

# TÉLESCOPE

## Niveau

L2/3

## Commentaires du jury

— prout

## Bibliographie

- Houard optique-approche expérimentale et pratique
- Hetch Optique
- lien interferomètre stellaire

## pré-requis

- Optique géométrique
- Diffraction des ondes lumineuses
- Interférences

## Expériences

—

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Le télescope de Newton</b>	<b>2</b>
1.1	Présentation . . . . .	2
1.2	Caractérisation . . . . .	2
1.3	Limites . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Interféromètre stellaire</b>	<b>3</b>
2.1	Cohérence spatiale . . . . .	3
2.1.1	Illustration . . . . .	3
2.1.2	Notion de largeur de cohérence . . . . .	4
2.2	Réalisation et ordre de grandeur . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Optique adaptative</b>	<b>6</b>
3.1	Estimation des turbulences et comparaison à la résolution du télescope . . . . .	6
3.2	Principe de l'optique adaptative . . . . .	6

# Introduction

La fonction première des systèmes tels que les lunettes ou les télescopes est d'observer nettement des objets extrêmement éloignés et souvent à peine visibles. Astronomiquement parlant, il s'agit de pouvoir résoudre des objets, c'est-à-dire de distinguer des détails au sein d'un même corps céleste, par exemple deux étoiles dans un système binaire.

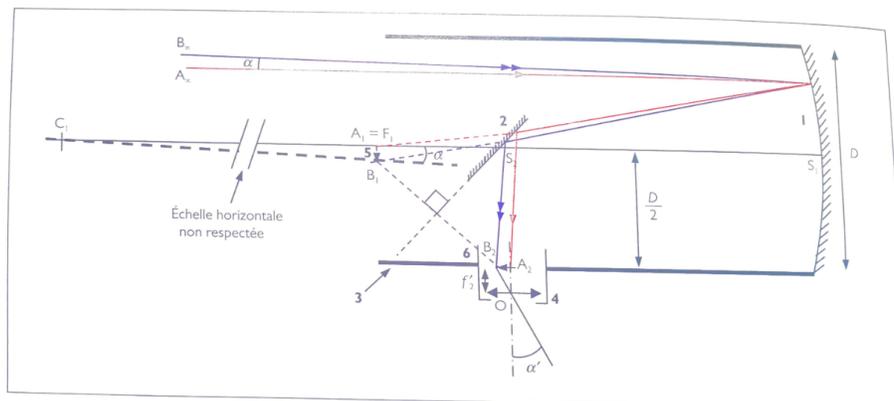
La lunette astronomique utilise des lentilles. Ici on ne vas pas 'y intéresser, pourquoi? Parce qu'il y a des aberration chromatique et qu'il sont limité en taille (hors on va voir que pour augmenter sa résolution et sa luminosité on a tout intérêt à avoir de grand dispositif) : alors que les plus grands télescopes à miroirs ont des diamètres d'entrée de plus de 8 mètres, l'objectif de la plus grande lunette astronomique ne mesure qu'un mètre de diamètre (Observatoire Yerkes, Wisconsin, USA).

"Après quelques expérimentations assez limitées, Newton renonça également à l'idée d'éliminer l'aberration chromatique des lentilles des lunettes d'approche. Concluant à tort que cela ne pouvait être réalisé, il se tourna vers les configurations à miroirs. Le premier télescope à réflexion que réalisa Newton en 1668 ne faisait que 6 pouces (environ 15 cm) de long et 1 pouce (2,5 cm) de diamètre, mais il grossissait déjà 30 fois.

## 1 Le télescope de Newton

Bien qu'inventé il y a des siècles, le télescope de Newton est le télescope grand public couramment utilisé aujourd'hui : ses performances sont suffisantes.

### 1.1 Présentation



**Figure 7.42** Schéma de principe et marche des rayons dans un télescope de Newton.  
 1 : Miroir principal sphérique (ou paraboloidique)  $M_1$  2 : Miroir secondaire plan  $M_2$  incliné à  $45^\circ$  sur l'axe optique 3 : Tube de l'instrument 4 : Oculaire, de centre O et distance focale  $f'_1$  5 :  $A_1B_1$ , première image intermédiaire, renversée dans le plan focal de  $M_1$  6 :  $A_2B_2$ , seconde image intermédiaire, renversée dans le plan focal objet de l'oculaire 7 : Angle  $\alpha'$  sous lequel l'image finale  $A'B'$  est vue par l'œil de l'observateur

FIGURE 1 – Schéma du télescope de Newton (Houard)

Le microscope de Newton est constitué d'un miroir sphérique qui forme une image intermédiaire  $A_1B_1$  de l'objet observé  $A_\infty B_\infty$ , sur l'axe optique du miroir et perpendiculaire à celui-ci. Un second miroir, plus petit de manière à ne pas obturer complètement les rayons incidents, est placé sur l'axe optique et forme une nouvelle image  $A_2B_2$  dans un tube placé sur le côté du tube principal. Dans ce tube, on place un oculaire assimilé à une lentille mince convergente. On fait en sorte que  $A_2B_2$  se trouve dans le plan focal objet de l'oculaire, pour que l'image finale  $A'B'$  se trouve à l'infini : de cette manière, l'oeil sain n'a pas à accommoder.

### 1.2 Caractérisation

Les calculs sont dans le Houard, Optique - Une approche expérimentale et pratique, p. 180.

**Effet du miroir sphérique :** relation entre  $\alpha$ ,  $A_{B_1}$  et  $f'_1$ .  $f'_1 = R_1/2$  où  $R_1$  est le rayon de courbure du miroir.

**Effet du miroir plan :** Condition pour placer  $A_2B_2$  dans le tube de l'oculaire. On fait l'image du miroir par symétrie (parce que c'est un miroir plan). On fait le lien avec l'encombrement.

**Lentille de l'oculaire :** Il s'agit de projeter une image à l'infini. On peut en déduire le grossissement avec un peu de trigo. Quelques ODG.

**Nombre d'ouverture :**

### 1.3 Limites

On est limité.es par l'encombrement du télescope, et la planéité des miroirs.

C'est la focale du miroir qui fixe la position de  $A_1$ . 2 possibilités : soit on augmente  $D$ , soit augmente  $S_1 S_2$ .

**Bonus :**

- Télescope de Gregory : le miroir plan est remplacé par un miroir ellipsoïdique qui forme l'image de l'objet observé au centre du miroir principal, qui est percé pour qu'on puisse observer. La distance focale peut être grande devant l'encombrement.
- Télescope de Cassegrain : même principe, mais la courbure du miroir secondaire est dans l'autre sens.
- Télescopes aplanétiques : correction des aberrations sphériques et de la coma. Cf Houard
- Télescope à miroir liquide : Cette page wikipédia. C'est stylé parce que à courbure adaptative!

Mais la plus grosse limite c'est la diffraction!! Voir LP microscope et photographie

## 2 Interféromètre stellaire

On est limité par l'extension spatiale des telescope, mais si on en utilise 2 c'est mieux!

En étudiant la variation du contraste des franges avec la ligne de base, on peut obtenir des détails de l'objet inférieurs au dixième de seconde d'arc, en dessous du pouvoir de résolution des télescopes en imagerie classique.

Cette technique a d'abord été utilisée avec des radio-télescopes. Depuis les années 1990, elle est développée dans les grands observatoires optiques.

En 1890, sur les conseils de Fizeau, A. Michelson proposa un interféromètre d'un intérêt particulier car il annonçait quelques-unes des plus importantes techniques modernes, et parce qu'il s'interprète bien en termes de cohérence. La fonction de l'interféromètre stellaire, comme on l'appelle, est de mesurer les faibles dimensions angulaires de corps célestes lointains.

C'est le même principe de des trous d'youngs

### 2.1 Cohérence spatiale

ou : Quelle est l'influence de l'extension spatiale de la source sur la figure d'interférences.

#### 2.1.1 Illustration

**Rappel :** Décalage de la figure d'interférences

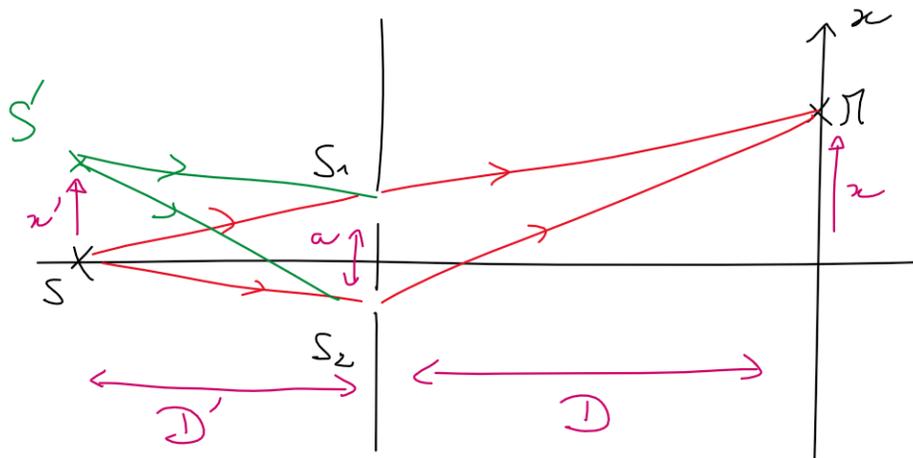


FIGURE 2 – Fente d'Young pour un point source hors de l'axe

On remarque que les rôles de  $x'$  et  $x$  dans la différence de marche entre deux rayons mais avec une distance  $D'$ . Ainsi, la différence de marche pour un point source positionné en  $x'$  s'écrit

$$\delta = \frac{ax}{D} + \frac{ax'}{D'} \quad (1)$$

La valeur de l'intensité sur l'écran est alors donnée par :

$$I(x) = 2I_0 \left( 1 + \cos \left( \frac{2\pi\nu}{c} \left( \frac{ax}{D} + \frac{ax'}{D'} \right) \right) \right) \quad (2)$$

Donc la position des interférences est modifiée quand on déplace la source.

**Expérience :** On modifie la largeur du diaphragme devant la source QI. On observe une variation du contraste et on peut aller jusqu'à la première inversion du contraste.

### 2.1.2 Notion de largeur de cohérence

On considère que chaque source est incohérente et induit sur l'écran une intensité élémentaire :

$$dI = 2i_0 dx' \left( 1 + \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{ax'}{D'} + \frac{ax}{D} \right) \right) \right) \quad (3)$$

Nous notons que ici  $I_0 = i_0 b$  Nous avons donc l'intensité totale sur l'écran qui s'écrit :

$$I = \int_{-b/2}^{b/2} dI \quad (4)$$

$$= 2i_0 b + 2i_0 \int_{-b/2}^{b/2} \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{ax'}{D'} + \frac{ax}{D} \right) \right) dx' \quad (5)$$

$$= 2I_0 + \frac{i_0 \lambda D'}{\pi a} \left[ \sin \left( \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{ab}{2D'} + \frac{ax}{D} \right) \right) - \sin \left( \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{-ab}{2D'} + \frac{ax}{D} \right) \right) \right] \quad (6)$$

$$= 2I_0 \left[ 1 + \frac{\lambda D'}{\pi ab} \cos \left( \frac{2\pi ax}{\lambda D} \right) \sin \left( \frac{\pi ab}{\lambda D'} \right) \right] \quad (7)$$

$$= 2I_0 \left[ 1 + \gamma \cos \left( \frac{2\pi ax}{\lambda D} \right) \right] \quad (8)$$

Avec  $\gamma = \text{sinc} \left( \frac{2\pi ab}{\lambda D'} \right)$ . On peut définir le contraste :

$$C = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (10)$$

Nous observons alors que  $|\gamma|$  correspond au contraste, c'est à dire à quelle point les interférences sont marquées (différences d'intensité entre les franges lumineuse et les franges sombres).

**Simulation** La première annulation du contraste correspond à la *largeur de cohérence*. Elle correspond alors a :

$$L_s = \frac{\lambda D'}{b} = \frac{\lambda}{\theta}$$

où  $\theta$  est l'angle avec lequel on voit la source

On a alors une source cohérente si

$$a \ll \frac{\lambda}{\theta} = L_s \quad (11)$$

À la différence du cas avec la cohérence temporelle quand on élargie la source, la figure se brouille sur toute sa longueur.

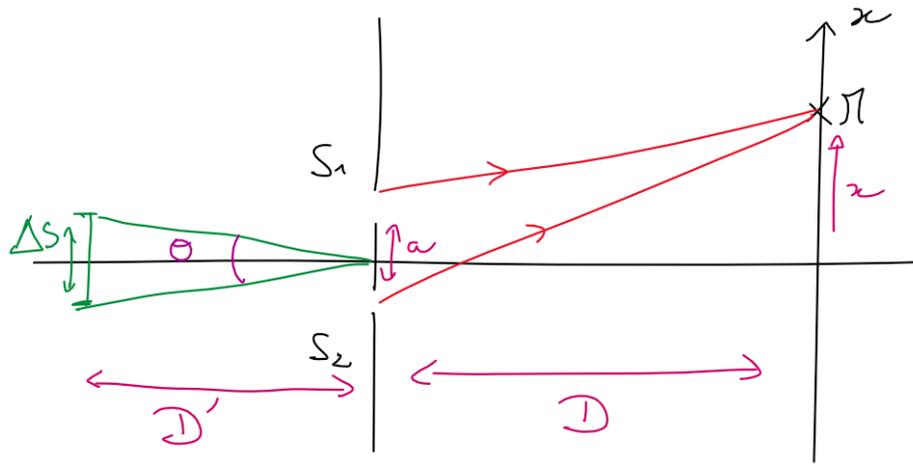


FIGURE 3 – Fente d'Young pour un point source hors de l'axe et largeur de cohérence

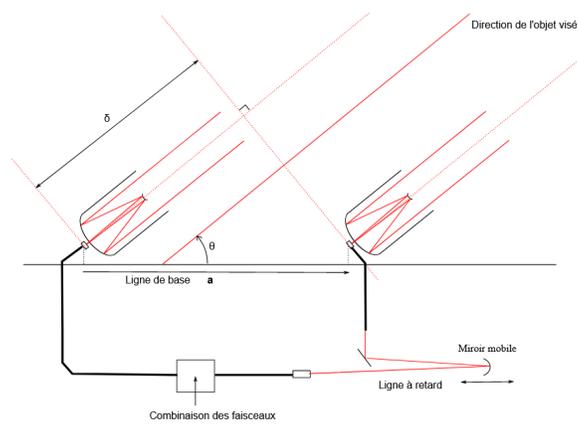


FIGURE 4 – Interféromètre stellarie

## 2.2 Réalisation et ordre de grandeur

En faisant varier l'écartement entre l'écart  $h$  entre les deux miroirs  $M_1$  et  $M_2$ , on observe des brouillages successifs. La position de ces brouillages permet de remonter à l'extension angulaire de l'étoile.

Le contraste est donné par la fonction de Bessel de première espèce d'ordre 1  $J_1(x)/x$  (tracé). Sa première annulation a lieu en  $x \approx 3,83$ , avec  $x = \frac{\pi h}{\lambda} \theta$ . On gagne en précision en repérant plusieurs pertes de contraste. Michelson a observé un brouillage pour  $h = 3 \text{ m} = \frac{1,22\lambda}{\theta}$  pour  $\lambda = 570 \text{ nm}$ . Il a obtenu  $\theta = 2,26 \times 10^{-7} \text{ rad}$ .

Avec quatre gros télescopes fixes (diamètre 8,20 m), et quatre plus petits mobiles (diamètre 1,80 m), le VLTI est capable de mesurer le contraste des franges d'Young pour une série de valeurs de  $a$  et  $b$ . Il y a trente positions possibles pour les petits télescopes. La ligne de base maximale est de 200 mètres, ce qui permet en principe d'accéder à des détails de l'ordre  $\lambda/a = 0,001$  secondes d'arc (dans l'infrarouge proche). Un traitement du signal par transformée de Fourier permet ensuite de restituer la fonction d'intensité de l'objet lien interféromètre stellaire. Lorsque la distance entre les deux télescopes est 5 fois leur diamètre, il y a environ 10 franges visibles dans cette tache de diffraction. Il s'agit d'observer ces franges dans des conditions qui permettent d'évaluer précisément leur contraste. Or les observations à cette échelle (de l'ordre du dixième de seconde d'arc) sont très fortement altérées par la turbulence atmosphérique, c'est pourquoi le système interférométrique est couplé à une optique adaptative qui permet de corriger en temps réel les effets de la turbulence atmosphérique.

Cf le Houard pour le lien entre télescopes et interférométrie.

## 3 Optique adaptative

Houard aussi... Agregation 2020 et correction :

Les turbulences atmosphériques, phénomène dynamique, limite la résolution des télescopes en déformant les images. L'optique adaptative est un système permettant de corriger ces images en temps réel

### 3.1 Estimation des turbulence et comparaison à la résolution du télescope

On rappelle que la limite de l'envergure du télescope est : La fonction de transmission de la pupille d'entrée du télescope est un disque de rayon  $D/2$ . La fonction de transfert est la convolution de ce disque par lui-même.

**Turbulence** : Loi des gaz parfait (différentiel) et loi de Gladstone :  $\rho \propto (n - 1)$ , donne

$$\frac{\Delta(n - 1)}{n - 1} = -\frac{\Delta T}{T} \implies \Delta L = \Delta n e = -(n - 1)e \frac{\Delta T}{T}$$

**ODG** : Avec  $n = 1,0002678$ ,  $e = 0,3 \text{ m}$ ,  $\Delta T = -1 \text{ K}$  et  $T = 300 \text{ K}$ , on trouve :  $\Delta L = 0,27 \times 10^{-6} \text{ m}$ .

Des modulations de l'amplitude de  $A$  se traduisent par une variation de l'éclat de l'étoile : c'est le phénomène de scintillement, facilement observable à l'oeil nu un soir où le ciel est dégagé.

D'après le critère de Rayleigh, il faut  $\Delta L < \lambda/4$  pour que la dégradation due à la présence de turbulence soit négligeable par rapport à l'effet de la diffraction. Ici on a  $\lambda/4 = 0,5 \times 10^{-6}/4 = 0,13 \times 10^{-6} \text{ m}$ . Ainsi, on voit qu'un écart de température de 1 K suffit à dégrader l'image par turbulence.

### 3.2 Principe de l'optique adaptative

Concrètement, on fait comment ?

On considère la fonction de transfert : La fonction de transfert et la TF de la réponse impulsionnelle :  $H(x, y) = |h(x, y)|^2$  où  $h$  est l'amplitude diffracté dans le plan d'observation. Les termes de phase ajoutés correspondent à la prise en compte de l'atmosphère. La turbulence augmente beaucoup la taille minimale d'une tache image. Aussi en présence de turbulence, la limite angulaire de résolution  $\theta_R$  n'est plus obtenue en utilisant  $D$  le diamètre du télescope mais en utilisant le paramètre de Fried  $r_0$  wiki. Il caractérise l'échelle de cohérence spatiale du front d'onde provenant de l'étoile, perturbé par la turbulence. On remplace ainsi  $D$  par  $r_0$  pour la limite de diffraction, aussi il devient inutile d'augmenter le diamètre des télescopes si on ne corrige pas ce problème. En déformant le miroir on compense le déphasage.

Concrètement, quand on ne déforme pas : Le signal de sortie de l'analyseur de surface d'onde est une tension image de la position des points images sur la matrice CCD. Ces positions sont, au premier ordre, proportionnelles à l'écart angulaire entre le front d'onde et un plan. Il s'agit donc de la forme du front d'onde non corrigée par le miroir. Angulairement, la déformation du miroir à imposer est la moitié de la déformation du front d'onde. Avec un coefficient de proportionnalité, il s'agit donc d'imposer à une lame piézoélectrique une tension image des points

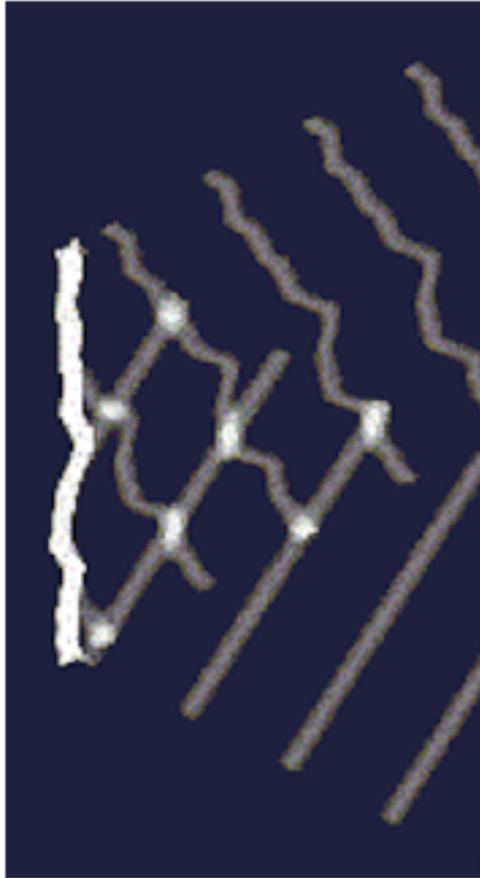


FIGURE 5 – *miroir non plan (agregation 2020)*

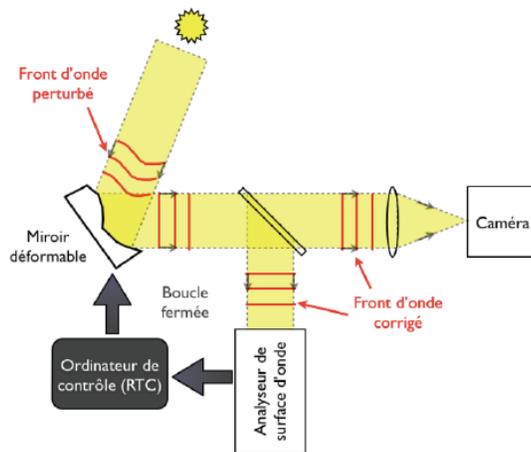


FIGURE 6 – *Dispositif*

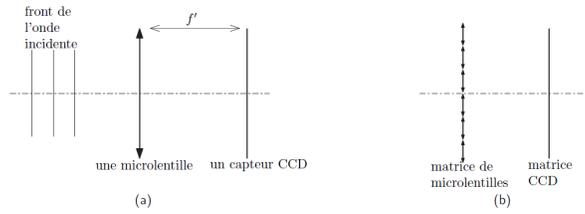


FIGURE 7 – Principe

$$\hat{H}(u, v, t) = K \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tau(X, Y) \tau(X - \lambda f u, Y - \lambda f v) \exp[j(\phi(X, Y, t) - \phi(X - \lambda f u, Y - \lambda f v, t))] dX dY.$$

FIGURE 8 – fonction de transfert (agregation 2020)

sur la matrice CCD. Pour chaque actionneur piézoélectrique déformant une portion de miroir, l'une des faces doit être fixe, l'autre solidaire du miroir. En pratique, cela nécessite une boucle d'asservissement, voir le turbo schéma du Houard ?

La question est de savoir ce que l'on peut corriger avec N actionneur et un diamètre de télescope de  $D = 2$  mètres : On considère qu'il faut au moins un actionneur par zone de taille  $r_0$ . Sur le miroir, on a donc  $N_0 = \frac{2}{(\pi r_0^2)}$  zone de diamètre  $r_0$ . La taille minimale recherchée est telle que  $N_0 = N : r_0 = D / \sqrt{N} \text{ ODG} r_0 = 0.14m$ .

**Alternative :** faire un télescope hors de l'atmosphère ! C'est le cas de Hubble dont la résolution angulaire est de :  $\theta_R = 1.22 \frac{\lambda_0}{D} = 1.22 \frac{500 \cdot 10^{-9}}{2.4} = 0.052''$  !!

## Conclusion

On a vu ce que c'était un télescope. Il a l'avantage par rapport aux lunette astronomique de s'affranchir des aberrations chromatiques (ou en tout cas, il n'y a qu'un lentille dans l'objectif : ca fait moins de source d'aberrations chromatiques), mais ils ne sont pas parfaitement stigmatiques. Aussi il existe plein de dispositif permettant de corrigé ces abérations. Mai n'oublions pas le but premier des télescope, séparer des objet lointains le plus proche possible entre eux, pour avoir les détails de l'image. Ici vient la limite de diffraction vient limiter notre résolution. On peut alors combiner des interféromètre pour augmenter la distance effective. On utilise alors un dispositif interférommétrique. Cependant, augmenter la taille sur terre ne sert à rien si on ne corriger pas les effets de l'atmosphère.

*Finir en montrant une turbo photo de Hubble...*

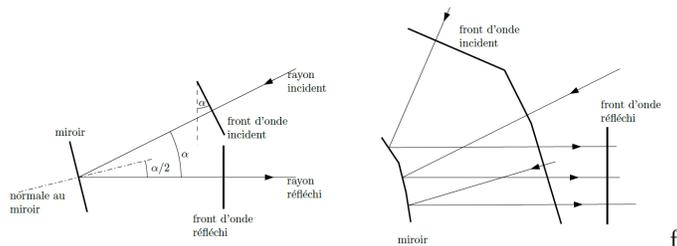
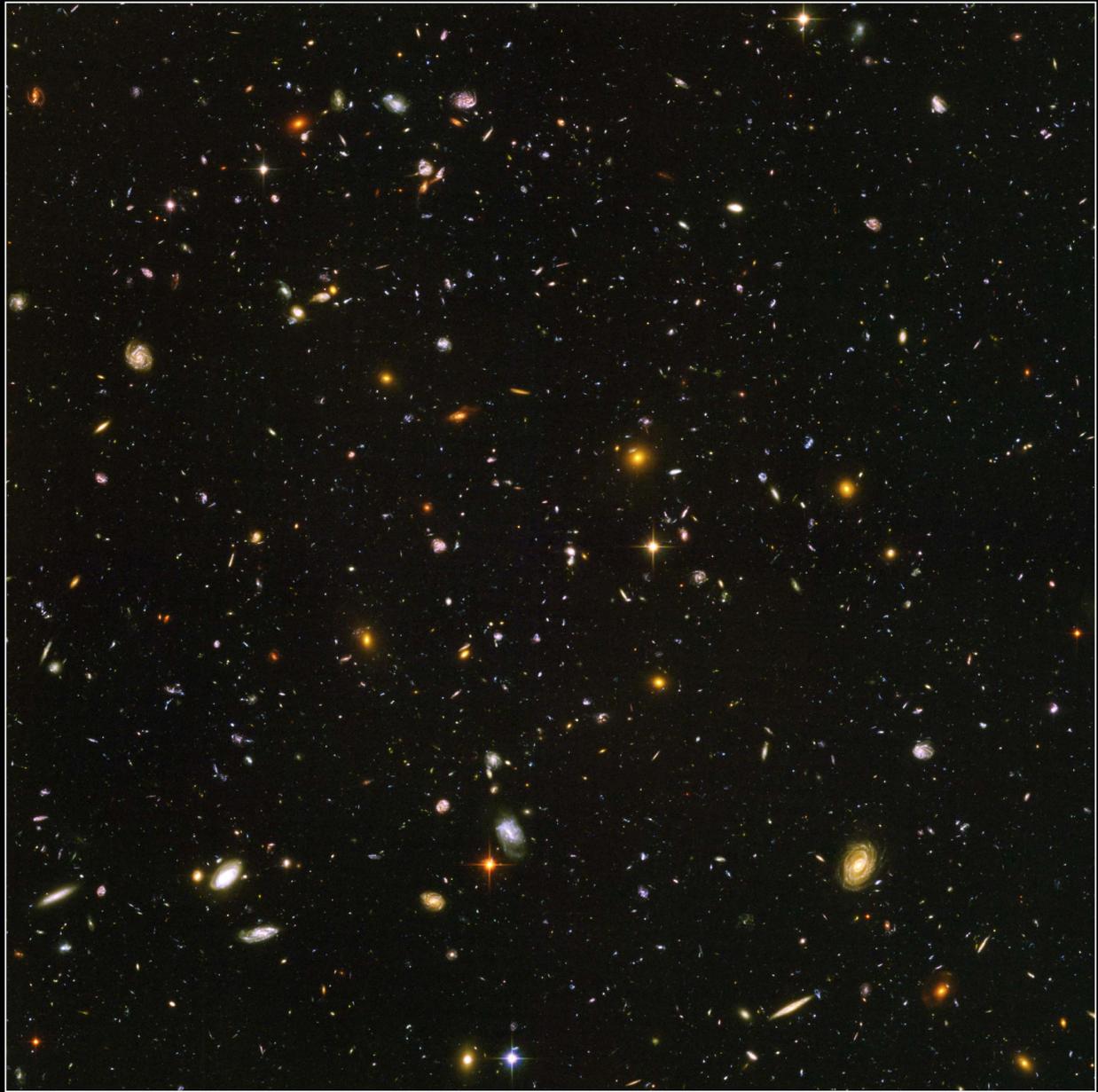


FIGURE 9 – Résolution



**Hubble Ultra Deep Field**  
**Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys**

NASA, ESA, S. Beckwith (STScI) and the HUDF Team

STScI-PRC04-07a

FIGURE 10 – Stylé. 11.3 jours d'exposition au total. On scanne une zone de ciel qui correspond à 5.3' d'arc au carré, soit 1/28000000 du ciel total...