

La haute résolution spatiale en images

Georges Paturel, Observatoire de Lyon

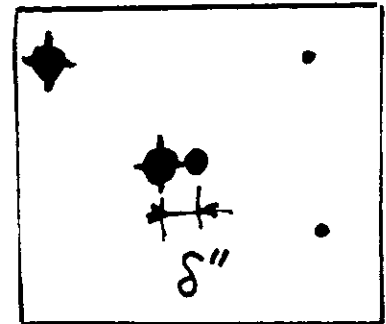
ARTICLE DE FOND

Cette contribution souhaite vous initier à ce qu'on appelle la haute résolution spatiale, c'est à dire l'art de séparer deux étoiles avec un télescope, ou, plus généralement, l'art de voir les détails d'une image.

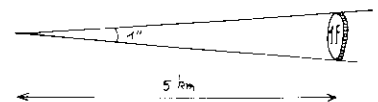
Notre présentation en images, avec peu de texte, demandera au lecteur un effort pour lire entre les lignes, pour compléter l'information. L'article suggère plus qu'il n'explique. Pour arriver à cette simplicité il y a des raccourcis. Nous demandons aux puristes de nous les pardonner. Ces raccourcis ne devraient pas entraver la compréhension du phénomène (c'est en tout cas ce qu'espère l'auteur). Par exemple, quand nous parlons de l'onde électromagnétique nous ne considérons que la composante du champ électrique sans parler du champ magnétique.

Le but du propos est de faire appréhender sans calcul le phénomène complexe de la **diffraction** qui fait que l'image d'une source ponctuelle a une dimension non nulle et irréductible pour un télescope donné. C'est ce phénomène qui règle la résolution maximale que peut espérer un télescope. Nous pourrions comprendre alors une technique géniale, « l'**interférométrie des tavelures** », inventée par l'astronome Antoine Labeyrie. Cette technique permet de reconstituer l'image dégradée lors de la traversée de notre atmosphère terrestre. Nous arriverons enfin à la présentation de la technique qui est en train de révolutionner l'observation depuis le sol : l'**optique adaptative**. A l'aide d'un système piloté par ordinateur on corrige en temps réel les déformations introduites par notre atmosphère.

La haute résolution spatiale est le pouvoir de séparer angulairement deux objets (par exemple deux étoiles).

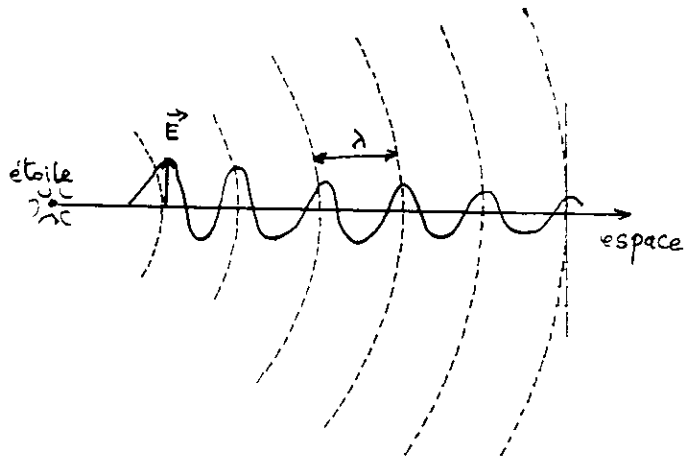


On mesure la séparation en secondes d'arc. Une seconde d'arc est l'angle sous lequel on voit une pièce de un franc placée à 5 km.

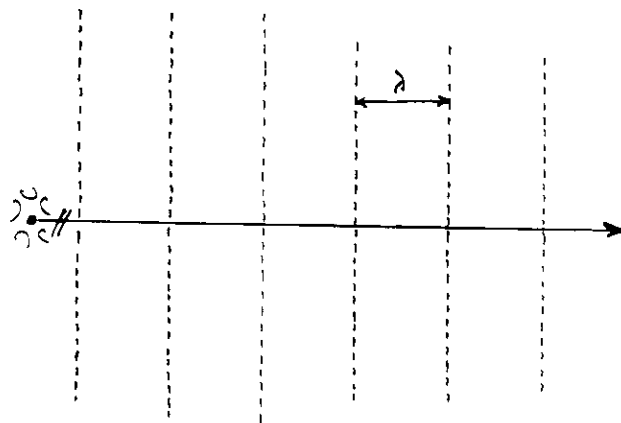


Onde électromagnétique

Une onde lumineuse est formée d'un champ électrique \vec{E} qui "ondule" en ondes sphériques issues de l'étoile.



A grande distance de l'étoile, l'onde est quasiment plane.

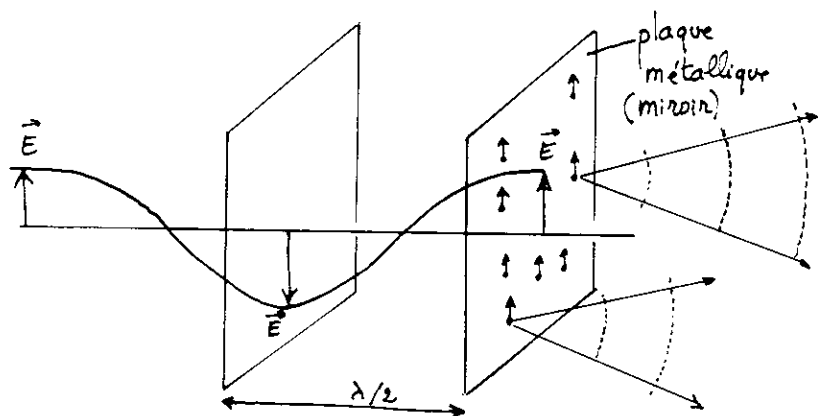


Effet d'une onde sur des électrons libres

En présence d'un champ électrique, l'électron subit une force donc une accélération.

Or, un électron accéléré crée un champ électrique \vec{E} , donc une onde.

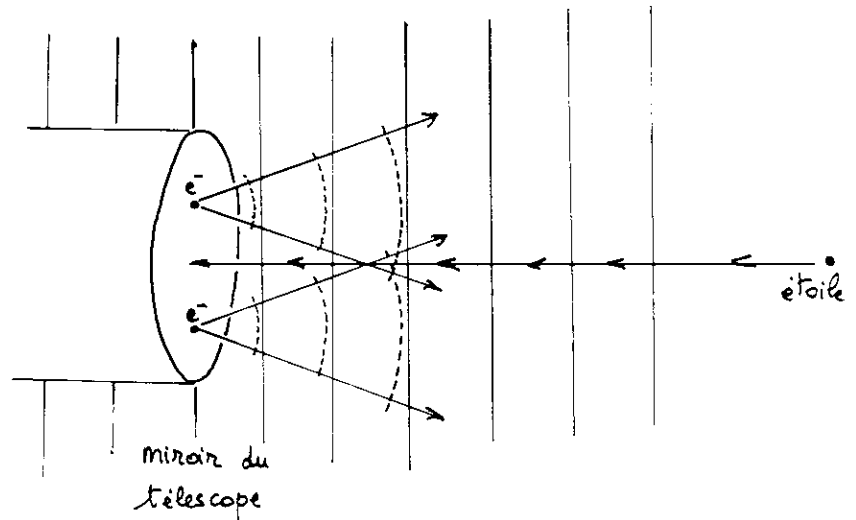
Tous les électrons libres d'une plaque métallique sont mis en mouvement de va-et-vient sous l'effet de l'onde. L'onde est absorbée, mais les électrons étant accélérés vont réémettre à la même fréquence mais **dans toutes les directions**.



Cas d'un miroir de télescope

Comment se recombinent les ondes réémises par les électrons libres du miroir ?

Nous allons prendre en compte le fait que le miroir est concave.

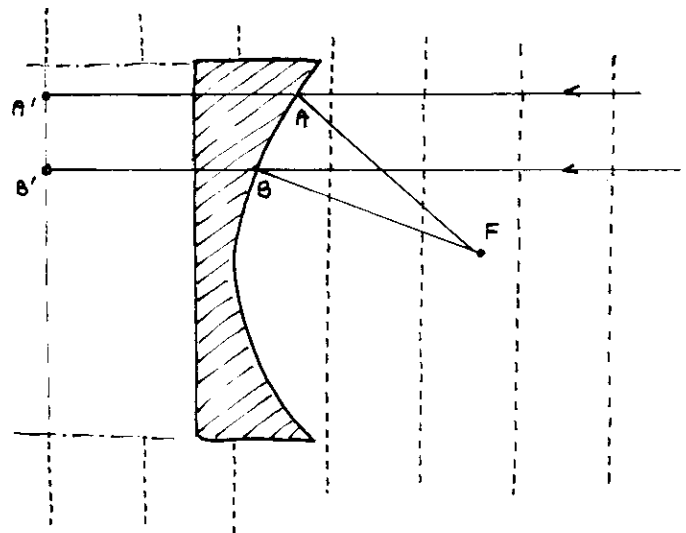


Miroir parabolique

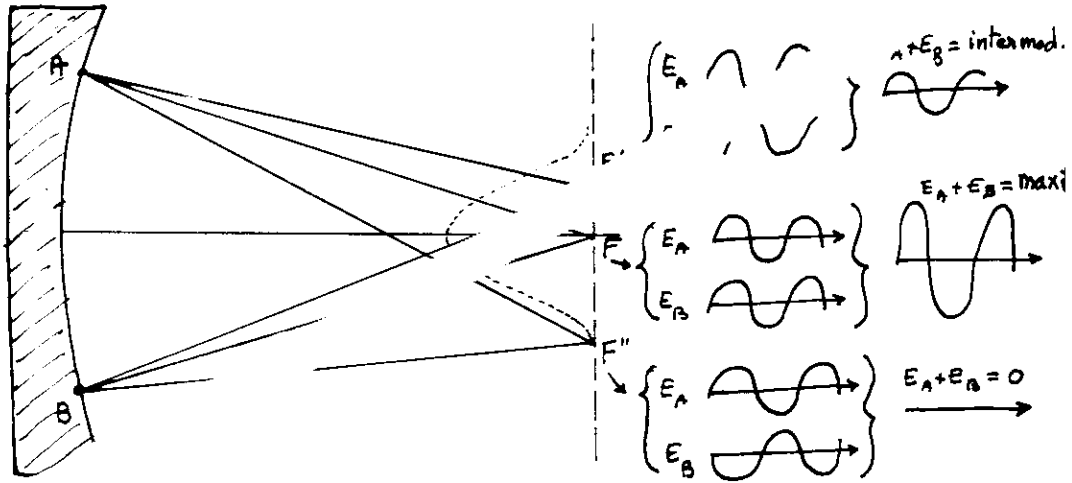
Tous les rayons convergent en F.

Les champs électriques \vec{E} y sont tous en phase car $A'A = FA$, $B'B = FB \dots$

Regardons ce qui se passe près du foyer F quand les ondes de deux électrons se recombinent.



Recombinaison des ondes réémises par deux électrons "La diffraction"

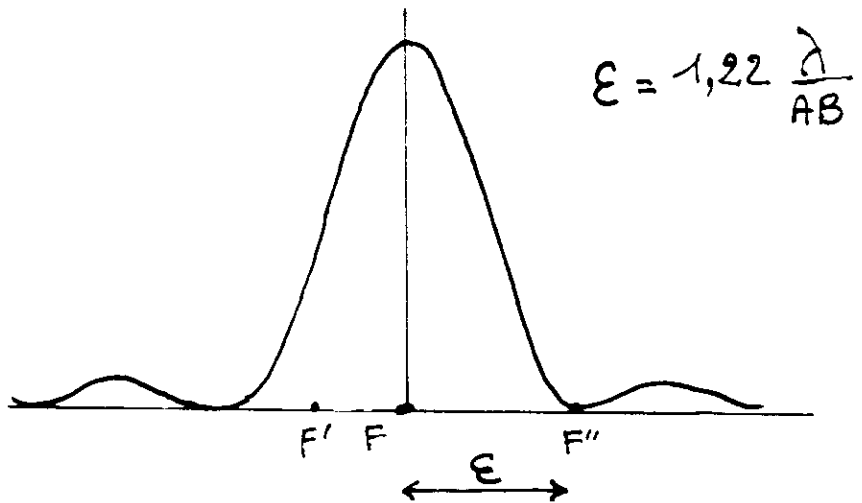


En F les deux ondes sont en phase ce qui implique un maximum de lumière.

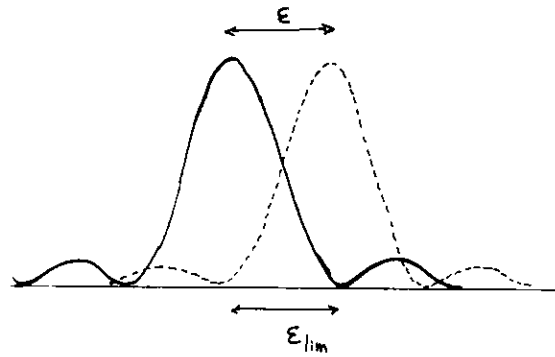
En F' une des ondes est en retard. Il y a donc une atténuation de la lumière.

En F'' les deux ondes s'annulent. Il n'y a donc plus de lumière.

Avec deux électrons on observerait une série de maxima et de minima, mais si on prend en compte tous les électrons du miroir on obtient un maximum en F seulement car **il n'y a qu'en F que toutes les ondes sont en phase.**



Le pouvoir séparateur



$$\epsilon_{lim} = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

$$\epsilon_{lim}'' = \frac{14''}{D} \quad \text{à } \lambda = 0.55 \mu\text{m}$$

Cette courbe avec un maximum est l'image de l'étoile ponctuelle. Si nous observons deux étoiles séparées de ϵ'' , les deux courbes de leurs images vont se superposer.

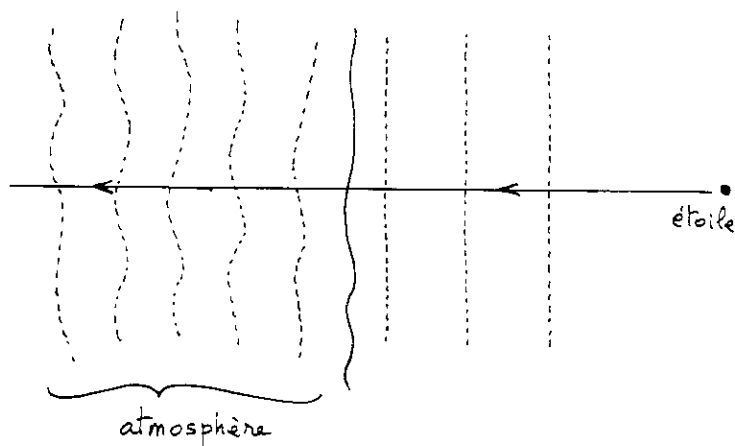
Nous ne séparerons les deux étoiles que si ϵ est supérieur à la valeur limite ϵ''_{lim} .

Pour un télescope de diamètre $D = 3,60$ m on a $\epsilon''_{lim} = 0,04''$.

Pour le télescope spatial, "Hubble" ; $\epsilon''_{lim} = 0,06''$

Mais ...

Les inconvénients de l'atmosphère terrestre.



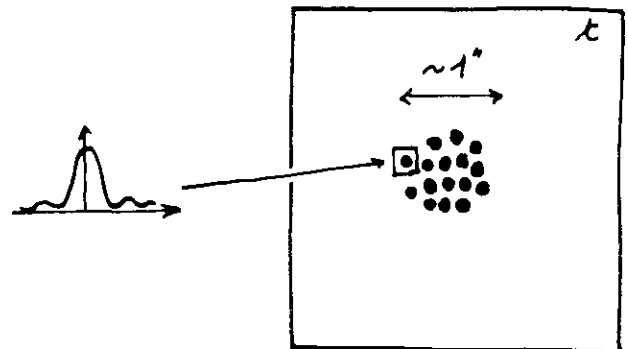
La vitesse de la lumière dans l'air dépend de l'indice de réfraction n :

$$v = \frac{c}{n}$$

Or n n'est pas constant, **l'onde plane est déformée**

Au foyer du télescope on n'observe pas une image mais **plusieurs taches**.

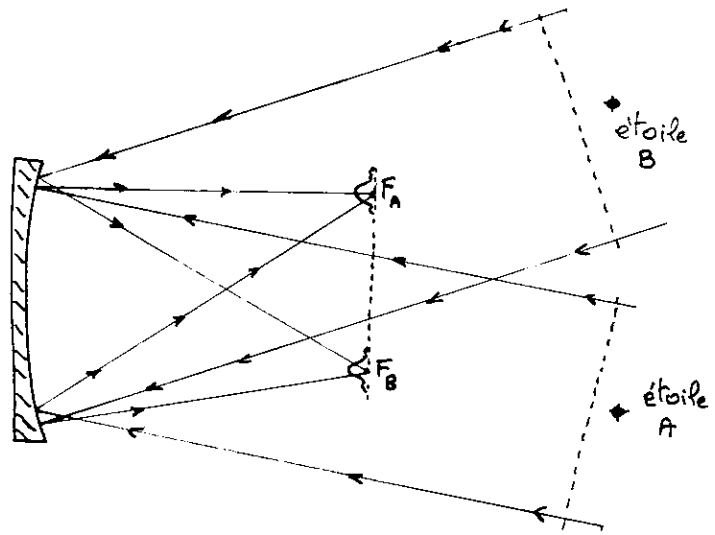
Essayons de comprendre pourquoi.



Les tavelures

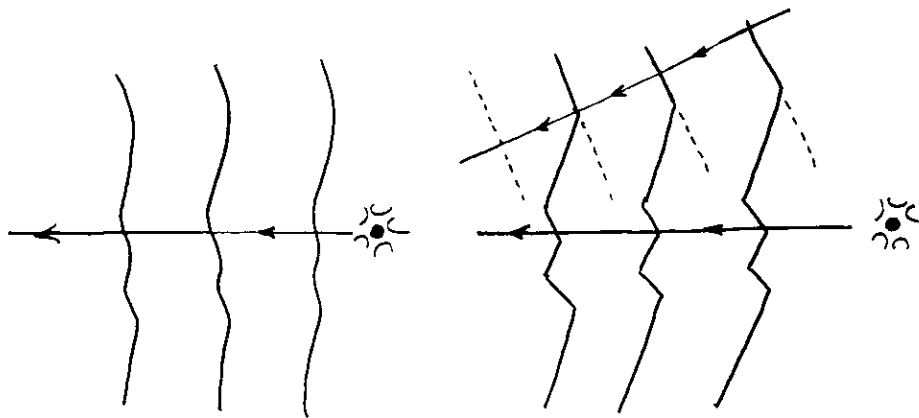
Deux ondes planes venant de deux étoiles donnent deux images F_A et F_B .

Si on représente les déformations de la surface d'onde traversant l'atmosphère par des plans d'inclinaisons différentes, on comprend qu'un point source (étoile) donnera plusieurs taches : les tavelures.

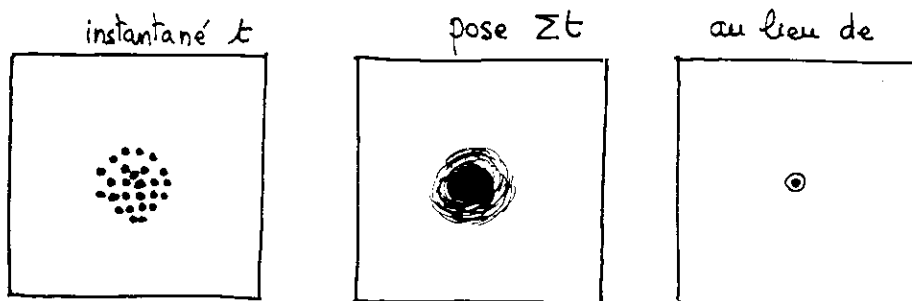


Plan d'onde réel

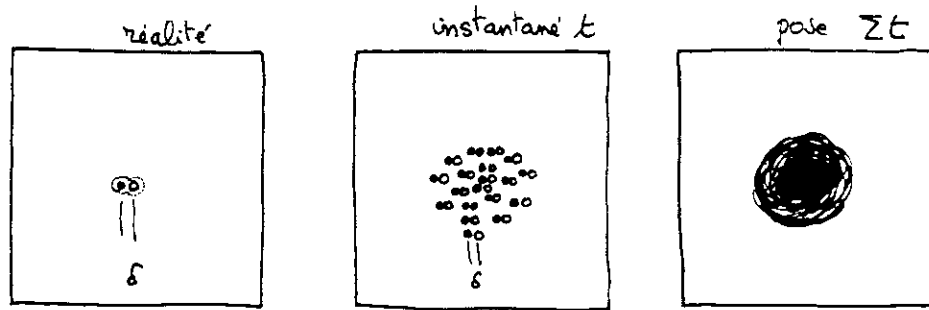
Représentation



Conséquence sur l'image d'une étoile



Conséquence sur l'image de deux étoiles

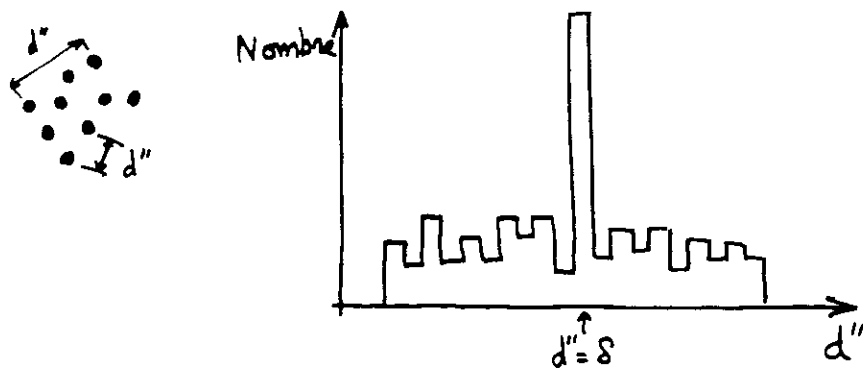
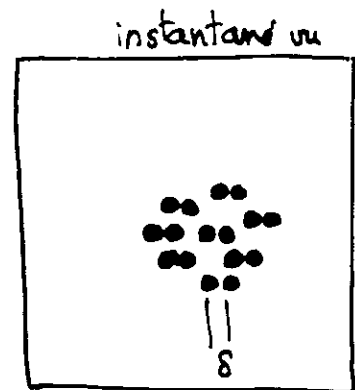


Après une pause (Σt) les deux étoiles ne sont plus séparables.

La "speckle" interférométrie (interférométrie des tavelures)

A priori, on ne sait pas que les tavelures viennent de deux étoiles.

Si on enregistre toutes les images instantanées et que l'on construit l'histogramme de toutes les séparations entre tavelures on obtiendra le résultat ci-dessous.

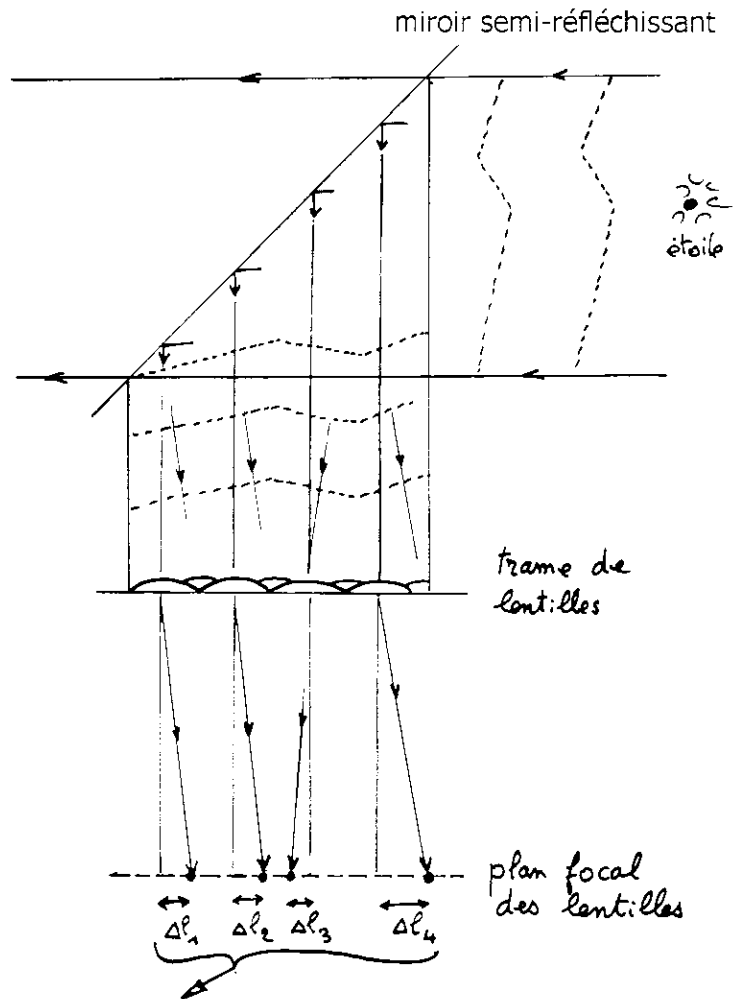


L'optique adaptative

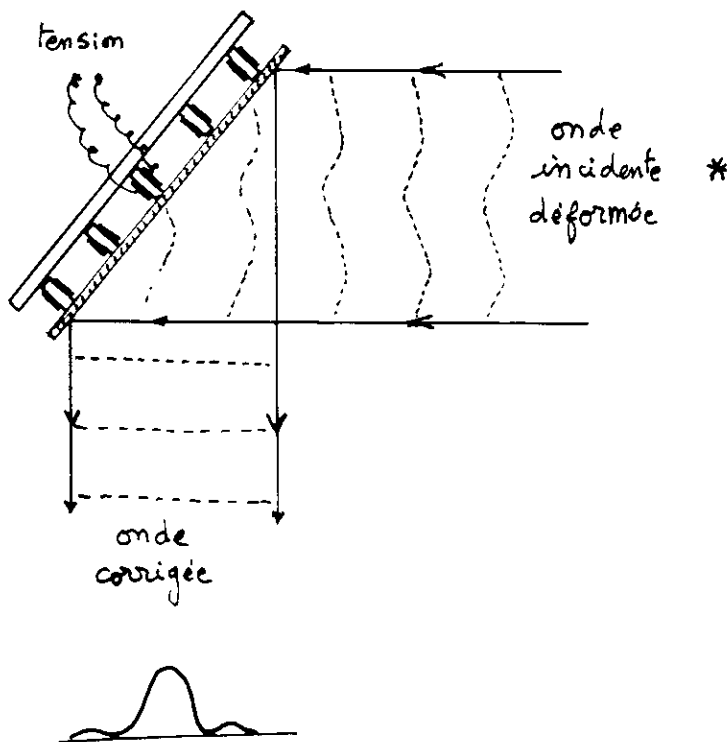
Une séparation reviendra plus souvent : la séparation δ vraie entre les deux étoiles.

Il est maintenant possible d'analyser les déformations de la surface d'onde.

Les Δ_i donnent la forme de l'onde à un instant donné.



Analyse des Δ_i par ordinateur en temps réel



Correction de la surface d'onde

A l'aide d'une série de poussoirs piezo électriques, on applique des déformations à un miroir selon les Δ_i mesurés.

On corrige ainsi les déformations de l'onde...

et on obtient une image parfaite de l'étoile.