

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE AL HADJ LAKHDAR BATNA
FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MATIERE**

Mémoire

**Présente Pour L'obtention Du Diplôme De
Magister**

Option : Astrophysique

Présenté Par

BENNOUI Fatiha

Titre

**L'ESTIMATION DES PARAMETRES DE LA
TURBULENCE ATMOSPHERIQUE
« L'EXPERIENCE MISOLFA »**

Mémoire dirigée par Toufik Alhak. Abdelatif

Soutenue le 11 janvier 2012 devant le jury composé de :

Pr .Abdelhamid. Bouldjedri	université de Batna	président
Dr. Toufik Alhak. Abdelatif	observatoire d'Alger	directeur de thèse
Pr. Jamal. Mimouni	université de Constantine	examineur
Pr. Darradji .Bahloul	université de Batna	examineur

à 10h00 à la Faculté des Sciences de l'Université de BATNA.

Remerciements

Je remercie avant tout les membres de ma famille : mon père et ma mère, mes frères et mes sœurs..., jamais je n'aurais pu réaliser cette recherche sans leur patience et énorme soutien moral pendant les moments difficiles pour moi...

Je tiens beaucoup à exprimer ma profonde gratitude au Dr. T. Abdelatif, mon directeur de thèse, pour la confiance qu'il m'a accordé et pour son soutien.

Je tiens aussi à remercier énormément Messieurs les membres du jury Prof. A. Bouldjedri, Prof. J. Mimouni, Prof. D. Bahloul, d'avoir bien voulu s'intéresser à mon travail et d'avoir accepté de le juger.

Je remercie également tous les membres de l'école doctorale d'astrophysique : enseignants, étudiants, plus particulièrement les Professeurs J. Mimouni, A. Bouldjedri, et N. Seghouani.

Je tiens beaucoup à remercier tous les membres de l'observatoire de la Côte d'Azur Unité Cassiopée et plus particulièrement les Professeurs. J. Provost, T. Corbard, P. Assus et C. Renaud, pour leur sympathie et leur gentillesse durant mon stage.

Au fond du cœur je remercie toutes les personnes m'ayant aidé de près ou de loin à mener ce travail.

Merci pour vous ...parce que je vous aime tous

Table des matières

Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Acronymes	
Introduction	01

Chapitre 1

Optique atmosphérique

1-1 L'atmosphère turbulente	03
1-2 Propagation dans l'atmosphère	05
1-2-1 Fluctuations de la phase	06
1-2-1-1 Fonctions de structure de phase	07
1-2-1-2 Densités spectrales de phase	08
1-2-1-3 La fonction de cohérence de la phase (la covariance)	09
1-2-2 Fluctuation d'angle d'arrivée (AA)	09
1-2-2-1 Densités spectrales d'AA	10
1-2-2-2 Fonctions de structure d'AA	11
1-2-2-3 La fonction de cohérence d'AA (la covariance)	12
1-2-3 Caractérisation de front d'onde	12
1-2-4 Les effets de la turbulence	16
1-2-4-1 La scintillation	16
1-2-4-2 L'agitation	17
1-2-4-3 L'étalement	18
1-3 Conclusion	19

Chapitre 2

Simulations de la turbulence atmosphérique

2-1 L'effet instrument (réponse du système optique de télescope)	20
2-2 L'effet de la turbulence atmosphérique	23
2-3 Conclusion	28

Chapitre 3

La réponse impulsionnelle (atmosphère-instrument)

3-1 Relation objet- image	29
---------------------------	----

3-2 Fonction de transfert	29
3-3 Corrélation temporelle des speckles	29
3-3-1 Images courtes pose	29
3-3-2 Images en pose longue	31
3-4 La résolution angulaire	34
3-5 Anisoplanétisme et isoplanétisme	35
3-6 Conclusion	36

Chapitre 4

Simulation du bord solaire

4-1 L'assombrissement centre-bord	37
4-2 Les modèles d'assombrissement centre-bord	38
4- 3 L'imagerie numérique	40
4-4 Images du bord solaire	40
4-5 Conclusion	49

Chapitre 5

Estimations des paramètres de la turbulence

5-1 L'estimation des paramètres par la variance d'AA	52
5-1-1 La variance théorique	52
5-1-2 La variance expérimentale	53
5-2 Estimations des paramètres par la covariance	59
5-2-1 La covariance théorique	59
5-2-2 La covariance expérimentale	61
5-2-3 Ajustement non linéaire théorie-observation	66
5.3 L'expérience MISOLFA	68
5-4 Conclusion	69

Conclusion générale et perspectives

Bibliographie

Annexe

Résumé

Liste des figures

- 1.1 L'échelle externe et interne dans la turbulence atmosphérique.
- 1.2 Modèle d'une couche turbulente
- 1.3 L'angle d'arrivée du front d'onde arrivant au sol
- 1.4 Exemple de profils mesurés par le SCIDAR (Hawaii)
- 1.5 L'angle isoplanétique
- 1.6 Les paramètres de la turbulence atmosphérique
- 1.7 Image courte et longue pose
- 2.1 Une pupille de télescope
- 2.2 La réponse d'un télescope (tache d'Airy), une coupe de la réponse d'un télescope
- 2.3 Ecran de phase de taille (512x512) à gauche 2D à droite 3D pour les différentes valeurs de r_0, h, dx, L_0
- 2.4 L'influence des paramètres r_0, L_0 sur l'écran de phase
- 3.1 Simulation des images courte pose pour différents valeurs de r_0, L_0
- 3.2 Simulation des images longue pose la résolution angulaire
- 3.3 PSF pupille atmosphère
- 4.1 Schéma montrant l'assombrissement centre bord
- 4.2 La relation entre λ (nm) et la valeur du paramètre d'Hestroffer- Magnan
- 4.3 L'image du bord du Soleil par la fonction d'assombrissement
- 4.4 Coupe transversale dans l'image du bord solaire
- 4.5 La variation du bord solaire avec différents échantillonnage angulaire et différents longueur d'onde.
- 4.6 L'image du bord solaire à cause l'effet instrumental
- 4.7 L'effet de la diffraction sur le bord solaire "effet instrumental"
- 4.8 L'effet de la turbulence optique en courte pose sur le bord solaire
- 4.9 L'effet de la turbulence optique en longue pose sur le bord solaire
- 5.1 Comparaison entre la variance théorique de Von karman et Kolmogrov
- 5.2 La fonction d'assombrissement centre- bord et la dérivée première et secondaire de cette fonction
- 5.3 Le contour du bord du soleil
- 5.4 En bleu le contour du bord solaire perturbé. En noir le contour du bord solaire non perturbé.
- 5.5 Fluctuations d'angle d'arrivée
- 5.6 La variance (arcsec) des fluctuations d'AA en fonction de r_0

- 5.7 La variance (arcsec) des fluctuations d'AA en fonction de r_0
- 5.8 La covariance théorique
- 5.9 Contour du bord solaire non perturbé
- 5.10 Contour du bord solaire perturbé
- 5.11 Contour du bord solaire en absence et en présence de la turbulence
- 5.12 Fluctuations d'angle d'arrivée
- 5.13 La covariance expérimentale pour différents valeurs (r_0, L_0, h)
- 5.14 Comparaison entre la covariance théorique et la covariance

Liste des tableaux

- 2.1 L'influence des paramètres r_0 , L_0 , h sur l'écran de phase
- 4.1 Les valeurs de longueur d'onde et du paramètre d'Hestroffer- Magnan (α)
- 5.1 Comparaison entre la variance théorique de Von karman et Kolmogrov
- 5.2 Les valeurs de r_0 calculée par la variance simulée

Acronymes

AA	Angle d'Arrivée
U.A	Unités. Arbitraires
VK	Von Karman
Kol	Kolmogrov
OA	Optique Adaptative
SCIDAR	Scintillation, Detectation and Ranging
VLTI	Very Large Telescope Interferometer
Exp	Expérimentale
RSB	Rapport Signal à Bruit
RI	Reponse Impulsionnelle
Tél	Télescope
TF	Transformée de Fourier
TFI	Transformée de Fourier Inverse
Atm	Atmosphère

Introduction

Introduction

Il est certain que le ciel est magnifique par ces objets astronomiques : le soleil, la lune, les étoiles, les planètes et les galaxies...etc., mais leur vérité est de plus cachée. L'atmosphère terrestre empêche la révélation de celle-ci. En effet, notre atmosphère empêche presque la totalité du spectre électromagnétique qui vient de l'espace de parvenir au sol, sauf le spectre optique (la lumière visible) et une grande partie du spectre radio. Il est possible donc d'observer l'univers à partir de la terre, en utilisant soit la lumière visible ou les ondes radio (observations au sol) alors que le reste du spectre doit être observé hors atmosphère par les télescopes spatiaux. Même la lumière visible souffre d'un problème lors de son passage à travers l'atmosphère à cause de la turbulence. Cette dernière est associée aux masses d'air différentes en raison des fluctuations de température, ces fluctuations conduisent à une fluctuation de l'indice de réfraction. Celle-ci conduit à la déformation du front d'onde qui vient des astres et donne une image floue et très loin de la réalité. Les scientifiques ont d'abord pensé de mettre les télescopes hors atmosphère afin d'éviter ce problème, mais la durée de vie limitée ainsi le coût élevé empêche le renouvellement de l'expérience du télescope Hubble (premier télescope est au-dessus du niveau de turbulence de près de 600 km). Les scientifiques essaient aujourd'hui de tenter de parvenir à une haute résolution avec des télescopes au sol, de valeur égale ou supérieure à la résolution des télescopes spatiaux. Les recherches ont connu un grand développement sur la propagation des ondes dans les milieux turbulents et aussi sur la formation d'images passant par la turbulence atmosphérique afin de les corriger. Ces derniers temps les recherches sont de plus en plus développées pour tenter de parvenir à une haute résolution angulaire des télescopes au sol.

La résolution angulaire des télescopes moyens est liée à la dimension de la pupille du télescope où plus le diamètre de la pupille augmente la résolution angulaire augmente. Ceci en absence de turbulence, alors que dans le cas de la présence de la turbulence la résolution est limitée et c'est ce qui rend important le choix du site d'observation. Newton a dit en 1704 : « le seul traitement efficace pour réduire la turbulence, c'est l'air le plus calme et la sérénité, comme celui qu'on rencontre dans la cime des hautes montagnes » Mais les limites de la turbulence de l'air peuvent être significatives même dans les cimes des hautes montagnes. Les chercheurs ont commencé à explorer l'idée de compenser la turbulence en utilisant la technologie « optique adaptative » qui repose sur la correction de la distorsion du front d'onde ce qui corrige les

défauts dans les images astronomiques. La caractérisation de la turbulence atmosphérique ou l'estimation des différents paramètres de cohérence des fronts d'onde ($r_0, L_0, \theta_0, \tau_0$), permet d'affiner mieux les systèmes d'optique adaptative, et permet de donner aux scientifiques la haute résolution et la clarté du télescope spatial Hubble, surtout que le diamètre du télescope au sol dépasse de loin le diamètre du télescope spatial.

L'objectif principal de cette étude est de trouver des informations sur les propriétés de la déformation du front d'onde lors de sa propagation dans l'atmosphère et son influence sur la déformation des images, c.à.d. d'obtenir une estimation des différents paramètres de cohérence des fronts d'onde que sera effectuée à partir d'une analyse statistique tel que la variance et la covariance des angles d'arrivée.

Pour débiter nous avons consacré le chapitre I à l'optique atmosphérique qui correspond à tous les concepts et les propriétés dynamiques et optique de la turbulence ainsi que la propagation des ondes lumineuses à travers la turbulence atmosphérique. Ensuite nous définissons les paramètres utilisées pour caractériser les conditions d'observation et les effets de la turbulence atmosphérique sur le front d'onde qui ne sont autres que les fluctuations d'angle d'arrivée.

Dans Le deuxième chapitre nous étudions les effets principaux qui conduisent à la dégradation des images obtenues à l'aide des télescopes au sol tel que l'effet du système optique et l'effet de la turbulence. Ce chapitre est aussi dédié à la simulation de la turbulence atmosphérique. Dans notre étude la variation temporelle de la turbulence atmosphérique est modélisée par l'approximation de la turbulence gelée sous forme de plusieurs écrans de phase. L'écran de phase est à l'origine de la distorsion du front d'onde, cette distorsion s'exprime mathématiquement par la distribution spatiale des fluctuations de la phase dont la transformé de Fourier est appelée densité spectrale des fluctuations de la phase.

Le troisième chapitre, met en évidence la formation des images obtenue à l'aide de télescope au sol et aussi la simulation d'images dégradées par la turbulence atmosphérique en pose longue et en pose courte pour restaurer les hautes résolutions angulaires. Comme les images sont dégradées par des zones de la couche turbulente on parle alors d'isoplanétisme ou anisoplanétisme.

Dans le quatrième chapitre nous étudions les variations du bord solaire à partir d'images simulées avec l'effet de la turbulence atmosphérique où le bord est défini par la fonction d'assombrissement centre-bord. Il faut noter que la fonction d'assombrissement centre-bord est fonction de la longueur d'onde.

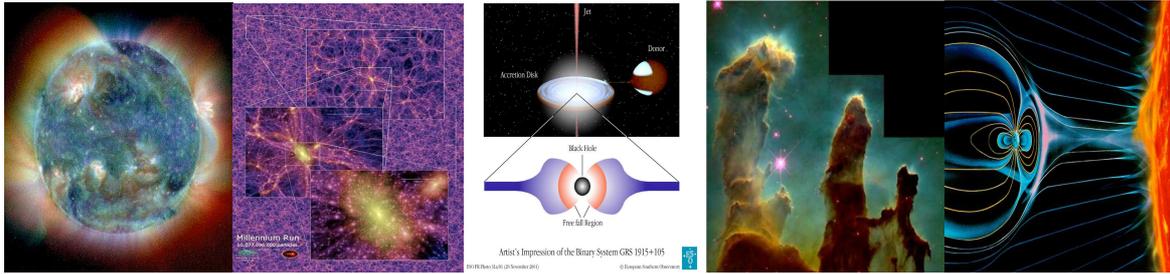
Pour estimer les paramètres de la turbulence atmosphérique sur les mesures du bord solaire, qui est mesuré par la détermination du point d'inflexion, il faut faire une analyse statistique sur les fluctuations d'angle d'arrivée c.-à-d. la covariance et la variance, Ceci fera l'objet du cinquième chapitre.

Nous terminons le manuscrit par une conclusion qui résume les principaux résultats obtenus et qui présente des perspectives possibles.

Chapitre 1

Optique atmosphérique

En astrophysique la turbulence joue un rôle très important :



Et elle reste néanmoins un handicap majeur pour l'observation des objets astronomique. (A. Ziad (1993[41])), en effet le pouvoir est fortement diminué par la turbulence atmosphérique (plus la turbulence est importante plus la résolution du télescope est affectée).



1-1 l'atmosphère turbulente

L'écoulement de l'air atmosphérique est presque toujours turbulent et caractérisé par des changements de propriétés et par des variations rapides de la pression, de la vitesse et de la température dans l'espace et le temps, plusieurs modèles théoriques et expérimentaux ont été proposés afin de modéliser la turbulence. (M.Lemaitre (2007[21]), P.Mège (2002[43])), le premier à être introduit dès 1922 par L.F.Richardson puis développé par Kolmogorov en 1941, il est devenu plus tard le fondement de la théorie de la formation des images astronomiques à travers l'atmosphère terrestre, dans le cas d'une turbulence développée le modèle de turbulence est le modèle dit « turbulence pleinement développée c'est-à-dire que le transfert de l'énergie cinétique a lieu à toutes les échelles spatiales » sa théorie des cascade d'énergie peut se résumer de la façon suivante : ce processus d'écoulement turbulent prend naissance à une certaine échelle dit l'échelle externe L_0 de la turbulence, lorsque le nombre de Reynolds caractéristique de l'écoulement qui mesure le rapport entre les forces d'inertie et les forces de visqueuse (pour l'air le nombre de Reynolds est de l'ordre de 10^6), l'énergie cinétique de la turbulence est fournie par des phénomènes à grande échelle L_0 se transfère ensuite à des mouvements d'échelles de plus en

plus petites jusqu'à ce qu'elle se dissipe sous forme de chaleur, se produit à une échelle l_0 dite échelle interne, le domaine compris entre L_0 et l_0 est le domaine « d'inertie » où la turbulence est supposée homogène et isotrope. (J.Borgnino (1978[1, 34]), J.Maire (2007[38])).

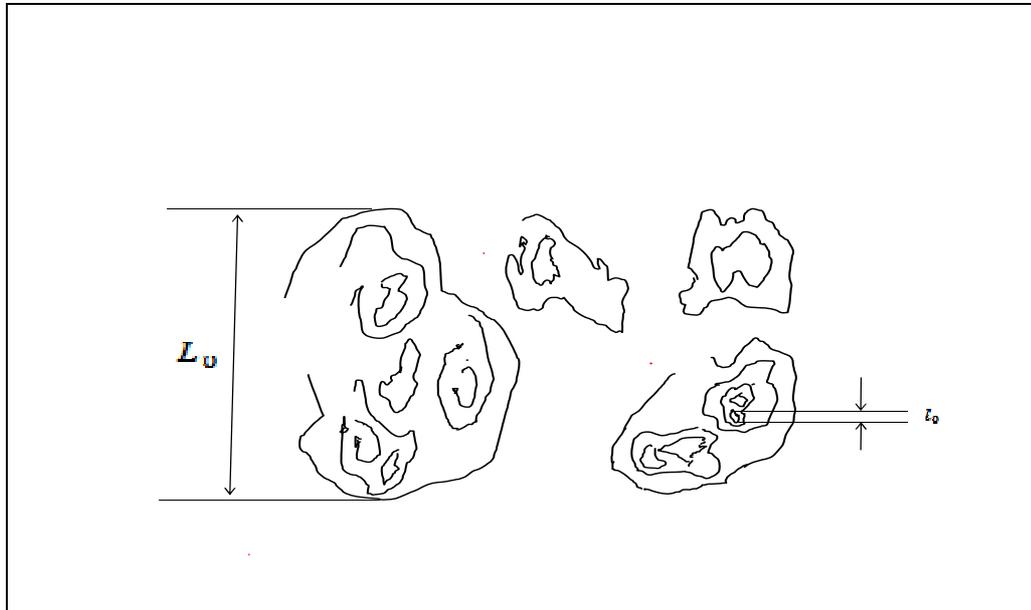


Figure (1.1) : L échelle externe et interne dans la turbulence atmosphérique

Kolmogorov montre que la fonction de structure des fluctuations de vitesse s'écrit :

$$D_v(\vec{r}) \approx C_v^2 r^{2/3} \tag{1.1}$$

Où C_v^2 est la constante de structure des fluctuations des vitesses et r la distance entre deux points de mesure l'énergie cinétique, en suite il a exprimé la densité spectral de fluctuation de vitesse sous la forme :

$$\Phi_v(\vec{f}) \approx C_v^2 f^{-11/3} \tag{1.2}$$

Où \vec{f} une fréquence spatiale et f son module $f \in \left[\frac{1}{L_0}, \frac{1}{l_0} \right]$

Plus-tard en 1949 O. Bukhov a montré que la loi spectrale des fluctuations de vitesse s'appliquait également aux fluctuations de température où la fonction de structure $\langle \Delta_\rho(T) \rangle$ représente la variance des fluctuations de température T entre deux points distants ρ de elle est définie par :

$$D_T(\rho) = \langle \Delta_\rho(T) \rangle = \langle (T(r + \rho) - T(r))^2 \rangle \tag{1.3}$$

Alors que dans le domaine inertiel (J.Borgnino (1978[1])), elle s'écrit sous forme :

$$D_T(\vec{r}) \approx C_T^2 r^{2/3} \tag{1.4}$$

Et la densité spectrale par :

$$\Phi_T(f) \approx C_T^2 f^{-11/3} \quad (1.5)$$

Où C_T^2 est la constante de structure des fluctuations de température, de même les fluctuations de température induisent à des fluctuations d'indice de réfraction, (T. Sadibekova(2007[45])), dont la fonction de structure s'écrit dans une couche d'altitude h sous forme :

$$D_n(\rho, h) = \langle \Delta_{\rho, h}(n) \rangle = \langle (n(r + \rho, h) - n(r, h))^2 \rangle \approx C_n^2 r^{2/3} \quad (1.6)$$

Où la densité spectrale est reliée directement à la fonction de structure par la transformation de Fourier (TF ($D_n(\rho, h)$)), on obtient le spectre dit Kolmogorov

$$w_{n, h}^{\text{kolmogorov}}(\bar{f}) = 0.0098 C_n^2(h) f^{-11/3} \quad (1.7)$$

Dans la loi de Kolmogorov apparaît aux basses fréquences des spectres turbulente une divergence des intégrales (une énergie globale de la turbulence infinie), pour éviter ce problème un modèle a été proposé par Lutmerski et al1970 et Ishinaru 1978 dite la loi de turbulence de Von_karman (à une énergie finie)

$$w_{n, h}^{\text{Vonkarman}}(\bar{f}) = 0.0098 C_n^2(h) \left(\frac{1}{L_0^2} + f^2 \right)^{-\frac{11}{6}} \quad (1.8)$$

La fonction de cohérence (ou covariance) des fluctuations d'indice de réfraction n'est alors que la transformée de Fourier inverse de la densité spectrale des fluctuations d'indice de réfraction (théorème de Wiener-Kirchine)

$$C_n(\rho) = \text{TFI}(w_n(f))$$

1-2 Propagation dans l'atmosphère

Les rayons du soleil sont modifiés quand ils traversent l'atmosphère par les effets de la réfraction, la réflexion, la diffusion, et la dispersion... (X.Rondeau (2007[42])):

C'est la raison de l'émergence du ciel par différentes couleurs. La couleur bleu la couleur rouge du ciel sont le résultat d'une collision des rayons avec de petites particules trouve dans l'atmosphère (par exemple : l'azote N_2). Le ciel bleu quand la diffusion des ondes courtes (bleu) est plus que les ondes longues (rouge), le contraire c'est le ciel rouge, et parfois le bord supérieur du soleil est vert lorsque le soleil est caché derrière l'horizon où les ondes plus longues (vert).



1-2-1 Fluctuation de la phase

Nous allons tout d'abord détailler les perturbations des ondes lumineuses qui en proviennent lors de la traversée de la turbulence atmosphérique.

Une onde lumineuse incidente traversant l'atmosphère reçue au sol au point r , s'écrit sous une forme complexe par :

$$\Psi(\mathbf{r}) = A(\mathbf{r}) \exp [i\varphi(\mathbf{r})] \quad (1.9)$$

Où $A(\mathbf{r})$ est les fluctuations de l'amplitude *et* $\varphi(\mathbf{r})$ est les fluctuations de la phase.

En 1981 F. Roddier ([27]) a montré que la propagation d'une onde électromagnétique à travers la turbulence atmosphérique produit un déphasage défini par :

$$\varphi(\mathbf{r}, h) = \frac{2\pi}{\lambda} \delta(\vec{r}) \quad (1.10)$$

Où $\delta(\vec{r})$ représente la variance du chemin optique introduit par les fluctuations d'indice de réfraction à l'intérieur de la couche :

$$\delta(\vec{r}, h) = \int_h^{h+\delta h} n(\mathbf{r}, z) dz \quad (1.11)$$

Où Z est l'altitude.

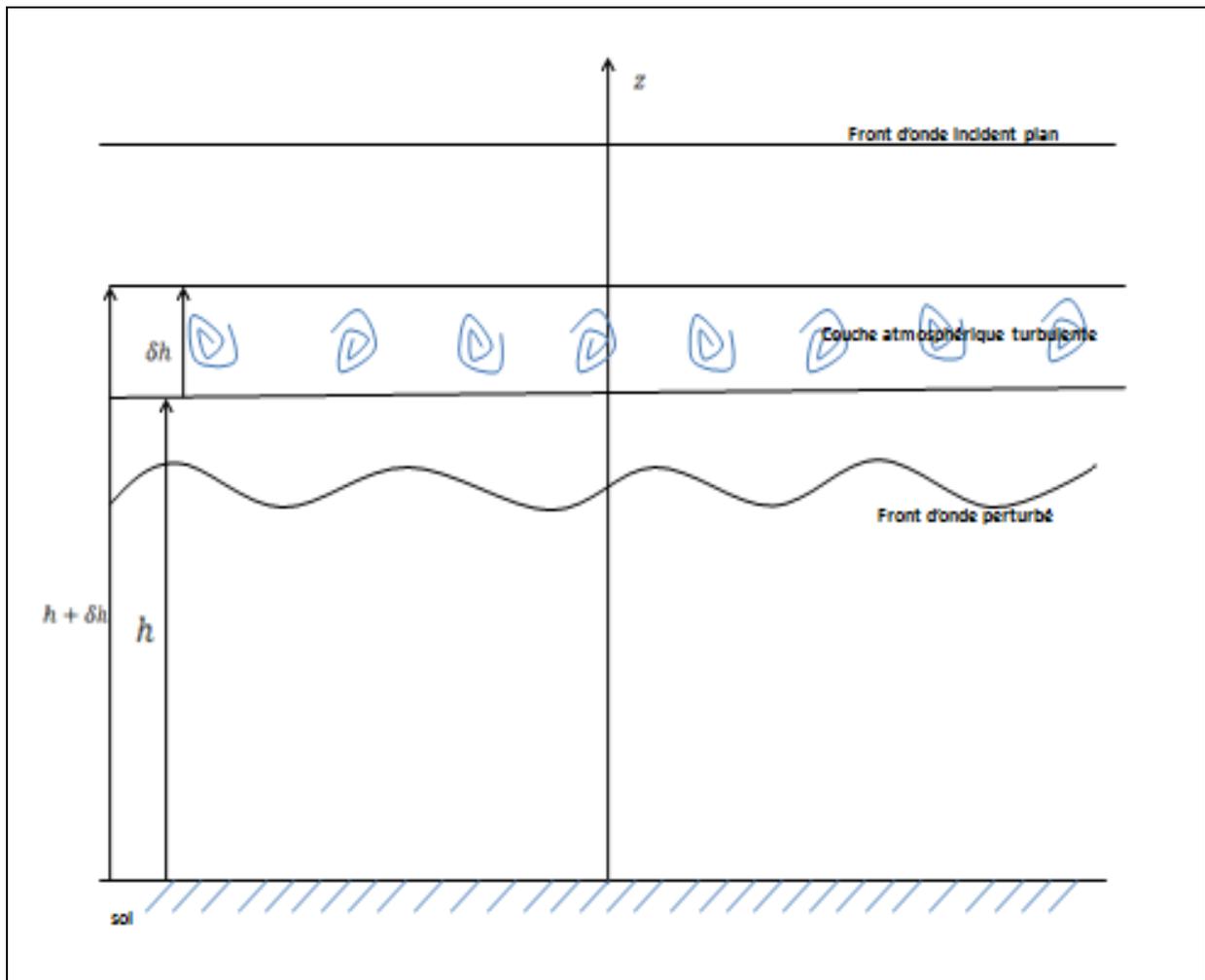


Figure (1.2) : Modèle d'une couche turbulente

1-2-1-1 Fonction de structure de la phase

La variance des fluctuations de phase entre deux points séparés par une distance ρ est la fonction de structure de la phase. (F.Roddier 1981[27]) :

$$D_{\varphi}(\rho, h) = \langle \Delta_{\rho, h}(\varphi) \rangle = \langle (\varphi(r + \rho) - \varphi(r))^2 \rangle \quad (1.12)$$

On trouve deux cas :

Le premier cas est d'une seule couche turbulente (une couche turbulente à l'altitude h):

$$D_{\varphi}(\rho, h) = 2.91k^2\rho^{5/3}C_n^2(h)\delta h \quad (1.13)$$

Où $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ (est le nombre d'onde de la lumière) et δh l'épaisseur de la couche turbulente à l'altitude h.

Le second cas est celui des diverses couches turbulentes dans les deux cas discret et continu (W.Daliali 2007[40]) par :

$$D_{\varphi}(\vec{r}, h) = 2.91k^2 r^{5/3} \int_0^{\infty} C_n^2(h_j) \delta h$$

Où (1.14)

$$D_{\varphi}(\vec{r}, h) = 2.91k^2 r^{5/3} \sum_j C_n^2(h_j) \delta h$$

1-2-1-2 La densité spectrale de la phase

La densité spectrale de la phase est notée DSP, on peut écrire en fonction de la densité spectrale des fluctuations de l'indice de réfraction par :

$$w_{\varphi, h}(\vec{f}) = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 w_{n, h}(\vec{f}) \delta h \quad (1.15)$$

En remplaçant $w_{n, h}(\vec{f})$ par son expression donnée selon le modèle de Kolmogorov, on obtient :

$$w_{\varphi, h}(\vec{f}) = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 w_{n, h}^{\text{kolmogorov}}(\vec{f}) \delta h$$

$$w_{\varphi, h}^{\text{kolmogorov}}(\vec{f}) \approx 0.3870 \lambda^{-2} f^{-11/3} C_n^2(h) \delta h \quad (1.16)$$

Et dans le modèle de Von Karman :

$$w_{\varphi, h}(\vec{f}) = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 w_{n, h}^{\text{Von karman}}(\vec{f}) \delta h$$

$$w_{\varphi, h}^{\text{Von karman}}(\vec{f}) \approx 0.3870 \lambda^{-2} \left(\frac{1}{L_0^2} + f^2\right)^{-11/6} C_n^2(h) \delta h \quad (1.17)$$

A l'approximation des faibles perturbations on considère que les déphasages introduits par la turbulence à travers chaque couche ont de très faibles $\varphi(\vec{r}) \ll 1$ ($e^{i\varphi_n(\vec{r})} \approx 1 + i\varphi_n(\vec{r})$). Alors le développement des fluctuations de l'amplitude et les fluctuations de la phase complexe provoquées par la traversée des couches produite au niveau du sol, nous pouvons écrire sous cette forme (J. Borgnino 2004 [16]):

$$w_{A,0}(\vec{f}) = \int w_{\varphi, h}(\vec{f}) \delta h \sin^2 \pi \lambda h f^2 \quad (1.18)$$

$$w_{\varphi,0}(\vec{f}) = \int w_{\varphi, h}(\vec{f}) \delta h \cos^2 \pi \lambda h f^2 \quad (1.19)$$

$$\text{ou}' \quad w_{\psi,0}(\vec{f}) = w_{A,0}(\vec{f}) + w_{\varphi,0}(\vec{f}) \quad (1.20)$$

Dans l'hypothèse de champ proche (la turbulence est supposée être localisée près du télescope) les effets des fluctuations de l'amplitude sont négligeables par rapport aux effets des fluctuations de la phase, alors selon (20) on obtient :

$$w_{\psi,0}(\vec{f}) \approx w_{\varphi,0}(\vec{f}) \quad (1.21)$$

En suit la densité spectrale des fluctuations de phase de l'onde arrivant au sol et traversant plusieurs couches quand en remplissant les équations (1.16) et (1.17) dans l'équation (1.19). (B.LeBous 2003[32]):

$$W_{\varphi,0}^{Kolmogorov}(\vec{f}) = 0.3870 \lambda^{-2} \int C_n^2(h) \delta h f^{-\frac{11}{3}} \cos^2 \pi \lambda h f^2 \quad (1.22)$$

$$W_{\varphi,0}^{Von\ karman}(\vec{f}) = 0.3870 \lambda^{-2} \int C_n^2(h) \delta h \left(\frac{1}{L_0^2} + f^2\right)^{-\frac{11}{6}} \cos^2 \pi \lambda h f^2 \quad (1.23)$$

Où $\int_0^\infty C_n^2(h) \delta h$ intégrale sur l'épaisseur d'atmosphère traversée de la constante de structure des fluctuations de l'indice de réfraction de l'aire, il relié directement par la longueur d'onde λ et le paramètre par la relation :

$$\int_0^\infty C_n^2(h) \delta h = 0.06 \lambda^2 r_0^{-5/3} \quad (1.24)$$

Dans le domaine inertiel de turbulence (modèle de Kolmogorov-Tatarski) la sommation sur l'ensemble des couches conduit à une fonction de structure totale l'équation (14) sera la forme :

$$D_\varphi(\vec{r}) \simeq 6.88 \left(\frac{\rho}{r_0}\right)^{\frac{5}{3}} \quad (1.25)$$

Et les équations (22), (23) respectivement par. (J.Borgnino et F.Martin 1977[28], 1992[35]),:

$$W_{\varphi,0}^{Kolmogorov}(\vec{f}) = 0.0232 r_0^{-5/3} f^{-\frac{11}{3}} \quad (1.26)$$

$$W_{\varphi,0}^{Von\ karman}(\vec{f}) = 0.0232 r_0^{-5/3} \left(\frac{1}{L_0^2} + f^2\right)^{-\frac{11}{6}} \quad (1.27)$$

1-2-1-3 La fonction de cohérence de phase (la covariance)

La fonction de cohérence ou la covariance de la phase entre deux points séparés d'une distance ρ défini par :

$$C_\varphi(\rho) = \langle \varphi(r) \varphi(r + \rho) \rangle = \langle e^{i[\varphi(r) - \varphi(r+\rho)]} \rangle \quad (1.28)$$

Les statistiques des fluctuations de phase sont gaussiennes, ceci permet de caractériser la covariance comme la relation entre la fonction de cohérence et la fonction de structure de phase, on peut écrire (P.Mège 2002[43])

$$C_\varphi(\rho) = e^{-\frac{1}{2} D_\varphi(\vec{r})} \quad (1.29)$$

Et la fonction de cohérence du champ au sol s'écrit :

$$C_{\varphi}(\rho) = e^{-\frac{\lambda}{2}(2.91k^2\rho^{5/3} \int C_n^2(h) \delta h)} \tag{1.30}$$

En remplaçant l'équation (1.25) dans (1.30) on trouve :

$$C_{\varphi}(\rho) = e^{-3.44 \left(\frac{\rho}{r_0}\right)^{5/3}} \tag{1.31}$$

1-2-2 Fluctuation des angles d'arrivée (AA)

L'angle d'arrivée (AA) du front d'onde arrivant au sol est l'angle entre la direction normale à la surface d'onde perturbée et la direction normale à la surface d'onde non – perturbée au point défini par \vec{r} .

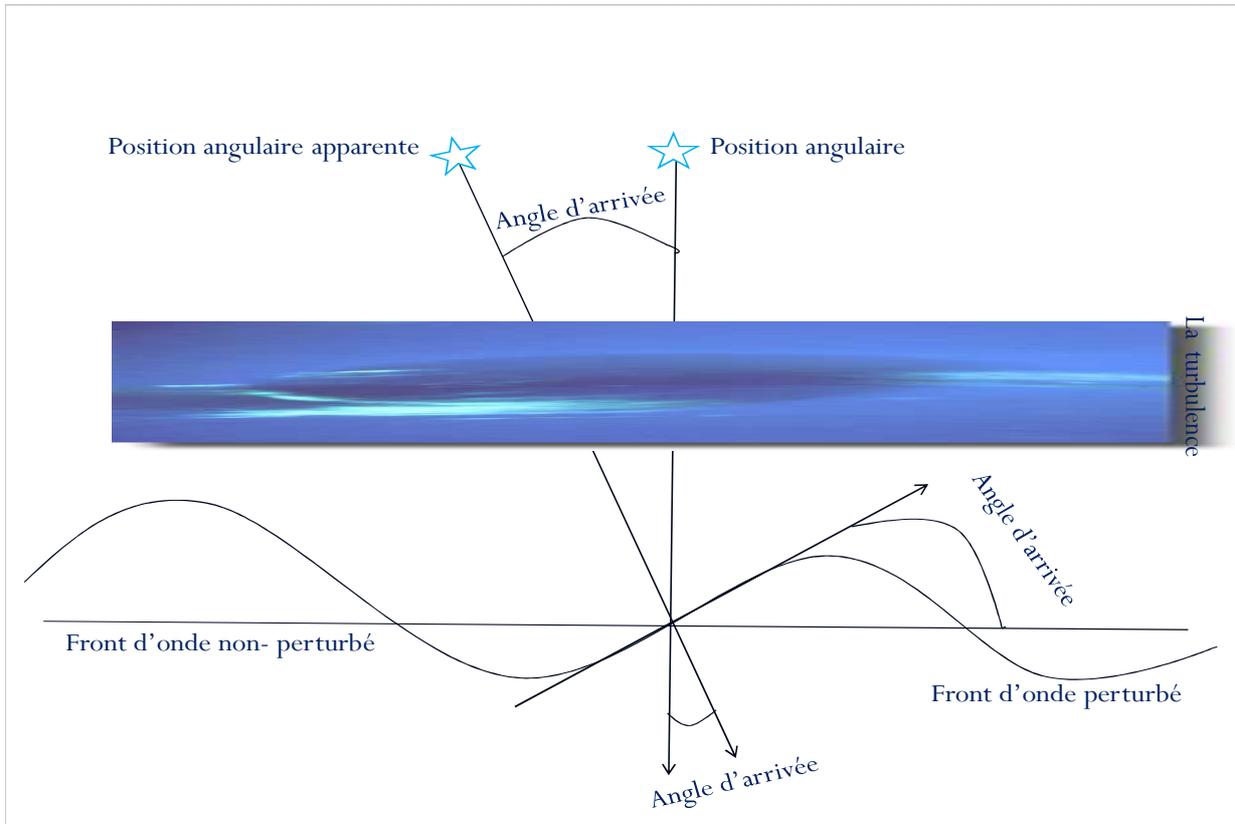


Figure (1.3) : L'angle d'arrivée du front d'onde arrivant au sol

L'angle d'arrivée du front d'onde est proportionnel de la dériver spatiale de la phase φ dans les directions x et y sera données par (J. Borgnino 1990 [24]):

$$\alpha(x, y) = -\frac{\lambda}{2\pi} \frac{\partial}{\partial x} \varphi_0(x, y) \tag{1.32}$$

$$\beta(x, y) = -\frac{\lambda}{2\pi} \frac{\partial}{\partial y} \varphi_0(x, y)$$

Si on tenait la diffraction sur la pupille du télescope l'angle d'arrivée du front d'onde est donné par (W.Daliali 2007[40]) :

$$\alpha(x, y) = -\frac{4\lambda}{2\pi^2 D^2} G(x, y) * \frac{\partial}{\partial x} \varphi_0(x, y) \quad (1.33)$$

$$\beta(x, y) = -\frac{4\lambda}{2\pi^2 D^2} G(x, y) * \frac{\partial}{\partial y} \varphi_0(x, y)$$

Où $G(x, y)$ est la fonction pupille et $\varphi_0(x, y)$ est la fluctuation de la phase sur la pupille.

1-2-2-1 Densité spectrale d'AA

La densité spectrale de l'angle d'arrivée est liée à la densité spectrale de la phase au sol par :

$$w_{AA}(\vec{f}) = \lambda^2 f^2 \left| \frac{2J_2(\pi f D)}{\pi f D} \right|^2 w_{\varphi,0}(\vec{f}) \quad (1.34)$$

Pour les deux directions par :

$$w_{\alpha}(\vec{f}) = \lambda^2 f_x^2 \left| \frac{2J_2(\pi f D)}{\pi f D} \right|^2 w_{\varphi,0}(\vec{f}) \quad (1.35)$$

$$w_{\beta}(\vec{f}) = \lambda^2 f_y^2 \left| \frac{2J_2(\pi f D)}{\pi f D} \right|^2 w_{\varphi,0}(\vec{f})$$

Où Le terme $\left| \frac{2J_2(\pi f D)}{\pi f D} \right|^2$ est le filtrage par la pupille (la fonction pupille)

Si en remplaçant les équations (1.22) et (1.23) dans l'équation (1.34) on trouve La densité spectrale de l'angle d'arrivée par les deux modèles Kolmogorov, Von Karman. (J.Maire 2007[38]) :

$$w_{AA}^{Kol}(\vec{f}) = 0.3870 \int C_n^2(h) \delta h f^{-\frac{11}{5}} \left| \frac{2J_2(\pi f D)}{\pi f D} \right|^2 \cos^2 \pi \lambda h f^2 \quad (1.36)$$

$$w_{AA}^{VK}(\vec{f}) = 0.3870 \int C_n^2(h) \delta h \left(\frac{1}{L_0} + f^2 \right)^{-\frac{11}{5}} \left| \frac{2J_2(\pi f D)}{\pi f D} \right|^2 \cos^2 \pi \lambda h f^2 \quad (1.37)$$

1-2-2-2 Fonction de structure d'AA

La fonction de structure d'angle d'arrivée est liée par la densité spectrale de la phase par la relation suivant (J. Borgnino 1992 [35], R. Conan et al [18,22]):

$$D_{AA}(\theta) = 2\pi \lambda^2 \int_0^{+\infty} df f w_{\varphi,0}(f) [1 - J_0(2\pi f \theta h) - J_2(2\pi f \theta h)] \left| \frac{2J_2(\pi f D)}{\pi f D} \right|^2 \quad (1.38)$$

Et par les deux modèles :

$$D_{AA}^{Kol}(\theta) = 2.430 \int_0^{+\infty} df f^3 \int C_n^2(h) \delta h f^{-\frac{11}{5}} \left| \frac{2J_2(\pi f D)}{\pi f D} \right|^2 \cos^2 \pi \lambda h f^2$$

$$[1 - J_0(2\pi f\theta h) - J_2(2\pi f\theta h)] \quad (1.39)$$

$$D_{AA}^{VK}(\theta) = 2.430 \int_0^{+\infty} df f^3 \int C_n^2(h) \delta h \left(\frac{1}{L_0^2} + f^2\right)^{-\frac{11}{6}} \left|\frac{2J_2(\pi f D)}{\pi f D}\right|^2 \cos^2 \pi \lambda h f^2 [1 - J_0(2\pi f\theta h) - J_2(2\pi f\theta h)] \quad (1.40)$$

La variance des fluctuations d'AA est liée à la densité spectrale de l'AA plus particulièrement à la densité spectrale de la phase par cette relation :

$$\sigma_{AA}^2 = \int_0^{+\infty} w_{AA}(\vec{f}) \delta f \quad (1.41)$$

$$\sigma_{AA}^2 = \pi \lambda^2 \int_0^{+\infty} f^3 w_\varphi(\vec{f}) \left|\frac{2J_2(\pi f D)}{\pi f D}\right|^2 \delta f \quad (1.42)$$

En remplaçant $w_\varphi(\vec{f})$ par son expression donnée selon les deux modèles Kolmogorov et Von Karman respectivement par:

$$\sigma_{AA}^2 = 0.229 \pi \lambda^2 r_0^{-\frac{5}{3}} \int_0^{+\infty} f^{-\frac{2}{3}} \left|\frac{2J_2(\pi f D)}{\pi f D}\right|^2 \delta f \quad (1.43)$$

$$\sigma_{AA}^2 = 0.229 \pi \lambda^2 r_0^{\frac{5}{3}} \int_0^{+\infty} f^3 \left(\frac{1}{L_0^2} + f^2\right)^{-\frac{11}{6}} \left|\frac{2J_2(\pi f D)}{\pi f D}\right|^2 \delta f \quad (1.44)$$

Après l'intégrale et dans le cas où $L_0 \gg D$ l'équation (1.43) sera donnée par :

$$\sigma_{AA}^2 = 0.17 \lambda^2 r_0^{\frac{5}{3}} D^{-\frac{1}{3}} \quad (1.45)$$

1-2-2-3 la fonction de cohérence d'AA (la covariance)

La covariance des fluctuations d'angle d'arrivée est liée à la densité spectrale de la phase par (J. Borgnino et al 1992 [34,35], R. Avila et al 1997 [20]) :

$$C_{AA}(\theta) = \pi \lambda^2 \int_0^{+\infty} df f^3 w_{\varphi,0}(f) [J_0(2\pi f\theta h) + \cos \emptyset J_2(2\pi f\theta h)] \left[\frac{2J_2(\pi f D)}{\pi f D}\right]^2 \quad (1.46)$$

On peut distinguer deux types de covariance, la covariance longitudinale $\emptyset = \frac{\pi}{2}$ et la covariance transversale $\emptyset = 0$.

1-2-3 caractérisation de front d'onde

Il faut connaître bien les paramètres optiques qui caractérisent la cohérence du front d'onde pour les limitations de la turbulence à haute résolution angulaire.

La constante de structure des fluctuations de l'indice de réfraction C_n^2 :

Le paramètre de la constante de structure mesure l'énergie de la turbulence d'une couche à l'altitude h . elle joue un rôle essentiel pour la qualification des sites d'observation astronomique, (B.Le boux 2003[32]) ce paramètre est toujours exprimé par un profil $C_n^2(h)$, caractéristique de la turbulence et peut être mesuré optiquement par des instruments tels que DIMM, SCIDAR...etc.

A partir des observations de jour et de nuit, les valeurs trouvées c'est que l'énergie turbulente dans la basse atmosphère est nettement plus faible pour les observations de nuit que pour les observations de jour (C.Petit 2006[44]).

La figure (1.4) présente un exemple de profils de $C_n^2(h)$ obtenus lors d'observations à Mauna Kea (Hawaii), ce profil montre que la turbulence est souvent localisée dans deux couches. (J.Maire 2007[38])

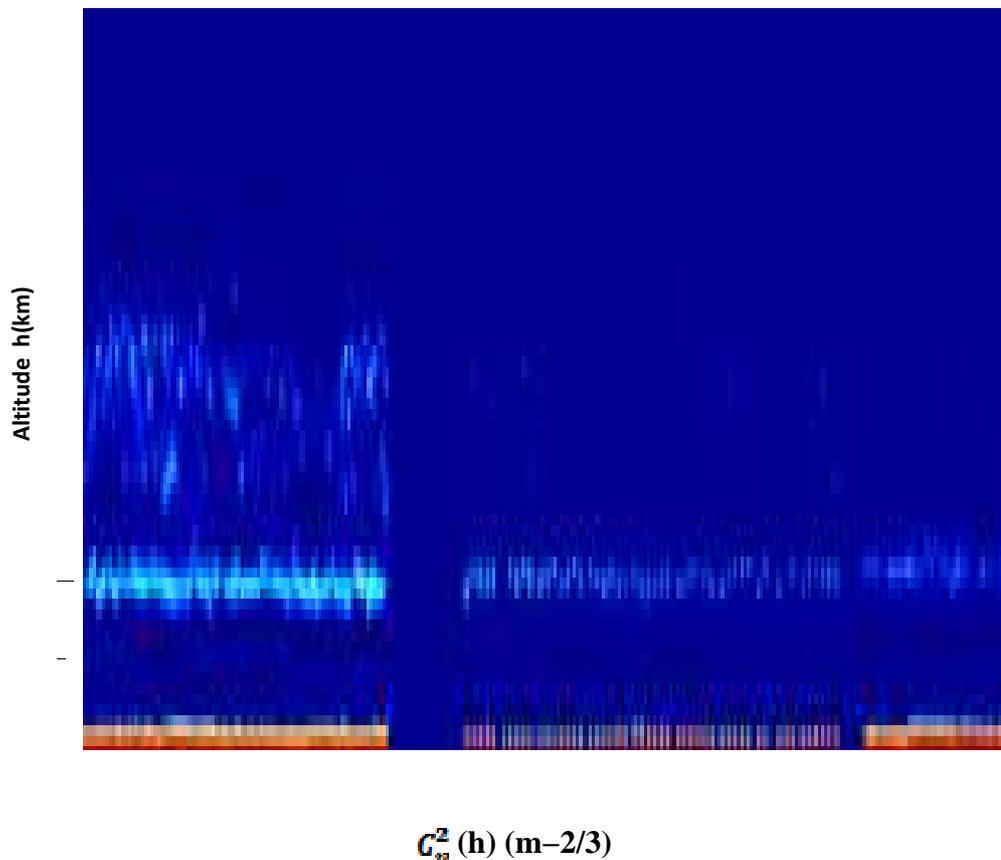


Figure (1.4) : Exemple de profils mesurés par le SCIDAR (Hawaii)

Le paramètre de Fried r_0

En 1965 Fried propose un paramètre dit paramètre de Fried noté r_0 qui représente la largeur de cohérence spatiale du front d'onde perturbé (A.Ziad 1993[41]), ce paramètre est défini comme le diamètre qui devrait avoir un télescope hors atmosphère pour que sa résolution soit équivalente à celle imposée par la turbulence. (J.Borgnino 1978[1]), r_0 s'exprime en fonction de l'énergie optique de la turbulence caractérisée par la constante de structure $C_n^2(h)$ des fluctuations d'indice de réfraction de l'air donnée par (F.Roddier 1981[27]):

$$r_0 = [16.7 \lambda^{-2} \int_0^{+\infty} C_n^2(h) \delta h]^{-3/5} \quad (1.47)$$

Un paramètre exprime la qualité de l'image au foyer d'un télescope correspond à la largeur à mi-hauteur de la tache de diffraction a été calculée par Dierickx (1992) en fonction du paramètre de Fried c'est le seeing S (C.Petit(2006[44])) défini par :

$$S = \frac{\lambda}{r_0} \quad (1.48)$$

r_0 est un paramètre chromatique et varie en $\lambda^{6/5}$ ($r_0 \propto \lambda^{6/5}$) tandis que S est quasiment achromatique et varie en $\lambda^{-1/5}$ ($S \propto \lambda^{-1/5}$) (W.Daliali 2007[40]).

L'échelle externe L_0

Elle définit la taille maximale des perturbations du front d'onde qui restent cohérents. L'échelle externe L_0 de cohérence du front d'onde liée à l'échelle externe L_0 caractérisant la turbulence dynamique et la fonction de l'énergie optique de turbulence caractérisée par la constante de structure $\int_0^{+\infty} C_n^2(h) \delta h$ (J.Maire 2007[38]) se calcule par l'équation :

$$L_0^{-1/3} = \frac{\int_0^{+\infty} L_0(h)^{-1/3} C_n^2(h) \delta h}{\int_0^{+\infty} C_n^2(h) \delta h} \quad (1.49)$$

Le domaine d'isoplanétisme

On appelle domaine isoplanétisme le champ défini par l'angle isoplanétisme θ_0 (l'angle critique à partir duquel la dégradation atmosphérique va changer de l'ordre d'une à quelques secondes d'arc) où l'angle d'isoplanétisme correspond à l'angle entre deux faisceaux lumineux provenant du même objet,

(B.Le Roux 2003[32]).

Les faisceaux ne traversant pas exactement le même volume de turbulence, il résulte une décorrélation de la phase en fonction de la distance angulaire θ , un paramètre important est la séparation spatiale des faisceaux à l'altitude h écrite sous forme : $r = \theta h$

C'est-à-dire si l'angle est petit ($r < L_0$) la couche turbulence est localisée près de la pupille et les faisceaux traversent des régions de turbulence identique pour lequel les déformations des fronts d'onde arrivant sur la pupille restent corrélées (quantifie la cohérence spatiaux-angulaire du front d'onde) on parle alors l'isoplanétisme.

Et lorsque l'angle apparent de l'objet observé est grand ($r > L_0$), les faisceaux seront perturbés par des dégradations atmosphériques complètement différente, il résulte une décorrélation des fronts d'onde arrivant sur la pupille on parle alors l'anisoplanétisme. (M.Lemaite (2007[21])).

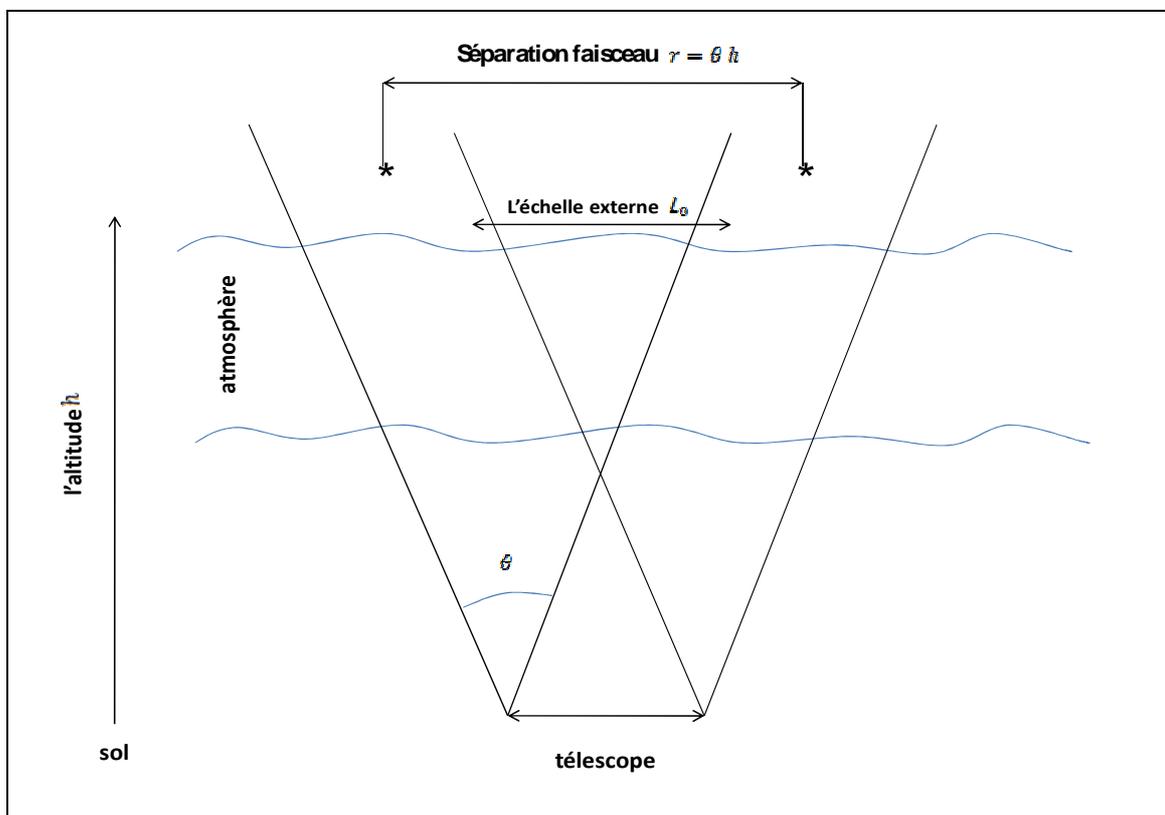


Figure (1.5) : l'angle isoplanétique

Le paramètre θ_0 (angle isoplanétique), dépend de l'altitude H caractéristique des couches turbulentes et le paramètre de Fried r_0 (C.Petit 2006[44]) par :

$$\theta_0 = 0.314 \frac{r_0}{H} \quad (1.50)$$

Ou H donné par :

$$H = \left[\frac{\int_0^{+\infty} c_n^2(h) h^{5/3} \delta h}{\int_0^{+\infty} c_n^2(h) \delta h} \right]^{3/5} \quad (1.51)$$

Fried en 1982 montre que l'angle isoplanétique correspond à la variance de phase et qui s'exprime en fonction du profil de turbulence et aussi l'angle critique à partir duquel la dégradation atmosphérique va changer, il est défini par la relation suivant :

$$\theta_0 = \left(2.905 k^2 \int_0^{+\infty} c_n^2(h) h^{5/3} \delta h \right)^{-3/5} \quad (1.52)$$

Le temps de cohérence

Le temps de cohérence τ_0 caractérise le temps d'évolution des déformations du front d'onde. L'évolution de ce paramètre dépend de la distribution du vent (direction, vitesse) (C.Petit 2006[44]).

$$\tau_0 \simeq 0.314 \frac{r_0}{V} \quad (1.53)$$

Où V est défini la vitesse de vent

Pour l'observation d'imagerie à haute résolution angulaire, le temps de pose doit être inférieur au temps d'évolution de la turbulence.

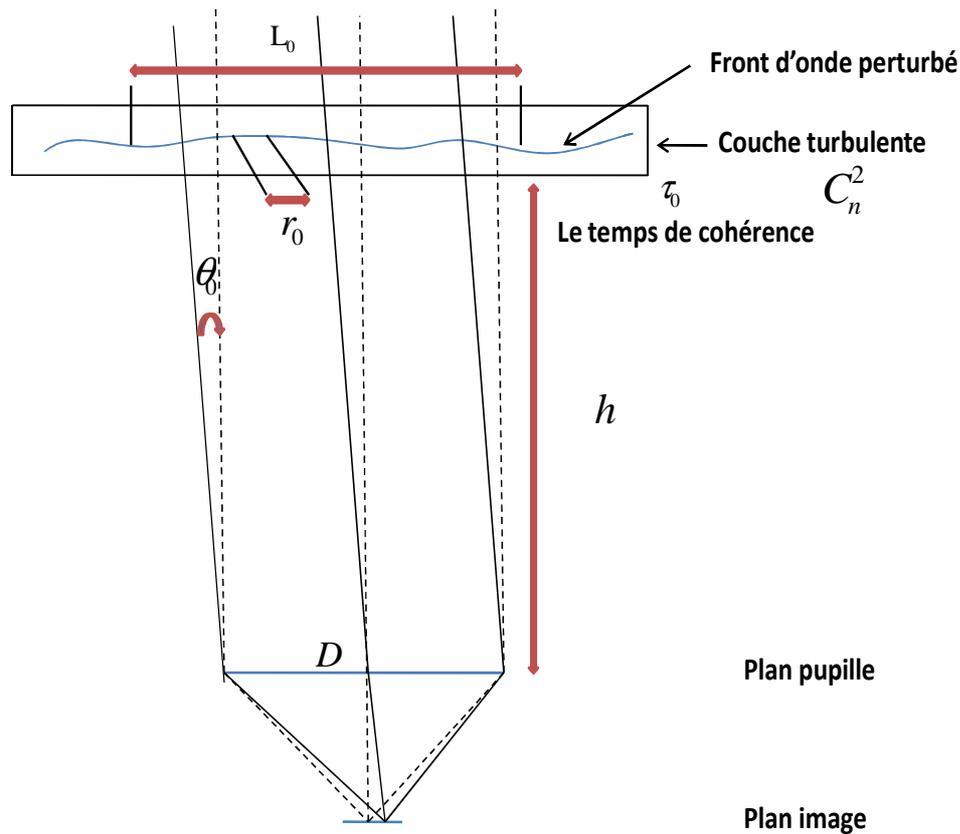


Figure (1.6) : les paramètres de la turbulence atmosphérique

1-2-4 Les effets de la turbulence

1-2-4-1 La scintillation

La manifestation la plus évidente de la turbulence est la scintillation des étoiles, qui observée à l’œil humain comme la brillance des étoiles et aussi le changement de couleur d’une seule étoile, elle correspond à les fluctuations de l’amplitude de l’onde qui arrive au sol (J.Maire 2007[38]),(A.Berdja 2002[4]), (A.Berdja 2007[7]). Dans le cas de petits télescopes, la scintillation est une modulation aléatoire de l’intensité globale, mais pour les grands télescopes elle est contribué à la dégradation totale d’image. Relativement la scintillation dépendant du profil de l’indice de réfraction C_n^2 et pour la quantifier en utilisant l’expression de la densité spectrale de fluctuation de l’amplitude (R.Avila 1997 [20]). Elle est donnée par le modèle de Kolmogorov l’équation (1.18) par :

$$w_{A,0}(\vec{f}) = 0.3870\lambda^{-2} \int C_n^2(h) \delta h f^{-\frac{44}{3}} \sin^2 \pi \lambda h f^2 \quad (1.54)$$

Et la variance de scintillation est le moment d'ordre 2 des fluctuations d'amplitudes s'écrit (F.Roddier 1981[27]) :

$$\sigma_I^2 = 19.11 \lambda^{-7/6} \int C_n^2(h) h^{5/6} \delta h \quad (1.55)$$

1-2-4-2 L'agitation

Parmi les effets des dégradations du front d'onde sur les images, on a l'agitation au foyer d'un télescope. L'agitation de l'image dans le plan focal du télescope correspond à une fluctuation de la phase (J.Maire 2007[38]) et donc une fluctuation de l'angle d'arrivée (A.Berdja 2007[7]).

A partir de la densité spectrale de fluctuation d'AA qui est lié directement par la densité spectrale de la phase l'équation (1.43) on trouve les fonctions de la variance et de la covariance d'AA, qui sont dépendantes aux paramètres caractéristiques la turbulence (W.Daliali 2007[40]) selon les deux modèles :

1) La variance :

Modèle de Kolmogorov (1.45)

$$\sigma_{AA}^2 = 0.1698 \lambda^2 r_0^{-5/3} D^{-1/3} \quad (1.56)$$

Et le paramètre de Fried en fonction de la variance, si la variance en (rd^2) l'équation (1.57), et si la variance en (seconde d'arc) l'équation (1.58)

$$r_0 = 0.3451 \lambda^{6/5} D^{-1/5} (\sigma_{AA}^2)^{-3/5} \quad (1.57)$$

$$r_0 = 8.25 \cdot 10^5 D^{-1/5} (\sigma_{AA}^2)^{-3/5} \quad (1.58)$$

Modèle de Von Kàrmà (1.44)

$$\sigma_{AA}^2 = 0.0229 \pi \lambda^2 r_0^{-5/3} \int_0^{+\infty} df f^3 (f^2 + L_0^{-2})^{-11/6} \left| \frac{2J_1(\pi f D)}{\pi f D} \right|^2 \quad (1.59)$$

2) La covariance :

L'expression représente la corrélation des fluctuations d'angle d'arrivée, c'est la covariance qui correspond par les paramètres caractérisée la turbulence atmosphérique (R.Avila 1997 [20]) tel que θ, r_0, L_0, h et à partir l'équation (1.46) la covariance transversale donnée par :

$$C_{AA}(r_0, L_0, h, \theta) = 0.0716 \lambda^2 r_0^{-5} \int_0^{+\infty} df f^3 \left(\frac{1}{L_0^2} + f^2 \right)^{-11/6} \left[J_0(2\pi f \theta h) + J_2(2\pi f \theta h) \right] \left| \frac{2J_1(\pi f D)}{\pi f D} \right|^2 \tag{1.60}$$

où θ représente une direction angulaire sur le ciel dont les limites sont imposées par le champ sur lequel est faite l'analyse.

1-2-4-3 L'étalement

Au foyer du télescope, l'image courte pose se compose de nombreuses taches appelées tavelures (speckles) de dimension $\frac{\lambda}{D}$ mais l'image longue pose est la moyenne des images en temps courte forme une tache de diamètre $\frac{\lambda}{r_0}$, c'est l'étalement, il dépend au r_0 et lie à largeur à mi hauteur **FWHM** par la relation (J.Maire 2007[38]), (W.Daliali 2007[40]),

$$FWHM = 0.976 \frac{\lambda}{r_0} \tag{1.61}$$

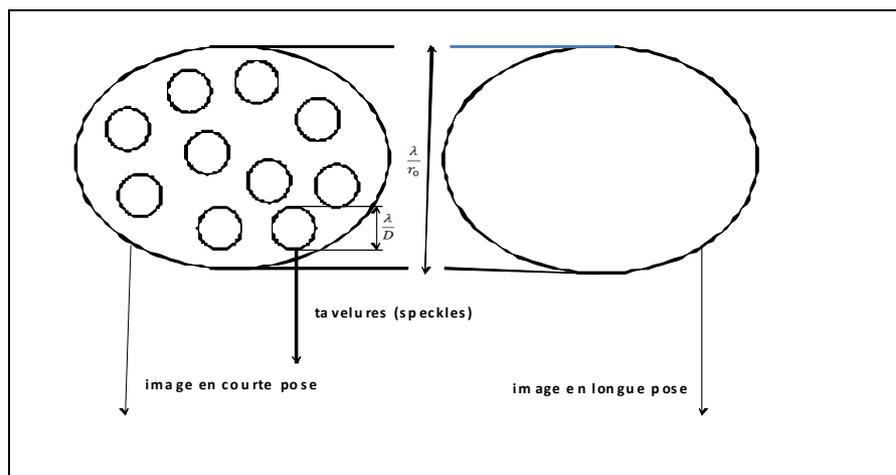


Figure (1.7) : Image courte et longue pose

1-3 Conclusion

Dans ce premier chapitre 'optique atmosphérique' nous avons exposé les éléments théoriques de base de la turbulence optique et de la propagation des ondes lumineuses à travers la turbulence atmosphérique. Nous avons aussi défini les paramètres utilisés pour caractériser les conditions d'observation et les effets de la turbulence atmosphérique sur le front d'onde. L'analyse des fluctuations des angles d'arrivées est très importante dans le cas de l'étude de l'influence de la turbulence atmosphérique sur la formation des images astronomiques.

Chapitre 2
Simulations de la turbulence
Atmosphérique

Les images obtenues à l'aide de télescopes au sol sont brouillées suite à l'action de deux effets principaux, un effet instrumentale et un autre effet atmosphérique introduisant le filtrage du à la turbulence atmosphérique.

2-1 L'effet instrument (la réponse d'un télescope)

La réponse du système optique qui est présenté dans les images c'est le résultat de l'ouverture finie de l'instrument (pupille), elle n'est pas simple, mais analysé par les processus de diffraction (phénomène par lequel les rayons lumineux issus d'une source ponctuelle sont déviés de leur trajectoire et basée sur l'interférence de la lumière émise), l'image de diffraction appelée tâche d'Airy est un disque central brillant entouré d'un certain nombre de s'amenuisent rapidement anneaux concentriques, cette répartition de l'intensité est décrite par La réponse du système optique (télescope) imposée par la diffraction en anglais Point Spread Function (PSF).

La fonction d'ouverture de la pupille de rayon R donnée par (A.Berdja 2007[7]),(C.Petit 2006[44]) :

$$P(r) = \begin{cases} 1 & \text{à l'intérieur de la pupille} \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (2.1)$$

Où $r = \sqrt{x^2 + y^2}$

La réponse du système optique (réponse impulsionnelle de télescope) est définie par l'autocorrélation de la fonction d'ouverture de la pupille noté $RI_{\text{tél}}$ et donnée par l'équation :

$$RI_{\text{tél}} = \frac{1}{S} \int P(r)P(r - \lambda f) \quad (2.2)$$

Avec $S = \frac{\pi}{4} D^2$: est la surface de la pupille.

Programme 2.1 : fonctions sous MATLAB de simulation de pupille et de PSF

```
function P = pupilles(s,n)
[X,Y] = meshgrid((-s-1)/2:((s-1)/2),(-s-1)/2:((s-1)/2));
p = zeros(s);
p((X.^2+Y.^2)<=(n/2).^2) = 1;
%la fonction de tache d'Airy (psf) de taille n
function psf = tached'Airy(P)
tpsf = fft2(P);
psf = sqrt(real(tpsf).^2+imag(tpsf).^2);
psf = fftshift(psf);
```

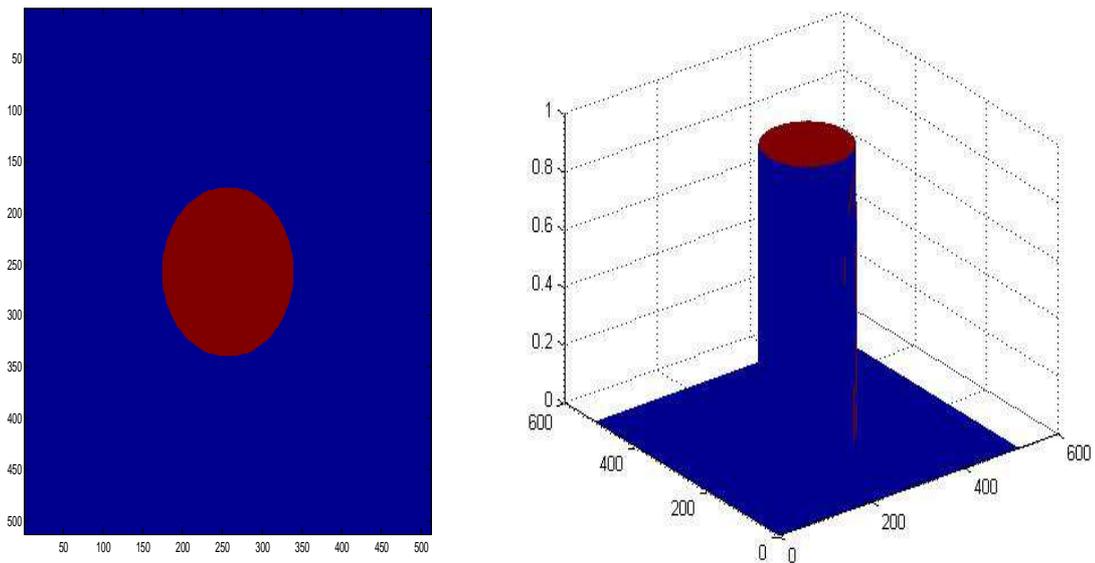


Figure (2.1) : une pupille de télescope à gauche (2D) et à droite (3D), (512x512) pixel

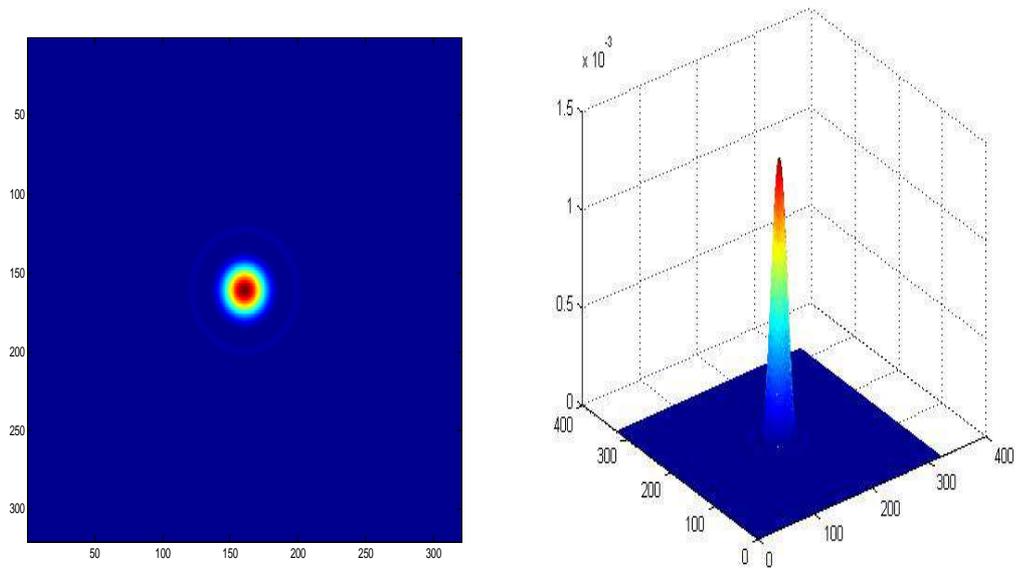


Figure (2.2): la réponse d'un télescope (tache d'Airy) à gauche 2D et à droite 3D, (320x320) pixel

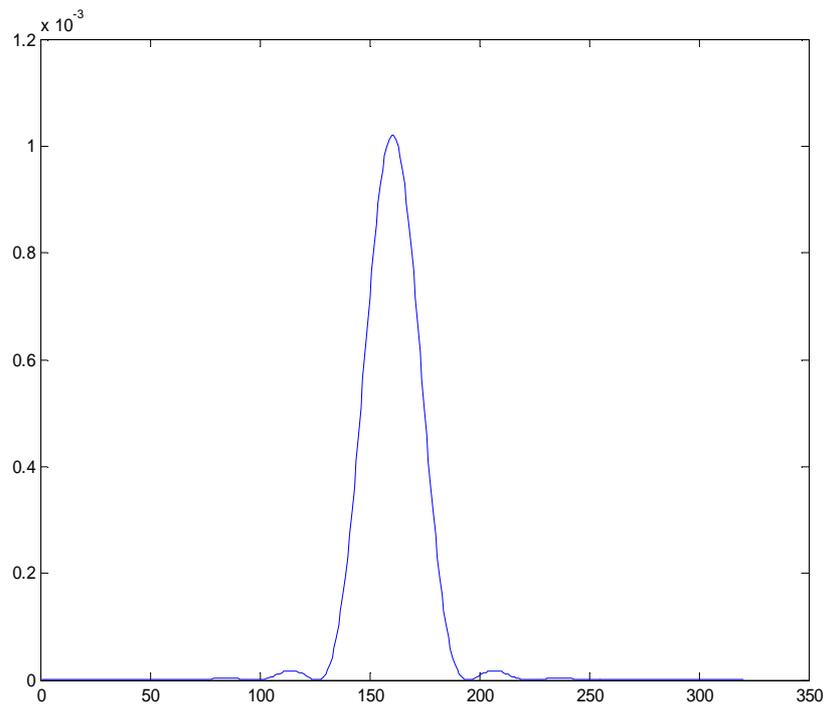


Figure (2.2) : une coupe de la réponse d'un télescope

2-2 L'effet de la turbulence atmosphérique

Les perturbations atmosphériques sont en grande partie responsables de la dégradation des mesures astronomie (le soleil par exemple), elles dégradent le front d'onde incident. Cette simulation de turbulence permet de générer une turbulence atmosphérique, ensuite la turbulence est générée sous forme d'écran (A.berdja 2002[4]), (A.berdja 2007[7,]), il peut être de type Kolmogorov ou Von-karman .on se base pour cela sur la méthode spectrale (méthode de Thadashi Nakajima) est la possibilité de retrouver numériquement la distribution spatiale des fluctuations de la phase par la transformation de Fourier inverse de la densité spectrale de phase (C.Petit 2006[44]).

La dimension de ces écrans sont déterminées par les conditions de simulation par exemple la fréquence d'échantillonnage $\Delta f_{\max} = \frac{1}{2dx}$ où dx est l'échantillonnage spatial de l'écran de phase, et aussi ces écrans sont générant selon les caractéristiques de la turbulence le paramètre de Fried r_0 et l'échelle L_0 externe (W.Daliali 2007[40]).

Programme 2.2 : fonctions sous MATLAB de simulation d'écran de phase

```
function phase = écran de phase (r0,L0,dx,h,lambda,layer,N0)
N = N0/2;
fmax = 1./(2*dx);
df = fmax / N;
ff = linspace(0,fmax,N);
[fx,fy] = meshgrid(ff,ff); f2 = fx.^2 + fy.^2;
dspphi = 0.0228*r0^(-5/3)*(f2 + 1/(L0.^2)).^(-11/6);
aa = fft2(dspphi);
phase = abs(aa);
```

Dans la simulation nous choisiront des écrans de phase comme des matrices de taille (512x512) et la longueur d'onde ($\lambda = 535.7\text{nm}$).

Pour regarder l'effet des paramètres caractéristiques la turbulence atmosphérique injectées dans la simulation de l'écran de phase, on peut changer un paramètre et fixer les autres paramètres sur chaque génération d'un écran de phase.

r_0 (cm)	2	2	2	8	2
L_0 (m)	1	10	10	10	10
h (m)	1000	1000	10000	1000	1000
dx (cm)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.8

Table (2.1) : l'influence des paramètres r_0, L_0, h sur l'écran de phase

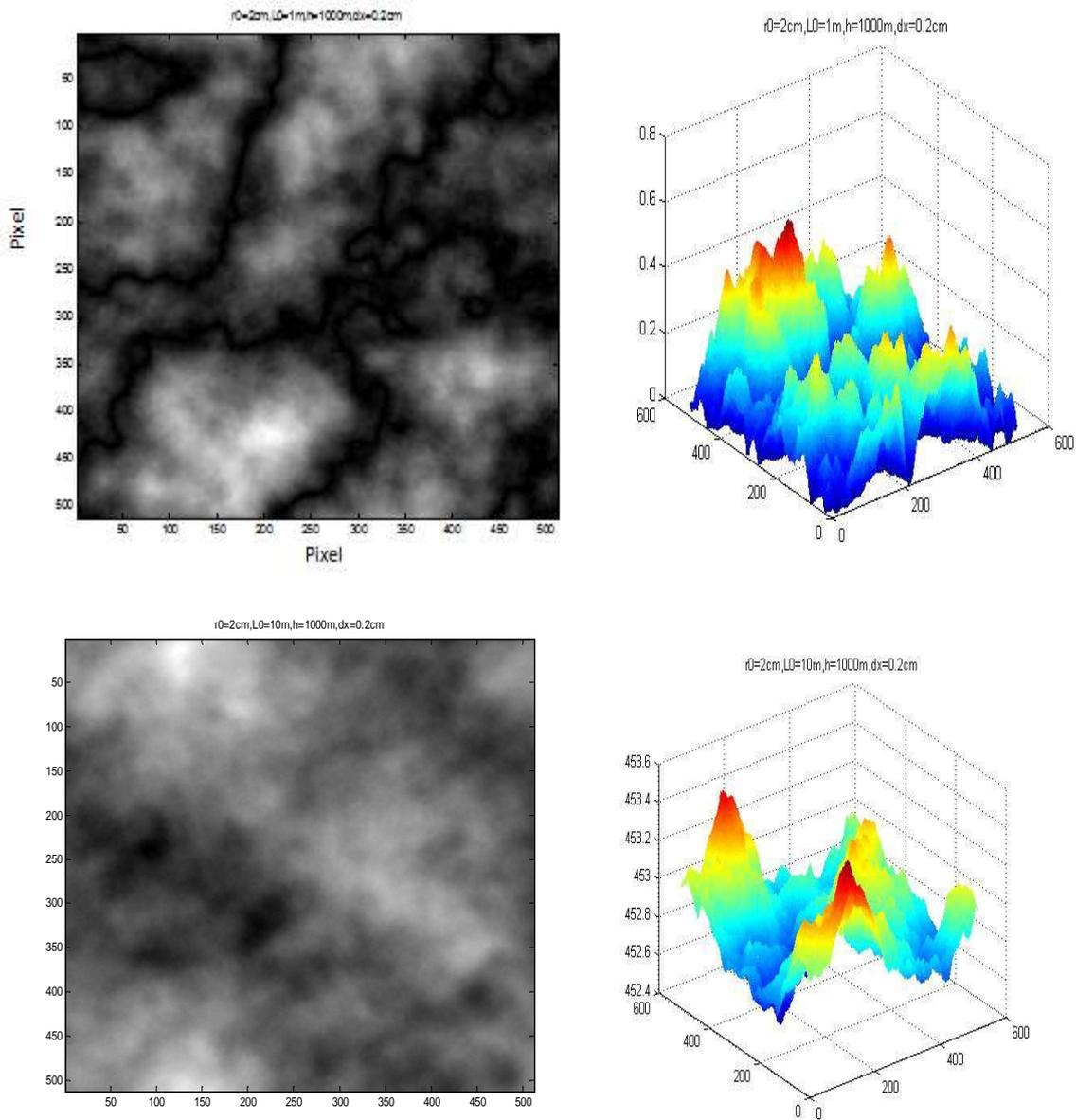


Figure (2.3) : Ecran de phase de taille (512x512) Pixels, à gauche 2D, à droite 3D pour les différentes valeurs de L_0

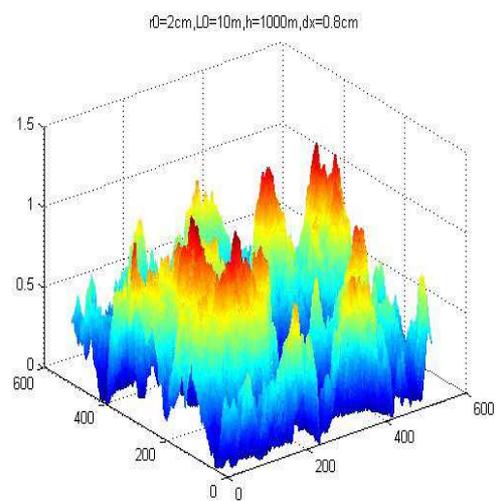
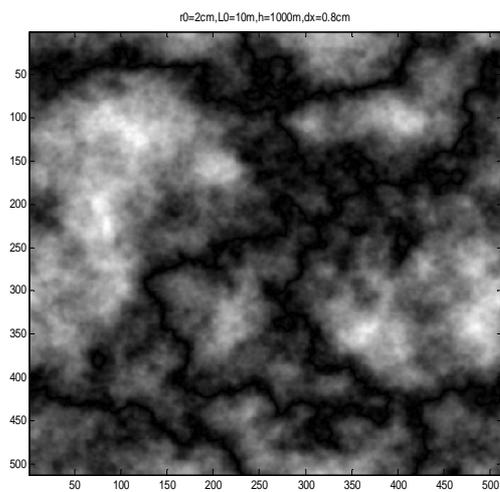
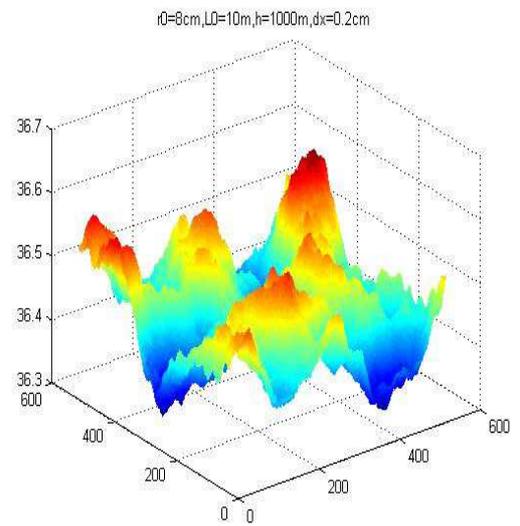
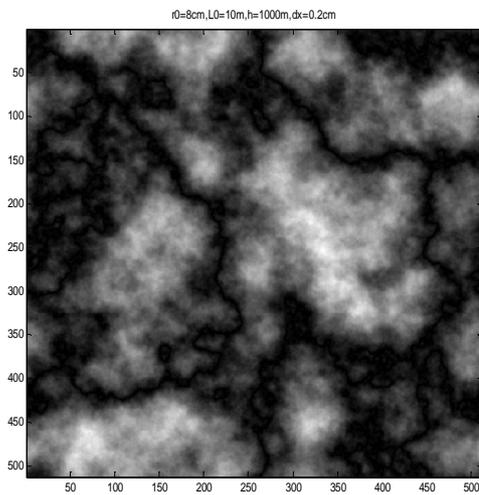
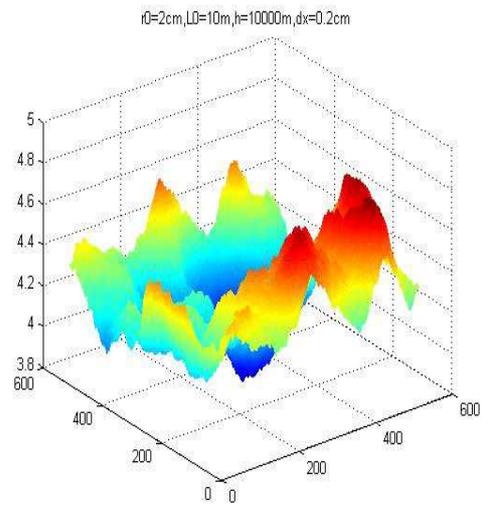
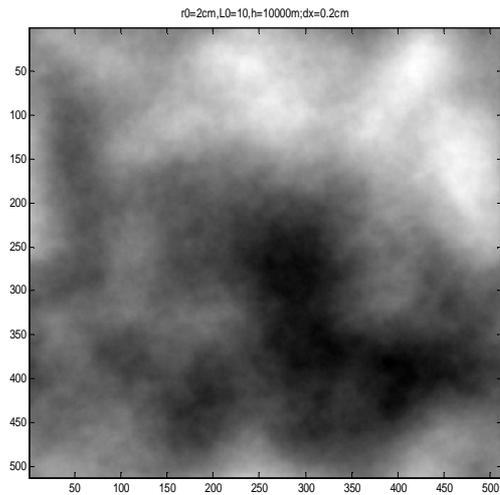


Figure (2.3) : Ecran de phase de taille (512×512) Pixels, à gauche 2D à droite 3D pour les différentes valeurs de r_0, h, dx

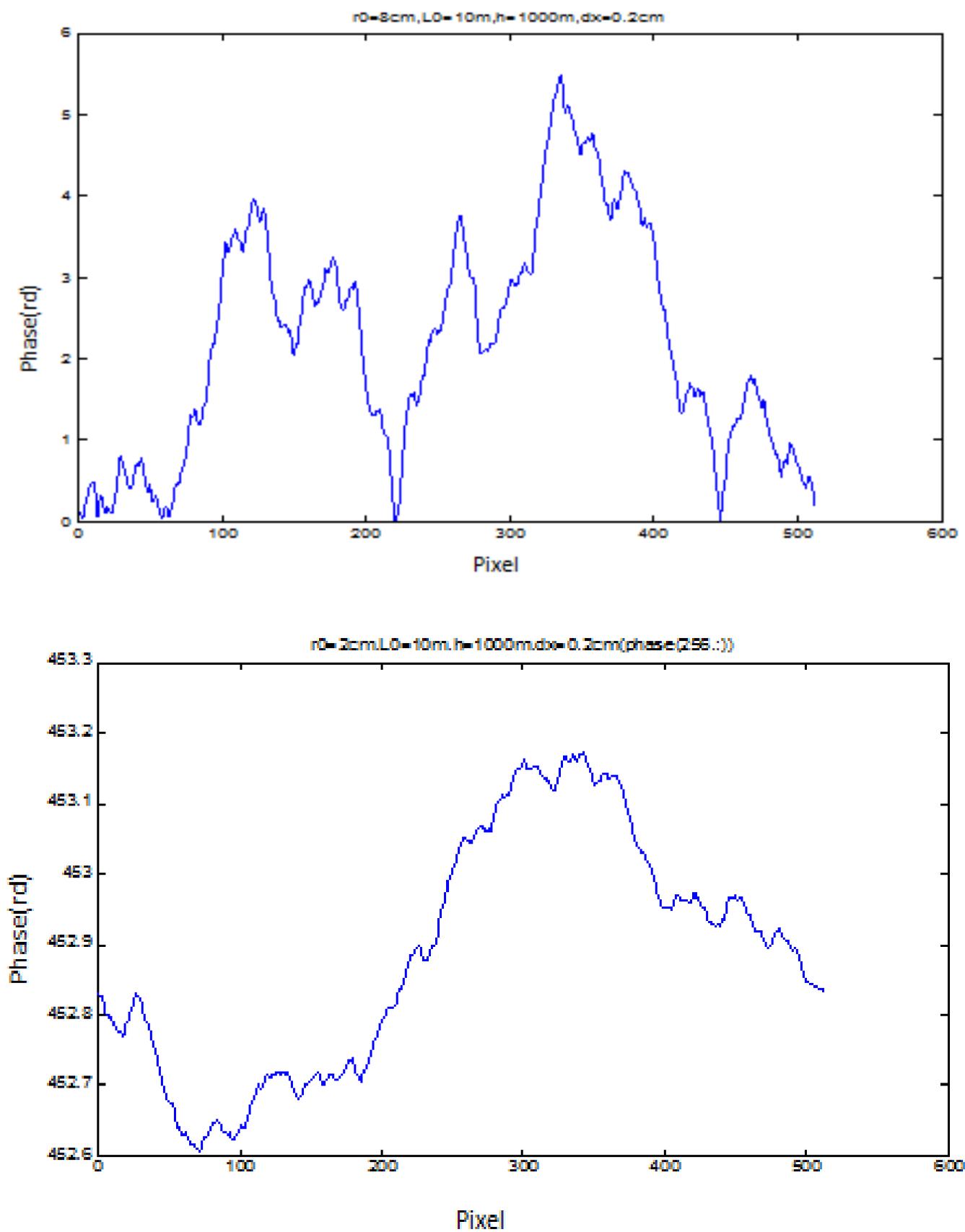


Figure (2.4) : l'influence de r_0 sur l'écran de phase

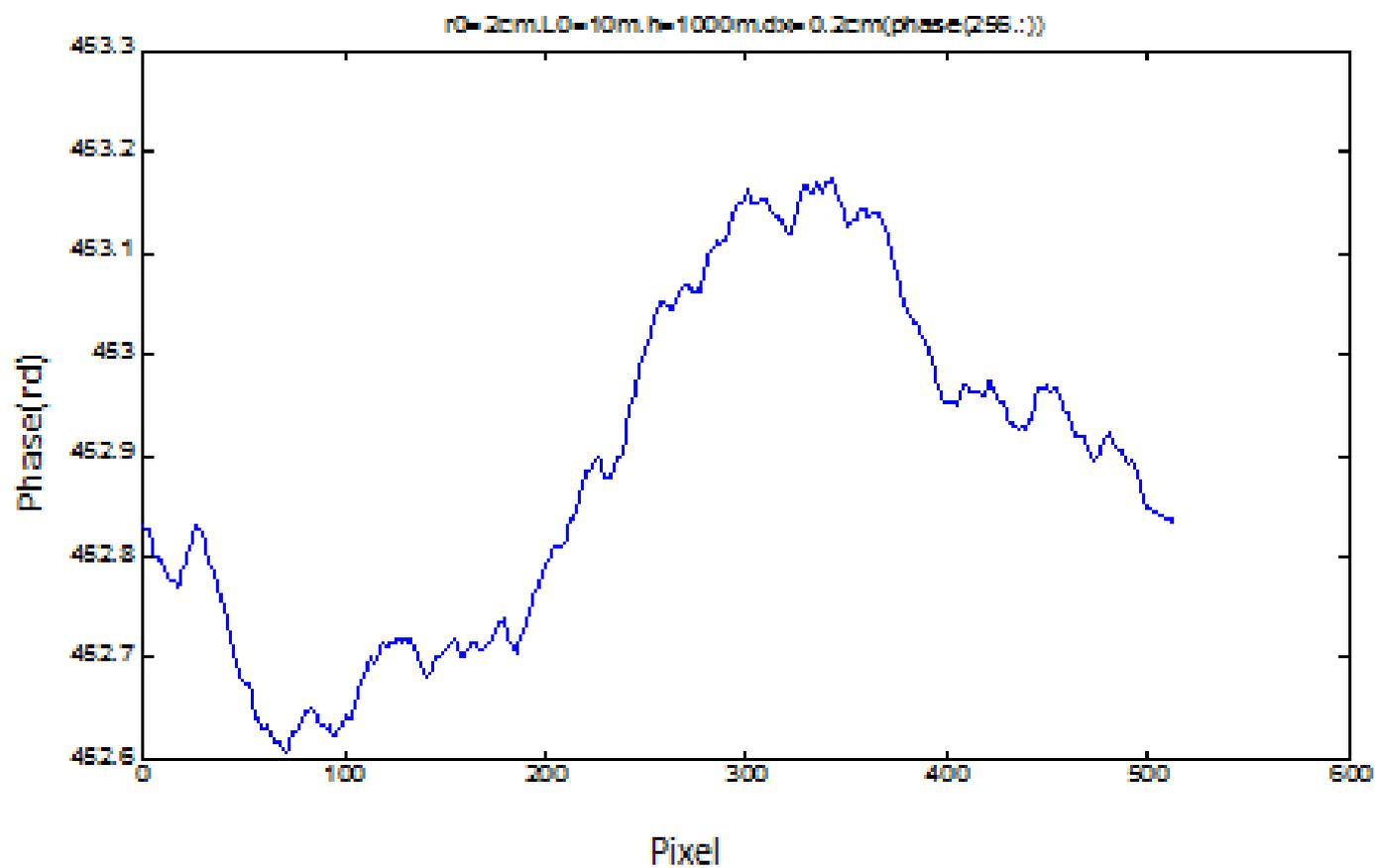
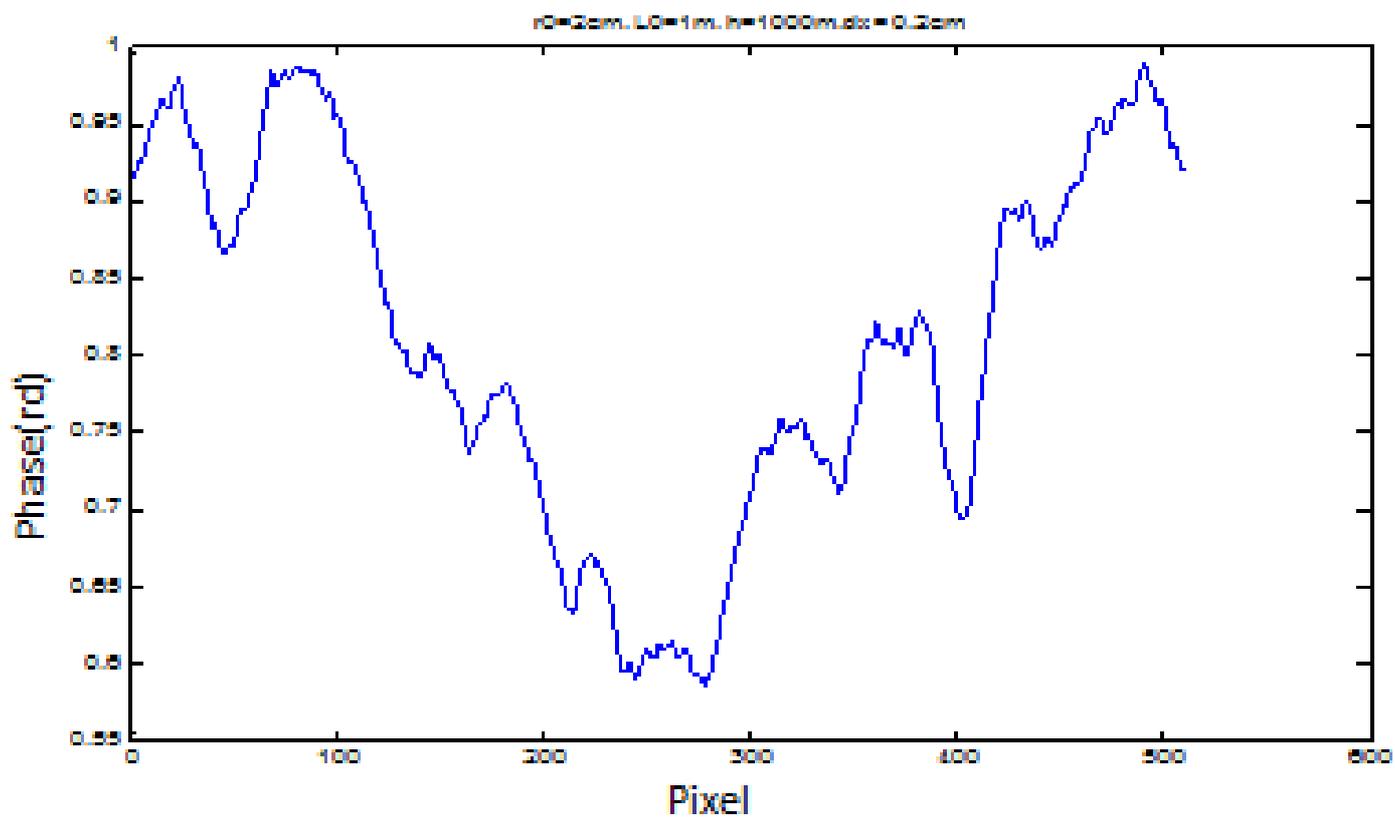


Figure (2.4) : l'influence de L_0 sur l'écran de phase

2-3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons aussi présentons les effets principaux qui conduisent à la dégradation des images obtenues à l'aide de télescope au sol tel que l'effet du système optique et l'effet de la turbulence et aussi la simulation de la turbulence atmosphérique où la variation temporelle de la turbulence atmosphérique est modélisée par l'approximation de la turbulence gelée où plusieurs écrans de phase, sachant qu'un écran de phase qui est à l'origine de la distorsion du front d'onde, où cette fonction de distorsion est la densité spectrale des fluctuations de la phase, ensuite j'ai présenté la méthode de Nakajima pour simuler des écrans de phase, cette méthode basée sur la procédure de la transformation de Fourier. Le résultat majeur de ce chapitre se concentre sur la méthode Nakajima, elle est le plus souvent utilisée pour simuler les dégradations de phase dans une direction donnée pour former des images isoplanétiques ou anisoplanétiques. Ainsi nous avons simulé l'influence des paramètres de turbulence atmosphérique sur l'écran de phase, telle que le paramètre de Fried et l'échelle externe. Nous avons que si l'écran de phase est soumis à une variation notable dans le cas où le paramètre de Fried augmente, par contre si l'échelle externe augmente la variation de l'écran de phase est très faible.

Chapitre 3

La réponse impulsionnelle (atmosphère-instrument)

Dans ce chapitre, on parlera d'abord de la formation de l'image dans le plan focal d'un télescope et cela en tenant les effets de la turbulence sur celle-ci.

3-1 Relation objet- image

Les objets lumineux observés sont en général considérés comme des sources étendues dont, leurs images sont ainsi la somme des images de chacun des points lumineux de l'objet, l'image peut être représentée comme une fonction de la position, la longueur d'onde et du temps ou de l'intensité, où la distribution d'intensité d'une image au point du plan focal image peut s'écrire dans un domaine angulaire (les perturbations atmosphériques restent corrélées (domaine isoplanétique soit quelques secondes d'arc dans la visible) par un produit de convolution entre la distribution de brillance de l'objet et la réponse impulsionnelle instantanée

$S(r, t, \lambda)$ du système télescope - atmosphère à l'instant et à la longueur λ (en anglais « Point Spread Function noté PSF (X.Rondeau 2007[42]),).

3-2 Fonction de transfert

La fonction de transfert est la relation objet- image dans l'espace de Fourier où la transformation de Fourier pour la convolution est le produit

3-3 Corrélation temporelle des speckles

Par suite de l'effet de la turbulence atmosphérique, l'image d'une source ponctuelle est une distribution aléatoire d'intensité (speckles) dans le plan focal de l'instrument, dont le temps d'évolution caractéristique est le temps de cohérence atmosphérique, en générale est de l'ordre de la centième de seconde.

🚦 Images courtes pose

L'aspect instantané de l'image dans le plan focal du télescope où le temps de pose de l'ordre de quelques millisecondes correspond par une fonction aléatoire, la relation entre l'image et l'objet qui observée donnée par une relation de convolution, (T. Sadibekova 2007[45]), :

$$I(\vec{r}, \lambda, t) = O(\vec{r}) * S(r, \lambda, t) \quad (3.1)$$

Où $I(\vec{r}, \lambda, t)$, $O(\vec{r})$ et $S(r, \lambda, t)$ sont respectivement l'image, l'objet et la réponse impulsionnelle.

La relation de convolution (3.1) s'exprime par transformation de Fourier par :

$$\hat{I}(\vec{f}, \lambda, t) = \hat{O}(\vec{f}) \cdot \hat{S}(\vec{f}, \lambda, t) \quad (3.2)$$

Où le symbole $\hat{}$ représente une transformation de Fourier et f une fréquence spatiale.

Et $\hat{S}(\vec{f}, \lambda, t)$ s'appelle la fonction de transfert de modulation instantanée

Programme 3.1 : fonctions sous MATLAB de simulation d'image courte pose

```
function psfcp = imagecourtpose(phase,P)
```

```
psfcp=(exp(sqrt(-1)*(phase))).*(P);
```

```
psfcp = fftshift(abs(fft2(psfcp).^2));
```

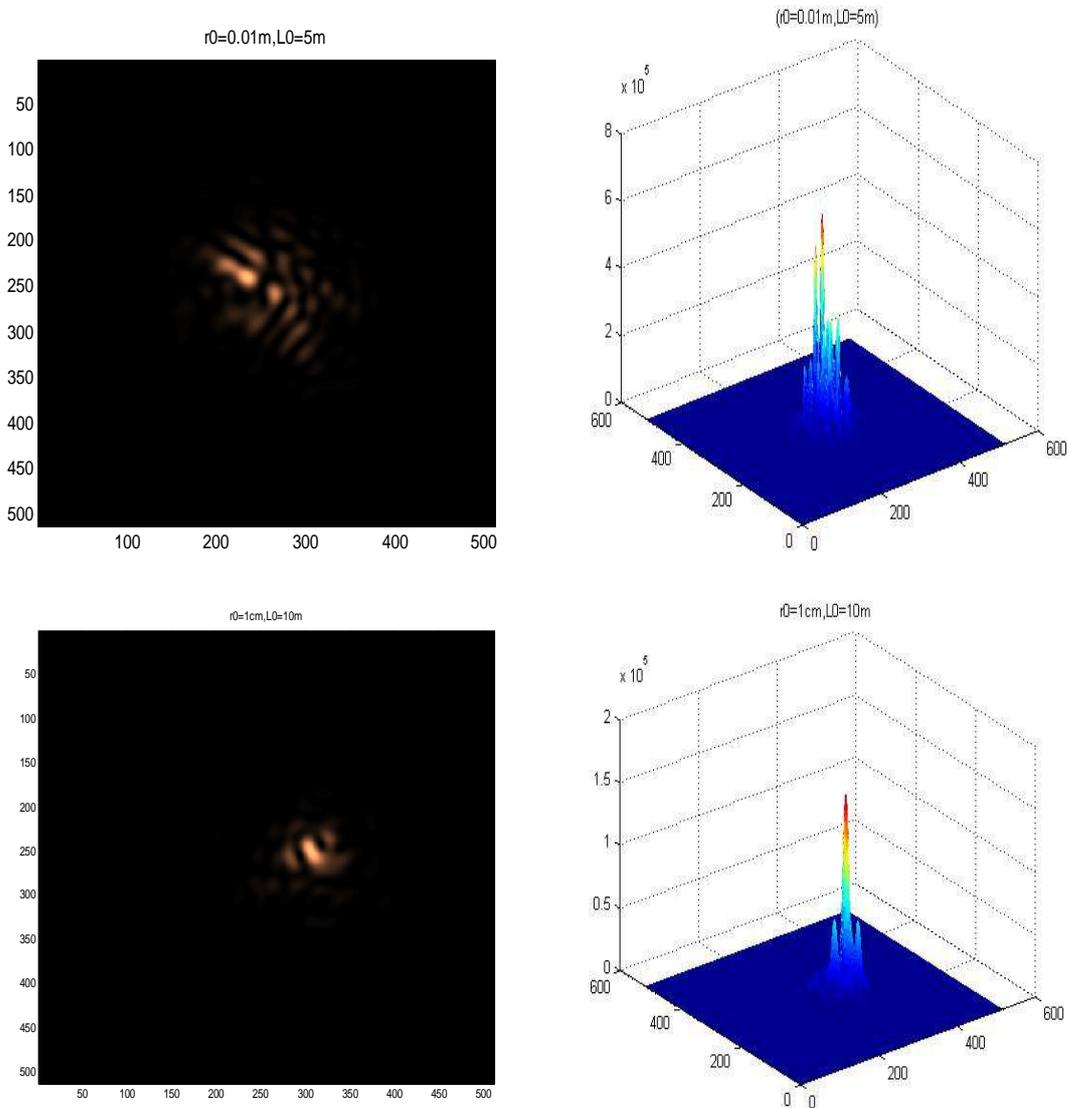


Figure 3.1 simulation des images courte pose pour différentes valeurs de r_0, L_0

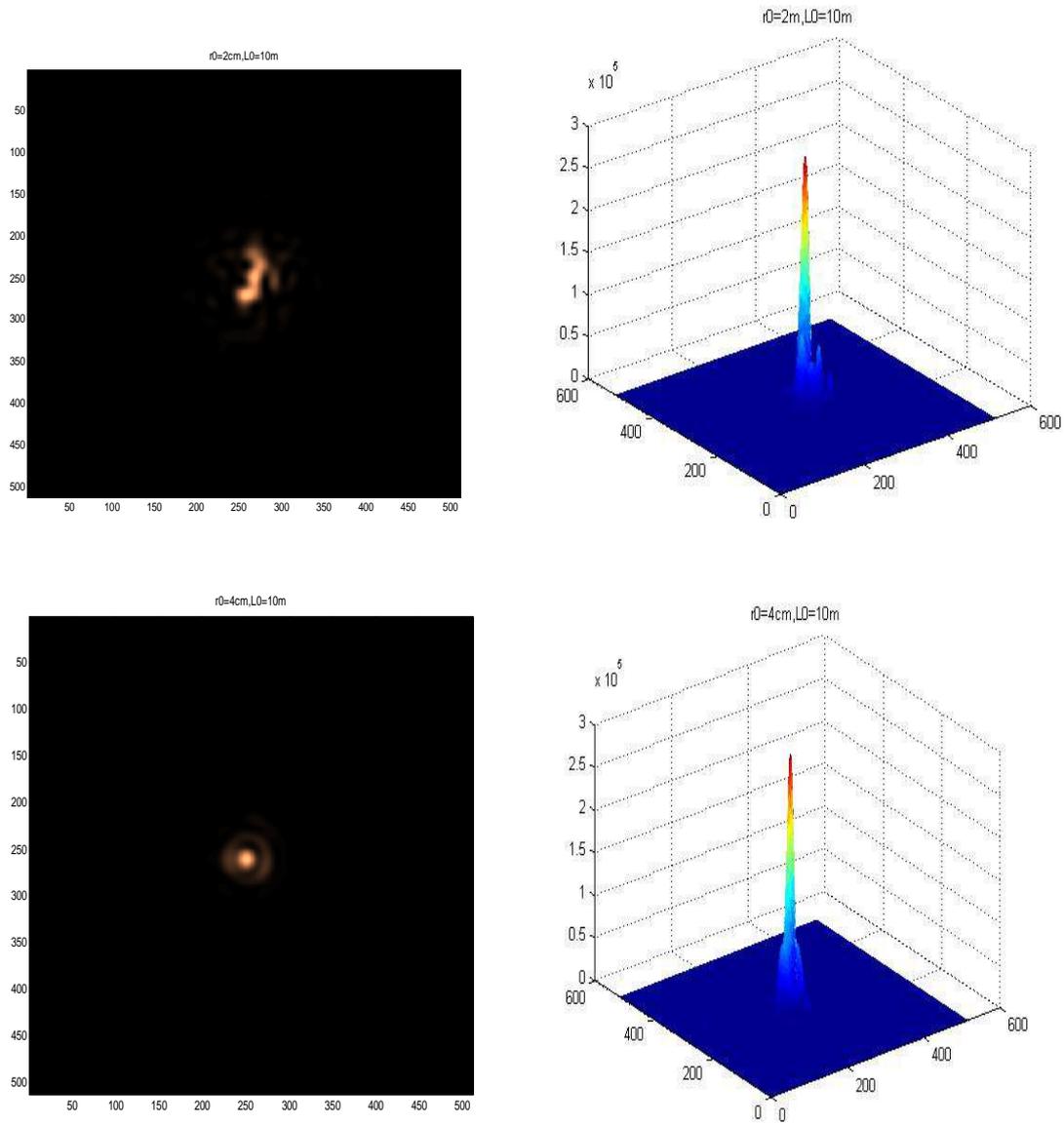


Figure 3.1 simulation des images courte pose pour différentes valeurs de r_0

Image en pose longue

La plupart des images astronomiques sont obtenues avec des temps de pose longs par rapport au temps d'évolution de l'image (τ_0), elle est basée sur la valeur moyenne d'ensemble $\langle I(\vec{r}, \lambda, t) \rangle$, compte tenu de l'équation (3.1), par (M.Lemaitre 2007[21]):

$$\langle I(\vec{r}, \lambda, t) \rangle = \langle O(\vec{r}) * S(r, \lambda, t) \rangle = O(\vec{r}) \cdot \langle S(r, \lambda, t) \rangle \quad (3.3)$$

Où $\langle S(r, \lambda, t) \rangle$ et la réponse impulsionnelle de l'ensemble constitué par le système d'observation et par l'atmosphère (PSF), donnée par :

$$\langle I(f, \lambda, t) \rangle = O(f) \cdot \langle S(f, \lambda, t) \rangle \quad (3.4)$$

Où $\langle I(f, \lambda, t) \rangle, \mathcal{O}(f), \langle S(f, \lambda, t) \rangle$ sont respectivement les transformées de Fourier de $\langle I(\vec{r}, \lambda, t) \rangle, \mathcal{O}(\vec{r}), \langle S(\vec{r}, \lambda, t) \rangle$.

$\langle S(f, \lambda, t) \rangle$ est la fonction de transfert pour les longues pose, cette fonction s'écrit par le produit de la fonction de transfert du système optique (téléscope) $T(f)$ et la fonction de transfert atmosphérique $\mathcal{C}(f)$ (W.Daliali 2007[40]).

$$\langle S(f, \lambda, t) \rangle = T(f) \cdot \mathcal{C}(f) \quad (3.5)$$

Où $\mathcal{C}(f)$ est définie par la fonction de cohérence de front d'onde donnée par :

$$\mathcal{C}(f) = \langle \varphi(r) \varphi_0(r + \lambda f) \rangle = C_\varphi(\lambda f) = \exp\left(-3.44 \left(\frac{f}{r_0}\right)^{5/3}\right) \quad (3.6)$$

$T(f)$ est définie par l'autocorrélation de la fonction d'ouverture de la pupille et donnée par l'équation (2.2)

Programme 3.2 : fonctions sous MATLAB de simulation d'image longue pose

```
function psflp = imagelonguepose(n,s,f,r0)
P = pupile(s,n);
psf = fft2(P);
psf = sqrt(real(psf).^2+imag(psf).^2);
psf = fftshift(psf);
psf = psf/sum(psf(:));
tpsf = ifft2(psf);
dspphi=(6.88*r0^(-5/3)*(f*lambda)^(5/3));% La fréquence spatiale
fsphi =exp(-1i/2*dspphi);

ou`
fsphi =exp(-3.44i*r0^(-5/3)*(f2*lambda)^(5/3));
psflp = fft2(tpsf.*fsphi);
psflp = sqrt(real(psflp).^2+imag(psflp).^2);
```

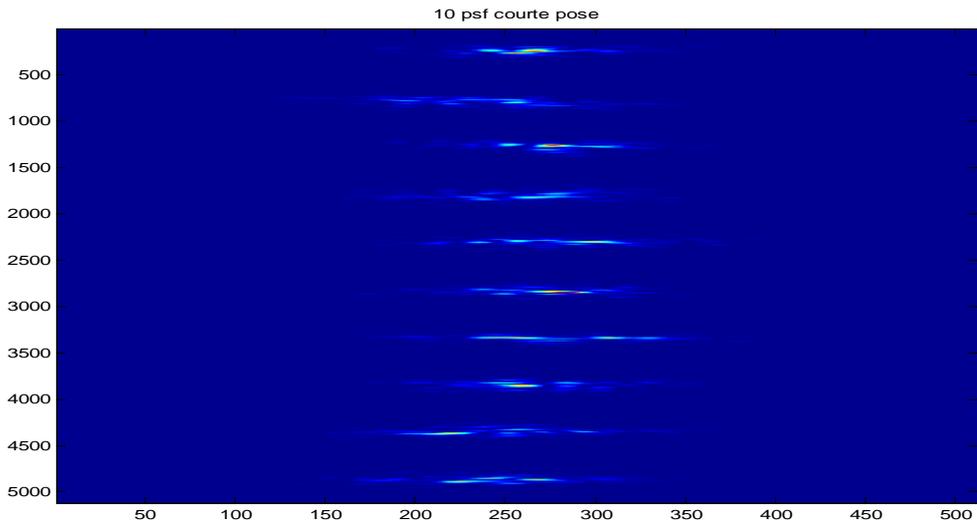
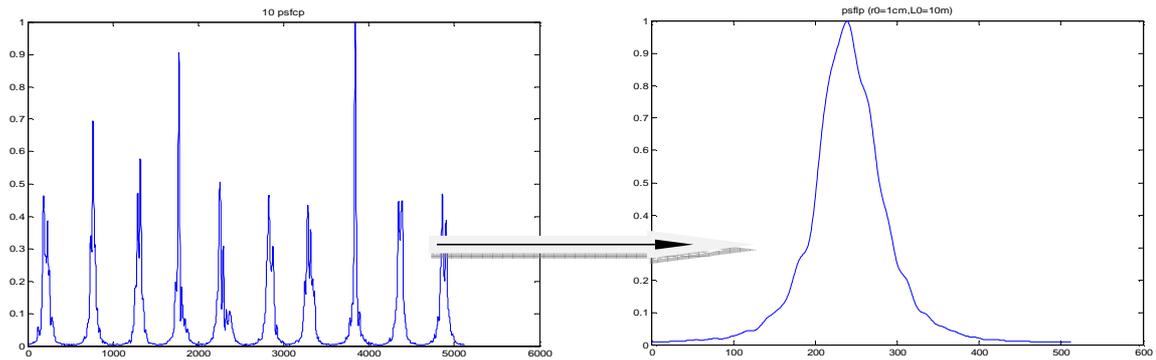


Figure 3.3: sommation des images courte pose 2D



Somme des courtes poses

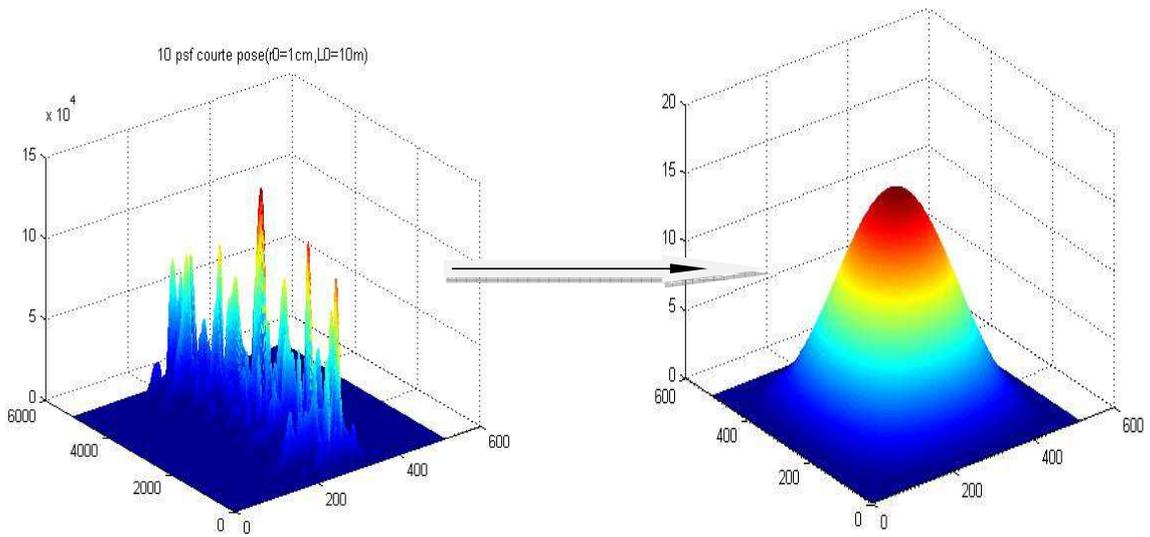


Figure 3.3: simulation des images longue pose

3-4 La résolution angulaire

Les rayons sur la pupille du télescope subit une diffraction dans tous les sens, le produit de cette diffraction qui est focalisé par l'optique du télescope pour former l'image de l'objet observé, l'image au foyer du télescope d'une source éloignée est une tache appelée tache d'air y, l'image instantanée (courte pose) n'est pas alors plus une tache d'air y mais est une figure de taveurs (spectrales) formée de plusieurs taches, varie dans le temps et finit par former en longue pose une tache de diffraction qui est plus étendu que celle du télescope seul (figure) (X. Rondeau 2007[42])

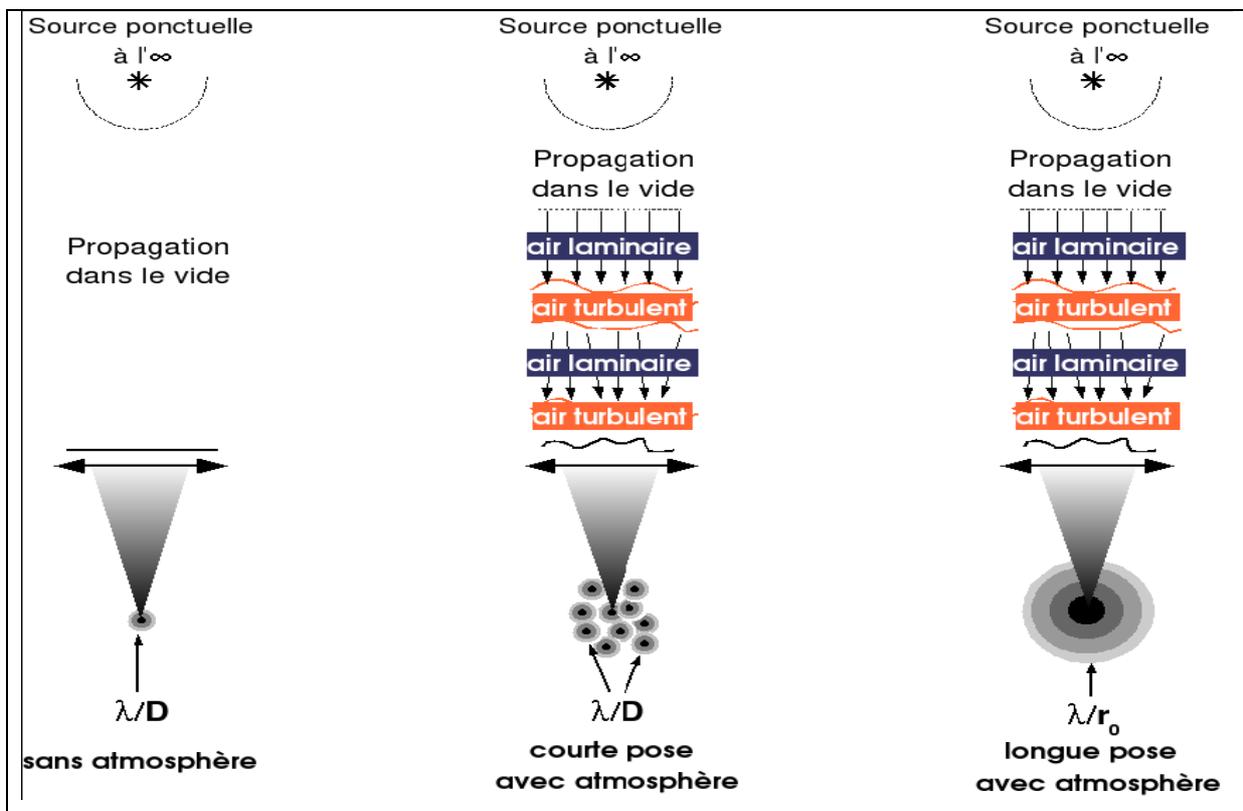
La résolution angulaire théorique dans l'image instantanée (courte pose) est donnée par la taille à mi – hauteur de la tache d'air y (FWHM) ; avec :

$$FWHM = 1,22 \frac{\lambda}{D} \quad (3.7)$$

Où λ est la longueur d'onde observée et D le diamètre du télescope (diffraction).

Sur une image longue pose la largeur à mi – hauteur (FWAM) la résolution angulaire théorique est liée au paramètre de Fried donné par la relation figure (1.4):

$$FWHM = 0,97 \frac{\lambda}{r_0} \quad (3.8)$$



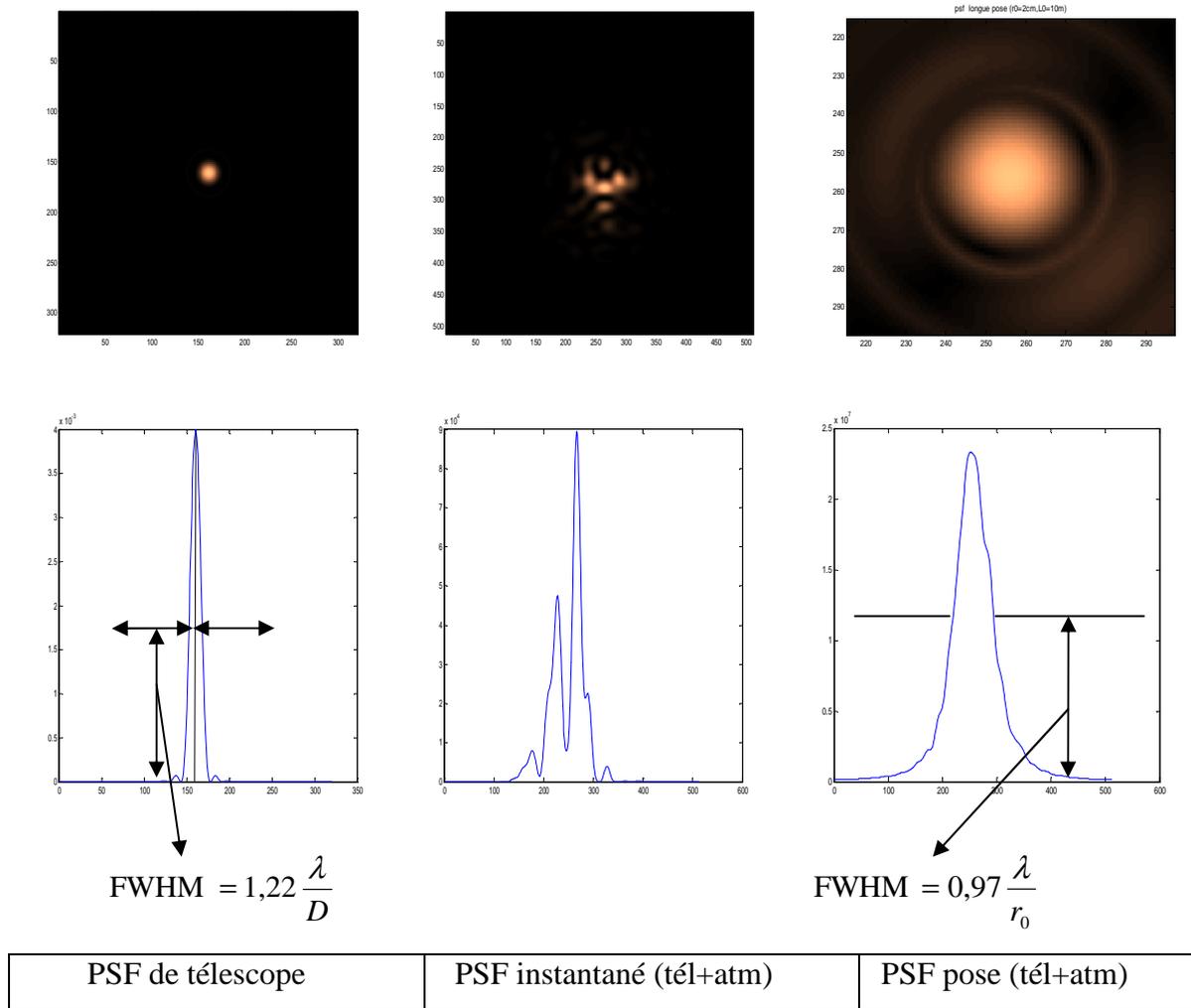


Figure 3.3 la résolution angulaire

3-5 Anisoplanétisme et isoplanétisme

L'observation d'un objet quelconque : il s'agit que cet objet émit les rayons lumineux (ondes), ces derniers sont dégradés selon les zones de turbulence. Deux cas peuvent alors se présenter (M..Lemaitre 2007[21]):

1. Si l'angle θ apparent de l'objet observé est grand, c.à.d. les rayons émis par l'objet observé seront perturbés par des dégradations atmosphériques complètement différentes. Cela se traduit par une réponse impulsionnelle différente (PSF différente), on parle alors d'anisoplanétisme total.
2. Si l'angle θ apparent de l'objet observé est petit, c.à.d. les rayons arrivants ont traversé les mêmes régions (la même perturbation atmosphérique) c.à.d. l'objet observé est convoler par la même PSF ; c'est l'isoplanétisme ou anisoplanétisme faible.

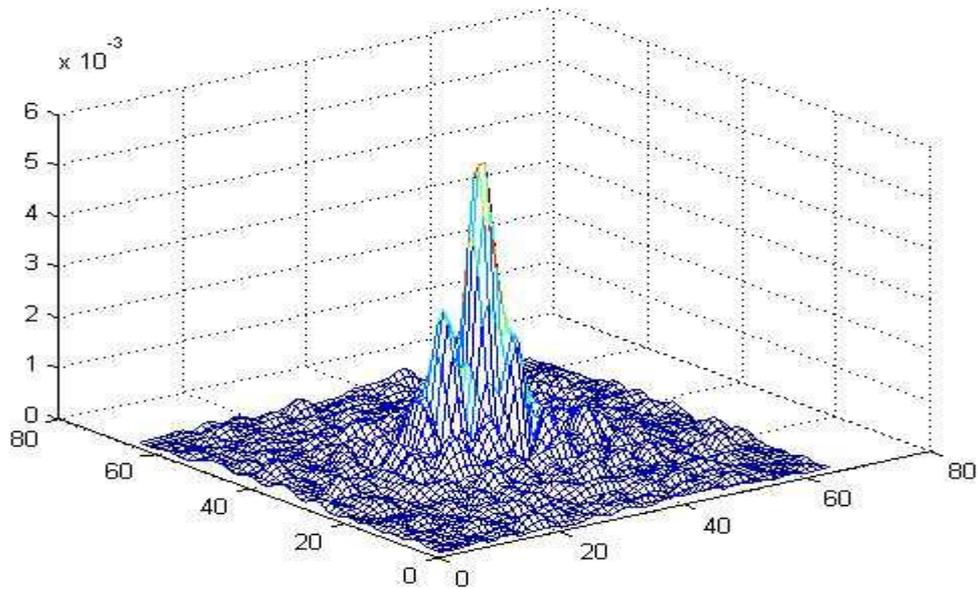


Figure 3.4 PSF pupille atmosphère

3-6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons effectué une modélisation théorique ainsi qu'une simulation numérique des effets de la turbulence atmosphérique sur des images obtenues en pose longue et en pose courte pour restaurer les hautes résolutions angulaires, ainsi comme les images sont dégradées par des zones de la couche turbulente nous avons discuté l'isoplanétisme et anisoplanétisme. Les résultats majeurs de ce chapitre se résument comme suite :

- 1- Si le paramètre de Fried $r_0 > D$ il y a seulement la diffraction et on obtient alors une tache d'Airy et si $r_0 < D$ on voit alors apparaître une structure éclatée en petits grains lumineux ou sombres appelés tavelures ou speckles.
- 2- les images obtenues est telles conditions, l'isoplanétisme (c.à.d. que tous les pixels de l'image obtenue seront dégradés par la même réponse impulsionnelle (PSF)) ce cas très rarement observable, mais il est plus simple à simuler, il va falloir générer le même front d'onde pour chaque pixel, soit par de l'anisoplanétisme, contrairement à l'isoplanétisme où chaque pixel de l'image obtenue sera dégradé par une réponse impulsionnelle (PSF) différents et ce cas très courant et il est généralement observable, mais il est le plus difficile à simuler, il va falloir générer un front d'onde différent pour chaque pixel.

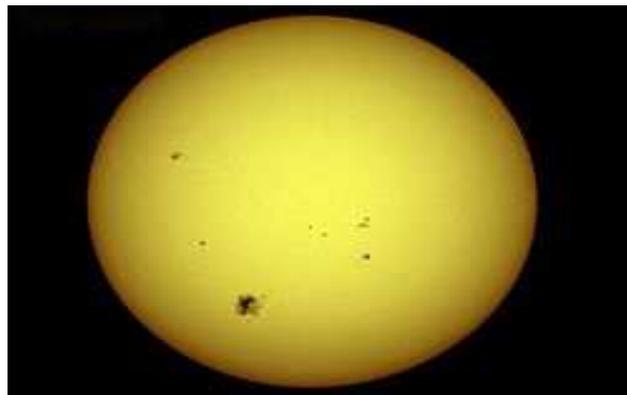
Chapitre 4

Simulation du bord solaire

La simulation est un moyen important pour générer les effets de la turbulence atmosphérique sur les images du bord solaire (l'agitation et l'étalement), ainsi pour estimer les paramètres des qualifications des images (les paramètres de la turbulence atmosphérique et le profil de turbulence). Les images de bord solaire longue ou courte pose sont dégradées par l'optique de l'instrument, et au cours de la traversée de l'atmosphère.

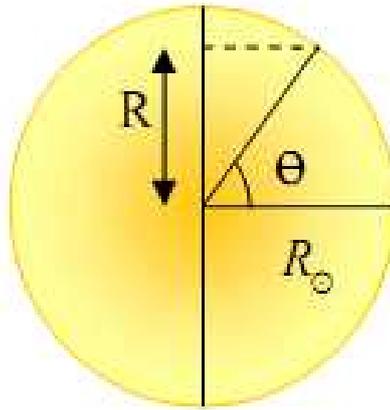
4-1 L'assombrissement centre – bord

On sait que le soleil étant une sphère gazeuse où la densité et la température dans les couches externes moins que les couches internes, ce qui met le rayonnement de bord sera moins intense qu'au centre. En effet, un rayon partant du centre et allant vers nous, traverse moins les couches externes (l'atmosphère solaire) qu'un rayon partant du bord (couche externe) ; il a donc moins de chance d'être observé. Le bord alors plus sombre que le milieu du disque. C'est l'assombrissement centre – bord (Limb darkening) (A.berdja 2007[7,]), (W.Daliali 2007[40]) ; pour ça, nous observons le soleil dans le ciel comme un disque est plus brillant qu'au voisinage du limbe.



Le soleil. Une image de la photosphère prise le 07 juin 1992.

Les mesures expérimentales de l'intensité de chaque point \mathbf{R} de disque solaire se basent sur un modèle d'assombrissement centre – bord qui se présente sous la forme d'une empirique ; ce modèle qui correspondant par la fonction de $\mu = \cos\theta$ où θ est l'angle d'une position choisie de la surface solaire et les longueurs d'onde. Les mesures d'intensités (approximation de la fonction centre – bord pour des longueurs d'ondes différentes), nous montrent des incertitudes lors de la détermination du diamètre, de plus le diamètre observé au domaine radio est environ huit fois plus grand que celui observé aux domaines visibles (A.Vigoureux [46]).



Où: $R_{\odot} = 960.53''$.

Figure 4.1 : schéma montrant l'assombrissement centre bord

La qualité et la nouveauté des données obtenues grâce aux caméras CCD (permettant des à présent de donner) sur le diamètre solaire observée donne une idée sur les effets atmosphériques. En d'autres termes, l'influence des effets atmosphériques sur l'observation.

4-2 Les modèles d'assombrissement centre – bord

On étudie l'assombrissement centre – bord par un modèle où le modèle souvent adapté est celui avec une distribution d'intensité donnée par une loi polynomiale écrite sous la forme H.Neckel & (D. Labs 1994[47])

$$I(\lambda, R) = I(\lambda, 0) \sum_{j=0}^N a_j \mu^k \quad (4,1)$$

Où $I(\lambda, 0)$ et a_j sont les constantes du modèle et μ le cosinus de l'angle entre la normale et la direction d'observation, tout en sachant que.

$$\mu = \cos\theta = \sqrt{1 - \left(\frac{R}{R_{\odot}}\right)^2} \quad (4,2)$$

R : est le rayon angulaire dans la distribution θ des rayonnements incidents et dont l'origine correspond au centre du disque solaire apparent.

$R_{\odot} = 959,63$ est le rayon angulaire du disque solaire défini pour une distance d'une unité astronomique ($1 \text{ AU} = 1,495979 \cdot 10^{11} \text{ m}$) et $I(\lambda, 0)$ est l'intensité au centre du disque solaire. Mais pour nos simulations, on prendra une valeur approximative de $R_{\odot} = 960''$.

Une autre loi empirique peut réécrire ces fonctions de manière très simplifiée et qui ne dépend que d'un seul paramètre qu'on appelle d'Hestroffer – Magnan (D. Hestroffer & C. Magnan 1998[49]) s'écrit :

$$I(\lambda, R) = I(\lambda, 0) \times \left(1 - \left(\frac{R}{R_p}\right)^2\right)^{\frac{\alpha(\lambda)}{2}} \quad (4.3)$$

$\alpha(\lambda)$ est un coefficient qui s'obtient par les deux équations (4.1) et (4.3) (paramètre d'Hestroffer – Magnan).

Les deux modèles sont numériquement presque équivalents et vous donnent un bon ajustement aux valeurs réelles (mesurées) de l'assombrissement centre – bord. On utilisera dans notre étude pour les simulations numériques des images du bord solaire le deuxième modèle qui est déterminé par l'équation (4.2). La valeur de α est donnée par Neckel et Labs pour des longueurs d'ondes données (H.Neckel 2005[48]).

Le tableau suivante donne certaines valeurs de α par rapport à λ

λ (nm)	α
303.327	0.967
385.202	0.808
416.320	0.712
477.435	0.588
526.535	0.542
601.015	0.464
710.425	0.368

Table (4.1) : les valeurs de longueur d'onde et du paramètre d'Hestroffer- Magnan (α)

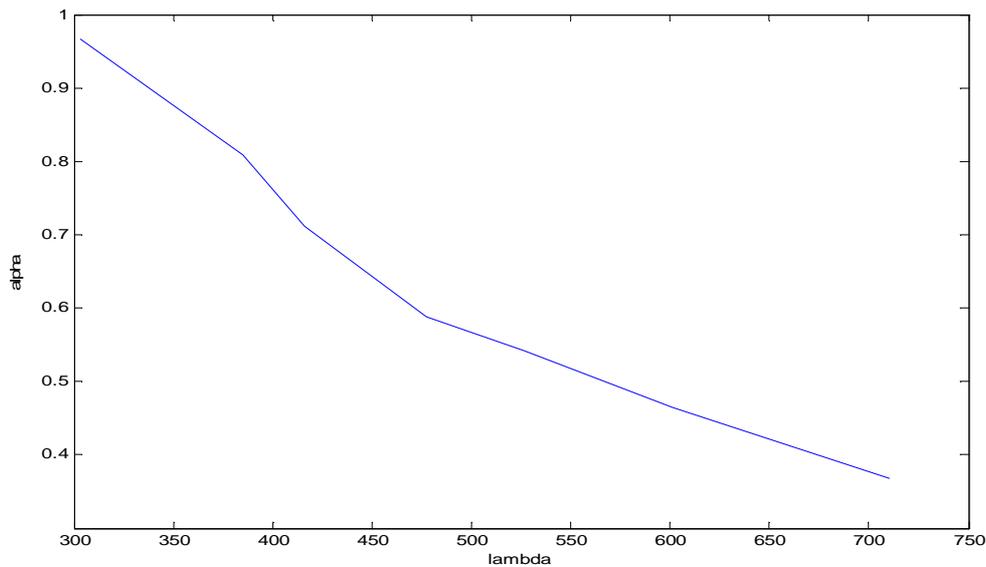


Figure (4.2) : la relation entre λ (nm) et la valeur du paramètre d'Hestroffer- Magnan (α)

4-3 L'imagerie numérique

L'image d'un objet sur le plan d'observation (produit par un système optique) est la distribution d'intensité lumineuse. Cette image est enregistrée par une caméra équipée d'une matrice de détecteurs bidimensionnels (CCD) (Charged Coupled Device dispositifs à transfert de charge), au nombre fini ($n \times p$) d'éléments sensibles appelés pixel, consiste dans la génération et le transfert de charges, la quantité de charges étant proportionnelle à l'intensité du rayonnement incident. Alors une image numérique est un signal 2D constitué de lignes et de colonnes (matrice à 2D) où la valeur d'un pixel représente l'intensité lumineuse spatialement localisée sur les coordonnées de ce pixel (dx, dy), la résolution d'une image est la taille de l'image en terme de nombre de lignes et nombre de colonnes ((N_x, N_y)).

En principe, l'échantillonnage nécessite le respect des conditions de simulation, L'échantillonnage est une opération primordiale avant tout traitement numérique de l'image, si la taille de l'objet observé est fixe, son image peut être variable selon l'échantillonnage, si le nombre de pixel est plus grand l'image d'un objet est plus nette, pour atteindre un échantillonnage, il faut calculer la focale de l'instrument ou d'un montage optique, à partir d'une image, en mesurant la taille en pixels par la formule (W.Daliali 2007[40]):

$$F(\mu m) = \frac{206 * \text{taille du pixel du CCD en } \mu m * \text{taille de l'objet}}{\text{diamètre apparent de l'objet en seconde d'arc}}$$

Et alors l'échantillonnage se calcule par la formule :

$$E(\text{en secondes d'arc par pixel}) = 206 * \frac{\text{taille du pixel du capteur en } \mu m}{\text{focale totale en mm}}$$

Cependant, les fronts d'ondes arrivant sur la pupille de l'instrument subissent une diffraction de Fraunhofer, celle-ci étant circulaire. On observe pour des objets ponctuels des tâches d'Airy dans le plan focal.

Il faut que la fréquence d'échantillonnage d'un signal soit égale ou supérieure au double de la fréquence maximale contenue dans ce signal (la fréquence de coupure de l'instrument).

$$f_c = \frac{D}{\lambda}$$

Où D est le diamètre de la pupille et λ est la longueur d'onde.

Selon la condition de Shannon :

$$f_e \geq 2f_c \Rightarrow E \leq E_{max} = \frac{\lambda}{2D}$$

4-4 Image d'un bord solaire

Pour définir du bord solaire, il est nécessaire de bien définir le modèle de turbulence optique, la réponse impulsionnelle de l'instrument et le modèle d'assombrissement centre – bord.

En début pour approximation en considérant un bord sous la forme d'une fonction de Heaviside ; c'est-à-dire un bord qui ne présente pas d'assombrissement centre – bord continu comme le soleil mais la discontinuité de l'intensité dans cette fonction s'appliquant à un corps solide, sans atmosphère et aussi on considère la turbulence optique isoplanétique (ne considérer que la contribution de la turbulence proche du sol).

Pour la simulation d'un bord solaire, on ne considère qu'une coupe de l'image dans le sens (centre – bord) ce qui revient à ne prendre qu'une colonne sur l'image obtenue avec un CCD.

L'image du bord dans le champ de vision du télescope est définie dans un repère cartésien d'angles θ_x dans le sens centre – bord et θ_y dans le sens parallèle au bord, où $\theta_x = dx \dots$

Dans cette simulation du bord solaire nous utilisons quelques paramètres avec lesquelles on peut distinguer l'image (instrument d'observation par exemple la taille d'image, la valeur alpha).

Programme 4.1 : fonctions sous MATLAB de simulation de bord solaire

```
function img = (Nx,Ny,alpha,R0,dx,dy)
```

```
for j = 1:Nx
```

```
    for i = 1:Ny
```

```
        x1=(i-Nx2)*dx;
```

```
        y1=(R0-(Ny2-j)*dy);
```

```
        r=sqrt(x1.^2+y1.^2);
```

```
        I0=(1-(r/R0)^2)^(alpha/2);
```

```
        if r>R0
```

```
I0=0;  
end  
img(i,j)=I0;  
end  
end
```

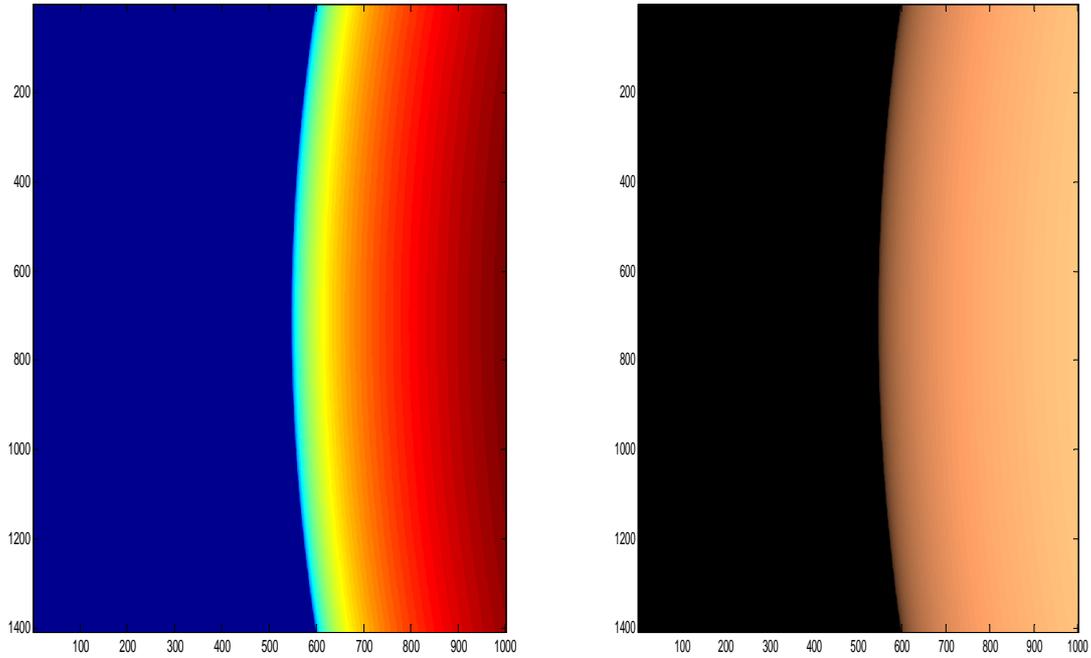


Figure (4.3) : L'image du bord du Soleil de taille (1000 x1400) Pixels par la fonction d'assombrissement

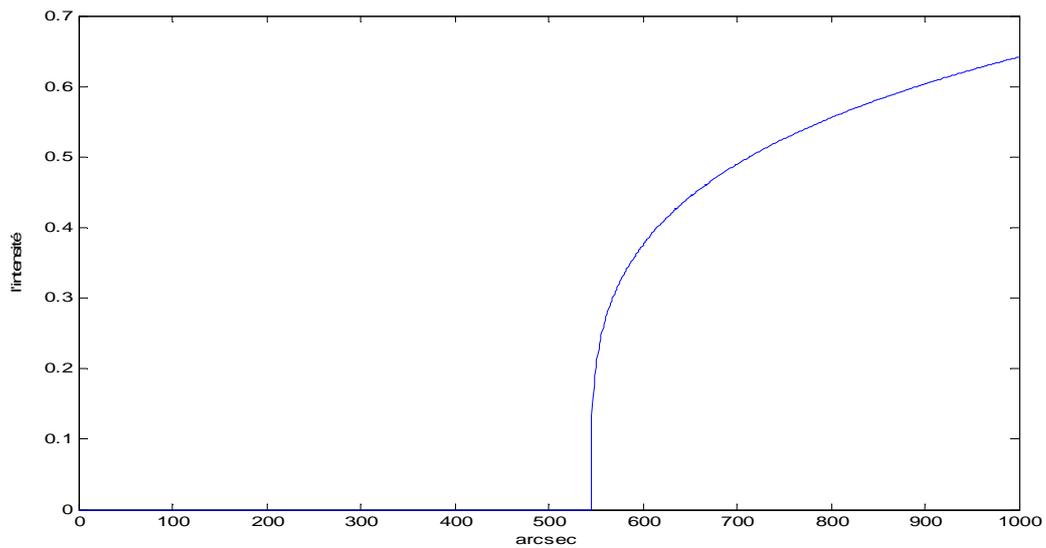


Figure (4.4) : coupe transversale dans l'image du bord solaire

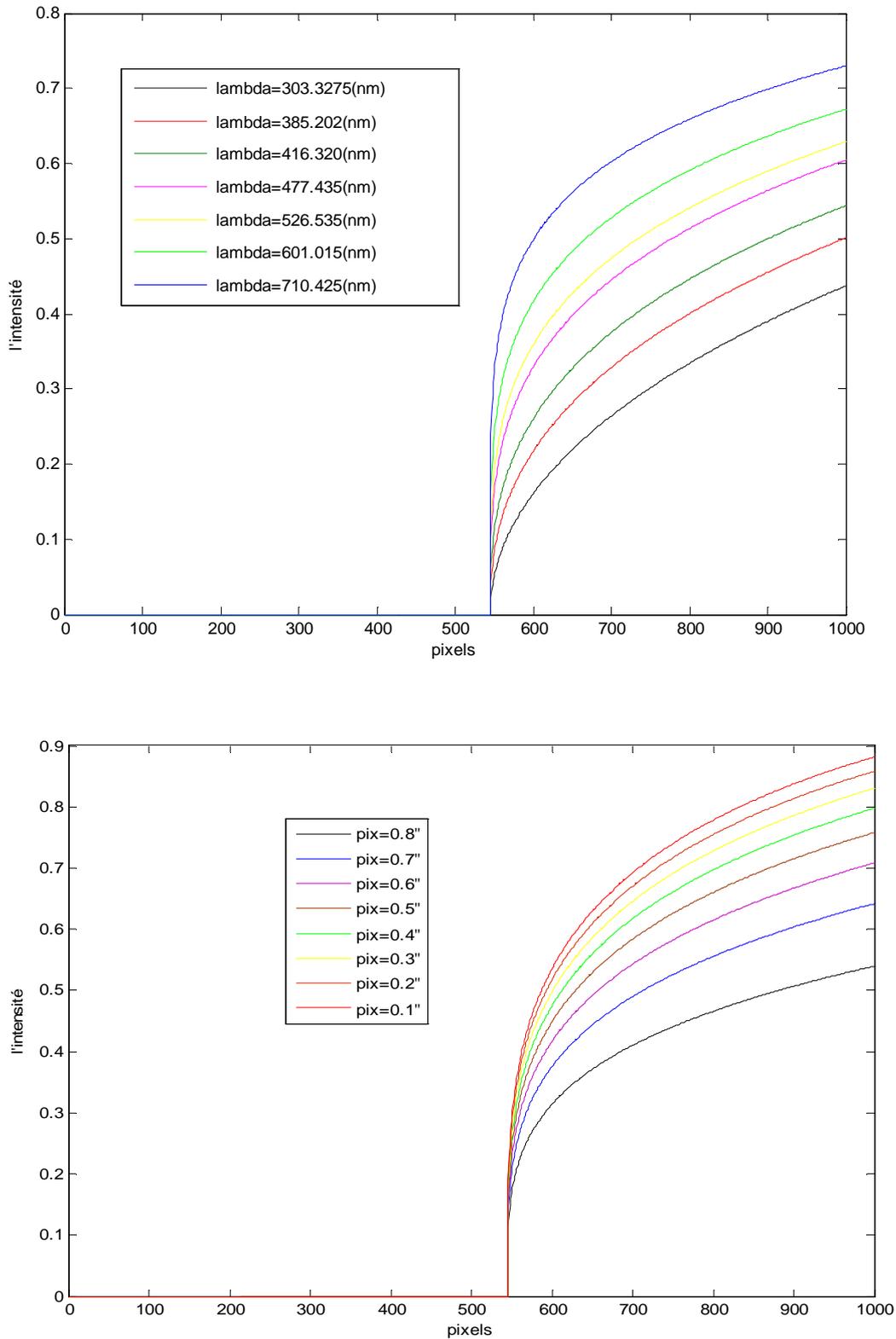


Figure (4.5): la variation du bord solaire avec différents échantillonnage angulaire et différents longueur d'onde.

On sait que l'image au foyer du télescope est le produit de convolution entre la distribution d'intensité de l'objet et la réponse impulsionnelle instantanée (PSF), donnée à une dimension par l'équation (2.1)

Programme 4.2 : fonction sous MATLAB du bord solaire au foyer du télescope

```
function imgt= (img,n,s)
P = pupilles(s,n);
psf= psf = tached' Airy(P)
imgt=conv2(img,psf,'same');
```

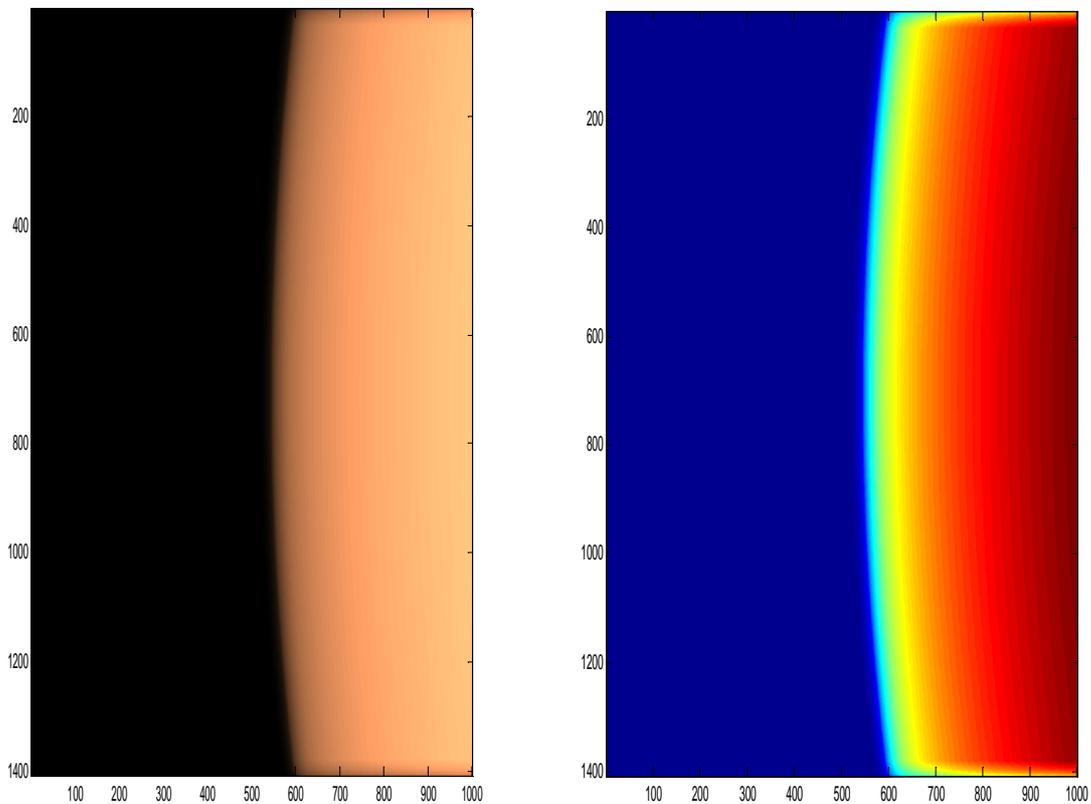


Figure (4.6) : L'image du bord solaire à cause l'effet instrumental

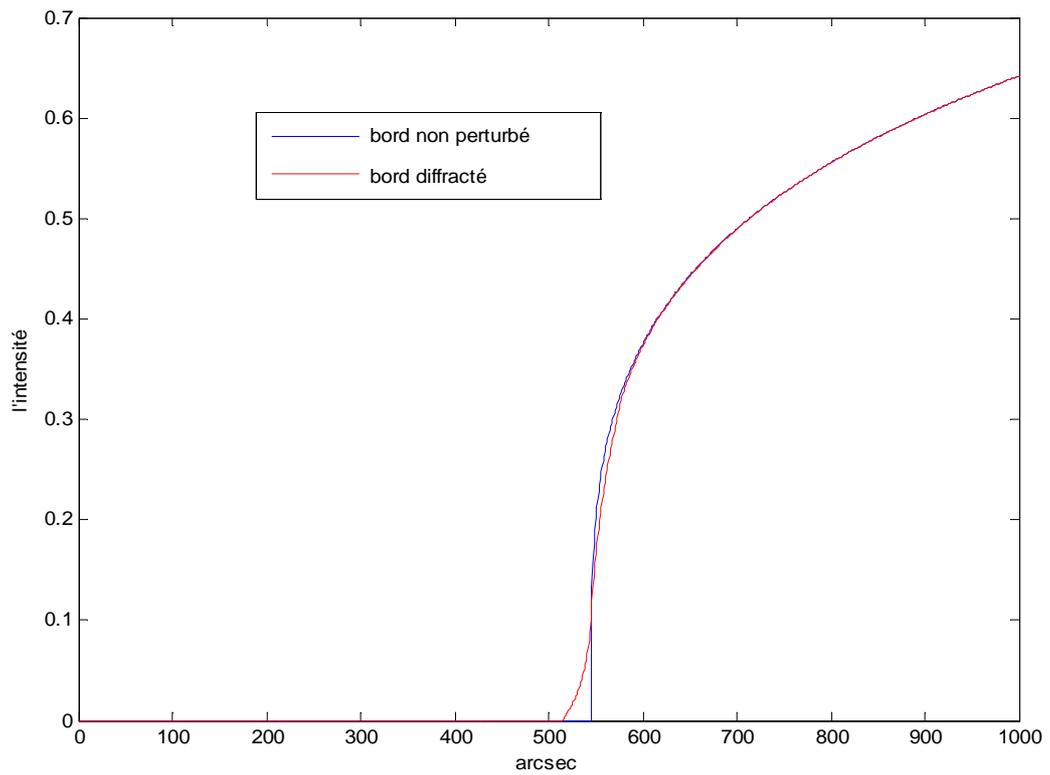
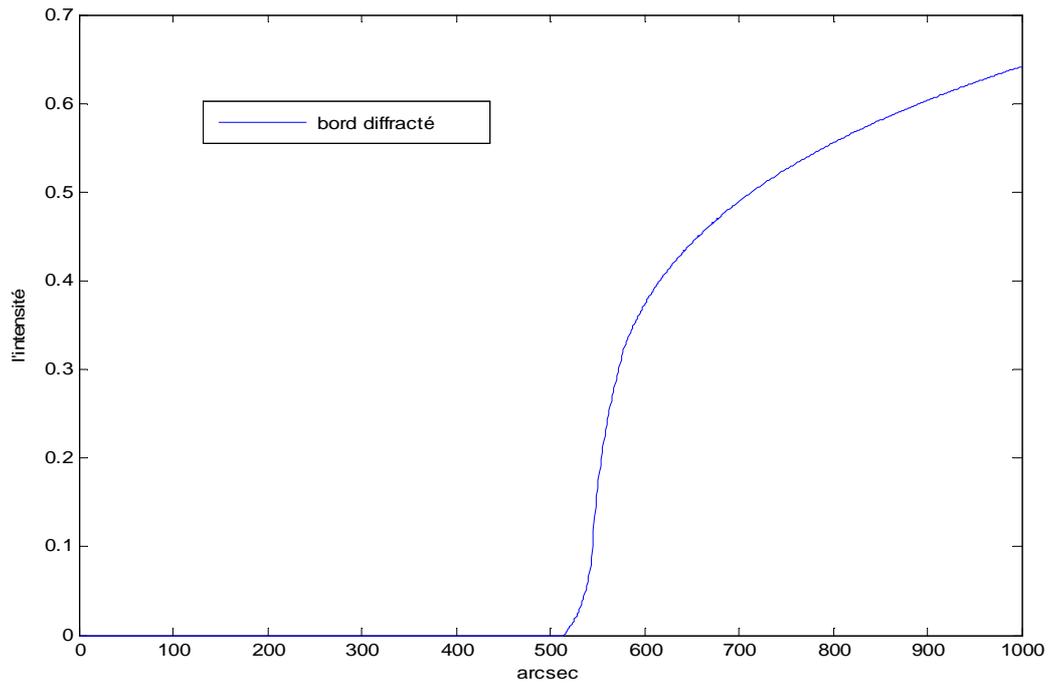


Figure (4.7) : l'effet de la diffraction sur le bord solaire "effet instrumental"

Pour plus de précision, l'effet de la turbulence optique sur des images instantanées du bord dans le cas isoplanétique se partage par deux phénomènes.

Le premier est visible s'appelle l'étalement à cause de longueur angulaire moyenne des PSF instantanée et le deuxième s'appelle l'agitation par rapport à une position moyenne de ce bord étalé et pour mesure, ce dernier est mesuré par la position du point d'inflexion (représente la position où la variation d'intensité est la plus forte). (A.Berdja 2007[7]).

Programme 4.3 : fonctions sous MATLAB de bord solaire en courte pose

```
function imgd= (img,phase,P)
psfcp = imagecourtpose(phase,P)
imgd = conv2(img,psfcp,'same');
```

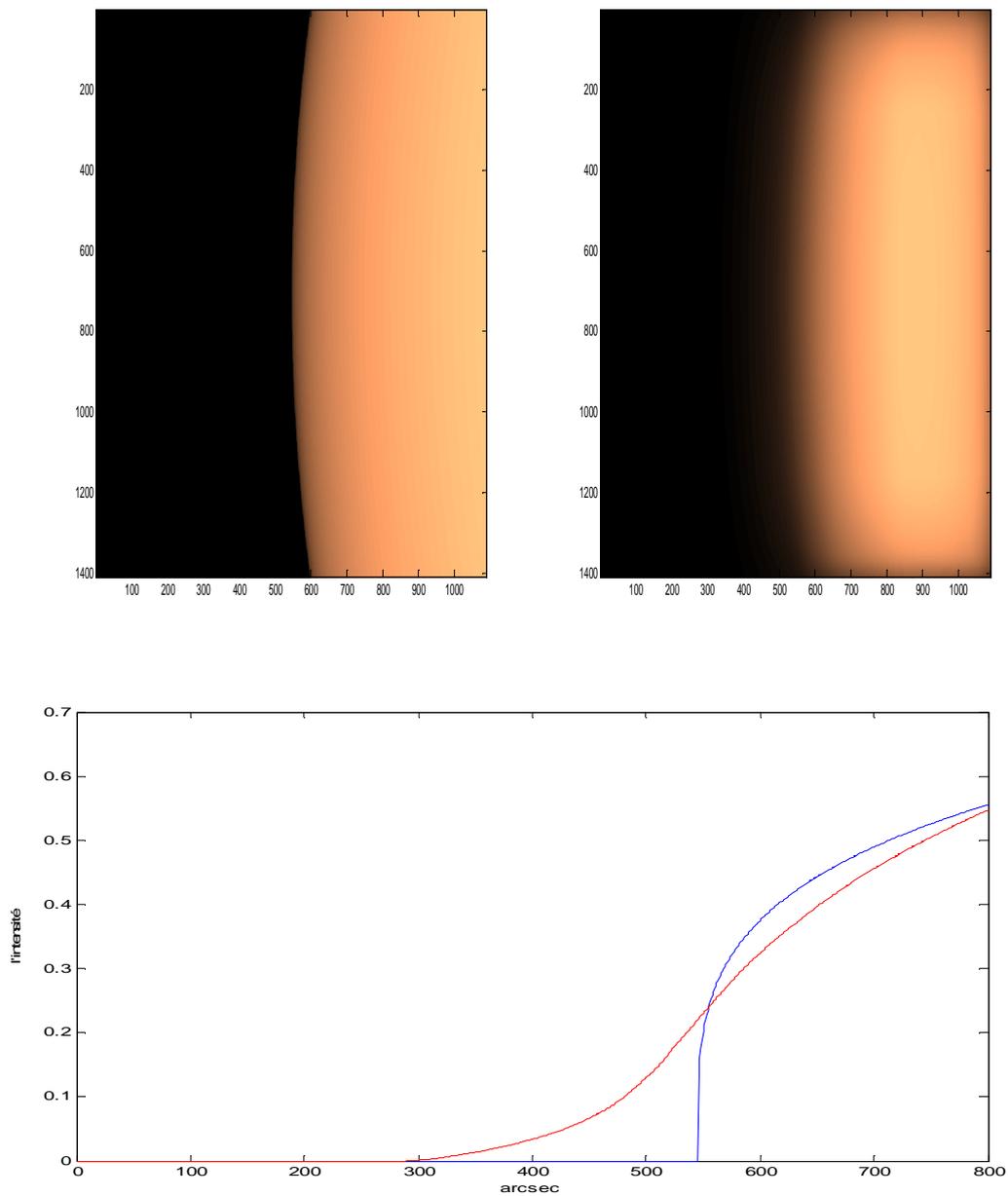


Figure (4.8) : L'effet de la turbulence optique en courte pose sur le bord solaire

Programme 4.3 : fonctions sous MATLAB du bord solaire en longue pose

```
function img= (img,n,s,f,r0)
psflp = imagelonguepose(n,s,f,r0)
imgd = conv2(img,psflp,'same');
```

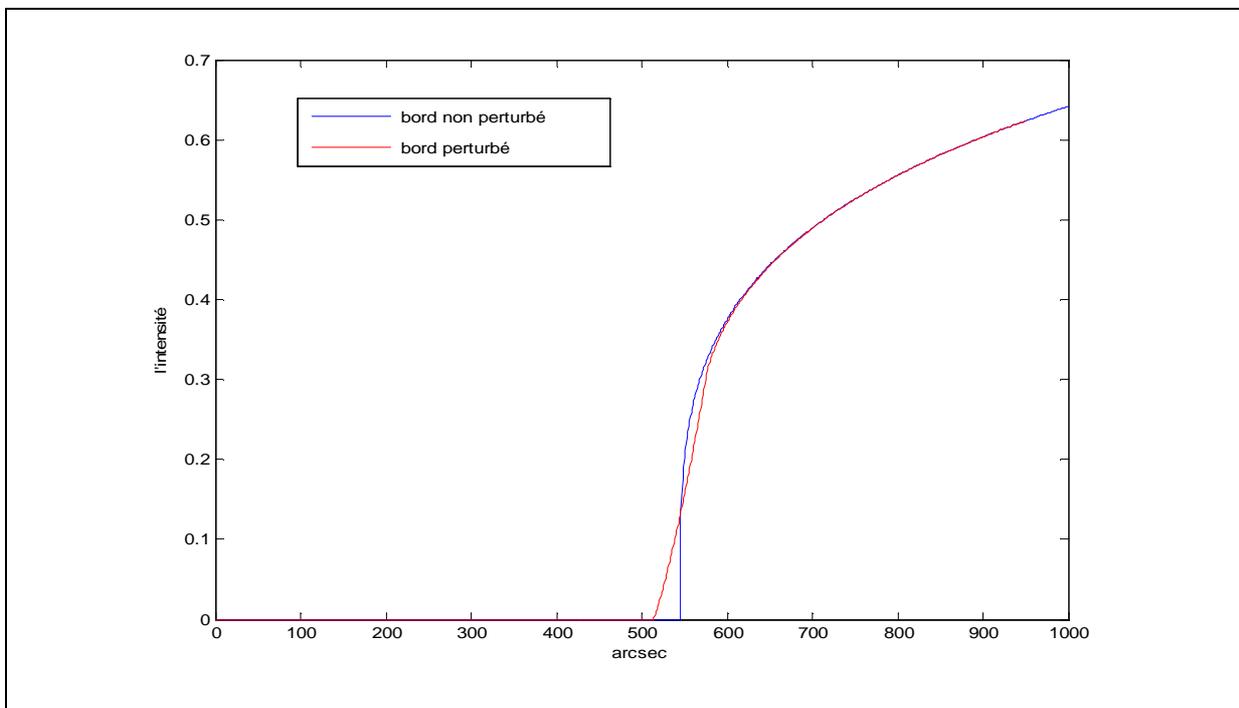
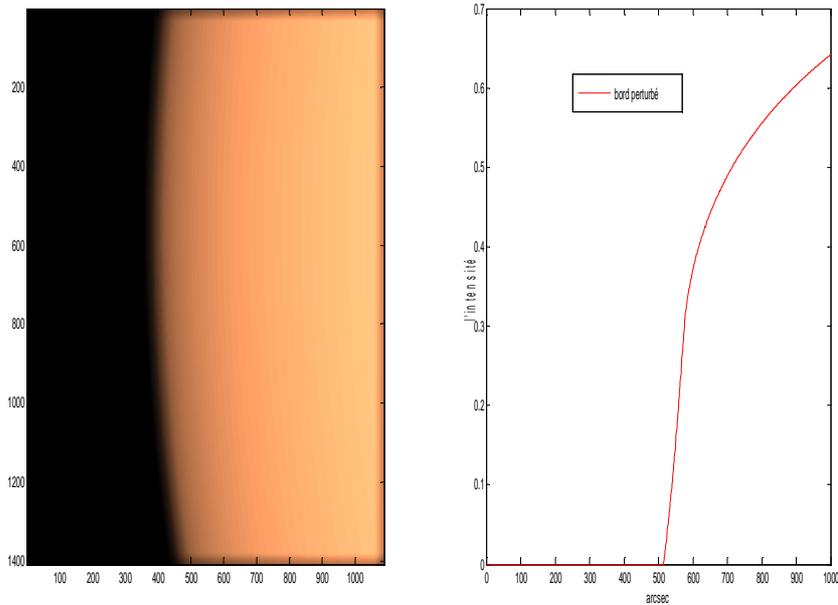


Figure (4.9) : L'effet de la turbulence optique en longue pose sur le bord solaire

4-5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons examiné les variations du bord solaire à partir de l'agitation sur les images simulées en courte pose et à partir d'étalement sur les images simulées en longue pose. Le bord est défini par la fonction d'assombrissement centre-bord qui dépend de la longueur d'onde. Nous montrons que la simulation du bord est un outil important pour mesurer les fluctuations d'angle d'arrivée.

Chapitre 5

Estimation des paramètres

De nombreuses méthodes sont utilisées pour estimer les différents paramètres de la turbulence atmosphérique, et basée sur l'étude des fluctuations d'angle d'arrivée. Où la connaissance de ces paramètres présente l'intérêt de l'observation astronomique à haute résolution angulaire.

Ces dernières années ont vu que l'analyse statistique des fluctuations d'angle d'arrivée est le moyen le plus efficace et le plus simple permettant d'estimer les différents paramètres de la turbulence atmosphérique responsable de la dégradation des images astronomiques.

Dans ce paragraphe nous avons estimé les paramètres de la turbulence à partir des mesures de la variance et la covariance de l'angle d'arrivée, Où ce dernier est obtenu par trois étapes :

1^{ère} étape : extraction du contour

Pour chaque image perturbée, nous cherchons la position du point d'inflexion de chaque ligne d'une image (par la première dérivation, nous cherchons le point max ou par la dérivation secondaire nous cherchons le passage par point zéro). La coordonnée de chaque point d'inflexion est enregistrée dans un vecteur dont la taille dépend de l'image.

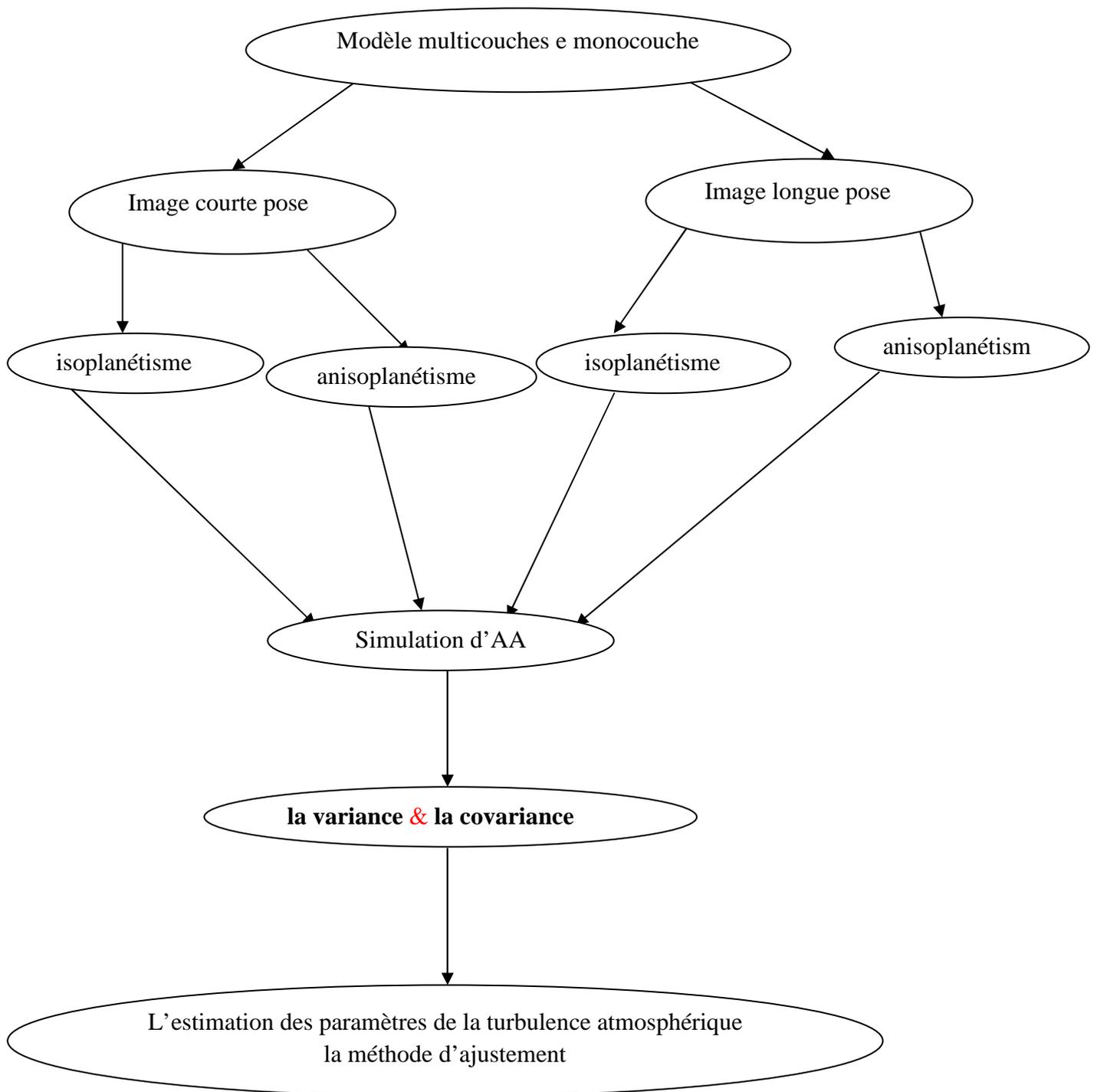
2^{ème} étape : extraction des fluctuations d'AA

Les fluctuations d'AA sont les résidus déduits où le résidu est la différence entre le contour d'une image non perturbée et le contour de l'image perturbée.

3^{ème} étape : extraction la variance et la covariance

Par des calculs statistiques.

Dans la simulation en utilisant le modèle isoplanétique à une couche de l'atmosphère.



5.1 L'estimation de paramètre de Fried par la variance d'AA

5-1-1 La variance théorique

La détermination de la variance théorique d'angle d'arrivée est effectuée par les deux modèles Kolmogorov et Von Karman, telle qu'elle a donné respectivement par les équations (1.59) et (1.60).

Programme 5.1 : fonctions sous MATLAB de simulation de variance

```
function var_VK = variance(D,r0,L0,f)
ii = quad(@covth_fun,1,10);
cxy_thv = 0.0229*pi*lambda.^2 * r0.^(-5/3) * ii;
function res = covth_fun(f)
res = f.^3 .* (f.^2 + 1./(L0.^2)).^(-11/6);
res = res .* (2*besselj(1,pi*D*f,1)/(pi*D*f)).^2;
```

```
function var_Kol = variance(D,r0,L0,f)
cxy_thv = 0.1698*lambda.^2 * r0.^(-5/3) * D.^(-1/3);
```

r_0	Variance Von Karman	Variance Kolmogrov
0.005	362.1000	520.8387
0.01	114.1000	164.0539
0.015	58.0000	83.4644
0.02	35.9000	51.6737
0.025	24.8000	35.6249
0.03	18.3000	26.2896
0.035	14.1000	20.3332
0.04	11.3000	16.2762
0.045	9.3000	13.3752
0.05	7.8000	11.2211
0.055	6.7000	9.5730
0.06	5.8000	8.2807
0.065	5.0000	7.2465
0.07	4.5000	6.4046
0.075	4.0000	5.7089
0.08	3.6000	5.1267
0.09	2.9000	4.2129
0.095	2.7000	3.8499
0.1	2.5000	3.5344
0.15	1.3000	1.7982
0.2	0.8000	1.1133

Table (5.1) : comparaison entre la variance théorique de Von karman et Kolmogrov

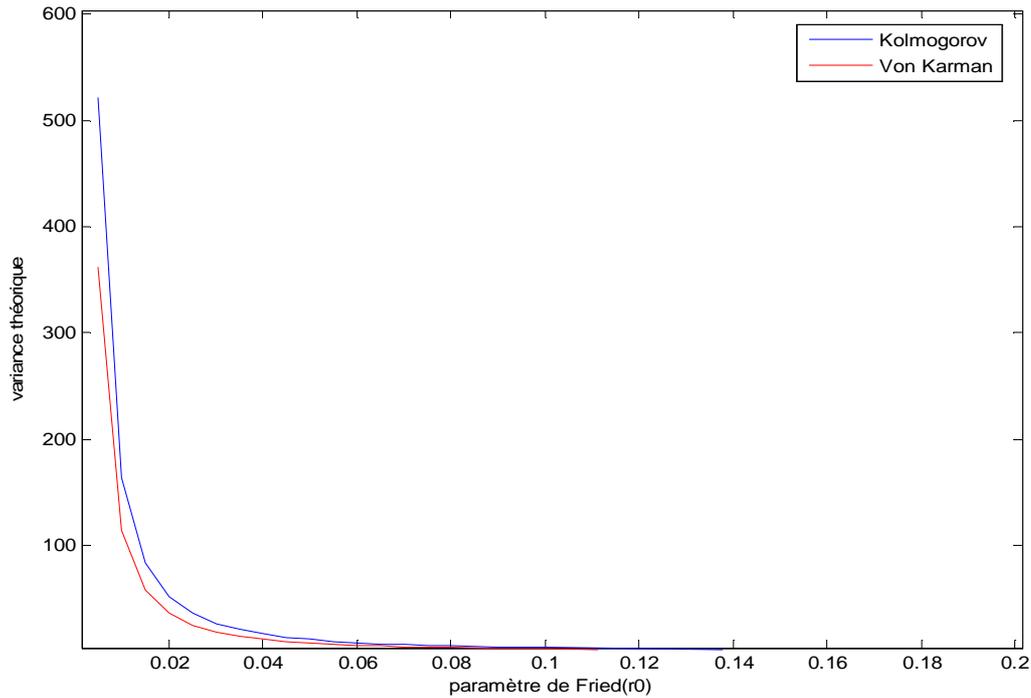


Figure (5.1) : comparaison entre la variance théorique de Von karman et Kolmogrov

5-1-2 La variance expérimentale

1^{ère} étape : extraction du contour

Pour chaque image du bord solaire perturbée, nous cherchons la position du point d'inflexion de chaque ligne du bord

Programme5.2: fonctions sous MATLAB de simulation de point d'inflexion

```
function point d'inflexion = dérivée1(img,line)
vecteur=diff(img(line,:));
max(vecteur);
```

Ou

```
function point = dérivée2(img,line)
vecteur=diff(img(line,:,2));
```

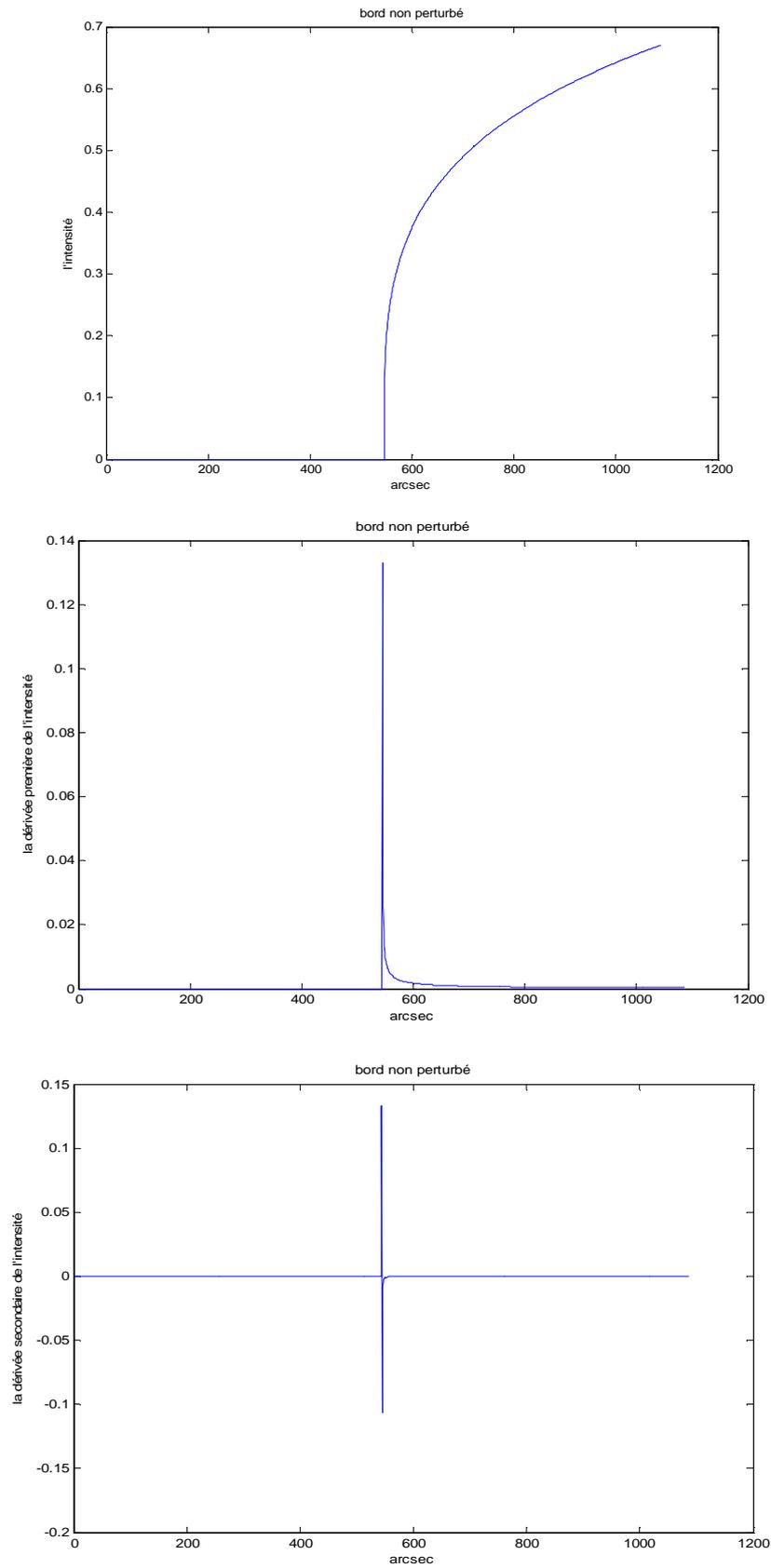


Figure (5.2) : la fonction d'assombrissement centre- bord et la dérivée première et secondaire de cette fonction

La coordonnée de chaque point d'inflexion est enregistrée dans un vecteur dont la taille dépend de la dimension du pixel du bord c'est le contour.

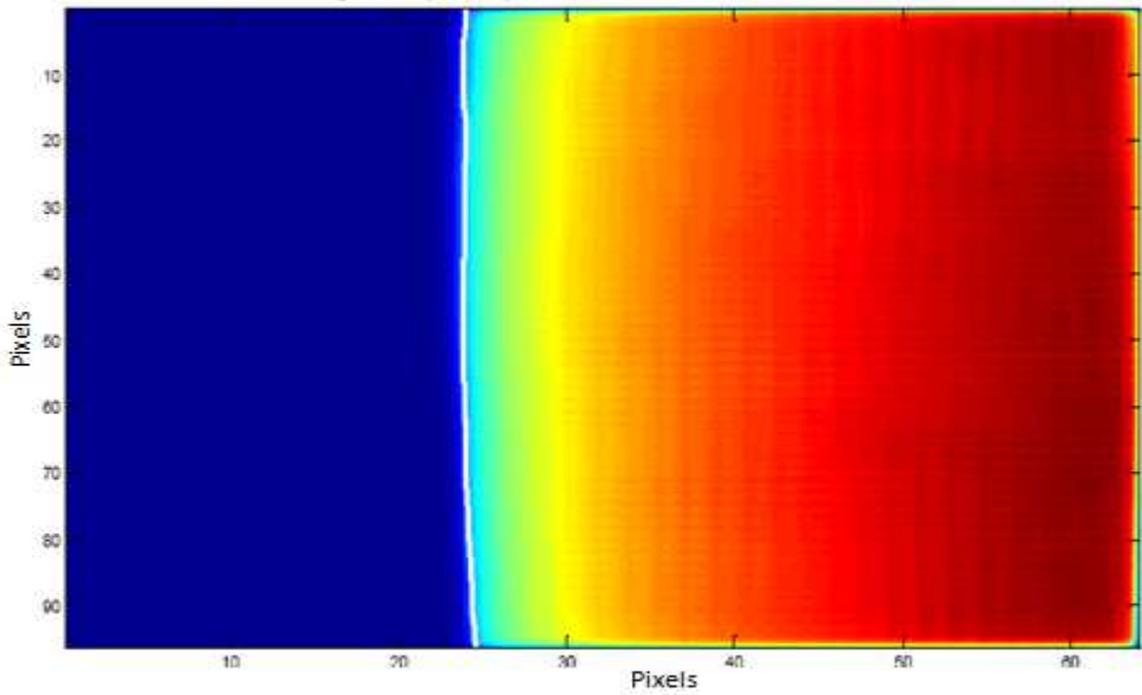


Figure (5.3) : le contour du bord du soleil

2^{ème} étape : extraction des fluctuations d'AA

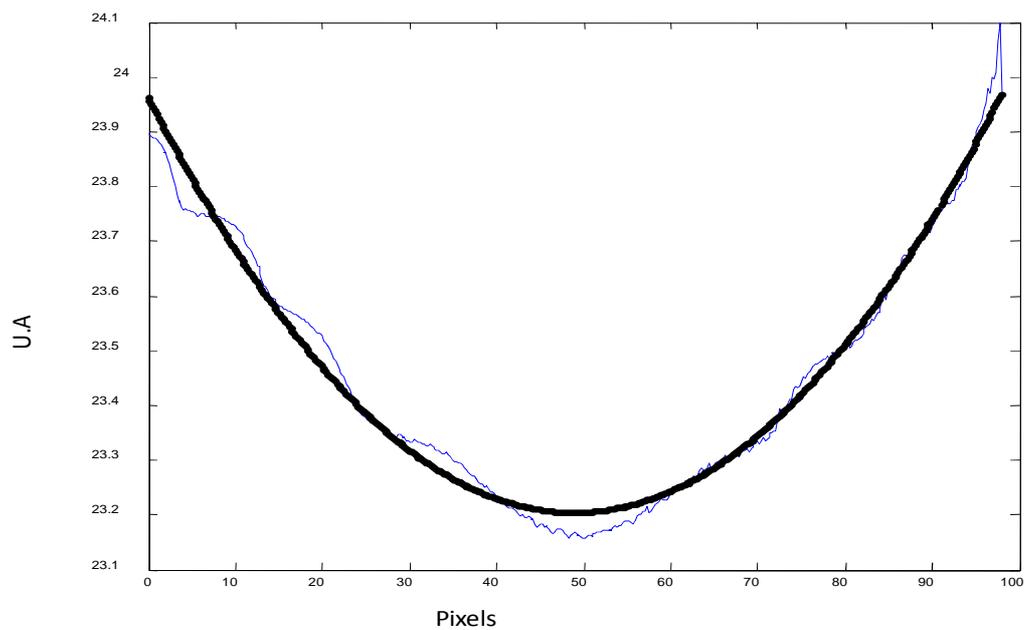


Figure (5.4) : en bleu le contour du bord solaire perturbé. En noir le contour du bord solaire non perturbé.

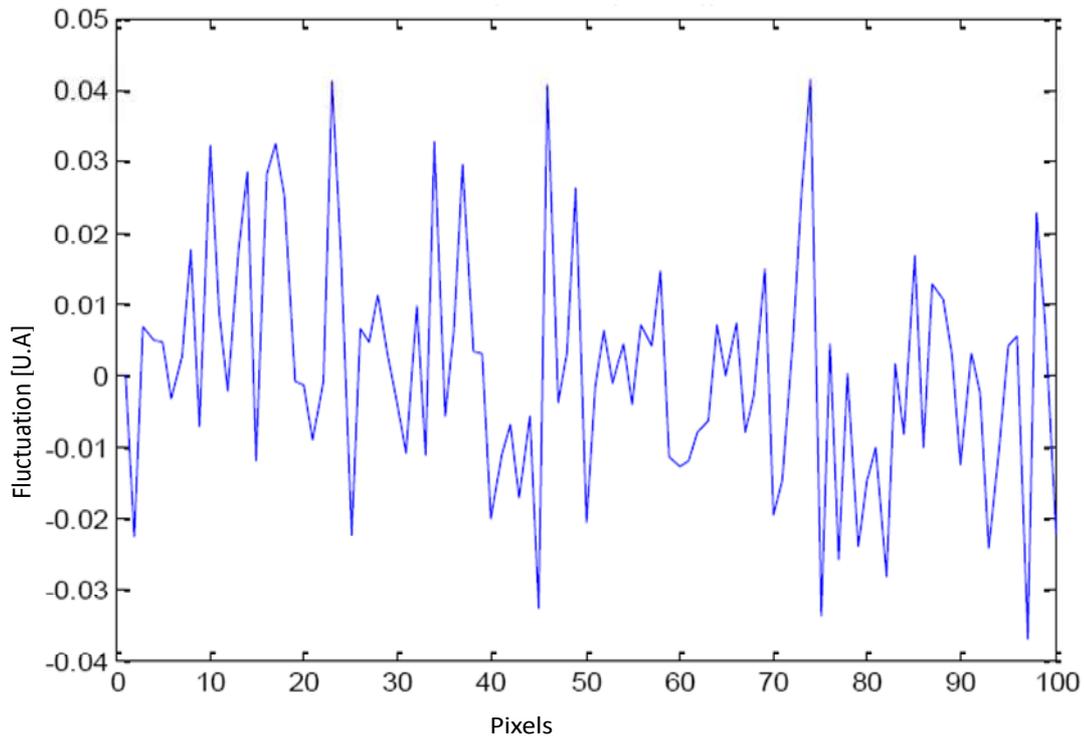


Figure (5.5) : fluctuations d'angle d'arrivée obtenue par simulation numérique d'un bord solaire en présence la turbulence optique

3^{ème} étape : extraction la variance

La fluctuation d'angle d'arrivée est obtenue par une série de mesures indépendantes obtenues par simulation numérique d'un bord solaire en présence de turbulence optique.

La variance obtenue par la fonction statistique et r_0 , est effectuée par l'équation (1.59)

Programme5.3:fonctions sous MATLAB de simulation de variance

Function [var,r0] = (angle_arrivée,lambda,D)

var = std(angle_arrivée)^2; %variance de l'angle d'arrivée

r0=8.25e5*(lambda)^(6/5)*D^(-1/5)*(var^(-3/5))

Variance-résultat	r_0 -résultat
1.9556	0.0217
2.0728	0.0210
1.7036	0.0236
1.2797	0.0280
1.0247	0.0320
0.8544	0.0357
0.7326	0.0391
0.6413	0.0424
0.5702	0.0455
0.5132	0.0485
0.4667	0.0513
0.4278	0.0541
0.3950	0.0567
0.3668	0.0593
0.3424	0.0618
0.3210	0.0642
0.3021	0.0666
0.2854	0.0689
0.2704	0.0712
0.2569	0.0734
0.2446	0.0756
0.2335	0.0777
0.2234	0.0798
0.2141	0.0819
0.2055	0.0839
0.1976	0.0859
0.1903	0.0879
0.1835	0.0898
0.1772	0.0917
0.1713	0.0936

Table (5.2) : les valeurs de r_0 calculée par la variance simulée

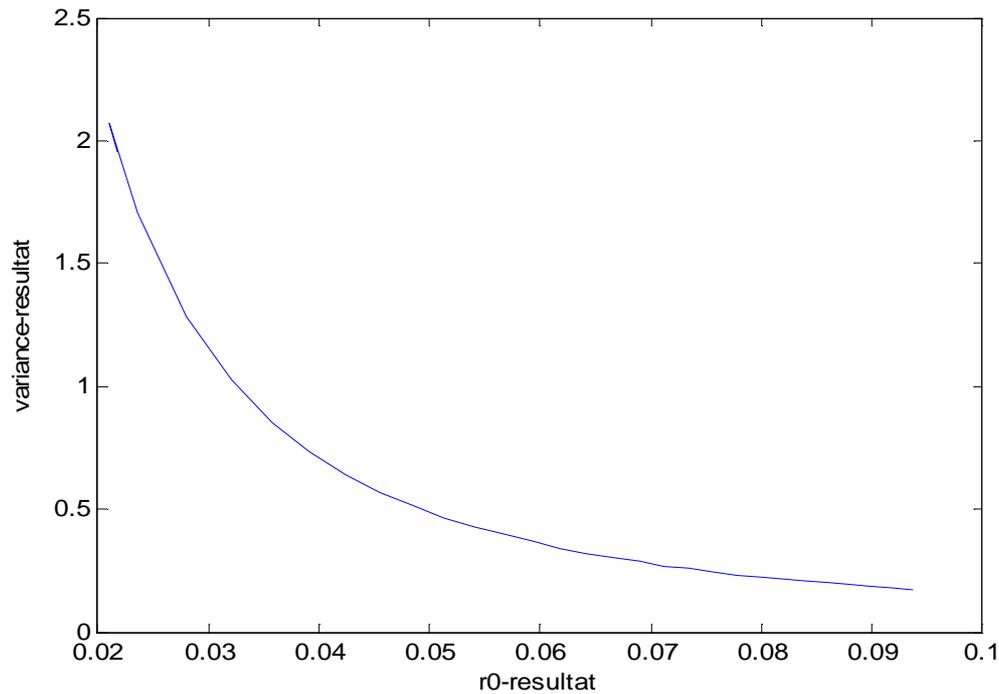


Figure (5.6) : la variance (arcsec) des fluctuations d'AA en fonction de r_0

5-2 estimations des paramètres par la covariance

5-2-1 La covariance théorique

La détermination de la covariance théorique d'angle d'arrivée est effectuée par l'équation (1.55).

Programme 5.4 : fonctions sous MATLAB de simulation de covariance

```
function cxy_th = cov_th()
ii = quad(@covth_fun,0,1e5,1e-100);
cxy_th = 0.0716*lambda.^2 * r0.^(-5/3) * ii;
function res = covth_fun(f)
res = f.^3 .* (f.^2 + 1./(L0.^2)).^(-11/6);
res = res .* (besselj(0,2*pi*th*h*f) + besselj(2,2*pi*f*th*h));
res = res .* (2*besselj(1,pi*D*f,1)/(pi*D*f)).^2;
res = res .* cos(pi*lambda*h*f.^2).^2;
```

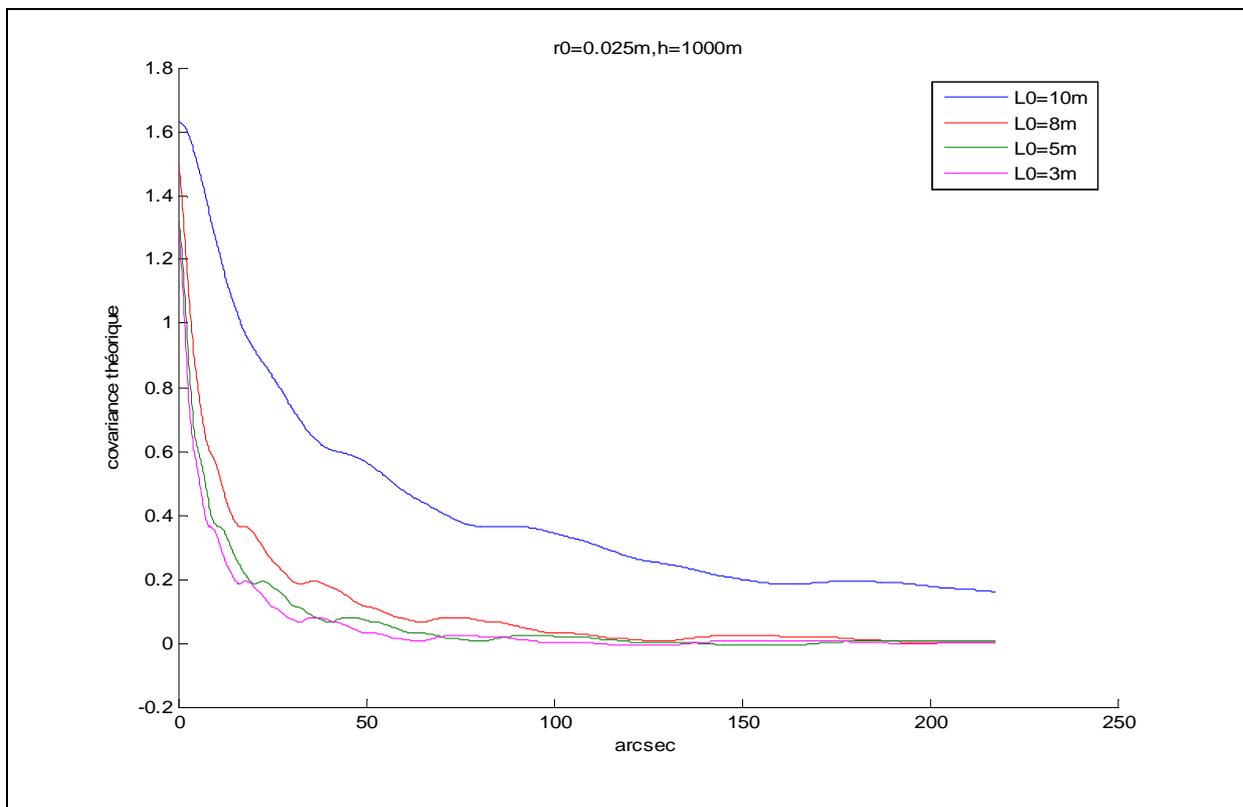
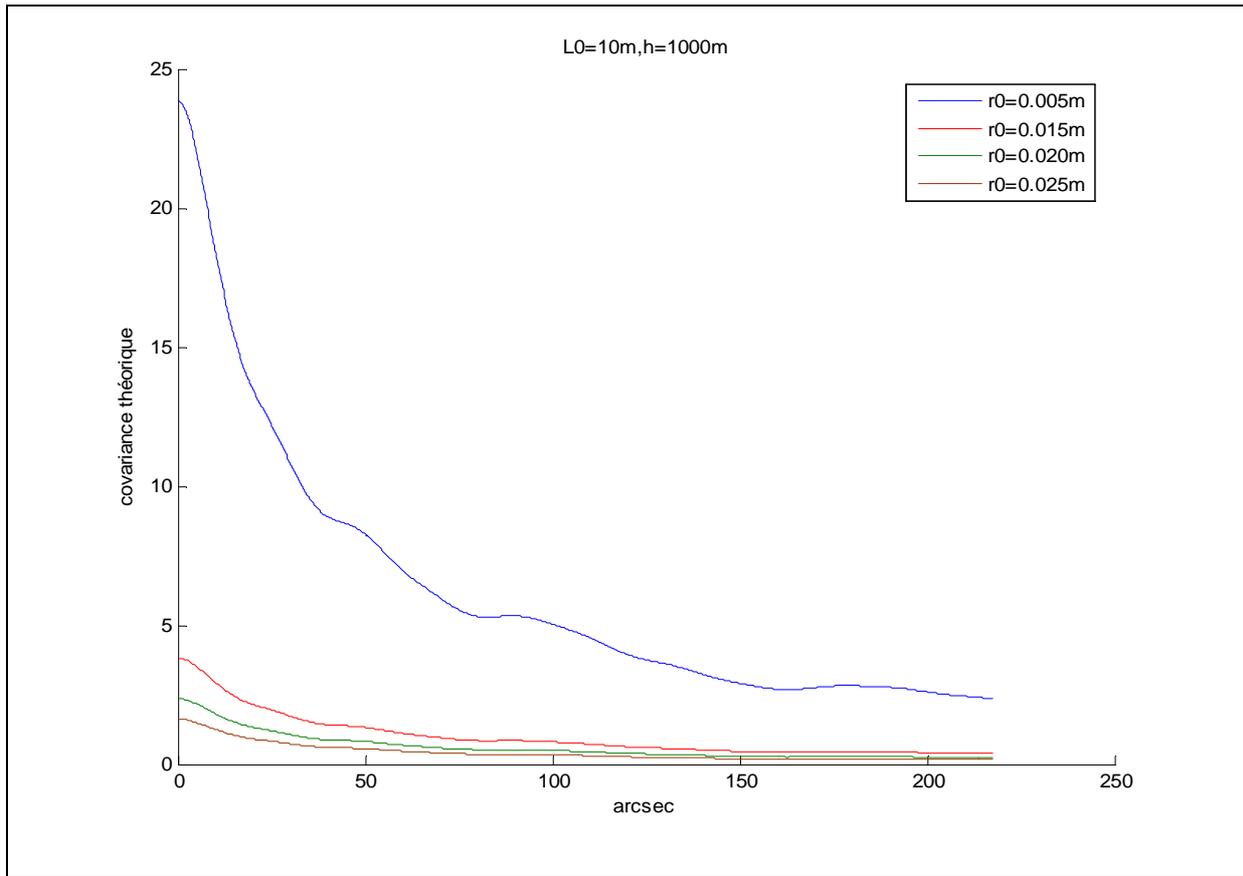


Figure (5.8) : la covariance théorique pour différentes valeurs de r_0 , L_0

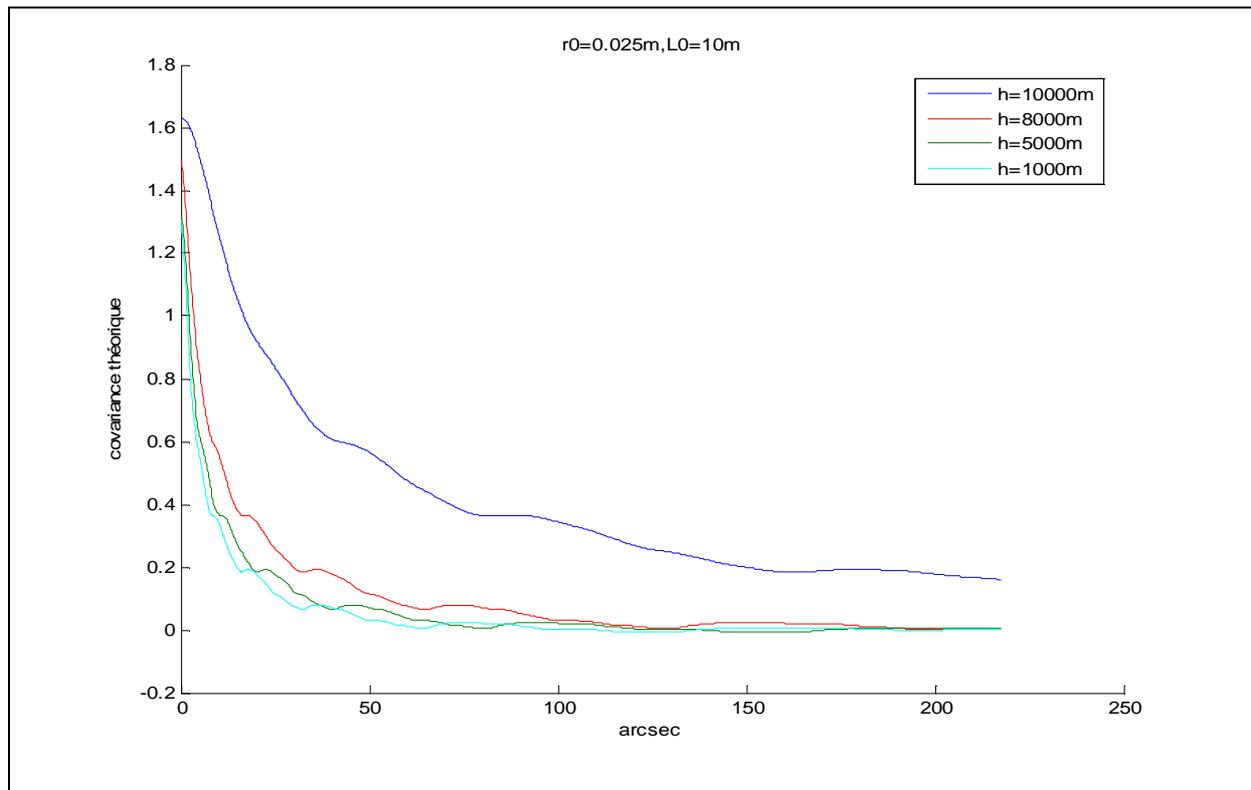


Figure (5.8) : la covariance théorique pour différentes valeurs de h

5-2-2 La covariance expérimentale

1^{ère} étape : extraction du contour

Programme 5.5 : fonctions sous MATLAB de simulation du contour

```

function cont = get_cont(img)
[Mx,My] = size(img);
y0 = 1:My;
x0 = 1:Mx;
yy = ones([size(x0,2),1]) * y0;
ii = [-1,0,1;-1,0,1;-1,0,1];
jj = ones(3);
cc = conv2(conv2(img,jj,'same'),ii,'same');
cc = cc(x0,y0);
cont = (sum(yy.*cc,2)./sum(cc,2)+x0(1)-1);

```

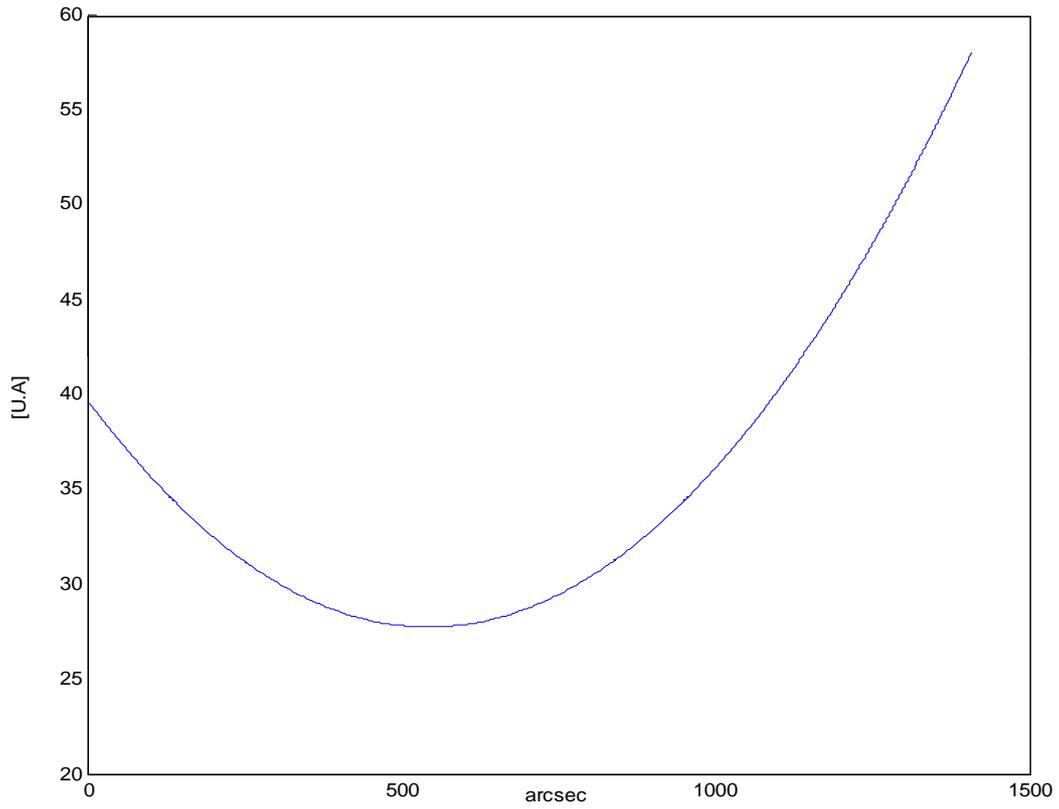


Figure (5.9) : contour du bord solaire non perturbé (absence de turbulence)

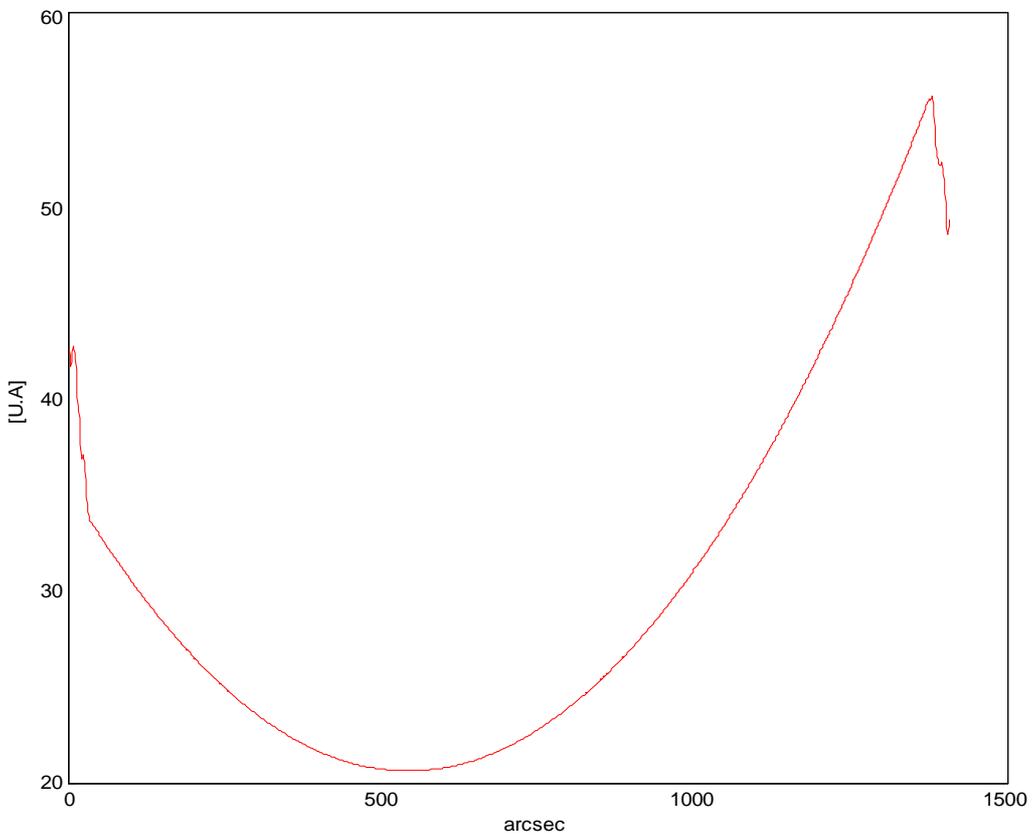


Figure (5.10) : contour du bord solaire perturbé (présence de turbulence)

2^{ème} étape : extraction des fluctuations d'AA

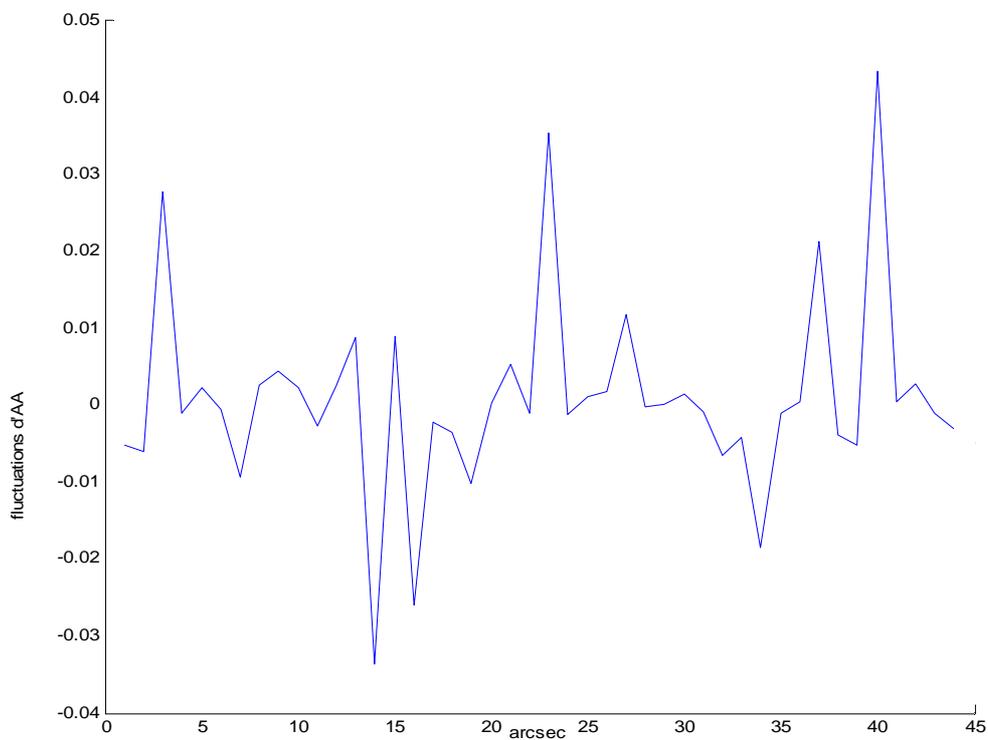
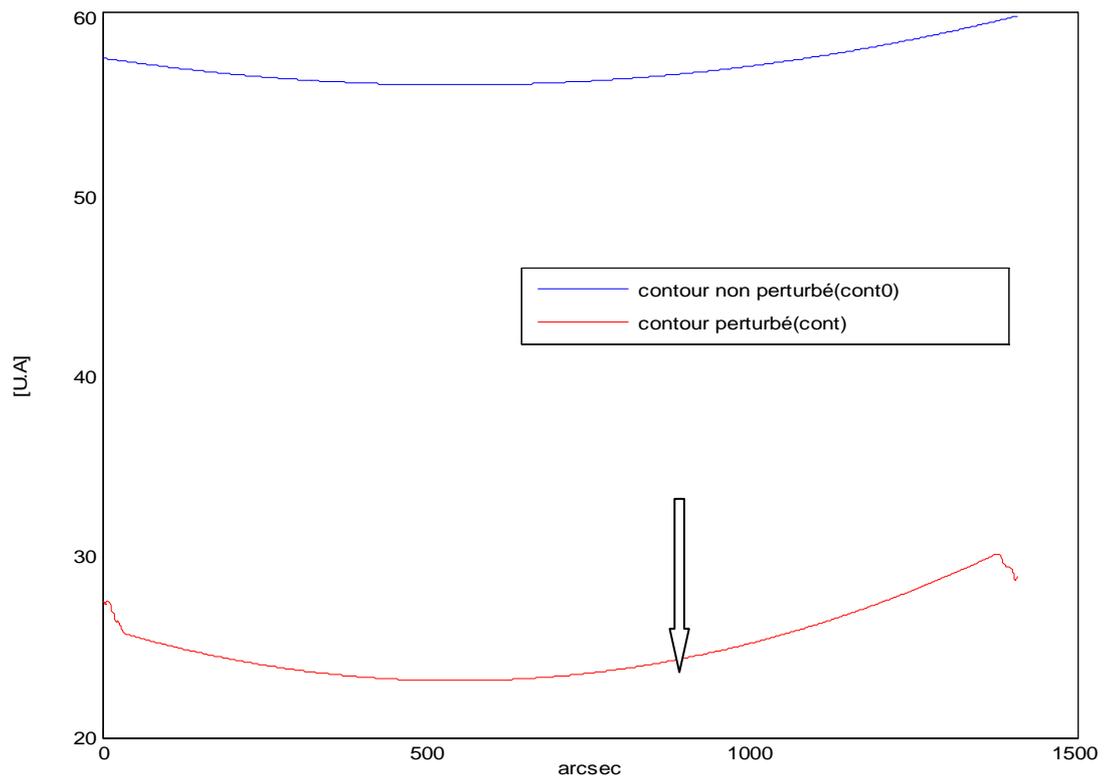


Figure (5.12) : fluctuations d'angle d'arrivée obtenue par simulation numérique d'un bord solaire en présence la turbulence optique

3^{ème} étape : extraction de covariance

La fluctuation d'angle d'arrivée est obtenue par une série de mesures indépendantes obtenues par simulation numérique d'un bord solaire en présence de turbulence optique.

La covariance obtenue par la fonction statistique.

Programme 5.6 : fonctions sous MATLAB de simulation de covariance

```
function covariance = angle(angle d'arrivée(d))
```

```
for j=1:Mx b(j)=sum((d(1:Mx-j+1)-mean(d)).*(d(j:Mx)-mean(d)))/nruns;end
```

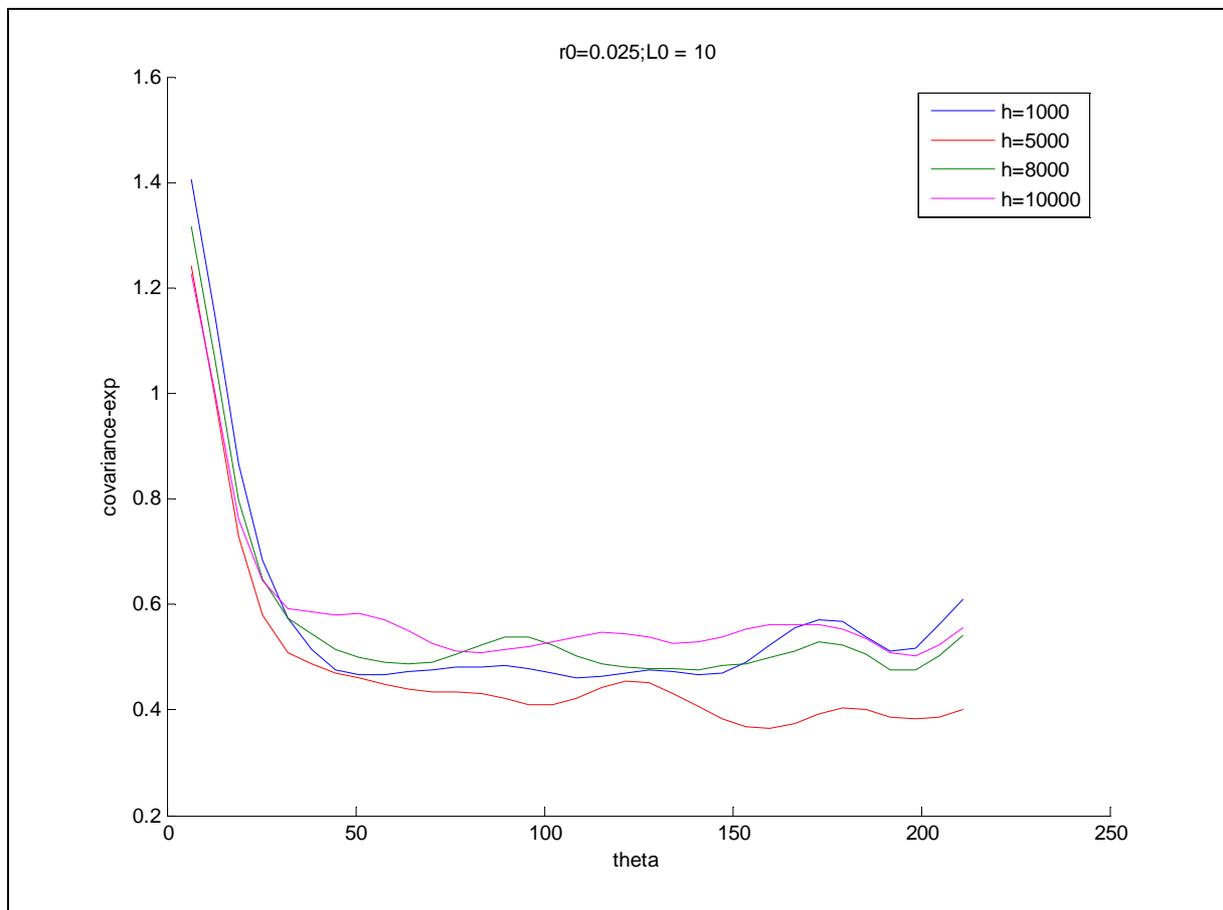


Figure (5.13) : la covariance expérimentale pour différents valeurs de h

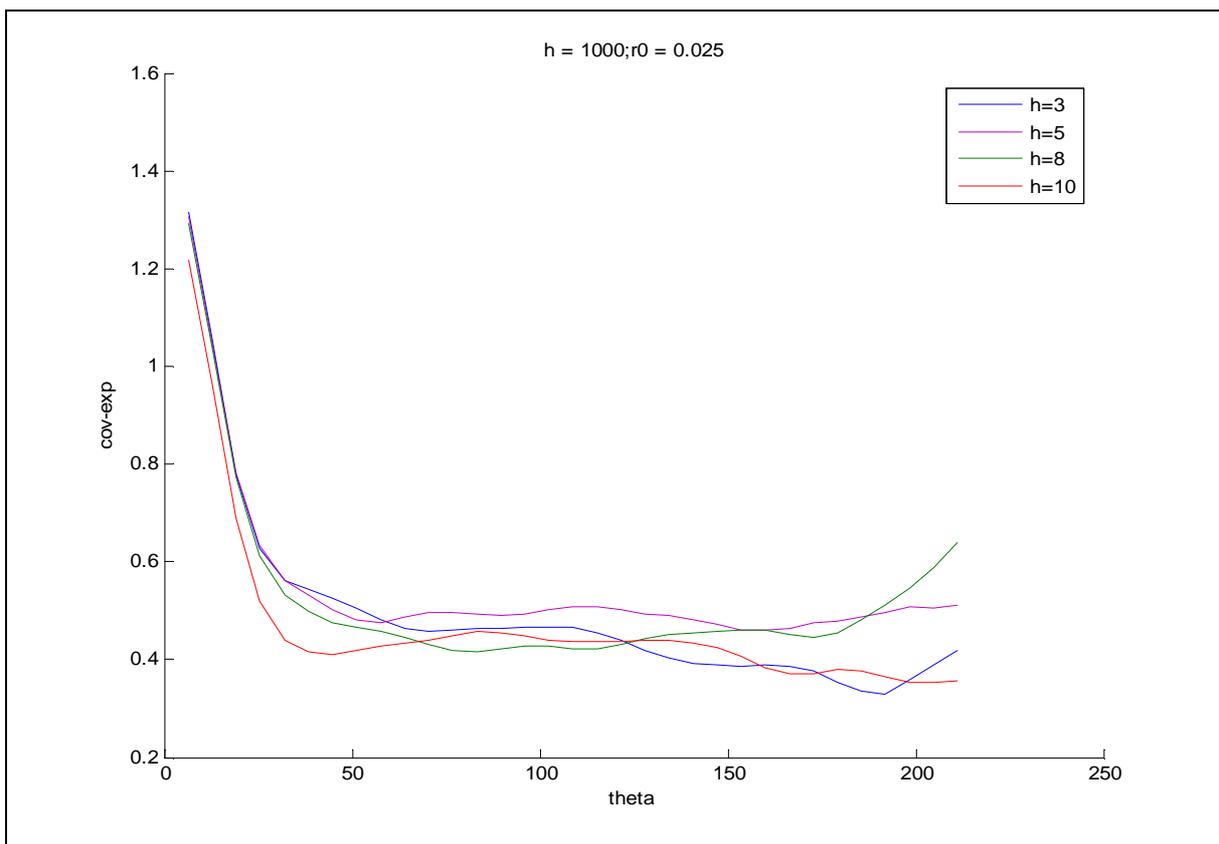
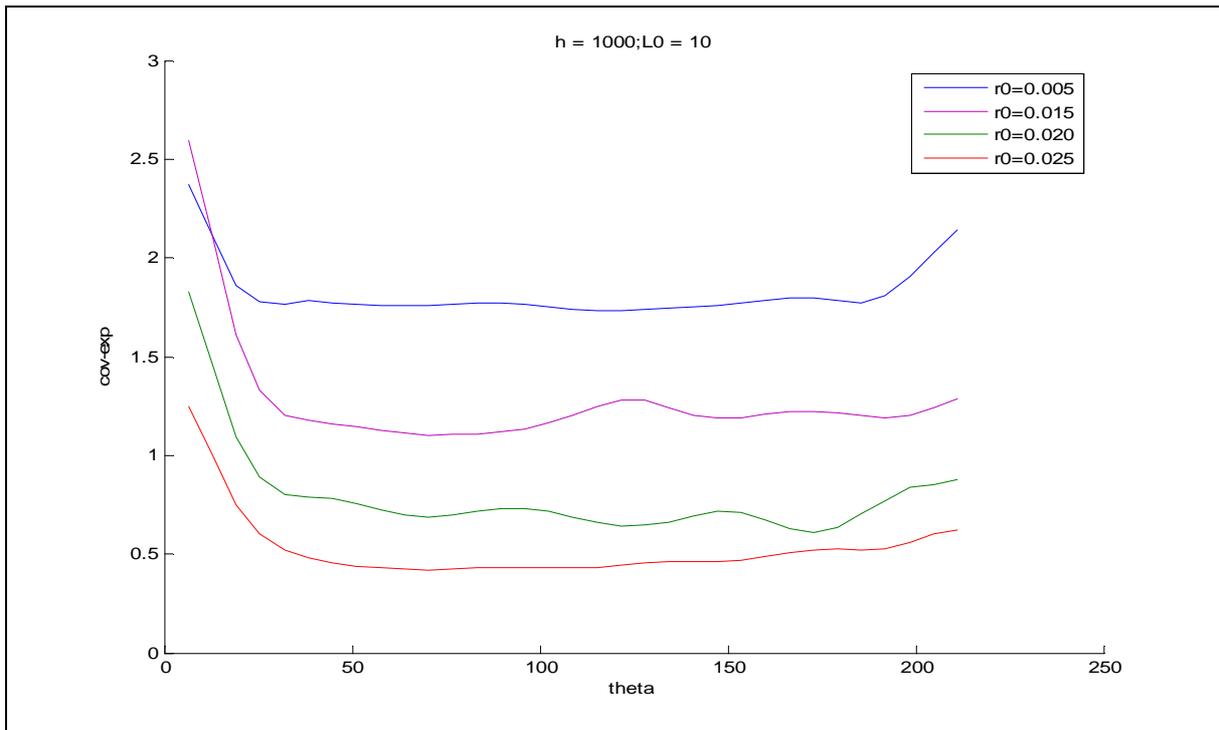
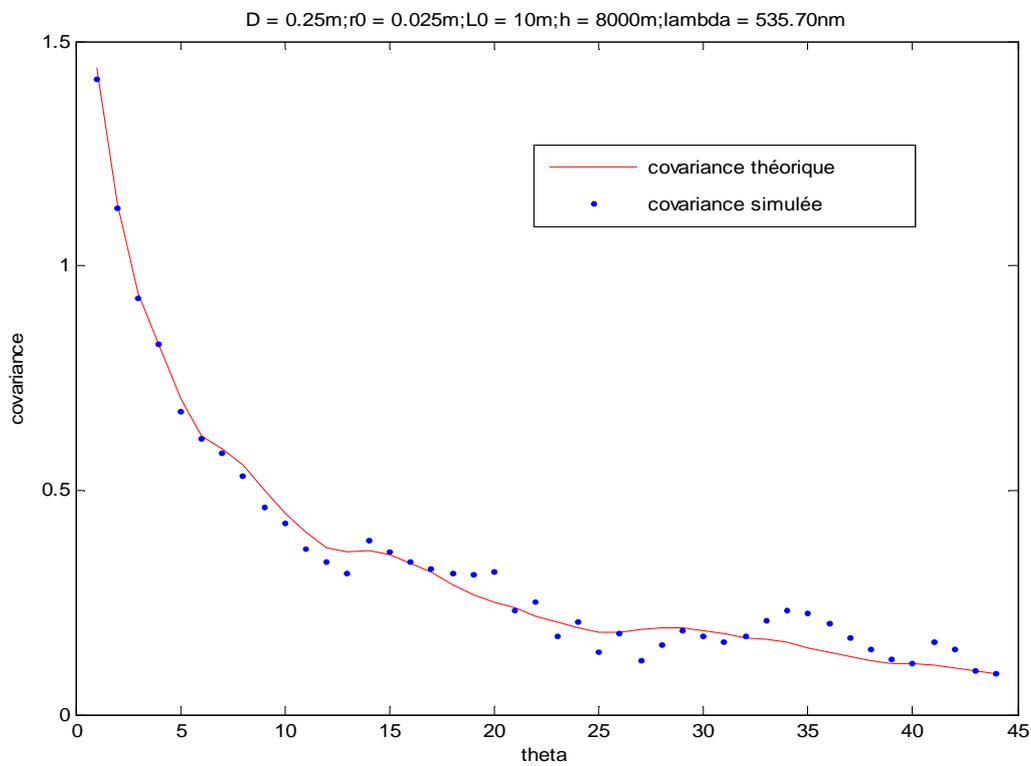
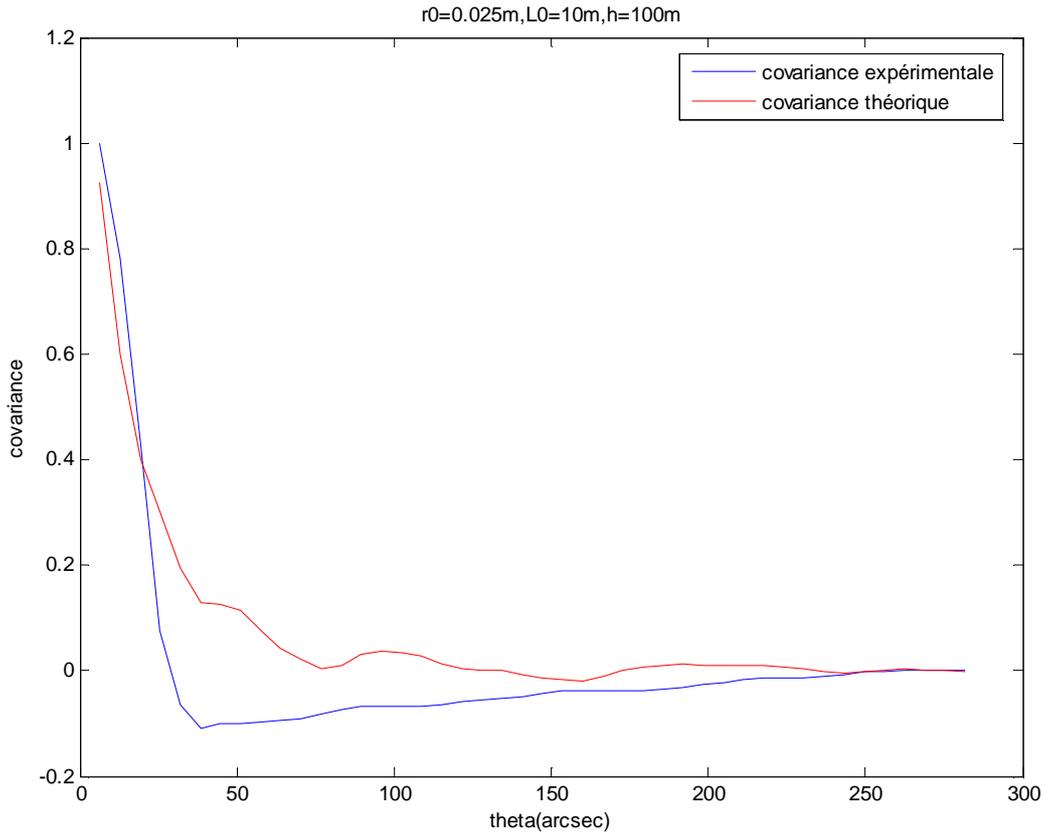


Figure (5.13) : la covariance expérimentale pour différentes valeurs de r_0 , L_0



Tab (5.14) : comparaison entre la covariance théorique et la covariance simulée par les fluctuations des angles d'arrivée

5-2-3 Ajustement non linéaire théorie-expérimentale

L'objectif de ce paragraphe est d'obtenir les paramètres qui définissent le modèle donné par l'expression de la covariance des fluctuations d'angles d'arrivée observées sur le bord de l'image du soleil au foyer d'instrument. Une technique itérative basée sur l'algorithme de Levenberg – Marquardt (une méthode d'ajustement qui consiste à minimiser) permettant une estimation automatique des paramètres du modèle qui sont le paramètre de Fried r_0 , l'échelle externe de cohérence spatiale L_0 et l'altitude de la couche équivalente du modèle h , cette stratégie de minimisation s'appelle génériquement la méthode des moindres carrés.

Programme5.7: fonctions sous MATLAB de l'ajustement non linéaire

```
function cxy_th = cov_th(M,th) %M=(M1=r0,M2=L0,M3=h)
ii = quad(@covth_fun,0,1e5,1e-100);
cxy_th = 0.0716*lambda.^2 * M1.^(-5/3) * ii;
function res = covth_fun(f)
global D M1 M2 M3 lambda th;
res = f.^3 .* (f.^2 + 1./(M2.^2)).^(-11/6);
res = res .* (besselj(0,2*pi*th*M3*f) + besselj(2,2*pi*f*th*a3));
res = res .* (2*besselj(1,pi*D*f,1)/(pi*D*f)).^2;
res = res .* cos(pi*lambda*M3*f.^2).^2;
theta = (1:Mx)*pix;
for i=1:length(theta)
i
th = theta(i); th = th*pi/(180*3600);
cxy_th(i) = cov_th() * (180*3600/pi).^2;
end
```

%%%

Partie 2

%%%

```
function out = F(M,xi,yi)
out = sum((yi-cov_th(M,xi)).^2);
```

%%%

Partie 3

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% pour passer les points expérimentaux à F
% définition des points expérimentaux
% (en général chargés depuis un fichier
load xi ;
load yi ;

M0 = [0.025 10 1000] % correspond r0;L0;h (paramètres initiaux
                    % appel de l'optimiseur autour de F
asol = fminsearch (@(M) F(M,xi,yi), M0)

plot(xi,yi,'*',xi,fit(asol,xi))
    
```

paramètres	$r_0(m)$	$L_0(m)$	$\theta_0(arcsec)$	$\tau_0(ms)$	$h(m)$
Valeur	0.025	10	1.2	5.5	1000

L’ajustement non linéaire théorie-expérimentale permet d’estimer les paramètres r_0, L_0, h et par conséquent θ_0, τ_0 qui sont directement reliés par les équations (1.50) et (1.53).

5.3 L’expérience MISOLFA

MISOLFA (Moniteur d’Image SOLaire Franco-Algérien) est une nouvelle génération de moniteur de turbulence diurne, qui permet de mesurer les paramètres de la turbulence atmosphérique.

MISOLFA est associé au projet PICARD-SOL (ensemble d’instruments situés en orbite et au sol), son objectif est de mesurer les paramètres de turbulence spatiale et temporelle afin de quantifier leurs effets sur les mesures du diamètre solaire qui sera fait à partir du sol:

- PICARD-ESPACE (Satellite PICARD) est constitué de trois instruments :
 - PREMOS mesure l’irradiance spectrale dans quatre domaines spectraux et l’irradiance solaire totale.
 - SOVAP mesure l’irradiance solaire totale.
 - SODISM-I Mesure le diamètre solaire.

- PICARD-SOL est constitué de deux instruments :
 - SODISM-II mesure le diamètre solaire.
 - MISOLFA caractérise la turbulence atmosphérique.



Image de MISOLFA et de la monture pour SODISM II

On pourra pendant la vie du satellite (PICARD (SODISM-I)) comparer les résultats obtenus par SODISM-I et SODISM-II qui sont différents de cause de la turbulence atmosphérique. Ces mesures sont complétées par une mesure simultanée de MISOLFA. MISOLFA va permettre de corriger les observations faites par SODISM-II pour s'approcher le plus possible des mesures faites par SODISM.

5-4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons tout d'abord examiné les méthodes de mesure des fluctuations d'angle d'arrivée, nous fait ainsi une analyse statistique sur les fluctuations d'angle d'arrivée c.à.d. la mesure de covariance et la variance. Cette mesure permet d'obtenir une estimation des paramètres de cohérence du front d'onde (paramètres de la turbulence atmosphérique) avec la méthode d'ajustement.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

La turbulence atmosphérique est le plus grand obstacle aux observations astronomiques terrestres. Elle empêche l'obtention d'images précises d'égale précision que celle des télescopes spatiaux. Malgré les tentatives de minimiser cet inconvénient à partir du choix de bons sites lors de la création de nouvelles observatoires, cela n'est certainement pas suffisant, il est impérative de connaître avec précision l'état de cette turbulence afin de pouvoir la corriger par l'optique adaptative.

Au cours de ces dernières années, les scientifiques tentent de connaître les détails et les caractéristiques de l'atmosphère. La connaissance de ces caractéristiques telles que les paramètres: r_0 , L_0 , τ_0 , θ_0 est d'un intérêt majeur en observation astronomique pour optimisation des techniques de haute résolution angulaire (l'interférométrie, optique adaptative et optique active).

L'étude présentée dans ce mémoire a montré l'intérêt de l'analyse statistique des fluctuations d'angle d'arrivée (variance et covariance) comme moyen efficace et particulièrement bien adapté pour la mesure des différents paramètres de la turbulence atmosphérique.

Ces fluctuations d'angle d'arrivée pouvant être mesurées directement à partir des images du bord solaire au foyer du télescope.

La comparaison entre le modèle théorique de covariance et la covariance simulée permis de montrer que l'accord théorie-simulation de covariance n'est pas exact pour tous les paramètres mais par un ajustement des différents paramètres on peut obtenir un accord entre les entités théoriques et expérimentales,

L'objectif principal est la mise au point de l'expérience MISOLFA qui permettent d'obtenir une caractérisation complète des paramètres spatio-temporelle de la turbulence où l'estimation des différents paramètres de la turbulence atmosphérique s'effectue essentiellement pour identifier le modèle approprié dans l'atmosphère.

Le travail entrepris dans le cadre de ce mémoire ouvre plusieurs perspectives telles que l'estimation des paramètres de turbulence atmosphérique pour le modèle multicouche et le domaine anisoplanétique où la turbulence plus loin au sol pour caractériser les conditions atmosphérique (état de bonne observation), ainsi la conception optimale de télescope à haute résolution angulaire.

Bibliographie

Bibliographie

[1] J.Borgnino.: « Etude de la dégradation des images astronomiques diurnes par analyse statistique des fluctuations d'angles d'arrivée. », thèse de doctorat (1978).

[2] A. Irbah, M. Chibani, L. Lakhel, A. Berdja, J. Borgnino, F. Martin, & P. Assus, "MISOLFA: a generalized solar seeing monitor," SF2A 2001-Lyon, EDPS Conference Series in Astronomy & Astrophysics, 59_61, 2001

[3] A. Irbah, J. Borgnino, F. Laclare & G. Merlin, "Isoplanatism and High Spatial Resolution Solar Imaging," Astron. Astrophys. 276, 663_672, 1993

[4] A.Berdja. : « Calcul du paramètre de Fried par la mesure de l'agitation relative de l'image dédoublée d'une étoile », thèse de magister, (2002).

[5] A.Berdja , J.Borgnino. & A.Irbah .: « Fresnel diffraction and polychromatic effects on angle-of-arrival fluctuations », J. Opt. A:Pure Appl,Opt.8: (2006)1-8.

[6] A. Berdja, A. Irbah & J. Borgnino, "Simulation of the Anisoplanatic Angle-of- Arrival Fluctuations Measured on the Solar Edge Images," SF2A 2002-Paris,EDPS Conference Series in Astronomy & Astrophysics, 205_206, 2002 207

[7] A. Berdja, "Effets de la Turbulence Atmosphérique lors de l'observation du soleil à Haute Résolution Angulaire", thèse de doctorat(2007)

[8] A. Berdja, A. Irbah & J. Borgnino, "Simulation of Angle-of-Arrival _uctuations as observed in the MISOLFA pupil plan," SF2A 2002-Bordeaux, EDPS Conference Series in Astronomy & Astrophysics, 355_357, 2003.

[9] A. Berdja, A. Irbah, J. Borgnino & F. Martin, "Simulation of pupil-plane observation of angle-of-arrival _uctuations in daytime turbulence," SPIE 5237,238_248, 2004.

[10] A. Berdja, J. Borgnino & A. Irbah, "Fresnel di_raction and polychromatic effects on angle-of-arrival _uctuations," Journal of Optics A : Pure and AppliedOptics, 8, 244_251, 2006

- [11] A. Berdja & J. Borgnino, "Modelling the optical turbulence boiling and its effect on nite-exposure di_ifferential image motion," Mon. Not. R. Astron. Soc. 378, 1177_1186, 2007
- [12] A.Bouzid , A.Irbah., J.Borgnino. and H.Lanteri.:” Estimation of atmospheric turbulence profiles from angle-of-arrival fluctuations observed on solar limb images “.117
- [13] C.Aime.:” Teaching Astronomical Speckle Techniques”, submitted to European Journal of Physics, (2000).
- [14] E.Aristidi. : « Reconstruction d’images astronomiques par analyse statistique du champ de speckles au foyer d’un grand télescope », thèse de doctorat, Université de Nice,(1992).
- [15] J.Borgnino, Ceppatelli, G., Ricort, G., and Righini, A. : 1982. Astron. Astrophys. 107,333.
- [16] J.Borgnino: “Modelling the Optical Effects of Atmospheric Turbulence in High Angular Resolution Astronomical Observations: Wavefront coherences and related parameters”; 2004.
- [17] Chollet F. : « Observation du Soleil à l’Astrolabe », thèse de doctorat (1981).
- [18] R Conan.: « Modélisation des effets de l’échelle externe de cohérence spatiale du front d’onde pour l’observation à Haute Résolution Angulaire en Astronomie. » thèse de doctorat (oct.2000).
- [19] R. Conan, A. Ziad, J. Borgnino, F. Martin & A. Tokovinin, "Measurements of the wavefront outer scale at Paranal : in_uence of this parameter in interferometry," SPIE 4006, 963_973, 2000
- [20] R. Avila ., A.Ziad ., J.Borgnino ., A.Agabi . and A.Tokovinin .:” Theoretical spatiotemporal analysis of angle-of-arrival induced by atmospheric turbulence as observed with the grating scale monitor experiment “, J. Opt. Am. A / Vol. 14,N11, (1997).
- [21] M.Lemaitre « Etude de la turbulence atmosphérique en vision horizontale lointaine et restauration de séquences dégradées dans le visible et l’infrarouge » these doctorat(2007)

- [22] R. Conan, "Modélisation des Effets de l'Échelle Externe de Cohérence Spatiale du Front d'Onde pour l'Observation à Haute Résolution Angulaire en Astronomie. Application à l'Optique Adaptative, à l'Interférométrie et aux Très Grands Télescopes," Thèse de Doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis(2000)
- [23] D. Hestroger & C. Magnan, "Wavelength Dependency of the Solar Limb Darkening," A&A 333, 338_342, 1998
- [24] F. Laclare, C. Delmas, J. P. Coin & A. Irbah, "Measurements and Variations of the Solar Diameter," Solar Physics 166, 211_229, 1996
- [25] F. Martin, J. Borgnino & F. Roddier, "Localisation de couches turbulentes atmosphériques par traitement optique de clichés d'ombres volantes stellaires," Nouv. Rev. Optique 6, 15_23, 1975
- [26] F. Martin & J. Borgnino, "Analyse statistique des déformations aléatoires d'une surface d'onde dues à la turbulence atmosphérique au voisinage du sol. II.- Estimation des fonctions de corrélations par traitement numérique," J. Optics (Paris), 9, 15_24, 1978
- [27] F. Roddier, "Effects of Atmospheric Turbulence in Optical Astronomy," Progress in Optics 19, E. Wolf Ed, 281_376, 1981.
- [28] J. Borgnino & F. Martin, "Analyse statistique des déformations aléatoires d'une surface d'onde dues à la turbulence atmosphérique au voisinage du sol.I.- Exposé de la méthode, Premiers résultats," J. Optics (Paris), 8, 319_326,1977
- [29] J. Borgnino & F. Martin, "Correlation between angle-of-arrival fluctuations on the entrance pupil of a solar telescope," J. Opt. Soc. Am. 8, 1065_1072,1977
- [30] J. Borgnino & J. Vernin, "Experimental verification of the inertial model of atmospheric turbulence from solar limb motion," J. Opt. Soc. Am. 68, 1056_ 1062, 1978
- [31] L.Lakhal " estimation des paramètres de qualification de la turbulence aux Dome C, rapport (2002)

[32] B. Le Roux « commande optimale en optique adaptative classique et multiconjuguée » these de doctorat Nice (2003)

[33] J. Borgnino, M. Azouit, R. Bartelli, G. Ceppatelli, L. Paternò, A. Righini, N. Speroni & J. Vernin, "Turbulence Around a Solar Telescope as Deduced from Angle of Arrival Statistics. A Comparison with Microthermal Measurements," *Astron. Astrophys.* 79, 184_189, 1979

[34] J. Borgnino, "Estimation of the Spatial Coherence Outer Scale Relevant to Long Baseline Interferometry and Imaging in Optical Astronomy," *Applied Optics* 29, 1863_1865, 1990

[35] J. Borgnino, F. Martin & A. Ziad, "Effect of a Finite Spatial-Coherence Outer Scale on the Covariances of Angle-of-Arrival Fluctuations," *Optics Communications* 91, 267_269, 1992

[36] J. Borgnino, "Modelling the Optical Effects of Atmospheric Turbulence in High Angular Resolution Astronomical Observation: Wavefront and Related Parameters," *Astronomy with High Contrast Imaging II*, EAS Publications Series 12, 103_124, 2004

[37] J. Maire, A. Ziad, J. Borgnino, D. Mourard, F. Martin, S. Jankov, D. Bonneau & F. Patru, "Wavefront outer scale deduced from interferometric dispersed fringes," *A&A* 448, 1225_1234, 2006

[38] J. Maire, "Modélisation des effets optiques de la turbulence atmosphérique pour les grands télescopes et les observations à Haute Résolution Angulaire," PhD Thesis, Université de Nice-Sophia Antipolis, 2007

[39] J. Maire, A. Ziad, J. Borgnino & F. Martin, "Measurements of profiles of the wave front outer scale using observations of the limb of the moon," *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 377, 1236_1244, 2007

[40] W. DaliAli, "Etude de la dégradation par la turbulence atmosphérique des images du bord solaire : estimation du paramètre de Fried," Mémoire de Magister, USTHB, 2007

[41] A. Ziad : « estimation des échelles limites de cohérence spatiale des fronts d'onde et optimisation des observations à haute résolution angulaire en astronomie », thèse de doctorat (octobre 1993)

- [42] X. Rondeau . « Haute résolution angulaire en astronomie » Rapport de DEA(2004)
- [43] P.Mège « interférométrie avec des guides d'ondes optiques. Théorie et applications. These de doctorat (2002).
- [44] C.Petit « Etude de la commande optimale en OA et OAMC, validation numérique et expérimentale » these de doctorat Paris(2006).
- [45]T. Sadibekova « contribution à l'étude des sites astronomique par modélisation et expérimentation in situ : Application aux sites de la silla et du dome C pour les telescopes geants du futur» Université de Nice-Sophia Antipolis, (2007).
- [46] J.-M.Conan, G.Rousset & P.-Y. Madec,” Wave-front temporal spectra in high-resolution imaging through turbulence,” J. Opt. Soc. Am. A 12, 1559-1570, 1995.
- [47] H.Neckel & D.Labs “ solar limb darkening”, solar Physics 153 :91-114,(1994).
- [48] H.Neckel “analytical reference functions $F(\lambda)$ for the sun's limb darkening and its absolute continuum intensities “solar Physics(2005).
- [49] D.Hestroffer&C.Magnan”Wavelength dependency of the solar limb darkening” A&A 333, 338-342, 1998.
- [50] A .Irbah, P.Assus, A.Berdja, J.Borgnino, M.Fodil et M.Y.Saidi « Microsatellite PICARD, MISOLFA : un moniteur de qualité d'images solaires utile à la mission PICARD », rapport de projet, CNRS service d'Astronomie (2004).

Annexe

Annexe

Programme principale pour l'estimation des paramètres de la turbulence atmosphérique

```
function [theta,cxy,cxy_th] = main_code()
% define global variables so we can use them between functions easily
global D r0 L0 h lambda th;
% read the image and rotate it
load imgMISOLFA ;img = fliplr(img);
% edge_at is the place wehere we will search for the solar edge later, it is between 450 and 650
before scaling the image
edge_at = [450,650];
% scale is the factor by which to scale the image, the original size is too large
% pix is the resolution of the image in arcsec
scale = 32; pix = 0.2;
% here we scale the image, the values of edge_at, and also pix
edge_at = round(edge_at./scale); edge_at = edge_at(1):edge_at(2);
s = size(img)./scale; Mx = s(1); My = s(2);
pix = pix * scale;
O = imresize(img,[Mx My]);imga = double(O);
% define the input variables
N = 32;D = .05;r0 = 0.025;L0 = 1;h = 1000;lambda = 535.7e-9;
cont0 = get_cont(imga(:,edge_at));
cxy=[]; nruns=200;
for i=1:nruns
    i
    [imgn, L, psf] = imgnoniso2(imga,r0,L0,h,lambda,D,N,pix);
    cont = get_cont(imgn(:,edge_at));d = cont-cont0;
    b=[];for j=1:Mx b(j)=sum(((d(1:Mx-j+1)-mean(d)).*(d(j:Mx)-mean(d))))/nruns;end
    cxy = [cxy;b];
end
theta = (1:Mx)*pix;
cxy = mean(cxy,1)*pix.^2;
cxy_th=cxy*0;
```

```

for i=1:length(theta)
    i
    th = theta(i); th = th*pi/(180*3600);
    cxy_th(i) = cov_th() * (180*3600/pi).^2;
end
plot(theta,cxy); hold on
plot(theta,cxy_th,'r');hold off

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function cxy_th = cov_th()
global D r0 L0 h lambda th;
ii = quad(@covth_fun,0,1e5,1e-100);
cxy_th = 0.0716*lambda.^2 * r0.^(-5/3) * ii;
function res = covth_fun(f)
global D r0 L0 h lambda th;
res = f.^3 .* (f.^2 + 1./(L0.^2)).^(-11/6);
res = res .* (besselj(0,2*pi*th*h*f) + besselj(2,2*pi*f*th*h));
res = res .* (2*besselj(1,pi*D*f,1)/(pi*D*f)).^2;
res = res .* cos(pi*lambda*h*f.^2).^2;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [imgn, L, psf] = imgnoniso2(img,r0,L0,h,lambda,D,N,pix)
% size of the image
[Mx,My] = size(img);
layer = 4;
im_pix = max(Mx,My);
im_arcsec = 2 * im_pix * pix;
L = h * im_arcsec * pi/(180*3600);
dx = L/N;
dphi = D*dx/(lambda*h); %%%
if dphi<1, dphi=1; dx=lambda*h/D;end
Delem = 2*round(D/dx);
dx = D/Delem;
L = N*dx;
dphi = D*dx/(lambda*h);

```

```

Nu = round(max(Mx+2*Delem,My+2*Delem)*dphi);
Nu = 2.^(round(log2(Nu)));
%% calculate the phase
phase = turbulus(r0,L0,dx,h,lambda,layer,Nu);
%% apply the phase to the image
[psf,imgn] =applyphi2(img,phase,dphi,Delem);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [psf,imgn] = applyphi2(img,phase,dphi,DimD)
[Mx,My] = size(img);
ksi = exp(sqrt(-1)*phase);
P = pupile(DimD,DimD);
I = zeros(Mx+DimD,My+DimD);
xphi = 1; yphi = 1;
for i=1:Mx
for j=1:My
if img(i,j) ~= 0
pp = ksi(xphi:xphi+DimD-1,yphi:yphi+DimD-1);
psf = abs(fftshift(fft2(P .* pp))).^2;
psf = psf ./ sum(psf(:));
I(i:i+DimD-1,j:j+DimD-1)=I(i:i+DimD-1,j:j+DimD-1)+img(i,j)*psf;
end
yphi = min(round(j*dphi),size(phase,2)-DimD+1);
end
xphi = min(round(i*dphi),size(phase,1)-DimD+1);
end;
imgn = I(DimD/2+1:DimD/2+Mx, DimD/2+1:DimD/2+My);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [psf, imgn] = applyphi(img,phase,dphi,DimD)
[Mx,My] = size(img);
P = pupile(2*DimD,2*DimD);
I = zeros(Mx+2*DimD,My+2*DimD);
ksi = exp(sqrt(-1)*phase);
iX_phi = 1;

```



```

function p = pupile(s,n)
[X,Y] = meshgrid((-s-1)/2:((s-1)/2),(-s-1)/2:((s-1)/2));
p = zeros(s);
p((X.^2+Y.^2)<=(n/2).^2) = 1;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [] = test2d()
N = 512; D=.25; r0= 0.02; dx = 0.01; L0 =10;
fmax = 1./(2*dx);
ff = linspace(0,fmax,N);
[fx,fy] = meshgrid(ff,ff); f2 = fx.^2 + fy.^2;
phi = 0.0228*r0^(-5/3)*(f2 + 1/(L0.^2)).^(-11/6);
nn = 2; psd_exp=[];
for i=1:nn
pp = prepare_fft(phi);
ff = ifft2(pp);
imagesc(real(ff))
a = fft2(real(ff)); a = a(1:N,1:N);
psd_exp = [psd_exp;abs(a).^2];
end
psd_exp = reshape(psd_exp,N,nn,N);
b = mean(psd_exp,2);b = reshape(b,N,N);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function spec = prepare_fft(dspphi)
N = size(dspphi,1);
P = zeros(2*N,2*N);
P(1:N,1:N) = dspphi;
P((N+1):(2*N),1) = P((N+1):-1:2,1);
P(1,(N+1):(2*N)) = P(1,(N+1):-1:2);
P((N+1):(2*N),2:(N+1)) = P((N+1):-1:2,2:(N+1));
P(2:(2*N),(N+1):(2*N)) = P((2*N):-1:2,(N+1):-1:2);
spec = sqrt(P) .* randn(size(P)) .* exp(sqrt(-1)*rand(size(P))*2*pi);
spec((N+1):(2*N),1) = conj(spec((N+1):-1:2,1));
spec(1,(N+1):(2*N)) = conj(spec(1,(N+1):-1:2));

```

```
spec(2:(2*N),(N+1):(2*N)) = conj(spec((2*N):-1:2,(N+1):-1:2));
spec(1,1) = abs(spec(1,1));
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
get the position of the solar disc edge
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
function cont = get_cont(img)
[Mx,My] = size(img);
y0 = 1:My;
x0 = 1:Mx;
yy = ones([size(x0,2),1]) * y0;
ii = [-1,0,1;-1,0,1;-1,0,1];
jj = ones(3);
cc = conv2(conv2(img,jj,'same'),ii,'same');
cc = cc(x0,y0);
cont = (sum(yy.*cc,2)./sum(cc,2)+x0(1)-1)
```

Résumé

La turbulence atmosphérique est le plus grand obstacle aux observations astronomiques terrestres. Elle empêche l'obtention d'images précises d'égale précision que celle des télescopes spatiaux. Malgré les tentatives de minimiser cet inconvénient à partir du choix de bons sites lors de la création de nouvelles observatoires, cela n'est certainement pas suffisant, il est impérative de connaître avec précision l'état de cette turbulence afin de pouvoir la corriger par l'optique active ou adaptative.

Au cours de ces dernières années, les scientifiques tentent de connaître les détails et les caractéristiques de l'atmosphère. La connaissance de ces caractéristiques telles que les paramètres: r_0 , L_0 , h est d'un intérêt majeur en observation astronomique pour optimisation des techniques de haute résolution angulaire (optique adaptative ou active).

L'objectif de cette étude est d'estimer ces paramètres dans le cas solaire par l'analyse statistique des fluctuations d'angle d'arrivée et ceci peut être obtenu directement à partir des observations du bord solaire.

Abstract

The atmospheric turbulence is the biggest obstacle to terrestrial astronomical observations. It prevents us to obtain precise images of equality precision of the space telescopes. In spite of the attempt to minimize this inconvenience by choosing good site for the creation of new observatories, this is certainly not sufficient, it is indispensable to know with precision the state of the turbulence in order to correct it with adaptive or active optics

During these last years, the scientists try to know details and characteristics of the atmosphere. The knowledge of these characteristics such as the parameters: r_0 , L_0 , h is of a major interest in astronomical observation for angular high-resolution optimization of techniques (adaptive or active optics).

The objective of this study is to estimate these parameters the case of observation of the sun by the statistical analysis of arrival angle fluctuation and this can be directly obtained from the observations of the solar edge.

المخلص

يعتبر اضطراب الغلاف الجوي اكبر عائق للمراصد الفلكية. فهو يحول دون إمكانية الحصول على صور دقيقة تكافؤ دقة التلسكوبات الفضائية فبالرغم من محاولة التقليل من هذا العائق عن طريق اختيار مواقع جيدة لإنشاء المراصد إلا أن هذا غير كافي

على مدى هذه السنوات الأخيرة يقوم العلماء بمحاولة معرفة تفاصيل وخصائص الغلاف الجوي إن معرفة هذه الخصائص و المتمثلة في مجموعة المعالم له فائدة كبيرة في تحسين تقنيات الدقة العالية - البصريات الكيفية-

هدف هذا البحث هو محاولة محاكاة وتحديد هذه المعالم من خلال التحليل الإحصائي للتقلبات في زاوية الوصول أين يمكن الحصول على هذه الأخيرة مباشرة من دراسة أطراف قرص الشمس