Observatory"*, Astronomy and Astrophysics Supplement Series, **115**, p. 311

PELLETIER J.D. : *"Variations in solar luminosity from timescales of minutes to months"*, The Astrophysical Journal, **463**, p. L41

PENNA J.L., BENEVIDES-SOARES P., ANDREI A.H., LACLARE F., LEISTER N.V. : *"Results from the solar observation with astrolabes"*, Astronomy and Astrophysics, **310**, p. 1036

POPPE P.C.R., LEISTER N.V., LACLARE F. : *"Corrections to the FK5 reference frame from the Sun's observations with the astrolabes at Abrahão de Moraes (1988-1994) and Calern (1988-1991) Observatories"*, Astronomy and Astrophysics, **315**, p. 633

RÖSCH J., ROZELOT J.P., DESLANDES H., DESNOUX V. : *"A new estimate of the quadrupole moment of the Sun"*, Solar Physics, **165**, p. 1

ROZELOT J.P. : *"Aplatissement solaire"*, Séminaire - Observatoire de Calern/Grasse

ROZELOT J.P. : *"Measurements of the oblateness of the Sun"*, Joint Organisation for Solar Observations, **Annual Report**, p. 80

ROZELOT J.P., RÖSCH J. : *"Le Soleil change-t-il de forme ?"*, Comptes Rendus Academie des Sciences Paris, Série II b, **322**, p. 637

VASILYEV O.B., MAKAROV V.I. : *"On the 22-year oscillations. I. Hysteresis of the solar diameter"*, Solar Physics, **163**, p. 249

VIGOUROUX A. : *"Etude de la variabilité solaire à long terme"*, Thèse de Doctorat - Université de Nice

VIGOUROUX A. : *"Variations of the observed solar diameter"*, Forum Themis - Observatoire de Paris-Meudon

WITTMANN A.D., NECKEL H. : *"On relation between the Sun's (geocentric) angular-diameter and the observed (topocentric) drift time"*, Solar Physics, **163**, p. 1

YOSHIZAWA M. : *"Solar semi-diameter variations observed with the Tokyo photoelectric meridian circle for the years from 1985 to 1994"*, dans *"New Observational Techniques, Catalogues and Astrometry"* - IAU Colloquium 165, Poland

## 1997

APPOURCHAUX T., ANDERSEN B.N., FRÖHLICH C., JIMÉNEZ A., TELLJOHANN U., WEHRLI C. : *"In-flight performance of the VIRGO luminosity oscillations imager aboard SOHO"*, Solar Physics, **170**, p. 27

BIDART P. : *"Elaboration d'un modèle du bord solaire et test sur des images CCD obtenues au CERGA"*, Rapport de stage de DEA - Observatoire de Paris

EMILIO M. : *"Estudo das variações do semi diâmetro solar"*, Tese de Doutorado - Instituto Astronômico e Geofísico - São Paulo



FRICK P., GALYAGIN D., HOYT D.V., NESME-RIBES E., SCHATTEN K.H., SOKOLOFF D., ZACHAROV V. : *"Wavelet analysis of solar activity recorded by sunspot groups"*, Astronomy and Astrophysics, **328**, p. 670

FRÖHLICH C., ANDERSEN B.N., APPOURCHAUX T., BERTHOMIEU G., CROMMELYNCK A., DOMINGO V., FICHOT A., FINSTERLE W., GÓMEZ M., GOUGH D., SCHERRER P., ANDERSEN B.N., BOGART R., BUSH R., FINSTERLE W., JIMÉNEZ A., LEIFSEN T., LOMBAERTS M., PAP J.M., PROVOST J., ROCA CORTÉS T., ROMERO J., ROTH H., SEKII T., TELLJOHANN U., TOUTAIN T., WEHRLI C. : *"First results from VIRGO, the experiment for heliosismology and solar irradiance monitoring on SOHO"*, Solar Physics, **170**, p. 1

HEMPELMANN A., DONAHUE R.A. : *"Wavelet analysis of stellar differential rotation"*, Astronomy and Astrophysics, **322**, p. 835

HIRZBERGER J., VÁZQUEZ M., BONET J.A., HANSLMEIER A., SOBOTKA M. : *"Time series of solar granulation images. Differences between small and large granules in quiet regions"*, The Astrophysical Journal, **480**, p. 406

KOBANOV N.I., GRIGORYEV V.M. : *"An integral method for measuring solar limb darkening"*, Solar Physics, **171**, p. 225

KURBASOVA G.S., KORSUN A.A., RYAKHOVA L.V., RYBALOVA M.N., SHLIKAR G.N. : *"Statistical correlation between 10 - year variations of annual mean geodynamical, geophysical, and heliophysical data"*, Astronomy Reports, **41/1**, p. 128

MAGAIN P., COURBIN F., SOHY S. : *"Deconvolution with Correct Sampling"*, The E.S.O. Messenger, **88**, p. 28

MARTIN V.A.F., LEISTER N.V. : *"Absolute declinations from astrolabe data"*, Astronomy and Astrophysics Supplement Series, **126**, p. 169

MOREL P., PROVOST J., BERTHOMIEU G. : *"Updated solar models"*, Astronomy and Astrophysics, **327**, p. 349

NOËL F. : *"Variations of the apparent solar semidiameter observed with the astrolabe of Santiago"*, Astronomy and Astrophysics, **325**, p. 825

PENNA J.L., BENEVIDES-SOARES P., ANDREI A.H., LACLARE F. : *"Discussion of the results from solar astrolabes"*, Astronomy and Astrophysics Supplement Series, **123**, p. 403

ROZELOT J.P., RÖSCH J. : *"An upper bound to the solar oblateness"*, Solar Physics, **172**, p. 11

SCHOU J., KOSOVICHEV A.G., GOODE P.R., DZIEMBOWSKI W.A. : *"Determination of the Sun's seismic radius from the SOHO Michelson Doppler Imager"*, The Astrophysical Journal, **489**, p. L197

STENFLO J.O., BIANDA M., KELLER C.U., SOLANKI S.K. : *"Center-to-limb variation of the second solar spectrum"*, Astronomy and Astrophysics, **322**, p. 985

TOBIAS S.M. : *"The solar cycle : parity interactions and amplitude modulation"*, Astronomy and Astrophysics, **322**, p. 1007

TONER C.G., JEFFERIES S.M., DUVAL T.L. : *"Restoration of long-exposure full-disk solar intensity images"*, The Astrophysical Journal, **478**, p. 817

TOULMONDE M. : *"The diameter of the Sun over the past three centuries"*, Astronomy and Astrophysics, **325**, p. 1174

WITTMANN A.D. : *"CCD - drift scan measurements of the solar diameter : methods and first results"*, Solar Physics, **171**, p. 231

ZHUGZHDA Y., STIX M. : *"Comments on the analytic theory of p modes by Dzhililov and Staude"*, Astronomy and Astrophysics, **322**, p. 982

## 1998

ANTIA H.M. : *"Estimate of solar radius from f-mode frequencies"*, Astronomy and Astrophysics, **330**, p.

- GABRIEL M. : "On velocity and intensity line asymmetries", *Astronomy and Astrophysics*, **330**, p. 359
- GOODE P.R., STROUS L.H., RIMMELE T.R., STEBBINS R.T. : "On the origin of solar oscillations", *The Astrophysical Journal*, **495**, p. L27
- HOEKZEMA N.M., RUTTEN R.J. : "Small-scale topology of solar atmosphere dynamics", *Astronomy and Astrophysics*, **329**, p. 725
- JIMÉNEZ-REYES S.J., RÉGULO C., PALLÉ P.L., ROCA CORTES T. : "Solar activity cycle frequency shifts of low-degree *p*-modes", *Astronomy and Astrophysics*, **329**, p. 1119
- SINCEAC V., CHOLLET F., LACLARE F., DELMAS C. : "Méthode nouvelle pour la mesure CCD du diamètre solaire avec un astrolabe", *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, **128**, p. 605
- SOLANKI S.K., UNRUH Y.C. : "A model of the wavelength dependence of solar irradiance variations", *Astronomy and Astrophysics*, **329**, p. 747
- TALON S., ZAHN J.P. : "Towards a hydrodynamical model predicting the observed solar rotation profile", *Astronomy and Astrophysics*, **329**, p. 315

### En cours de publication

- BASU S., "Effects of errors in the solar radius on helioseismic inferences", *Monthly Notices Royal Astronomical Society*
- BROWN T.M., CHRISTENSEN-DALSGAARD J., "Accurate Determination of the Solar Photospheric Radius", *The Astrophysical Journal*
- BURNS D., BALDWIN J.E., BOYSEN R.C., HANIFF C.A., LAWSON P.R., MACKAY C.D., ROGERS J., SCOTT T.R., WARNER P.J., WILSON D.M.A., YOUNG J.S., "The Surface Structure and Limb Darkening Profile Of Betelgeuse", *Monthly Notices Royal Astronomical Society*
- JILINSKI E.G., PULIAEV S.P., PENNA J.L., ANDREI A.H., SINCEAC V., CHOLLET F., DELMAS C., "Solar Diameter Observations with Astrolabe at Observatório Nacional - Rio de Janeiro", *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*
- KUHN J.R., BUSH R.I., SCHEICK X., SCHERRER P., "The Sun's Shape and Brightness", *Nature*
- POPESCU R., "Adaptation des caméras CCD aux instruments astrométriques de l'Observatoire de Bucarest. Application à l'astrolabe de Danjon", *Thèse de Doctorat – Observatoire de Bucarest & Observatoire de Paris*
- PIJPERS F.P., "Helioseismic determination of the solar gravitational quadrupole moment", *Monthly Notices Royal Astronomical Society*
- TOUTAIN T., APPOURCHAUX T., BAUDIN F., FRÖHLICH C., GABRIEL A., SCHERRER P., ANDERSEN B.N., BOGART R., BUSH R., FINSTERLE W., GARCÍA R.A., GREC G., HENNEY C.J., HOEKSEMA J.T., JIMÉNEZ A., KOSOVICHEV A., ROCA CORTÉS T., TURCK-CHIÈZE S., ULRICH R., WEHRLI C., "Tri-phonic heliosismology : comparison of solar *p* modes observed by the heliosismology instruments aboard SOHO", *Solar Physics*
- VONDRÁK J., RON C., PEŠEK I., "Earth rotation in the Hipparcos reference frame", *Astronomy and Astrophysics*