

# **INTERFÉRENCES ET DIFFRACTION**

**ENS Physique 2010 – 2011**

# INTERFÉRENCES ET DIFFRACTION

## Bibliographie générale :

- **Théorie générale :**
  - Bruhat : *Optique*, 6ème édition
  - les livres de Françon, par exemple : *Vibrations lumineuses – Optique cohérente*
  - Goodman : *Introduction à l'optique de Fourier et à l'holographie*
  - Hecht : *Optics* (en anglais)
  - Lauterborn, Kurz et Wiesenfeld : *Optique cohérente*
  - Born et Wolf : *Principles of Optics* (en anglais)
- **Livres d'expériences :**
  - Sextant : *Optique expérimentale* **Nuit Gravement à l'Echec**
  - Bottineau : *Expériences d'optique*
  - Françon, Krauzman, Mathieu et May : *Expériences d'optique physique*
  - Henry et Jouanisson : *La lumière du laser*

1. Pour un premier TP, ne pas passer trop de temps sur la partie « Interférences » (une étude sérieuse des franges d'Young devrait suffire, il y a aussi un poly sur le Michelson !). Conserver plus de 50 % du temps pour l'étude de la diffraction, plus délicate.

2. Des commentaires indiquent l'importance à accorder aux diverses expériences : commencer par les expériences essentielles, en laissant de côté les facultatives pour y revenir éventuellement en fin de TP ou à la fin de l'année. De même les notes de bas de page donnent des développements facultatifs.

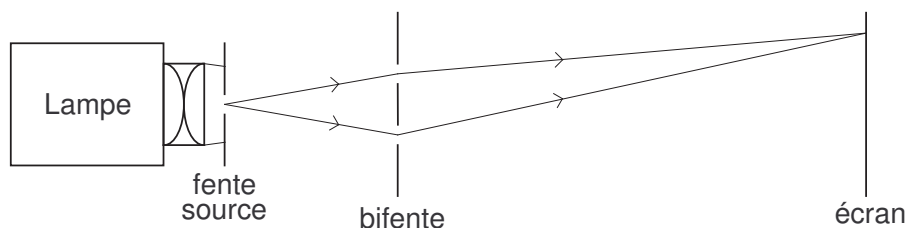
3. Le laser est une source facile à mettre en œuvre, il faut en user mais pas en abuser, interférences et diffraction existent aussi avec les sources conventionnelles.

## I) Interférences.

Il est important de bien différencier les montages ou dispositifs interférentiels utilisant la division d'amplitude (DA) de ceux utilisant la division du front d'onde (DFO).

### 1) Franges d'Young – DFO (IMPORTANT)

FIGURE 1 – *Franges d'Young*



- Comme le montre la figure 1, on propose l'expérience sous sa forme classique, sans utiliser de lentille après la fente source. Il ne s'agit pas d'une expérience de diffraction de Fraunhofer.
- Choix de la source :  
Lampe Quartz-Iode<sup>1</sup>. Pourquoi le laser ne permet-il pas de faire l'expérience (importante) de cohérence spatiale ?
- Choix du condenseur :  
Comparer la zone éclairée de l'écran dans le cas d'un condenseur très convergent puis très peu convergent. Si l'on veut que la luminosité sur l'écran soit élevée lequel a-t-on intérêt à choisir ?<sup>2</sup>
- Choix de la fente source :  
Choisir une fente réglable étalonnée (pour l'expérience de cohérence spatiale), s'entraîner à la mettre en œuvre (lecture de sa largeur). Le faisceau doit couvrir toute sa surface, et en pratique, afin de réduire la lumière parasite, il est conseillé de placer la fente contre le condenseur. Placer la fente avec sa largeur maximum. Constater que l'on voit sur l'écran l'image indésirable du filament. En déplaçant un petit écran mobile remarquer que cette image est très délocalisée : il s'agit d'un effet de *profondeur de champ*, plus on diaphragme plus le champ en profondeur est grand (cf. *poly Instruments d'optique-Lasers*). Remarquer ensuite qu'en réduisant beaucoup la largeur de la fente, l'image du filament sur l'écran devient floue, donc non gênante, à cause de la diffraction. Les expériences qui suivent imposent de travailler avec une fente fine, donc on sera toujours à peu près dans ce cas.<sup>3</sup>
- Choix de la bifente :  
Choisir une bifente photographique dont la distance  $a$  entre les deux traits est comprise entre 0,2 et 0,3 mm. Il y a aussi une bifente gravée sur plaque inox mince mais celle-ci n'est pas conseillée ici car  $a = 0,6$  mm est un peu trop grand. Placer la bifente à 10-30 cm de la fente source (à ajuster, plus cette distance est grande plus on peut élargir la fente source, mais il ne faut pas trop réduire l'interfrange sur l'écran).
- Observer les franges sur un écran à environ 2 m. Elargir progressivement la fente source en faisant un compromis entre luminosité et contraste. *Bien régler le parallélisme fente-bifente*. Pour rendre l'expérience visible de loin, interposer un petit écran mat fortement incliné vers l'"auditoire". Expliquer les irisations.  
Vérifier la non localisation des franges en déplaçant l'écran.
- Placer des filtres interférentiels (les filtres colorés ordinaires n'ont pas de longueur d'onde affichée, ils peuvent cependant servir à faire une première présentation sans mesure) et vérifier quantitativement la loi donnant l'interfrange. Le phénomène est très peu lumineux. Pour le rendre plus visible pour l'auditoire on peut utiliser une Webcam avec son objectif dirigé vers l'écran **mat** et observation sur l'écran de l'ordinateur étalonné avec une règle,

1. La nécessité de mettre un filtre spectral à bande étroite réduit beaucoup la luminosité. On peut tenter d'utiliser une lampe Philora dont les raies verte ou jaunes sont peu atténuées par le filtre, mais cette source est beaucoup moins ponctuelle que la Quartz-Iode, sa luminance est faible. Le bilan s'avère ici défavorable.

2. L'énergie qui traverse la bifente est surtout contrôlé horizontalement par la diffraction au niveau de la fente source donc dépend peu du condenseur, mais plus la figure d'interférence est étendue verticalement moins elle est lumineuse.

3. Le réflexe classique qui consiste à changer de condenseur pour éliminer cette image du filament est très inefficace ici.

ou placer une barrette CCD (voir l'Annexe I en fin de poly). A tester mais ces techniques risquent de vous prendre pas mal de temps à chaque fois. Avec ces appareils le contraste peut être meilleur si on ajoute un filtre anti-IR.

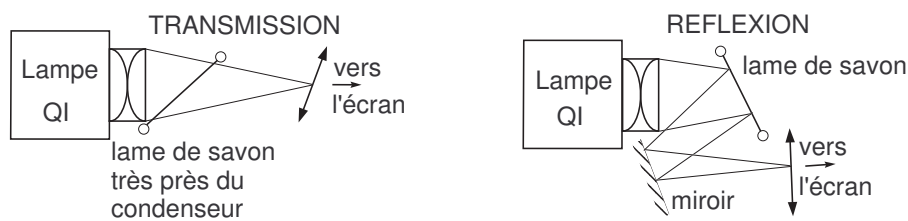
- Etudier l'influence de la largeur de la fente source (*cohérence spatiale*, IMPORTANT) : En élargissant la fente source on observe le brouillage puis la réapparition des franges avec inversion du contraste.<sup>4</sup>

Il faut faire une exploitation quantitative du premier brouillage, mais on ne peut pas en attendre une grande précision, on peut donc opérer rapidement en utilisant un filtre coloré orange (environ 600 nm<sup>5</sup>) à la place d'un filtre interférentiel. Dans ce cas l'expérience est beaucoup plus lumineuse. Elle est visible de loin en inclinant l'écran. Sinon Webcam ou barrette CCD.

## 2) Interférences localisées – DA (franges d'égale épaisseur d'une lame de savon, facultatif)

Réf : Bottineau

FIGURE 2 – Lame de savon (vues de dessus)



Pour augmenter la tenue des lames on peut interposer un filtre anti-thermique.

Le **montage par transmission** est facile à mettre en œuvre mais donne un très faible contraste des franges (expliquer). L'expérience peut cependant être réalisée en inclinant fortement la lame autour d'un axe vertical ce qui augmente le coefficient de réflexion. Pour accroître la zone de netteté, incliner un peu la lentille vers la lame comme indiqué sur la figure 2<sup>6</sup>.

Pour réaliser le **montage par réflexion**, plus délicat à mettre en œuvre, il est préférable d'opérer en incidence proche de la normale, car à partir de l'incidence de Brewster le comportement change (notamment en phase).

- Pourquoi ne voit-on pas de franges quand la lame est épaisse ?
- Ajouter un filtre interférentiel. Que se passe-t-il ?
- Pourquoi avant l'éclatement la partie la plus mince apparaît-elle noire dans le montage par réflexion ?

### Rappel :

D'autres expériences d'interférences à deux ondes sont décrites ailleurs :

- Interféromètre de Michelson (cf. TP *Interféromètres*)
- Interférences en lumière polarisée (cf. TPs *Polarisation I et II*).

4. Conceptuellement il s'agit d'étudier une propriété de la fente source, il vaudrait donc mieux opérer sans changer la largeur de celle-ci (cf. *Sextant*). Cependant cela complique un peu la mise en œuvre.

5. Ce choix est justifié par le fait que l'orange correspond à un intervalle spectral faible 590-610 nm alors que celui du rouge par exemple est 610-780 nm. Par ailleurs c'est un compromis entre le maximum de sensibilité de l'œil 555 nm et celui d'émission de la lampe QI 900 nm environ.

6. Il s'agit de la *règle de Scheimpflug* qui indique comment obtenir l'image nette d'un objet incliné. Elle stipule que les plans de l'objet, de la lentille et de l'écran doivent passer par une même droite. Elle est facile à comprendre sachant que quand l'objet est dans le plan de la lentille il est confondu avec son image ; l'aplanétisme joue aussi un rôle dans le raisonnement. Cependant il faut opérer empiriquement à cause des aberrations.

## II) Diffraction

### 1) Diffraction de Fraunhofer

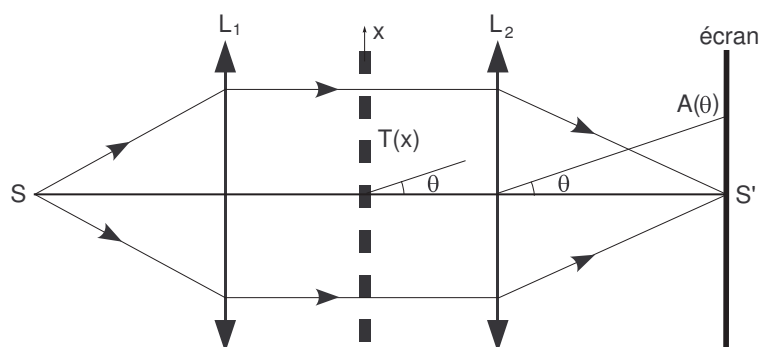
Réf : Françon et Sextant

La diffraction de Fraunhofer est importante car on la rencontre dans de nombreux cas de formation d'images<sup>7</sup>. De plus, il y a une relation de transformée de Fourier entre la fonction de transmission de l'objet éclairé par une source ponctuelle cohérente  $S$  et l'amplitude complexe obtenue dans le plan où se forme l'image  $S'$  de la source (plan de Fourier).

Elle peut s'obtenir dans les deux configurations particulières ci-dessous :

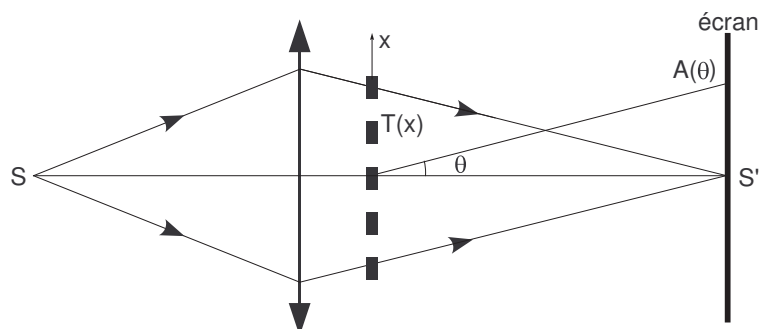
- le cas de la diffraction à l'infini : objet diffractant  $T$  éclairé par une onde plane et observation à l'infini. En pratique, cette condition est réalisée dans le montage (a) figure 3 : source dans le plan focal de la lentille  $L_1$  et écran dans le plan focal de la lentille  $L_2$

FIGURE 3 – Montage a : Diffraction à l'infini



- le cas de la diffraction à distance finie au voisinage de l'image géométrique de la source. La configuration à une seule lentille, expérimentalement la plus simple, est représentée par le montage (b) figure 4.

FIGURE 4 – Montage b : Diffraction au voisinage de l'image géométrique



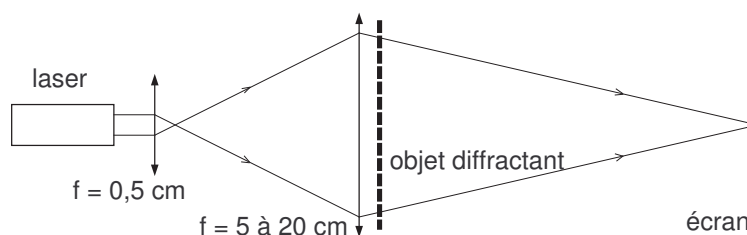
On est tenté de faire toutes les expériences avec un laser, cependant il est conseillé de faire une expérience avec une source conventionnelle, au moins qualitative. Par exemple présenter en introduction la diffraction par une fente avec une lampe QI, et un filtre ordinaire afin de conserver suffisamment de luminosité (pour la mise en œuvre voir les commentaires sur l'expérience des fentes d'Young au début de ce poly).

Quand on opère avec un laser on a deux montages possibles :

7. Ainsi en photographie la diffraction dégrade l'image bien avant que le diaphragme de l'objectif ait atteint sa fermeture maximum.

- Faisceau direct envoyé sur un objet diffractant de petite taille (moins d'1 mm). Avantage : luminosité.
- Faisceau élargi pour les objets étendus (figure 5). Il s'obtient au moyen d'une lentille de très courte focale (environ 0,5 cm) et d'une lentille de 5 à 20 cm de focale (suivant la largeur désirée). Ajuster cette dernière de façon à avoir une tache très petite sur l'écran éloigné (cf. *Limite de validité* page 9). Si on opère avec les lentilles de la boîte laser, on peut les placer sur un même support et passer rapidement du faisceau élargi au faisceau direct.

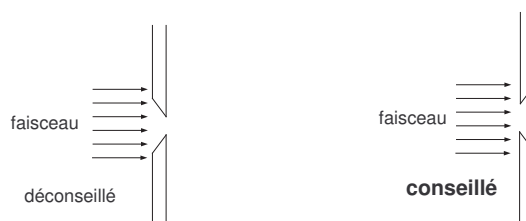
FIGURE 5 – *Elargissement du faisceau laser*



#### a) Diffraction par une fente (IMPORTANT)

Envoyer directement le faisceau laser sur une fente étalonnée de largeur variable  $a$ <sup>8</sup>. Si les bords de la fente sont en biseau, il faut que celui-ci soit du côté émergent des rayons (figure 6).

FIGURE 6 – *Orientation des fentes*



Observer l'image de diffraction. Montrer l'évolution du phénomène en fonction de la largeur de la fente.

#### Exploitation quantitative :

Il s'agit de mesurer la distance entre les franges de diffraction ainsi que les intensités des maximums successifs, puis de confronter ces mesures à la Théorie.

- Méthode rapide

Fermer nettement la fente réglable étalonnée de façon à ce que le maximum central occupe plusieurs cm. Mesurer la taille des franges avec une règle. Mesurer les intensités avec une photodiode auto alimentée, il faut que la largeur du détecteur soit petite devant celle d'une frange<sup>9</sup>, sinon diaphragmer le capteur avec de l'adhésif noir.

8. L'idée d'utiliser comme fente étalonnée un pied à coulisse à lecture numérique semble bonne, mais les mâchoires de cet appareil ont une épaisseur longitudinale  $e$  de l'ordre du mm qui peut changer la figure de diffraction. La question est abordée plus loin, dans l'Annexe II page 14.

9. 10 % de la largeur de la frange centrale donne une faible erreur systématique (2 % d'après un calcul théorique).

– Méthode longue

Avec une CCD linéaire, cf. Annexe I. Attention au parallélisme entre la CCD linéaire et le faisceau diffracté.

Avec une Webcam : on peut l'utiliser comme la CCD en ôtant l'objectif, ou avec l'objectif orienté vers l'écran **mat**. L'analyse des intensités se fait dans IGOR par la fonction "Line Profile".

On peut faire un ajustement numérique pour vérifier que l'intensité suit une loi de  $(\text{sinc})^2$ . Les courbes obtenues avec un laser sont bruitées à cause du *speckle* et facilement déformées par des déphasages parasites. A ce titre on aura parfois moins de problèmes en utilisant le faisceau laser élargi ou une source conventionnelle filtrée.

Une autre difficulté est liée à la faible dynamique des capteurs : pour réduire le flux utiliser des filtres gris (effet brutal) ou des polariseurs (effet progressif).

L'expérience montre que la méthode longue n'est pas très fiable, ne pas y passer trop de temps.

Les paragraphes qui suivent proposent diverses expériences possibles, il faut faire un choix.

## b) Diffraction par un obstacle circulaire

L'expérience étant peu lumineuse, envoyer directement le faisceau laser sur un trou et observer sur l'écran éloigné. Vérifier la loi classique donnant le rayon du 1er anneau de diffraction.

Réaliser l'expérience avec les trous sur plaque inox mince<sup>10</sup>. Malheureusement les dimensions indiquées par le fabricant sont parfois assez fausses, l'écart peut atteindre 25 %.

On peut aussi réaliser la diffraction par des *spores de lycopode*, alias *pied-de-loup*. Déposer la poudre sur une plaque de verre embuée, au-dessus d'une feuille de papier, et récupérer le surplus. Comparer le résultat en éclairage direct et élargi (cf. paragraphe *Speckle* page 11). Par rapport à la précédente, cette expérience illustre aussi le *théorème de Babinet* et la diffraction par de nombreux *objets identiques répartis aléatoirement*.<sup>11</sup>

Pourquoi peut-on déduire de cette expérience que les spores ont des diamètres voisins ?

On peut observer la forme, et comparer la taille trouvée avec la mesure obtenue par observation directe des spores, au moyen de l'ensemble microscope + caméra vidéo + moniteur (faire la calibration en observant la mire graduée au moyen du même dispositif).

## c) Diffraction par plusieurs fentes régulières, cas du réseau

### – Fentes multiples

Utiliser les fentes multiples gravées sur plaque inox mince et les éclairer avec un *faisceau laser élargi*. Observer sur un écran fortement incliné afin d'étaler la figure. Montrer l'évolution quand on passe de 2 à 5 fentes de même pas (apparition de n-2 maximums secondaires et réduction progressive de la largeur des maximums principaux).

### – Réseau classique

Passer au réseau classique, déterminer par exemple sa densité de traits.

On peut montrer un exemple de réseau "blazé" (le "blaze" est un effet de phase car la

10. Au sujet du rôle négligeable de l'épaisseur de la plaque cf. Annexe II. Par ailleurs les "trous" sur plaque photo donnent une figure médiocre à cause du *speckle* créé par l'émulsion.

11. Cependant il s'agit de sphères, objets à 3 dimensions, d'où un effet 3D possible, qui s'avère négligeable comme on l'indique dans l'Annexe II.

figure de diffraction d'une fonction  $T(x)$  réelle serait symétrique autour de l'ordre zéro, cf. *Symétrie de la figure de diffraction* page 8).

- CD ou DVD (Facultatif)  
Eclairer un CD, voire un DVD, en incidence normale, en déduire le pas de réseau du sillon<sup>12</sup>. En déduire un ordre de grandeur de la capacité en mégaoctets du disque.
- Réseau en incidence oblique (Facultatif, qualitatif)  
Eclairer un régle métallique *plan* en incidence rasante. Remarquer que les franges sont très élargies par l'inclinaison. Remarquer aussi que la figure n'est pas symétrique ce qui s'explique par l'effet 3D (Cf. Annexe II).
- Réseau aléatoire (Facultatif, qualitatif)  
Eclairer une tôle d'aluminium non peinte avec le faisceau laser direct et observer la lumière réfléchi. Tourner la plaque de 90° dans son plan. Cette expérience simple montre qu'il y a un réseau orienté aléatoire dû au laminage du métal.
- Réseau sinusoïdal (Facultatif, qualitatif)  
On peut peut-être trouver dans la Collection un réseau sinusoïdal. Interpréter la figure de diffraction qu'il donne.

#### d) Théorème de Babinet (Facultatif, qualitatif)

Comparer qualitativement les figures de diffraction du faisceau laser par :

- une fente gravée sur métal
- son complémentaire gravé sur métal (ou un cheveu mais il est 3D)

#### e) « Réciprocité » de la transformée de Fourier (Facultatif, qualitatif)

Montrer la figure de diffraction d'une grille (par exemple celle du réseau cuivré).

Par ailleurs les boîtes laser contiennent une diapo "croix de Mills", en montrer la figure de diffraction.

Que pensez-vous de cette expérience comme illustration de la réciprocité de la TF ? Attention, l'interprétation de cette expérience est plus délicate qu'il n'y paraît.

#### f) Symétrie de la figure de diffraction (Facultatif, qualitatif)

Il est facile de démontrer par le calcul que la figure de diffraction correspondant à une fonction  $T(x)$  réelle est symétrique :  $I(\theta) = I(-\theta)$ .

Pour l'illustrer éclairer le bord d'une lame de rasoir avec le faisceau laser direct bien perpendiculaire au plan de la lame (la symétrie du résultat n'est-elle pas intuitivement surprenante ici ?).

Eclairer ensuite le sommet d'un prisme en verre de petit angle (30° maxi) en faisant en sorte que seule la moitié du faisceau laser atteigne le prisme. Pour éviter l'effet 3D orienter le prisme de sorte que sa face d'entrée soit perpendiculaire au faisceau incident (comme indiqué "conseillé" sur la figure 6 page 6). La dissymétrie s'explique par le fait que l'objet déphase donc  $T(x)$  n'est plus réelle.<sup>13</sup>

#### g) Illustration du Théorème de Convolution (Facultatif, qualitatif)

Faire par exemple la figure de diffraction du faisceau laser direct par successivement :

- une bifente gravée sur métal mince
- un réseau pas trop dispersif et pas trop "blazé"

12. Attention les angles de diffraction sont très grands, il n'est pas sûr que la formule classique soit exactement vérifiée (théorie scalaire...), cependant le résultat trouvé est proche de celui qui est indiqué par les fabricants.

13. Cette propriété est utilisée dans les réseaux par transmission "blazés", qui peuvent être réalisés par un réseau de petits prismes dont l'angle est choisi pour envoyer l'énergie dans un ordre. Actuellement on utilise plutôt une technique holographique qui crée un réseau 3D dans l'émulsion. L'effet 3D peut s'interpréter comme un effet de phase sur un réseau 2D.



- la bifente suivie du réseau, si possible accolés

Interpréter. On rappelle que la convolution d'une fonction par un Dirac non centré à l'origine a pour effet de décaler la fonction et qu'un réseau est presque un peigne de Dirac.

## h) Limite du pouvoir séparateur

Voir les polys de TP *Propriétés des instruments d'optique et Spectroscopie*.

## 2) Limite de validité de la diffraction de Fraunhofer. (Qualitatif mais Important)

Réf : *Sextant, Bottineau*

Une propriété importante de la transformée de Fourier est que lorsque l'on déplace l'objet diffractant dans son plan, l'amplitude complexe  $A(\theta)$  est déphasée mais l'intensité  $I(\theta)$  est inchangée.

Réaliser l'expérience précédente de diffraction par une fente, mais opérer avec le faisceau laser élargi.

Déplacer la fente dans son plan et vérifier que cela n'a pas d'effet visible sur l'écran.

Pour sortir des conditions de Fraunhofer, avancer ou reculer nettement l'écran, puis déplacer nouveau la fente dans son plan. Observer l'effet.

Oter l'objet diffractant : la tache sur l'écran n'est plus ponctuelle.

Interprétation mathématique : que devient  $T(x)$  lorsqu'on supprime l'objet diffractant ? Que vaut sa transformée de Fourier ? Cette propriété est-elle vérifiée lorsque l'écran d'observation a été déplacé ?

Conclusion : *une condition nécessaire pour être dans les conditions de Fraunhofer est d'observer sur l'écran une tache de taille négligeable en absence d'objet diffractant.*

Le paragraphe facultatif suivant reprend cette expérience sous une forme plus extrême.

## 3) Diffraction de Fresnel (Facultatif)

FIGURE 7 – Diffraction de Fresnel

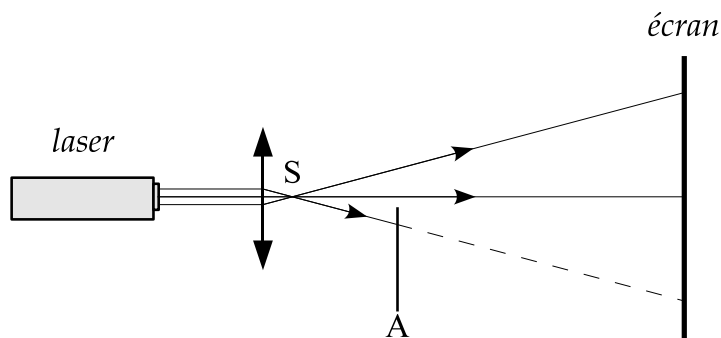


Figure 7. A est un objet diffractant tel que le bord rectiligne d'une lame de rasoir. On utilise comme source un laser. Il est suivi d'une lentille unique de courte focale. La position de l'écran d'observation n'est pas imposée.

Commenter la présence de lumière dans l'ombre géométrique. Pour une interprétation plus complète, voir le *Bruhat*, p. 200.

### III) Applications – Effets de cohérence

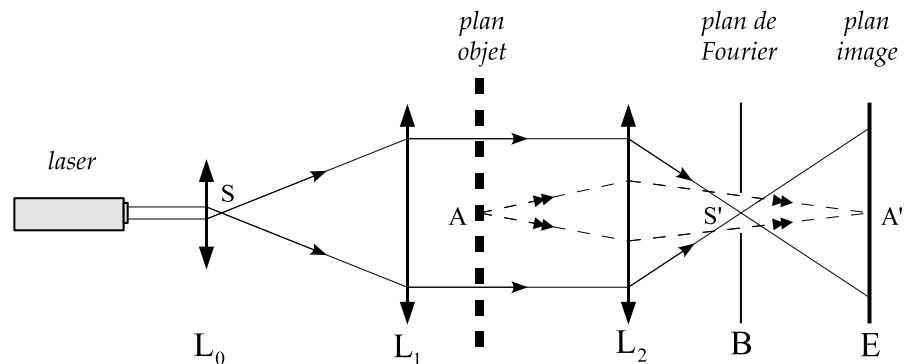
#### 1) Filtrage des fréquences spatiales

Réf générale : Françon et al., p. 87 à 93

##### a) Expérience d'Abbe (Qualitatif mais Important)

Réf : Bottineau, Henry et Jouanisson

FIGURE 8 – Expérience d'Abbe



A titre indicatif :  $f_0 = 0,5 \text{ cm}$ ,  $f_1 = 10 \text{ à } 20 \text{ cm}$ ,  $f_2 = 10 \text{ cm}$

Choisir  $f_1$  de façon à couvrir convenablement l'objet.

Il est important de choisir une assez courte focale pour  $f_2$  afin que l'image de la grille sur l'écran soit bien visible.

A = grille xy (pas  $\approx 0,3 \text{ mm}$ )

Le pas de la grille est assez critique : trop grande on ne voit pas sa TF, trop petite on ne voit pas son image sur l'écran.

B = fente, E = écran éloigné

**Présentation**  $L_0$  et  $L_1$  permettent d'obtenir un faisceau parallèle.  $L_2$  forme l'image de A sur l'écran E.

Dans le plan de convergence du faisceau laser (plan de  $S'$ ), on a la transformée de Fourier de A. Sur l'écran E on a une amplitude qui est la transformée de Fourier de l'amplitude dans le plan de  $S'$ .<sup>14</sup>

Si on place dans le plan de  $S'$  un diaphragme B, on modifie la figure de diffraction de A, et, sur E, on observe une modification de l'image  $A'$  de A.

**Proposition d'expérience** Choisir pour A une grille xy (diapositive "Expérience d'Abbe"). Former avec soin son image sur l'écran<sup>15</sup>. Choisir la position de netteté qui correspond à une

14. Il semble donc que si on rapproche l'objet de  $L_2$  la figure dans l'espace de Fourier est inchangée et pourtant l'image sur l'écran devient floue. Il y a quelque chose qui cloche ! Voir l'Annexe III.

15. On constate qu'il y a plusieurs positions qui donnent une image nette de la grille, c'est le phénomène de Talbot. Il apparaît en optique cohérente avec les structures répétitives. Voir l'Annexe III. En plaçant provisoirement un calque juste avant la grille on réduit la cohérence du faisceau et élimine le phénomène de Talbot, ce qui facilite la mise au point.

distance objet-lentille  $L_2$  proche de sa focale puisque l'écran est éloigné. Sa figure de diffraction dans l'espace de Fourier est une croix ("croix de Mills"), cf paragraphe *Reciprocité de la transformée de Fourier* page 8. Avec une fente B, n'en sélectionner que la branche verticale.

Vérifier alors qu'on ne voit plus, dans le plan image, que les traits horizontaux : ne subsistent que ceux dont la figure de diffraction est verticale, c'est-à-dire les traits horizontaux.

Jouer sur l'orientation et la finesse de B.<sup>16</sup>

**Conseil** On peut visualiser directement la TF sur l'écran. Ajouter après B une lentille de focale 10 cm et former sur l'écran l'image du plan de Fourier, qui est matérialisé par B. Montrer la mise en place du "filtre" puis ôter cette lentille...

## b) Strioscopie

*Réf : les mêmes que pour l'expérience précédente*

Cette technique de filtrage spatial a été découverte par Toepler en 1867 pour étudier les fluides, les couches d'écoulement apparaissant comme des stries, d'où le nom.

Reprendre le montage précédent<sup>17</sup> en remplaçant la grille A par un *objet de phase*<sup>18</sup> (empreintes digitales sur du verre ou trace de vernis).

Cette fois B est un cache circulaire (pastille d'adhésif noir couvrant entièrement, mais sans déborder, la tache centrale d'ordre zéro.

En l'absence de A, l'écran doit être parfaitement sombre.

On observe l'image "haute fréquence" due à la lumière diffractée par A en blanc sur fond noir. Les mises au point doivent être soignées. Relier l'interprétation de cette expérience à celle de la précédente.<sup>19</sup>

## 2) Speckle : granularité laser (facultatif)

*Réf : Svelto (Principles of laser, p. 400) et Hecht pour la théorie, Bottineau*

Lorsqu'on éclaire un objet diffusant avec un laser, les différents points de l'objet rayonnent de façon cohérente. On observe donc dans tout l'espace, et en particulier au voisinage de l'image de l'objet par un système optique (objectif, œil, ...), une figure d'interférence caractéristique : le *speckle*.

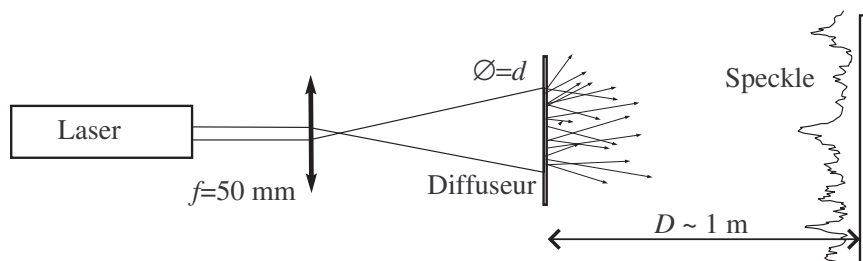
"Élargir" le faisceau laser à l'aide d'une lentille convergente de focale assez courte (5 cm). Observer la modification du speckle lorsqu'on déplace le dépoli par rapport au point de convergence du faisceau. La répartition des grains dépend de la structure (aléatoire) du dépoli, la taille des grains, en revanche, est de l'ordre de  $\lambda D/d$  où  $d$  est le diamètre de la portion de diffuseur éclairée par le faisceau.

16. Cette expérience peut être réalisée en lumière blanche mais son interprétation est alors différente car on est en lumière (partiellement) incohérente (cf. *Sextant chap. III*).

17. C'est pour simplifier mais l'expérience est plus belle avec une lampe QI sans filtre.

18. C'est à dire un objet qui n'absorbe pas mais déphase, sa fonction de transmission est purement imaginaire. L'idéal serait de choisir un objet transparent pratiquement invisible dans les conditions normales d'observation, ce n'est pas tout à fait le cas avec les objets proposés ici. L'expérience d'*ombroscopie* avec des ultrasons dans l'eau proposée dans le poly *Ondes 1-Acoustique* est un bon exemple de visualisation d'un objet de phase.

19. Note sur le *contraste de phase* (cf. *Perez*) : en microscopie on rencontre souvent des objets de phase. La strioscopie permet de les étudier mais présente un inconvénient : la luminosité observée ne dépend pas du signe de la phase ("plein" ou "creux"). Le contraste de phase y remédie en remplaçant la petite pastille centrale absorbante par une pastille qui déphase de  $90^\circ$  à la longueur d'onde de travail. Le problème expérimental est que le déphasage de la lame est absolu : ce n'est pas une lame biréfringente, c'est une couche diélectrique très mince ( $\frac{\lambda}{4(n-1)}$ ) déposée sur du verre optiquement plan. Nous n'en possédons pas.

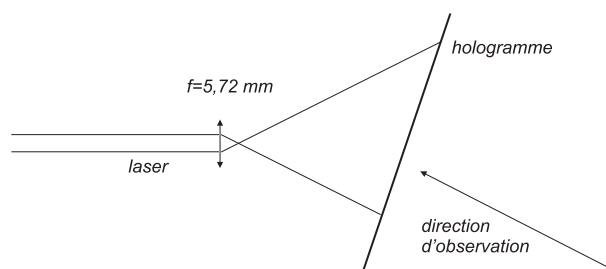
FIGURE 9 – *Speckle*

En se plaçant au point de convergence ( $d$  minimum) déduire de l'expérience un ordre de grandeur de la dispersion angulaire du faisceau laser.

### 3) Holographie (facultatif)

Réf : article de Michel Henry (BUP n° 723) et Goodman

On propose ici une expérience d'observation d'un hologramme, visible par un large public. Se placer d'abord dans les conditions usuelles d'observation de l'hologramme : figure 10.

FIGURE 10 – *Observation d'un hologramme*

Ajuster l'orientation de l'hologramme pour avoir l'image la plus lumineuse possible. Il s'agit alors d'une image virtuelle.

L'expérience ainsi réalisée n'est visible que par une seule personne. Pour qu'elle soit plus spectaculaire, il faut rendre l'image réelle et donc « projetable » sur un écran. Pour cela, tourner l'hologramme de  $180^\circ$  autour d'un axe vertical et placer à l'endroit où se trouvait l'œil dans l'expérience précédente un dépoli parallèle à l'hologramme. Ôter la lentille. Alors qu'on éclaire une toute petite partie de l'hologramme, on observe l'ensemble de l'image. Faire tourner le laser pour éclairer un autre point de l'hologramme. Vérifier que l'objet est alors "vu" sous un angle différent.

## Annexe I : Enregistrement des résultats

### Webcams

Une webcam permet de capturer une image en 2D de l'expérience que l'on est en train de réaliser. On peut acquérir les images à l'aide des logiciels de base fournis avec les webcams (Philips VRecord ou AMCAP).

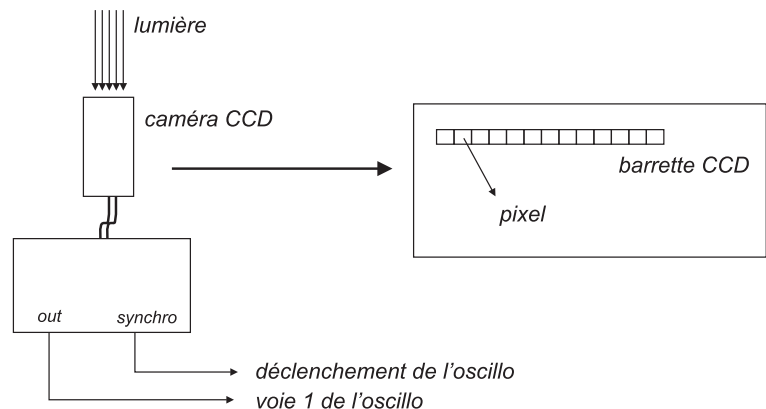
Sur l'utilisation des webcams (réglage du gain, de la vitesse d'obturation, des dépendances en longueur d'onde...), voir l'Annexe du poly "Instruments d'optique et lasers" : ce sont des instruments de mesure offrant de multiples possibilités, pour peu que l'on fasse attention aux divers points évoqués dans cette Annexe.

Ces instruments sont sensibles à l'infra-rouge.

Igor et Synchronie permettent ensuite de traiter ces images, par exemple en faisant une "coupe" pour obtenir un profil à 1D. Sur l'utilisation de Synchronie, voir le Poly *Outils Informatiques*.

### Utilisation d'une barrette CCD

FIGURE 11 – Utilisation d'une barrette CCD



On dispose de deux dispositifs :

- une **barrette Hamamatsu**, montée sur une tête séparée de l'électronique
  - Éclairer correctement la barrette d'éléments photosensibles ;
  - Repérer les "tops" de synchronisation à l'oscillo et régler la base de temps pour avoir deux tops sur l'écran ;
  - Visualiser la figure. Il faut travailler à **très faible intensité** pour ne pas saturer la CCD. On prendra garde notamment au fait qu'à forte intensité, la réponse de la CCD, qui semble ne plus saturer, n'est en fait plus linéaire, déformant ainsi le signal (penser à consulter la notice). Ajouter un filtre atténuateur ou deux polariseurs dont on ajustera l'angle.
- une **autre barrette**, directement montée dans le boîtier (bleu) qui contient l'électronique de contrôle : plus facile à synchroniser et avec un calibre réglable, mais dont la tête est plus encombrante.

Dans les deux cas, regarder la documentation pour comprendre comment faire la conversion temps/déplacement pour la calibration du signal.

De même que pour les images, on peut acquérir les signaux fournis par les barrettes CCD sur l'ordinateur, afin de les traiter à l'aide des logiciels Igor ou Synchronie (par exemple pour réaliser des ajustements). Voir le poly "Outils Informatiques" ainsi que la notice spécifique "Acquisition de données sous Igor Pro".

## Utilisation du système CALIENS

Avant toute utilisation, lisez attentivement la notice simplifiée consacrée à la caméra CCD CALIENS. En particulier, les points suivants sont cruciaux :

- Ne jamais envoyer de lumière directement sur la tête optique. Utiliser les deux polariseurs en atténuateur variable (un point rouge sur chacun permet de repérer s'ils sont croisés ou parallèles).
- Suivre scrupuleusement les étapes du branchement décrites page 3 de la notice simplifiée.
- Soignez le réglage de la tête optique (*colinéarité* image – détecteur et *alignement* image – détecteur ; voir notice simplifiée p.11).

## Annexe II : Diffraction par des objets d'épaisseur non négligeable

Cet effet 3D est rarement traité, or il intervient souvent dans les expériences de diffraction (fentes, bord d'écran, lycopode).

On commence par traiter la question pour une fente de largeur  $a$  et d'épaisseur  $e$ . On se place dans le cas où les surfaces sont absorbantes (noir mat). Voir la figure 12 où le faisceau incident est une onde plane horizontale vers la droite.

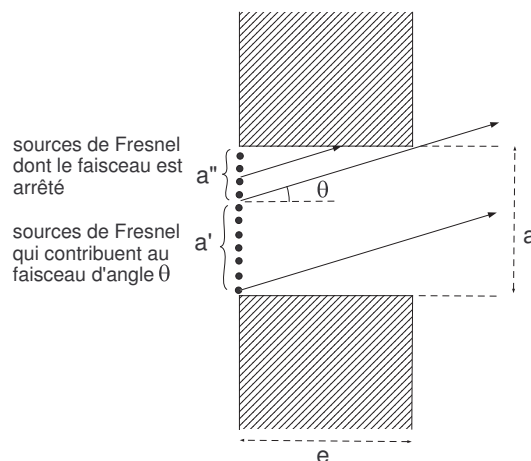


FIGURE 12 – Cas d'une fente épaisse

La figure montre que tout revient à avoir une fente moins large ( $a' < a$ ), mais l'effet est non linéaire, il dépend de  $\theta$ .

Pour que l'effet soit négligeable il faut (en se limitant aux angles faibles) que :  $a'' \cong e \theta \ll a$

- donc si on se contente d'étudier la frange centrale :

$$\theta \approx \frac{\lambda}{a} \quad \text{d'où : } e \ll \frac{a^2}{\lambda} \quad \text{qu'on écrira : } e < \frac{a^2}{10\lambda} \text{ (inégalité 1)}$$

– et si on veut étudier les 10 franges de chaque côté :

$$\theta \approx \frac{10 \lambda}{a} \quad \text{d'où : } e < \frac{a^2}{10 \lambda} \quad \text{qu'on écrira : } e < \frac{a^2}{100 \lambda} \text{ (inégalité 2)}$$

Pour une fente de largeur  $a = 0,1 \text{ mm}$  on trouve respectivement avec le laser rouge :

- $e < 1,6 \text{ mm}$  pour le cas 1
- $e < 0,16 \text{ mm}$  pour le cas 2

Les plaques en inox gravé, d'épaisseur  $e$  un peu inférieure à  $0,1 \text{ mm}$ , vérifient bien ces conditions.

Le cas où la surface de la fente n'est pas absorbante complique l'étude. Dans le cas d'un reflet métallique on pourrait penser que le faisceau diffracté dans la direction  $-\theta$  est renvoyé dans la direction  $\theta$  par la paroi basse de la figure et vient compenser le faisceau reçu par la paroi haute, mais ce raisonnement est faux à cause des déphasages lors de la réflexion sur le métal. Le fait que la surface soit noircie en mettant de la peinture ou de l'adhésif noirs brillants n'améliore pas les choses car tout diélectrique brillant a un coefficient de réflexion proche de 1 en incidence quasi normale et déphase.

On peut illustrer expérimentalement ceci en éclairant, bien perpendiculairement à son plan, le bord d'une lame de rasoir puis le bord d'une plaque métallique lisse d'épaisseur supérieure à  $0,5 \text{ mm}$ . On peut opérer plus rapidement en utilisant le bord coté coupant et le bord épais d'une lame de canif ou de ciseaux.

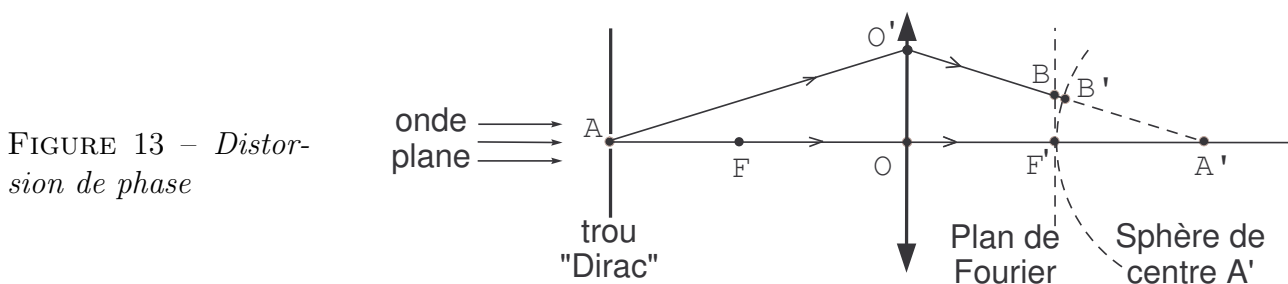
Le cas du lycopode, constitué de granules quasi sphériques de diamètre approximatif  $a = 30 \mu\text{m}$  est plus complexe à analyser avec précision. On va admettre que les inégalités précédentes s'appliquent en posant  $a = e$ . Dans ce cadre on trouve que l'inégalité 1 est bien vérifiée et la 2ème pas tout à fait. Mais si on se contente de mesurer le 1er anneau de diffraction et si on ajoute le fait que la précision de la mesure est réduite par la dispersion des diamètres, on peut exploiter quantitativement l'expérience sans problème.

On peut remarquer que plus l'objet diffractant est petit,  $\frac{a}{e}$  étant donné, plus l'effet 3D prend d'importance. Explication : plus l'objet est petit plus la diffraction provoque des rayons orientés vers les parois latérales.

**En conclusion**, il n'est pas nécessaire de retenir ces calculs, mais il bon de se rappeler que les plaques et fentes ne doivent pas avoir une épaisseur supérieure à  $0,1 \text{ mm}$  et que l'expérience du lycopode ou du cheveu ne pose pas de problème.

## Annexe III : Distorsion de phase dans le plan de Fourier

La figure classique de diffraction à l'infini (cf. figure 3 page 5) donne l'impression que la figure dans le plan de Fourier ne dépend pas de la position de l'objet diffractant par rapport à la lentille  $L_2$ . C'est vrai pour l'intensité mais faux pour l'amplitude complexe, il y a une seule position de l'objet qui respecte la répartition attendue de phase. Ce fait est peu connu, c'est pourquoi on développe un peu ce sujet ici. Il permet de mieux comprendre l'expérience d'Abbe. On part d'un cas théorique représenté sur la figure 13.



L'onde plane éclaire le trou A infiniment petit. On sait que la TF de ce "Dirac" est une constante qu'on peut supposer réelle. On s'attend donc à avoir dans le plan de Fourier, qui est aussi le plan focal image de la lentille, des points  $F'$  et  $B$  ( $B$  pris au hasard) en phase, si ce n'est pas le cas il y a distorsion de phase. Or les points  $A$  et  $A'$  étant conjugués par la lentille, on a, en tenant compte des épaisseurs de verre traversées, égalité des différences de marche soit :  $(AOA') = (AO'A')$  donc  $(AOF') = (AO'B')$ . Par conséquent les points  $B$  et  $F'$  ont une différence de chemin optique qui vaut :  $\delta = BB' \cong \frac{(F'B)^2}{2(F'A')}$ . La distorsion de phase qui s'ensuit

n'est pas visible sur un écran placé au plan de Fourier, mais elle apparaît si on veut reconstituer l'image sur un écran-image éloigné.<sup>20</sup>

Si on place le trou au foyer  $F$ , le point  $A'$  est à l'infini et la sphère de centre  $A'$  se confond avec le plan de Fourier, il n'y a plus de distorsion,  $BB' = 0$ .

Conclusion : **une condition nécessaire pour ne pas avoir de distorsion de phase est que l'objet éclairé par une onde plane soit placé au foyer objet de la lentille.** Dans le cas contraire l'image reconstituée à l'infini n'est pas nette en général et d'un point de vue plus théorique la relation entre l'objet et l'amplitude complexe dans le plan de Fourier n'est pas une TF exacte.

*Explication du phénomène de Talbot*, cf. Henry et Jouanisson *La lumière du laser*.

On se place dans le cas de la figure ci-dessus mais on remplace le trou par un objet périodique, on obtient dans le plan de Fourier des taches équidistantes ...,  $B_{-2}$ ,  $B_{-1}$ ,  $F'$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ , ... quelle que soit la distance  $AF$  comme on l'a dit au début de cette Annexe.

Lorsque l'objet  $A$  est en  $F$ , il n'y a pas de distorsion et son image est nette sur l'écran.

Lorsque  $A$  s'éloigne de  $F$ , à gauche ou à droite, il existe une position telle que la distorsion de phase  $\phi_1 = 2\pi \delta_1/\lambda$  entre  $B_1$  et  $F$  est égale à  $2\pi$ , alors la formule quadratique donnée plus haut,  $BB' \cong \frac{(F'B)^2}{2(F'A')}$ , conduit à un déphasage  $\phi_2$  entre  $B_2$  et  $F$  égal à  $4 \times 2\pi$  puis  $\phi_3 = 9 \times 2\pi$ , etc. La distorsion n'a pas d'effet, l'image est donc nette. Puis,  $A$  s'écartant encore, on retrouve une image nette lorsque  $\phi_1 = 4\pi$ , ...

L'expérience montre qu'entre 2 positions de netteté expliquées ici, il y a une autre position qui conduit à une apparence de netteté. La plus proche de  $F$  correspond au cas où  $\phi_1 = \pi$ ,  $\phi_2 = 4 \times \pi$ ,  $\phi_3 = 9 \times \pi$ , ... ce qui revient à changer le signe des ordres impairs. Il y a donc une distorsion particulière, dont l'effet n'est pas évident. Dans le cas d'une grille constituée de traits cela se traduit dans l'image par une inversion des zones claires et sombres (confirmée par l'étude mathématique du spectre), mais ce n'est pas une propriété générale (c'est évident pour les fonctions qui n'ont que des ordres pairs).

20. Si l'écran-image n'est pas éloigné, la distorsion peut jouer un rôle utile. Pour le comprendre le plus simple est de supposer cet écran au point  $A'$  : dans ce cas la distorsion de phase permet d'avoir une image nette ! C'est évident puisque  $A$  et  $A'$  sont conjugués. Dans toute la suite on suppose l'écran-image éloigné.