

## TAILLEZ VOUS MÊME VOTRE MIROIR DE TÉLESCOPE



Ce texte date de 1989, il a été publié sous forme de brochure par [Ciel et Espace](#)

© 1989, Texte et dessins de ces pages : [Laurent Koechlin](#)

LAURENT KOEHLIN  
Observatoire Midi Pyrénées  
14 avenue Edouard Belin  
31400 TOULOUSE  
tel 05 61 33 28 87  
fax 05 61 33 28 40

## Sommaire

1	LES TÉLESCOPES ET LEURS MIROIRS.....	4
1.1	Le choix de la focale.....	4
1.2	La taille d'un miroir.....	4
2	COMMENT S'INSTALLER.....	5
3	L'EBAUCHAGE.....	9
3.1	Méthode de travail.....	9
3.1.1	La taille du miroir.....	9
3.1.2	Les courses d'ébauchage.....	11
3.2	Contrôle du rayon de courbure.....	13
3.2.1	Le calibre en bristol.....	14
3.2.2	Mesure du rayon de courbure par réflexion.....	15
3.2.3	Le sphéromètre.....	16
3.2.4	Utilisation du sphéromètre.....	17
3.3	Fin d'ébauchage et préparation au doucissage.....	18
4	LE DOUCISSAGE.....	19
4.1	Matériel et produits pour le doucissage.....	19
4.2	Débouillage d'un émeri.....	20
4.3	Les étapes du doucissage.....	20
4.4	Défaut possibles au doucissage.....	22
5	LE POLISSAGE.....	23
5.1	Le polissoir.....	23
5.2	La poix.....	24
5.3	Séances de polissage.....	28
5.4	Retailage des carrés de poix.....	30
5.5	Quelques règles à respecter.....	32
5.6	Difficultés au polissage.....	32
6	LE FOUCAULTAGE.....	34
6.1	Principe de la mesure avec l'appareil de Foucault.....	34
6.2	Quels sont les plus petit défauts décelables ?.....	36
6.3	Construction de l'appareil de Foucault.....	43
6.3.1	Matériaux et outils nécessaires.....	43
6.3.2	Quelques points particuliers :.....	47
6.4	La pratique du foucaultage.....	47

6.4.1	Détermination de la distance focale de l'instrument.....	49
6.5	Correction des gros défauts d'un tirage de 1 mm ou plus .....	49
7	LA PARABOLISATION .....	53
7.1	La parabolisation est nécessaire.....	53
7.2	Courses de parabolisation .....	56
7.2.1	Première méthode .....	56
7.2.2	Deuxième méthode .....	57
7.3	Contrôle des écarts à la parabole .....	57
7.4	Evaluation de la forme de la surface .....	61
7.5	Utilisation et limites de la méthode de mesure .....	64
7.6	Retouche des paraboles .....	64
7.7	Définitions .....	66
7.8	Ancienne liste des fournisseurs (datant de 1990).....	67

# 1 LES TÉLESCOPES ET LEURS MIROIRS

La construction d'un télescope est une entreprise de longue haleine, mais ô combien passionnante !

Habituellement les astronomes amateurs ne font eux-mêmes que le miroir principal, le tube et la monture. ils achètent les autres pièces : miroir plan de renvoi, chercheur, oculaires.

De nombreux amateurs sont à la recherche de documents permettant la réalisation d'un miroir. Malheureusement, la bibliographie sur ce sujet est rare et l'ouvrage qui fait référence en ce domaine, (la construction du télescope amateur de Jean Texereau), est épuisé depuis fort longtemps.

Les télescopes se caractérisent entre autres par le diamètre (D) et la focale (f) de leur miroir principal. C'est de lui que dépend la qualité de tout l'instrument. C'est aussi la pièce la plus coûteuse quand on veut l'acheter toute faite (2 000 à 3 500 francs en fonction de la qualité, pour un miroir de 21 cm de diamètre).

Ce miroir doit être de forme parabolique (surface très proche d'une calotte de sphère), d'une précision extrême : les écarts avec la surface idéale ne doivent pas dépasser 1/20 000 de mm ou encore  $\lambda/8$ .  $\lambda = 0,00056$  mm, c'est la longueur d'onde de la lumière jaune-vert, à laquelle l'oeil est le plus sensible.

Seule une machine très perfectionnée doit être capable de réaliser cela, direz-vous, eh bien pas du tout : les meilleurs résultats sont obtenus à la main et par des méthodes somme toute assez simples.

## 1.1 Le choix de la focale

A grossissement égal, un télescope à longue focale est aussi lumineux qu'un télescope de même diamètre à courte focale. Dans la majorité des instruments d'amateurs et du commerce, la focale vaut 5 à 8 fois le diamètre de l'instrument :

$$f/D = 5 \text{ à } 8.$$

Au-delà, l'instrument est encombrant et sa monture délicate à réaliser, au-dessous le miroir doit être assez concave et on a des difficultés au polissage pour lui donner une forme parabolique correcte.

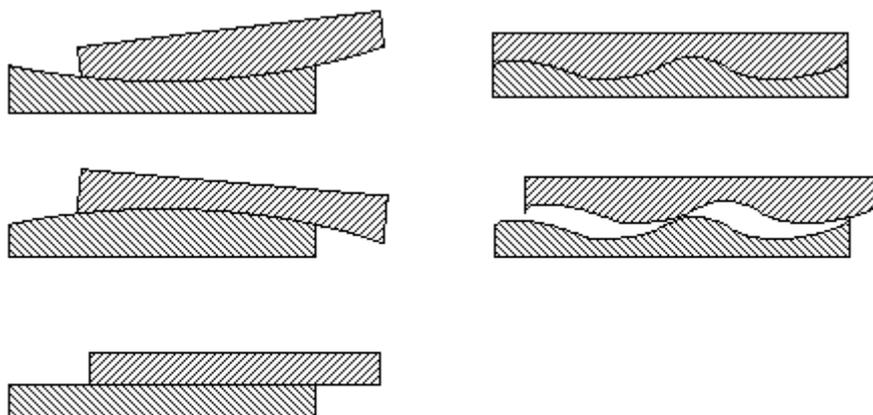
## 1.2 La taille d'un miroir

Évidemment, plus la taille du miroir est importante, plus il est difficile à réaliser. Pour un débutant, les dimensions optimales sont comprises entre 200 et 300 mm, de diamètre, avec un rapport f/D de 5 à 8. Polir un miroir de plus de 300 ou de moins de 150 mm est très délicat.

La taille et le polissage d'un miroir de 21 cm de diamètre prennent en moyenne une centaine d'heures, comptez donc, en travaillant un jour par semaine, trois mois à un an pour en venir à bout. En même temps que le disque qui sera le miroir, on achète des abrasifs, des produits de polissage et un second disque (appelé outil) en verre, de même diamètre que le miroir, mais un peu moins épais pour réduire les coûts. L'épaisseur "standard" d'un disque miroir se situe aux alentours de 40 mm. Pour le disque outil on peut se contenter de 30 mm.

Il y en a pour à peu près 1 200 francs de fournitures. L'économie réalisée est faible, elle se réduit à zéro si l'on compte les nombreuses heures de travail. Mais ce qui est important, c'est l'expérience acquise et qui permet d'aller plus loin et tailler des instruments d'un diamètre de 400, 500 mm, voire même plus. La qualité d'un miroir taillé avec soin sera, dans la majorité des cas, supérieure aux optiques du commerce.

Le travail s'exécute par rodage des deux surfaces l'une contre l'autre avec interposition d'un mélange composé d'abrasifs et d'eau. A cause du très grand nombre de va-et-vient (courses) que l'on fait subir aux disques de verre, chaque point de ceux-ci est usé dans les mêmes proportions. Si un aspérité survient lors de la taille du miroir, celle-ci sera nivelée plus rapidement que l'ensemble du disque. Pour les creux, le phénomène est inversé. au bout d'un certain temps, les surfaces des deux disques s'appliquent parfaitement l'une sur l'autre dans n'importe quelle position. De telles surfaces ne peuvent être que des portions de sphères, aux irrégularités du dépoli près.



Seules des surfaces planes ou sphériques s'adaptent dans n'importe quelle position.

Le travail de taille d'un miroir de télescope se décompose en trois phases :

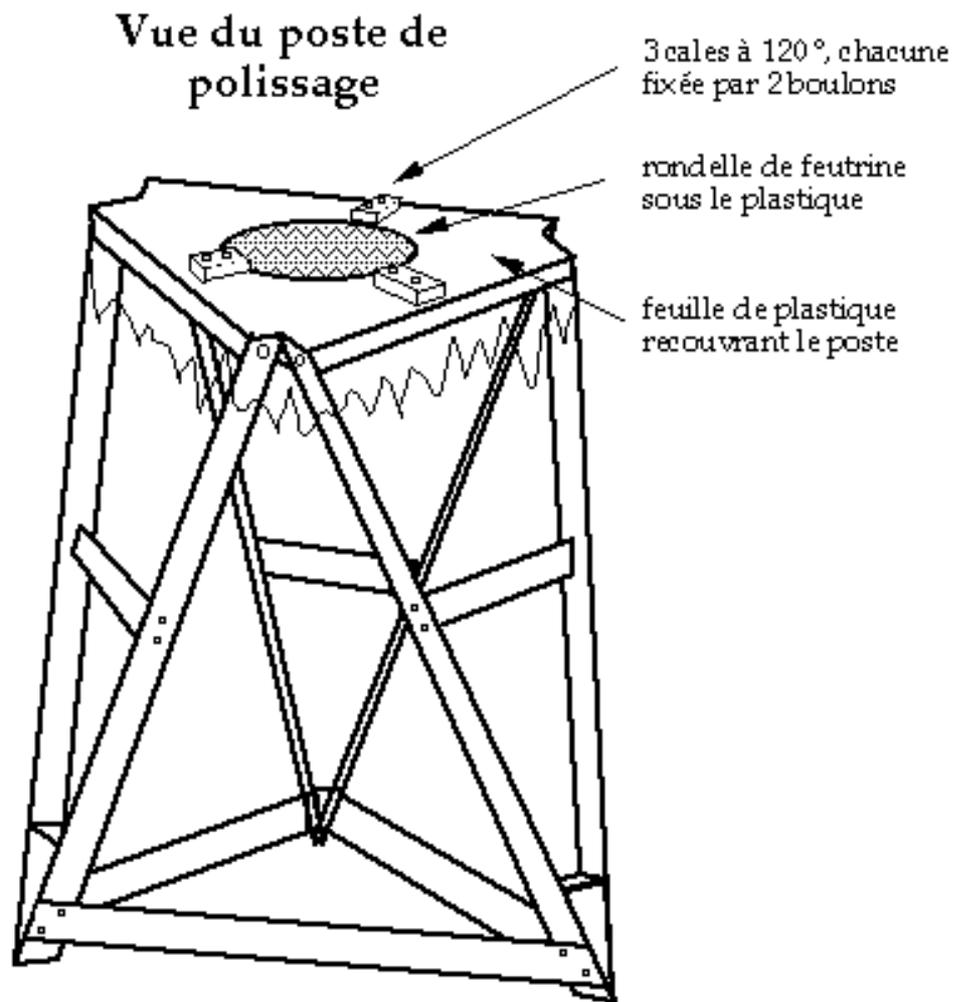
**L'EBAUCHAGE** : A l'aide d'un abrasif grossier, le carbure de silicium ou carbo, en grains de 2/10 de mm, on donne au disque miroir sa forme concave voulue (le disque outil devient convexe). Le verre présente alors un dépoli assez grossier.

**LE DOUCISSAGE** : On réduit le dépoli à l'aide d'abrasifs de plus en plus fins (émeri, corindons) de taille dégressive, d'un dixième à 5 millièmes de millimètre, et la forme s'approche de celle d'une sphère.

**LE POLISSAGE** : On polit le miroir avec une boue de "rouge" ou d'oxyde de zirconium, en le frottant avec l'outil recouvert de carrés de poix. Cette dernière phase est la plus délicate.

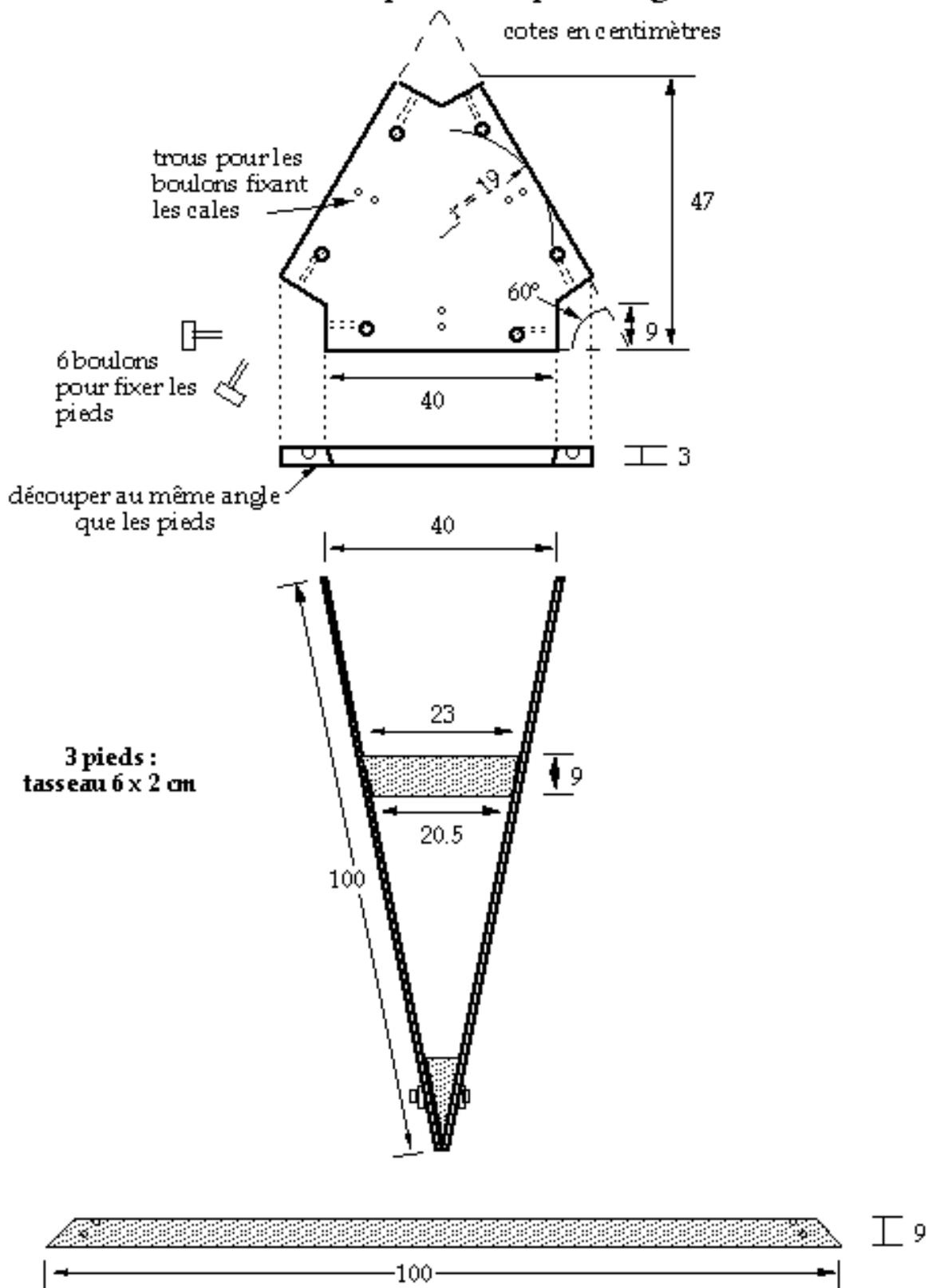
## 2 COMMENT S'INSTALLER

On doit choisir un local propre et bien éclairé, si possible près d'un point d'eau, et surtout facile à nettoyer. En fin de doucissage, le moindre grain d'abrasif issu du début de la taille peut provoquer une grave rayure. Pour le polissage, il est conseillé de changer de local et de poste de travail. Celui-ci doit être un bâti en bois très stable : un baril métallique ou un tonneau en bois recouvert d'une planche solidement fixée qui doit se trouver entre 80 cm et 1 m de hauteur. Ceci permet un travail agréable. Il faut lester le poste avec 30 à 50 kg afin de garantir sa stabilité.



Inspiré de l'une des propositions de poste de J Texereau, dans son livre : La construction du télescope d'amateur.

## Plans du poste de polissage

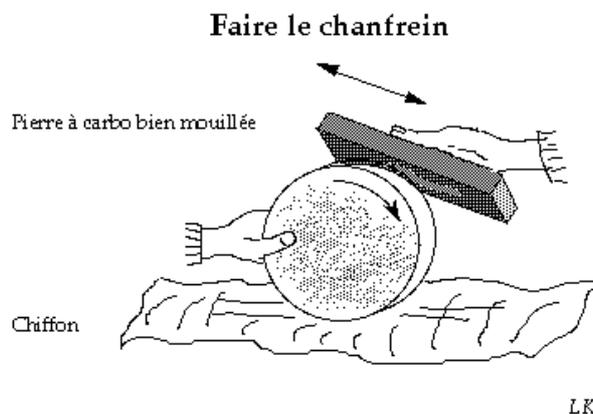




autre exemple :



Les disques fournis actuellement dans le commerce sont approximativement plans. Ils peuvent avoir une face polie ou au moins translucide et une face dépolie. C'est cette dernière qu'il faut creuser. Le côté dépoli permet de voir travailler l'abrasif et de doser correctement l'oxyde ou le rouge lors du polissage. Le verre contient des petites bulles très gênantes si on les atteint pendant l'ébauchage ou le doucissage car elles se remplissent d'abrasifs et sont difficiles à nettoyer. Cet abrasif peut causer des rayures quand le dépoli est devenu fin. Il faut vérifier que la face à tailler soit, sur une épaisseur d'environ 3 mm, exempte de bulles. Pour les voir, on mouille le disque ou on l'enduit d'huile et on l'observe par transparence derrière une lampe. Ne vous affolez pas si sur l'ensemble de son épaisseur il y en a beaucoup : on creuse très peu le verre. Pour un miroir de télescope de 21 cm de diamètre et ouvert à  $f/D = 6$ , la flèche est de 2 mm au centre. Seules les bulles proche de la surface de taille sont gênantes : elles apparaissent très nettes. Une fois les faces repérées, faites un chanfrein (si ce n'est déjà le cas) de 2 à 3 mm sur le disque miroir et de 4 à 5 mm sur l'outil, pour éviter écailllements et ébréchures. On utilise pour cela une pierre à carbo (achetée en droguerie) qui sera mouillée.



Après toutes ces opérations, on peut commencer l'ébauchage. Nous allons traiter le travail d'un miroir de 210 mm de diamètre, à  $f/D = 6$ , mais la méthode reste la même entre 160 et 310 mm, quelle que soit la focale que l'on a choisi d'obtenir.

## 3 L'EBAUCHAGE

### 3.1 Méthode de travail

Avant d'entamer la taille du miroir, rappelons que le travail doit être effectué avec soin et rigueur. Ces précautions vous éviteront de passer de nombreuses heures à faire des retouches, de vous énerver inutilement et peut-être même finalement de renoncer.

#### 3.1.1 La taille du miroir

##### MATÉRIEL NÉCESSAIRE :

- Une cuvette pouvant contenir les disques,
- une éponge,
- 500 grammes de carbo,
- et bien sûr, les deux disques et le poste de travail.

Mettre le carbo dans une salière pour le saupoudrer sur un disque : cela permet une bonne répartition de l'abrasif en début de séchée et un dosage précis.

Le disque outil doit reposer sur le poste par l'intermédiaire d'une épaisseur de feutrine recouverte d'une feuille de plastique pour faciliter le nettoyage. Trois cales à 120 degrés servent à le maintenir fixe sans le serrer. Rangez soigneusement le carbo, la cuvette et l'éponge à des places déterminées et limitez au maximum le nombre d'objets à manipuler.

Trempez les deux disques, l'un après l'autre, dans une cuvette remplie d'eau, puis essuyez-en sommairement le dos et mettez l'outil en place sur le poste. Saupoudrez quelques centimètres cube de carbo et posez le miroir dessus en ayant soin de ne pas vous tromper de face (il est bon de mettre une flèche au crayon sur la tranche pour l'indiquer, et avant d'entamer les courses vérifier une seconde fois la bonne position des disques).



La quantité d'eau nécessaire à une séchée d'ébauche doit être bien dosée afin que l'abrasif se répartisse uniformément. Elle correspond en général à ce qui reste sur la surface des disques après qu'on les ait rincés et sommairement égouttés.

S'il y a trop d'eau, dès le début de la séchée, vous verrez le carbo chassé de la surface de travail et couler sur le bord de l'outil : rapidement, le bruit diminuera. Si au contraire la quantité est insuffisante, le mouvement s'embourbera à cause d'une purée sèche de poudre de verre et de carbo irrégulièrement répartie.

Si le dosage n'est pas parfait, ce n'est pas très grave : l'ébauchage sera un peu moins rapide. Il est conseillé de changer l'eau de la cuvette toutes les 10 séchées.

### 3.1.2 Les courses d'ébauchage

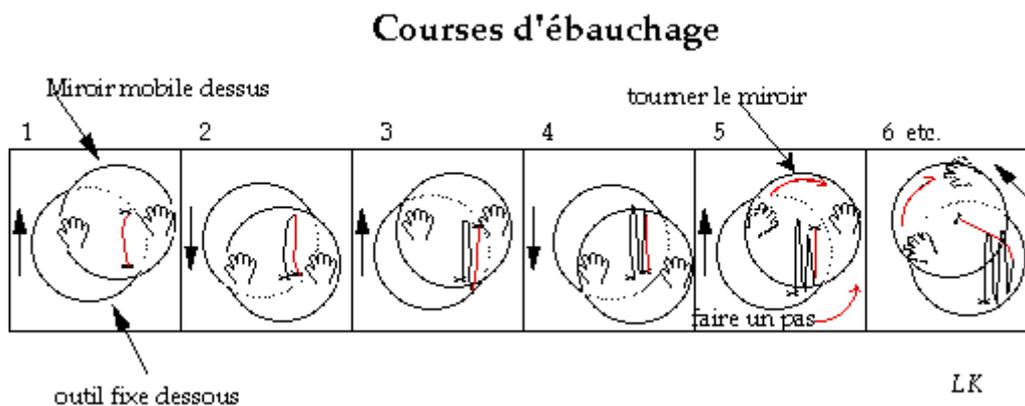
elles sont très fortement décentrées latéralement :  $5/6$  du diamètre, et longues.

Vitesse : 1 aller et retour par seconde.

Pression : forte.

Le bord de l'outil doit user le centre du miroir.

Pour bien répartir l'usure, tournez le miroir dans vos mains de  $1/6$  de tour tous les 3 ou 4 aller et retours, et décalez vous d'un pas. Tout doit avoir changé : l'orientation du miroir par rapport aux mains, son orientation par rapport à l'outil et par rapport à la direction moyenne des courses.



Continuez jusqu'à ce que le carbo soit usé (1 à 2 minutes). Il forme alors une boue grisâtre avec la poudre de verre et le bruit d'abrasion est moins fort qu'au début. Séparez les disques en les ex-centrant et rincez-les. Vous avez fait ce qu'on appelle une "séchée". L'ébauchage en demande entre 50 et 100 pour un débutant.

Comme vous voyez sur le schéma, les courses sont très excentrées, Si l'on allonge trop les courses, le miroir "bascule". Ce n'est pas grave quand la pression des mains n'est pas trop forte. Lorsque vous aurez acquis suffisamment l'habitude pour éviter ces maladrotes, vous devrez appuyer sur le miroir d'une force de 10 à 20 kg.

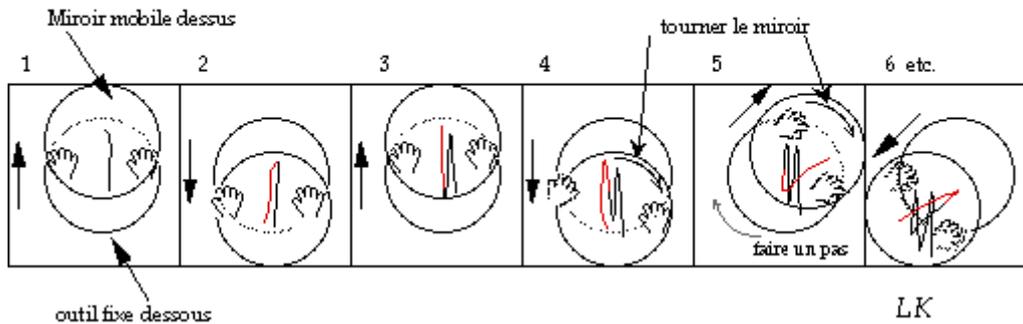
L'efficacité du travail est proportionnelle à la pression. A ce rythme, les séchées durent moins longtemps. au bout d'une heure ou deux de travail, soit 10 à 20 séchées, on commence à voir une faible courbure en observant le miroir par la tranche.

Lorsqu'on approche de la bonne courbure (voir méthodes de contrôle de courbure plus loin), il faut utiliser des courses moins excentrées, les courses de fin d'ébauchage :

- Miroir dessus.
- Centrées et allongées.
- Vitesse : 1 aller-retour toutes les 2 s.
- Pression : un peu plus que le poids des mains.

Les zones moyennes du miroir et de l'outil s'usent pour acquérir une forme plus sphérique. La surface du miroir se creuse encore un peu.

## Courses de fin d'ébauchage

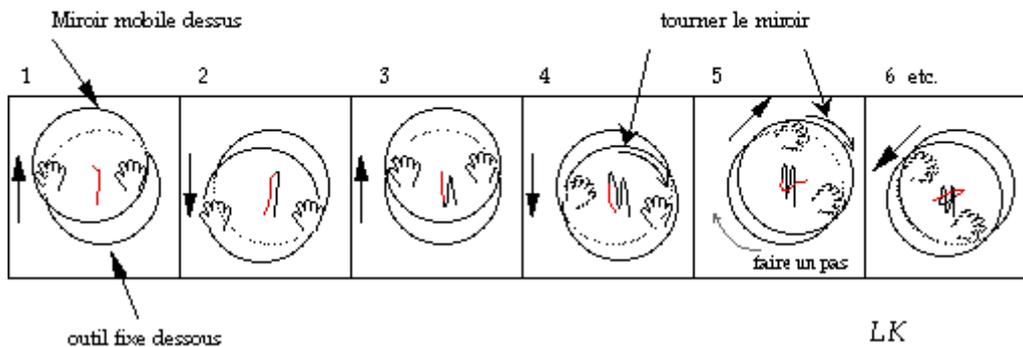


- courses normales : pour les dernières séchées d'ébauchage, tout le doucissage et le polissage (à part les retouches en fin de polissage) :

- Aussi bien miroir dessus qu'outil dessus.
- Vitesse : à varier, autour de 1 aller-retour pas seconde.
- pression : un peu plus que le poids des mains.

La courbure du miroir ne change pratiquement pas : elle se creuse très légèrement en position miroir dessus et l'effet est inverse en position miroir dessous .

## Courses de doucissage et de polissage ( courses "normales" )



En moyenne ces courses ont pour longueur un tiers du diamètre des disques. Ceux-ci doivent donc être décalés d'un sixième de D en bout de course, soit 2 à 3 cm pour un 160 mm de diamètre et 3 à 4 cm pour un 210 mm.

Faites dériver les courses latéralement vers un bord ou l'autre du disque, ce qui leur donne la forme d'un W, d'un M, d'un à deux ou plusieurs boucles Le décalage latéral maximum est de 1 à 2 cm pour un 160 mm et 2 à 3 cm pour un 210 mm (schéma 3.1).

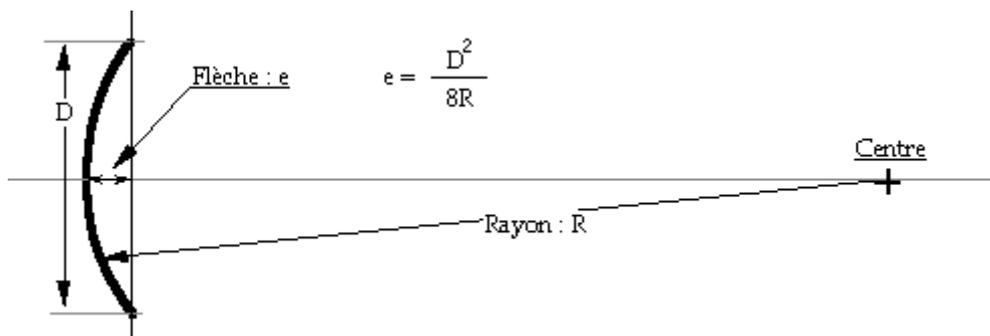
En bout de course n'arrêtez pas les disques mais faites un boucle pour revenir, vous éviterez ainsi des écailles supplémentaires. Tournez le disque dans vos mains tous les 10 ou 15 aller et retours, et décalez-vous d'un pas en sens inverse. Après 50 à 100 courses, le disque doit avoir fait deux tours, et vous un tour autour du poste.

Tout ceci a pour but de répartir uniformément les courses et d'éviter qu'elles ne reviennent systématiquement aux mêmes endroits. L'idéal serait qu'elles soient réparties au hasard, ne respectez donc qu'à peu près les chiffres ci-dessus et variez amplitude, décalage, vitesse et forme des courses. En taillant un miroir à plusieurs, on a de meilleures chances de le réussir car le travail est diversifié.

Affolé par tant de précautions à prendre, la tête entre les mains et les coudes sur le poste de travail, vous vous dites : "Mais dans quelle galère me suis-je embarqué !"... Soyez sans crainte, c'est plus facile qu'il n'y paraît. On apprend vite à exécuter tous ces gestes sans y penser, et à "sentir" ce qui se passe entre les deux disques.

### 3.2 Contrôle du rayon de courbure

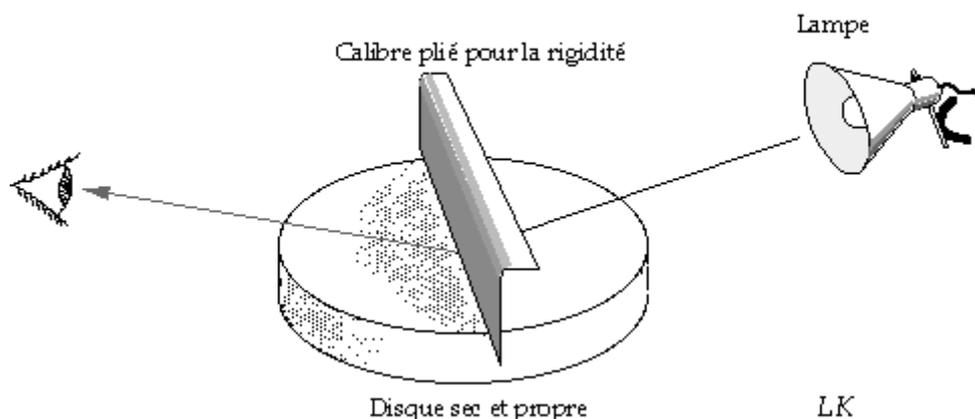
Pour suivre correctement les progrès de l'ébauchage et s'arrêter à la concavité voulue, dont dépendra la distance focale (f), il faut disposer d'un moyen de contrôle de la courbure du miroir. Sa surface est quasiment une calotte de sphère dont le rayon est le double de la focale (f).



Si le diamètre du miroir  $D = 210$  mm et  $f/D = 6$ , alors  $f = 6 \times D = 6 \times 210$  mm = 1,26 m = 1260 mm.

- Le rayon de courbure  $R = 2 \times f$ , soit 2 520 mm.
- La flèche  $e = D^2 / (8R) = 2,19$  mm.

## Mesure de la flèche avec un calibre



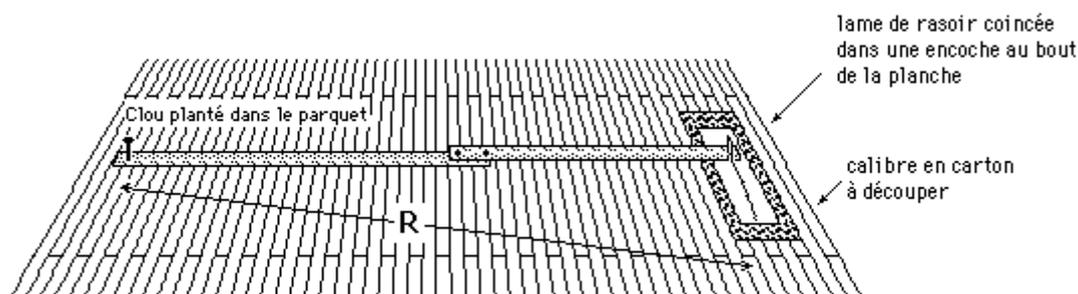
### 3.2.1 Le calibre en bristol

Découper dans un matériau quelconque (carton à chemise ou bristol de préférence) un arc de cercle identique au rayon de courbure du miroir (2,52 m dans notre cas). On applique ce calibre sur le miroir et l'on regarde l'intervalle entre le verre et celui-ci. De cet écartement on en déduit visuellement la précision de la courbure.

Pour tracer un arc de cercle de 2,52 mètres de rayon, il faut un compas de grande taille, introuvable dans le commerce. Pour le remplacer, on utilise une longue planche, (ou éventuellement plusieurs vissées bout à bout), que l'on fait pivoter autour d'un clou. A l'autre bout, on fixe une lame de rasoir qui découpe le carton punaisé sur une planche bien lisse. Ne pas chercher à remplacer la planche de bois par un fil car le tracé serait mauvais à cause de l'élasticité du fil et du mauvais maintien de l'outil de coupe.

Un ruban métallique comme ceux utilisés dans les mètres rubans convient bien par contre. On trouve des mètres rubans de 3 m, c'est parfait car ils sont déjà gradués, il suffit de percer un petit trou à un bout pour placer le pivot, et de scier ou limer une petite échancrure à la distance voulue pour tenir la lame de rasoir).

### Découpe du calibre



R est le rayon de courbure du miroir :  
2,52 m pour un miroir de 210 mm à  $f/D = 6$

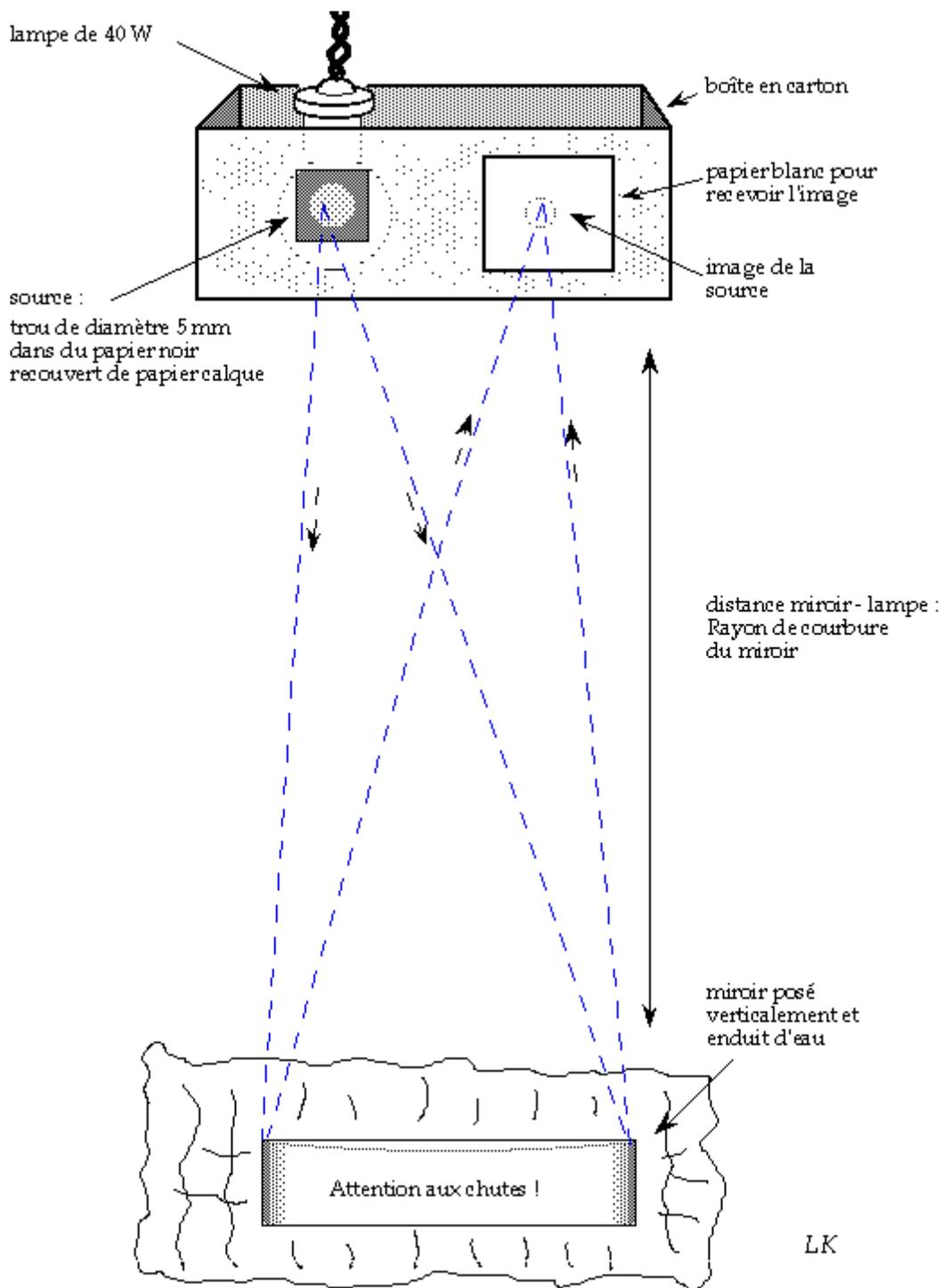
Le bon calibre ne sera peut être pas le premier, aussi est-il conseillé de s'y reprendre à plusieurs fois. Cette méthode ne donne pas une précision de plus de 0,1 mm sur la mesure, ce qui engendre une incertitude de 12 cm sur la focale.

Avec environ 2,2 mm de flèche et 210 mm de diamètre, une erreur de  $x$  sur la mesure de la flèche entraîné une erreur de 1150 fois  $x$  sur l'estimation du rayon de courbure, soit 11,5 cm pour une erreur de 0,1 mm ou bien encore 60 cm pour une erreur de 0,5 mm. Ne pas s'affoler : la méthode du calibre donne facilement 1 à 2/10 ème de mm de précision sur la flèche.

De toutes façons, à l'ébauchage, le miroir n'est pas encore sphérique et l'on pourra modifier la focale de quelques centimètres pendant le doucissage. Pour la contrôler, il faudra utiliser un moyen de mesure plus précis (schéma 3.5).

### **3.2.2 Mesure du rayon de courbure par réflexion**

Si l'on mouille le disque miroir, il devient réfléchissant. Évidemment, la mince pellicule d'eau qui reste sur la surface n'est pas d'une épaisseur uniforme et ne représente pas exactement la forme du verre, mais elle est suffisamment régulière pour donner l'image d'un point lumineux placé en son centre de courbure. Quand le miroir est juste ébauché, la région où cette image est nettement distincte ne s'étend pas sur plus de 5 cm de longueur. Elle est encore plus réduite au début du doucissage. Lorsque la source et l'image sont dans un même plan, devant le miroir, leur distance à celui-ci est le rayon de courbure. Cette seconde méthode, bien que plus lourde à mettre en oeuvre, donne une meilleure précision. Elle est plus adaptée aux mesures finales de l'ébauchage.

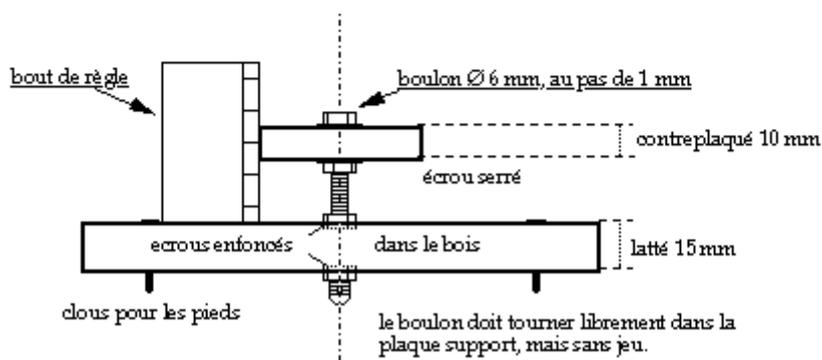
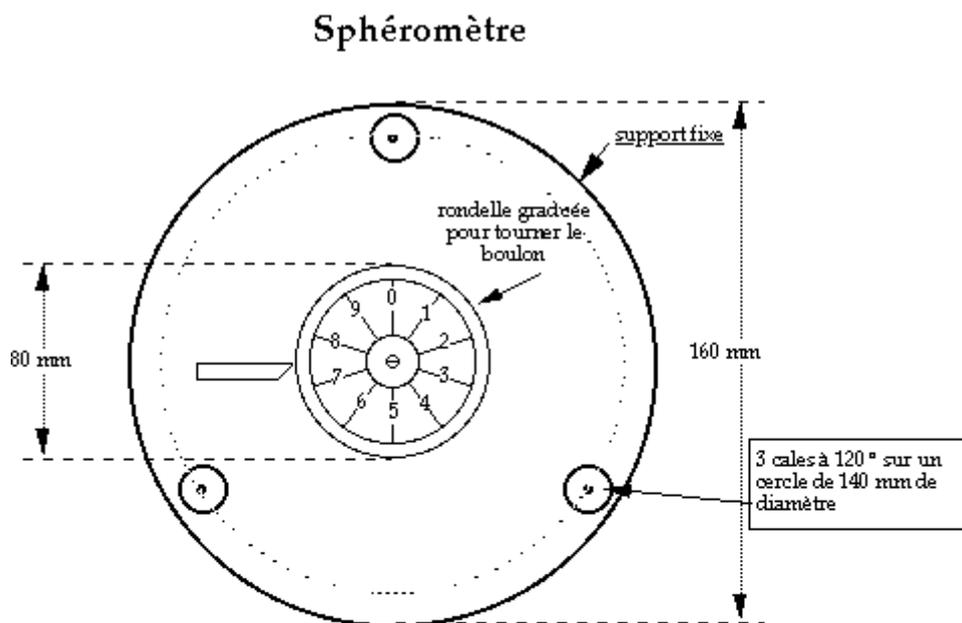


Ne comptez pas connaître exactement la focale de votre miroir avant le polissage. C'est pour cela qu'il est recommandé de ne commencer le tube du télescope que lorsqu'on a terminé le miroir.

### 3.2.3 Le sphéromètre

C'est la méthode la plus précise pour connaître la focale : on mesure la flèche à l'aide d'une vis, sur le même principe que le palmer. Le sphéromètre repose sur trois points à la surface du miroir, et la vis vient palper le centre du miroir. La différence de hauteur entre le cercle

où s'inscrivent les trois points de contact et le centre du miroir est la flèche que l'on veut mesurer.



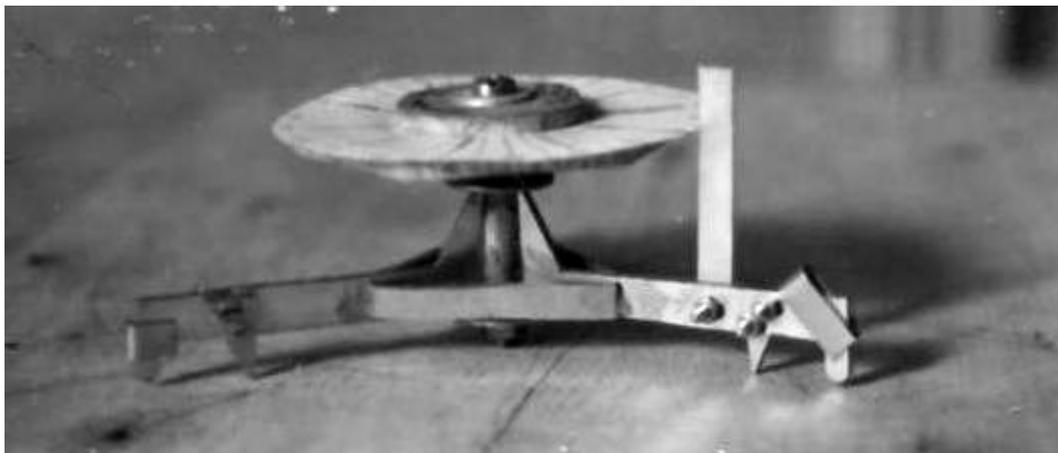
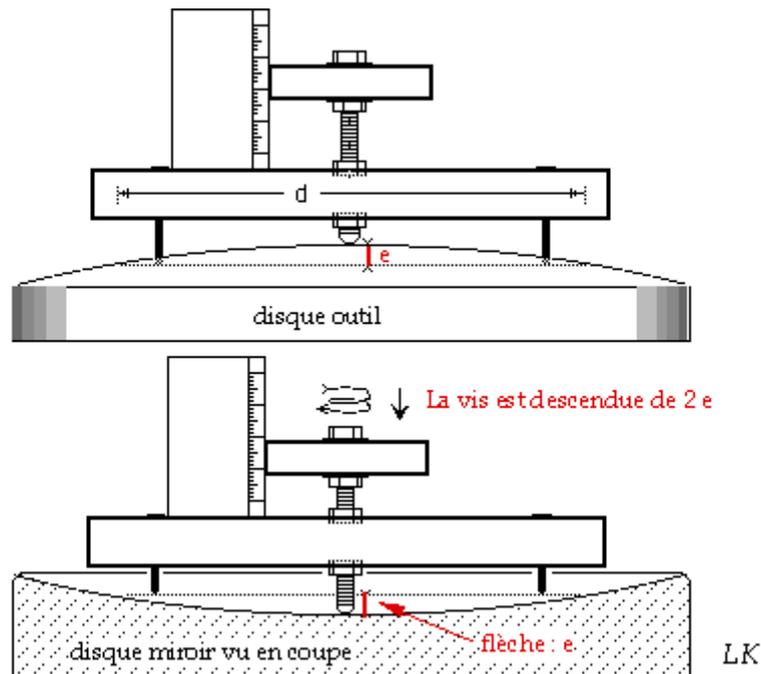
LK

### 3.2.4 Utilisation du sphéromètre

On mesure la différence de courbure entre le miroir et l'outil. Posez d'abord le sphéromètre sur la face convexe de l'outil (celle qui a servi à creuser le miroir) . Dans les schémas suivants la courbure des surfaces est fortement exagérée

Tournez la vis jusqu'à ce qu'elle affleure la surface et libère les 3 pieds d'une partie seulement du poids de l'appareil : on doit le sentir prêt à tourner autour du point de contact central, mais bien en contact aussi avec la surface aux trois points périphériques.

Notez le chiffre de la rondelle graduée pointé par la règle.



Prenez délicatement le sphéromètre, et posez le maintenant sur la face concave du miroir. La vis centrale n'est plus en contact avec le verre. Comptez le nombre de tours qu'il faut visser pour atteindre la surface, tours entiers et dixièmes, en vous servant des 10 graduations que vous avez faites, et notez la différence. Si votre boulon est bien de diamètre 6 mm, 1 tour correspond exactement à un déplacement de 1 mm. Le nombre de tours donne donc la distance parcourue en mm. Divisez par 2 cette valeur : vous avez la flèche du miroir.

Pour obtenir le rayon de courbure  $R$ , utilisez la formule :  $e = d^2 / 8R \Rightarrow R = d^2 / 8e$  où  $e$  est la flèche trouvée et  $d$  le diamètre du cercle délimité par les 3 pieds du sphéromètre : ici 140 mm ; PAS le diamètre du miroir !

### 3.3 Fin d'ébauchage et préparation au doucissage

La fin de l'ébauchage a pour but de réduire les écarts à la sphère et les écailles profondes dues aux fortes pressions tout en continuant de creuser légèrement. A ce stade la courbure

change peu. Lorsque vous êtes à la concavité voulue, flèche correcte à 1 ou 2 dixièmes près, remplacez les courses d'ébauchage par les courses de fin d'ébauchage (dessin et photo en haut à gauche de la p. 23, nx 135), 10 séchées de ce type plus 10 séchées de courses "normales" doivent nous amener à la bonne courbure tout en préparant le doucissage.

Une fois l'ébauchage terminé, il est nécessaire de tout nettoyer minutieusement : le sol du local, le poste de travail ainsi que ce qui a été manipulé pendant l'ébauchage. Il faut impérativement changer les cales et leurs vis qui ont dû rouiller, la cuvette qui s'est incrustée de carbo ainsi que la feuille de plastique qui recouvre le poste. Les disques sont alors prêts pour le doucissage.

## 4 LE DOUCISSAGE

Votre disque miroir est maintenant ébauché, c'est-à-dire qu'une de ses faces a été creusée et approximativement à la concavité voulue. En effet, l'abrasif utilisé (carbo 80 ou corindon 80) a laissé un dépoli assez grossier et les pressions mal réparties qu'on a dû exercer pour creuser le miroir n'ont pas engendré une forme sphérique (figure 4.1).

Le doucissage a deux rôles : parfaire la forme des surfaces et réduire le dépoli des écailles de quelques millièmes de mm qui, seules, peuvent être nivelées par le polissage dont l'action est très lente. On utilise successivement 5 à 6 sortes d'émeris ou de corindons de taille dégressive (0,1 mm à 0,005 mm) : le premier use le dépoli laissé par le carbo et le remplace par un plus fin qui est à son tour usé par le second, et ainsi de suite pendant six étapes. A titre indicatif, un astronome amateur hardi et persévérant qui déciderait de passer directement du carbo 80 au rouge à polir perdrait bien dix ans de sa vie à transpirer sur son polissoir avant d'obtenir une surface acceptable !

Au début du doucissage on accorde le mieux qu'on peut la courbure à la focale voulue. Une fois la bonne valeur atteinte, celle-ci ne doit plus changer. Pour cela on alterne une séchée miroir dessus (qui augmente la concavité du miroir) avec une séchée miroir dessous (qui la diminue).

### 4.1 Matériel et produits pour le doucissage

- 1 cuvette (mais pas la même qu'à l'ébauchage),
- 1 éponge neuve,
- 1 carnet,
- les émeris : cor 120, cor 180, W1, W2, W3, BM 303 1/2, BM 304  
ou : émeri 1 mn, 2 mn, 5 mn, 10 mn, 20 mn, 40 mn, 60 mn,
- 1 nouvelle feuille de plastique pour recouvrir le poste et envelopper les cales.
- 3 cales neuves.

Avant de commencer le travail, vérifiez soigneusement que tout a été nettoyé dans le local, refaites les chanfreins de l'outil et du miroir si nécessaire et rangez les émeris dans des pots bien bouchés : pots de confiture ou petites bouteilles en verre avec un bouchon de liège.

## 4.2 Déburrage d'un émeri

Les grains d'émeri en suspension dans l'eau se précipitent vers le fond d'autant plus rapidement qu'ils sont gros. Par exemple, les grains de l'émeri 10 mn mettent dix minutes pour descendre un mètre d'eau.

Un abrasif qui n'est pas déburré contient les grains qu'il annonce, mélangés à d'autres de taille plus petite. Il s'agit d'une farine d'émeri gênante pour l'efficacité du travail. C'est le cas des W1, W2 et W3 qui correspondent à du 5, 10 et 20 mn.

Pour déburrer, prenez un grand pot de confiture vide (faites-vous des tartines si nécessaire) et propre, mettez une épaisseur d'émeri d'un centimètre, remplissez d'eau et mélangez. Attendez que la plupart des grains soit tombée, ce qui correspond au double du minutage, puis videz l'eau avec ce qui y reste en suspension. Il est nécessaire de réitérer 2 à 3 fois cette opération, jusqu'à ce que l'eau soit à peu près claire au-dessus de l'émeri qui s'y est déposé. Il devrait alors vous rester approximativement la moitié du volume initial d'abrasif.

Pour une hauteur d'un mètre d'eau le temps de décantation devrait être pour le W1 de 15 minutes, pour le W2 : 25 mn et pour le W3 : 40 minutes. Dans un bocal de 20 centimètres de hauteur cela donne W1 : 3 mn, W2 : 5 mn et pour W3 : 8 minutes.

## 4.3 Les étapes du doucissage

Le cor 120 ou l'émeri 1 mn : Remplissez le quart d'un verre de cet émeri et ajoutez de l'eau pour former une boue épaisse. C'est ainsi que devront être préparés tous les émeris avant utilisation. Mais attention, ne les stockez pas dans cet état car les grains s'agglomèrent facilement, ce qui peut provoquer des rayures lors de leur emploi.

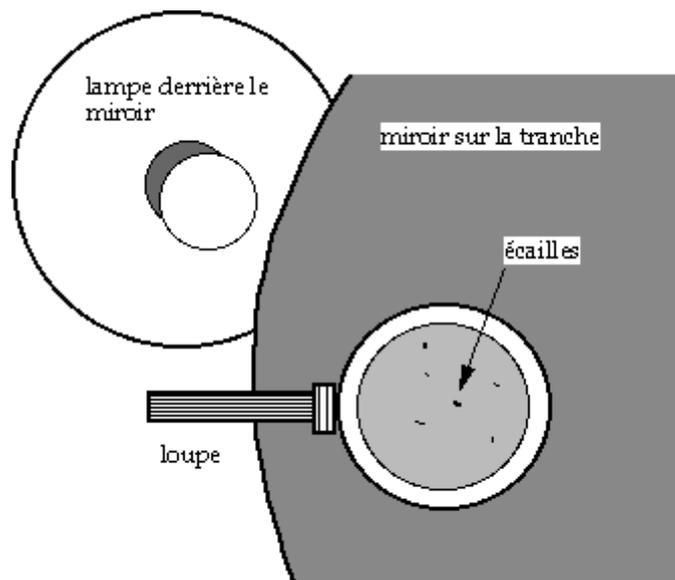
Trempez les disques dans la cuvette, puis essayez-en bien le dos et la tranche : balayez du plat de la main l'excès d'eau sur les surfaces à travailler. Posez un des disques sur le poste. Prélevez une noisette de pâte d'émeri et étalez-la sur le disque avec les doigts. Posez délicatement le second disque dessus et faites quelques courses, en le soulageant de son poids, pour bien répartir l'émeri. Travaillez avec des courses normales. Si le dosage d'émeri et d'eau est correct, on voit le film d'abrasif se répartir uniformément, accompagné éventuellement de petites bulles qui s'allongent dans le sens des courses. Avec l'évolution de la séchée l'eau s'évapore et l'abrasif se charge de poudre de verre. au bout de 5 à 10 mn le bruit d'abrasion s'est affaibli et la résistance à l'avancement augmente rapidement. On doit alors arrêter la séchée. Nettoyez avec l'éponge les disques dans la cuvette. Ils doivent être parfaitement propres pour la séchée suivante. Inverser à ce moment les disques miroir et outil.

Le dosage d'émeri et d'eau n'étant jamais correct du premier coup, voici ce qui peut arriver :

- Il y a trop d'eau par rapport à la quantité d'émeri : l'abrasif est chassé et coule sur les bords, le bruit d'abrasion diminue rapidement, l'efficacité du travail aussi. La séchée s'éternise.
- Il n'y a pas assez d'eau par rapport à la quantité d'émeri : l'abrasif s'embourbe rapidement et se répartit mal, la résistance à l'avancement devient plus forte et irrégulière. La séchée est trop courte.

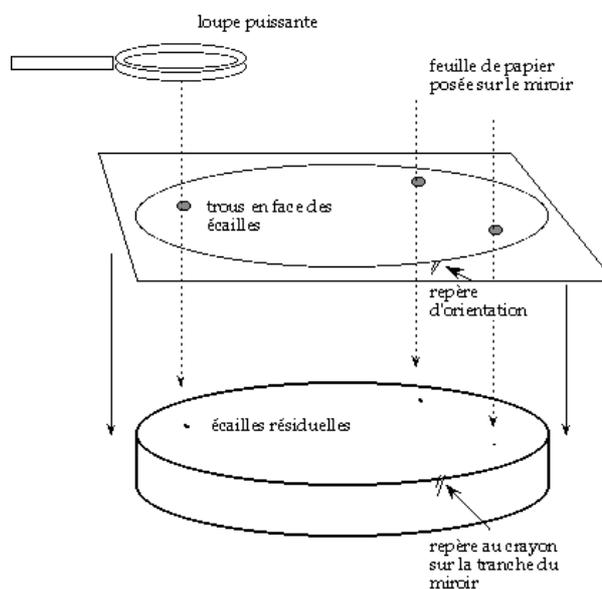
Ceci est valable pour tout le doucissage, mais vous vous apercevrez que la quantité d'abrasif et d'eau nécessaire diminue quand on descend dans la gamme des émeris. Une expérience acquise valant mieux que tous ces renseignements, notez vos remarques sur votre carnet et numérotez-y vos séchées avec la mention « pour le miroir dessus ou » pour le miroir dessous.

Il est nécessaire pour un débutant d'effectuer 20 ou 30 séchées de cor 120 pour éliminer les écailles du carbo 80. On a l'impression qu'elles ont disparu au bout de 3 ou 4 séchées, mais en observant le miroir sec par transparence devant une lampe, on voit des points brillants à la surface qui sont de profondes piqûres.



Pour les reconnaître d'une séchée à l'autre et voir si elles ont disparu, faites des trous dans une feuille de papier et ce, en face de ces écailles quand on la pose sur le miroir. Marquez par des flèches l'orientation de la feuille par rapport au miroir.

#### Contrôle des écailles résiduelles



Faites des séchées plus courtes et plus mordantes au début d'un émeri : l'usure sera plus rapide. Aux dernières séchées, adoucissez au contraire les courses pour réduire les piqûres. Quand les plus grosses écailles ont disparu, nettoyez tout et passez à la phase suivante.

- Le cor 180 ou l'émeri 2 mn : Même travail que précédemment, 15 à 20 séchées sont nécessaires pour éliminer les piqûres du cor 120. Vers la fin, le travail doit être très doux. Faites durer un peu plus les 5 dernières séchées et, en plus du nettoyage, changez d'éponge pour passer au W1.
- L'émeri W1 ou le 5 mn : La taille des grains du W1 étant nettement inférieure à celle du 5 mn, 20 séchées seront nécessaires. Cet émeri doit être débourbé (voir chapitre 4.2), ainsi que les W2 et 3. Le bruit d'abrasion est largement plus doux.
- Le W2 ou émeri 10 mn : Faire 10 séchées au minimum.
- W3 ou le 20 mn : 8 séchées minimum sont nécessaires avec cet émeri : Changer l'éponge avant de passer au BM 303.
- Le BM 303 1/2 ou le 40 mn : Cette taille de grain demande 6 séchées au minimum.
- Le BM 304 ou 60 mn : 6 séchées, faites les 2 dernières le miroir dessous et mettez un peu plus d'eau pour bien les faire durer.

Le doucissage est terminé. Votre miroir a maintenant un aspect satiné et il réfléchit déjà la lumière pour les incidences rasantes et obliques. Au-delà d'un certain angle, l'image réfléchie devient rougeâtre et s'éteint. Cet angle croît avec la finesse du douci et atteint 30 à 40° au stade actuel.

#### **4.4 Défaut possibles au doucissage**

Si vous n'avez pas été suffisamment soigneux dans votre travail, il a pu vous arriver quelques mésaventures :

- des éclats, si le chanfrein a été mal refait ou si vous avez cogné le bord d'un disque en le manipulant trop brutalement. Il n'y a pas de remède mais cela ne nuit pas à la qualité du miroir ;
- des rayures dues à un grain d'émeri grossier si vous avez mal nettoyé. Reprenez le doucissage à un stade antérieur (le W1 suffit généralement). Les rayures qui subsistent en fin de doucissage ne partiront pas au polissage ;
- des piqûres qui sont restées après le passage trop rapide d'un émeri au suivant. Si vous êtes exigeant reprenez le doucissage au W2 ou 3, mais ce ne sont pas des défauts trop nuisibles ;
- une mauvaise forme des surfaces. Vous vous en apercevrez au polissage. C'est le défaut le plus grave, mais il arrive très rarement si les courses ont été correctement effectuées et le miroir correctement supporté pendant le travail.

## 5 LE POLISSAGE

Avant d'entamer la phase finale de la taille de votre miroir, il faut faire disparaître toutes traces d'abrasif dans le local. Le mieux serait d'ailleurs de changer de local. De toute façon rangez le poste ou au moins les cales, vis, feutrine et plastiques.

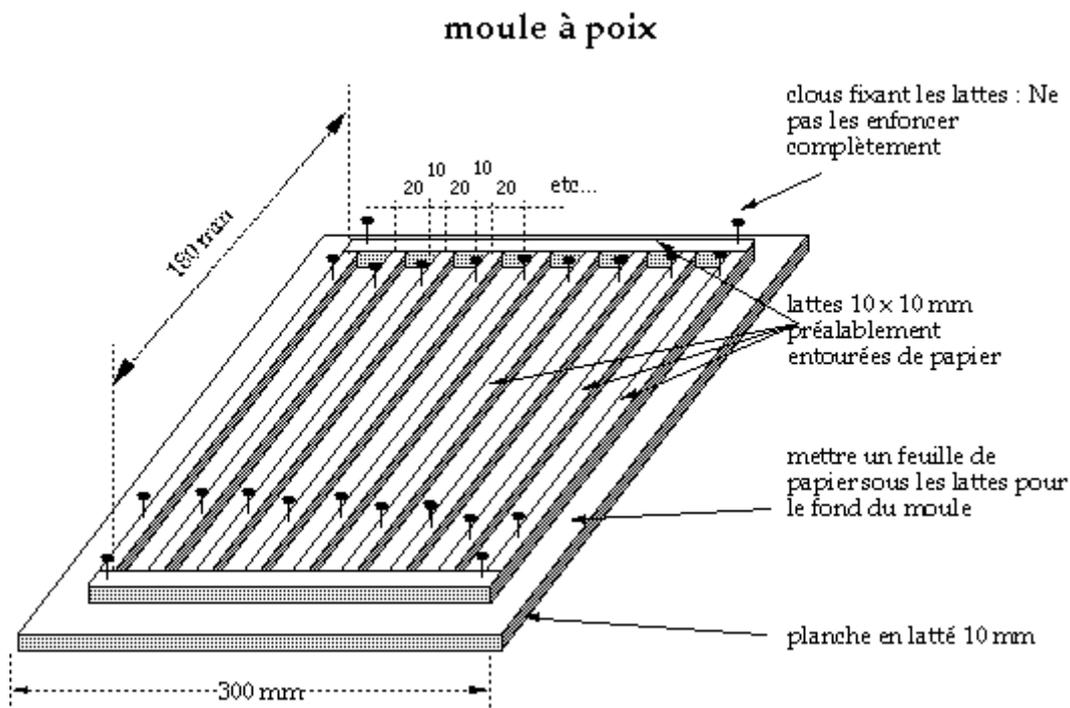
Fabriquez ensuite un polissoir en collant des carrés de poix sur l'outil : c'est eux qui serviront de support au travail du produit à polir (soit rouge pour l'optique astronomique, soit oxyde de zirconium ; les autres produits étant trop violents).

### 5.1 Le polissoir

Prévoyez le matériel suivant pour le polissoir :

- une vieille casserole,
- 500 grammes de poix,
- de l'huile de lin,
- 2 mètres de baguette carrée 1 x 1 cm,
- une planche d'au moins 20 x 30 cm,
- du papier en grandes feuilles (minimum 20 x 30 cm),
- des petits clous, 1 marteau, 1 paire de tenailles,
- un entonnoir métallique ou un cornet en papier dur,
- une fine passoire.

Faites un moule pour couler 8 bandes de poix de 2 x 16 cm et 1 cm d'épaisseur en clouant les baguettes sur la planche recouverte d'un papier. N'enfoncez pas complètement les clous pour pouvoir les retirer facilement et entourez préalablement les baguettes avec du papier, car la poix colle au bois et se casserait au démoulage.



## 5.2 La poix

La poix du commerce est parfois trop dure ou trop molle. Idéalement, elle doit être dure au toucher et ne pas s'écraser sous une pression des doigts, mais l'ongle doit la marquer très profondément en 1 ou 2 secondes de pression

Si elle est trop dure : Faites des essais avec en fondant dans une casserole à feu très doux 100 g de poix en prélevant Tester des échantillons après avoir ajouté 1, 2, 3 et 4 cuillères à café d'huile de ricin ou (enlever) de lin. Quand vous aurez trouvé le bon dosage, chauffez Toute la poix avec la quantité nécessaire d'huile et mélangez bien. Versez dans le moule en vous servant de la passoire et de l'entonnoir tenus avec une pince. (à la ligne)

Si la poix est trop molle, faites la chauffer 1/4 d'heure à feu très doux et testez... Continuez à chauffer en testant tous les 1/4 h.jusqu'à ce que la poix soit de la bonne dureté.

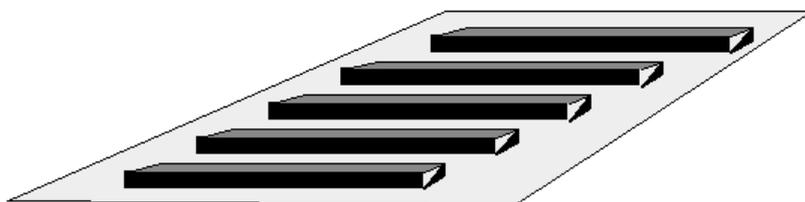
Laisser refroidir 10 mn les échantillons (du volume d'une noix). avant d'en tester la dureté. La dureté de la poix est très sensible à la température : Il est impossible de polir en dehors de la fourchette 19 - 25 °C.

Si vous avez le courage de prendre entre vos dents un échantillon de poix (refroidi) et de le mastiquer,et si vous avez réussi à ce qu'il ne se casse pas, sachez que de la poix de la bonne dureté pour polir à 20 °C deviendra de la consistance du chewing gum a 37 °C. Mais attention, à la différence du chewing-gum, ça colle aux dents ! Et ça tient ! Vous pouvez faire le coup à vos amis en leur faisant croire que les carrés de poix sont des caramels, c'est très efficace pour leur clouer le bec.

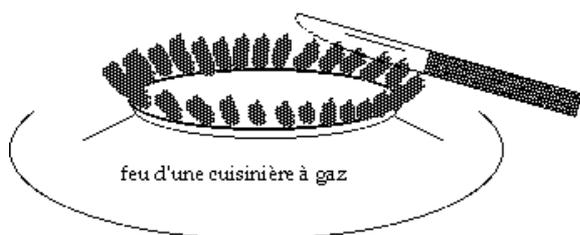
Si vous n'avez pas d'entonnoir métallique, faites-en un en papier mais surtout n'en prenez pas en plastique : c'est une matière capricieuse qui fond quand il ne faut pas, et qui peut vous réserver des surprises désagréables du genre de l'entonnoir déliquescant ou du plastique sur le moule qui reste obstinément rigide.

Démoulez les bandes après quelques heures de refroidissement et coupez-les en carrés de 2 x 2 cm avec un couteau chaud dont vous essuiez la lame de temps en temps.

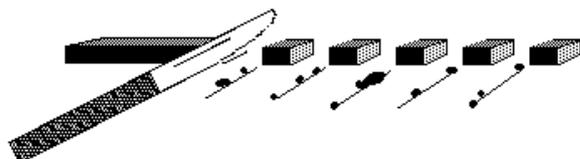
**Bandes de poix**



### Découpe des carrés de poix



1) chauffer le couteau



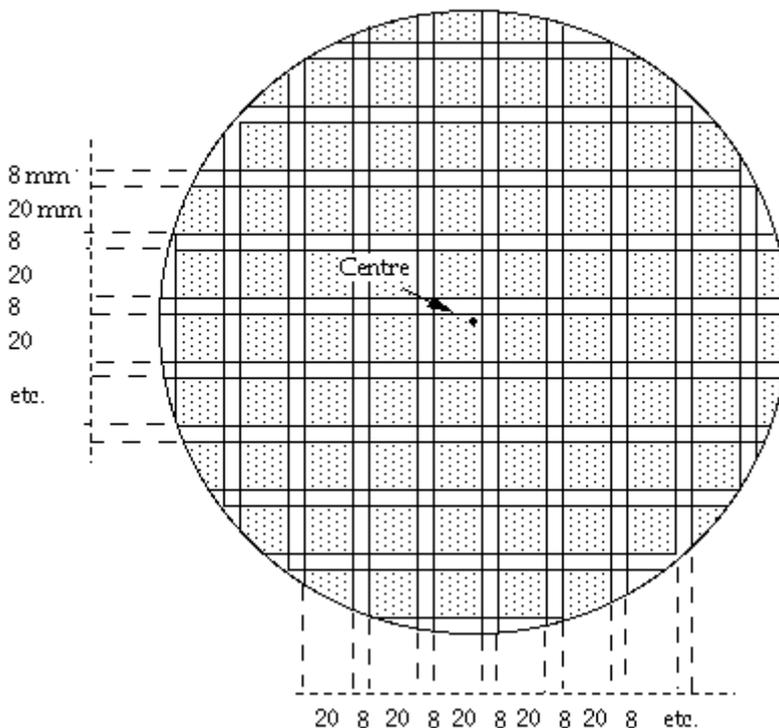
2) découper quelques carrés de poix



3) essuyer le couteau sur un chiffon ...

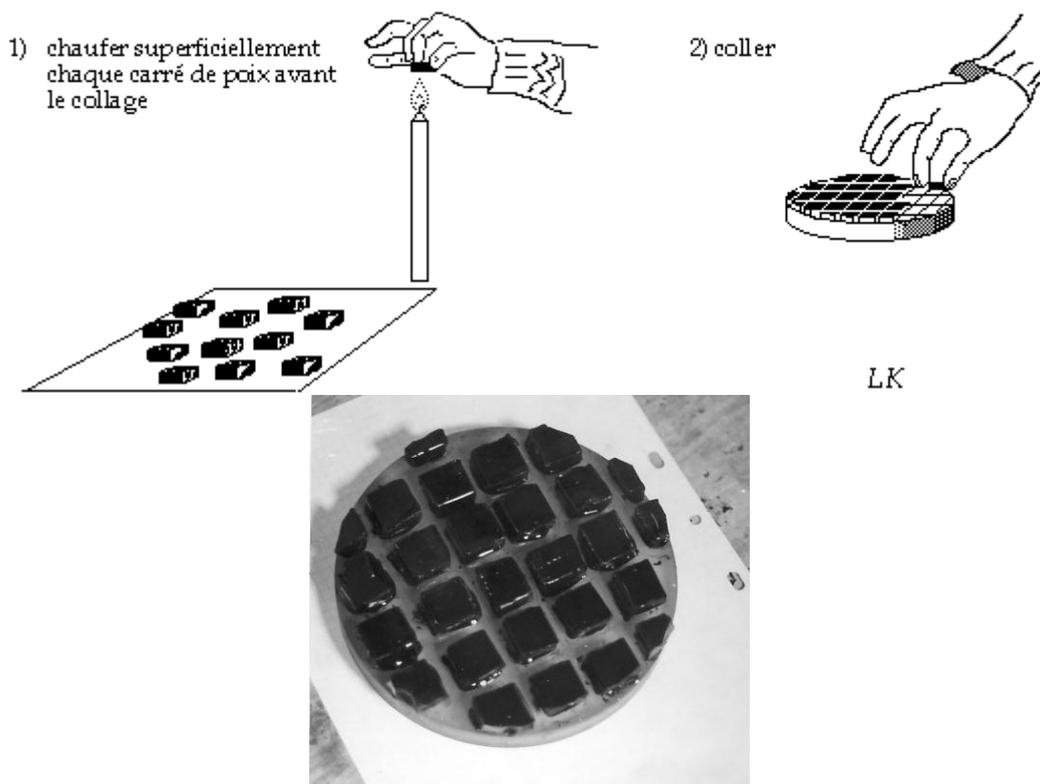
Repérez les endroits à couper par des marques à l'ongle tous les 2 centimètres sur les bandes. Indiquez l'emplacement où coller les carrés par un quadrillage au crayon sur la face doucie de l'outil.

### Quadrillage à tracer sur le disque outil

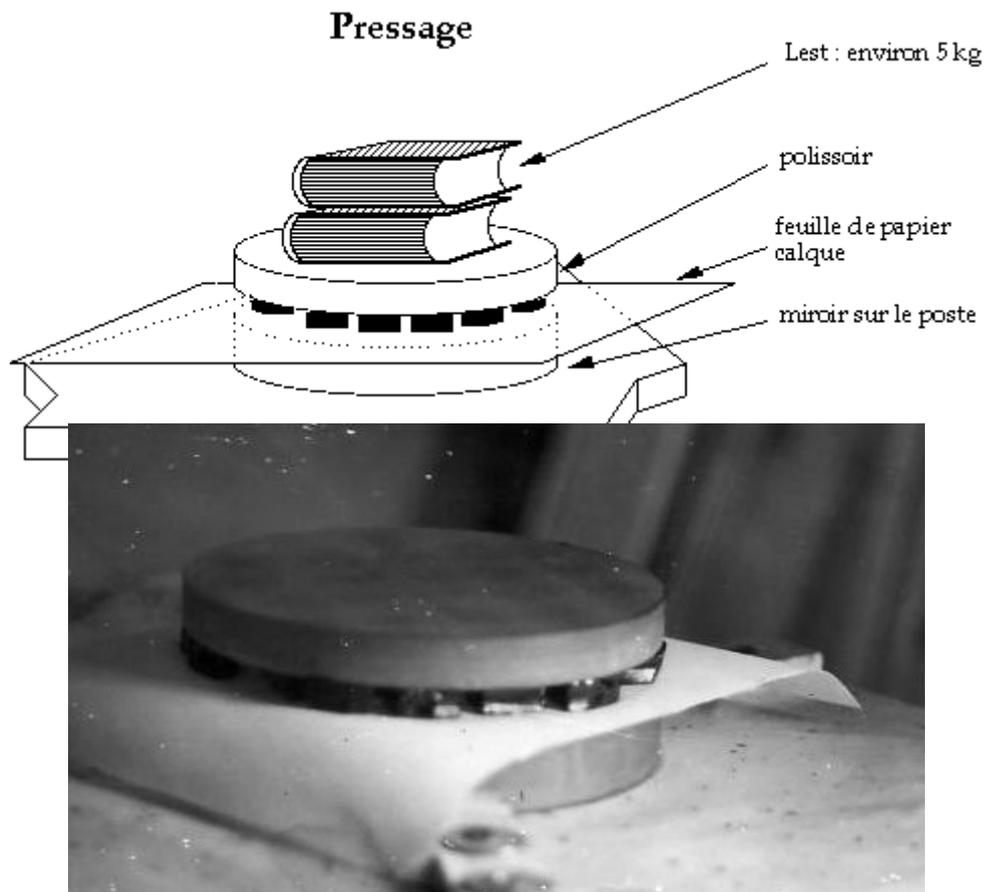


Tiédire l'outil dans de l'eau à 30 °C durant dix minutes, car la poix adhère mal au verre puis collez les carrés en faisant fondre une de leurs faces à la flamme d'une bougie.

### Collage des carrés de poix



Les carrés possèdent à présent des hauteurs diverses et doivent être nivelés à la courbure du miroir par des pressages. Mettez le miroir sur le poste, recouvrez-le d'une feuille de papier calque et posez le polissoir dessus. Ajoutez sur l'outil 10 à 15 kg de lest. 1/4 heure après en moyenne, les carrés se sont un peu affaissés et font tous une marque bien nette sur le calque. Contrôler toutes les 2 mn qu'ils ne se touchent pas entre eux, laissez au minimum 2 mm de séparation. Dès qu'il y a moins arrêtez le pressage et rectifiez.



Polissoir après pressage :



S'ils ne sont pas nivelés après deux heures de pressage, c'est que la poix est trop dure et il faut refaire le polissoir. Quand vous êtes satisfait du pressage, enlevez le calque et tenez-vous prêt pour le polissage.

### 5.3 Séances de polissage

Matériel nécessaire pour le polissage :

- une cuvette neuve,
- une éponge neuve,
- des chiffons propres et non pelucheux (vieux drap),
- du "rouge" pour l'optique astronomique (oxyde de fer obtenu en calcinant de l'oxalate ferreux), ou du blanc (oxyde de Zirconium). N'utilisez pas d'autres produits à polir : ils sont tous trop violents ou pas assez purs,
- un pinceau.

Le "blanc" et le "rouge" s'utilisent à peu près de la même façon. Je vais décrire la conduite générale du polissage au "blanc" et j'indiquerai les particularités des deux produits aux quelques étapes où les méthodes divergent.

Si vous avez commencé le polissage avec l'un des deux produits, n'en changez pas en cours de route. Le polissage n'est pas qu'une simple action mécanique ; des réactions chimiques complexes entre le verre et le produit de polissage jouent un rôle important. Il se forme un effet de "peau" où le verre est plus résistant à l'usure en surface. Si l'on change de produit à polir, l'usure de cette "peau" se fait de manière très irrégulière avec pour conséquence des heures de travail supplémentaires pour ré-égaliser la surface.

Le polissage est de loin la phase la plus délicate et la plus intéressante de la taille d'un miroir, c'est là qu'on voit apparaître les résultats du travail quelque peu ingrat qui a précédé. Il est assez exaltant de penser que le mouvement de vos mains façonne une surface de verre déjà précise à quelques dix-millièmes de millimètres près et qui le sera bientôt cent fois plus : supérieure à 1/10 000 000 du diamètre du miroir.

Évidemment la moindre flexion du disque pendant le polissage se répercute sur la surface par une déformation qui n'est plus négligeable et provoque un défaut inverse à la fin du travail. Il faut donc mettre deux épaisseurs de feutrine bien tendue sous le plastique du poste, là où reposera le miroir.

On dit aussi que la chaleur venant du disque par le frottement du polissoir ou par le contact des mains dilate dans des proportions très faibles certaines zones qui se trouveront plus usées que les autres. C'est parfaitement vrai : le meilleur moyen de se protéger contre ces défauts, c'est de les rendre aléatoires (ce qui se fait automatiquement à condition de ne pas y penser) et en même temps faibles, en polissant trois ou quatre heures d'affilées, ce qui laisse le temps à la chaleur de se répartir. La température du local, pendant toute la phase de polissage, ne doit jamais descendre en-dessous des 18°C.

Pour ceux qui ont les moyens de payer 500 à 1000 F de plus leur disque miroir, je conseille d'utiliser du Zerodur : un verre à coefficient de dilatation nul. Il est un peu plus long à travailler mais donne plus de facilité pour obtenir une bonne surface au polissage car il n'y a pas de dilatations parasites.

On n'a pas de déformations pendant le travail de polissage et on peut tester sa surface presque immédiatement après les retouches au lieu d'avoir à attendre 24 h entre chaque retouche ! De plus, quand le miroir sera en service dans le télescope, il gardera une forme

constante (et parfaite si vous l'avez réussi...) quelles que soient les variations de température, alors que les miroirs classiques se déforment par dilatation et donnent parfois de mauvaises images.

Vérifiez que le poste est bien lesté (50 kg au minimum) car vous allez exercer des forces importantes en fin de séchée. Pour mieux éviter la poussière et les abrasifs, retrousser vos manches, enfiler une blouse, changez d'habits, ou mieux mettez-vous torse nu, pendant le polissage.

Quand tout est prêt, versez deux cuillères à café de blanc (ou de rouge) dans un quart de verre d'eau et mélangez. Placez le miroir sur le poste, badigeonnez la surface d'une bonne couche de ce mélange et posez délicatement le polissoir dessus. Ne touchez plus à rien une fois le contact établi... Non, ce n'est pas encore le début du polissage, mais la dernière opération préliminaire : le pressage au blanc (ou rouge). Laissez presser 5 mn avec un poids de 2 à 5 kg sur le polissoir.

Ne séparez pas les disques après le pressage : décalez-les de quelques centimètres, rajoutez un mélange de blanc et d'eau par deux ou trois traits de pinceau sur le miroir et commencez la première séchée du polissage par des courses normales assez lentes. Pendant tout le polissage vous utiliserez ces courses "normales".

Au début, l'adhérence est mauvaise, c'est-à-dire que la résistance est irrégulière et le polissoir avance par à-coups. Après 2 à 5 mn, la résistance, guère plus régulière est devenue assez forte. Il faut passer à la séchée suivante. Sans séparer les disques, donnez deux ou trois traits de pinceau du mélange blanc et eau, répartissez le produit à polir par quelques courses lentes et les disques glisseront de nouveau facilement l'un sur l'autre. Une séchée dure quatre minutes en moyenne.

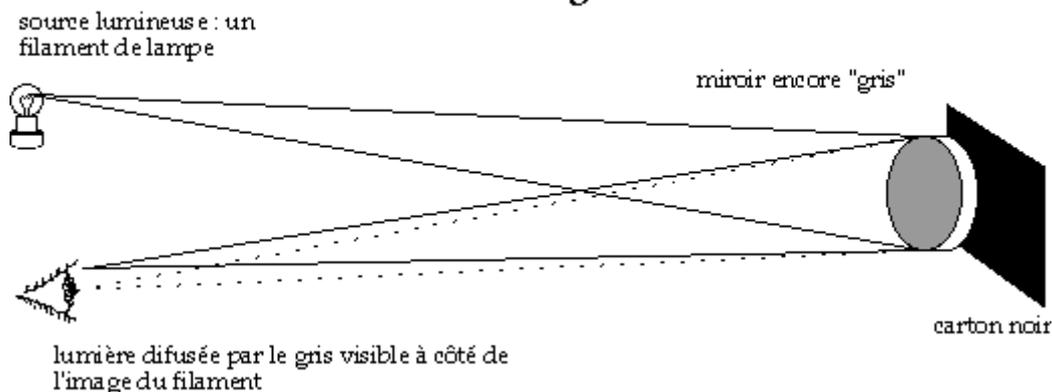
Après une heure de travail SANS INTERRUPTION, l'adhérence devient bonne : la résistance est régulière et proportionnelle à la vitesse des courses. Vous pouvez alors :

- diminuer la quantité de mélange eau et blanc pour une séchée,
- diminuer la proportion de blanc par rapport à la quantité d'eau,
- pousser les séchées un peu plus longtemps,
- augmenter progressivement la vitesse des courses à 1 ou 1,5 aller et retour par seconde.

Vous avez atteint "le régime de croisière du polissage". Si l'on pousse les séchées trop loin, on entend des sifflements aigus qui sont le signe d'un polissage efficace et la résistance devient forte. Attention avec le blanc, il vaut mieux ne pas trop faire durer les séchées car son action augmente tellement qu'elle devient ravageuse et irrégulière.

Les résultats de la première heure de travail sont surprenants : le miroir semble déjà presque poli, mais quand on examine le reflet d'une fenêtre, les contrastes sont noyés dans le "gris". Cela est dû aux piqûres d'émeri encore très nombreuses (plus de 10 000 par millimètre carré). Ce gris est plus important vers le centre qu'aux bords car vous avez travaillé miroir dessous et ce sont les bords qui ont été les plus polis.

## Contrôle du gris



Pour établir une avance uniforme du polissage, inversez les positions du miroir et du polissoir toutes les heures, tournez-le tous les quarts d'heure en position miroir dessus d'un peu plus de 90 degrés pour éliminer les défauts dus aux flexions résiduelles. Voici approximativement le temps nécessaire à un débutant pour polir un miroir correctement doux :

Diamètre du miroir avec du blanc avec du rouge

- 160 mm 7 à 10 heures
- 210 mm 10 à 15 heures

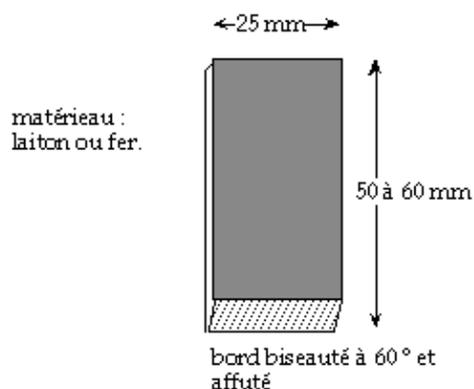
Travaillez de préférence par séances de 2 à 3 heures, mais, jamais moins d'une heure : plus vous polirez longtemps sans interruption, plus le polissage sera efficace et meilleure sera la forme du miroir. Je vous conseille de vous mettre à deux ou trois pour ce travail : ce sera d'une part moins fatigant et d'autre part, la répartition des courses sera bien meilleure.

## 5.4 Retailage des carrés de poix

Outils nécessaires :

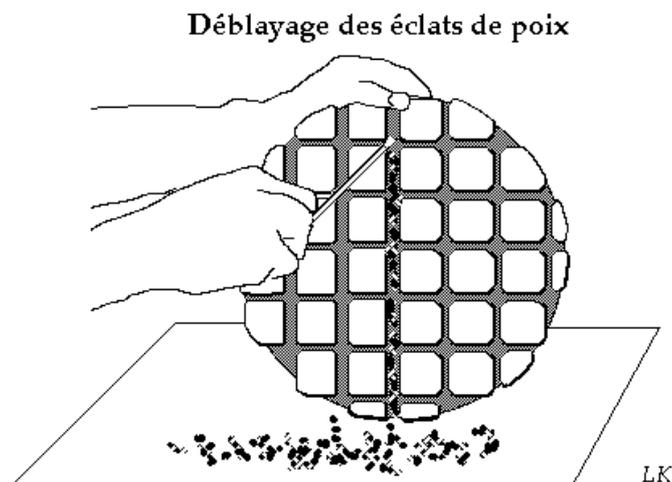
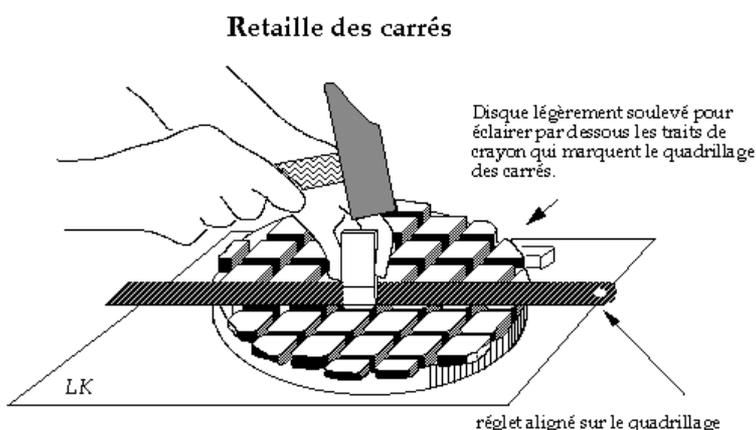
- un marteau,
- un réglet de 25 cm au moins,
- une pièce de métal limée en biseau (fig. 2) ou un ciseau à bois de plus de 2 cm de large.

### ciseau à découper les carrés de poix.



Au cours du polissage les carrés de poix s'affaissent et s'étalent. S'ils venaient à se toucher le blanc ne se répartirait plus et l'adhérence serait très difficile à obtenir. On doit donc les retailler toutes les deux ou trois heures selon la dureté de la poix (celle-ci est trop molle s'ils s'affaissent en une heure ou moins ; trop dure s'il ne faut pas les retailler après 3 heures).

Pour tailler les carrés, posez le réglet sur une rangée de carrés, à l'aplomb de la marque de quadrillage sur l'outil qui a servi à placer ceux-ci (au bout de quelques heures de travail, le blanc masque ce quadrillage). Coupez ce qui dépasse en frappant un ou deux petits coups secs sur le ciseau. Prenez garde à ce que des éclats de poix ne viennent se coller sur vos habits et vos mains. Pour les enlever, utilisez du white spirit. Pour dégager les éclats de poix, incliner le miroir et passez délicatement la lame d'un tournevis dans la rainure. N'attendez pas car la poix se recolle.



Quand le polissoir vient d'être fait, les carrés sont épais et s'étalent rapidement : il faut retailler souvent. Après quelques heures de polissage et quelques retailles, les carrés se sont amincis à 2 ou 3 mm et s'étalent moins vite : on peut travailler plus longtemps d'affilée. Quand les carrés atteignent 1,5 mm d'épaisseur ou moins, il faut refaire le polissoir.

## 5.5 Quelques règles à respecter

a) L'efficacité du polissage augmente si :

- les courses sont plus rapides,
- les séchées sont poussées plus longtemps,
- l'on réduit la proportion de blanc par rapport à l'eau.

Pour obtenir ce résultat, plongez d'abord votre pinceau dans le mélange normal, puis trempez-le plus ou moins dans un verre d'eau pure. Mais ne dépassez pas la limite où le travail deviendrait irrégulier.

b) Indiquez toutes vos remarques sur votre carnet, cela vous servira pour les séances suivantes.

c) Méfiez-vous : le mélange d'eau et de rouge à polir colore tout et résiste remarquablement au lavage (c'est de l'oxyde de fer). Le blanc (oxyde de zirconium) est beaucoup moins salissant. N'utilisez surtout pas le rose à polir (oxyde de cérium) pour le polissage des miroirs de qualité : c'est un produit efficace pour le polissage rapide des pièces dont l'état de surface n'a pas besoin d'être très bon. De plus le rose à polir contient des traces de thorium et j'ai effectivement constaté qu'il était radio-actif.

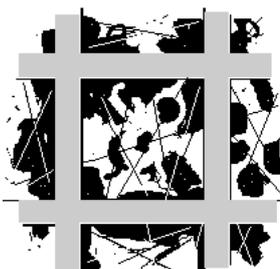
d) A la fin d'une séance de polissage, rincez le miroir et enveloppez-le dans un torchon. Passez un coup d'éponge sur le polissoir et rangez-le sur le dos dans un sac en plastique fermé. Ne posez rien dessus car la poix en garderait la trace.

Quand vous reprenez le travail après une interruption de plusieurs heures ou plusieurs jours, faites un pressage au blanc ou au rouge de 5 mn pour remettre l'outil en forme. Un polissoir non utilisé depuis plus de 3 ou 4 semaines est en général à refaire. Si vous avez la place, et la certitude que personne ne posera jamais rien dessus, vous pouvez essayer de conserver un polissoir plusieurs semaines au réfrigérateur, pour ralentir l'affaissement naturel de la poix... Technique à n'utiliser, bien sur, qu'en cas de stockage de longue durée car il faut attendre un douzaine d'heures que le polissoir se remette à la température ambiante avant de travailler.

## 5.6 Difficultés au polissage

a) l'adhérence est mauvaise : augmentez la concentration de blanc. Si les difficultés persistent et que les carrés ne sont pas couverts uniformément de blanc mais rayés ou marbrés, c'est que la poix est trop dure. Avant de vous résigner à refaire le polissoir, essayez d'augmenter la température de la pièce où vous travaillez, ce qui ramollira la poix.

Carré de poix mal garni



LK

b) séchées trop courtes : mettez plus de blanc et d'eau. S'ils coulent sur les bords dès le début de la séchée et que les difficultés persistent, abaissez la température ou augmentez l'humidité ambiante.

c) séchées trop longues : laissez durer, c'est tout bon.

d) la poix s'affaisse trop vite : refaites le polissoir avec de la poix plus dure.

e) le gris est très inégal entre différentes zones du miroir et cela persiste après 10 h de polissage : la forme est mauvaise et il faut reprendre le doucissage au 20 mn ou W3.

Au cours des heures de polissage, le gris s'en va petit à petit. Pour mieux contrôler son évolution, observez-le au voisinage de l'image d'un filament de lampe (fig. 6). A partir de 8 heures de polissage avec du blanc ou de 12 heures avec du rouge, ralentissez la cadence des courses à moins de un aller et retour par seconde et arrêtez les séchées avant que la résistance ne devienne forte. Continuez ainsi jusqu'à la disparition du gris.

Votre miroir tel qu'il est là peut, à la rigueur, se passer de contrôle et de parabolisation mais vous n'avez guère de chances qu'il donne de meilleurs résultats qu'une petite lunette du commerce. Il faut donc un moyen de déceler ses défauts, de les corriger et enfin de paraboliser.

A la fin du polissage, votre miroir a l'air parfait mais que savez-vous de la qualité de sa surface ? Rien. Or, c'est d'elle que vont dépendre les performances de votre télescope. Un polissage bien conduit par un débutant engendre normalement une surface sphérique avec une précision de l'ordre du micron (1 millième de millimètre), mais c'est insuffisant. Il va vous falloir corriger les défauts, modifier légèrement la forme ("paraboliser") et enfin réduire les écarts résiduels à moins d'un vingtième de micron. A ce stade, une augmentation supplémentaire de la précision n'a plus d'influence sur la qualité de l'image observée (diffraction).



## 6 LE FOUCAULTAGE

Pour pouvoir les corriger, il faut déceler et mesurer les défauts de la surface du miroir. La plus simple et pratiquement la plus sensible des méthodes de contrôle : la méthode de Foucault, fait apparaître en relief et amplifie un million de fois les écarts qu'il y a entre une sphère et la surface à tester.

### 6.1 Principe de la mesure avec l'appareil de Foucault

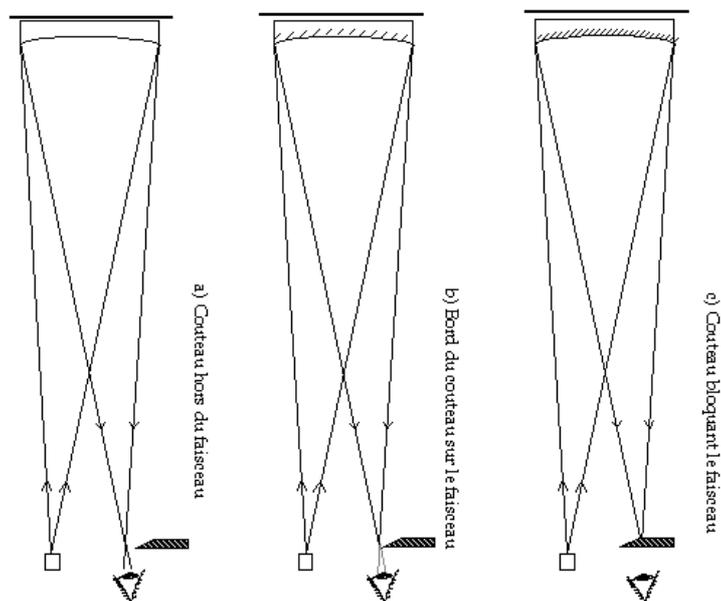
On place une source lumineuse ponctuelle à une distance suffisante du miroir pour que la lumière réfléchiée revienne converger presque à son point de départ.

On met l'oeil dans le prolongement du faisceau, tout près du foyer (zone de convergence). Imaginez maintenant deux cas :

#### Premier cas : la surface est parfaitement sphérique

Elle renvoie toute la lumière dans une tache minuscule : le foyer, qui serait infiniment fine s'il n'y avait pas la diffraction. Chaque point de cette tache reçoit de la lumière de toutes les parties du miroir. On coupe le faisceau au niveau du foyer avec le bord d'un écran appelé "couteau".

Foucaultage d'un miroir sphérique



Ce que l'on voit :



a) miroir uniformément éclairé



b) miroir uniformément gris : "en teinte plate"



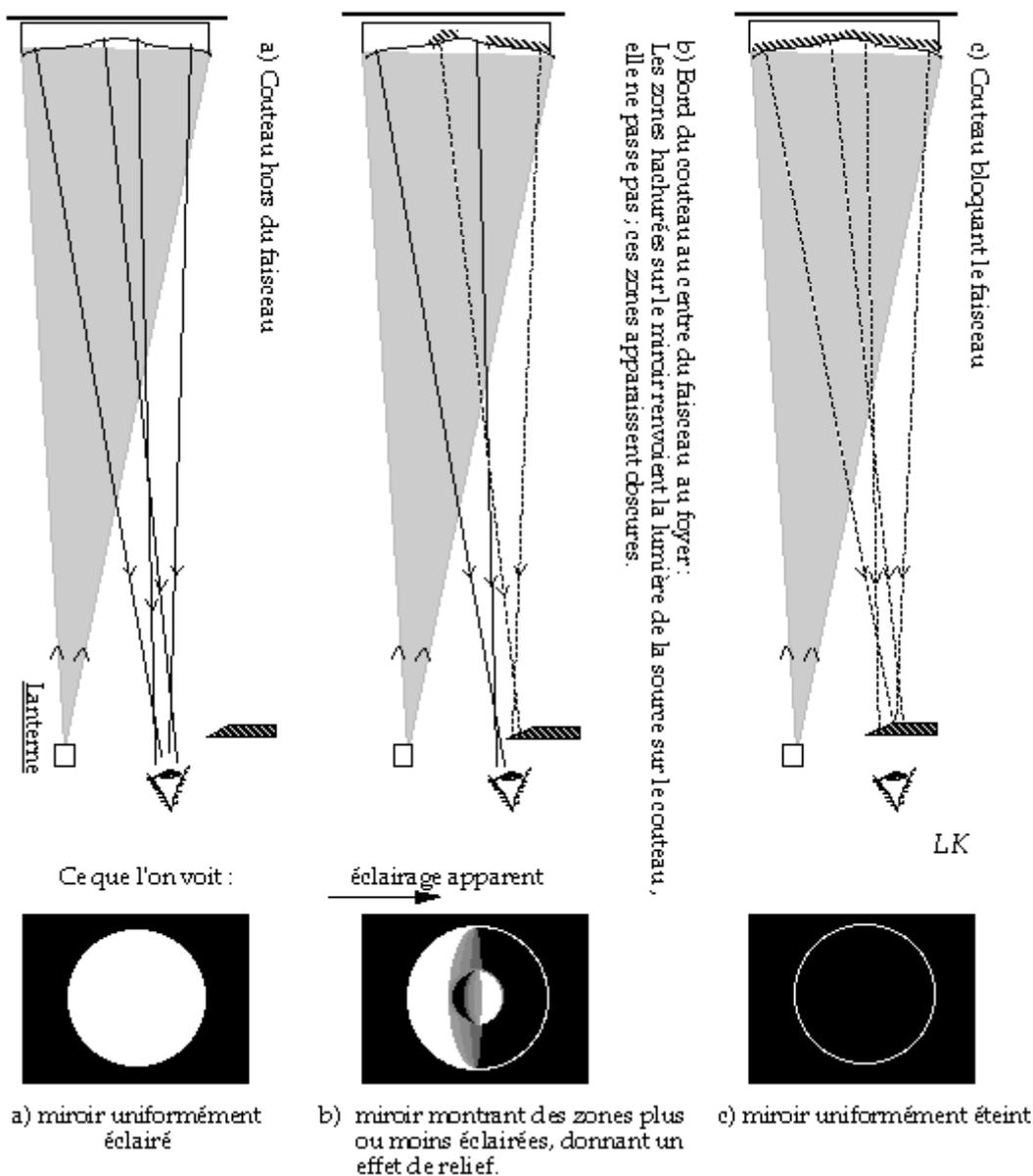
c) miroir uniformément éteint

En a) : le couteau n'a pas entamé le faisceau, le miroir paraît entièrement brillant.  
 En b) : le couteau est arrivé au milieu de la tache de diffraction, la moitié de la lumière passe, le miroir est uniformément gris.  
 En c) : toute la lumière est arrêtée, le miroir est obscur.

### Deuxième cas : la surface a des défauts

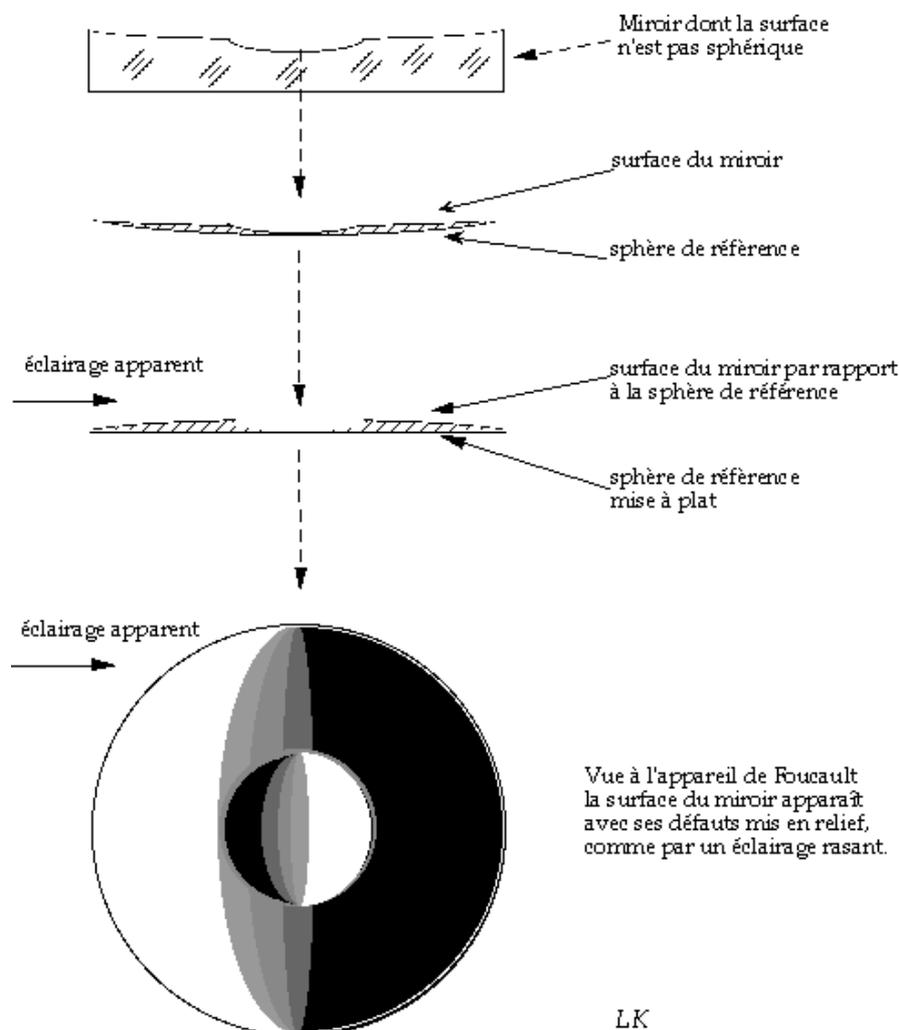
Toute la lumière ne converge plus au même point. Sans changer aucune distance, faisons repasser le couteau par les positions précédentes.

### Foucaultage d'un miroir avec un trou central



En a) : toute la lumière passe.  
 En b) : le couteau est au point où convergeaient les rayons de la sphère : il arrête les rayons passant trop à droite, envoyés par des zones du miroir inclinées dans le sens A par rapport aux régions correspondantes de la sphère (hachurées sur la figure). Celles-ci

paraîtront obscures. Une zone correctement orientée sera grise et une zone inclinée dans le sens inverse sera plus brillante, d'où l'impression de relief : un éclairage rasant donnerait la même impression.

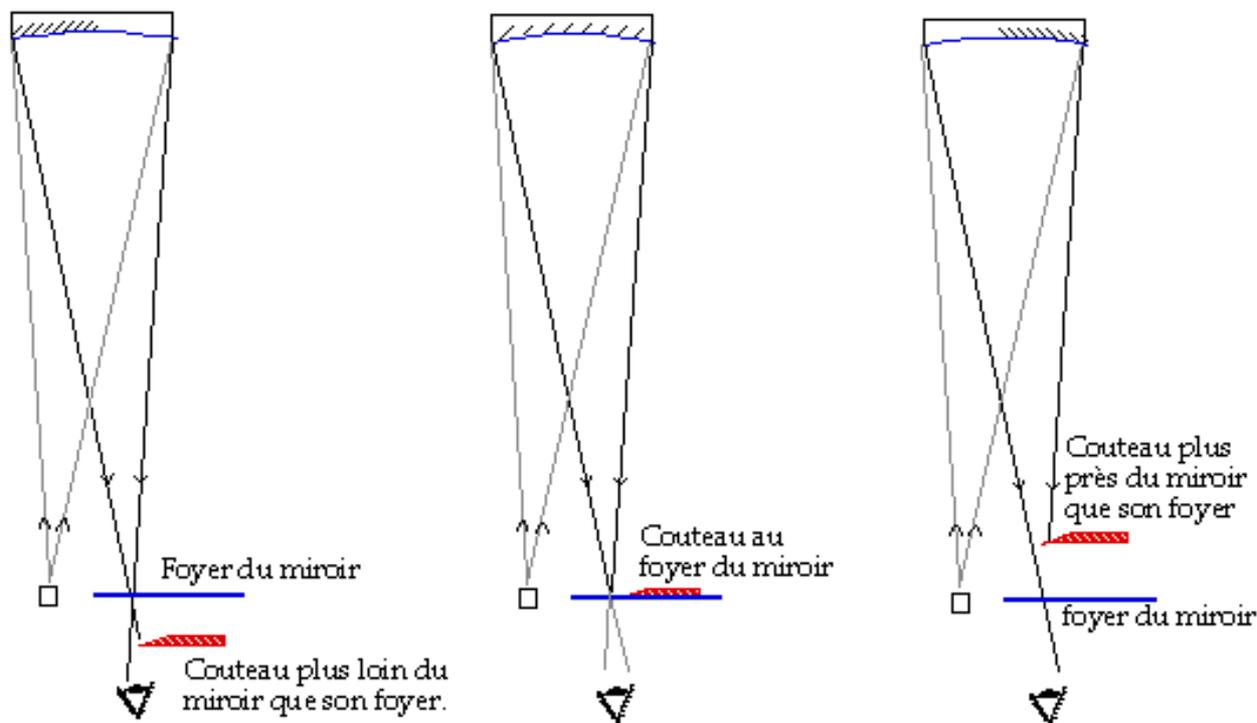


## 6.2 Quels sont les plus petit défauts décelables ?

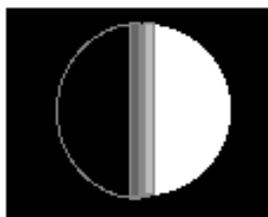
Un appareil de Foucault, bricolé par un amateur, permet de distinguer des écarts angulaires de  $1/600\ 000$  sur le miroir, soit une différence d'épaisseur de  $30/600\ 000$  de mm dans une zone de 30 mm de large  $30/600\ 000$  mm cela fait  $1/200$  de micron ou encore  $1/100$ . Peut-être que ces chiffres ne vous disent pas (encore) grand chose. Ils correspondent à une couche d'une épaisseur de 10 molécules de verre seulement.

Dans la légende, sous la figure ci-dessus, vous avez lu "sphère de référence". En effet, imaginez que l'on rapproche ou éloigne le couteau le long du faisceau, sa position correspondra au foyer d'une sphère plus ou moins concave que précédemment, et les écarts d'orientation du miroir seront rapportés à celle-ci. Ainsi, une sphère apparaîtra en bosse ou en creux, selon que l'on coupe le faisceau, avant ou après le foyer.

## Vue d'un miroir sphérique à différents tirages



la sphère de référence a un rayon plus long, elle est donc moins creuse que la surface du miroir.



surface apparente



surface du miroir

sphère de référence

La sph. de référence a le même rayon que la surface du miroir, donc la même courbure.



surface apparente



Surface du miroir

Sphère de référence

La sphère de référence a ici un rayon plus court que celui du miroir, elle est donc plus creuse.



surface apparente

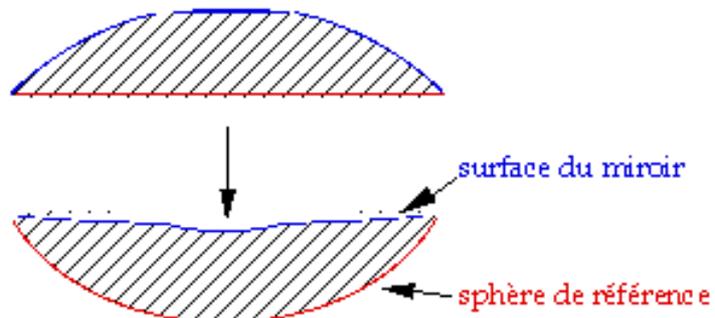
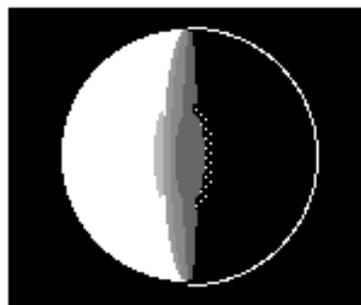
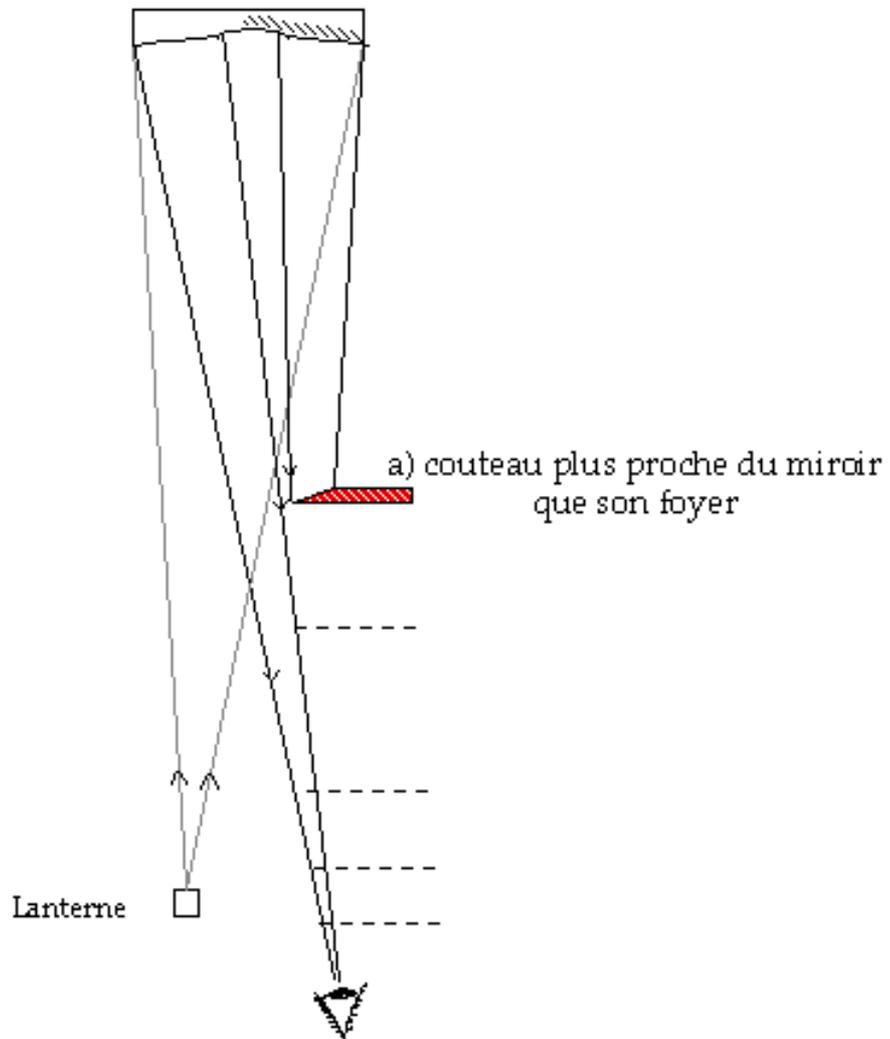


surface du miroir

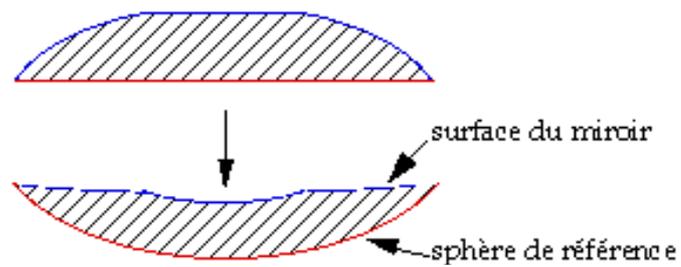
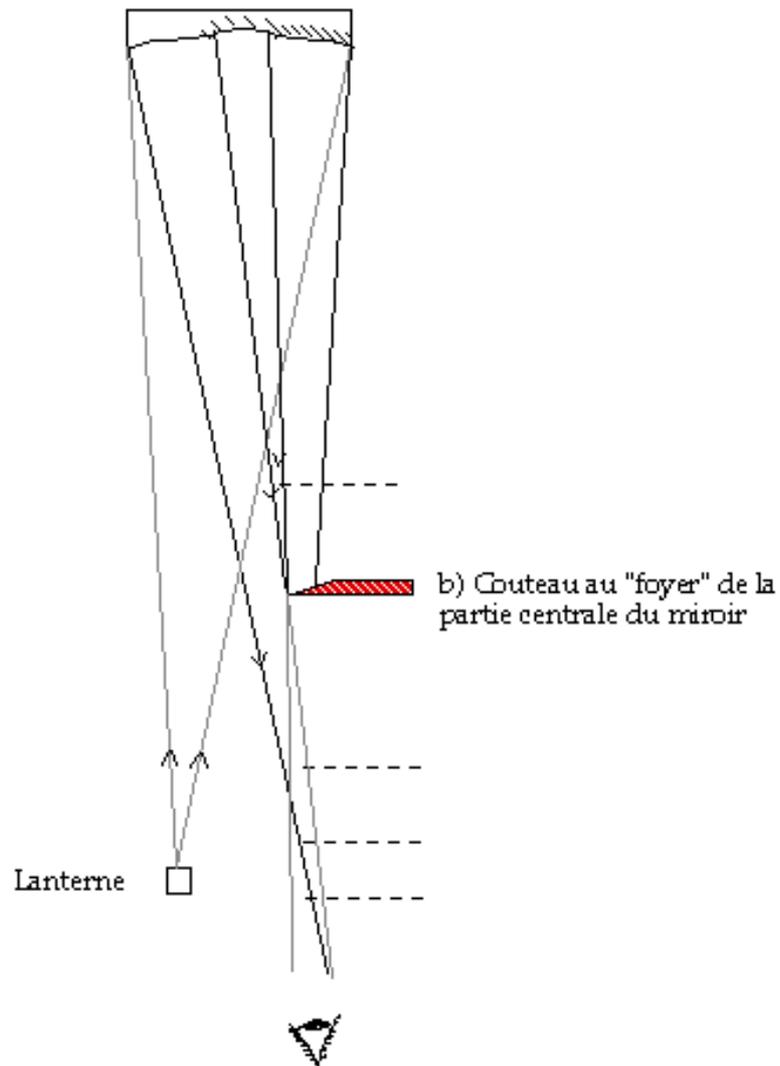
sphère de référence

La "sphère de référence" correspond à la surface d'un miroir imaginaire dont le foyer serait juste à l'endroit du couteau à chaque instant.

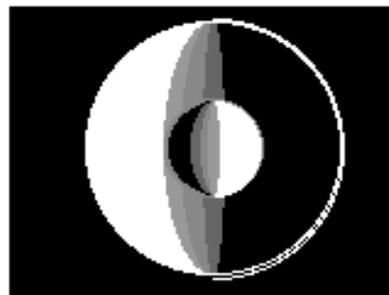
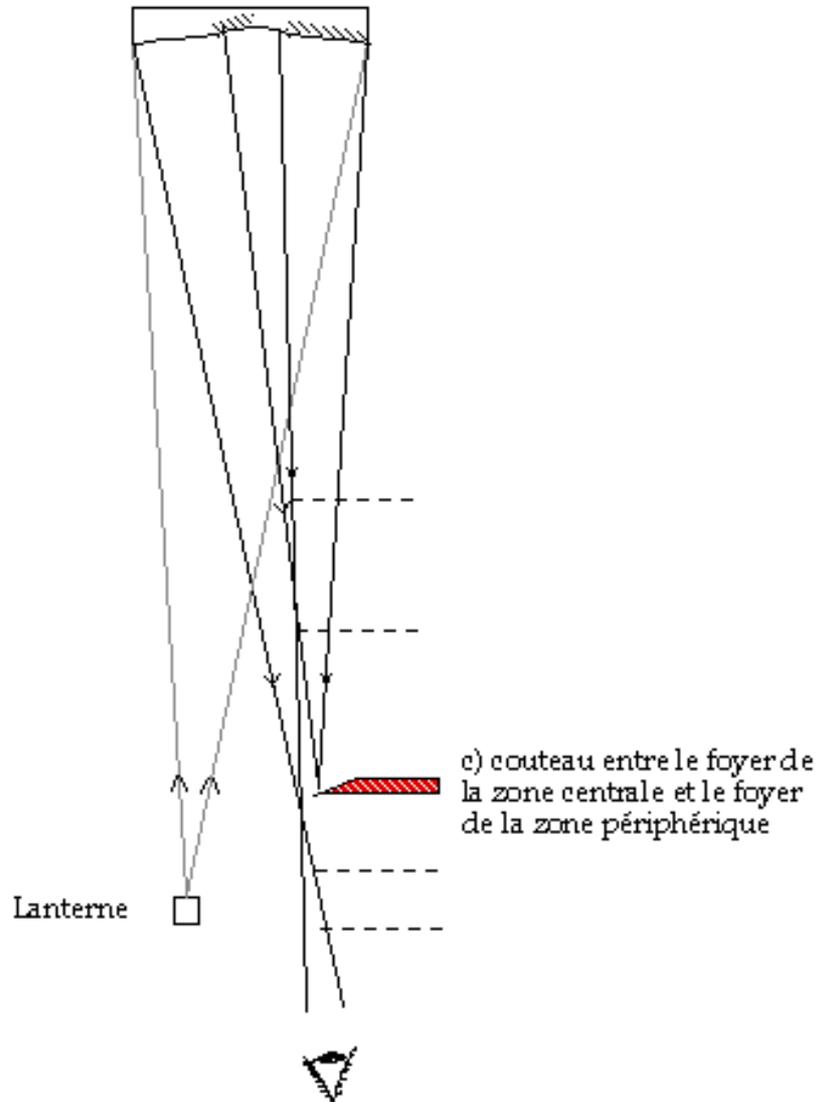
a)  
**Vue d'un miroir avec défauts à différents tirages**



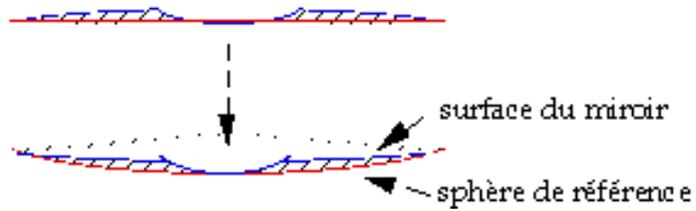
### Vue d'un miroir avec défauts à différents tirages



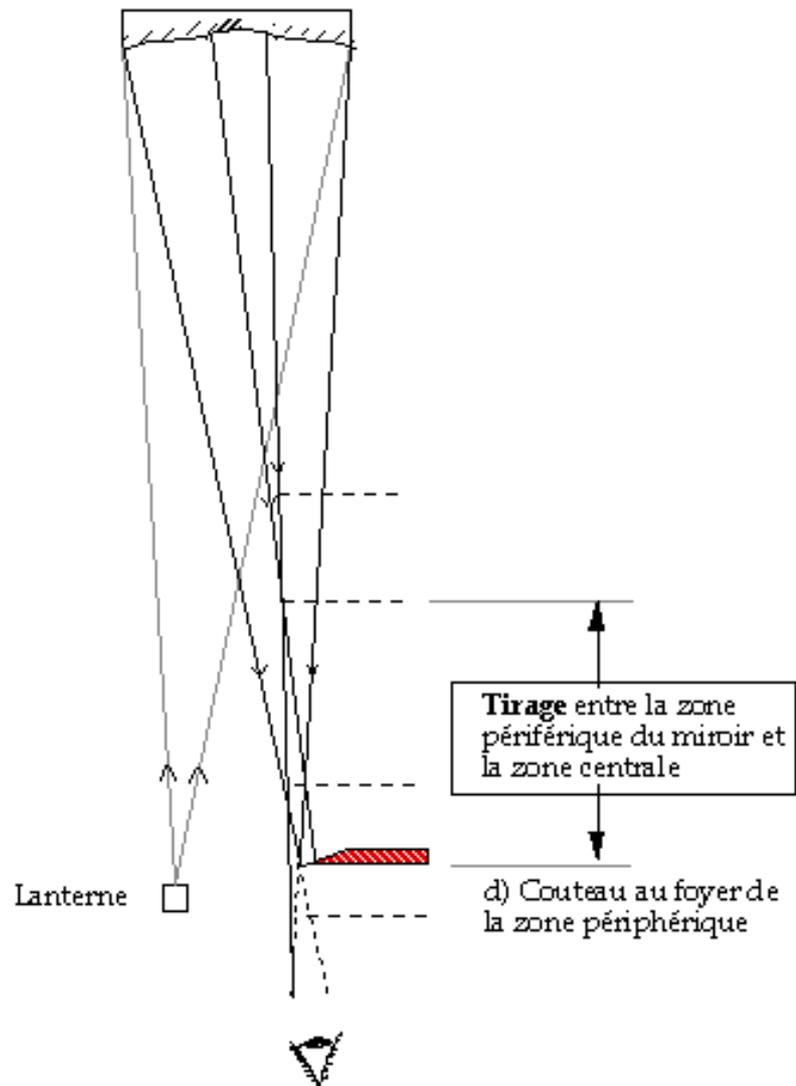
### Vue d'un miroir avec défauts à différents tirages



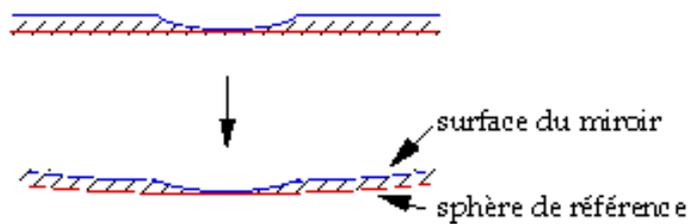
surface apparente



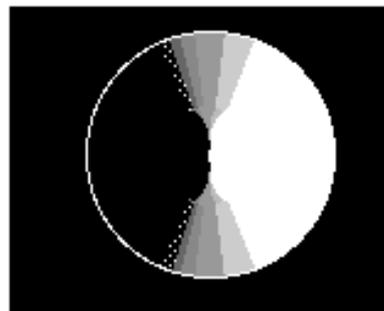
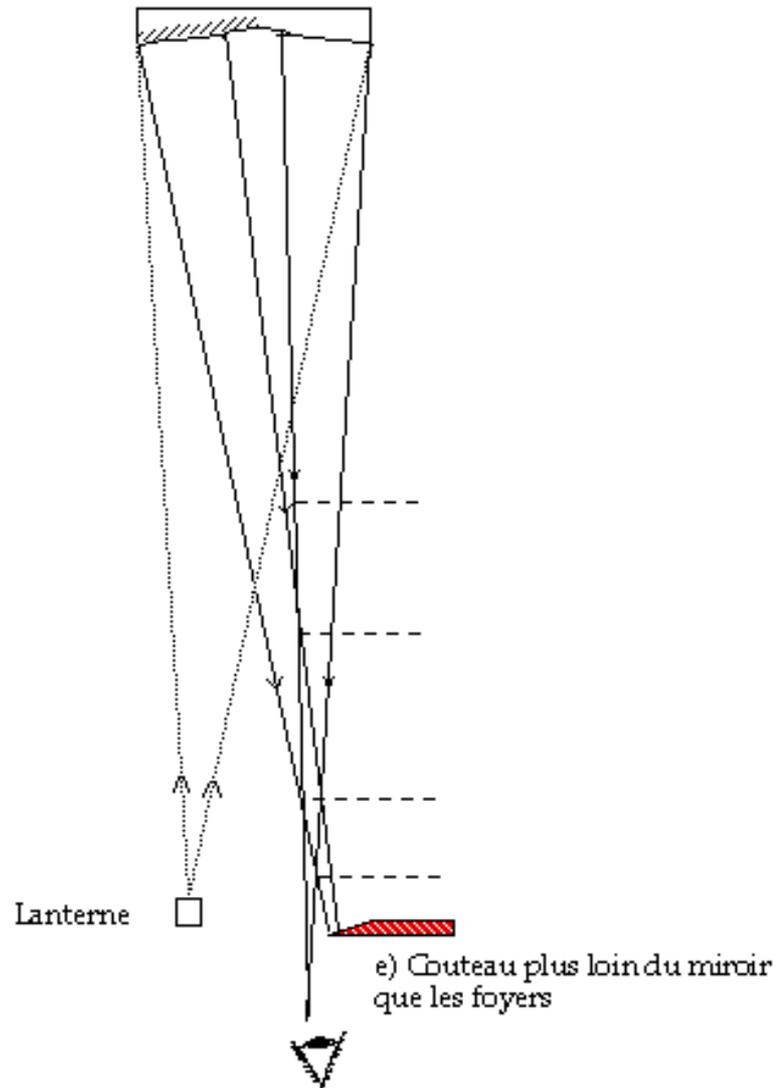
### Vue d'un miroir avec défauts à différents tirages



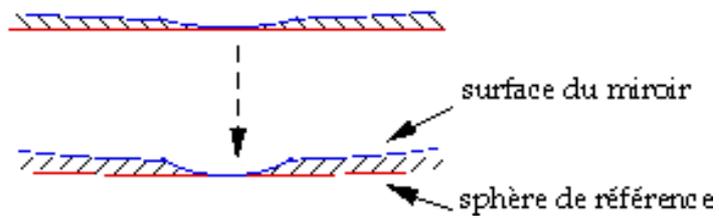
surface apparente



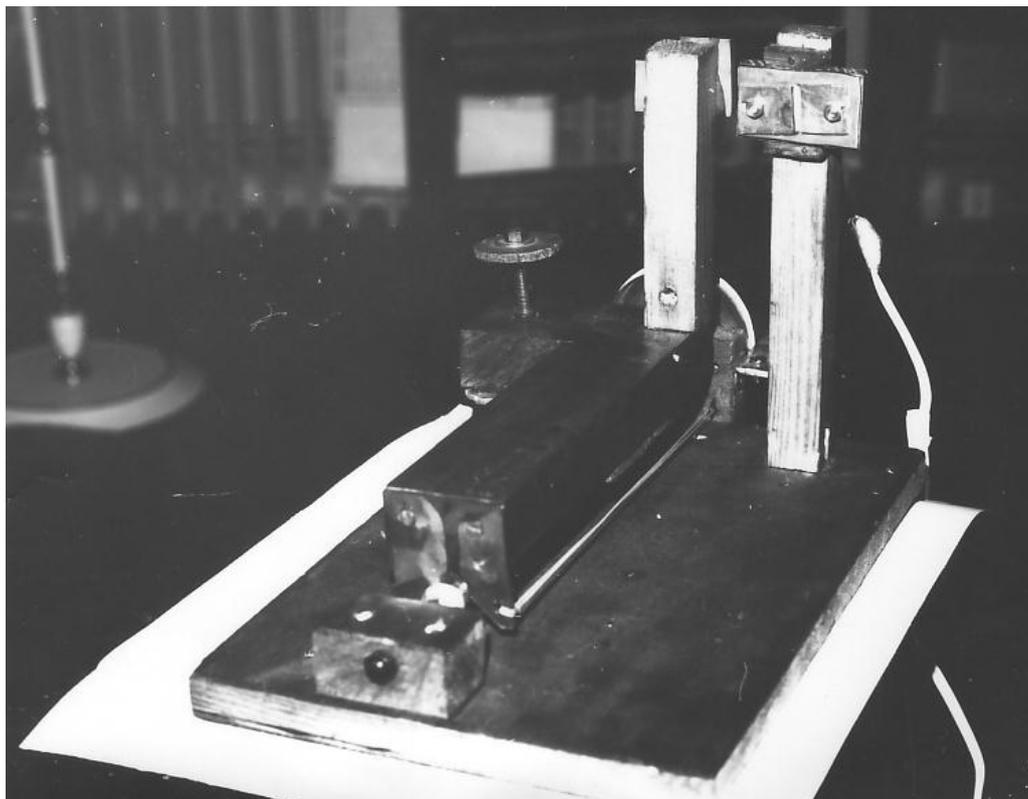
### Vue d'un miroir avec défauts à différents tirages



surface apparente



## 6.3 Construction de l'appareil de Foucault

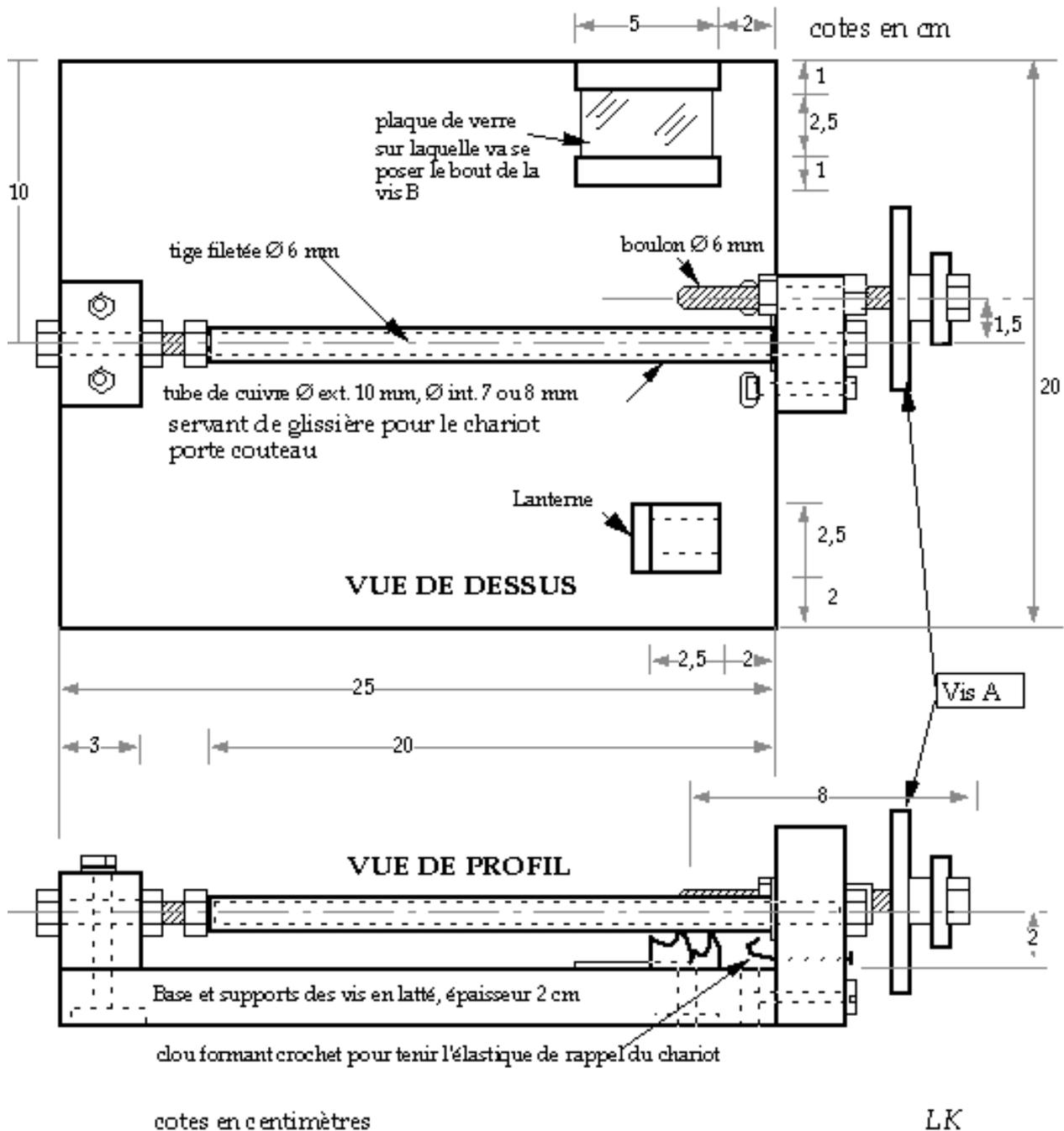


### 6.3.1 Matériaux et outils nécessaires

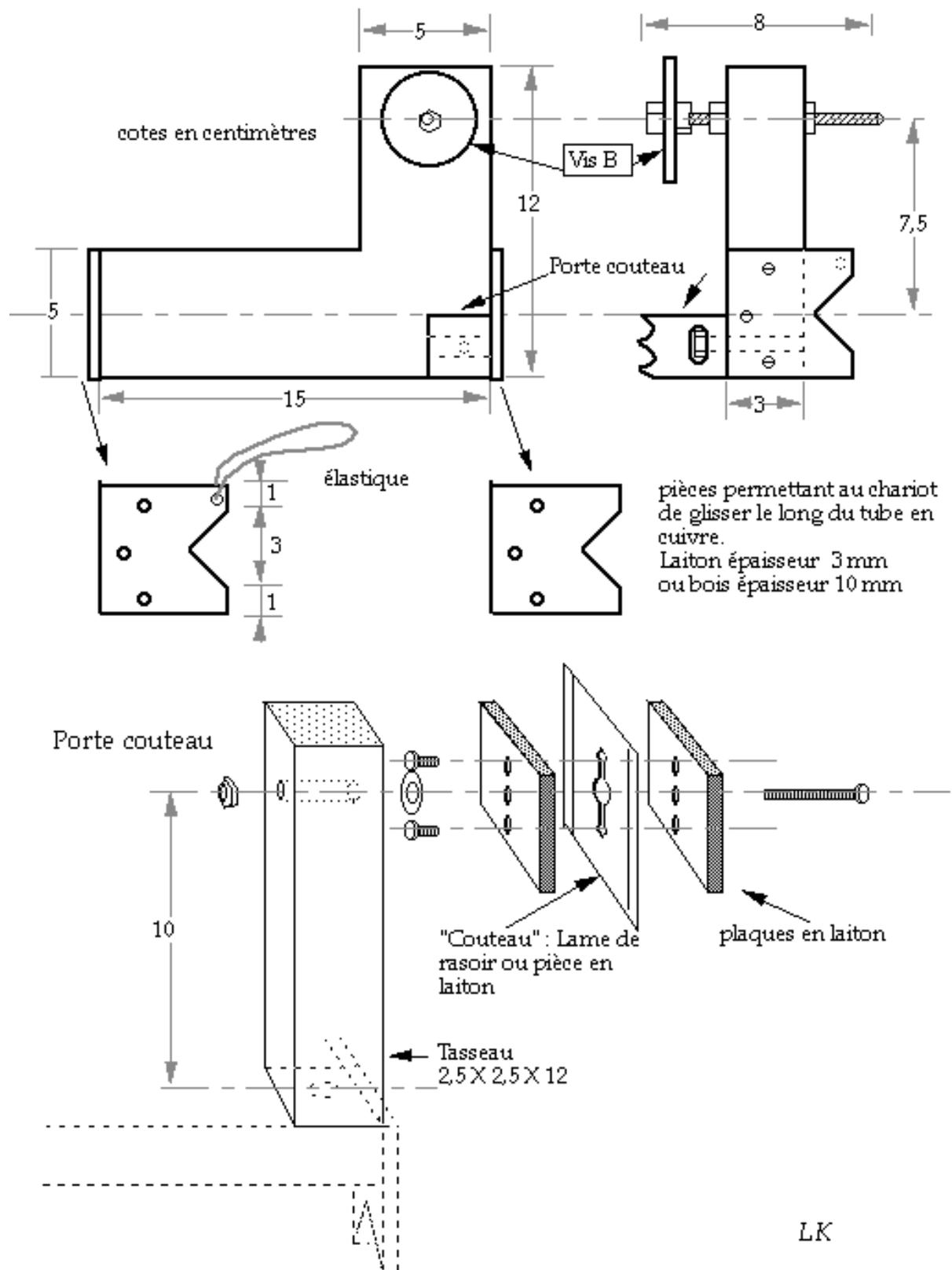
- Bois : tasseaux 2,5 x 2,5 cm,
- Planche en latté ou contre-plaqué 30 x 30 x 1,5 cm.
- Clous, vis, colle.
- 4 boulons de diamètre 6 mm, longueur 10 cm, ou tige filetée et écrous.
- 10 à 15 boulons de diamètre 4 mm, longueur 5 cm, et des écrous.
- Un bout de tube (tuyau de cuivre par exemple, de diamètre intérieur supérieur à 6 mm), ou un fer cornière de 15 cm de long.
- Une ampoule de 4,5 V et 0,3 A ou petit néon orange.
- Une douille pour cette ampoule.
- Une pile de 4,5 V ou transfo. (pas nécessaire si l'on prend un néon).
- 3 petites plaques de métal de 2 mm d'épaisseur, ou à défaut 3 lames de rasoir neuves.
- Du papier d'aluminium, du papier calque, du papier noir.
- Marteau, lime, scie, chignole, tournevis.

Ne vous affolez pas, il y en a au maximum pour un ou deux jours de bricolage. C'est amusant et cela vous changera de tourner autour du poste. Il n'y a besoin d'aucune précision particulière dans la construction. Respectez les mesures au millimètre près, et veillez à ce que l'ensemble soit bien rigide.

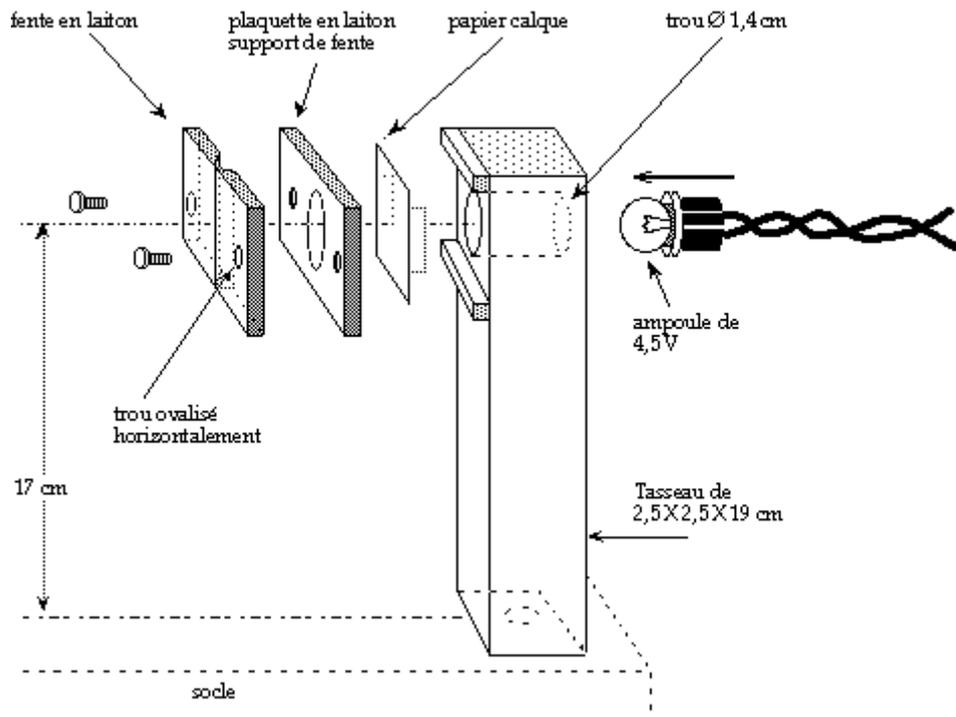
### Plans de l'appareil de Foucault : Sode



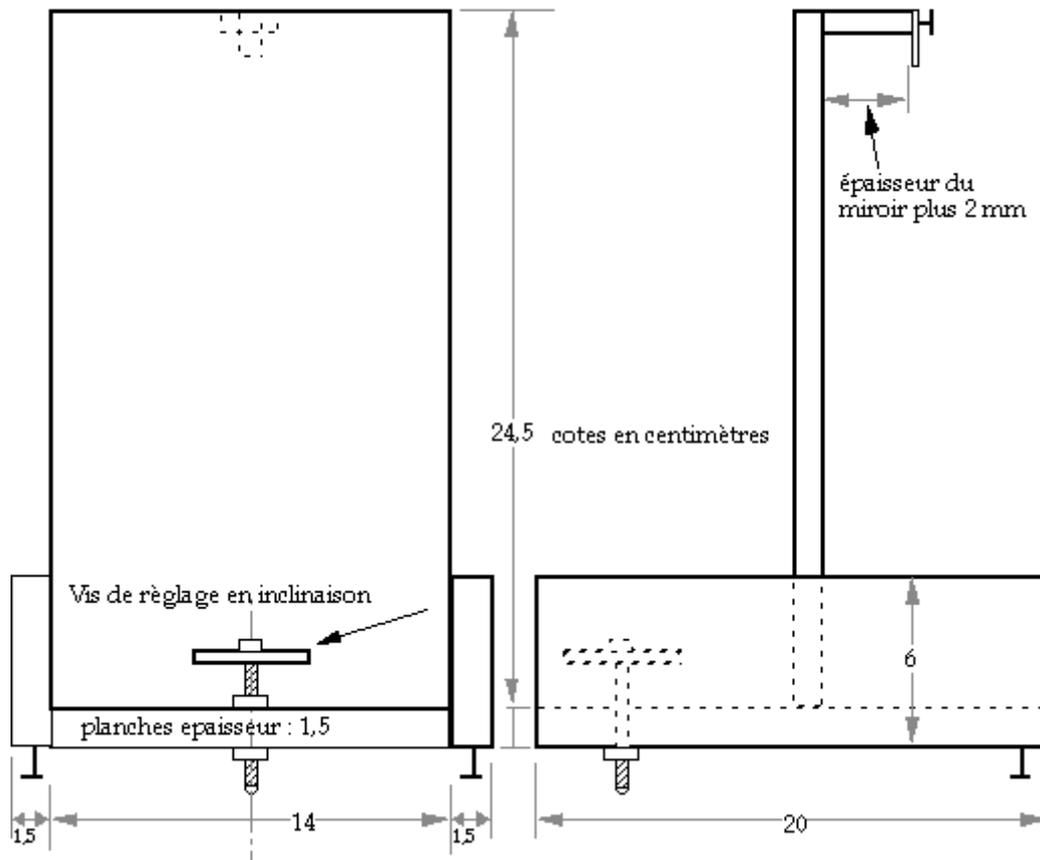
## Plans de l'appareil de Foucault : Chariot et porte couteau



### Plans de l'appareil de Foucault : Lanterne



### Plans de l'appareil de Foucault : support du miroir

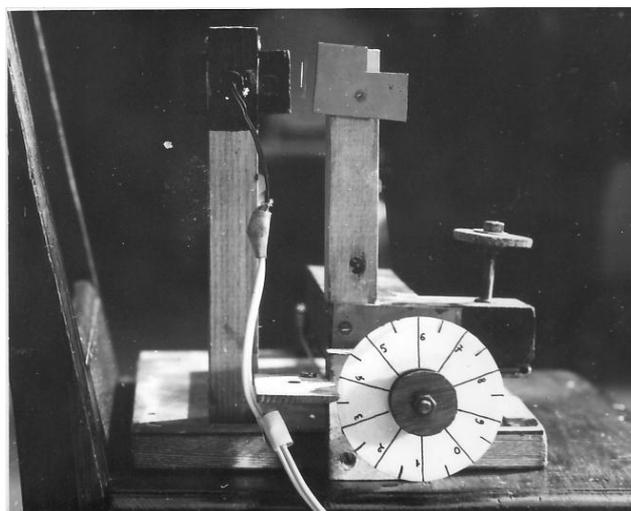
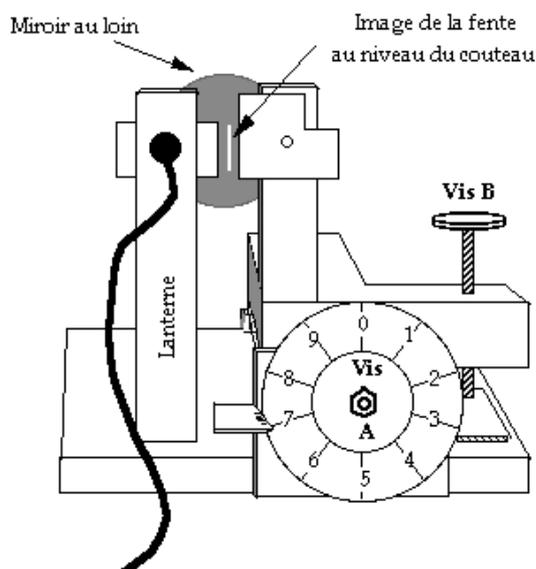


### 6.3.2 Quelques points particuliers :

La lanterne donnera une source de lumière en forme de fente fine et régulière d'un dixième de millimètre de large sur un centimètre de long. Les lèvres de la fente peuvent être des lames de rasoir appliquées sur une petite plaque métallique percée d'un trou de 1 cm de diamètre. L'une d'entre elles doit être réglable en position et en orientation pour donner une fente de largeur égale sur toute sa hauteur.

On peut avantageusement remplacer les lames de rasoir (trop souples) par deux petites plaques métalliques (laiton) de la même forme que celles-ci mais de 1 ou 2 mm d'épaisseur. Sur chacune, limez un bord de manière à faire un biseau. Veillez à ce que l'arrête du biseau soit la plus droite possible. A moins d'utiliser une fraiseuse, on n'arrive pas à la précision voulue sans une étape supplémentaire : il faut "désaiguiser" le biseau en le frottant doucement 2 ou 3 fois sur du verre dépoli, bien perpendiculairement au verre. L'arrête vive sera remplacée par une très fine facette parfaitement rectiligne.

Le couteau peut être fait de la même façon. Il devra se déplacer librement mais avec précision, vous le fixerez à un chariot mobile sur un rail (tube ou fer cornière), solidaire du socle. On fait avancer ou reculer le couteau le long du faisceau en poussant avec la vis (A) et on "coupe" le faisceau en pivotant légèrement le chariot autour du rail avec la vis (B).



## 6.4 La pratique du focautage

Installez-vous dans une grande pièce calme, sans passage et exempte de courant d'air. Le moindre courant d'air ou la moindre source de chaleur (=> turbulence) dans un rayon de 2 m autour du miroir détruirait toute chance de mesure précise de sa surface. Attention aux radiateurs, aux portes entrebâillées et éviter que personne ne se trouve plus à proximité du miroir une fois les réglages faits. Si votre miroir a 1,5 mètres de distance focale, l'appareil devra en être éloigné de 3 m, comptez sur 1 de plus pour avoir la place de vous installer derrière lui et 50 cm pour éloigner le miroir du mur ce qui donne 4 m 50 au minimum. Arrangez-vous pour que le miroir soit le plus loin possible des portes ou des fenêtres.

Éteignez toutes les lumières, sauf une lampe de 25 W. Le jour, fermer les rideaux donne une pénombre suffisante.

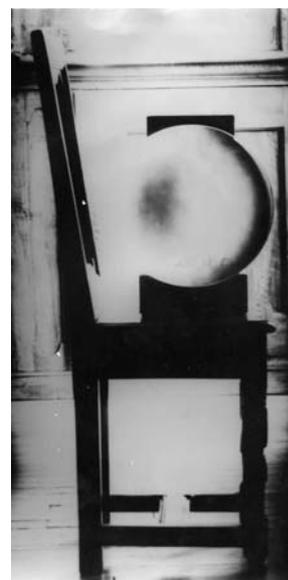
Collez devant la lanterne, non pas la fente mais un morceau de papier noir cachant la moitié inférieure de l'ampoule allumée. Cherchez-en le reflet en vous approchant du miroir. Quand vous l'aurez trouvé, éloignez-vous sans le quitter des yeux, jusqu'au niveau de l'appareil. Déplacez celle-ci dans son ensemble de manière à faire passer le faisceau entre la lanterne et le couteau, agissez sur la vis du support du miroir pour monter ou descendre le reflet à la hauteur du couteau. Mettez l'oeil tout près derrière le couteau, vous voyez l'image de la lampe. Si celle-ci est à l'endroit (le noir en bas) l'appareil est trop près, ou le contraire si elle est à l'envers. A la bonne distance, tout le miroir paraîtra éclairé.

Remplacez alors le papier noir par la fente, vérifiez que le miroir est toujours entièrement et uniformément éclairé. N'oubliez pas le morceau de papier calque devant l'ampoule, améliorez les réglages et jouez sur la position de la fente. En reculant l'oeil vous verrez un trait vertical lumineux proche du bord du couteau. Avancez l'oeil de nouveau : tout le miroir est brillant. "Coupez" alors lentement le faisceau. Vous verrez probablement quelque chose comme la figure 5, donc le couteau n'est pas encore bien au foyer et il faut avancer ou reculer un peu l'appareil (avancer si la partie gauche est obscure, ou vice versa). Maintenant il vous est possible de voir les défauts, en relief, sur votre miroir. Rassurez-vous, ils sont très amplifiés.



on se place

et on voit ...



Améliorez encore le parallélisme du couteau : reculez l'oeil et faite une coupe ; vous devez voir l'image de la fente s'éteindre simultanément en haut et en bas. Les défauts faibles apparaissent plus ou moins contrastés selon leur importance, mais au-delà d'un certain seuil le contraste n'augmente plus. De toute façon, il vous faut mieux qu'une appréciation qualitative d'après l'aspect "artistique" de la surface.

A cause de la technique de polissage, les irrégularités sont presque toujours des zones circulaires symétriques par rapport au centre du miroir (par exemple trou central, bord rabattu, etc...). A chacune d'elles correspond une sphère de référence, donc une distance du couteau pour laquelle elle apparaît "plate". Les positions du couteau peuvent différer de quelques millimètres d'une zone à l'autre. La mesure de cette

différence appelée "tirage" donne une idée plus précise de la gravité des défauts. Par exemple, dans le cas de la figure 4, le tirage est la distance  $b - d$ . Dans la pratique, on déplace le chariot en tournant la vis (A) et l'on compte le nombre de tours. Avec une vis de 6 mm au pas standard, un tour correspond à une avance de 1 mm.

#### 6.4.1 Détermination de la distance focale de l'instrument

Lorsque l'appareil de Foucault est bien réglé, mesurez la distance entre le couteau et le miroir, puis celle presque égale entre le miroir et la fente. La moyenne des deux vous donne le rayon de courbure du miroir : divisez par 2 pour avoir la distance focale (f).

Par exemple, si la distance couteau-miroir est de 2,60 mètres, et, la distance source-miroir de 2,68 mètres, on obtient le rayon de courbure

$$R = (2,68 + 2,62)/2 = 2,65 \text{ m}$$

et la distance focale

$$f = R/2 = 1,325 \text{ m.}$$

Pour mesurer les distances, utilisez l'intermédiaire d'un fil rigide tendu entre le bord du miroir et l'appareil de Foucault.

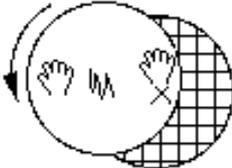
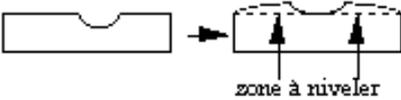
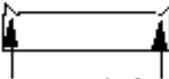
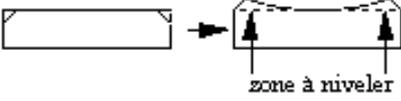
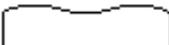
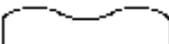
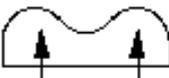
### 6.5 Correction des gros défauts d'un tirage de 1 mm ou plus

Quelques règles :

- a) Attendez que le gris soit parti pour faire des retouches.
- b) Si vous ne le faites pas déjà, notez sur votre carnet chaque séance de travail avec le type de courses et leurs vitesses, la position des disques (dessus ou dessous), le temps de travail et qui travaillait, les effets sur la surface et vos remarques. Ce carnet vous sera très vite plus utile que n'importe quelle explication générale.
- c) Face à n'importe quel défaut, le premier remède à tenter est de polir une ou deux heures de plus, comme si de rien n'était. Neuf fois sur dix vous améliorerez la forme du miroir.
- d) Faites un pressage au blanc avant chaque séance de retouche : pendant le travail mettez plus de blanc et d'eau que d'habitude.
- e) S'il n'est pas en matériau à coefficient de dilatation nul, attendez plusieurs heures que le miroir se stabilise avant de foucaulter à nouveau, sinon ce que vous voyez ne signifie rien, par exemple : retouche le soir, test le lendemain soir.
- f) A un défaut d'une importance donnée correspond un tirage plus grand s'il est près du centre que s'il est près de bord.
- g) Les défauts les plus graves : une surface tourmentée ou asymétrique (fig. 16 et 17) due à des flexions pendant le polissage ou à des séchées trop poussées. Remède : vérifiez que votre poste est bien plan, que la feutrine est bien placée sous les disques et

que, en position miroir dessous, vous avez bien tourné celui-ci tous les quarts d'heure. Tout devrait s'arranger après quelques heures de travail plus doux, miroir dessus courses normales.

h) Les défauts ordinaires : on nivelle la zone saillante en modifiant les courses pour faire passer celle-ci plus souvent sur le bord de l'outil (position miroir dessus).

FORMES	REMEDES
<p><u>Bosse centrale</u></p> 	 <p>Travailler miroir dessus, courses 1/4 Ø excentrées pendant 5 minutes. Méthode très efficace : un temps excessif peut entraîner un trou central.</p>
<p><u>Trou central</u></p>  <p>zone à niveler</p>	 <p>Travailler miroir dessus, courses normales pas trop excentrées.</p>
<p><u>Bords relevés</u></p>  <p>zone à niveler</p>	<p>surpression</p>  <p>Travailler outil dessus, courses 1/4 Ø peu excentrées latéralement, 10 minutes. Exercer une surpression avec la main du côté où l'outil surplombe le miroir.</p>
<p><u>Bords rabattus</u></p>  <p>zone à niveler</p>	<p>surpression</p>  <p>Travailler outil dessus, courses 1/4 Ø peu excentrées latéralement, 10 minutes. Exercer une surpression avec la main du côté où l'outil <u>ne surplombe pas</u> le miroir.</p>
<p><u>Creux central et bords rabattus doucement reliés</u></p>  <p>Tirage 0 Sphère</p>  <p>Tirage &lt; 4 mm ellipse</p>  <p>Tirage de l'ordre de 4 mm parabole</p>	<p>Pas de correction nécessaire avant la parabolisation ou les retouches finales.</p>
 <p>zone à abaisser</p> <p>Tirage &gt; 4 mm hyperbole</p>	 <p>Travailler outil dessus, courses 1/4 Ø normalement décentrées, exercer des surpressions quand le bord de l'outil passe sur les zones à user.</p>

Types de défauts graves nécessitant une repirise du polissage :

SURFACE	TYPE DE DÉFAUT
	<p>Type : "Couvercle de poubelle". Provient en général d'un polissage industriel de mauvaise qualité.</p>
 <p>Défauts non symétriques</p>	<p>Type "montagnes Russes". Provient en général d'un travail trop violent et/ou d'un polissoir trop dur.</p>
 <p>Défauts non symétriques</p>	<p>Type "symbole Yin - Yang". Provient d'un défaut d'astigmatisme.</p> <p><u>Causes possibles</u>                  Disque miroir trop fin ou trop souple,                  poste pas assez plat                  ou bien encore vous n'avez pas tourné assez régulièrement l'outil entre vos mains et vous-même autour du poste.</p> <p style="text-align: right;">LK</p>

Après avoir corrigé les principaux défauts, vous considérerez peut-être que, ayant assez souffert pour votre miroir, il est temps de le mettre à contribution. Soit, vous pouvez vous arrêter là. Vous avez entre les mains une pièce optique égale ou meilleure en qualité que la plupart de celles vendues dans le commerce.

Mais pourquoi ne pas faire mieux, beaucoup mieux ! L'étape finale est délicate, mais ni longue, ni fatigante. Elle se nomme : parabolisation.

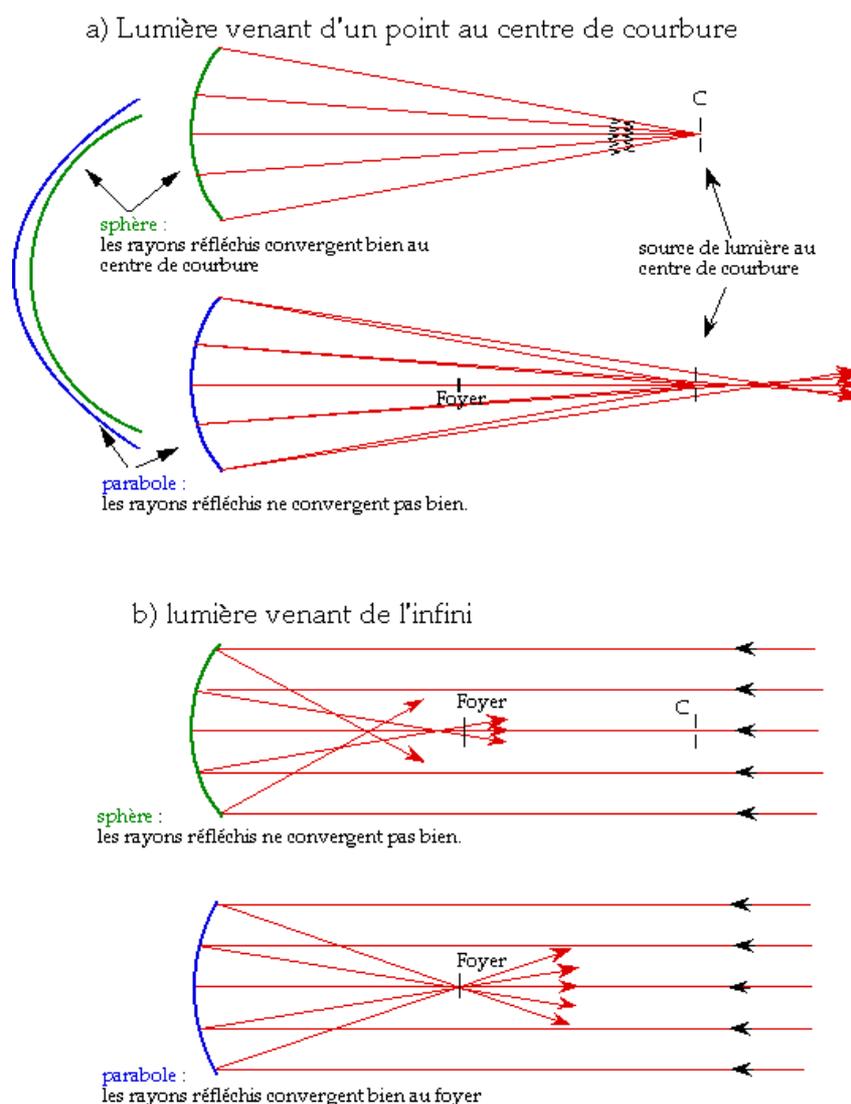
## 7 LA PARABOLISATION

### 7.1 La parabolisation est nécessaire

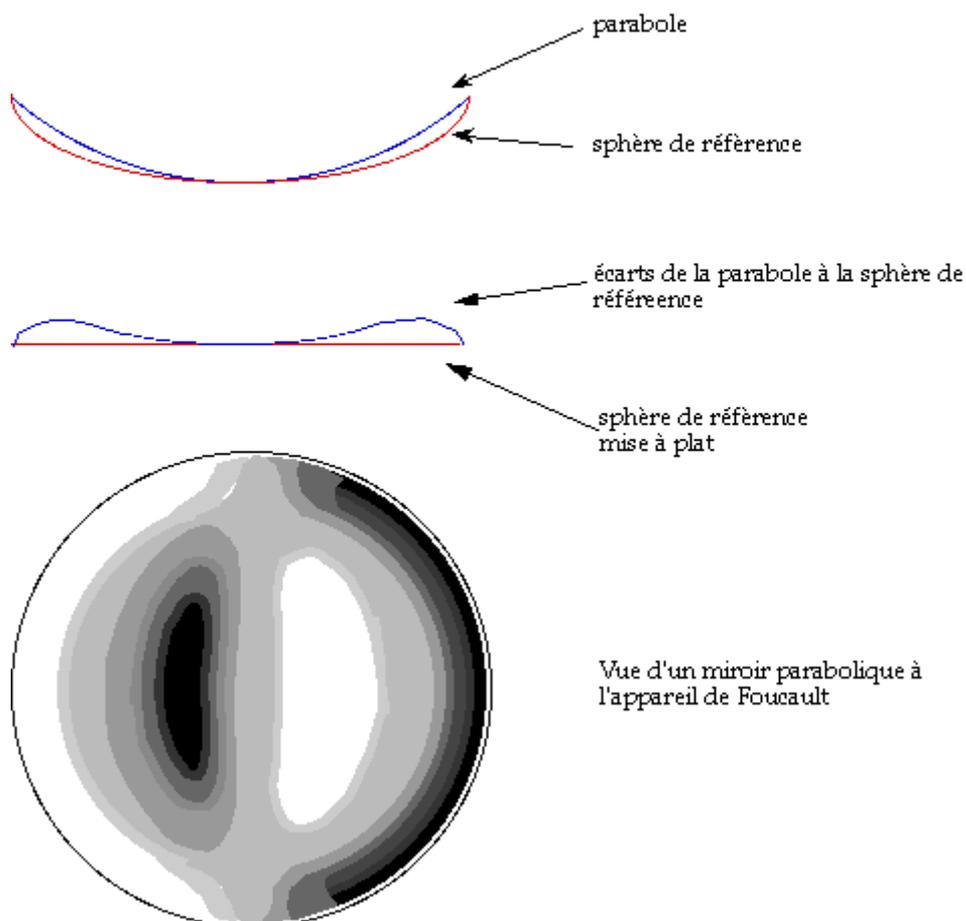
La caractéristique principale que vous attendez de votre futur miroir c'est qu'il donne une bonne image, c'est-à-dire qu'il fasse converger la lumière le plus finement possible.

Quand celle-ci vient de l'infini, ce qui est toujours le cas en astronomie, la surface idéale pour votre miroir est un paraboloïde de révolution, très semblable à la sphère : l'écart entre les deux est de quelques dixièmes de micron seulement. Par contre, quand la lumière vient d'un point proche, par exemple du centre de courbure du miroir, comme dans le cas du test de Foucault, la surface parfaite, celle qui va donner une extinction uniforme quand on coupe le faisceau, n'est plus le paraboloïde de révolution, mais la sphère exacte.

#### Différences sphère - parabole



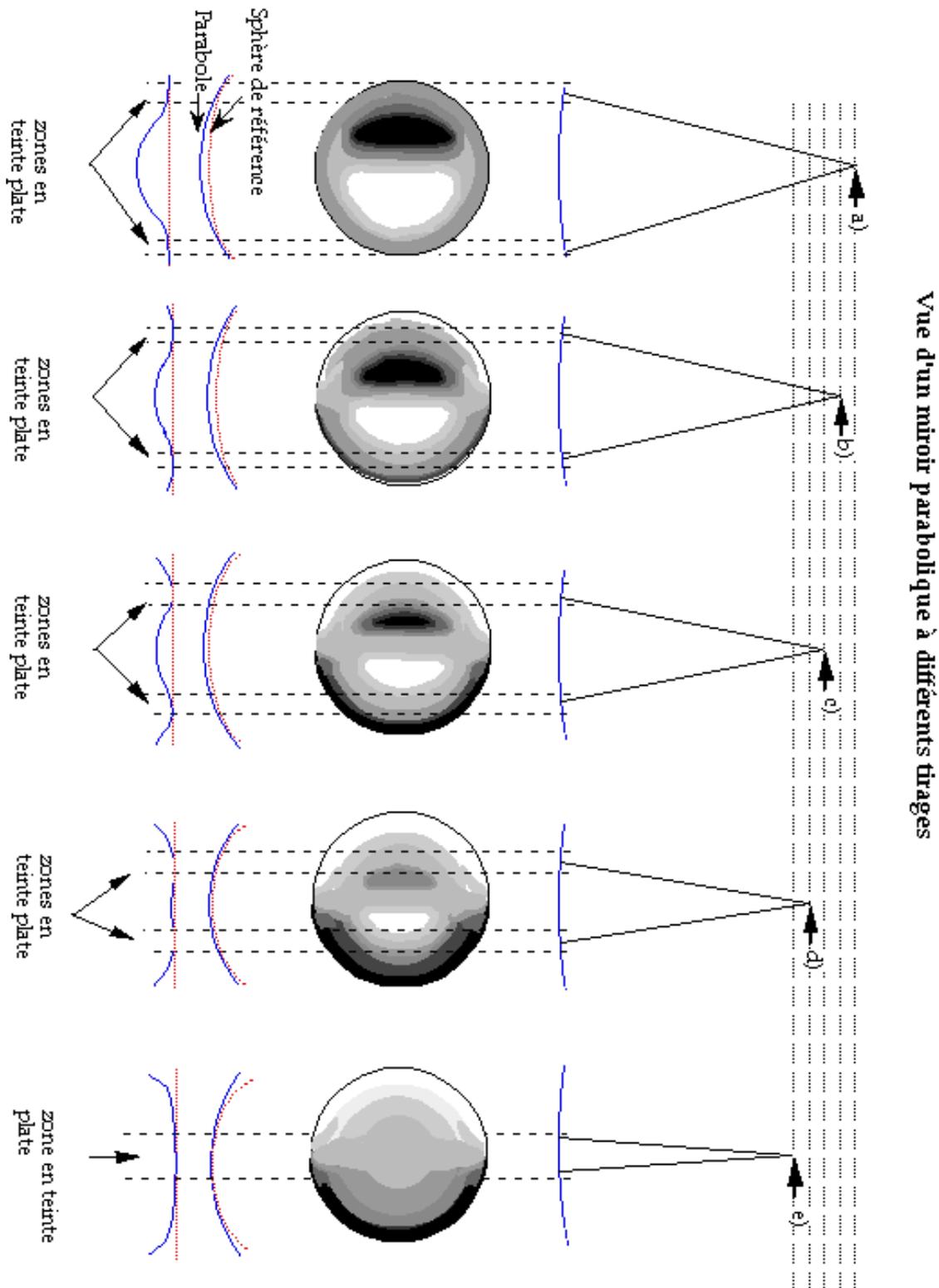
Ceci explique qu'un miroir terminé et parabolisé ne donne pas une teinte uniforme à l'appareil de Foucault, mais présente l'aspect suivant :



Imaginez que vous disposez d'un miroir parabolique parfait et que vous vous amusez à le contrôler. En mettant le couteau à différentes distances du miroir (séparées de quelques dixièmes de millimètre l'une de l'autre), on peut faire apparaître successivement des zones concentriques du miroir en teinte plate (gris uniforme dans la zone), la "couronne" en teinte plate va du centre vers le bord quand on rapproche le couteau du miroir. Si l'on mesure la distance  $p$  du couteau au miroir pour une zone de rayon  $h$  sur le miroir, on trouve :

$p = R - h^2/R$ .  $R$  est le rayon de courbure du miroir (2 fois la focale),  $h$  est le rayon de la zone.

Seule un miroir parabolique obéit à cette loi et la méthode de contrôle présentée plus loin consiste à mesurer les écarts à cette loi. Voici, par exemple, ce que donnerait un miroir parabolique de 21 cm de diamètre et 1,50 m de focale (soit 3 m de  $R$ ), ce qui sera le cas à peu de chose près, pour votre miroir.



Pratiquement, il suffit de mesurer les écarts de position du couteau, par rapport à une position quelconque prise comme référence, pour s'assurer que le miroir contrôlé suit (ou ne suit pas) la loi de la parabole. En l'occurrence, si votre miroir présente l'aspect de la figure ci-dessus pour une position moyenne du couteau et que le tirage (différence de position) à effectuer pour passer de a) à e) mesure entre 3 et 5 millimètres, vous pouvez être presque certain que votre miroir est déjà "à lambda sur 4".

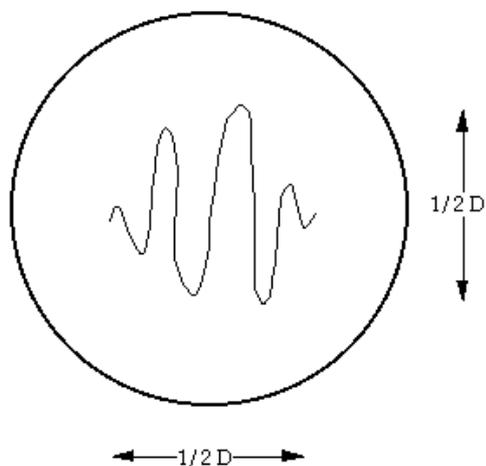
## 7.2 Courses de parabolisation

Si vous avez conduit correctement le polissage avec des courses normales, la surface de votre miroir doit être à peu près sphérique, ou déjà légèrement parabolisée. Il faut amplifier cet écart à la sphère avec les courses suivantes.

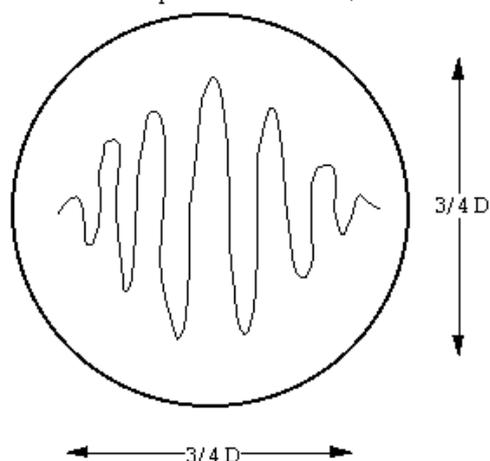
### 7.2.1 Première méthode

Si vous êtes plusieurs à avoir travaillé sur le miroir depuis quelques temps déjà : une heure de polissage miroir dessus, courses pas trop rapides (un aller-retour par seconde) variées en forme et en amplitude : tournez souvent le disque dans vos mains et vous-même autour du poste ; faites un bon pressage au blanc avant de commencer ; mettez bien du blanc (ou du rouge) et de l'eau ; ne faites pas durer les séchées.

Courses de parabolisation, 1ère méthode



Courses de parabolisation, 2ème méthode



### 7.2.2 Deuxième méthode

Si vous êtes seul : 10 minutes miroir dessus, grandes courses 3/4D, 3/4D même conseils que pour la première méthode.

Après une séance de parabolisation, votre miroir doit commencer à prendre l'aspect de la figure xxx (trou central faible et large, bords légèrement rabattus). Le tirage entre le centre et les bords doit être de 2 ou 3 mm.

Plusieurs séances de parabolisation sont parfois nécessaires avant d'obtenir un tirage entre 3 et 4 mm, mais dès que celui-ci atteint 2,5 mm vous pouvez traiter votre miroir par la méthode des retouches expliquée plus loin.

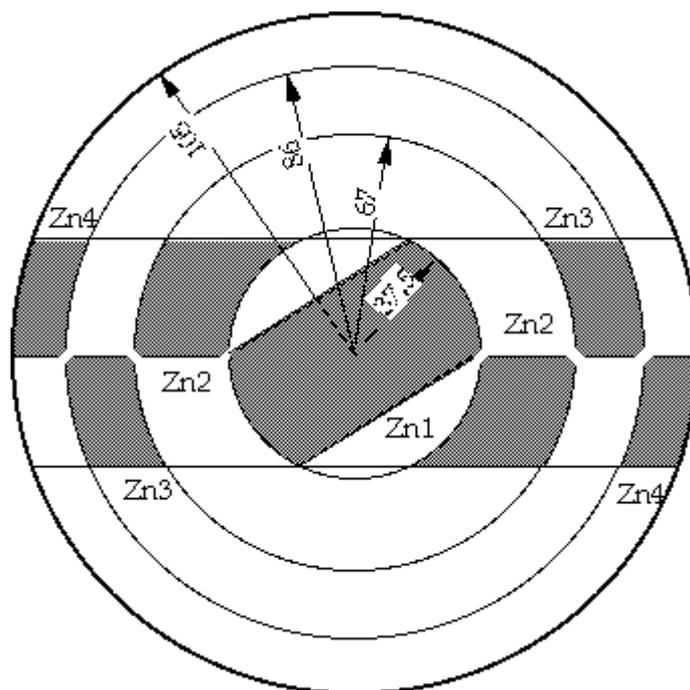
### 7.3 Contrôle des écarts à la parabole

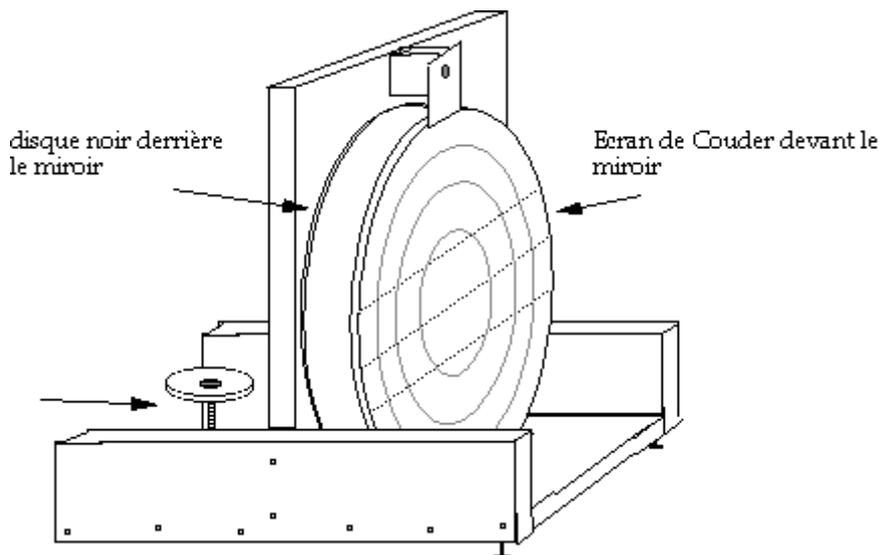
Je vais décrire ici la méthode que je connais le mieux, l'ayant apprise dans l'ouvrage de J. Texereau et pratiquée de nombreuses fois : il s'agit de la méthode de l'écran à échancrures de A. Couder, qui consiste à définir quatre zones sur le miroir, grâce à des trous percés dans un diaphragme que l'on place devant.

Découpez dans un carton mince, rigide, mat et de couleur claire, un diaphragme comme sur la figure suivante. Voici les rayons à donner aux différentes limites entre les zones :

Pour un miroir de diamètre 210 mm :

- h1 = 37.5 mm
- h2 = 67 mm
- h3 = 86 mm
- h4 = 104 mm





Les parties en gris sont à découper et enlever. Si votre miroir ne mesure pas 210 mm de diamètre, multipliez les nombres du tableau ci-dessus par  $D/210$ , où  $D$  est le diamètre en millimètres de votre miroir. Le rayon  $h_4$  doit correspondre au demi-diamètre du miroir. Pour des miroirs plus ouverts, il faut plus de 4 zones.

Ce "masque" en carton à placer devant le miroir, sert à délimiter quatre zones concentriques. Il comporte deux fenêtres par zone, qui vont vous permettre de la délimiter sur le miroir et de mesurer pour quel tirage elle est en teinte plate.

Ces nombres sont obtenus par la formule  $p = - h^2/r$  donnée au paragraphe précédent, en prenant pour  $h$  le rayon moyen de chaque zone.

Table des zones pour un miroir de diamètre 210 mm et 2,44 m de rayon ( $f/D=5.8$ ) :

	zone 1	zone 2	zone 3	zone 4
pour $R = 2440$ mm				
Rayon du bord de la zone	37,5	67	86	104
Rayon moyen de la zone : $h_m$	24,2	52,7	76,5	95,0
Tirage pour une parabole : $p = \frac{h_m^2}{R}$	0,24	1,14	2,40	3,70

Attention : les tirages de référence :  $P = \frac{h_m^2}{R}$  sont à recalculer avec la bonne valeur de  $R$  pour votre miroir (son rayon de courbure que vous avez mesuré). Les valeurs "p" du tableau ci-dessus sont juste un exemple pour un miroir donné.

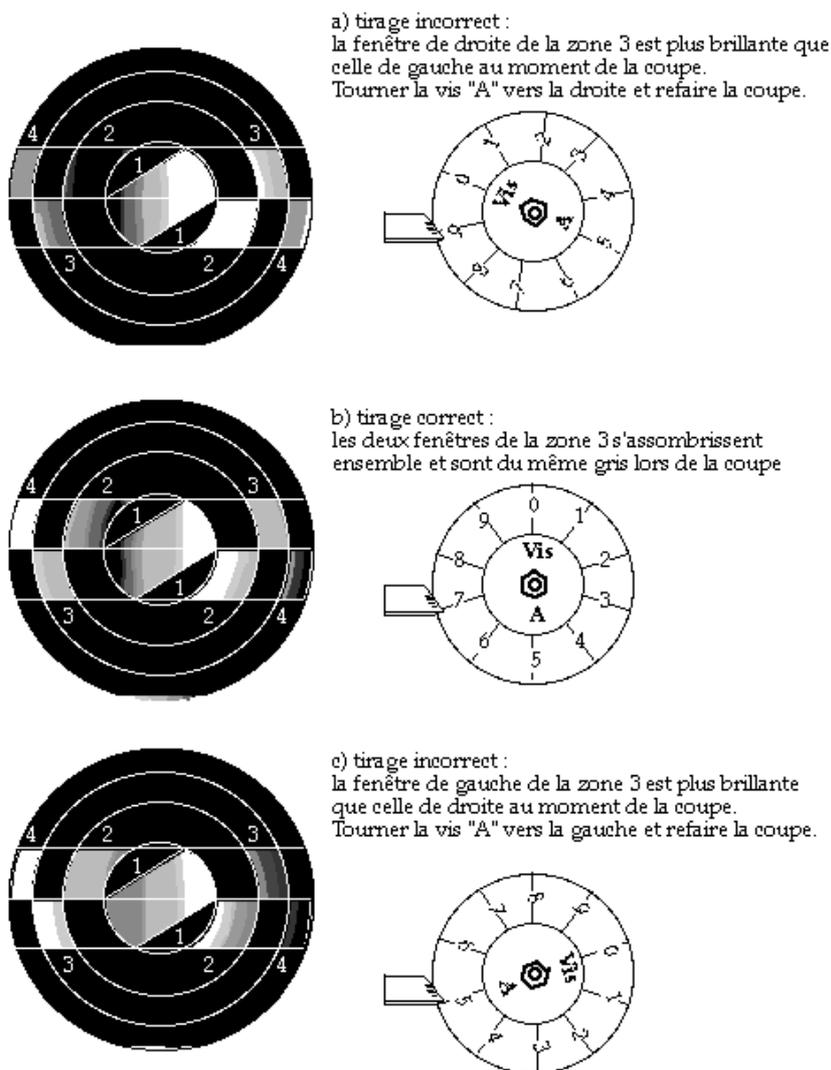
Après avoir appliqué les courses de parabolisation pendant les temps indiqués, laissez reposer votre miroir au moins 10 heures avant de passer au contrôle (quelques minutes seulement pour un miroir en Zerodur). Je vous conseille de le poser sur son support tout de

suite après l'avoir travaillé et rincé, et de le laisser là jusqu'au lendemain. Cela permettra au verre de libérer les tensions internes créées par le polissage, et à la surface de prendre sa position d'équilibre. De plus vous n'aurez pas à le manipuler au moment du contrôle, ce qui vous évitera de le chauffer avec vos mains.

Regardez la forme générale du miroir au Foucault : si elle ressemble à un "parabole", c'est bon. Mesurez à peu près le tirage entre le bord et le centre : s'il se situe entre 2 et 5 mm, c'est toujours bon. Mettez alors l'écran à échancrures devant le miroir et un rond de canson noir derrière le miroir et de même diamètre que celui-ci, pour ne pas être gêné par la lumière parasite venant du fond de la pièce.

Chaque couple d'échancrures diamétralement opposées dans le diaphragme délimite une zone : quand vous faites une coupe, vous vérifiez qu'une zone est en teinte plate quand les deux fenêtres de même numéro s'éteignent en même temps et sont du même gris au moment de l'extinction. Si la fenêtre de droite est plus brillante, il faut tourner la vis A vers la droite (sens des aiguilles d'une montre) et recommencer la coupe. Si c'est la fenêtre de gauche qui est la plus brillante, tournez la vis A vers la gauche. Pour la fenêtre centrale (zone 1) la comparaison se fait entre la moitié gauche et la moitié droite. Prenez soin de mettre un cercle divisé en 10 parties sur votre vis : et fixez une réglette de bois sur le côté comme repère, ce qui vous permettra d'apprécier le dixième de tour, c'est-à-dire le dixième de mm dans la position longitudinale du couteau, les millimètres entiers étant donnés par le compte des tours de vis.

### Exemple : contrôle de la zone 3



Mesurez séquentiellement les positions du couteau pour les teintes plates des différentes zones, dans l'ordre : zone 1, zone 2, zone 3, zone 4 : puis zone 4 de nouveau, zones 3, 2, 1, puis 1, 2, 3, 4, etc... Notez les mesures en colonne, comme sur la figure 7, ayez au moins 4 pointés sur chaque zone. Normalement vous obtiendrez des mesures fidèles, à mieux que 4/10 de millimètre pour une zone, d'un pointé sur l'autre, avec l'habitude d'une ou deux séances de contrôles. Si ce n'est pas le cas, revoyez votre appareil de Foucault ou le local dans lequel vous opérez (courants d'air) ou bien les supports du miroir et de l'appareil.

Si vous faites la moyenne de N mesures, vous augmentez la précision de \*N : par exemple la moyenne de 4 pointés est deux fois plus précise qu'un point isolé (\*4 = 2), la moyenne de 9 est trois fois plus précise, etc... Si vous avez des pointés précis à 4/10 de mm, en faisant la moyenne sur 16 vous aurez des valeurs précises à 1/10. Mais 16 pointés faits à la file sont rarement précis car, comme il y a quatre zones à mesurer, cela fait 64 mesures, et les yeux se fatiguent ! La moyenne des pointés pour chaque zone (figure \*\*\*) est une série de quatre nombres qui caractérisent entièrement votre miroir. Dans le paragraphe qui suit, j'explique les opérations à leur faire subir pour trouver la forme de la surface. Vous

verrez que je n'entre pas dans les détails, je ne dis pas pourquoi on fait comme cela. C'est volontairement, dans le but que ce texte soit utilisable par des amateurs ayant peu de connaissances en mathématiques.

## 7.4 Evaluation de la forme de la surface

Appelez les quatre moyennes que vous avez faites M1, M2, M3 et M4. Pour un miroir en voie de parabolisation, ces nombres doivent toujours être croissants quand on va de M1 à M4 et la différence entre M4 et M1 doit se situer entre 2,5 et 5 mm. Si elle est plus faible, votre miroir n'est pas assez parabolisé ; si elle est plus forte, mais inférieure à 6 mm, il est presque bon, vous pouvez utiliser la technique des retouches expliquée plus loin. Si elle dépasse 6 mm votre miroir est trop "parabolisé", reprenez le polissage avec des courses normales pas trop lentes et pas trop amples pendant une heure.

### ESTIMATION PLUS PRÉCISE

Retranchez respectivement aux moyennes M1, M2, M3, M4 les nombres P1, P2, P3, P4 qui sont donnés dans le tableau ci-dessous et qui caractérisent la loi de la parabole. Vous obtenez quatre différences : Diff\_1, Diff\_2, Diff\_3, Diff\_4, qui peuvent être chacune soit positive, soit négative.

Si ces quatre différences à la loi de la parabole étaient les mêmes pour chaque zone, votre miroir serait une parabole parfaite. J'ai bien dit égales entre elles ; pas forcément nulles. On peut ajouter ou soustraire la même constante arbitraire à chacun de ces écarts calculés : cela revient au même que d'approcher ou reculer légèrement l'appareil de Foucault par rapport au miroir.

Par exemple en remplaçant les valeurs :

Diff\_1, Diff\_2, Diff\_3, Diff\_4,

par : Diff\_1 + C, Diff\_2 + C, Diff\_3 + C, Diff\_4 + C, où C vaudrait 1 mm,

on déplacerait "virtuellement" l'appareil de Foucault de 1 mm.

Nous allons positionner "virtuellement" l'appareil de Foucault au meilleur foyer de votre miroir. Il faut pour cela choisir la bonne constante C à ajouter aux mesures de telle sorte que les écarts à la parabole soient les plus petits possible en valeur absolue. Cette étape est nécessaire pour le dessin de la surface du miroir.

Essayez différentes valeurs de C jusqu'à ce que le plus positif des Diff\_n + C soit à peu près égal au plus "négatif" (en valeur absolue). Par exemple dans le tableau ci-dessous nous avons au départ Diff\_1 = +0,03 comme plus grande valeur positive et Diff\_2 = -0,49 comme plus "grande" valeur négative. Il y avait un déséquilibre. En ajoutant C = +0,19 à toutes les valeurs on arrive à Diff\_1 = +0,22 et Diff\_2 = -0,30. On aurait pu ajouter C = 0,23 pour équilibrer parfaitement.

Le choix de la constante C correspond en fait au choix d'une parabole de référence, à laquelle vous comparez votre miroir. Varier la constante C consiste simplement à faire varier la focale de cette parabole de référence.

Maintenant pour un calcul rapide de la surface (les défauts ne sont pas représentés de façon parfaitement rigoureuse, mais c'est bien assez précis), calculez :

$$F1 = (\text{Diff}_1 + C) \times -1,$$

c'est-à-dire laissez-le tel quel mais changez son signe en son opposé,

$$F2 = (\text{Diff}_2 + C) \times -2,$$

$$F3 = (\text{Diff}_3 + C) \times -3,$$

$$F4 = (\text{Diff}_4 + C) \times -4.$$

Vous avez maintenant une série de produits  $F_n$  :  $F1$ ,  $F2$ ,  $F3$  et  $F4$ .

En reprenant l'exemple : nous avons :

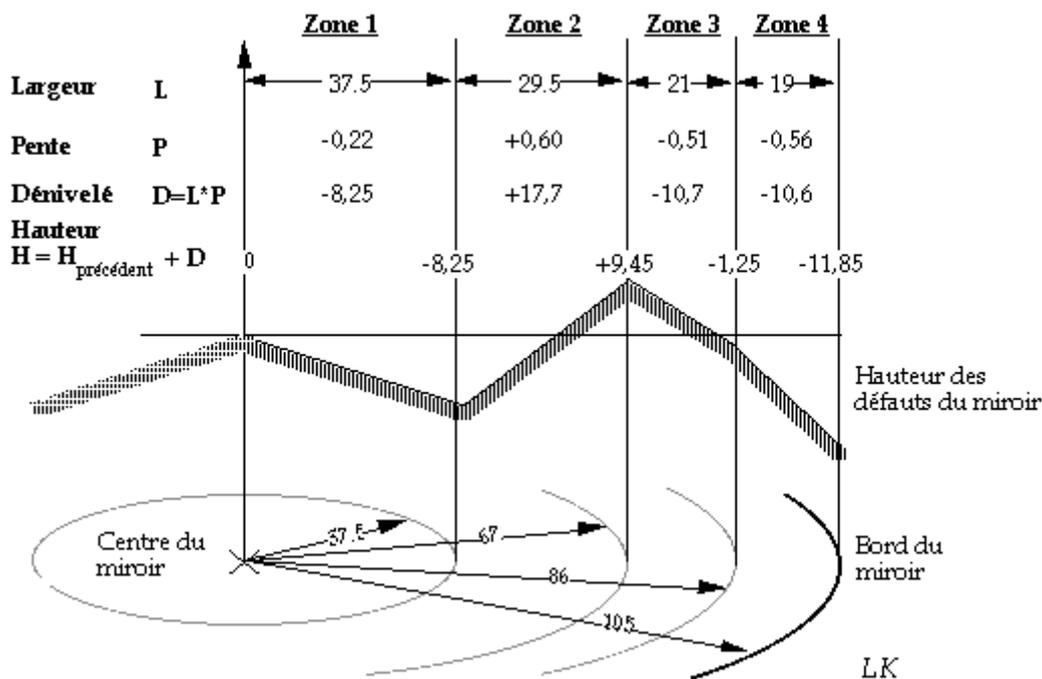
Zones	1	2	3	4
Mesures moyennes M	0,27	0,65	2,38	3,65
Tirages $p = hm^2 / R$ pour $R = 2.44$ m	0,24	1,14	2,40	3,70
Différences $M - p = \text{Diff}_n$	+0,03	-0,49	+0,02	-0,05
$\text{Diff}_n + C$ ; en choisissant $C = 0,19$	+0,22	-0,30	+0,17	+0,14
pentés de la surface du miroir : $F_n$	-0,22	+0,60	-0,51	-0,56

A présent tout est prêt pour dessiner la forme de la surface du miroir (en fait une demie - coupe le représentant à partir du centre, l'autre moitié est symétrique): Prenez du papier millimétré ou simplement une feuille quadrillée 5 x 5. Tracez une ligne horizontale qui représentera une coupe du miroir. Tirez des lignes verticales à des distances égales au rayon des zones de l'écran utilisé devant le miroir. Vous allez maintenant tracer la demie-coupe du miroir : une ligne brisée partant de la gauche dont la pente dans chaque zone est égale à  $F_n$  .

La pente d'une droite est le nombre de carreaux dont elle monte (ou descend, si c'est un nombre négatif) pour un carreau qu'elle parcourt horizontalement. Par exemple, pour la zone 1, le -0,22 signifie que la droite va descendre de 0,22 fois la distance qu'elle parcourt horizontalement c'est-à dire de  $37,5 \times 0,2 = 7,5$  mm, si le rayon de la zone 1 est 37,5.

La ligne de la zone 2 démarre du bout de celle de la zone 1 mais la pente a changé : c'est maintenant celle donnée par le coefficient  $F2$  soit + 0.60. Cette ligne va donc monter de 0,6 fois sa longueur. Même chose pour  $F3$  et  $F4$ .

Le dessin terminé, vous devez obtenir une ligne brisée semblable à celle soulignée de hachures dans la figure ci - dessous ; c'est la différence que fait la surface de votre miroir avec une parabole parfaite, différence amplifiée 200 000 fois environ. Si cette ligne présente une forte tendance moyenne à monter ou à descendre, refaites les  $\text{Diff}_n - C$  avec une constante  $C$  différente : Si par exemple vous aviez pris  $C = - 0,20$  et que votre dessin du profil du miroir monte trop fort, choisissez  $C = - 0,15$  ; si au contraire la courbe descend trop, choisissez  $C = - 0,25$  . Idéalement, les deux bouts de la ligne brisée représentant le miroir (le centre et le bord) devraient être au même niveau sur le dessin.



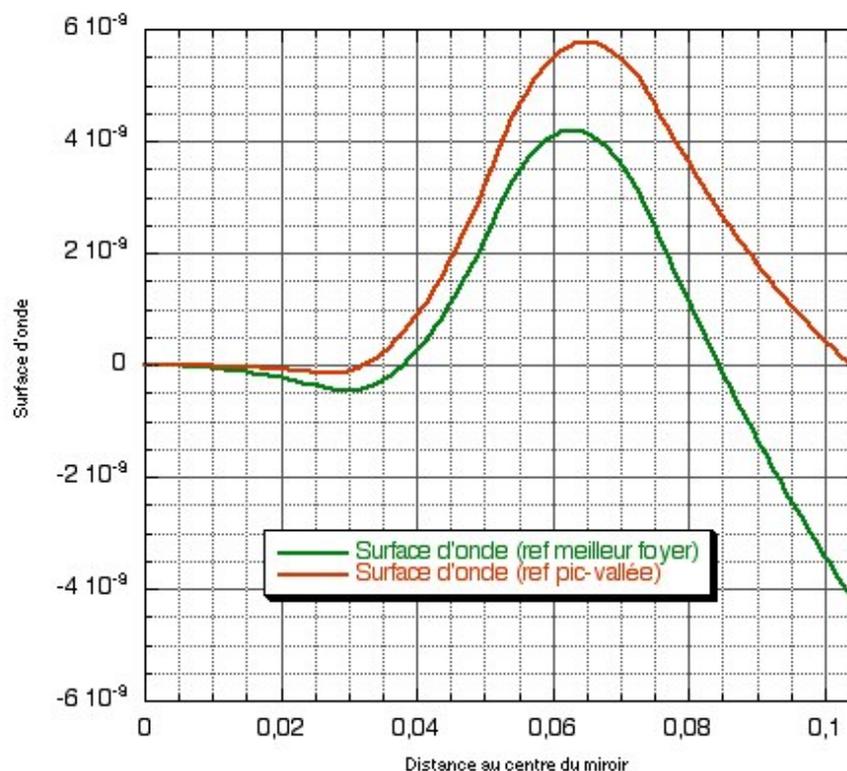
Si vous disposez d'un ordinateur ou même d'une calculette programmable, vous pouvez programmer les étapes ci-dessus et gagner du temps.

Vous pouvez télécharger un programme en langage C++ : [source c++](#)  
Ce programme calcule la surface d'onde à partir des mesures faites au Foucault que vous lui donnez.

Si vous avez un PC; pour faire tourner ce programme il faut d'abord le compiler avec un compilateur C++ sur votre ordinateur habituel.

Si vous avez un Mac, vous pouvez directement télécharger cet [executable](#). Rien ne vous empêche de travailler à partir du source si vous le souhaitez.

Ce programme affiche les données du miroir et sa qualité en "lambda sur x". Il écrit aussi des valeurs sur disque représentant la coupe du miroir, à partir desquels on peut afficher des courbes en utilisant un tableur.



Voici les courbes faites à partir des valeurs calculées par le programme, en fonction des mesures prises en exemple dans le paragraphe précédent.

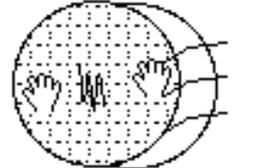
## 7.5 Utilisation et limites de la méthode de mesure

La méthode que je vous ai présentée est moins rigoureuse que celle de Texereau car je remplace par 1, 2, 3 et 4 les rayons moyens des zones 1,2,3,4 (qui leurs sont proches, mais pas rigoureusement proportionnels). Elle a l'avantage d'être plus rapide, tout en gardant une précision de 15% sur l'amplitude des défauts pour des miroirs de  $f/D = 5$  à 8. La nature des défauts n'est pas modifiée, ils sont juste légèrement sur- ou sous-estimés.

D'autre part, pas plus que les autres méthodes, celle-ci ne prétend représenter la forme exacte du miroir : il est évident que ce n'est pas une ligne brisée mais une structure beaucoup plus complexe, sans angles vifs et qu'il est impossible de la connaître exactement, même avec les méthodes les plus précises. Néanmoins cette simple ligne brisée contient assez d'informations pour correctement conduire les retouches et permettre d'obtenir un miroir dont les défauts seront absolument indécélables, dans tous les cas d'observation astronomique.

## 7.6 Retouche des paraboles

Les retouches consistent à user les zones en saillie mises en évidence par le calcul du profil du miroir. Le plus simple est d'opérer outil dessous en faisant frotter le bord de celui-ci préférentiellement sur les zones saillantes. Agir 2 minutes pour commencer et, dans tous les cas, par nombre entier de tours autour du poste.

Effet souhaité	Type de courses
Usure du bord	<p>Outil dessus</p>  <p>surpressions</p>
Usure entre les zones 2-3 ou 3-4	<p>Outil dessus</p>  <p>surpressions</p>
Usure du centre	<p>Outil dessus</p>  <p>surpressions</p>

Pour les premières séances de retouches, agissez très peu de temps (2 ou 3 minutes), avec des pressions faibles, puis en fonction des résultats, augmentez les temps d'action et la pression. Ne faites pas de courses trop lentes, mettez beaucoup de rouge (ou de blanc) et beaucoup d'eau. Assurez-vous que votre polissoir est bien régulier : pas de carrés qui se touchent ou de taille différente. Avant les retouches, faites un pressage de cinq minutes et, après la retouche, attendez le lendemain pour opérer un contrôle si vous avez un miroir en matériau à dilatation non nulle.

Quand les défauts deviennent faibles, faites deux séries de pointés de suite, après avoir tourné le miroir de 90 ° entre les deux, puis faites-en la moyenne.

Enfin, quand vous pourrez ajuster les valeurs F pour que l'écart entre la partie la plus haute et la partie la plus basse de la ligne brisée représentant votre miroir, soit inférieur ou égale au centimètre (avec la méthode "1234") vous pourrez expédier votre miroir à l'aluminure : il est à coup sûr meilleur que  $\lambda / 8$  "pic - vallée". Les défauts étant mesurés sur l'onde réfléchié par le miroir (ceux de la surface du miroir sont égaux à la moitié des défauts sur l'onde).

## 7.7 Définitions

Zone : partie du miroir en couronne autour du centre délimitée par 2 cercles concentriques.

Quand le miroir est "de symétrie", ce qui est presque toujours le cas, le rayon de courbure est le même sur toute une zone.  $h$  est la distance moyenne de la zone au centre du miroir, appelée hauteur.

Teinte plate : on dit qu'une zone est en "teinte plate" quand, en coupant le faisceau avec le couteau de l'appareil de Foucault, celle-ci s'éteint uniformément sur toute sa surface.

Rayon de courbure : distance entre le centre d'une sphère et sa surface. Le rayon de courbure d'une zone est le rayon de la sphère de référence qui la fait apparaître en teinte plate. (la sphère tangente au miroir sur la zone en question).

Pointé : mesure de la position du couteau (vis A) qui fait apparaître une zone en teinte plate.

$\lambda / 4$  ou  $\lambda / n$  : taille du défaut le plus gros d'un miroir, mesuré en fraction de la longueur d'onde moyenne de la lumière visible ( $\lambda = 0,5$  micromètre).  $\lambda / 10$  signifie que le défaut est au maximum de  $0,000\ 05$  mm. (le défaut est par définition mesuré sur l'onde réfléchiée par le miroir. Le miroir lui-même est deux fois meilleur).

Coupe : opération qui consiste à éteindre progressivement le miroir en avançant le couteau dans le faisceau. Le mouvement que l'on fait subir au couteau en "coupant" (en tournant la vis B).

## 7.8 Ancienne liste des fournisseurs (datant de 1990)

Cette liste est là pour servir de point de départ dans vos recherches.  
Certains fournisseurs ont disparu, d'autres sont apparus et ne sont pas dans la liste.  
Bonne recherche.

### LA MAISON DE L'ASTRONOMIE

33, rue de Rivoli, 75004 Paris

Tél. (1) 42 77 99 55

(réf. MA)

### LE CHASSEUR D'ETOILES

130, avenue de Versailles, 75016 Paris

Tél. (1) 45 20 09 99

(réf. CE)

### LE TELESCOPE

37, boulevard Beaumarchais, 75003 Paris

Tél. (1) 42 77 39 84

(Réf. LT)

### LICHTENKNECKER

Kuringersteenweg 44, B-3500 Hasselt, Belgique

Tél. (19-32) 11 25 30 26

(réf. LJ)

### MEDAS

57, avenue Président Doumer, BP 181, 03206 Vichy

Tél. 70 98 28 50

(réf. ME)

### MOSSER

1, rue de Lausanne, 67000 Strasbourg

Tél. 88 36 20 98

(réf. MO)

### ARCANE

3, rue du Puits d'Argent, 02240 Itancourt

Tél. 23 08 88 42

(réf. AR)

### ASTAM

Viry, 39360 Vaux-les-Saint-Claude

Tél. 84 41 12 10

(réf. AS)

### ASTROKIT

7, boulevard Chastenet de Gery, 94270 Le Kremlin-Bicêtre

Tél. (1) 47 26 88 11

(réf. AK)

### CLAVE

9, rue Olivier-Métra, 75020 Paris

Tél. (1) 47 97 05 10

(réf. CL)

### NEWTON 406

Dany Cardoen, La Remise, 04700 Puimichel

Tél. 92 79 94 28

(réf. DC)

### SCHOTT

8, rue Fournier, 92110 Clichy

Tél. (1) 42 70 14 18

(réf. SC)

### WEBER

9, rue du Poitou, 75121 Paris cedex 03

Tél. (1) 42 71 23 45

(réf. WE)

DENOMINATION	FOURNISSEURS												
	AR	AS	AK	CL	MA	CE	LT	LI	ME	MO	NE	SC	WE
Disques bruts	X	X	X		X					X		X	
Abrasifs et produits à polir	X	X	X		X					X			
Taille Miroirs	X	X								X	X		
Miroirs taillés	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
Barillet	X			X	X	X				X	X		
Alumineure	X	X	X								X		
Resurfacage		X								X	X		
Araignée et miroir plan	X	X		X	X	X	X	X	X	X			
Tubes de télescope	X	X			X		X		X				X
Oculaires et porte oculaire	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
Montures	X				X	X	X	X	X	X			
Chercheur	X			X	X	X	X	X	X	X			
Entrainement	X	X			X	X	X	X	X				