CNRS *Service d'Aéronomie*	PICARD	Référence : PIC-SA-AI-DJ-1.1- 01 Edition : 2 Révision : 0 Date : 31/03/08

Micro-satellite PICARD

MISOLFA: UN MONITEUR DE QUALITE D'IMAGES SOLAIRES UTILE A LA MISSION PICARD

	NOM	FONCTION	DATE
PREPARE PAR	ABDANOUR IRBAH PIERRE ASSUS JULIEN BORGNINO MÂMMAR FODIL GUY MERLIN FRANCIS MARTIN FREDERIC MORAND YACINE SAIDI		31 -03-2008
VU PAR			

BORDERAU D'INDEXATION

TITRE : **MISOLFA: UN MONITEUR DE QUALITE D'IMAGES SOLAIRES UTILE A LA MISSION PICARD**

AUTEURS : **ABDANOUR IRBAH *ET AL.***

MOTS CLES : **PICARD – SODISM – SIMULATION DIAMETRE SOLAIRE**

RESUME : CE RAPPORT PRESENTE LE MONITEUR DE QUALITE D'IMAGES SOLAIRES **MISOLFA** QUI SERA INSTALLE A L'OBSERVATOIRE DE CALERN PRES DE **SODISM II** ET DE L'EXPERIMENTATION SOLAIRE EXISTANTE. LES ASPECTS SCIENTIFIQUES QUI SONT A LA BASE DE LA CONSTRUCTION DU MONITEUR MAIS EGALEMENT LES ASPECTS TECHNIQUES SONT DONNES DANS LE DETAIL.

ABSTRACT: THIS REPORT PRESENTS THE SOLAR SEEING MONITOR **MISOLFA** WHICH WILL BE INSTALLED IN CALERN OBSERVATORY TO OBSERVE TOGETHER WITH **SODISM II** AND OTHERS SOLAR EXPERIMENTS. ALL SCIENTIFIC AND TECHNICAL ASPECTS USED TO DEVELOP THE MONITOR ARE PRESENTED IN DETAILS IN THE REPORT.

DIFFUSION

MODIFICATIONS

EDITION	REVISION	DATE	PAGES MODIFIEES	VISA
1	0	27 jan. 04	Création du document	
2	0	31 mars 08	Mise à jour du document	

ACRONYMES

psf : point spread function
DORaySol : Définition et Observation du Rayon Solaire
MISOLFA: Moniteur d'Images Solaires Franco Algérien

REFERENCES

[1] Measurements and long-term changes of the solar, Laclare F, Coin J.P, Delmas C. and Irbah A, *Solar Physics*, 1996, 166, 211-229

[2] Error due to atmospheric turbulence effects on diameter measurements performed with a solar astrolabe, Lakhal L, Irbah A, Bouzaria M, Borgnino J, Laclare F and Delmas C, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 138, 155-162, 1999

[3] Simulation of pupil-plane observation of angle-of-arrival fluctuations in daytime turbulence, Berdja A, Irbah A, Borgnino J and Martin F, SPIE, Optics in Atmospheric Propagation and Adaptive Systems IV, 8-12 September 2003, Barcelona, Spain

[4] Simulation of the anisoplanatic angle-of-arrival fluctuations measured on the solar edge images, Berdja A, Irbah A, Borgnino J, SF2A-2002 : Semaine de l'Astrophysique Francaise, meeting held in Paris, France, June 24-29, 2002, Eds : F. Combes et D. Barret, EDP Sciences, Conference series, p. 215

[5] Estimation of the spatial coherence outer scale for daytime observations, Seghouani N, Irbah A, Borgnino J, IAU Technical Workshop on "Astronomical Site Evaluation in the Visible and the Radio Range", ASP Conference Proceedings, Vol 266, 2000, Eds : J. Vernin, Z. Benkhaldoun, C. Munoz-Tunon.

[6] Estimation of turbulence parameters from solar observations, Lakhal L, Irbah A, Aime C, Borgnino J, Martin F, Proceedings SPIE, Vol. 4358, Optics in Atmospheric Propagation and Adaptive Systems, p. 112-118, 2001, Eds : A. Kohnle, J.D. Gonglewski, T.J. Schmugge.

[7] Estimation des paramètres de cohérence spatio-angulaire par analyse des fluctuations d'angle d'arrivée observées au bord du soleil, Lamraoui F, 2001, mémoire de stage du DEA « Astronomie : Haute Résolution Angulaire, Image et Gravitation », Université de Nice Sophia Antipolis, Direction : Borgnino J, Irbah A.

[8] Atmospheric turbulence profiles $C_n^2(h)$ deduced from solar limb observations, Bouzid A, Irbah A, Borgnino J, Lantéri H, IAU Technical Workshop on "Astronomical Site Evaluation in the Visible and the Radio Range" ", ASP Conference Proceedings, Vol 266, 2000, Eds : J. Vernin, Z. Benkhaldoun, C. Munoz-Tunon.

[9] A generalized solar seeing monitor : MISOLFA(Moniteur d'Images Solaires Franco-Algérien), Assus P, Borgnino J, Martin F, Bouzid A, Chibani M, Irbah A, Seghouani N, IAU Technical Workshop on "Astronomical Site Evaluation in the Visible and the Radio Range" ", ASP Conference Proceedings, Vol 266, 2000, Eds : J. Vernin, Z. Benkhaldoun, C. Munoz-Tunon.

[10] MISOLFA: A Generalized Solar Seeing Monitor, Irbah A, Chibani M, Lakhal L, Berdja A, Borgnino J, Martin F, Assus P, 2001, Société Française d'Astronomie et d'astrophysique, "Scientific Highlights 2001", EDP Sciences, Lyon, France, May 28-June 1.

[11] Analysis of diameter measurements performed at Calern Observatory astrolabe, Moussaoui R, Irbah A, Abdelatif T, Fossat E, Borgnino J, Laclare F, Delmas C, 1999, Solar Physics, 195, 433-437.

[12] Spectral analysis of solar diameter measurements recorded at Calern Observatory astrolabe during two solar cycles, Moussaoui R, Irbah A, Fossat E, Borgnino J, Laclare F, Delmas C, 2000, Astron. Astrophys., 374, 1100-1107.

[13] Isoplanatism and high spatial resolution solar imaging, Irbah A, Borgnino J, Laclare F, Merlin G, 1993, Astron. Astrophys., 276, 663-672

[14] Feature extraction from solar images using wavelet transform : image cleaning for applications to solar astrolabe experiment, Irbah A, Bouzaria M, Lakhal L, Moussaoui R, Borgnino J, Laclare F and Delmas C, *Solar Physics*, 185, Issue 2, p. 255-273, 1999

SOMMAIRE

I- INTRODUCTION 1

II- DEFINITION DES PARAMETRES DE QUALIFICATION 1

III- MODELISATION DE L'ATMOSPHERE – ESTIMATION DES PARAMETRES 2

III-1 ESTIMATION DES PARAMETRES DE QUALIFICATION DES OBSERVATIONS 3
III-2 ESTIMATION DES PROFILS DE TURBULENCE 3

IV- PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE MISOLFA 4

IV-1 FLUCTUATIONS DES ANGLES D'ARRIVEE OBSERVEES DANS LA VOIE *PLAN PUPILLE* 4
IV-2 FLUCTUATIONS DES ANGLES D'ARRIVEE OBSERVEES DANS LA VOIE *PLAN IMAGE* 5
IV-3 IMAGES DU SOLEIL DANS LA VOIE *PLAN IMAGE* DE MISOLFA 5

V- DEVELOPPEMENTS EXPERIMENTAUX DE L'INSTRUMENT 6

V-1 OPTIQUE DE MISOLFA 6
V-2 MECANIQUE DU TELESCOPE ET MECANIQUE AU FOYER 9
V-2.1 Mécanique du télescope 9
V-2.2 Rotateur de champ 13
V-2.3 Boîte focale 13
V-3 ELECTRONIQUE DE GUIDAGE ET DE COMMANDE 15
V-3.1 Architecture générale 15
V-3.2 Fonctions de l'électronique de guidage et de commande 18
V-3.3 Rack électronique de pilotage 19
V-3.4 Logiciel de pilotage 22

VI- ACQUISITION DES DONNES ET SAUVEGARDE 24

VI-1 ACQUISITION DES IMAGES DE LA VOIE *PLAN IMAGE* 24
VI-2 ACQUISITION DES DONNEES DE LA VOIE *PLAN PUPILLE* 29

VII- PROCEDURES POUR L'ESTIMATION DES PARAMETRES 32

VII-1 ESTIMATION DES PARAMETRES A PARTIR DE LA VOIE *PLAN IMAGE* 32
VII-1.1 Estimation des paramètres spatio-angulaires 32
VII-1.2 Estimation des profils de turbulence 34
VII-1.3 Traitement des données acquises 36
VII-2 ESTIMATION DES PARAMETRES A PARTIR DE LA VOIE *PLAN PUPILLE* 36

VIII- CONCLUSION 37

I- INTRODUCTION

Les mesures du diamètre solaire faites à l'astrolabe de l'Observatoire de Calern (OCA – France) sur plus de deux cycles solaires présentent des variations apparentes. Ces variations montrent une anti-corrélation avec l'activité solaire définie par le nombre de taches solaires (Laclare *et al.* 1996). Ces résultats ont soulevé nombre d'interrogations et donné lieu à de nombreux travaux scientifiques et à la mise en place du réseau international R2S3 spécialement dédié à la mesure du diamètre solaire. Parmi les travaux récents, on peut citer Moussaoui *et al.* (1999, 2000) qui révèlent de nouvelles périodes dont l'une proche de la rotation du soleil. La simulation des effets atmosphériques sur les mesures du diamètre faites à l'astrolabe solaire a aussi montré l'influence des conditions d'observation et l'importance de disposer d'un moniteur chiffrant la *qualité des images* acquises lors des observations (Lakhal *et al.* 1999). L'idée de développer MISOLFA s'est alors imposée pour fonctionner conjointement à la mission spatiale PICARD et à l'expérimentation au sol de l'Observatoire de Calern qui sert (ou servira) à la mesure du diamètre solaire (DORaySol et SODISM II, réplique au sol de SODISM I). Les conditions d'observation chiffrées par un certain nombre de paramètres permettent d'étudier l'influence de l'atmosphère terrestre sur les observations mais également à modéliser la réponse impulsionnelle de l'ensemble atmosphère-instrument aux instants de mesure du diamètre. Cette modélisation est indispensable pour raccorder les mesures qui seront faites par les instruments au sol à celles qui le seront dans l'espace par SODISM.
Les paramètres de qualification des images ainsi que le profil vertical de turbulence peuvent être obtenus par l'observation directe du bord solaire. La dérivée du bord que l'on assimile à une fonction de Heaviside, permet alors d'obtenir une estimation de la réponse impulsionnelle de l'ensemble atmosphère-télescope. L'évolution spatio-temporelle de la réponse impulsionnelle donne ainsi accès aux paramètres de cohérence du front d'onde et à la localisation des couches turbulentes suivant la ligne de visée. Les paramètres de qualification et la position des couches turbulentes dans l'atmosphère sont donc estimés à partir de l'acquisition puis de l'analyse de séquences d'image du soleil.
La qualité des mesures du diamètre solaire peut être évaluée ainsi que la possibilité de mettre en œuvre des méthodes de correction des effets optiques induits par la turbulence atmosphérique étudiée, soit par traitement a posteriori soit en temps réel (optique adaptative). La validité des méthodes de correction pourra être établie par comparaison avec les observations spatiales.

II- DEFINITION DES PARAMETRES DE QUALIFICATION

La turbulence induit dans l'atmosphère terrestre des micro-fluctuations de température qui engendrent des fluctuations de l'indice de réfraction. Le front d'onde qui se propage à travers ce milieu subit alors des déformations dues aux variations de trajet optique. Pour quantifier les conditions d'observation lors des mesures, on introduit un certain nombre de paramètres qui sont le(s) temps caractéristique(s) d'évolution du front d'onde, le domaine d'isoplanétisme, le paramètre de Fried et l'échelle externe de cohérence spatiale du front d'onde.

Le paramètre de Fried r_0 : Il est défini par le diamètre de la zone de cohérence spatiale du front d'onde. Il chiffre également la résolution de l'image obtenue à travers l'atmosphère par celle que donnerait un télescope équivalent de diamètre r_0 placé dans l'espace. Il est donné par l'expression :

$$r_0 = \left[16.7\, l^{-2} \int_0^{+\infty} dh\, C_n^2(h) \right]^{-\frac{3}{5}}$$

où $C_n^2(h)$ est le profil de turbulence et l la longueur d'onde. C_n^2 est la constante de structure des fluctuations de l'indice de réfraction de l'air atmosphérique.

L'échelle externe de cohérence spatiale L_0 : Elle définit la taille maximale des perturbations du front d'onde qui restent cohérentes. Elle traduit de l'évolution basse fréquence du front d'onde. L'échelle externe se calcule par l'équation :

$$L_0 = \left[\frac{\int_0^{+\infty} dh\, \mathrm{L}_0^{-\frac{1}{3}} C_n^2(h)}{\int_0^{+\infty} dh\, C_n^2(h)} \right]^{-3}$$

Le domaine d 'isoplanétisme q_0 : Il définit la zone angulaire suivant laquelle les grandeurs considérées (fluctuations de phase, d'angle d'arrivée ou tavelures …) restent similaires suivant le critère que l'on se donne. On en trouvera une étude dans Irbah *et al.* (1993). Pour les observations à Haute Résolution Angulaire, la taille du domaine d'isoplanétisme peut être considérée comme typiquement égale à $\frac{r_0}{h}$, où h est l'altitude d'une couche turbulente équivalente présentant sur les images au sol les mêmes effets que l'ensemble de l'atmosphère terrestre (voir section III).

Le(s) temps caractéristique(s) d'évolution du front d'onde *:* C'est le temps durant lequel on peut considérer l'atmosphère comme figée et que les grandeurs considérées gardent leur cohérence temporelle. Ici, pour les observations à Haute Résolution Angulaire, on peut considérer un temps de cohérence temporelle typiquement égal à $\frac{r_0}{v_e}$, où v_e est le module d'un vecteur vitesse équivalente obtenu à partir des vecteurs vitesses des différentes couches turbulentes ($\vec{v}(h)$) pondérés par l'énergie turbulente ($C_n^2(h)$).

III- MODELISATION DE L'ATMOSPHERE – ESTIMATION DES PARAMETRES

L'observation *in situ* des microfluctuations de température aux moyens de sondes portées par des ballons a permis de montrer que, du point de vue des effets optiques, la turbulence dans l'atmosphère terrestre est structurée en fines couches. Deux modèles sont alors généralement utilisés pour représenter l'atmosphère terrestre. Le premier est *le modèle à une couche* qui suppose que les fluctuations induites par la turbulence atmosphérique sur le front d'onde qui la traverse, sont les mêmes que celles que produirait une couche équivalente unique située à une hauteur *h* et caractérisée par un paramètre de Fried r_0 et une échelle externe L_0 de valeur équivalente. Le second modèle est *le modèle multicouche* où chaque couche *i* de l'atmosphère supposée stratifiée, est caractérisée par les mêmes paramètres r_{0i} et L_{0i} mais définis cette fois-ci localement. La variation de ces paramètres avec l'altitude définit les profils de turbulence $C_n^2(h)$ et de l'échelle externe $L_0(h)$. Les fluctuations du front d'onde arrivant sur la pupille de

l'instrument répondent à une statistique donnée dont la loi est régit par certains modèles (Kolmogorov, Von Karman etc.). Pour les besoins des diverses études, il est nécessaire de simuler des fronts d'onde en considérant les 2 types de modèles d'atmosphère. Le modèle à une couche sert aux études pour l'estimation des paramètres de qualification des observations et le modèle multicouche à valider les solutions obtenues des méthodes d'inversion pour l'estimation des profils de turbulence.

III-1 ESTIMATION DES PARAMETRES DE QUALIFICATION DES OBSERVATIONS

Le développement de simulations numériques pour la génération de fronts d'onde aléatoires perturbés par la turbulence atmosphérique permet de former des images du soleil dans différentes conditions d'observation. Ainsi, des méthodes pour la mesure des paramètres de qualification ont été développées notamment pour l'estimation de l'échelle externe de cohérence spatiale du front d'onde, paramètre jusqu'à présent peu estimé dans le cas des observations diurnes. Une première méthode a été expérimentée sur la base d'observations faites à l'astrolabe de Calern. Elle consiste à ajuster aux données expérimentales, une fonction théorique de covariance transverse déduite du modèle de Von Karman en se plaçant dans le cas du modèle d'atmosphère à une couche (Seghouani *et al*. 2000) (voir section VII-1). Une autre méthode pour l'estimation des paramètres consiste à calculer la réponse impulsionnelle long temps de pose (au sens de Fried) de l'ensemble atmosphère-télescope. Celle ci est obtenue en corrigeant l'image du soleil de sa courbure puis à l'intégrer suivant la direction perpendiculaire. La comparaison avec un modèle théorique permet alors d'estimer à la fois l'échelle externe de cohérence spatiale et le paramètre de Fried. Cette méthode a été appliquée à des observations faites à l'astrolabe de Calern et a donné des résultats encourageants (Lakhal *et al.* 2001). Enfin une troisième méthode pour l'estimation des paramètres de qualification des images est une méthode différentielle qui consiste à calculer le rapport des variances des fluctuations observées sur le contour de l'image du soleil et intégrées sur 3 domaines angulaires différents (Lamraoui 2001). Les développements théoriques de la méthode montrent que dans l'hypothèse du modèle à une couche, on peut estimer de façon efficace l'échelle externe, le domaine d'isoplanétisme et le paramètre de Fried (voir section VII-1).

III-2 ESTIMATION DES PROFILS DE TURBULENCE

Le profil de turbulence atmosphérique $C_n^2(h)$ est un paramètre important pour la qualification des sites d'observation astronomiques. Il traduit de l'intensité des fluctuations de l'indice de réfraction le long du trajet optique de l'onde lors de sa traversée dans l'atmosphère. L'estimation de $C_n^2(h)$ est obtenue, dans le cas des observations de jour, à partir des fluctuations observées sur l'image du soleil et d'un modèle (celui de Kolmogorov ou de Von Karman). Une première méthode à consister au développement d'un algorithme d'inversion utilisant la méthode de *Marquardt – Levenberg* (Bouzid *et al.* 2000) (voir section VII-1). En considérant dans un premier temps la formulation simplifiée de Fried (modèle de Kolmogorov), cet algorithme a permis d'estimer le profil de turbulence atmosphérique à partir de la mesure de la fonction de structure des fluctuations des angles d'arrivée obtenue de l'analyse de séquences d'images du soleil acquises à l'astrolabe de Calern. De nouvelles techniques d'inversion sont toujours en cours de développement. Elles utilisent une expression de l'équation intégrale déduite du modèle de Von Karman et établie par J. Borgnino. Contrairement à la formulation de Fried, cette nouvelle modélisation fait intervenir l'échelle externe de cohérence spatiale du front d'onde.

IV- PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE MISOLFA

Le principe de fonctionnement de MISOLFA est basé sur la mesure des fluctuations des angles d'arrivée qui sont responsables de l'agitation des images au foyer d'un télescope (Assus *et al.* 2000, Irbah *et al.* 2001). Les angles d'arrivée sont définis comme la normale en chaque point du front d'onde dégradé par la turbulence ; ils témoignent de ses caractéristiques. Dans le cas de MISOLFA, la mesure des fluctuations d'angles d'arrivée se fait simultanément dans deux plans : la *voie plan image* et la *voie plan pupille*. Ces deux voies permettent d'estimer tous les paramètres spatio-temporels de la turbulence mais pour des raisons techniques, seules les constantes de temps de l'atmosphère seront estimées à partir de la voie *plan pupille*. Cependant, l'intégration sur des zones angulaires de taille différentes des angles d'arrivées obtenus dans le *plan pupille*, permet également une estimation des paramètres spatiaux. La voie *plan image* sert essentiellement à la mesure des paramètres spatiaux et aux profils de turbulence. La figure 1 montre le schéma de principe de MISOLFA où sont clairement visibles les deux voies d'analyse.

IV-1 FLUCTUATIONS DES ANGLES D'ARRIVEE OBSERVEES DANS LA VOIE *PLAN PUPILLE*

L'image de la pupille est formée à travers une fente, de quelques secondes d'arc de large et de quelques dizaines de secondes d'arc de hauteur, positionnée perpendiculairement sur le bord de l'image du soleil (fig. 1). L'image ainsi obtenue présente des fluctuations d'intensité appelées *ombres volantes* qui au premier ordre, sont proportionnelles aux fluctuations d'angles d'arrivée sur la pupille d'entrée (fig. 2-a). Divers filtrages entachent les fluctuations d'angles d'arrivée observées (Berdja *et al*. 2003). Leurs effets sont étudiés au moyen de simulations numériques et pris en compte dans l'estimation des paramètres. L'évolution de la turbulence diurne étant par essence très rapide, la voie *plan pupille* est utilisée principalement pour la mesure du (des) temps d'évolution du front d'onde grâce à l'utilisation de photodiodes (voir section VII-2).

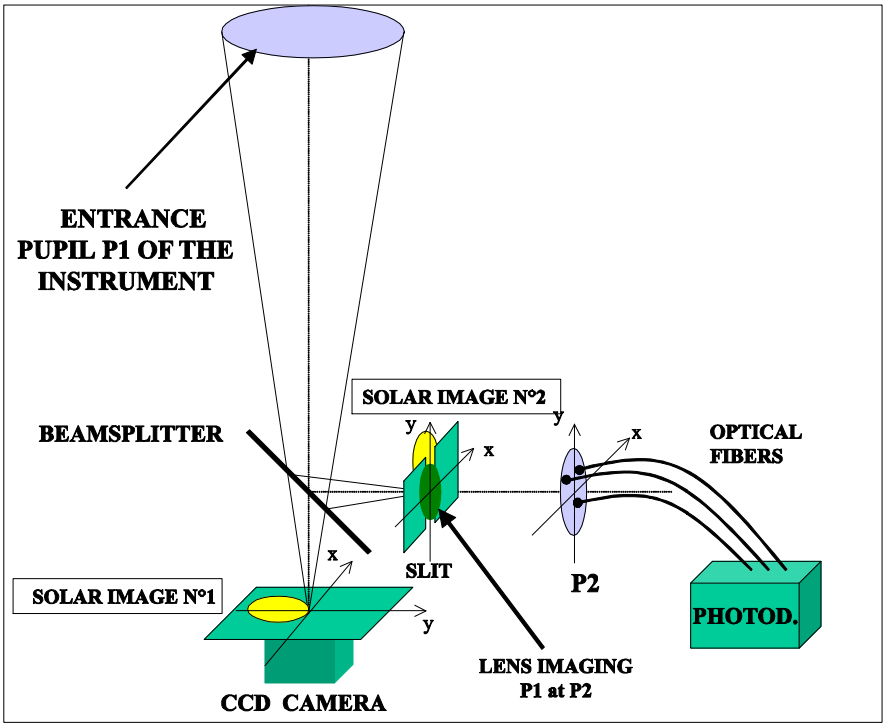


Fig. 1 Schéma de principe de MISOLFA

IV-2 FLUCTUATIONS DES ANGLES D'ARRIVEE OBSERVEES DANS LA VOIE *PLAN IMAGE*

L'image du soleil est directement formée sur la caméra CCD placée dans le plan focal de l'instrument (fig. 1). Les fluctuations d'angles d'arrivée sont celles que l'on observe sur le contour de l'image du soleil (fig. 2-b). Chaque point du contour est formé par le front d'onde dégradé par la turbulence limitée à la pupille de l'instrument. Les fluctuations d'angle d'arrivée ainsi mis en évidence dans le plan focal sont filtrés mais les méthodes d'estimation des paramètres tiennent compte de ce filtrage.

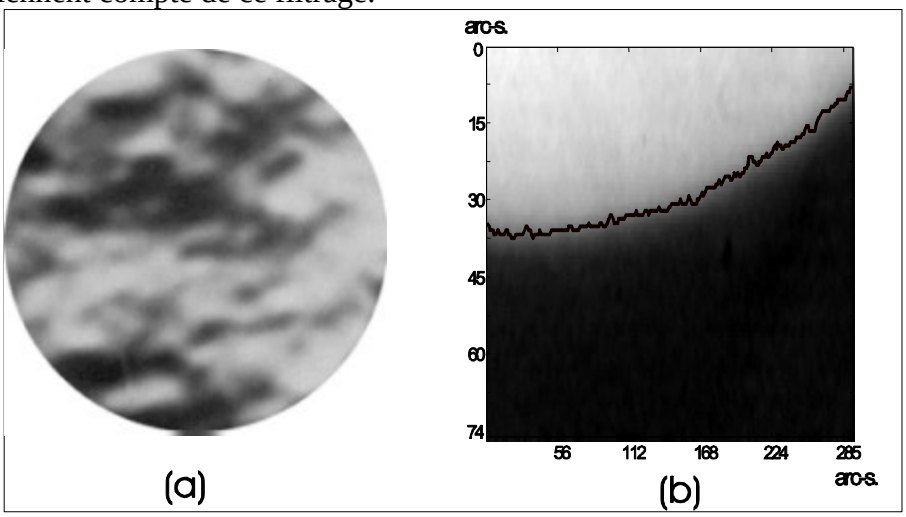


Fig. 2 Observation des fluctuations d'angle d'arrivée dans la voie *plan pupille* (a) et *plan image* (b)

IV-3 IMAGES DU SOLEIL DANS LA VOIE *PLAN IMAGE* DE MISOLFA

MISOLFA sera conçu de sorte à fournir les paramètres de la turbulence sur des lignes de visée ayant une séparation angulaire de plusieurs dizaines de minutes. Pour cela, l'idée retenue est de former une image sur la caméra CCD constituée des deux bords du soleil diamétralement opposés. La figure 3 montre le type d'image que l'on souhaite observer avec la voie *plan image*. En outre, pour limiter le flot de données à acquérir, seules deux fenêtres contenant

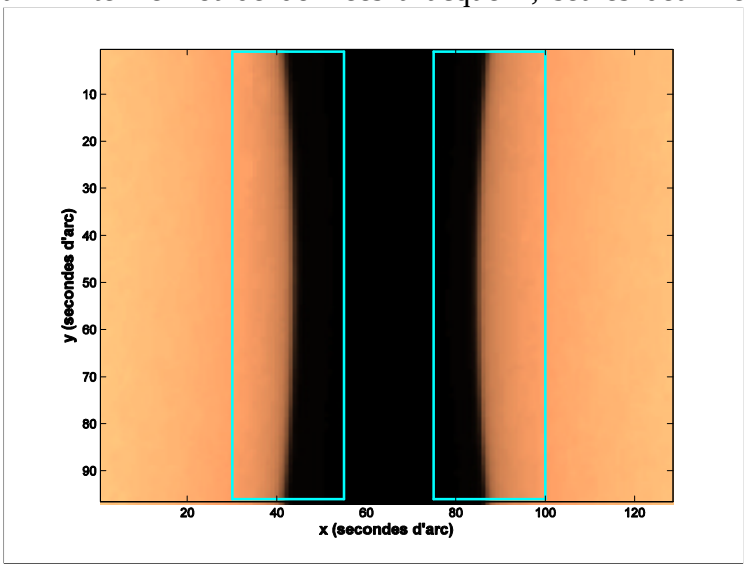


Fig. 3 Images du soleil telles qu'elles seront observées dans la voie *plan image* de MISOLFA et les parties acquises (cyan).

l'information utile seront sauvegardées. Les angles d'arrivée qui servent à estimer les paramètres sont mis en évidence comme décrit dans la section *IV-2* dans le cas de la voie *plan image*.

V-DEVELOPPEMENTS EXPERIMENTAUX DE L'INSTRUMENT

Cette section décrit les aspects techniques de MISOLFA, ceci tant en ce qui concerne l'optique que la mécanique et l'électronique de commande.

V-1 OPTIQUE DE MISOLFA

Plusieurs impératifs ont dicté la conception de MISOLFA:

- Le moniteur doit être réalisé à partir d'un télescope existant dont le miroir primaire (Φ = 252 mm, f/2.5) et le tube sont à conserver.
- L'instrument doit disposer de deux voies d'analyse de type différent pour toutes les longueurs d'onde d'observation choisies : le premier est le plan focal ou la *voie plan direct*. L'autre est celui où se forme l'image de la pupille à travers une fente placée dans le plan focal ; c'est la *voie plan pupille*.
- Les images de deux bords du soleil diamétralement opposés doivent être formés côté à côte dans la *voie plan image* où est placée une caméra CCD. En outre, elles doivent rester en permanence sur le CCD sans trop se rapprocher ni s'éloigner l'une de l'autre sous l'effet de la variation saisonnière de la taille du soleil.
- Dans *la voie plan image*, 1 seconde d'arc doit correspondre à 50 μm sur le CCD, ce qui donne une focale équivalente de 10 000 mm.
- Dans *la voie plan pupille*, la taille de l'image de la pupille doit avoir un diamètre de 10 mm.

L'ensemble de ces considérations a mené à la conception de MISOLFA suivant le schéma montré sur la figure 4 et en annexe *I*.

Calcul de la séparation des deux images dans la voie *plan image* : Deux images des bords du soleil diamétralement opposés sont formées sur la caméra CCD placée dans le plan focal du télescope. Une lame prismatique, partiellement réfléchissante sur les deux faces, est pour cela mise à l'entrée du télescope. Les faisceaux transmis et réfléchi deux fois sont décalés d'un certain angle qui dépend de l'indice *n* du verre du prisme et de son angle α (fig. 5-a). Les autres faisceaux qui se réfléchissent plusieurs fois à l'intérieur de la lame forment également d'autres images mais en dehors du champ de la caméra CCD et sont éliminées par les diaphragmes adéquats. Le calcul précis de l'angle à donner au prisme est effectué avec le programme de calcul optique ZEMAX.

Éloignement des images des bords solaires : En été, le soleil est le plus éloigné de la terre et son diamètre apparent est de l'ordre de 0.5422 degré d'angle. En hiver, il est plus proche et son diamètre apparent est de l'ordre de 0.5244 degré. L'angle à donner à la lame d'entrée séparatrice des faisceaux est alors déduit de ces valeurs, de la dimension de la caméra qui est de 640 x 480 pixels (1 pixel = 9.9 μm) et de la taille des zones d'analyse désirées fixée chacune à 32 x 480 pixels (fig. 5-b).

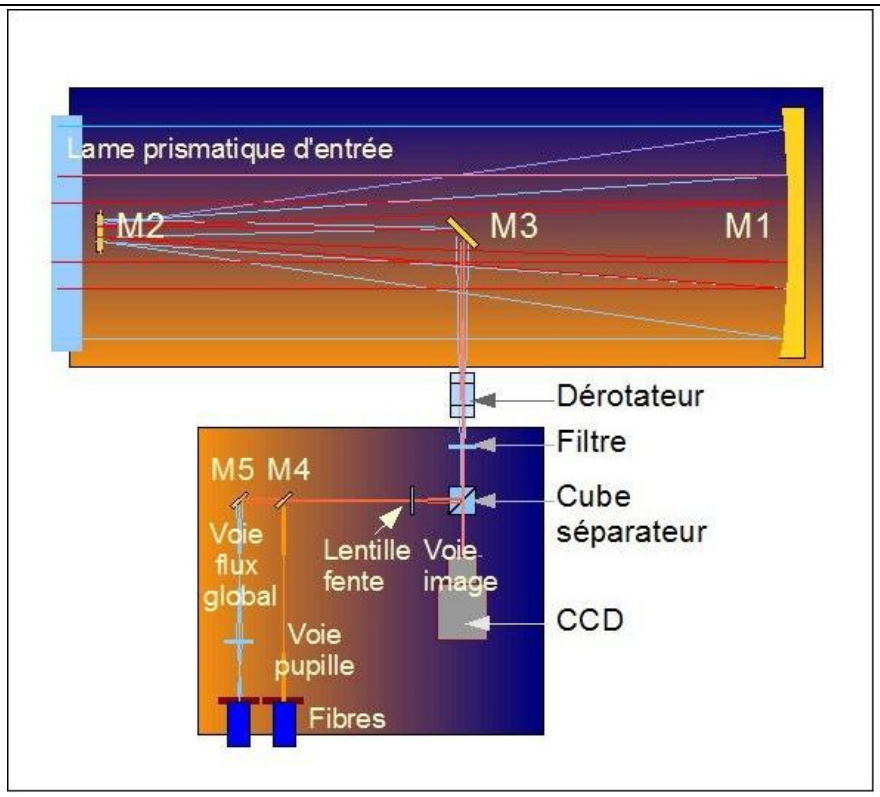


Fig. 4 Schéma technique de MISOLFA

Chromatisme : L'étude montre que le chromatisme provoqué par le prisme est négligeable. Il provoque en effet, un élargissement de l'image de l'ordre de 4 µm qui correspond à moins d'un demi pixel de la caméra et est très inférieur à la tache de diffraction du télescope. La figure 6 montre le *spot diagram* des deux images de la voie *plan image* obtenus avec ZEMAX pour une des longueurs d'onde de PICARD (λ=535.7 nm et $\lambda\Delta$ = 0.7 nm).

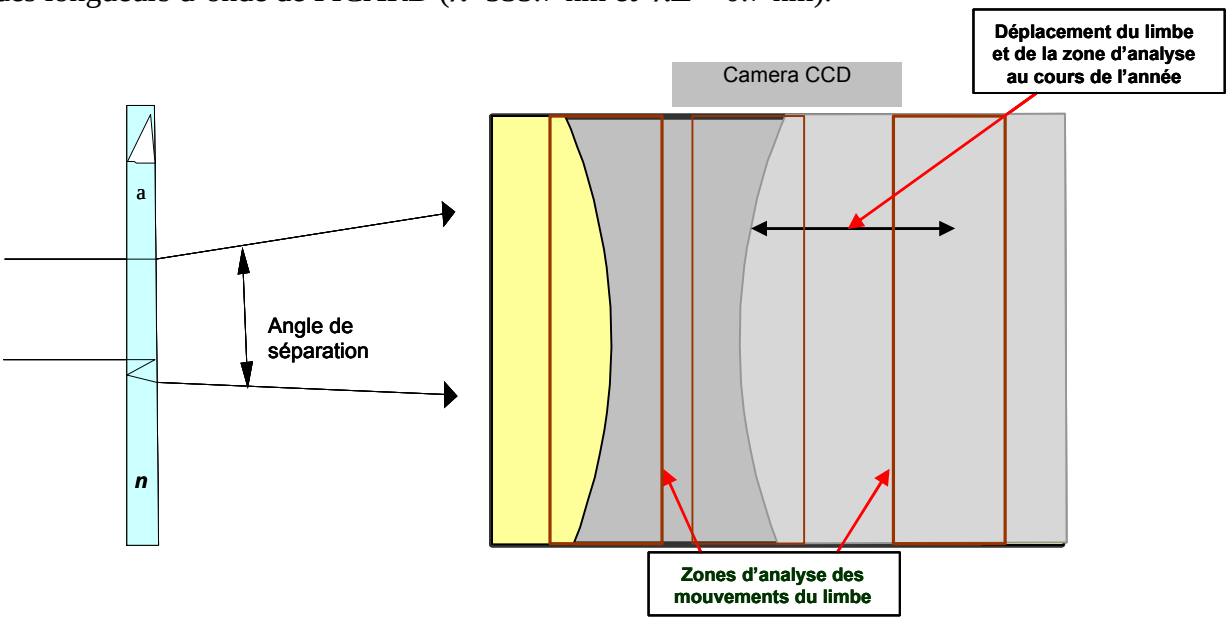


Fig. 5 a : Séparation des faisceaux lumineux par la lame d'entrée
b : Disposition des images sur le CCD

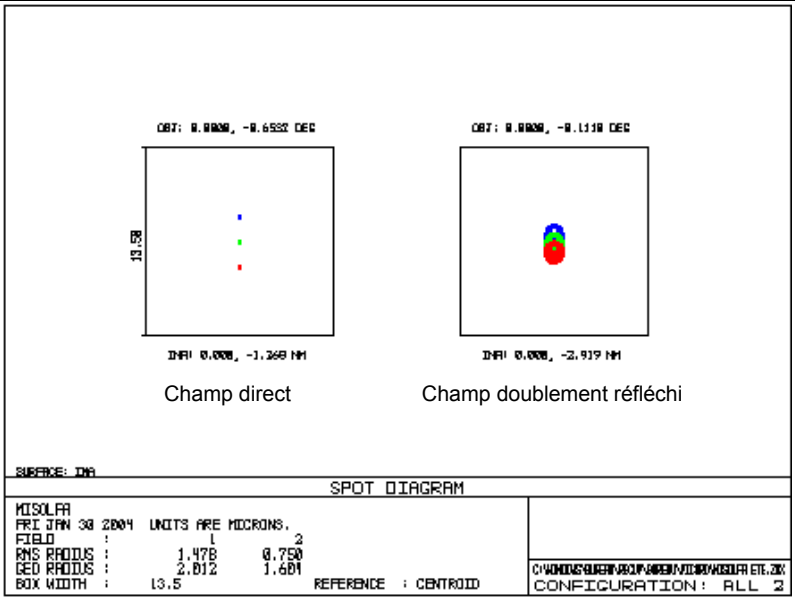


Fig. 6 *Spot diagrams* des deux images dans la voie *plan image* calculés pour λ = 535.7 nm et $\lambda\Delta$ = 0.7 nm

Calculs optiques de MISOLFA: Le récapitulatif des valeurs déduites des études techniques menées sur l'instrument est résumé dans le tableau I. En annexe *I* est également représentée une figure qui donne la cotation des différents éléments qui constituent MISOLFA.

Lame d'entrée	Angle des faces a Diamètre extérieur F_{ext} Diamètre intérieur F_{int} Epaisseur ***e***	10'54'' 270 mm 256 mm 35 mm
Miroir primaire (pupille du télescope)	Rayon de courbure Coefficient conique Diamètre	-1720 mm -1 254 mm
Miroir secondaire	Rayon de courbure Coefficient conique Diamètre utile	-148.4 mm -1.412 35.5 mm
Distance miroir primaire – miroir secondaire	M1M2	792 mm
Miroir tertiaire plan elliptique à 45°	Taille	25 x 35.35 mm
Cube séparateur	Arête	20 mm
Filtres	Diamètre	16 mm
Lentilles fentes au foyer sur la voie *plan pupille* (lentille 43-0868 de COHERENT)	Focale Diamètre	200 mm 12.5 mm

Tableau **I** : valeurs définissant l'instrument MISOLFA

Rotateur de champ *:* La monture étant alt-azimutale, l'image tourne avec le mouvement en hauteur. Pour le compenser, un rotateur de champ dioptrique à miroirs est mis en entrée de la boite focale. Il tourne à mi-vitesse de la rotation en altitude.
Le rectangle d'entrée a une dimension se 12.5 x 25 mm et les angles sont de 60 et 30°.

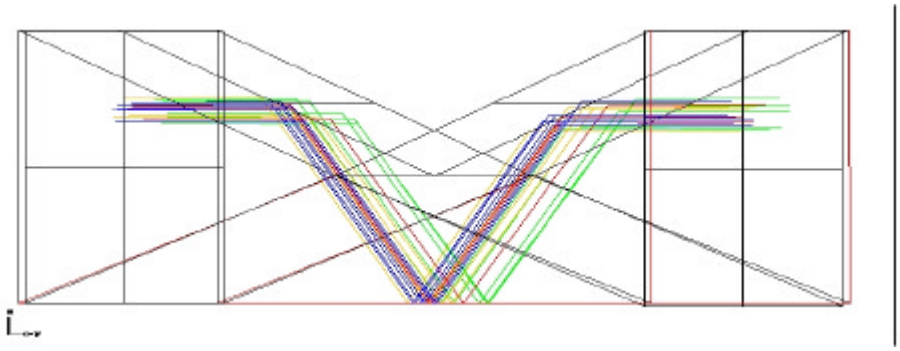


Schéma du dérotateur (image ZEMAX)

Les lentilles fentes : Elles sont utilisées pour créer la voie *plan pupille* qui est le plan d'observation correspondant à l'image de la pupille d'entrée formée par une lentille à travers une fente disposée dans le plan focal du télescope. Des lentilles fentes sont utilisées à cet effet. La lentille est construite de sorte à être traitée réfléchissante sauf au centre où existe une fente non traitée. Pour disposer de fentes d'épaisseur variables lors des observations, plusieurs lentilles identiques avec différentes épaisseurs de fente sont disposées sur un barillet.

Flat field : Pour effectuer le *flat field* nécessaire à la correction de gain des pixels de la caméra CCD, plusieurs solutions sont envisagées. L'une d'elles consistera à mettre un dépoli au niveau de la roue à filtres. Une autre solution sera celle utilisée pour PICARD et qui consiste à laisser défiler l'image du soleil sur le CCD suivant deux directions orthogonales tout en intégrant le flux avec la caméra CCD.

V-2 MECANIQUE DU TELESCOPE ET MECANIQUE AU FOYER

D'un point de vue mécanique, MISOLFA peut se décomposer en deux parties distinctes :

- le télescope qui permet d'assurer le pointage puis le suivi du Soleil au cours de la journée,
- la boîte focale, qui porte l'ensemble de l'optique et des détecteurs, et qui constitue la partie « scientifique » de l'instrument.

V-2.1 Mécanique du télescope

La conception du télescope MISOLFA (fig. 7) s'est faite autour de la possibilité de récupérer un tube et une optique existants. Le télescope étant à l'origine un Cassegrain coudé, il a été décidé de garder cette configuration, tout en modifiant l'optique secondaire pour lui donner une focale résultante de 10 m (voir section V.1)



Fig. 7 Le Télescope MISOLFA

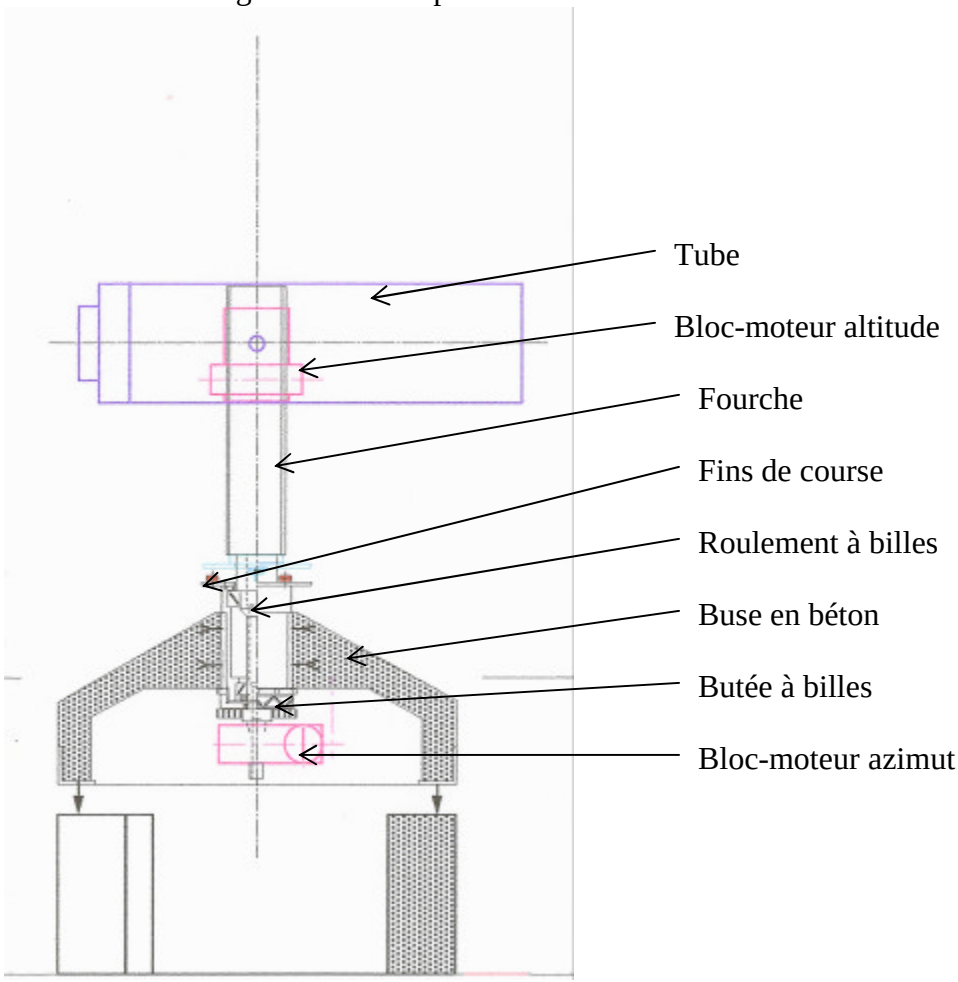


Fig. 8 Schéma mécanique du télescope de MISOLFA

Monture : Le choix du type de monture a été dicté par le principe même de fonctionnement de MISOLFA. Celui-ci devant mesurer simultanément deux bords opposés du Soleil (toujours verticaux, ou toujours horizontaux), il était nécessaire que le champ du télescope soit toujours orienté de la même façon par rapport à la verticale, et non par rapport au Soleil (ce qui aurait été le cas d'une monture équatoriale). Le type de monture **alt-azimutale** (un axe vertical d'azimut, un axe horizontal d'altitude) a donc tout naturellement été retenu.

La monture du télescope est constituée d'une **buse en béton** armée qui porte un insert métallique recevant un axe vertical (*axe d'azimut*) guidé par une **butée** et un **roulement** à billes (fig. 8). Cet axe d'azimut est motorisé par un **bloc-moteur** (voir section V-2.1.3). Un système de butées de **fin de course** basculantes, fixées sur un plateau horizontal solidaire de l'axe, autorise une rotation totale de 540° (un tour et demi)
Cet axe est relié à une **fourche** en U verticale. Elle comprend dans sa partie supérieure deux roulements à billes qui portent l'axe horizontal (*axe d'altitude*), lequel est solidaire du **tube** du télescope. L'une des extrémités de cet axe reçoit le **bloc moteur** qui permet d'assurer le déplacement du tube. L'autre partie de l'axe est creuse et permet de laisser passer les faisceaux lumineux provenant du tertiaire du télescope vers l'extérieur. Ce coté de la fourche reçoit donc une **console** permettant de fixer la boîte focale de MISOLFA. Enfin un système de butées de fin de course fixées sur l'axe autorise une rotation totale de 100° du tube (un peu plus d'un quart de tour).

Tube du télescope : Le tube du télescope est donc un tube existant de 800 mm de longueur et 280 mm de diamètre. Il comporte dans sa partie inférieure un barillet à 3 points permettant de recevoir l'optique primaire et d'en assurer les réglages d'orientation.
Les miroirs secondaire et tertiaire sont portés par des araignées à deux branches, ce qui permet de réduire les effets de diffraction.
Un vérin motorisé, placé en haut du tube à hauteur de l'araignée secondaire et agissant sur celle-ci afin d'assurer un déplacement longitudinal du secondaire, permet le réglage dynamique de la focalisation du télescope (voir fig. 9a).
Le tube dispose également à hauteur du tertiaire d'une trappe de visite permettant d'agir sur le barillet de ce dernier afin d'en assurer le réglage d'orientation.
Quelques adaptations de ce tube existant ont été nécessaires pour satisfaire aux besoins optiques de l'instrument MISOLFA (voir section V.1) :

- les barillets secondaire et tertiaire ont dû être redessinés afin de satisfaire les besoins de réglage et de recevoir les nouvelles optiques (modification des focales et des champs)
- un barillet rotatif a dû être installé en haut du tube afin de recevoir la lame prismatique d'entrée permettant d'effectuer la séparation des images. La rotation de ce barillet autour de l'axe optique permet d'assurer le réglage d'orientation du prisme pour définir la direction des deux bords opposés du Soleil analysés (voir fig. 3).

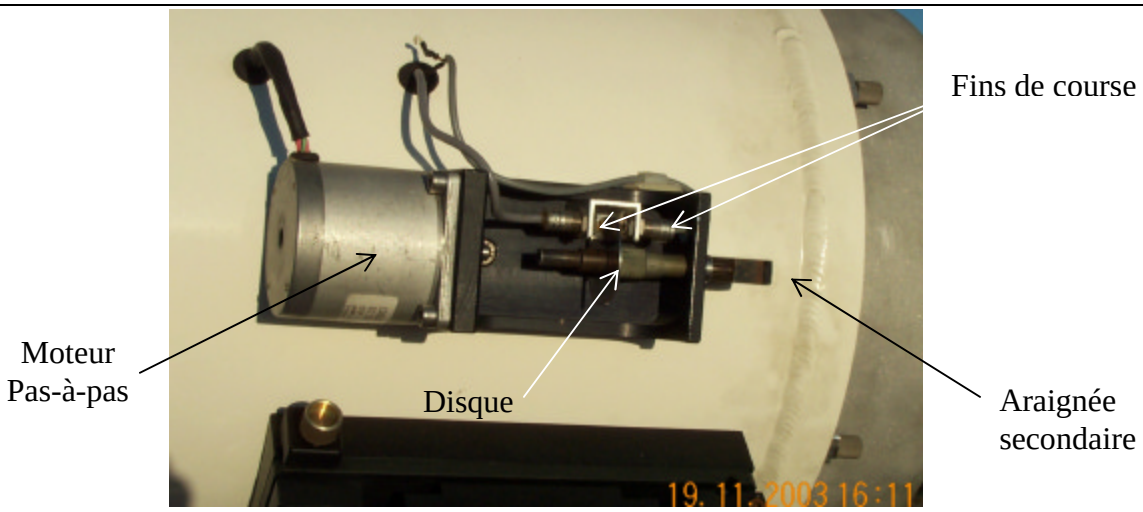


Fig. 9a Système de motorisation de la focalisation par le secondaire

Motorisation :

Motorisation des axes : Chacun des deux axes du télescope est motorisé par un module bloc-moteur identique parfaitement interchangeable, comprenant (fig. 9b) :

- une roue dentée de 180 dents, fixée sur l'axe considéré,
- une vis sans fin dite *vis tangente*, permettant d'entraîner la roue dentée. Un système presseur à ressorts qui permet d'engager la vis tangente à fond de filet dans la roue dentée et un ressort hélicoïdal enroulé sur l'axe, permettent d'assurer le rattrapage de jeu dans l'accouplement,
- un moteur ARTUS T-2171E, entraînant la vis tangente à l'une de ses extrémités,
- une génératrice tachymétrique TG-2179B, accouplée directement sur l'axe moteur, permettant de fournir l'information de vitesse de rotation du moteur,
- un codeur incrémental à l'autre extrémité assurant le codage en position angulaire de la vis tangente,
- un repère constitué d'un ergot métallique solidaire de l'axe de la roue dentée qui, associé à un détecteur de proximité inductif fixé sur le bâti, fournit un zéro de position absolu pour l'axe.

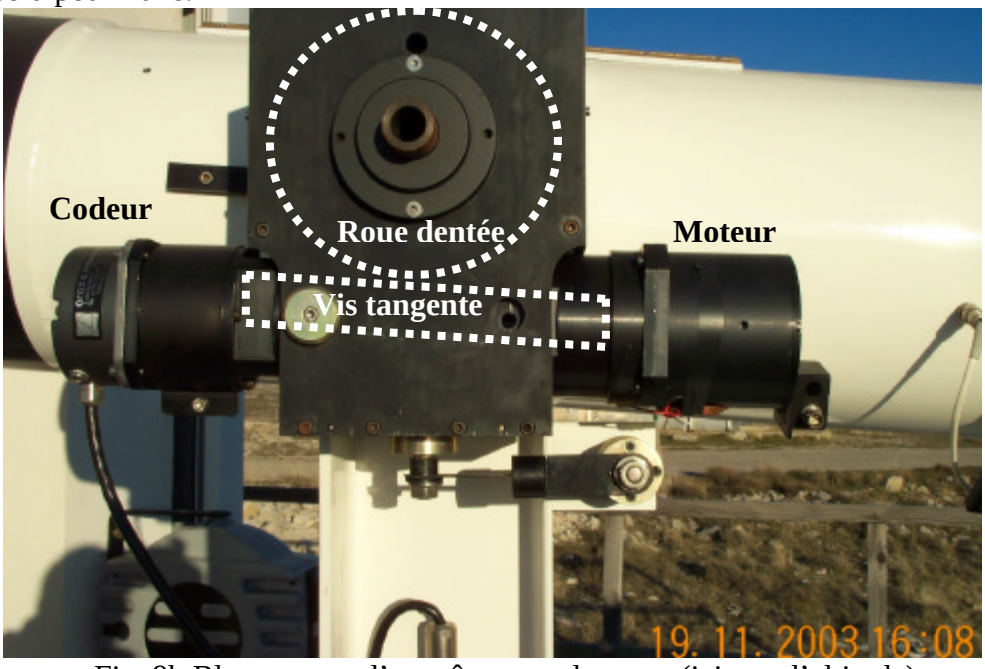


Fig. 9b Bloc-moteur d'entraînement des axes (ici axe d'altitude)

Motorisation de la focalisation : Le déplacement longitudinal de l'araignée secondaire est assuré par un moteur *pas à pas* (200 pas par tour). Ce moteur *pas à pas* fonctionne en « tout ou rien » (ON/OFF) et sa position n'est pas codée. Le contrôle de la focalisation s'effectuera en effet directement sur l'image de la caméra.
Un disque se déplace longitudinalement avec l'axe. Il est flanqué de deux microrupteurs qui font office de fins de course électriques.

V-2.2 Rotateur de champ

La mécanique du rotateur de champ a été conçue pour entraîner à vitesse moitié de celle de l'axe d'altitude le prisme assurant la rotation des images du télescope (voir section V-1.). Afin de ne pas ajouter de moteur supplémentaire, cette rotation à mi-vitesse est assurée par une réduction mécanique. La figure 10 donne le schéma de conception du système mécanique.

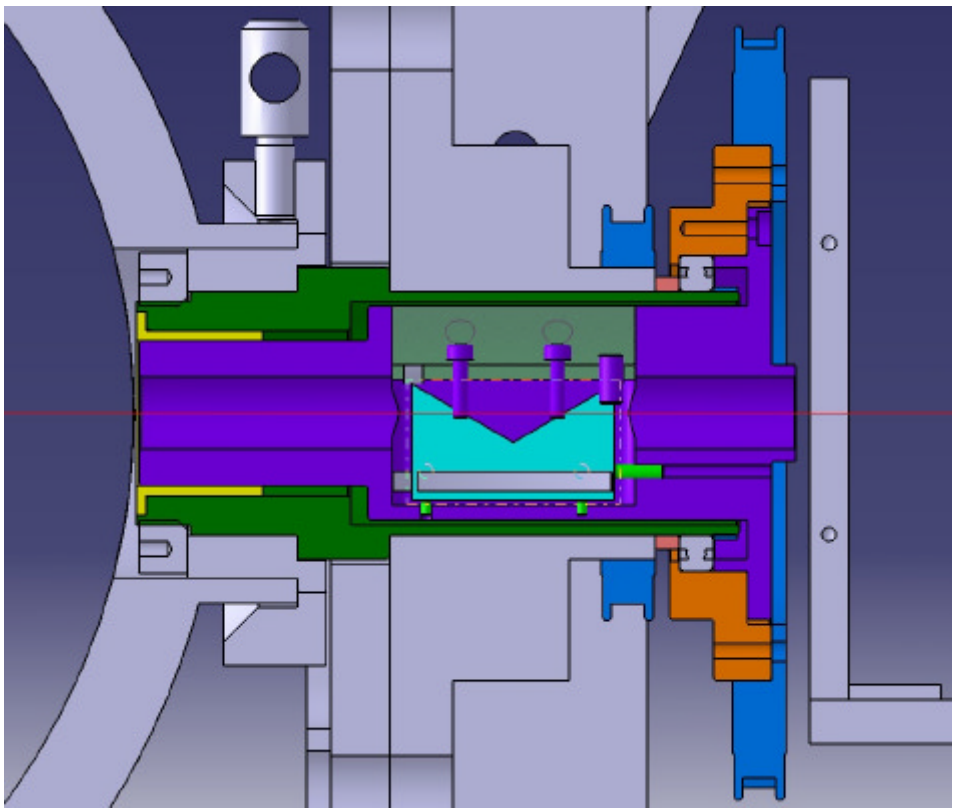


Fig. 10 Principe mécanique du rotateur de champ

Le prisme (turquoise) est porté par un tube-support (violet) inséré dans l'axe creux d'altitude du télescope. Un palier lisse (jaune) et un roulement (gris) autorisent la rotation libre du tube-support à l'intérieur de l'axe creux. Deux poulies crantées (bleu), l'une solidaire de l'axe d'altitude, l'autre, de diamètre double et solidaire du tube-support, sont accouplées par l'intermédiaire d'une courroie guidée par deux poulies (non représentées). Ce système d'accouplement assure la réduction de vitesse par deux recherchée.

V-2.3 Boîte focale

La boîte focale constitue en quelque sorte l'instrumentation focale de MISOLFA. Elle reçoit les différents éléments optiques nécessaires à l'acquisition des données.

Sa conception a donc été guidée par les contraintes dimensionnelles issues du calcul optique présenté dans la section V.1

Implantation générale des composants : La boîte focale est un parallélépipède de dimensions extérieures 368 x 256 x 128 mm. Elle est vissée sur une console horizontale fixée sur le coté de la fourche du télescope, à hauteur de l'axe de rotation du tube.
Un certain nombre de rainures de guidage sont creusées dans le fond de la boîte pour y recevoir, conformément aux spécifications optiques, les supports des composants optiques et en permettre le réglage le long de l'axe optique. Une roue à filtres à l'entrée de la boîte et une roue à fentes placée dans un plan image sur la voie pupille, (voir section suivante) y sont également disposées.
La caméra servant à l'acquisition dans la voie image est implantée directement dans la boîte. Pour la voie pupille, une ouverture est pratiquée sur le côté de la boîte pour y recevoir les supports des fibres optiques acheminant le flux vers les photodiodes (voir section VI-3)
La figure 11 présente une vue de dessus de la boîte focale avec l'implantation exacte des différents composants.

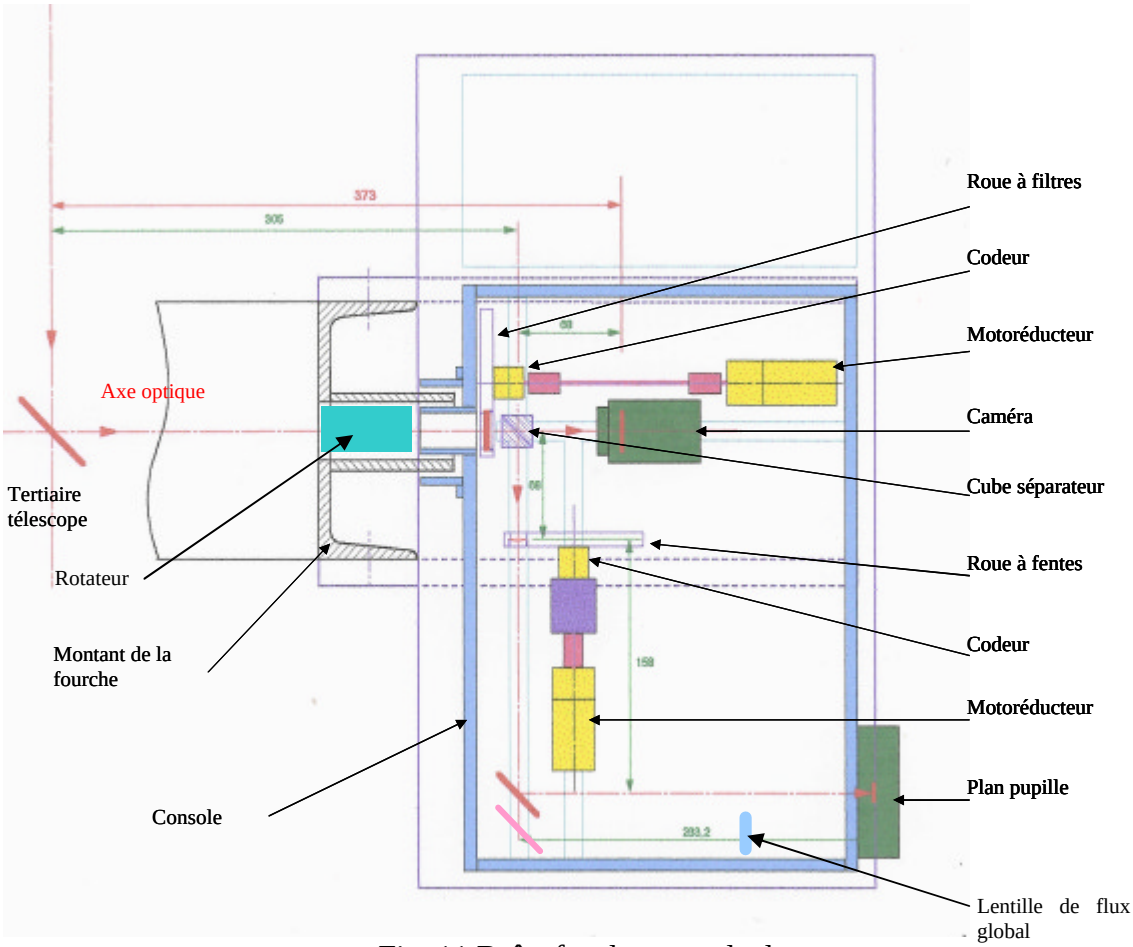


Fig. 11 Boîte focale – vue de dessus

Roues à filtres et à fentes : Sur le plan mécanique, les deux roues (à filtres et à fentes) sont identiques. Seules les contraintes d'encombrement font que leur implantation au sein de la boîte focale diffère légèrement (voir figure 11).

Chaque roue est constituée d'un disque percé de trous circulaires (5 pour la roue à filtres, 8 pour la roue à fentes) recevant les supports de filtres ou de lentilles fentes. Ces supports sont montés sur excentriques afin de faciliter leur réglage de positionnement sur l'axe optique.
Ce disque est fixé d'un côté sur un support solidaire de la boîte focale par l'intermédiaire de deux roulements à billes (voir figure 12)
Un deuxième axe de l'autre côté du disque permet d'y fixer un codeur à axe creux permettant de coder la position de la roue. Sur le même axe vient se fixer un motoréducteur à courant continu par l'intermédiaire d'un accouplement *SOUFFLEX*.
Les codeurs sont des codeurs à axe creux BHK 16 de *Baumer Electric*, d'une résolution de 2048 points par tour. Ces 2048 points étant interpolés par 4 par la carte électronique qui les lit, cela fournit une précision de positionnement meilleure que 3 minutes d'angle.
Les motoréducteurs sont des moteurs à courant continu 26L28 de *PORTESCAP* associés à un réducteur K27 de 6.2 de rapport de réduction.
Le codeur codant directement la position de la roue, son signal de zéro est suffisant pour fournir une origine de position.
Enfin, le mouvement des roues n'étant pas limité mécaniquement, elles ne disposent pas de butées de fin de course.

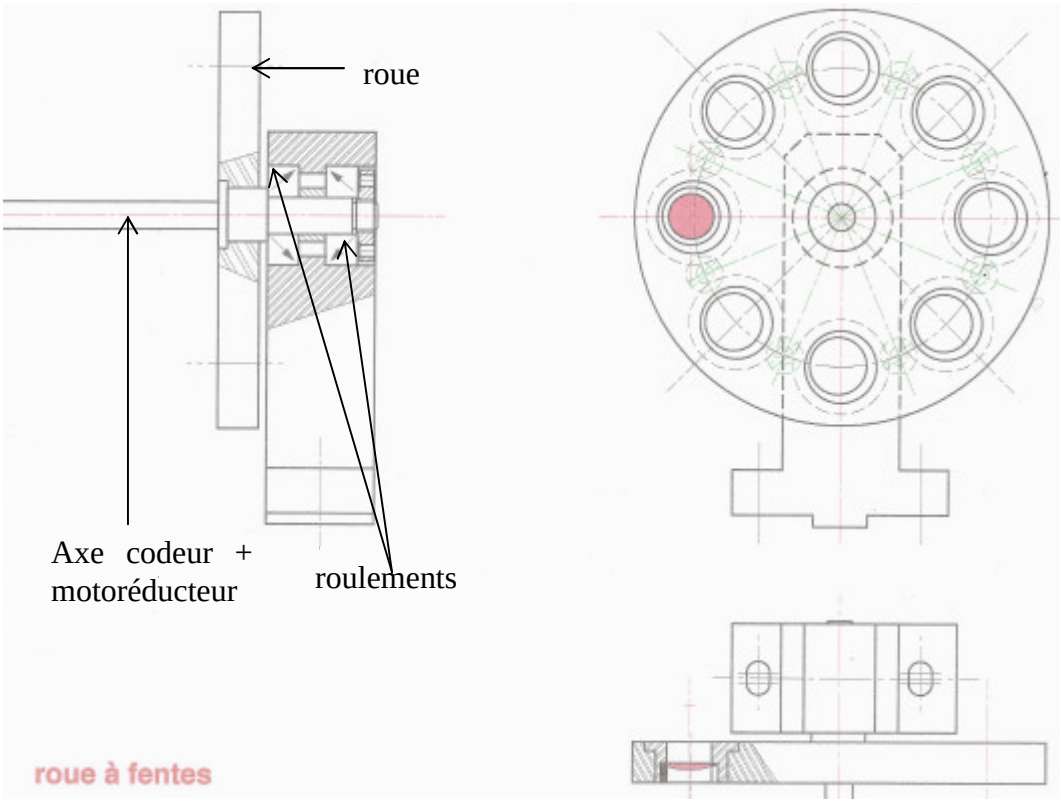


Fig. 12 Schéma mécanique de la roue à fentes

V-3 ELECTRONIQUE DE GUIDAGE ET DE COMMANDE

V-3.1 Architecture générale

Contexte instrumental de MISOLFA : MISOLFA a pour objectif de qualifier, en matière de turbulence atmosphérique, les images qui seront obtenus par SODISM II. Ces instruments seront installés sur le site de Calern, à l'Observatoire de la Côte d'Azur, et seront donc

accompagnés de l'actuel instrument de mesure du diamètre solaire, DORaySol, qui poursuit la longue série de mesures obtenues depuis près de 30 ans à l'Observatoire. DORaySol utilisera également les informations obtenues de MISOLFA pour améliorer la précision de ses mesures. La comparaison des diamètres obtenus simultanément avec SODISM II et DORaySol devrait apporter des informations très importantes.

Du point de vue électronique et informatique, MISOLFA s'intègre donc dans un ensemble plus grand comprenant l'instrument SODISM II d'une part, le télescope DORaySol d'autre part. L'ensemble de ces 3 instruments constitue le segment PICARDSOL.
L'objectif fixé est qu'un seul opérateur puisse faire fonctionner les 3 instruments simultanément. Cela passe par une automatisation complète des instruments MISOLFA et SODISM II. Pour DORaySol, qui n'a pas été conçu initialement pour être entièrement automatisé, cela demande une refonte complète du système de pilotage et d'acquisition, pour permettre un contrôle déporté de l'instrument depuis le bâtiment PICARDSOL. L'architecture informatique et électronique générale de l'ensemble des instruments est présenté figure 13.

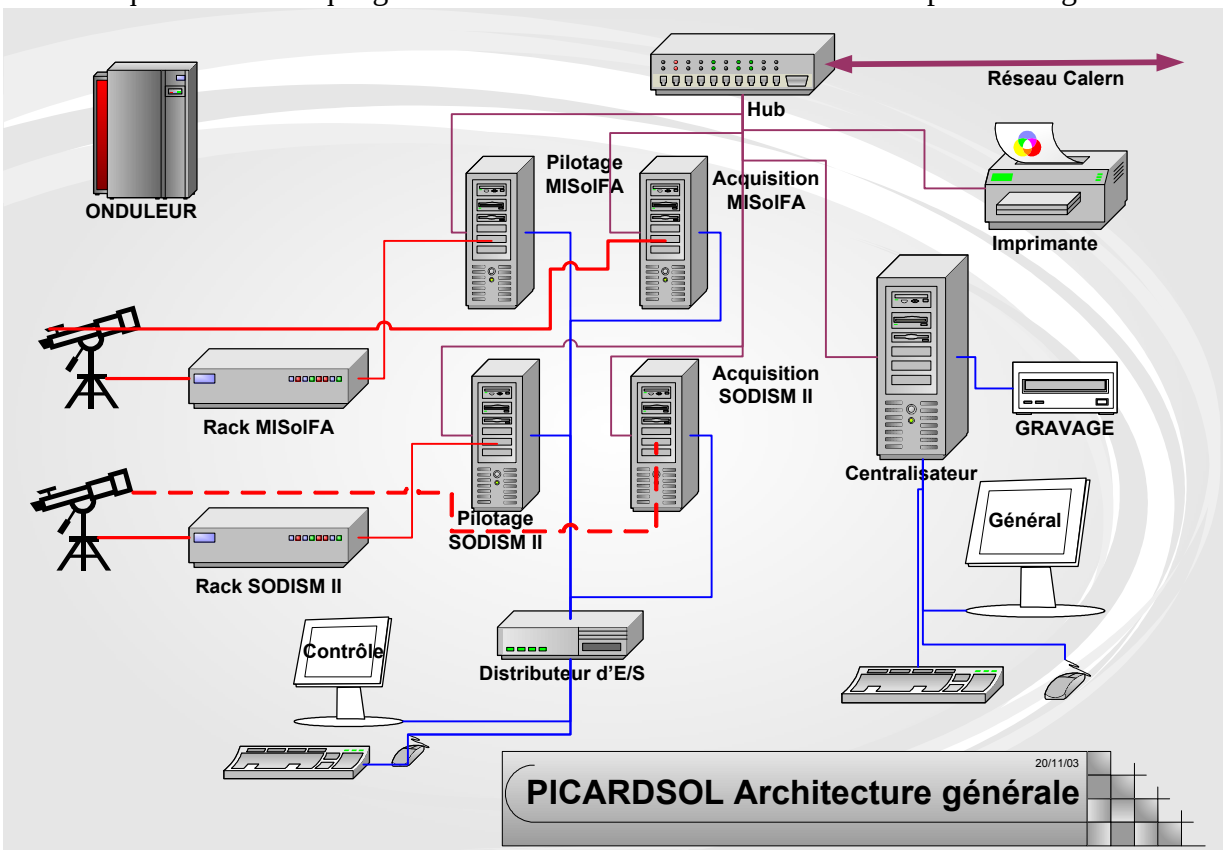


Fig. 13 Architecture informatique et électronique générale de PICARDSOL

La structure informatique de chacun des deux nouveaux instruments (SODISM II et MISOLFA) est similaire. Elle comporte :

- un PC dit de **pilotage**, relié à un rack électronique, le tout commandant le déplacement du télescope et d'autres actuateurs éventuels (pour MISOLFA ; voir plus loin)
- un PC dit **d'acquisition**, commandant la partie « scientifique » de l'instrument (boîte focale de MISOLFA, SODISM II)

Ces quatre ordinateurs sont reliés entre eux (et avec l'extérieur) par des liaisons Ethernet (protocole standard TCP/IP).

Ils fournissent tous à un autre PC, dit **centralisateur**, toutes les informations essentielles à l'observateur pour le contrôle de l'ensemble des instruments. Ce centralisateur reçoit en outre les informations provenant de l'instrument DORaySol. L'observateur, via le centralisateur, peut également envoyer des commandes aux différents PCs.
Enfin, une console (écran + clavier + souris) est partagée, par l'intermédiaire d'un distributeur d'entrées/sorties, entre les quatre premiers PCs à des fins de diagnostic et d'intervention en cas de pannes ou de problèmes.

La partie spécifique qui concerne l'instrument MISOLFA est maintenant détaillée.

Architecture générale de l'électronique/informatique de MISOLFA : L'informatique de MISOLFA s'articule donc autour de deux PCs :

- le PC d'acquisition, qui assure l'acquisition des données des voies *plan image* et *pupille*. Il est relié à la caméra PixelFly et au module de photodiodes par l'intermédiaire respectivement d'un module PCI et d'une carte National Instruments PCI 6013
- le PC de pilotage, qui assure la commande des mécanismes (5 moteurs). Il est relié à un rack électronique de pilotage par l'intermédiaire d'une carte d'axes PMAC et d'une liaison série sur bus USB2. Ce rack assure l'interface de puissance (amplification) avec les moteurs.

Ces deux ordinateurs communiquent entre eux via une liaison Ethernet, par l'intermédiaire de phrases ASCII (voir section V-3.3). Un synoptique général de cette architecture est présenté sur la figure 14.
L'objet de cette partie est de fournir une description de l'ensemble : ordinateur de pilotage, rack de pilotage et logiciel associé ; le système d'acquisition étant décrit dans la section VI.

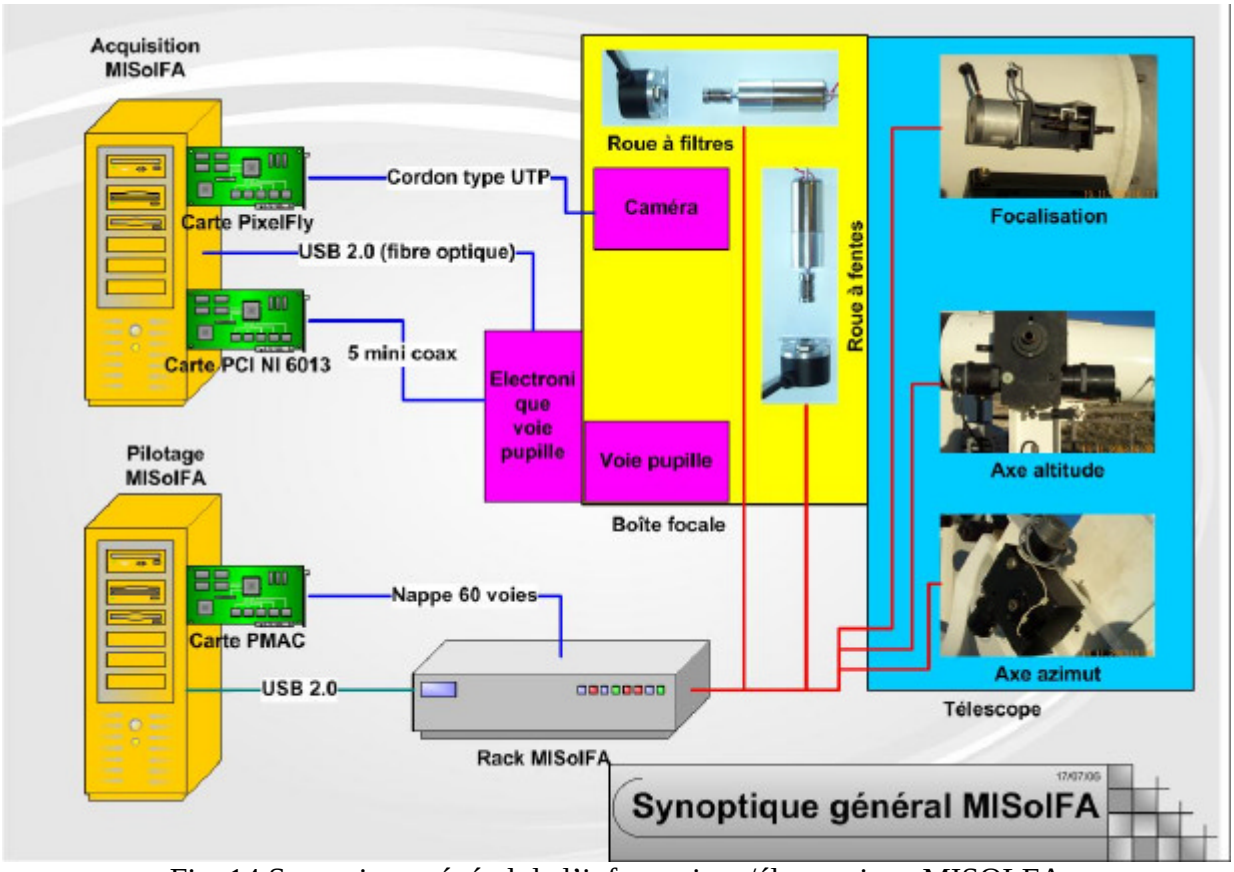


Fig. 14 Synoptique général de l'informatique/électronique MISOLFA

V-3.2 Fonctions de l'électronique de guidage et de commande

Commande des moteurs :
Le composant principal du PC de pilotage est donc la carte de contrôle d'axe PMAC lite, fabriquée par la société américaine *DeltaTau* et distribuée par *Jeambrun Automation* en France. Cette carte permet de piloter simultanément 4 moteurs synchrones ou à courant continu. Elle dispose de mémoire et d'une intelligence locale qui lui permettent d'assurer la gestion complète en temps réel de l'asservissement des 4 moteurs : lecture des codeurs, calculs des vitesses et de la boucle d'asservissement numérique (asservissement PID), génération des rampes d'accélération et de décélération, gestion des fins de courses, recherche des zéros, asservissement en position d'arrêt.
La carte est connectée au fond de panier du PC et communique avec lui par l'intermédiaire d'une DLL fournie par le constructeur (voir section V-3.3)

Les 4 voies de la carte sont affectées de la façon suivante :

- voie 1 : moteur d'axe d'azimut
- voie 2 : moteur d'axe d'altitude
- voie 3 : moteur de la roue à filtres
- voie 4 : moteur de la roue à fentes

Comme indiqué précédemment, le moteur *pas à pas* assurant la focalisation est commandé en tout ou rien et ne nécessite donc pas l'utilisation d'une boucle d'asservissement. Ce moteur est piloté au moyen d'ordres ASCII envoyés sur sa carte de commande à l'aide d'une liaison série transitant par le bus USB [voir plus loin]

La carte d'axes PMAC possède 4 voies strictement identiques. Chacune d'elle dispose :

- d'un signal DAC +/- 10 V de commande de l'ampli correspondant
- d'un signal de validation de l'ampli correspondant
- des signaux codeurs (2 signaux carrés en quadrature et leurs compléments)
- d'un signal de zéro (axe et/ou codeur)
- de deux signaux de fin de course
- d'un signal d'alarme ampli (sécurité thermique et/ou défaut)

Outre quelques tensions de référence (+5V ; +/-12V), quelques signaux logiques, qui ne sont pas utilisés, sont également disponible en sortie de la carte. Enfin, il est nécessaire de lui fournir une alimentation +/- 15V pour le fonctionnement des DACs.
L'ensemble de ces signaux est acheminé vers le rack électronique de pilotage via un câble en nappe à 60 voies.

Contrôle des alimentations :
Afin de garantir la sécurité électrique de l'instrument et de pouvoir intervenir en cas d'anomalie, l'ensemble des alimentations du rack de pilotage est contrôlé par le PC de pilotage :

- d'une part, la mise en route ou l'arrêt de chaque alimentation est contrôlé par un relais statique commandé par le logiciel de pilotage,
- la fourniture de la tension secteur au rack est elle aussi contrôlée par un relais statique,
- d'autre part, chaque tension d'alimentation est mesurée en permanence

Les commandes des relais et la lecture des tensions sont réalisées par l'intermédiaire d'un module d'entrées/sorties sur bus USB [voir plus loin]

Contrôle des températures :
L'instrument MISOLFA, chargé de mesurer la turbulence atmosphérique de jour, sera très sensible aux éventuelles variations internes de température du télescope et de la boîte focale. Ces fluctuations doivent donc être mesurées pour pouvoir être prises en compte lors du traitement des données.
Pour ce faire, des thermocouples de type K sont utilisés et placés le long du trajet optique :

- 1 sur la lame d'entrée
- 1 sur le miroir primaire
- 1 sur le miroir secondaire
- 1 sur le miroir tertiaire
- 1 dans le tube (température de l'air)
- 2 dans la boîte focale (sur chacune des voies d'analyse)

Ces températures sont lues à l'aide d'un boîtier dédié à la mesure des tensions délivrées par les thermocouples, disposant de 8 voies de mesure, et fonctionnant sur liaison série transistant par le bus USB [voir plus loin]
D'autre part, une mesure de la température au sein du rack électronique est réalisée à l'aide d'une sonde de température à semi-conducteur, connectée à une des entrées analogique du module USB mentionné ci-dessus pour le contrôle des alimentations.

Raquette de commande du télescope :
Le télescope de MISOLFA est muni d'une raquette de commande permettant de prendre le contrôle manuel des deux axes du télescope pour effectuer des corrections ou un pointage manuel.
Cette raquette dispose de 6 boutons :

- 2 pour le mouvement en azimut (+ et -)
- 2 pour le mouvement en hauteur (+ et -)
- 1 commutateur automatique / manuel
- 1 commutateur vitesse lente / vitesse rapide

Les 6 signaux correspondants sont des signaux logiques TTL, qui sont lus par le module USB mentionné ci-dessus pour le contrôle des alimentations

Sécurité utilisateur et instrument
Pour assurer la sécurité de l'utilisateur et de l'instrument, deux boutons d'arrêt d'urgence sont installés sur le système et coupent l'alimentation secteur du rack de pilotage, provoquant ainsi l'arrêt instantané de tous les actuateurs mécaniques.
L'un de ces boutons est situé près du télescope ; l'autre bouton est placé dans la salle de contrôle, près de l'ordinateur de pilotage de l'instrument.

V-3.3 Rack électronique de pilotage

Le rack électronique de pilotage a donc pour fonction principale de fournir la puissance aux moteurs qui assurent les mouvements des différents mécanismes, à savoir :

- les deux axes du télescope (identiques)
- la roue à fente et la roue à filtres (identiques)
- la focalisation par déplacement du secondaire

Il gère également les alimentations, les contrôles et les sécurités

Il se présente sous la forme d'un rack de dimensions standards (19 pouces, hauteur 3U), connecté au PC comme indiqué précédemment. La figure 15 propose un synoptique du contenu de ce rack.

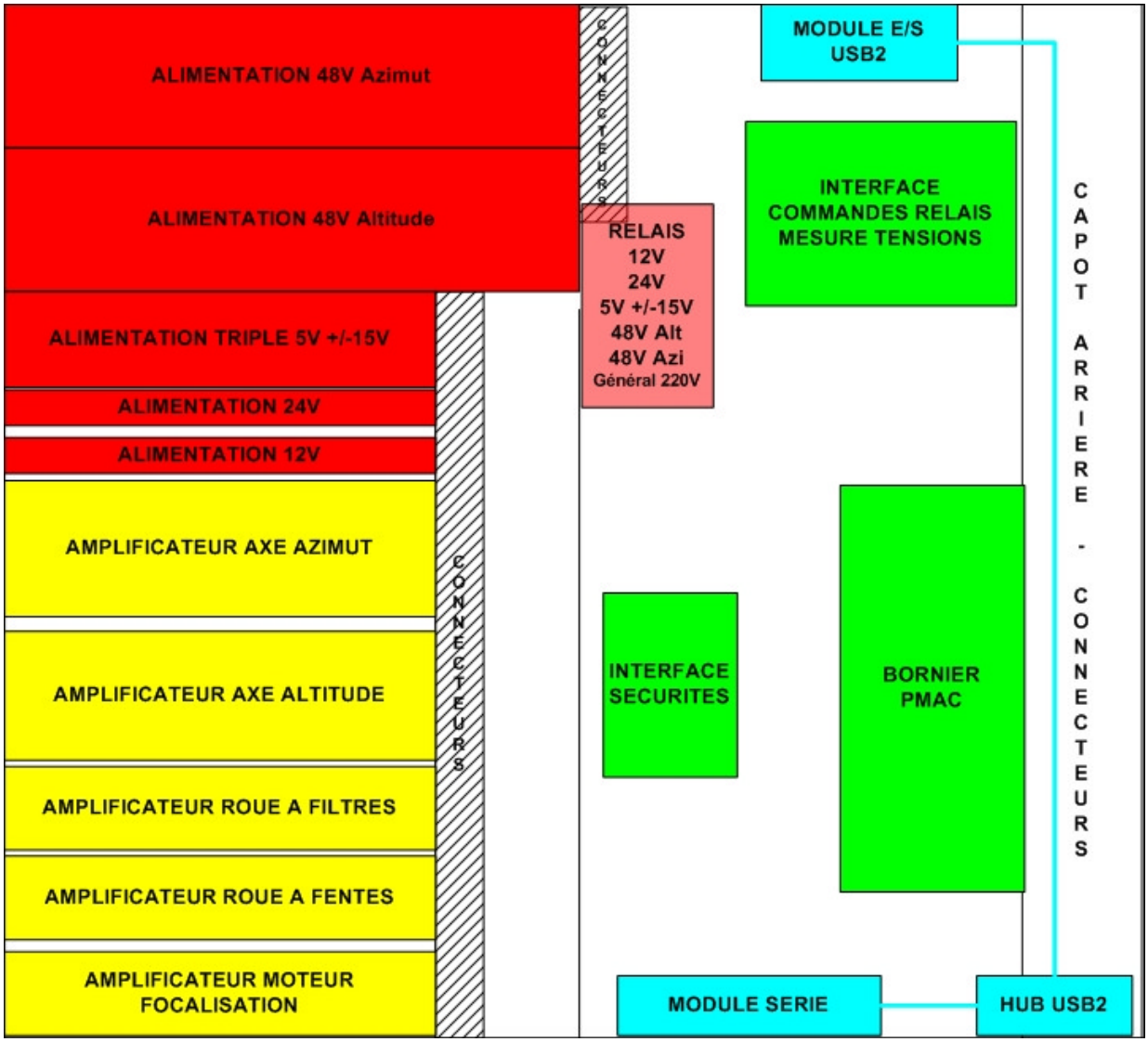


Fig. 15 Synoptique du rack électronique de pilotage MISOLFA

Il comprend :

- deux **amplificateurs** de puissance 50V / 4A MIDL 504 de Midi Ingénierie, recevant en entrée un signal de consigne +/- 10V et un signal provenant d'une génératrice tachymétrique, permettant de commander un asservissement en boucle de vitesse. Ces amplis reçoivent directement au travers d'entrées opto-isolées et gèrent de façon hard les signaux de fins de course. Ils acceptent un signal de validation et délivrent un signal

d'erreur en cas de dysfonctionnement. Ces deux amplificateurs commandent respectivement le moteur de l'axe d'azimut et le moteur de l'axe d'altitude,

- deux **amplificateurs** PORTESCAP ELD-3503, 24V 3A, recevant en entrée des signaux de consigne +/- 10V permettant de commander un moteur à courant continu en consigne de vitesse. Leur électronique assure un asservissement de vitesse par boucle de courant PI. Ces deux amplis commandent respectivement le moteur de la roue à filtres et le moteur de la roue à fentes,
- une carte de commande de moteur *pas à pas*, réalisée par le groupe projet du département Fresnel de l'OCA. Cette carte intègre à la fois la partie logique de commande (indexeur) et l'étage de puissance. Elle gère de façon hard les fins de courses et génère les rampes d'accélération et de décélération. Elle est intelligente et reçoit des ordres de l'ordinateur de pilotage sous forme de phrases ASCII au travers d'une liaison série RS422,

- deux **alimentations** continues 48V / 4A fournissant la puissance aux amplificateurs MIDL 504,
- une **alimentation** continue 24V / 2A fournissant la puissance aux amplificateurs PORTESCAP,
- une alimentation continue 12V / 2.5A fournissant la puissance à la carte de commande de moteur pas-à-pas,
- une **alimentation** continue triple basse tension (5V ; +/-15V) fournissant les alimentations des codeurs, des interrupteurs de fin de course, des détecteurs de proximité, des signaux de validation et de la partie logique de la carte de commande de moteur pas-à-pas.

Il comprend également :

- un **bornier** permettant de recevoir le câble en nappe à 60 voies provenant de la carte **PMAC** et de le distribuer sur des bornes à vis afin de faciliter la connexion avec :
  - les amplificateurs (signaux de commande, de validation, de défaut)
  - les codeurs
  - les fins de courses et les zéros
  - les alimentations des DACs (+/- 15V)

- un **module** « d'**interface sécurités** » permettant d'assurer, entre la carte PMAC et les amplificateurs, l'adaptation d'impédance des signaux de validation et de défaut des amplificateurs, des entrées de fins de courses mécaniques et des détecteurs de proximité (zéros axes).

- un **mini-hub USB2,** permettant de distribuer cette liaison sur un module d'entrées/sorties et un module série fournissant deux lignes séries standard [voir ci-après]

- un **module d'entrées/sorties sur bus USB2** National Instrument USB 6008, disposant de 8 voies d'E/S analogiques et 12 voies d'E/S numériques qui permet de gérer les relais statiques de commande des alimentations [voir ci-après], la lecture des signaux provenant de la raquette de commande du télescope et la mesure des tensions délivrées par les alimentations [voir ci-après]

- **6 relais** statiques **de commande des alimentations**, qui contrôlent la mise en route et l'arrêt de :
  - l'alimentation générale du rack (220 V secteur)
  - les deux alimentations 48V
  - l'alimentation 24V
  - l'alimentation 12V
  - l'alimentation triple (5V ; + /- 15V)

- un **module** « d'**interface alimentations** » permettant :
  - d'assurer l'adaptation d'impédance entre les sorties numériques du module USB 6008 et le circuit de commande des relais statiques,
  - d'assurer l'isolation galvanique, au moyen d'opto-coupleurs analogiques, entre les alimentations du rack et les entrées analogiques du module USB 6008,
  - d'assurer l'interface électrique entre une sonde LM35 et une entrée analogique du module USB, afin de contrôler la température du rack.

  C'est également sur ce module que les boutons d'arrêt d'urgence coupent l'alimentation secteur lorsque l'un des deux est enfoncé.

- un **module série**, connecté sur le hub USB et fournissant deux lignes série standard :
  - une ligne série RS 422 full duplex permettant la commande par le PC de pilotage de la carte de commande de moteur pas-à-pas (focalisation)
  - une ligne série RS 485, connecté à un module EXPERT EX9018 situé près du télescope, qui permet d'assurer la mesure des températures au sein de l'instrument.

V-3.4 Logiciel de pilotage

Le logiciel de pilotage est relativement simple dans la mesure où le PC de pilotage fonctionne comme un automate qui recevra des consignes de l'ordinateur d'acquisition.

Il est composé essentiellement de 4 modules (fig. 16) :

- un **noyau central séquenceur**, qui a pour fonction de communiquer avec les modules dits « temps réel » [module PMAC, module USB2 – voir ci-après], afin de leur transmettre des ordres bas niveau (rotation d'une roue, commande d'un relais) ou au contraire de recevoir des paramètres (position des axes, valeur d'une tension d'alimentation). Il doit également surveiller l'ensemble des automatismes (vérifier qu'un ordre demandé à l'électronique a été effectué correctement ; contrôler régulièrement la cohérence entre les commandes et l'état des alimentations, lire régulièrement les paramètres d'état de l'instrument, …). Il doit également envoyer régulièrement aux autres parties du système (acquisition, centralisateur, affichage local) des informations sur l'état de l'instrument. Enfin il est capable d'effectuer des commandes de haut niveau (par exemple : pointer le Soleil), en les décomposant en séquences d'ordres à envoyer aux modules « temps réel »

- un **module « temps réel PMAC »** qui sert à l'interface avec la carte PMAC. Ce module, par l'intermédiaire d'une DLL, permet de traduire les commandes venant du noyau central dans le langage de la carte. D'autre part, il permet de lire les variables d'état de la carte (position codeurs, état des fins de courses, etc.)

- un **module « temps réel commande-contrôle et focalisation »** qui envoie sur la liaison série USB2 les commandes permettant de
  - commander un relais d'alimentation (module USB),
  - lire une tension d'alimentation (module USB),
  - lire les commandes raquette (module USB)
  - mesurer une température sur l'instrument (module série RS485),
  - déplacer le secondaire pour la focalisation (module série RS422)

- un **analyseur-synthétiseur de commandes** qui permet d'assurer la liaison de l'ordinateur de pilotage avec les autres parties du système. Cet analyseur-synthétiseur analyse les messages qu'il reçoit ou génère des commandes qu'il envoie. Ces messages ou commandes sont sous forme de « phrases » ASCII, constituées de mots-clés et de paramètres. Ces messages ou commandes transitent par des liens Ethernet (protocole TCP-IP) gérés sur chaque machine par l'intermédiaire de *sockets*. Ces liens doivent être établis avec :
  - **l'ordinateur d'acquisition**,
  - une **Interface Homme-Machine locale** qui permet d'accéder à toutes les informations (y compris celles de bas niveau) et ce à des fins de diagnostic en cas de pannes. Cette interface doit être disponible via la console partagée par le distributeur d'entrées/sorties (voir section V-3.1)
  - le **centralisateur**, ordinateur qui regroupe toutes les informations importantes provenant de MISOLFA, SODISM 2 et DORAYSOL (voir section V-3.1).

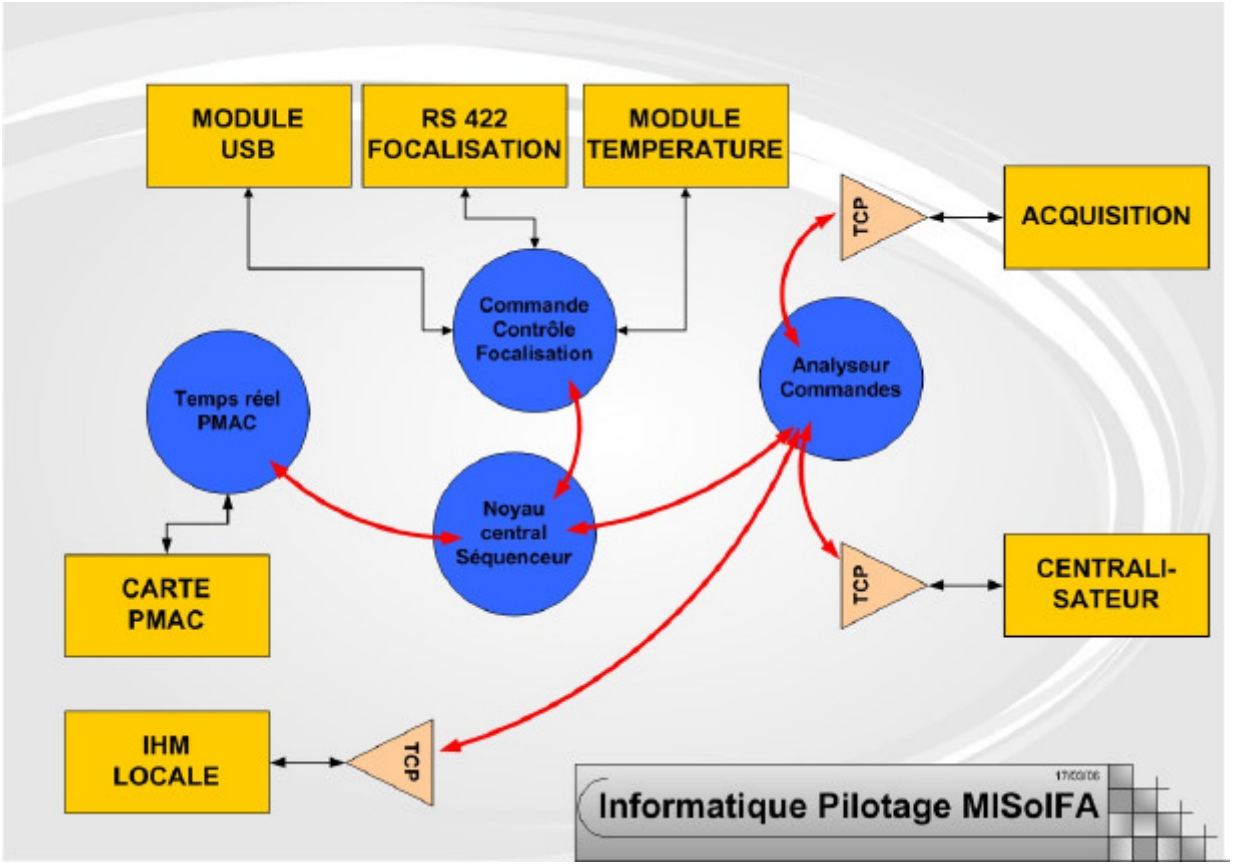


Fig. 16 Synoptique du logiciel de pilotage MISOLFA

VI- ACQUISITION DES DONNES ET SAUVEGARDE

Cette section décrit la partie qui a trait à l'acquisition des deux voies de mesure de MISOLFA : la voie *plan image* et la voie *plan pupille*. Cette une partie s'intègre dans l'architecture globale de PICARDSOL (fig. 13) montrée plus précisément sur le synoptique de la figure 14. L'ordinateur sur lequel sont connectées la caméra et les photodiodes via leur module respectif, effectue également les traitements nécessaires à l'estimation des paramètres de la turbulence, la sauvegarde des données et la mise à disposition de certaines d'entre elles sur le réseau pour leur envoi au centre de mission PICARD à Bruxelles.
L'acquisition des deux voies se fera en continu avec stockage et estimation des paramètres de la turbulence toutes les 2 minutes. Pour la voie *plan image*, seuls les contours des images du soleil seront sauvegardés avec une séquence d'acquisition par jour pour effectuer divers contrôles.

VI-1 ACQUISITION DES IMAGES DE LA VOIE *PLAN IMAGE*

Dans la voie *plan image*, les deux images des bords du soleil sont directement formées sur la caméra CCD placée dans le plan focal de l'instrument (voir section V-1). L'objectif est d'acquérir ces images en continu dans le temps pour extraire les paramètres spatio-angulaires de la turbulence. Le système d'acquisition est développé sur la base d'une caméra CCD connectée à un micro-ordinateur, le tout piloté par un logiciel approprié qui garantie les objectifs assignés (fig. 17).

La caméra CCD et ses caractéristiques : La caméra utilisée est une *PixelFly* VGA (n/b) de *PCO*. Elle est dotée d'un capteur CCD, ICX074AL de SONY à transfert interligne. Cette caméra fournie 40 images par seconde avec une résolution maximale de 640 x 480 pixels.

Caractéristiques géométriques du capteur : La matrice CCD a une architecture interligne. Dans ce type d'organisation, le capteur est constitué d'une zone image en relation avec une zone mémoire adjacente et d'un ou plusieurs registres de lecture. A la fin de la période d'intégration, les charges sont transférées de manière quasi-instantanée dans la zone mémoire adjacente (registre vertical). Les lignes de pixels sont ensuite décalées vers le registre de lecture pour former le signal vidéo de sortie.
Le capteur est constitué de 640(H) sur 480(V) photosites carrés de 9.9 µm, ce qui représente une taille de 6,3 sur 4,8 mm pour la matrice. Grâce à des micros lentilles sur chaque photosite (*Hole Accumulated Diode*), l'influence de la surface obscure (registres verticaux) est négligeable sur la formation spatiale de l'image.

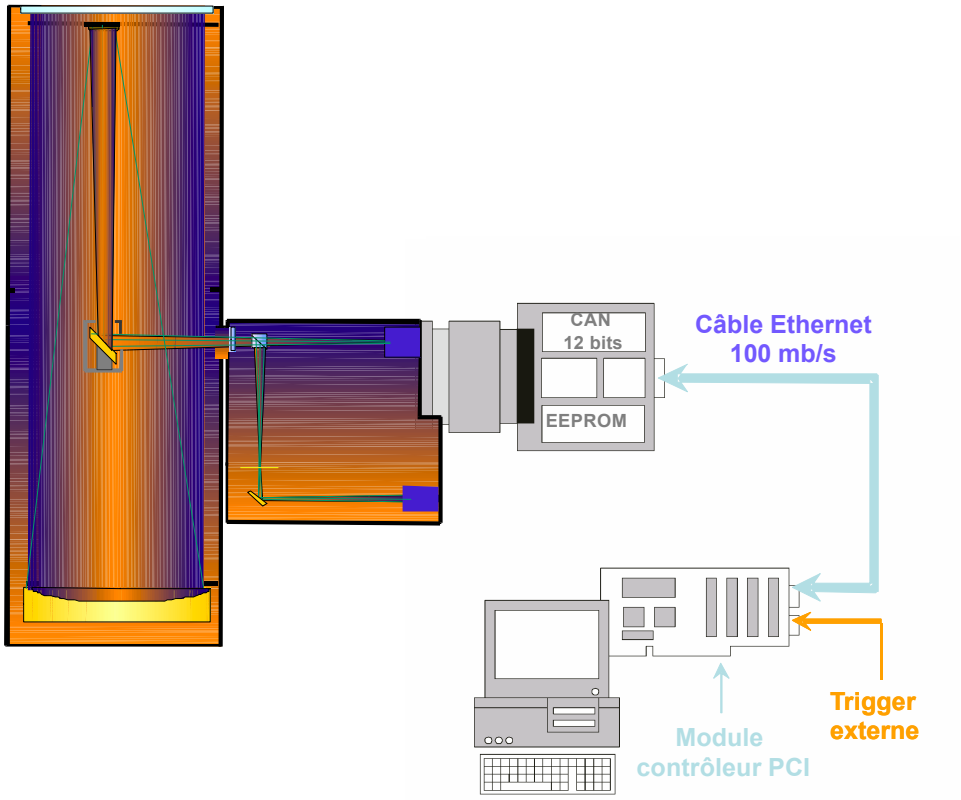


Fig. 17 Chaîne d'acquisition de la voie *plan image*

Caractéristiques optiques du capteur : Le champ angulaire couvert par le capteur CCD placé au foyer du télescope est de l'ordre de 128 par 96 secondes d'arc. Chaque photosite a donc une taille de 0.2 seconde d'arc, valeur qui impose l'échantillonnage spatial des images.

Niveaux de numérisation : Le convertisseur analogique - numérique (CAN) de la camera convertit la valeur analogique du signal vidéo sur 12 bits, soit 4096 niveaux.

Bruit de lecture : il est induit par la nature du capteur et l'électronique nécessaire au fonctionnement de la caméra. Il est d'environ de 16 électrons, valeur à rapporter à la capacité d'un photosite à la saturation qui est de 32000 électrons.

Bruit thermique (courant d'obscurité) : ce bruit est omniprésent même lorsque le CCD n'est pas soumis à la lumière ; c'est le courant d'obscurité (charges thermiques) qui est généré par l'agitation thermique des électrons dans le semi-conducteur. Ce bruit est proportionnel au temps de pose et dépend très fortement de la température CCD. Des mesures régulières du courant d'obscurité sont à effectuer lors des observations pour éliminer sa contribution des images acquises.

Principe de fonctionnement de la caméra : La PixelFly est reliée à un module PCI (Liaison ETHERNET de 10 mètre maximum) chargé de son interfaçage avec l'ordinateur. Les manipulations sur la caméra sont possibles grâce à une bibliothèque de routines (*Software Development Kit*).

La caméra dispose de plusieurs modes de fonctionnement (*vidéo* et *asynchrone*) et de possibilités de *Binning* vertical et horizontal qui permettent d'augmenter le nombre d'images acquises mais au détriment de leur résolution spatiale. En outre, elle dispose de l'option logicielle ou matérielle *Trigger* qui contrôle l'instant d'acquisition d'une image ou de séquences d'images.

Pour son fonctionnement *standard*, MISOLFA utilisera la caméra en mode *vidéo* sans *Binning* ; le nombre d'images acquises est alors de 40 par seconde. Le signal *Trigger* intervient pour générer toute la séquence d'images et le temps d'intégration varie entre 1 ms et 10 secondes avec un pas de l'ordre de la milliseconde (fig. 18-a). Il existe donc dans ce mode, le cas où le temps d'intégration est supérieur à celui nécessaire au transfert (fig. 18-b). La période de transfert sera alors égale au temps d'intégration. Dans le cas de MISOLFA et afin de respecter la cadence des 40 images par seconde, le temps d'intégration devra être inférieur à 25 ms.

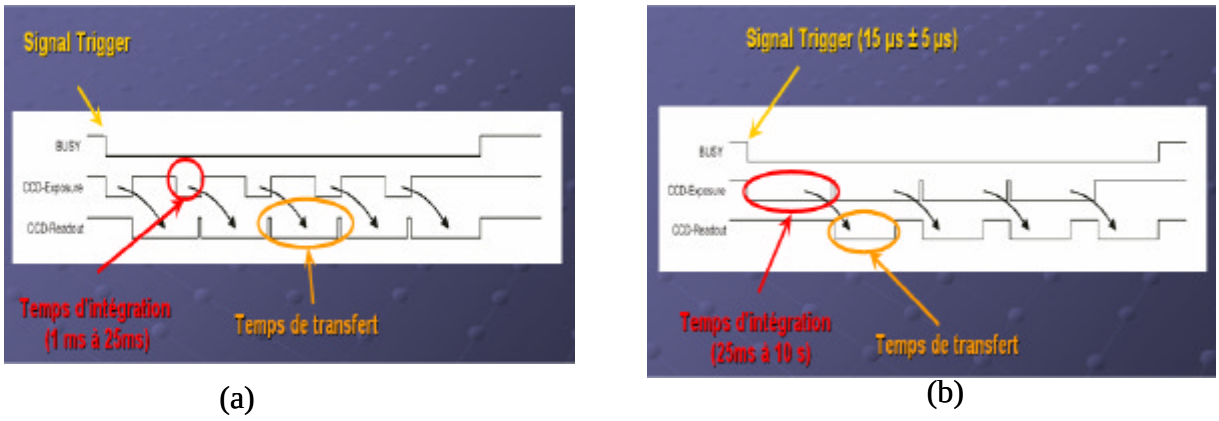


Fig. 18 : Diagramme temporel du mode Vidéo
(a) : Temps d'intégration < temps de transfert
(b) : Temps d'intégration > temps de transfert

Ordinateur et outils informatiques : L'ordinateur d'acquisition sera à base de biprocesseurs *Intel* ; il aura pour principales taches la collecte et le traitement des informations issues des deux plans. La prédominance des processeurs *Intel* sur le marché justifie en partie le choix du processeur qui équipera l'ordinateur d'acquisition. Le second critère à motiver ce choix est la masse de données et les traitements à réaliser en *temps réel.*

Le système d'exploitation qui sera utilisé dans le développement logiciel ainsi que dans l'utilisation finale du système d'acquisition, sera à priori basé sur l'architecture NT de Microsoft. Les dernières versions actuellement disponibles utilisant ce type de technologie sont Windows 2000 et XP qui sont des systèmes 32 bits multitâches sécurisés. Les applications sont séparées du code du système d'exploitation.

Les différents outils logiciels utilisés pour les développements de l'acquisition sont :

- *Microsoft Visual* C++ : Outils de développement pour la conception d'applications en C++ utilisant des API Win32 et MFC.
- *PixelFly SDK* : Contient les différentes fonctions nécessaires à la programmation de la caméra.
- *Intel Integrated Performance Primitives* (Intel IPP) : Les librairies d'*Intel* aident au développement d'applications de haute performance en traitement d'images.
- *Intel VTune* : Améliore la performance des applications en permettant d'identifier les goulots d'étranglements d'un code

Le logiciel d'acquisition : Le problème posé dans la conception du logiciel d'acquisition de MISOLFA, est dans la manière dont il devra s'intégrer et la façon qu'il aura à gérer les concurrences d'accès impliquant la synchronisation de multiples activités se déroulant dans l'environnement. Cette forme de concurrence d'accès est désignée sous le nom de fonctionnement *multitâches* (*multithreads*) qui implique le multiplexage de nombreuses tâches concurrentes sur un même microprocesseur physique donnant l'impression d'une gestion simultanée.
Les besoins scientifiques ont conduit au recensement des actions élémentaires que devra effectuer le logiciel. Elles sont regroupées dans les tâches suivantes :

A. Configuration et réglage de la caméra CCD

- ✓ Réglage du mode de fonctionnement.
- ✓ Réglage du temps d'intégration.
- ✓ Réglage du *Binning*.

B. Control de l'environnement (caméra, télescope, PC,…)

- ✓ Récupération d'informations sur le positionnement du télescope (TCP/IP).
- ✓ Erreurs de fonctionnement de la camera.
- ✓ Vérification de la température ambiante (station météorologique).
- ✓ Vérification de la température de la caméra.
- ✓ Ajustement de l'heure du system.

C. Acquisition des images

- ✓ Durée de la séquence : en continu
- ✓ Cadence de transfert : 40 images par seconde (cas sans *binning*).
- ✓ Format de l'image : 640H x 480V.
- ✓ Résolution de l'image : 12 bits.
- ✓ Espace en mémoire hôte : 16 bits.
- ✓ Taille de la séquence : 4800 images

Détection du contour des images : La quantité de données importante que MISOLFA va acquérir ne permet pas une sauvegarde dans leur totalité. L'option retenue est alors un traitement préliminaire des images pour extraire les contours qui seront sauvegardés. Pour cela, la méthode utilisée consiste à calculer le module du gradient *G(x,y)* à 2 dimensions des intensités *I(x,y)* de l'image défini par l'expression :

$$G(x,y) = \sqrt{\left(\frac{\partial I(x,y)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial I(x,y)}{\partial y}\right)^2}$$

puis à effectuer une détection de la position de ses extremums qui définissent le contour attendu. Cependant, le bruit dans l'image perturbe la détection du point d'inflexion et un filtrage est nécessaire. La méthode de filtrage qui sera utilisée, est basée sur l'utilisation de la transformée en ondelette. Elle est présentée en annexe *II* en prenant en exemple un limbe acquis avec l'expérience SDS (*Solar Disk Sextant*). Chaque ligne de l'image acquise avec MISOLFA peut être raisonnablement assimilée au limbe compte tenu de la taille d'une image fenêtrée (128 par 6.4 secondes d'arc) et la méthode peut lui être appliquée.

Traitements préliminaires et sauvegarde des données :

A. Réduction du bruit induit par l'acquisition : voir organigramme sur la figure 18.

B. Réduction de la masse de données par isolation de portions de l'image.
La taille d'une image acquise occupera 614400 Octets dans la mémoire de l'ordinateur hôte. Une réduction des données par fenêtrage s'impose pour diminuer l'espace ainsi occupé. Elle se fera par une identification et une isolation des deux zones d'intérêts sur chaque image (2 x 32 x 480 pixels), ce qui permettra de réduire l'espace ainsi occupé de 1/10ème. *Cette étape n'influencera cependant en aucun cas, la cadence d'acquisition.*

C. Réduction de la masse de données par extraction des points d'inflexion (ou des photocentres) sur les deux sous-images précédemment extraites, ce qui donne (2 x 3 x 480) pixels. Le volume de données utiles pour une moyenne de 8 heures par jour d'acquisition est alors de l'ordre de 3.1 Go.

D. Stockage et mise à disposition des données
Les coordonnées des contours seront stockées toutes les 2 minutes au format *FITS* (voir annexe *III*), soit des séquences de 4800 images analysées (9600 contours).
Les données seront disponibles comme suit :

- ✓ **Données N0** (Images fenêtrées) : Non disponibles.
- ✓ **Données N1A** (Contours) : Stockées en local, non distribuées
- ✓ **Données N2A** (Paramètres atmosphériques) : Stockées en local, distribuées toutes les 45 minutes.

En partant de l'hypothèse que les temps d'acquisition et les volumes de données à acquérir sont définis et fixes, le problème suivant se pose : comment s'assurer que les traitements se font sur des images acquises au même instant et comment ne pas perdre de données sachant que les traitements à faire sont potentiellement longs ?
Afin de pouvoir faire de l'acquisition et des traitements en « temps réel » :

- L'acquisition se fait selon la technique du double *buffer*. De cette façon les traitements pourront être faits sur une image pendant que la suivante est en cours d'acquisition. Cette méthode doit être raffinée pour le contexte de MISOLFA où les opérations à réaliser sont longues et leurs durées peuvent facilement dépasser la période d'acquisition de plusieurs images; ainsi un rajout d'une file d'attente s'impose pour chacun des deux *buffers*.
- Il faut une définition précise des opérations de traitements (calculs) à effectuer.
- Il faut une optimisation et une analyse des performances.

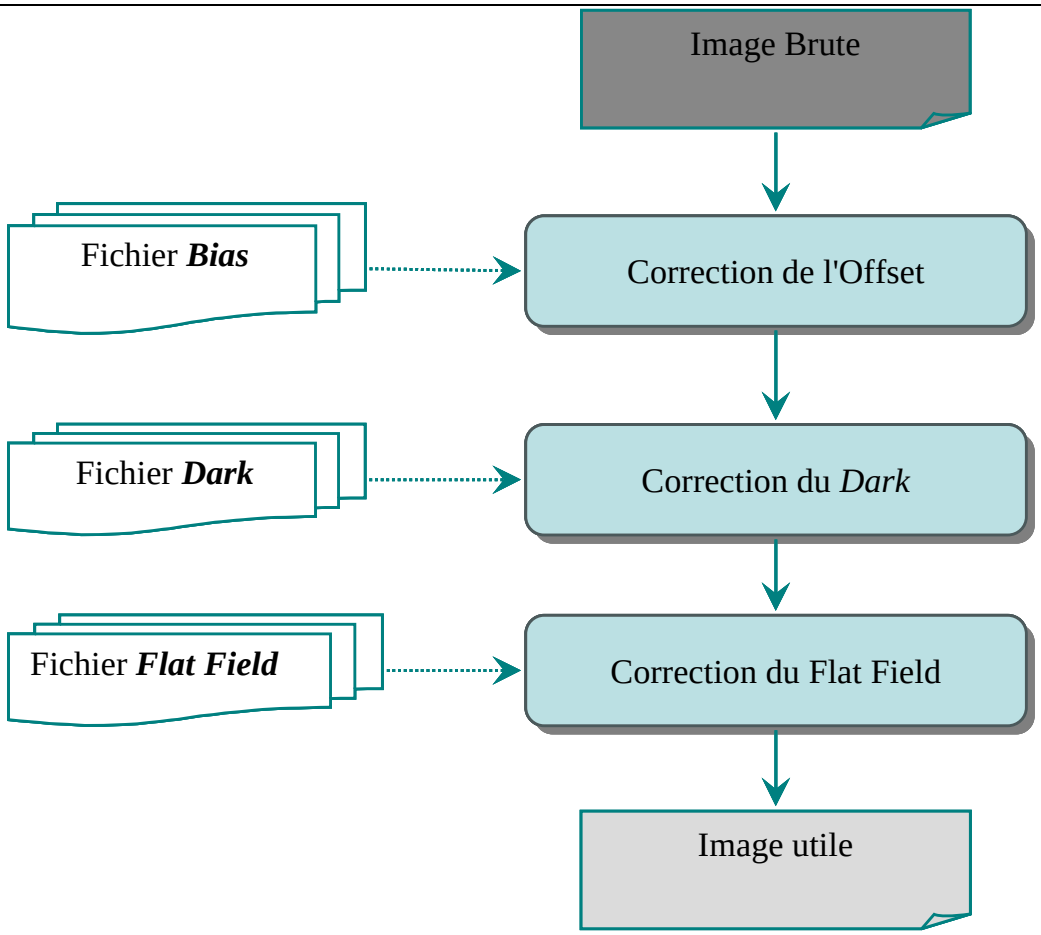


Fig. 18 Organigramme illustrant les traitements faits à l'image

VI-2 ACQUISITION DES DONNEES DE LA VOIE *PLAN PUPILLE*

L'image formée dans la voie plan pupille, présente des fluctuations d'intensité qui reflètent celles des angles d'arrivée du front d'onde dégradé par la turbulence (voir section IV-2). Trois photodiodes sont disposées sur l'image pour enregistrer à la fréquence de 1 KHz, les fluctuations de flux intégrées sur des zones angulaires de taille différente. Les paramètres de la turbulence désirés sont alors estimés à partir de l'acquisition temporelle du signal délivré par les photodiodes. L'organigramme de la figure 19 illustre la chaîne d'acquisition de la voie plan pupille.

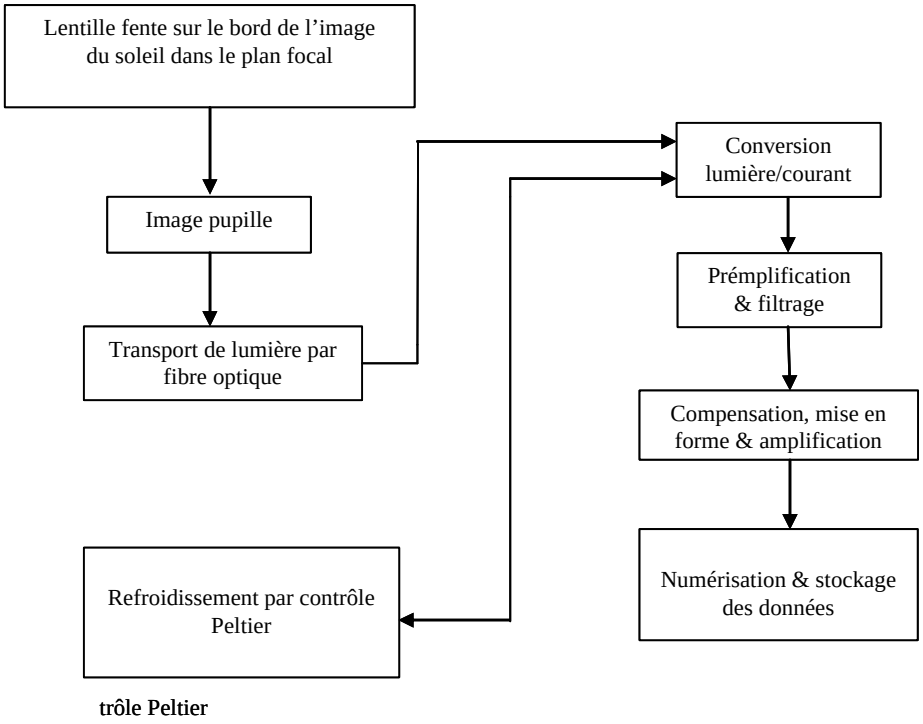


Fig. 19 Organigramme de la chaîne d'acquisition de la voie *plan pupille*

Collecte du flux lumineux dans l'image : Les principaux paramètres qui concernent l'image et le flux lumineux sont donnés dans le tableau II. La lumière collectée de l'image est véhiculée au moyen de fibres optiques jusqu'aux cinq photodiodes. Le diamètre des fibres de mesure sera pris égal à 0.5r0, r0, r0 et 2r0 où r0 est le paramètre de Fried (la cinquième voie servant à la mesure du flux global dans la pupille). Compte tenu de la valeur moyenne de r0 pour le site de Calern, ils correspondent respectivement à 0.5, 1 et 2 mm. Les fibres optiques sont des fibres à saut d'indice et en matière plastique pour leur disponibilité et leur facilité de maniement. Leur longueur n'excède pas 30 cm pour ne pas engendrer de pertes du flux de lumière. L'angle d'ouverture des fibres optiques choisies sera de 0.5 pour couvrir un angle de collecte de lumière assez important car la connexion fibre/image est complexe à réaliser et onéreuse. La connexion fibre optique/photodiodes est réalisée avec des bagues en alliage de cuivre et des connecteurs type SMA pour d'une part éviter toute perte de lumière entre la fibre optique et la surface sensible de la photodiode, et d'autre part faciliter le montage et le démontage entre la partie optique et la partie électronique.
Pour les besoins expérimentaux, une seule longueur d'onde est mesurée à la fois. Plusieurs filtres spectraux à bande étroite atténuant jusqu'à 80% du flux lumineux et centrés sur les longueurs d'onde 537.5, 635 et 782 nm seront sélectionnés grâce à une roue à filtre.

Image de la pupille	1 cm
Flux incident sur la lentille fente	12.5 mW
Dimensions de la fente	250 µm x 5 mm
Flux à la sortie de la fente	1 µW
Puissance reçue par la fibre optique	10 nW

Tableau **II**

Convertisseurs lumière / courant : Le flux de lumière véhiculé par la fibre optique sera détecté au moyen d'une photodiode qui transformera le signal reçu en signal électrique. La photodiode choisie est de type Hamamatsu S2592-03 en boîtier TO-8, de très bonne sensibilité et ayant une surface active de 2.4 x 2.4 mm qui est suffisante pour recevoir tout le flux incident de la fibre optique de 2 mm de diamètre. Elles sont faites en silicium (*Si*) et équipées de thermistance et TEC leur assurant une stabilité de fonctionnement à température fixe. Les principales caractéristiques des photodiodes sont résumées dans le tableau III.

Surface sensible	2.4 x 2.4 mm
Bande spectrale	190 – 1100 nm
Température de service	- 40 à + 70 °C
Photosensibilité	0.3 - 0.5 A/W
NEP	8.1 fW/Hz½
Refroidissement	? T = 35°C

Tableau **III**

Régulation de température par effet Peltier : Les photodiodes étant par nature des composants électroniques très sensibles au bruit, il est nécessaire d'optimiser le rapport signal à bruit (S/B) pour obtenir des mesures fiables, ceci étant d'autant plus vrai que le signal délivré sera de très faible amplitude. Pour ce faire, un régulateur de température à effet Peltier sera utilisé. Un contrôleur Peltier à boucle proportionnelle intégrale de contrôle de température opère directement avec la thermistance de la photodiode.
Le refroidissement Peltier des photodiodes ainsi que le contrôle de température sera pris en charge par un circuit WTC-3243 de *Wavelength*, ayant une précision de réglage inférieure à 0.01° C et un courant maximal de 2.2 A. Ce courant est suffisant pour commander les 3 modules Peltier des trois photodiodes à une température qui sera fixée entre 0° et -10° C. Elle sera définie en fonction des divers bruits qui seront occasionnés dans les circuits des photodiodes. Le tableau IV résume les principales caractéristiques du régulateur à effet Peltier choisi.

Stabilité maximale	0.01 °C
Courant de sortie	2.2 A (*****)
Température de fonctionnement	= -10°C pour S/B correct

(*****) suffisant pour commander les 3 TEC des 3 photodiodes.

Tableau **IV**

Pré amplification : L'efficacité quantique d'une photodiode est de l'ordre de 50%. Compte tenu du flux de lumière incident de l'ordre de 10 nW, le signal issu des photodiodes doit être pré amplifié pour ne pas être totalement noyé dans le bruit. Le préamplificateur sera construit sur la base d'un amplificateur opérationnel AD549K monté en inverseur. Ses caractéristiques sont données dans le tableau V.

Courant d'offset	= 1 pA
Tension d'offset	= 0.25 mV
Bande passante du signal de sortie	2 à 5 KHz (*****)

(*) Résistance et capacité de feedback déterminés par le niveau du signal de sortie

Tableau **V**

Compensation de la composante continue et amplification : La tension continue du signal issu du préamplificateur dépend de la position du bord solaire sur la fente. Il est donc prévu de compenser cette composante continue jusqu'au niveau zéro. Pour ce faire, on utilisera un additionneur (soustracteur) basé autour de l'amplificateur opérationnel AD708, de très grande précision ayant un bruit maximal de 0.3 µV. L'amplification finale est faite quant à elle, dans le but de mettre le signal au niveau souhaitable avec l'entrée de la carte d'acquisition analogique/numérique.

Acquisition des données sur PC : Une fois filtrés, traités et amplifiés, les trois signaux issus des trois photodiodes attaqueront les entrées d'une carte d'acquisition analogique pour être convertis en signaux numériques à la fréquence de 1 kHz. Les données numérisées seront sauvegardées en temps réel et éventuellement traitées pour ne conserver que les paramètres souhaités.
La carte de numérisation choisi est de type *National Instruments* PCI-6013 qui dispose de 16 entrées analogiques à 200 kS/s, d'une résolution de 16 bits, de 8 entrées-sorties numériques et 2 *timers* 24 bits. Les 8 entrées-sorties digitales sont utiles pour éventuellement commander le contrôleur Peltier. Les principales caractéristiques de la carte sont résumées dans le tableau VI.

Couplage	continu
Entrée	100mV, 1V, 10V, 20V
Impédance d'entrée	100GO avec 100pF
Mémoire FIFO	512 mots
Transfert	continu DMA

Tableau VI

VII- PROCEDURES POUR L'ESTIMATION DES PARAMETRES

Les données disponibles à l'issue d'une acquisition des deux voies sur 2 minutes de temps d'intégration sont les contours des images du soleil qui proviennent de la voie *plan image* et les valeurs de flux obtenues à partir des observations dans la voie *plan pupille*. Les paramètres de la turbulence sont déduits de l'enregistrement de ces données suivant des procédures élaborées lors de divers travaux scientifiques et simulations numériques (Seghouani *et al.* 2000 ; Lamraoui 2001).

VII-1 ESTIMATION DES PARAMETRES A PARTIR DE LA VOIE *PLAN IMAGE*

VII-1.1 Estimation des paramètres spatio-angulaires

Les données de la voie *plan image* sont utilisées pour extraire les paramètres spatio-angulaires caractérisant la turbulence et les fronts d'onde perturbés à savoir le paramètre de Fied r_0, l'échelle externe de cohérence spatiale du front d'onde L_0, le domaine d'isoplanétisme q_0 et le profil de turbulence $C_n^2(h)$ (voir sections II et III). Plusieurs méthodes d'estimation de ces paramètres ont été développées (voir section III-1 et III-2) et font encore l'objet d'études. Les paramètres spatio-angulaires sont déduits des fluctuations observées perpendiculairement au contour de l'image du soleil. Ces fluctuations qui dépendent de la direction angulaire q sur le

ciel que définit chaque point du bord du soleil, correspondent aux angles d'arrivée intégrés sur la pupille du télescope. La covariance transverse de ces fluctuations d'angles d'arrivée s'exprime dans le cas du modèle à une couche (voir section III) par l'équation :

$$C_a(q) = 0.0716\, l^2 r_0^{-\frac{5}{3}} \int_0^{+\infty} df\ f^3 \left(f^2 + \frac{1}{L_0^{\,2}}\right)^{-\frac{11}{6}} \left[J_0(2pfq\ h) + J_2(2pfq\ h)\right] \left[\frac{2J_1(pDf)}{pDf}\right]^2$$

où D est le diamètre du télescope, h la hauteur de la couche équivalente du modèle et λ la longueur d'onde.

Cette expression montre que la covariance dépend des paramètres qui font l'objet de la mesure, soit $C_a(q) = C_a(q, r_0, L_0, h)$. Cette propriété est ainsi utilisée pour leur estimation en ajustant à la covariance expérimentale mesurée, le modèle de covariance théorique adapté. On trouve un exemple d'application directe de cette méthode dans Seghouani *et al.* (2000).

Une des méthodes basée sur cette propriété qui sera implémentée dans MISOLFA, est celle qui utilise des abaques pour ajuster la covariance théorique aux observations. Cette méthode, qui permet de travailler sur des données intégrées, se révèle plus robuste que celle pour laquelle on utilise directement la covariance. Celle-ci est intégrée sur deux domaines angulaires q_1 et q_2 :

$$I_a(q_i) = \int_0^{q_i} dq\ C_a(q)$$

$$= 0.0716\, l^2 r_0^{-\frac{5}{3}} \int_0^{+\infty} df\ f^3 \left(f^2 + \frac{1}{L_0^{\,2}}\right)^{-\frac{11}{6}} \left[\frac{2J_1(pDf)}{pDf}\right]^2 \int_0^{q_i} \left[J_0(2pfq\ h) + J_2(2pfq\ h)\right] dq\ ;\ i = 1,2$$

Le rapport $R_h = \dfrac{I_a(q_2)}{I_a(q_1)}$ est alors calculé. R_h qui ne dépend que de L_0 et h, définit la relation qui lie les deux variables (fig. 20-a). Les observations permettent d'obtenir une valeur du rapport R_h (exemple : trait horizontal sur la fig. 20-a). Les différentes intersections avec les courbes de l'abaque donnent un ensemble de couples potentiels (L_0, h) susceptibles de répondre à la solution. A chacun de ces couples est associé une valeur du paramètre r_0 qu'il faut déterminer. Pour cela, $I_a(q_1)$ est calculé pour chaque couple potentiel (L_0 , h) qui n'est fonction que de r_0 :

$$I_a(q_1) = \int_0^{q_1} dq\ C_a(q) = f(r_0) \quad \text{pour } (L_0, h) \text{ donné}$$

Pour une valeur donnée de l'intégration angulaire de la covariance sur l'intervalle q_1, il existe un ensemble de nouvelles courbes $I_a(q_1)$ en fonction du paramètre r_0 correspondant à tous les couples potentiels (L_0, h) (fig. 20-b). Comme précédemment, les observations fournissent une valeur expérimentale de $I_a(q_1)$ et l'intersection avec les différentes courbes de l'abaque donne la valeur de r_0 associée au couple (L_0 , h) (trait continu sur la fig. 20-b). Un ensemble de triplets possibles (L_0, h, r_0) susceptibles de correspondre à la solution du problème est alors disponible : le triplet définissant le modèle à une couche qui ajuste le mieux la covariance ou la fonction de structure expérimentale est la solution recherchée.

Une autre méthode d'estimation des paramètres spatio-angulaires sera également utilisée pour MISOLFA. C'est une méthode différentielle qui permet de s'affranchir des vibrations éventuelles de l'instrument qui faussent la mesure des paramètres (Lamraoui 2001). Elle est basée sur le calcul de la variance intégrée des fluctuations des angles d'arrivée qui s'exprime dans le cas du modèle à une couche par :

$$s^2_{q_i} = \frac{1}{q_i} \int_{-\infty}^{+\infty} dq\ \Lambda\left(\frac{q}{q_i}\right) C_a(q)$$

où q_i est le domaine angulaire sur lequel la variance est intégrée et $\Lambda(\frac{q}{q_i})$ la fonction triangle centrée à l'origine de largeur $2q_i$.

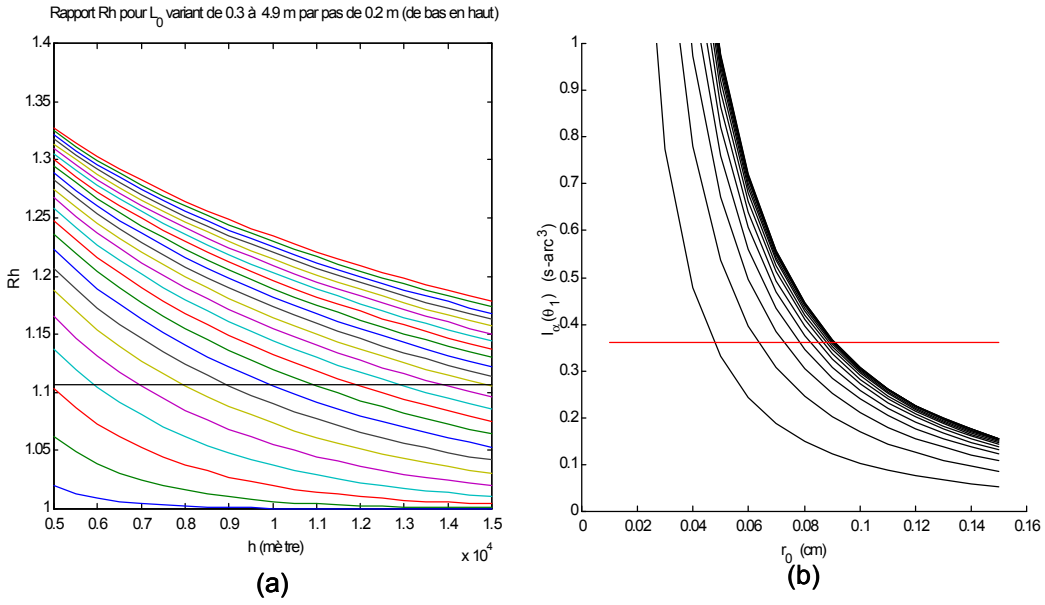


Fig. 20 (a) : Abaque donnant R_h en fonction de h et L_0.
(b) : Courbes $I_a(q_1)$ pour chaque couple (L_0, h) en fonction de r_0. De bas en haut, les courbes correspondent aux couples de la figure (a) pris de gauche à droite (*h* croissant).

La méthode d'estimation des paramètres consiste à calculer la variance intégrée sur trois domaines angulaires q_1, q_2 et q_3 puis à effectuer le rapport $R_h = \frac{s^2_{q_1} - s^2_{q_2}}{s^2_{q_1} - s^2_{q_3}}$ qui ne dépend également que de L_0 et *h*. Les simulations montrent un comportement différent du rapport R_h en fonction des domaines d'intégration angulaires q_i dont le choix approprié permet d'estimer les paramètres spatio-angulaires. En effet, s'ils sont de l'ordre de quelques secondes d'arc, R_h est indépendant de L_0 mais varie avec *h*, ce qui permet d'estimer ce paramètre. R_h varie par contre notablement si les domaines d'intégration q_i sont de l'ordre de plusieurs dizaines de secondes d'arc. La connaissance de *h* permet alors de déduire la valeur de L_0. Le paramètre r_0 est enfin déterminé à partir de la différence $s^2_{q_1} - s^2_{q_2}$ et des valeurs précédemment estimées de L_0 et *h*.

VII-1.2 Estimation des profils de turbulence

La fonction de structure déduite de la covariance des fluctuations d'angles d'arrivée intégrés sur la pupille s'écrit en considérant le modèle d'atmosphère multicouche (voir section III) (Bouzid *et al.* 2000) :

$$D_a(q) = 2[C_a(0) - C_a(q)] = 2.4\int_0^{+\infty} dh\, C_n^2(h)\, K(q,h,D,L_0)$$

où $K(q,h,D,L_0) = \int_0^{+\infty} df\ f^3 (f^2 + \frac{1}{L_0(h)^2})^{-\frac{11}{6}} [1 - J_0(2pfq\ h) - J_2(2pfq\ h)] \left[\frac{2J_1(pDf)}{pDf}\right]^2$

Le profil de turbulence $C_n^2(h)$ est estimé en inversant au moyen d'algorithmes adéquats, cette équation intégrale exprimant la fonction de structure.
En considérant qu'au voisinage du chemin optique, l'atmosphère est constituée de *N* couches turbulentes (modèle multicouche), l'équation intégrale ci-dessus peut être écrite sous la forme matricielle $d = K.C$ où $d = (d_1, d_2, ..., d_M)^T$, $C = (C_{n1}^2, C_{n2}^2, ..., C_{nN}^2)^T$ et *K* une matrice de dimension *M* x *N* dont les éléments sont calculés à partir de $K(q, h, D, L_0)$. La matrice *K* lie donc linéairement le profil de turbulence atmosphérique *C* à la fonction de structure *d*. La figure 21 représente les éléments de la matrice *K* et ses valeurs singulières qui montrent le mauvais conditionnement de la matrice.
Pour estimer le profil de turbulence atmosphérique à partir de la fonction de structure observée d_{obs}, le système $d = K.C$ est inversé en utilisant l'algorithme de *Levenberg – Marquardt*. L'algorithme fonctionne correctement lorsque le premier estimé C_0 qui l'initialise, n'est pas trop éloigné de la solution. C_0 est donc tout d'abord calculé en résolvant le système au sens des moindres carrés. Comme la matrice *K* est mal conditionnée, la fonctionnelle $L = \| d_{ob} - K.C \|^2 + g \| C \|^2$ est minimisée, ce qui donne le premier estimé :

$$C_0 = (K^T.K + g.I)^{-1}.K^T.d_{obs}$$

Le paramètre *g* est utilisé pour stabiliser la solution. Une valeur appropriée de *g* permet de déterminer les traits essentiels de la solution. C_0 initialise ensuite le processus itératif défini par l'algorithme de *Levenberg – Marquardt* basé sur la minimisation de la fonctionnelle :

$$\Phi = \| dd - K.dC \|^2 + n^2 \| dC \|^2$$

où *n* est le paramètre de *Marquardt*, $dd = d - d_0$ et $dC = C - C_0$.
Finalement, le processus itératif pour estimer la solution s'écrit :

$$C_{k+1} = C_k + (K^T.K + n^2.I)^{-1}.K^T.(d_{obs} - K.C_k)$$

Le paramètre *n* permet d'estomper les instabilités numériques dues aux erreurs de troncatures dans le calcul de la matrice *K* ainsi que l'effet du bruit présent dans les données.
C'est cette méthode qui sera implémentée dans MISOLFA pour estimer les profils de turbulence à partir de la voie *plan image*. Des résultats très significatifs ont été présentés dans Bouzid *et al.* (2000).

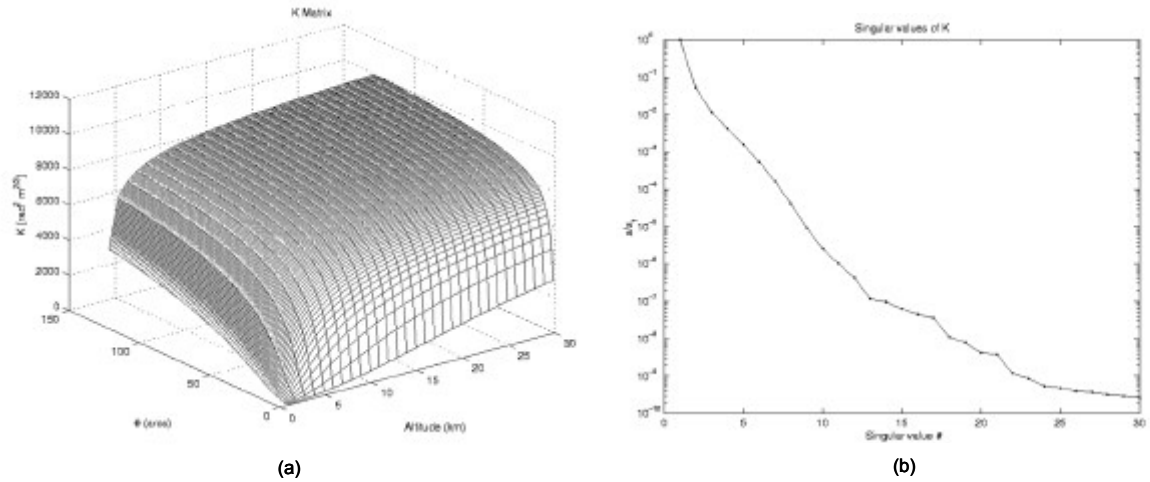


Fig. 21 : (a) Eléments de la matrice *K* - (b) Valeurs singulières de *K* montrant son mauvais conditionnement. Les valeurs singulières faibles sont entachées d'erreurs de troncature qui amplifient le bruit présent dans les données.

VII-1.3 Traitement des données acquises

L'application des méthodes d'estimation des paramètres spatio-angulaires et des profils de turbulence nécessite de disposer de la covariance ou la fonction de structure expérimentale des angles d'arrivée intégrés. Elle est obtenue des séries de contours d'images enregistrées sur des échantillons temporels de 2 minutes. Certains traitements sur les données seront effectués dans MISOLFA à cet effet.

Extraction des fluctuations : les fluctuations d'angles d'arrivée sont portées par la courbure du contour défini sur 128 secondes d'arc qu'il est nécessaire de corriger. Deux méthodes existent et seront implémenter dans le logiciel de traitement pour utiliser en conséquence la mieux adapter. La première consiste à calculer le contour moyen sur l'échantillon temporel qui est retranché de chaque contour individuel. Cela suppose que les fluctuations sont à moyenne nulle sur les deux minutes de temps d'intégration. Dans la seconde méthode, les fluctuations sont les résidus déduits de l'ajustement paraboliques effectués sur chaque contour. Cependant, quelque soit la méthode utilisée, un bruit inévitable se superpose à la mesure des fluctuations d'angles d'arrivée.

Covariance des fluctuations : La covariance est estimée en calculant la densité spectrale des fluctuations d'angle d'arrivée précédemment estimées puis en prenant sa transformée de Fourier inverse. Pour augmenter le nombre d'échantillons utilisés dans le calcul de la densité spectrale moyenne et réduire en conséquence le bruit statistique, chaque fichier de fluctuations obtenu d'un contour est découpé en 2 voire en 4 parties. Cette opération n'est possible que si la covariance angulaire présente une brusque décroissance à l'origine qui doit se faire sur au plus quelques secondes d'arc.

Réduction du bruit : le bruit résiduel dû à la mesure et aux diverses procédures pour extraire les fluctuations d'angle d'arrivée se manifeste dans la covariance par un pic à l'origine. Pour estimer l'importance de ce pic de bruit, la méthode précédemment utilisée par irbah *et al.* (*Astronon. Astrophys.* 1993) sera éventuellement utilisée. Pour cela, toute l'énergie au delà de la fréquence de coupure de l'optique dans le spectre est supposée due au bruit. Son niveau correspondant au pic à l'origine sera estimé en prenant un niveau de bruit constant dans le spectre puis en effectuant sa transformée de Fourier pour calculer la covariance.

VII-2 ESTIMATION DES PARAMETRES A PARTIR DE LA VOIE *PLAN PUPILLE*

Les données de la voie *plan pupille* correspondent à des mesures temporelles de fluctuations d'intensité de l'image de la pupille intégrées sur des zones angulaire différentes sur le ciel (voir section IV). Ces données sont utilisées en premier lieu, pour l'estimation du temps caractéristique du front d'onde perturbé qui est de l'ordre de quelques millisecondes justifiant l'échantillonnage à 1 KHz. Quatre canaux d'enregistrement qui correspondent aux photodiodes de surfaces d'intégration spatiale différentes, fournissent des données de flux sur un échantillon temporel de deux minutes. Une cinquième photodiode donne le flux intégré sur toute la pupille. Pour l'estimation du temps caractéristique, Les vibrations du télescope contribuent à ajouter des variations supplémentaires aux fluctuations réelles dues à la turbulence. Il est donc nécessaire d'effectuer des mesures différentielles afin de réduire la composante due aux vibrations. La différence des intensités issues de deux photodiodes est une série temporelle qui est proportionnelle aux angles d'arrivée différentiels affectés néanmoins par différents filtrages (diffraction, filtrage angulaire, anisoplanétisme et scintillation différentielle) que des simulations permettront de modéliser (voir section IV-1). Il demeure que la fonction de

structure temporelle calculée avec cette série est proportionnelle à celle des fluctuations d'angles d'arrivée différentiels. Pour obtenir le temps de cohérence de cette quantité il suffit alors de calculer le temps de montée de la fonction de structure par rapport au palier de saturation suivant un critère que l'on se donne (fig. 22). Le temps de cohérence ainsi obtenu est ensuite à mettre en relation avec les temps caractéristiques liés aux autres quantités de la turbulence optique (fluctuations de phase, évolution temporelle des tavelures).
Des considérations analogues à celle présentées dans la sous-section VII-1.3 sont également valables pour réduire le bruit dans le calcul de la covariance temporelle.
Le choix de l'utilisation de plusieurs photodiodes de surface différente a également pour objectif d'extraire les paramètres spatiaux de la voie *plan pupille* (r_0, L_0). Ces paramètres peuvent être obtenus en utilisant une méthode différentielle analogue sur le principe à celle présentée dans la sous-section VII-1.1. Elle s'appuie sur une expression théorique de la variance qui est fonction de r_0 et L_0. Le choix judicieux d'un rapport de combinaison des variances des angles d'arrivée calculées sur des surfaces angulaires différentes s'exprime uniquement en fonction de L_0 permettant ainsi d'estimer ce paramètre puis d'en déduire r_0.

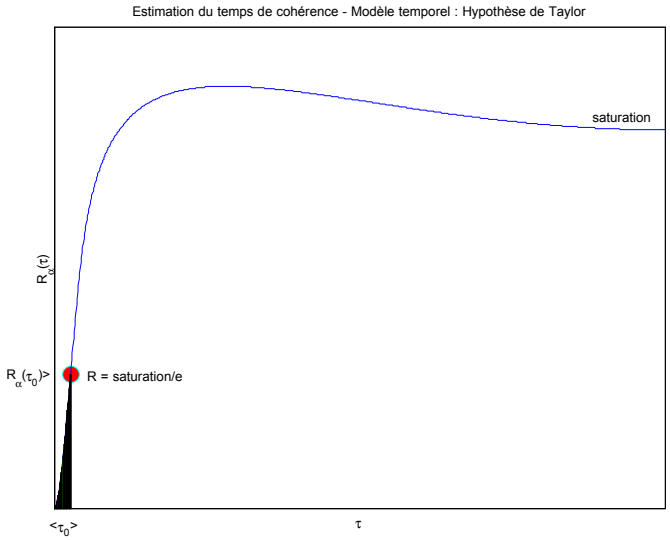


Fig. 22 Définition du temps caractéristique sur une fonction de structure temporelle des angles d'arrivée

VIII- CONCLUSION

Connaître les conditions d'observation lors des mesures au sol du diamètre solaire est essentiel pour comprendre les effets de l'atmosphère qui sont susceptibles d'entacher les données. Elles permettent également de modéliser la réponse de l'atmosphère qui est utile si l'on veut raccorder les mesures qui seront faites au sol à celles qui le seront depuis l'espace avec SODISM I. Le moniteur de qualité d'images solaires MISOLFA est ainsi développé dans ce sens. Il fonctionnera conjointement à la mission PICARD et à l'expérimentation solaire de l'observatoire de Calern (OCA) où il sera installé. Il mesurera de façon continue les conditions d'observation lors des mesures. MISOLFA fournira une estimation de tous les paramètres temporels et spatio-angulaires qui caractérisent le front d'onde dégradé par la turbulence et également les profils de turbulence.
MISOLFA est basé sur la mise en évidence des fluctuations d'angles d'arrivée qui permettent l'estimation de tous les paramètres désirés. Deux voies d'analyse compose le moniteur, une

voie dite *plan image* et l'autre dite *plan pupille*. La voie *plan image* forme sur une caméra CCD placée dans le plan focal du télescope de MISOLFA, une image composée des 2 bords diamétralement opposés afin de disposer des conditions de turbulence sur les points qui font la mesure du diamètre. Cette image est acquise en continu à raison de 40 images par seconde sur des temps d'intégration de 2 minutes avec une période de 4 minutes. Ces acquisitions permettent d'estimer les paramètres spatio-angulaires de la turbulence et les profils de turbulence suivant des procédures définies à l'aide de simulations numériques. La voie *plan pupille* consiste à mettre en évidence les fluctuations d'angles d'arrivée en les transformant en variations d'intensité dans l'image de la pupille. Cette transformation est faite en formant l'image de la pupille à travers un diaphragme positionné dans le plan focal sur le bord de l'image du soleil. Trois photodiodes de surface différente placées sur l'image de la pupille acquièrent les fluctuations d'intensité à la cadence de 1 KHz. Le signal temporel permet alors une estimation du temps caractéristique d'évolution du front d'onde. L'utilisation de photodiodes de surface différente devrait également permettre une estimation des paramètres spatiaux de la turbulence. Toutes ces considérations ont mené à la conception de MISOLFA suivant les développements techniques qui sont présentés dans ce rapport.

Annexe I

La figure A1 montre les faisceaux optiques qui traversent l'instrument MISOLFA et qui forment les images dans les voies *plan image* et *plan pupille*. La figure A2 donne la cotation des divers éléments qui constituent le moniteur.

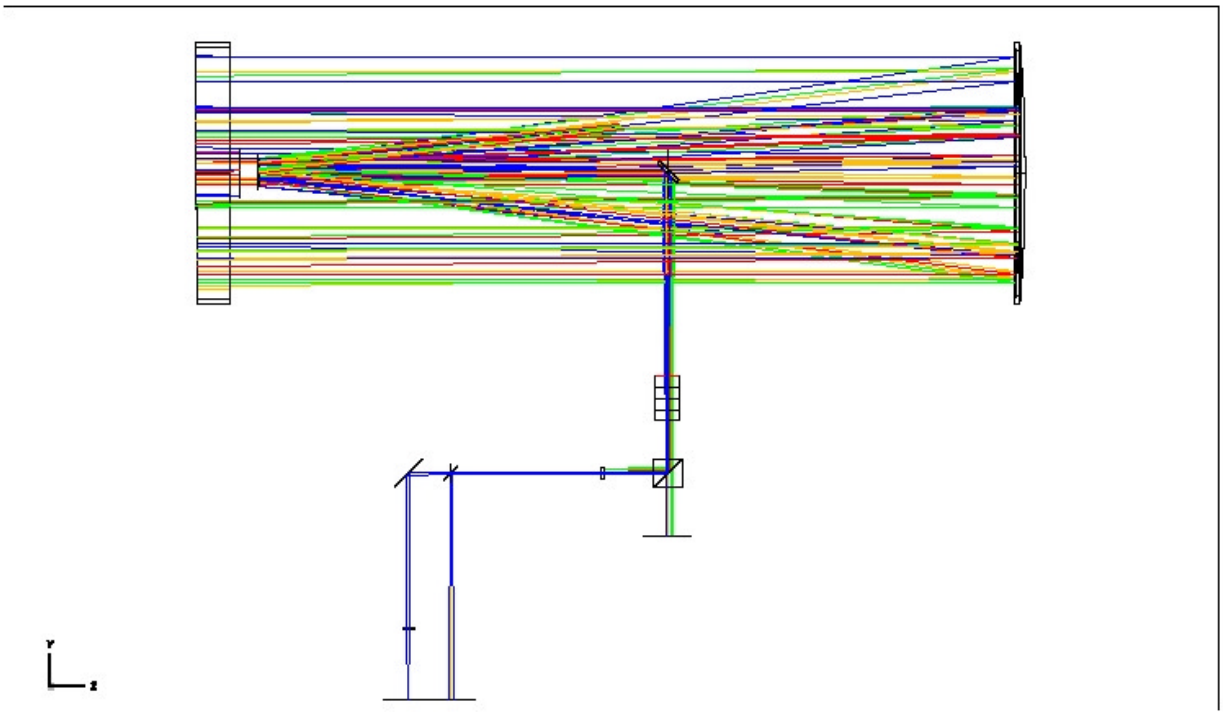


Fig. A1 Faisceaux formant les images dans les voies d'analyse de MISOLFA

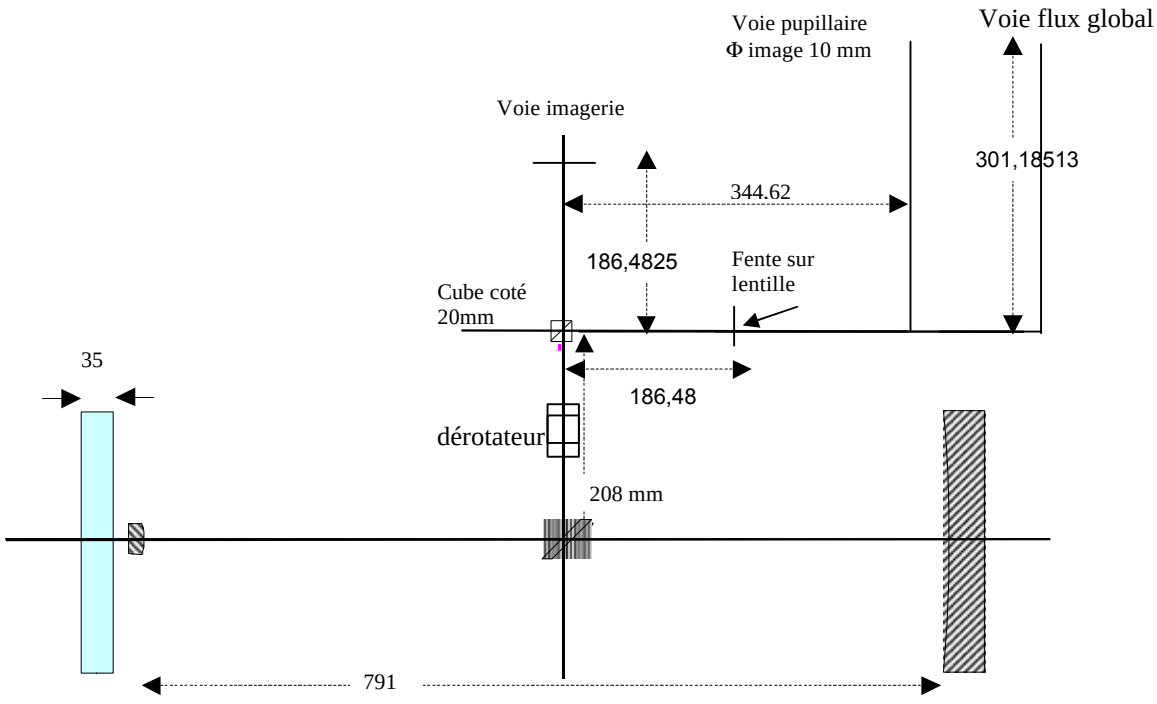


Fig. A2 Cotations des divers éléments constituant MISOLFA

Annexe II

DETECTION DU POINT D'INFLEXION EN PRESENCE DE BRUIT

La présence du bruit dans les images contribue à une mauvaise définition du passage par 0 de la dérivée seconde du limbe. La figure A3 montre un exemple type de limbe issu de la l'expérience *SDS* et sa dérivée seconde calculée de façon brutale. Elle montre qu'un filtrage est nécessaire pour s'affranchir du bruit et détecter correctement la position du point d'inflexion.

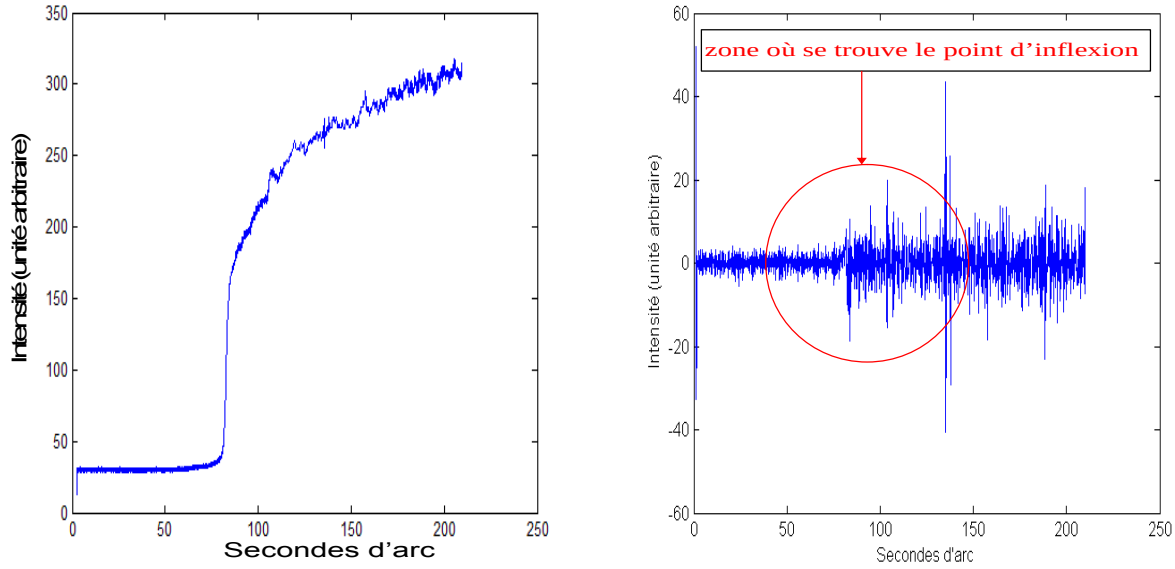


Fig. A3 Limbe et sa dérivée seconde montrant une mauvaise définition du passage par 0

La méthode de filtrage adoptée consiste à effectuer une décomposition en ondelette du limbe sur un seul niveau en utilisant pour cela l'algorithme *à trou*, puis à traiter le détail obtenu (irbah *et al*. 1999) (fig. A4). Le bruit étant par essence haute fréquence, sa signature apparaît donc

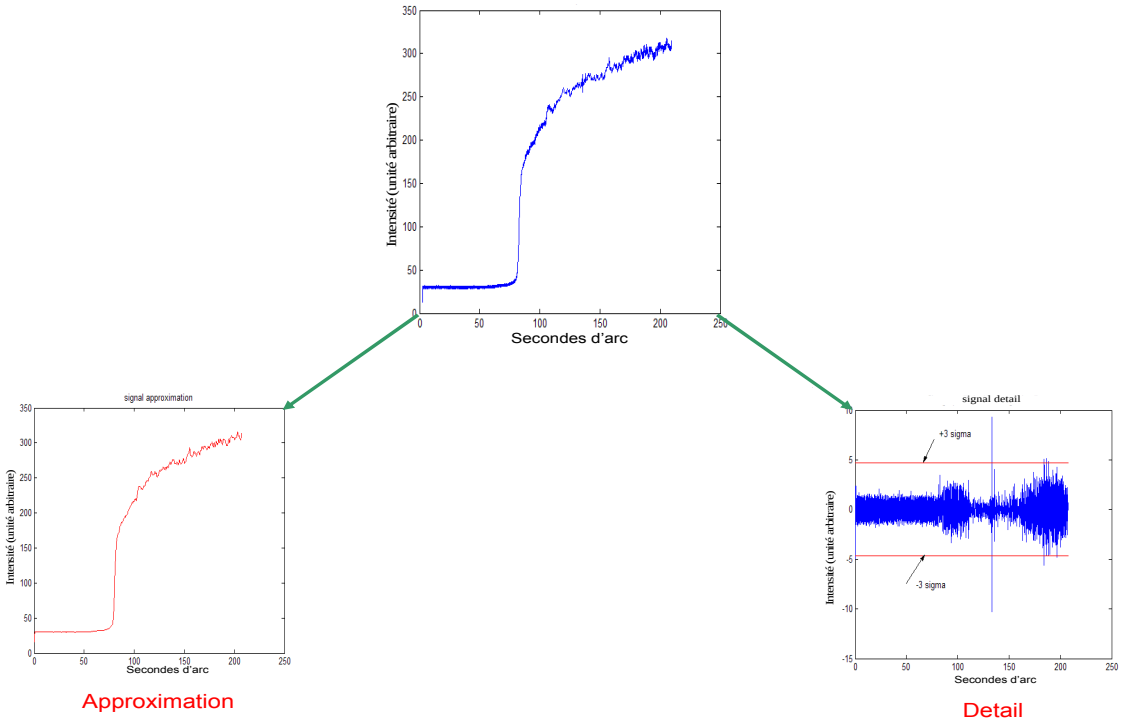


Fig. A4 Décomposition en ondelette du limbe pour des opérations de filtrage

majoritairement dans le premier détail de la décomposition. L'intensité du bruit dans le signal est alors réduite en imposant un seuil limite aux coefficients en ondelette du détail. Le limbe est ensuite recomposé à partir de l'approximation de la décomposition et du détail traité. Plusieurs itérations décomposition-recomposition sont effectuées si nécessaire. Pour affiner le filtrage, le même traitement est répété en adoptant un seuil gaussien centré sur une position grossière du limbe. Ce type de seuil à l'avantage de nettoyer plus sévèrement le signal du bruit en dehors de la zone où se trouve le point d'inflexion. Cette procédure permet de filtrer efficacement le limbe sans toucher à sa pente qui aurait pour effet de déplacer la position du point d'inflexion et modifier la forme du contour en conséquence. La figure A5 montre l'application et l'efficacité de cette méthode de traitement appliquée au limbe de la figure A3. Elle sera utilisée pour filtrer les images réelles du soleil qui seront acquises.

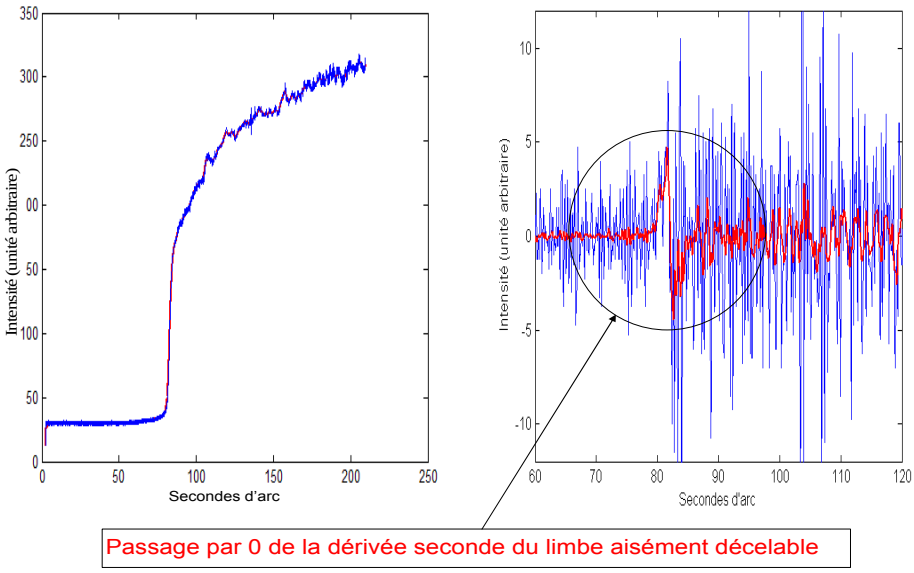


Fig. A5 Filtrage du limbe en utilisant la transformée en ondelette

Annexe III

PICARD/SODISM
DONNEES AUXILLIAIRES ET CRITERES DE RECHERCHE SUR LES IMAGES
(rouge : critères de recherche , en bleu les parties spécifiques espace, en vert les parties spécifiques sol)

Nom du fichier,
Niveau de fichier (1A),

INSTRUMENT

- nom "PICARD/SODISM I ", (ou PICARD/SODISM II), (ou MISolFA)
- les filtres sélectionnés,
- la durée de pose,
- températures (CCD, miroirs, tube carbone-carbone ?, Tension CCD ?, *Filtres*),
- *indicateur de correction sur le primaire*
- *Météo (température, pression, hygrométrie, vent (vitesse et direction))*

TEMPS ET REPERES

- le numéro d'orbite,
- **la date du début de pose** (Heure TU et heure croissante "PICARD", *MJD*),
- indicateur données orbite prévues ou réelles,
- distance instrument Soleil,
- coordonnées géocentriques du satellite (début de pose),
- *coordonnées de la station*,
- cosinus directeurs de l'axe de visée satellite Soleil,
- *azimut et distance zénithale du Soleil*,
- *ascension droite et déclinaison du Soleil*,
- barycentre de l'éclairement (X, Y en pixels),
- **indicateur d'absorption** (zone aurorale, anomalie AS, entrée dans l'ombre, …), *quel équivalent pour le sol ??*

CARACTERISTIQUES DE L'IMAGE

- **la longueur d'onde**,
- **type d'image** (limbe étroit, limbe large, image pleine solaire, image FF, courant d'obscurité),
- Le centre (X,Y) utilisé pour l'occultation dans le cas du limbe,
- le rayon intérieur et la largeur du limbe,
- le taux de compression dans le cas de la compression destructive (Langevin),

PIXELS

- référence de la matrice du courant d'obscurité utilisé,
- référence de la matrice du Flat-Field utilisé,
- facteur d'échelle relatif,
- nom du fichier brut d'origine,
- nom du fichier utilisé pour la cartographie des pixels,

CALCULS

max, min, moyenne, écart-type.