

## TRAVAIL PRATIQUE

### Mesure de fronts d'ondes par capteur Shack-Hartmann

#### 6. But de l'expérience

L'objectif de ce travail pratique est de

1. reprendre les notions de fronts d'onde et les principales aberrations géométriques.
2. Comprendre le principe d'un capteur Shack-Hartmann et effectuer à l'aide d'un montage ad hoc des mesures de front d'onde avec des effets de tilt, (dé-)focalisation et astigmatisme.



#### 7. Matériel et instrumentation

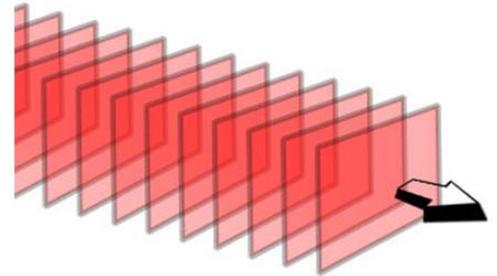
Un petit banc de mesure sur lequel on pourra monter quelques types de lentilles et objectifs, ce banc est composé de:

- Un laser à diode (632 nm) avec un filtre et un beam expander 10x.
- Un diaphragme pour limiter l'ouverture.
- Une caméra USB avec comme objectif un réseau de microlentilles avec un pas de 150  $\mu\text{m}$
- Logiciel développé sous Matlab
- Une lentille convergente lentille et une lentille cylindrique.

## 8. Rappels de théorie

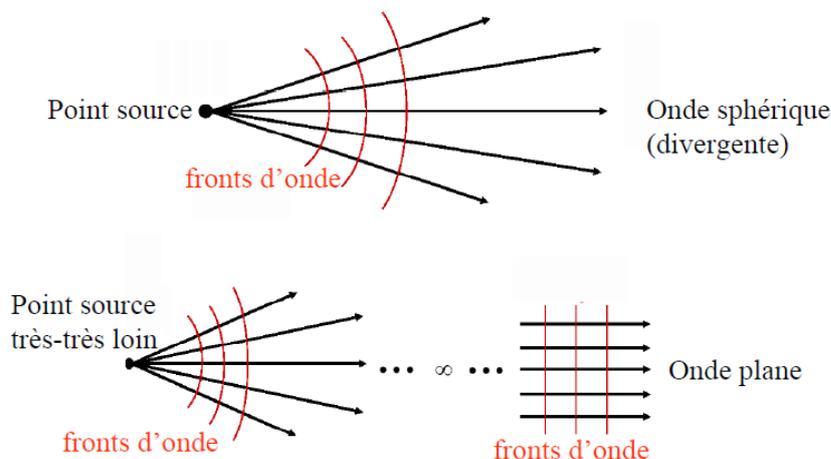
### 8.1 Fronts d'onde

Un front d'onde est la surface "virtuelle" que définit la position des photons (particules dont est composée la lumière), à un instant  $t$ , émis d'une même source de lumière. Il a la particularité que tous les points le composant ont la même phase, mais ils ont également mis le même temps de parcours depuis le point de source. De plus, la surface est toujours perpendiculaire aux rayons.



On distingue deux types d'ondes : les ondes sphériques et les ondes planes. Les dernières sont en fait issues des ondes sphériques et sont formées de plans infinis. En effet si on prend une onde sphérique et que l'on s'éloigne progressivement de son origine, la sphère sera de plus en plus grande, donc sa courbure très grande et proche d'une droite. Ainsi, si on tend vers l'infini, ce ne sera plus une onde sphérique, mais elle sera bel et bien formée de plans infinis (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). C'est pour cette raison que la lumière que l'on reçoit des étoiles est considérée sous forme de fronts d'onde plats étant donné qu'elles se trouvent à des années-lumière de la terre.

**Fronts d'onde plats, les plans correspondent aux fronts d'onde qui doivent être imaginés infinis**



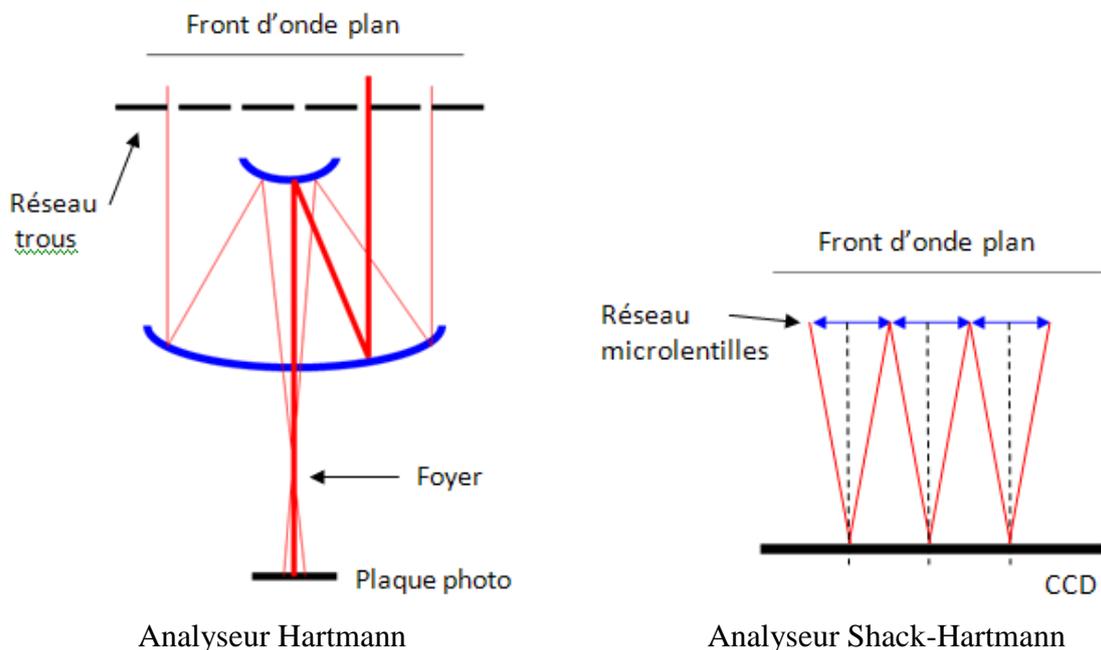
### Fronts d'onde sphériques et plats

Dans un milieu parfaitement homogène et isotrope, les ondes se propageant sans être perturbées restent donc inchangées. Mais dans le cas réel elles dépendent de plusieurs facteurs, comme par exemple, le type et la forme de la source, leur milieu d'évolution, et leur direction de propagation et de plusieurs autres phénomènes météorologiques. Ainsi, les fronts d'onde ne sont plus parfaitement sphériques ou plats, mais perturbés, et si ce sont des ondes lumineuses (domaine optique) il incombe de les compenser.

## 8.2 2.1 Historique

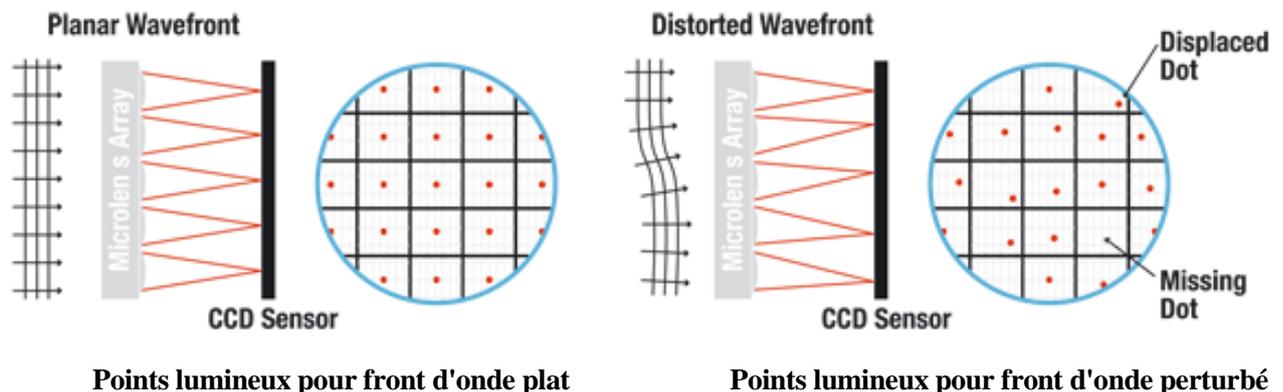
L'analyseur de front d'onde Hartmann fut inventé par l'astronome allemand Johannes Franz Hartmann en 1880. Il proposa de décomposer le front d'onde à l'aide d'une grille faite de trous. Ces derniers ont comme but d'échantillonner le front d'onde afin de n'avoir plus que des portions du front d'onde initial. En l'associant à un télescope, ce système était donc capable de mesurer le front d'onde émis par une étoile directement sur la plaque photo sous forme de. Le système n'est cependant pas très précis et manque en intensité lumineuse.

Il faut attendre 1970 pour que cette technique soit améliorée par Roland Shack. Il eut l'idée de remplacer les trous par des microlentilles (de forme carrée) et ainsi crée un réseau de microlentilles. Avec cette méthode, la mesure est plus précise et on ne perd plus de flux lumineux, donc on a des taches (ou point) plus lumineuses.



### 8.2.1 Fonctionnement du capteur de front d'onde

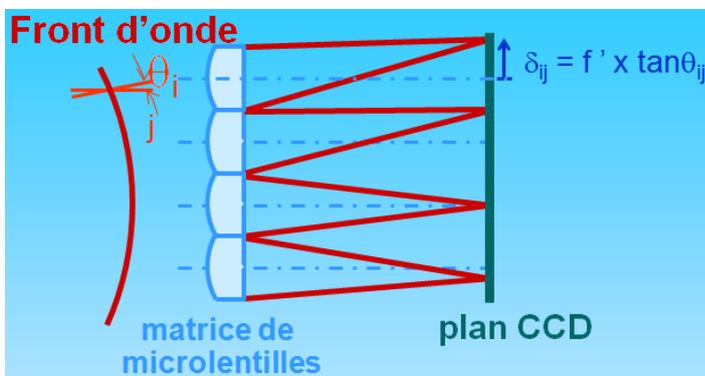
Que ce soit avec le Hartmann ou le Shack-Hartmann on a le principe suivant : avec un front d'onde plane, il va résulter un réseau de point lumineux centré (figure ici-bas), sur une grille virtuelle dans le plan de la plaque photo (dans le cas Hartmann) ou sur le plan du CCD (dans le cas du Shack-Hartmann), alors qu'avec un front d'onde " perturbé " on aura un réseau de points non alignés et non centrés (figure à droite).



Le déplacement des points est le déplacement résultant de l'angle d'incidence de l'onde qui focalise sur le plan focal du CCD.

Par exemple : sur le plan du CCD chaque point est représenté par ces coordonnées  $xy$  (figure ici-bas). Pour reconstruire l'onde perturbée, il suffit de prendre la pente locale à chaque point.

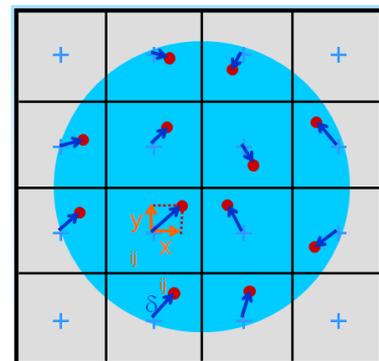
Pour ce faire, il faut mesurer le déplacement  $\delta$  du point par rapport à sa position initiale (c'est-à-dire dans le cas d'une onde plane) et connaître la focale du réseau de microlentilles. Connaissant ainsi la surface de l'onde sous forme de pente on intègre cette surface afin de retrouver l'onde originale.



Calcul de la pente du front d'onde (dans ce cas

$$\delta = \sqrt{x^2 + y^2} \text{ ) et la pente n'est autre que } \tan(\Theta)$$

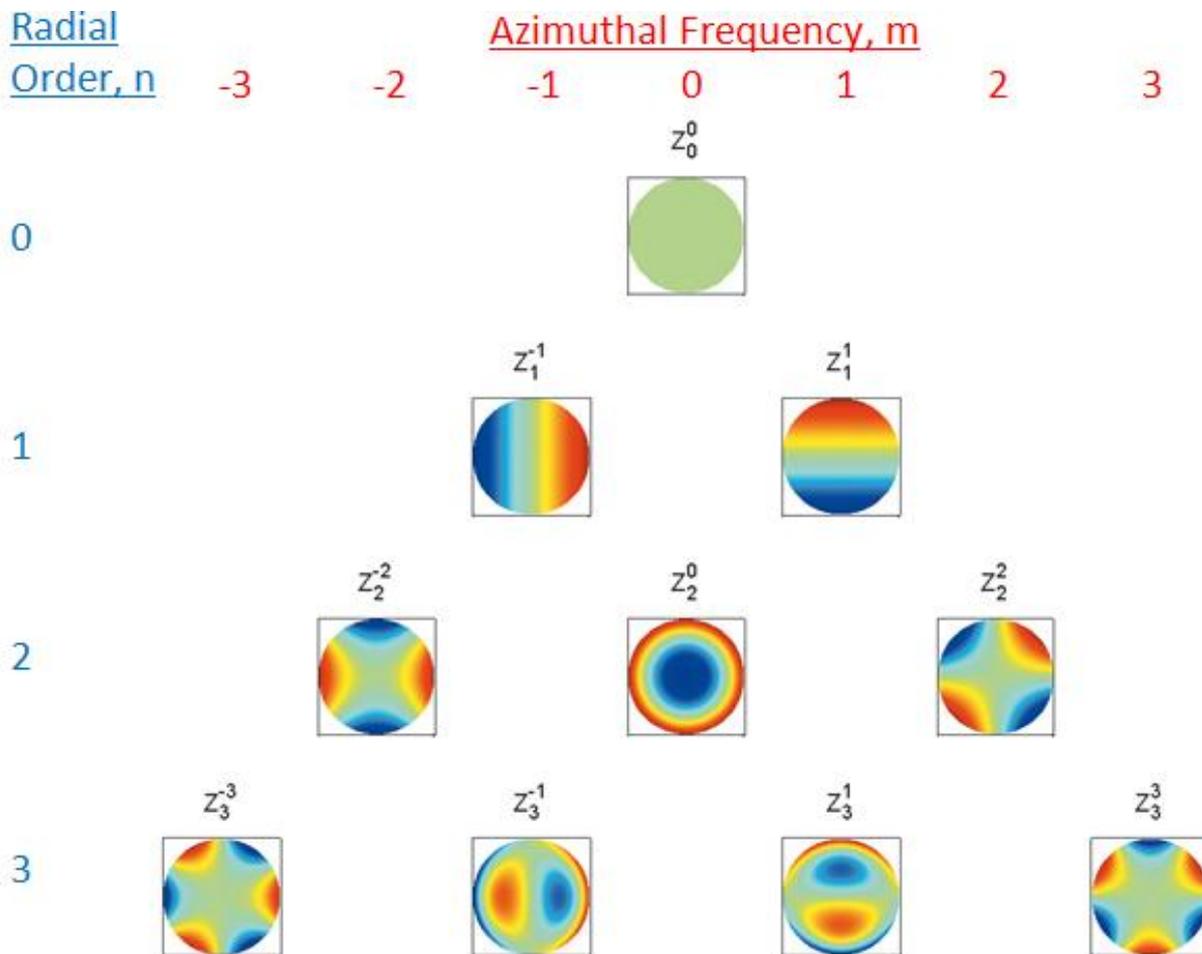
+ Position initiale



Représentation des points lumineux  
en  $xy$  dans le plan CCD

### 8.3 Les modes de Zernike

On peut faire correspondre chaque type d'aberration d'un élément optique circulaire à une forme modale. Celles-ci sont exprimées par les polynômes (modes) de Zernike.



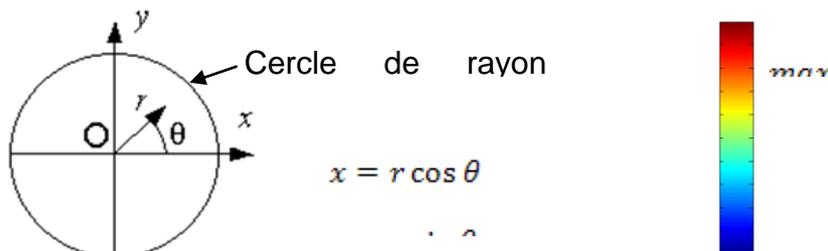
Les modes de Zernike

Les polynômes de Zernike sont des fonctions de deux variables, soit  $r$  et  $\theta$   $x$  et  $y$  en coordonnées cartésiennes,  $r$  et  $\theta$  en coordonnées polaires, définies dans notre cas sur un disque de rayon unité.

Ces fonctions permettent de modéliser un front d'onde lorsqu'elles sont combinées linéairement entre elles ou, dit autrement, lorsque chaque fonction est multipliée par un coefficient (appelé coefficient de Zernike) et que les résultats sont additionnés.

A l'instar de la transformée de Fourier qui permet de reconstruire n'importe quel signal analogique à l'aide de sommes de sinus, les polynômes de Zernike peuvent reconstruire n'importe quelle forme d'onde à l'aide de sommes de mode. Ces dernières étant, comme dans le cas de Fourier, également de nombre infini. On notera que le mode 0 (piston) ne peut pas être mesuré à l'aide d'un Shack-Hartmann, il sera donc seulement utilisé dans les calculs et non pas affiché.

Les conventions utilisées ici sont les suivantes :



L'équation de base d'un mode de Zernike est la suivante :

$$Z_n^m(r, \theta) = R_n^m(r) \cdot \sin m\theta \quad (1)$$

$$Z_n^{-m}(r, \theta) = R_n^m(r) \cdot \cos m\theta$$

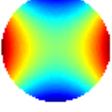
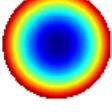
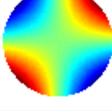
L'indice  $n = 0, 1, 2, \dots$  est appelé le *degré* de la fonction et  $m$  son *ordre*.

On peut représenter  $R_n^m(r)$  sous la forme d'une somme finie de puissance de  $r^2$  :

$$R_n^m(r) = \sum_{k=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^k (n-k)!}{k! \left(\frac{n+m}{2} - k\right)! \left(\frac{n-m}{2} - k\right)!} \cdot r^{n-2k} \quad (2)$$

Cette équation brute se simplifie grandement pour les premiers modes :

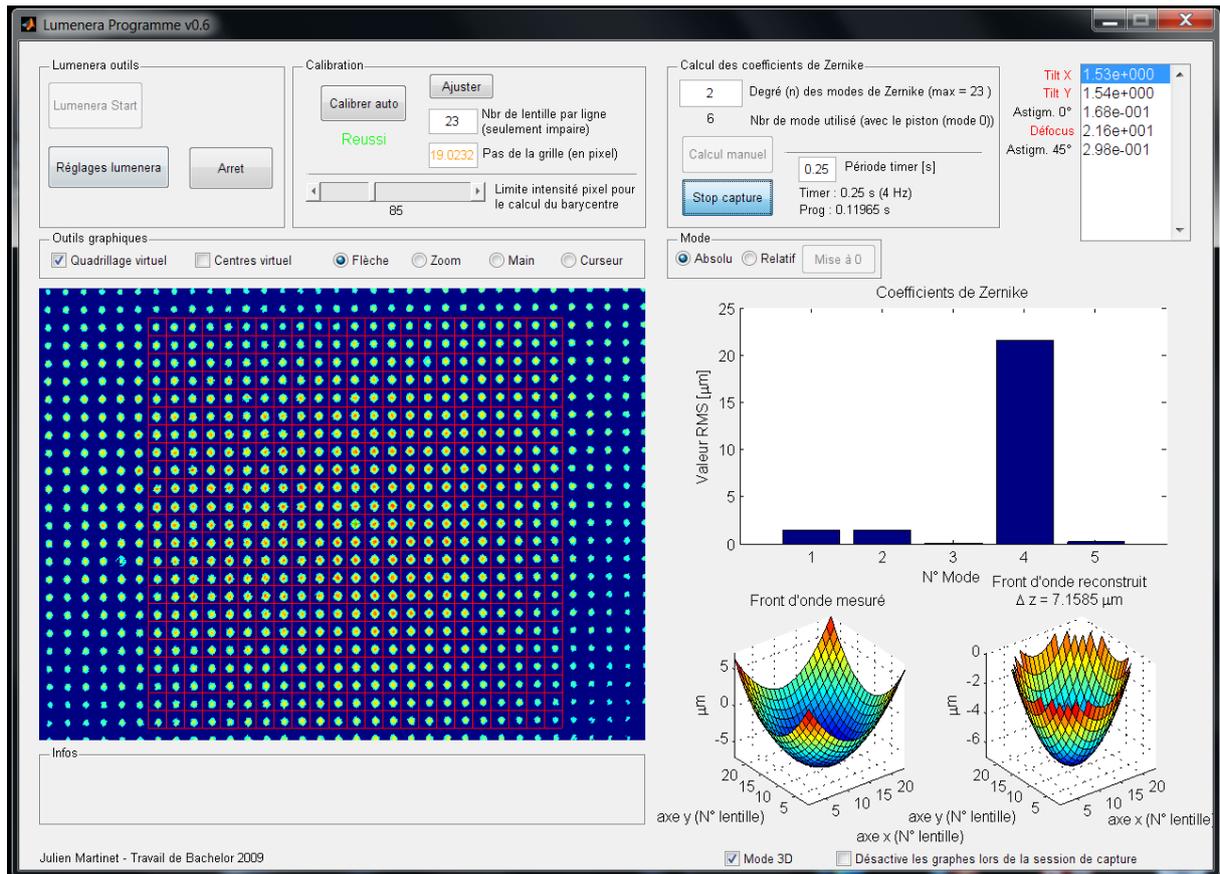
$R_0^0(r)$	1
$R_1^1(r)$	$r$
$R_2^0(r)$	$2r^2 - 1$
$R_2^2(r)$	$r^2$

$Z_0^0(r)$	1	<b>Piston</b>		Mode 0
$Z_1^{-1}(r)$	$r \cos \theta$	<b>Tilt X</b>		Mode 1
$Z_1^1(r)$	$r \sin \theta$	<b>Tilt Y</b>		Mode 2
$Z_2^{-2}(r)$	$r^2 \cos 2\theta$	<b>Astigmatisme 0°</b>		Mode 3
$Z_2^0(r)$	$2r^2 - 1$	<b>Défocus</b>		Mode 4
$Z_2^2(r)$	$r^2 \sin 2\theta$	<b>Astigmatisme 45°</b>		Mode 5

## 8.4 Programme GUI

### 8.4.1 Vue d'ensemble

Il a été réalisé une interface graphique à l'aide de la GUI (Graphic User Interface) de Matlab afin de faciliter les prises de mesures pour l'utilisateur. Il permet en plus d'avoir un choix d'outils de réglage, mais aussi de pouvoir visualiser le front d'onde et ses coefficients de Zernike sous diverses formes. On peut également prendre des mesures en continu (temps réel), avec 2 modes principales (l'absolu et le relatif).

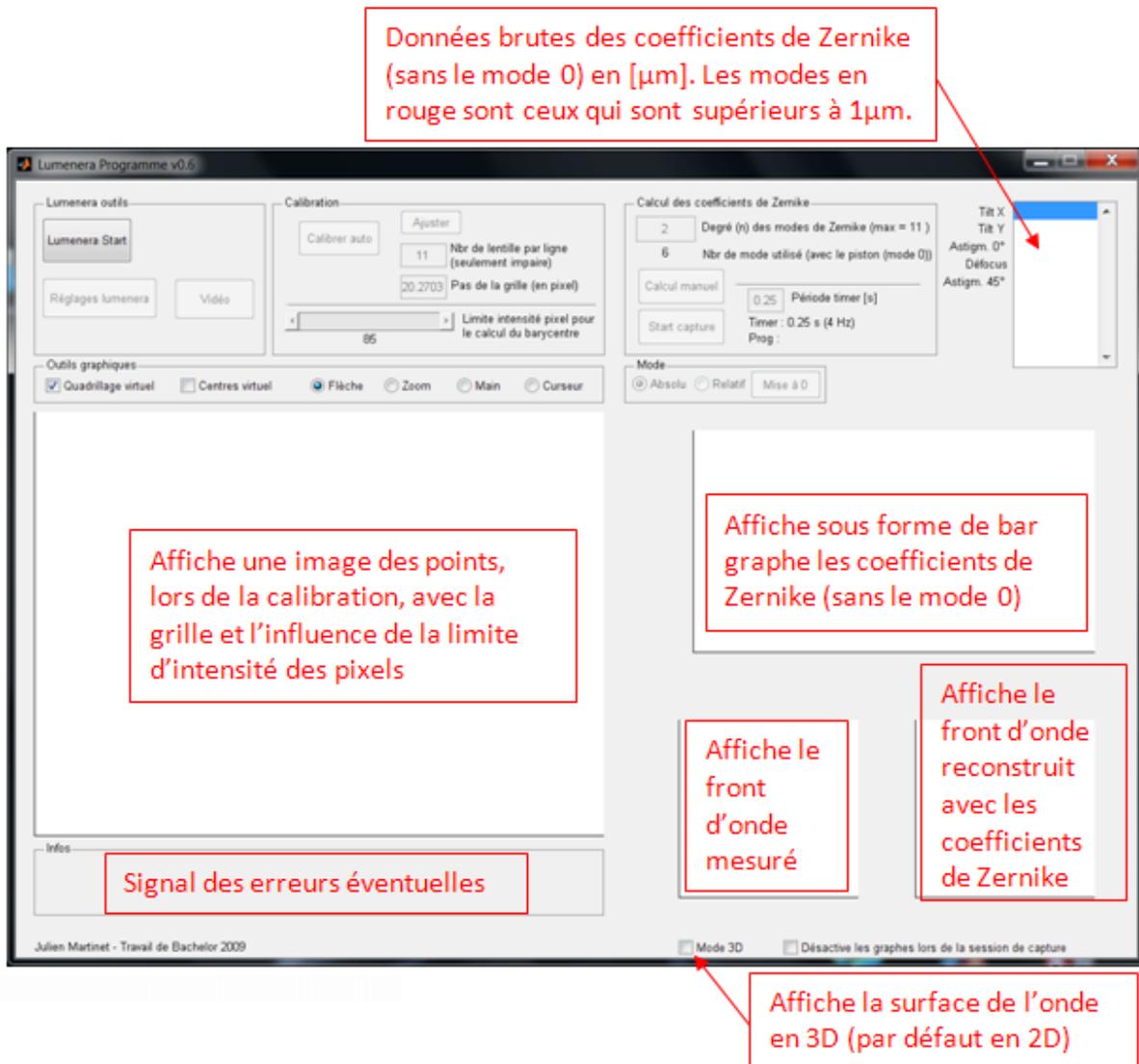


### GUI, vue d'ensemble

Le programme se divise en plusieurs sous-ensembles : Lumenera outils, Calibration, Calcul des coefficients de Zernike, Mode.

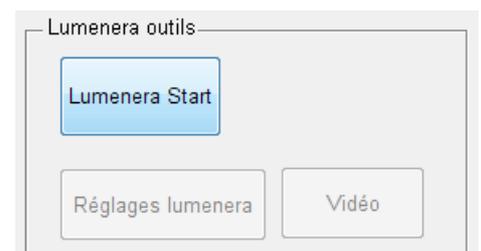
### 8.4.2 Affichages des données

Voici un exemple de tous les types d'information que l'on peut visualiser sur le programme.



### 8.4.3 Outils Lumenera

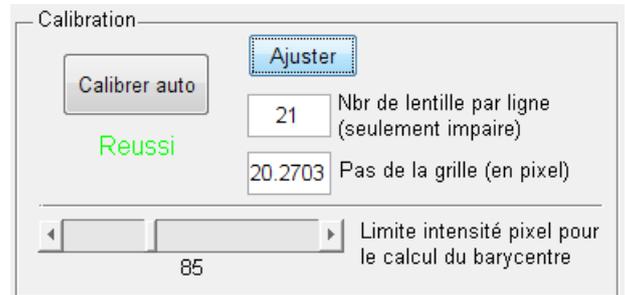
La première chose à faire est de démarrer la caméra Lumenera avec le bouton "Lumenera Start". Une fois cela fait on peut accéder au réglage de celle-ci par "Réglages Lumenera" et modifier ainsi le temps d'exposition ou le gain. On peut également visionner directement l'image qu'elle reçoit en temps réel par le bouton "Vidéo". Ce dernier ouvre une nouvelle fenêtre que l'on peut laisser durant les mesures pour faciliter le positionnement ou simplement visualiser ce qui se passe.



### 8.4.4 Calibration

Il faut ensuite faire une calibration afin d'initialiser plusieurs paramètres importants comme : le nombre de lentilles par ligne ( $n$ ), le pas de la grille (quadrillage virtuel) ( $pas$ ), la limite d'intensité des pixels pour le calcul du barycentre ( $Val\_limite$ ).

En appuyant sur le bouton "Calibrer auto", le programme cherche le point le plus lumineux situé aux alentours du centre de l'image. Puis à partir de ce point, il définit un quadrillage virtuel dont ce point en est le centre. Il calcule en outre automatiquement la valeur du pas de ce quadrillage ( $pas$ ) en fonction de l'écartement moyen des points alentours. Mais comme il ne prend actuellement que les 4 points autour il se peut que le quadrillage ne soit pas adapté.



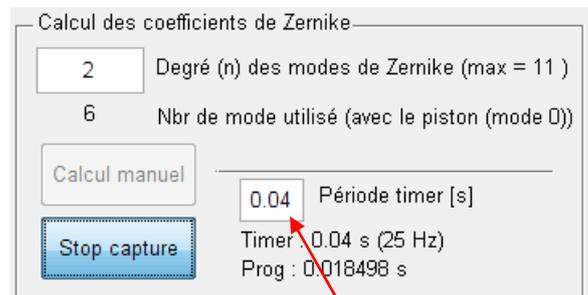
Par ailleurs en général on voudra mesurer le front d'onde par rapport à un plan : pour cela il est nécessaire de remettre le pas. à l'aide de l'entrée y référant, à la valeur nominale de **20.2703** .

Vérifiez que tous les points soient à l'intérieur du quadrillage. On peut également changer le nombre de lentilles par ligne (il doit être impair du fait qu'il est centré sur un point). Ces changements doivent ensuite être validés par le bouton "Ajuster".

### 8.4.5 Calcul des coefficients de Zernike

Il ne reste plus qu'à calculer les coefficients de Zernike. Deux options sont possibles : le calcul manuel ou le calcul automatique ("Start Capture"). Le premier calcule simplement une seule fois lorsque l'on appuie sur le bouton.

Si l'on veut avoir les infos en continu (temps réel), il faut alors utiliser le deuxième bouton ("Start Capture"). Ce dernier exécute le calcul en continu à chaque période de temps (défini par la case "Période timer"). Par exemple si on met **1 s** cela veut dire que chaque seconde il calcule les coefficients. Si le traitement du calcul est plus long que le temps réglé dans "**Période timer**" une sécurité a été mise afin d'arrêter la session de calcul pour éviter que le programme devienne instable et finisse par planter. Cependant il tolère quelque pics plus grands que 1.5 fois la période, mais si c'est trop fréquent mieux vaut augmenter la période. Il est également possible que le temps de traitement varie en fonction de la puissance de l'ordinateur qui exécute le programme.



Temps de traitement de tous les calculs y compris les affichages des graphes (si activé)

Pour afficher les graphes dans le mode "Start Capture", il faut décocher la coche "Désactive les graphes lors de la session de capture". Mais le traitement sera alors plus long et il faudra surement augmenter la période.

### 8.4.6 Mode d'exécution

Deux modes sont possibles pour les calculs : soit en absolu, soit en relatif. Le mode absolu fait tous les calculs du front d'onde à partir d'un front d'onde plat, alors que le mode relatif permet de calculer à partir d'un référentiel choisi par le bouton "Mise à 0". En effet on appuyant à n'importe quel moment sur ce bouton, on met à zéro les coefficients ainsi que la surface du front d'onde. Puis à partir de ce moment, toutes les mesures qui suivent sont calculées à partir de cette mise à zéro.



Un problème peut survenir avec le mode relatif, en effet si entre temps les points se sont écartés en dehors du quadrillage (le pas des points qui a augmenté ou diminué), les points se chevauchent alors dans une même fenêtre. Et comme il n'y a plus la possibilité d'adapter à nouveau la grille, des surfaces incorrectes peuvent être mesurées. La seule façon est donc de faire une calibration auto ou d'ajuster le pas de la grille, mais alors le mode relatif sera perdu.

Voici un exemple d'une surface mesurée fautive avec un pas pour la grille supérieur à celui des points mesurés.

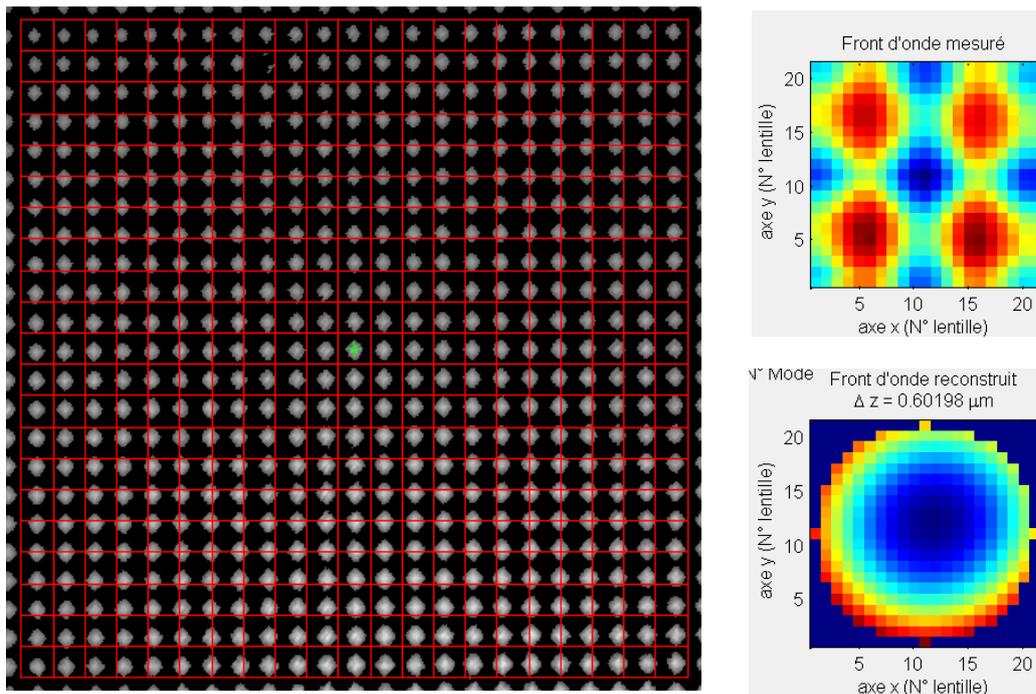


Figure 1 : Exemple d'une mesure erronée à cause des chevauchements des points à

## 9. Procédure de travail

### 9.1 Préparation

1. Examiner le montage de mesure.
2. Comprendre le principe général. Comprendre la fonction de chaque élément du banc et des divers réglages.
3. Réaliser un schéma optique et un croquis avec les principales dimensions.

### 9.2 Mesures

- Aligner et bien centrer (par rapport à l'ouverture du diaphragme) le faisceau laser avec les deux miroirs réglables.
- Régler le diaphragme pour un diamètre connu. Lancer le programme `lumenera_programme`.
- Cliquez <Lumenera Start> ensuite <Video> qui va ouvrir une fenêtre avec l'image prise par la caméra. Bien centrer la caméra et éventuellement réaligner pour avoir l'illumination la plus homogène possible. Régler les paramètres (temps d'exposition, gain) de la caméra.
- Cliquez <Calibrer auto>, afin de mesurer en absolu, i.e. par rapport à un front d'onde nominale plat, il faudra ensuite réassigner le <Pas de la grille> à **20.2703**. Cliquez ensuite <Ajuster>.
- Mettez prudemment le <Periode timer> à 1 seconde et lancer <Start capture>. Observez les modes calculés.
- Ajuster le *beam expander* et le *tip tilt* afin d'optimiser le parallélisme du faisceau ainsi que sa perpendicularité au capteur. Obtenez ainsi le front d'onde le plus *plat* possible. Notez la valeur moyenne des coefficients de Zernike ainsi que la déviation maximum du front d'onde que vous obtenez.
- On veut maintenant provoquer des modes particuliers. Notez pour chaque cas la valeur moyenne des coefficients de Zernike ainsi que la déviation maximum du front d'onde.
  - Modes tip-tilt: observez l'évolution de ces modes quand on agit sur les réglages du tip-tilt de la caméra.
  - On peut obtenir une mesure des angles ( $R_x$  et  $R_y$ ) de la camera par rapport à l'axe du faisceau à partir des valeurs des coefficients des modes tip-tilt (qui sont en  $\mu\text{m}$ , référés au rayon  $R$  de la pupille du réseau de microlentille (voir la figure en annexe - chap. 10 ici-bas). Evaluer donc la gamme et la résolution, traduite en unités d'angle (i.e.  $\mu\text{rad}$ ) qu'on peut avoir avec cette configuration de capteur.
  - Un mode de défocus pur peut en principe être obtenu en plaçant une lentille convergente devant la caméra. A moins que le faisceau soit parfaitement perpendiculaire, on va aussi ajouter un peu de tip-tilt : Régler donc le montage de la caméra pour le minimiser, et on devrait bien voir le défocus.
  - On peut utiliser la mesure de ce défocus pour contrôler la focale de la lentille (ici à supposer inconnue). Mesurez la distance  $a$  et calculez le  $\Delta z$  théorique avec les formules données en annexe (chap. 10 ici-bas), qu'on peut comparer avec la mesure par le Shack-Hartmann.

- Une lentille cylindrique donnera par contre une combinaison d'astigmatisme et défocus. Orientez la lentille à  $0^\circ, 90^\circ, 45^\circ$ . Qu'observez-vous au niveau des modes ? Pourquoi y-a-t-il aussi du défocus ? Notez que vous devrez probablement remettre le tip-tilt à zéro à chaque réalignement de la lentille.
- Essayez d'avoir respectivement soit de l'astigmatisme  $0^\circ$  soit de l'astigmatisme  $45^\circ$  (voir les modes à la page 6). Notez les valeurs des coefficients de Zernike ainsi que la déviation maximum du front d'onde que vous obtenez dans chaque cas.

## 10 Distribution du travail

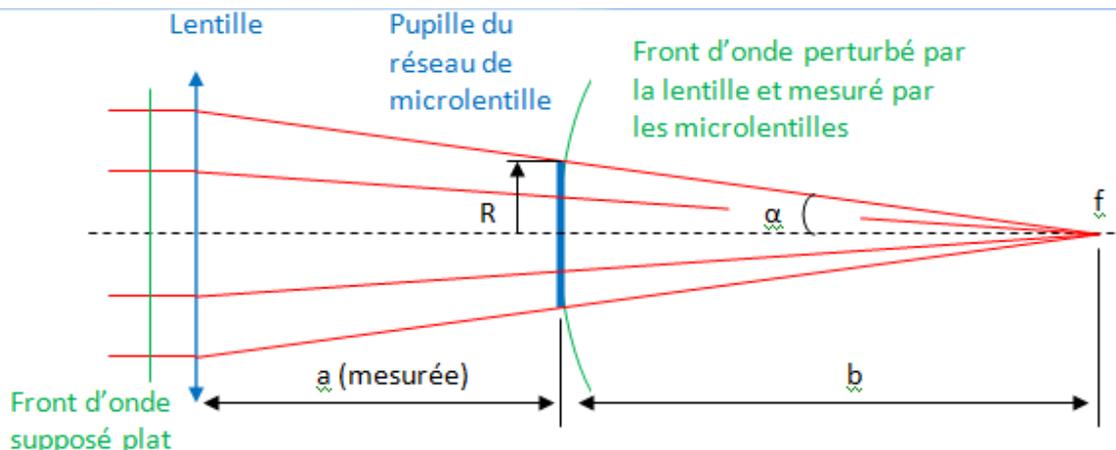
Ce TP sera généralement réalisé en équipe de 2 ou 3 personnes. Chaque groupe est évidemment libre de s'organiser: toutefois on suggère que :

- au moins une personne se dédie déjà durant la manip aux calculs par Excel ou Matlab de support et compréhension des résultats trouvés ;
- au moins une personne vérifie que toute la procédure est entièrement et bien suivie et prene des notes, des mesures et des croquis exhaustifs durant la manip ;
- au moins une personne soigne particulièrement le montage et les mesures, prene des photos, etc..

Le rapport peut être rédigé en se partageant le travail mais il devra être revu et corrigé avant livraison par tous les membres.

Il est en tout cas primordial que **tous les membres de l'équipe maîtrisent tous les aspects**, à la fois pratiques et théoriques, de ce travail pratique.

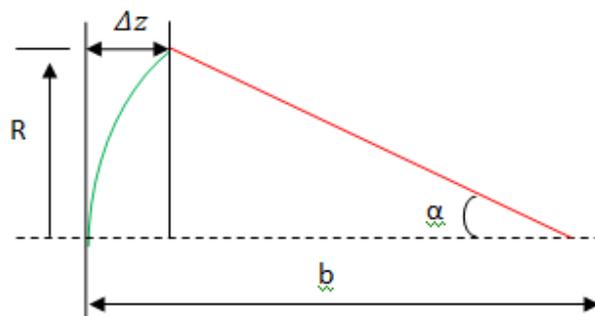
## 11 ANNEXE: Formules pour un front d'onde convergent



$$f = a + b \Rightarrow b = f - a$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{R}{b}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{R}{f - a}\right)$$

En zoomant sur le front d'onde on trouve :



$$\Delta z = b \cdot (1 - \cos(\alpha)) = b \cdot \left(1 - \cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{R}{f - a}\right)\right)\right)$$

Le rayon ( $R$ ) de la pupille se calcule en prenant la distance entre le centre de la pupille et le centre du dernier pixel multiplié par le pas des microlentilles.

