

En pratique, α_p et α_{-p} sont mesurés sans se préoccuper d'une éventuelle convention d'orientation. Ainsi, la formule utile pour calculer λ dans le cas d'une incidence quasi normale est :

$$\lambda = \frac{a}{p} \sin \frac{|\alpha_p - \alpha_{-p}|}{2}.$$

II.2.3. Minimum de déviation

Expérimentalement (ou par le calcul, mais nous ne prendrons pas la peine de le démontrer), on constate, en faisant varier de façon monotone l'angle d'incidence θ' et en suivant le déplacement d'un pic correspondant à une longueur d'onde λ dans un ordre p , que la déviation $D_p = \theta_p - \theta'$ passe par un minimum⁹. La méthode du minimum de déviation est utilisée pour la détermination de λ .

Le minimum de déviation correspond nécessairement à une annulation de la dérivée de D_p par rapport à θ' :

$$\frac{dD_p}{d\theta'} = \frac{d\theta_p}{d\theta'} - 1 = 0. \quad (28.12)$$

En dérivant la formule fondamentale du réseau (28.10) par rapport à θ' :

$$\cos \theta_p \frac{d\theta_p}{d\theta'} - \cos \theta' = 0.$$

En injectant la contrainte (28.12), on obtient $\cos \theta_p = \cos \theta'$, soit $\theta_p = \pm \theta'$.

La solution $\theta_p = \theta'$ correspond à l'ordre zéro, la direction de l'optique géométrique, ce qui ne présente aucun intérêt. La solution recherchée est donc $\theta_p = -\theta'$.

Au minimum de déviation, la direction du faisceau incident et celle du faisceau émergent considéré sont symétriques par rapport au plan du réseau.

En notant D_{pm} le minimum de déviation dans l'ordre p , pour une longueur d'onde λ , on a $D_{pm} = 2\theta_p = -2\theta'$. Reste à remplacer θ_p et θ' dans la formule fondamentale du réseau (28.10) pour exprimer D_{pm} en fonction de λ notamment :

$$2 \sin \frac{D_{pm}}{2} = p \frac{\lambda}{a}.$$

La formule qui donne λ en fonction du pas a du réseau, de l'ordre p et de la mesure de la déviation minimale D_{pm} est alors :

$$\lambda = \frac{2a}{p} \sin \frac{D_{pm}}{2}.$$

II.3. Réglage du goniomètre

II.3.1. Présentation du goniomètre

Le goniomètre, représenté sur les figures 28.7 et 28.8, est constitué d'un collimateur (pour réaliser la source de lumière à l'infini), d'une lunette autocollimatrice (pour l'observation à l'infini) et d'une plate-forme mobile sur laquelle on pose le réseau. La lunette peut pivoter par rapport

⁹ L'incidence correspondant au minimum de déviation est propre à chaque longueur d'onde et à chaque ordre. Il faut donc prendre garde de bien suivre la raie spectrale que l'on souhaite étudier par la suite.

au socle de l'appareil afin de viser différentes directions, sa position est repérée à l'aide de graduations (au degré ou au demi-degré près selon le type d'appareil). Ces différents appareils ont été étudiés dans le livre de première année, les étapes de réglage sont brièvement rappelées dans les sections suivantes.

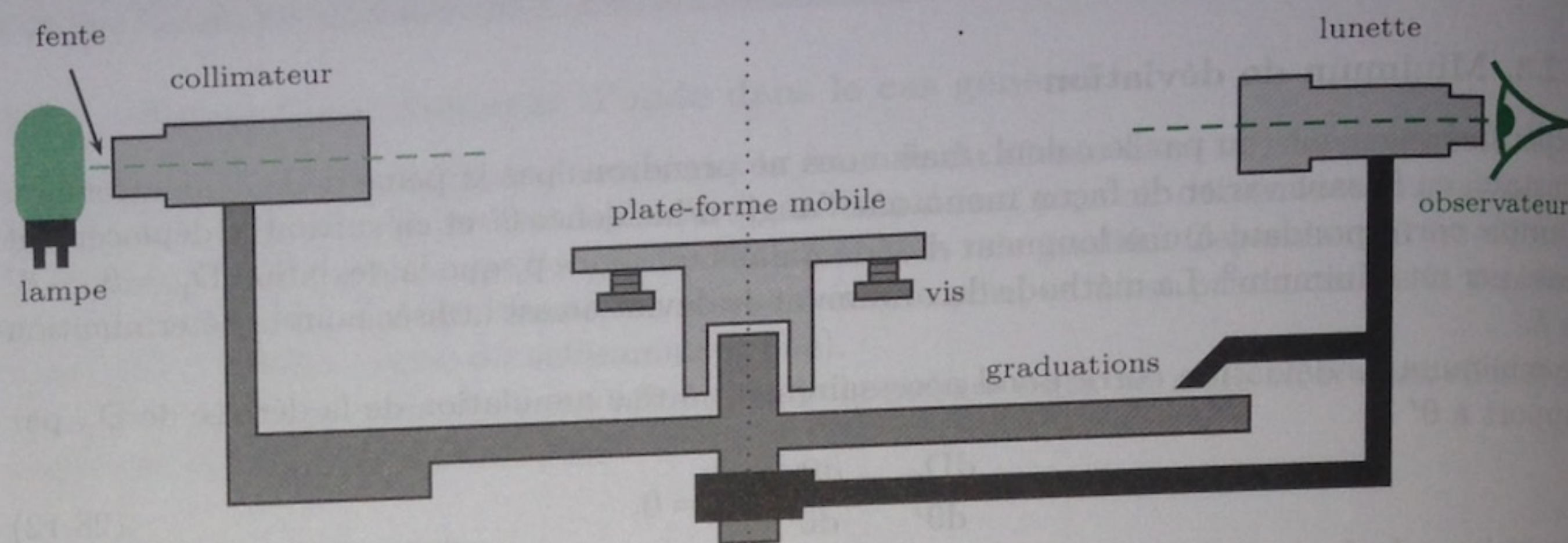


FIG. 28.7. Présentation du goniomètre (vue de profil).

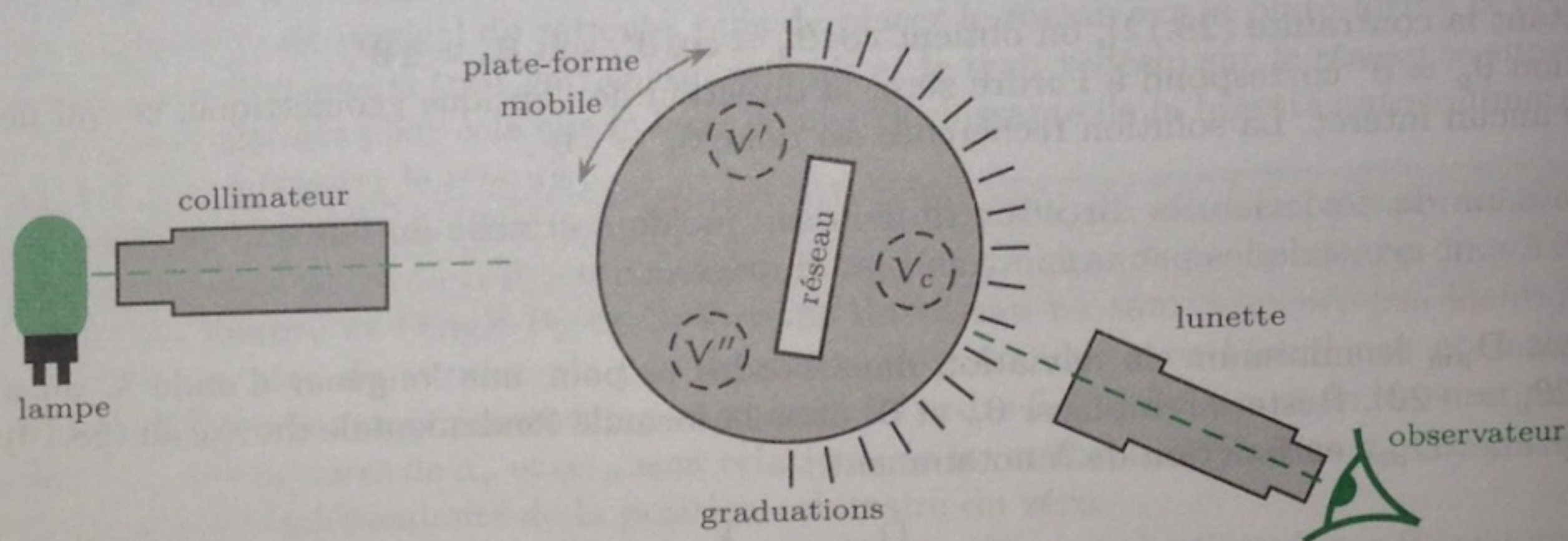


FIG. 28.8. Présentation du goniomètre (vue de dessus schématique).

II.3.2. Réglage de la lunette autocollimatrice

Description

Lorsqu'elle est réglée correctement, la lunette autocollimatrice est une lunette afocale, c'est-à-dire qu'elle permet l'observation d'un objet situé à l'infini. Cette lunette est schématiquement constituée de deux lentilles convergentes, l'une étant l'objectif, l'autre étant l'oculaire ; le réglage a pour but de confondre le foyer image de l'objectif avec le foyer objet de l'oculaire. L'image intermédiaire de l'objet à l'infini étant dans le plan focal objet de l'oculaire, l'image finale est à l'infini¹⁰.

Entre ces deux lentilles sont placés deux fils très fins, disposés en croix et appelés **réticule**, ainsi qu'une lampe permettant d'éclairer ce réticule afin qu'il puisse devenir lui-même un objet pour les besoins du réglage (voir figure 28.9, page 783). Les positions de l'objectif et de l'oculaire

¹⁰Nous supposons que l'observateur est emmétrype, il observe alors sans fatigue.

par rapport à celle du réticule sont réglables. Le dispositif permettant d'éclairer le réticule est constitué d'une lampe et d'une lame semi-réfléchissante escamotable. La lampe peut ainsi éclairer le réticule tout en laissant la possibilité à l'expérimentateur d'observer à travers la lunette. Ce dispositif n'est utilisé que pendant la phase de réglage de la lunette.

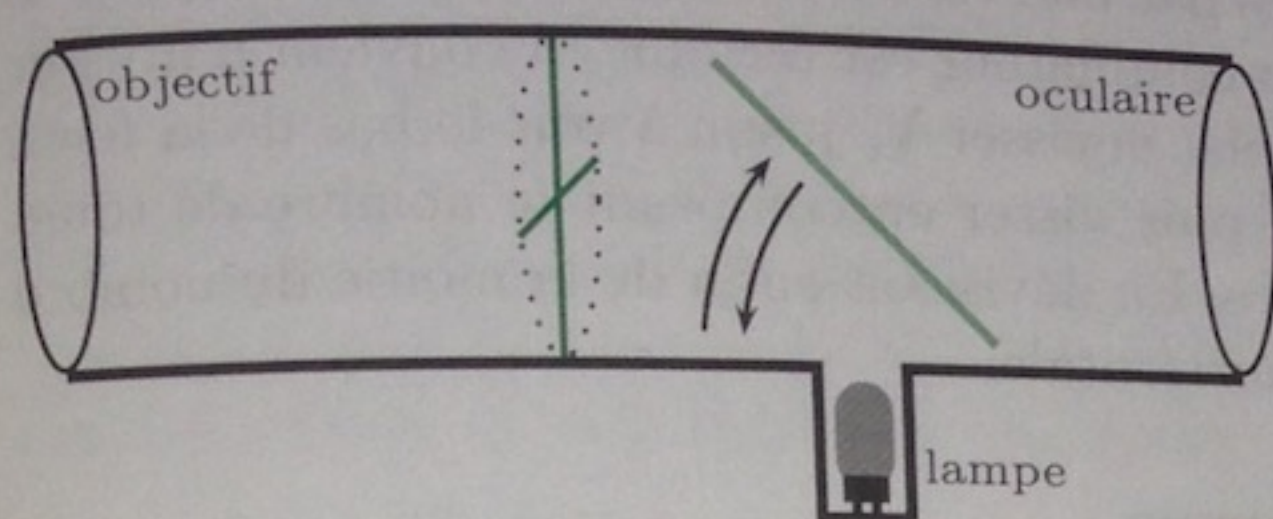


FIG. 28.9. Lunette autocollimatrice. Constituée d'un objectif, d'un oculaire et d'un réticule (en couleur sombre), placé entre les deux premiers, et pouvant être éclairé par une ampoule à l'aide d'une lame semi-réfléchissante escamotable (en couleur claire), la lunette est réglée lorsque le réticule est dans le plan focal image de l'objectif et dans le plan focal objet de l'oculaire.

Réglage de l'oculaire

La première étape consiste à régler l'oculaire de la lunette autocollimatrice de manière à voir net et sans accommodation le réticule. En l'absence de source de lumière extérieure, l'expérimentateur éclaire le réticule à l'aide du dispositif décrit sur la figure 28.9. En supposant que l'expérimentateur a un œil emmétrope, il observera ce réticule sans fatigue si celui-ci est situé dans le plan focal objet de l'oculaire. Du fait de la capacité de l'œil à accommoder, l'expérimentateur voit en réalité le réticule net sur une certaine plage de distance de la lentille avec le réticule. L'observation sans fatigue se fait lorsque l'image (virtuelle) du réticule est le plus loin possible (tout en restant nette), donc lorsque l'oculaire est dans la position la plus éloignée du réticule permettant de voir celui-ci net à travers l'oculaire. En pratique, il faut dévisser la vis de réglage de l'oculaire et s'arrêter juste avant que le réticule ne devienne flou.

Réglage de l'objectif par autocollimation

Pour régler la lunette à l'infini, il faut confondre le plan focal image de l'objectif avec le plan focal objet de l'oculaire, autrement dit avec le plan du réticule d'après le réglage précédent. À l'aide du dispositif constitué de la lampe et de la lame semi-réfléchissante, le réticule peut devenir un objet. En plaçant un miroir plan devant la lunette, le réticule sera dans le plan focal de l'objectif lorsque son image, après passage par l'objectif, réflexion sur le miroir et retour par l'objectif (par la suite simplement désignée par « l'image du réticule »), se formera dans le plan du réticule. Il suffit alors, en regardant à travers l'oculaire et en réglant la vis permettant de déplacer l'objectif par rapport au réticule, de se placer dans la position permettant d'observer nettement l'image du réticule. À travers la lunette, l'expérimentateur observe alors nettement et sans fatigue à la fois le réticule et son image, soit deux croix *a priori* décalées¹¹.

II.3.3. Réglage du collimateur et « horizontalité » de la lunette

Collimateur

Le rôle du collimateur est de créer la source à l'infini afin que le réseau soit éclairé par une onde plane. En réalité, compte tenu du fait que le réseau est constitué de fentes (verticales en pratique), il peut être éclairé par une fente source verticale dans le plan focal objet d'une lentille convergente (voir figure 28.10). La fente d'entrée du collimateur est éclairée par une lampe (par exemple celle que l'on souhaite utiliser pour les mesures à suivre), l'expérimentateur observe avec la lunette autocollimatrice réglée à l'infini dans l'axe du collimateur. Il faut alors tourner la bague

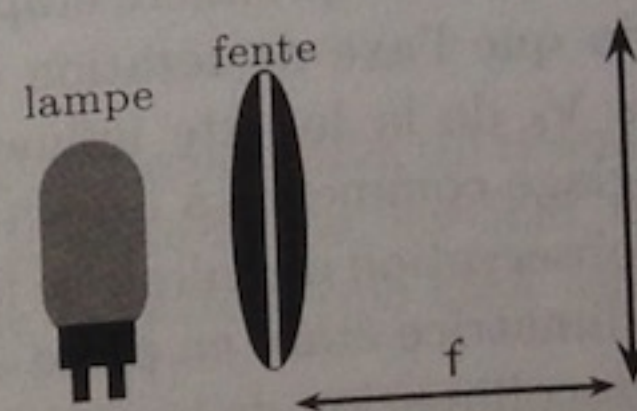


FIG. 28.10. Schéma de principe d'un collimateur.

¹¹Ce que l'expérimentateur observe alors ressemble au schéma de la figure 28.12.

de réglage du collimateur (qui permet de faire varier la distance entre la lentille convergente et la fente) jusqu'à ce que la fente apparaisse nette. Le collimateur est alors réglé, la source de lumière semble être à l'infini.

« Horizontalité » de la lunette

Le réglage de l'horizontalité de la lunette est assuré par une vis (non représentée, notée V_ℓ par la suite) placée sous la lunette. Lorsque le réglage du collimateur est terminé, il convient d'ajuster grossièrement l'horizontalité de la lunette. Pour cela, dévisser V_ℓ jusqu'à voir le bas de la fente du collimateur en bas de l'oculaire de la lunette, puis visser en comptant le nombre de tours jusqu'à voir le haut de la fente en haut de l'oculaire. En dévissant enfin de la moitié du nombre de tours, la lunette est alors approximativement horizontale.

II.3.4. Réglage de la lunette et de la plate-forme

La plate-forme repose sur trois vis disposées à 60° qui permettent de régler son horizontalité (voir figure 28.8). Ces vis reposent elles-mêmes sur un socle (non représenté) pouvant tourner autour du même axe vertical que celui de rotation de la lunette. Le système est réglé lorsque l'axe optique de la lunette est perpendiculaire à l'axe de rotation de la plate-forme¹² et lorsque les fentes du réseau sont parallèles à cet axe de rotation. Le plan du réseau est alors perpendiculaire aux axes du collimateur et de la lunette.

Réglage de la lunette à l'aide d'un miroir

Cette étape consiste à placer verticalement un miroir (en réalité, les deux faces du miroir doivent être réfléchissantes) sur la plate-forme, les faces du miroir étant parallèles à l'axe de deux des trois vis de la plate-forme. La troisième vis est alors la vis calante, notée V_c sur la figure 28.11.

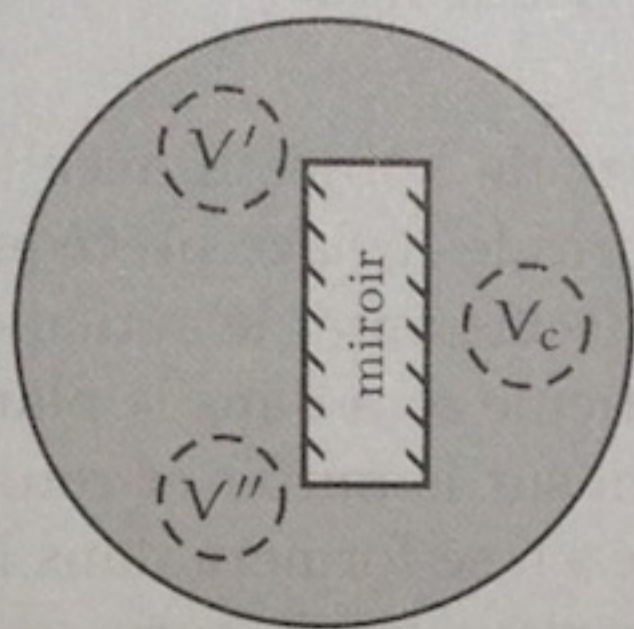


FIG. 28.11. Position du miroir sur la plate-forme et définition de la vis calante. Il s'agit d'une vue de dessus ; les trois vis de réglage de la plate-forme, situées en dessous, sont représentées par des tirets. Le miroir est placé sur la plate-forme, ses faces réfléchissantes étant parallèles à l'axe de deux des trois vis ; la troisième est alors la vis calante.

Dans le cas général (spectroscopie à prisme par exemple), cette étape n'a pour but que de régler l'orthogonalité de l'axe de la lunette avec l'axe de rotation de la plate-forme. Cependant, dans le cas de la spectroscopie à l'aide d'un réseau plan, il est possible d'utiliser le réseau comme un miroir. Une fois le réglage terminé, l'axe de rotation de la plate-forme est contenu dans le plan du réseau (voir plus loin). Nous continuerons à parler de miroir par la suite, mais, en conclusion, nous rappellerons l'intérêt d'utiliser le réseau en guise de miroir.

Lors de cette première étape, les deux vis de réglage à utiliser sont, d'une part, la vis calante V_c afin que l'axe de rotation du miroir soit confondu avec le plan du miroir et, d'autre part, la vis V_ℓ de la lunette influant sur l'« horizontalité » de celle-ci (il s'agit en réalité d'affiner le réglage commencé à la section précédente).

L'observation du miroir se fait à travers la lunette, la lame semi-réfléchissante de la lunette autocollimatrice étant en place afin d'éclairer le réticule. Cette situation est identique au réglage par autocollimation de la position de l'objectif de la lunette ; si cette étape a été faite correctement,

¹² C'est la raison pour laquelle, en supposant que l'axe de rotation de la plate-forme est vertical, nous parlons du réglage de l'horizontalité de la lunette. L'axe de rotation n'est pas nécessairement parfaitement vertical en pratique, mais parler d'« horizontalité » de la lunette pour signifier que son axe de visée est perpendiculaire à l'axe de rotation de la plate-forme permet d'alléger le propos.

l'expérimentateur observe alors nettement à la fois le réticule et l'image du réticule par réflexion dans le miroir.

L'objectif est de faire en sorte que le miroir contienne l'axe de rotation de la plate-forme en jouant sur la vis calante et, de plus, que l'axe de la lunette soit parfaitement perpendiculaire à cet axe, en ajustant le réglage de la vis V_ℓ . Ce réglage se fait par itérations successives, en réduisant de moitié l'écart entre le trait horizontal du réticule et celui du réticule réfléchi (voir figure 28.12), en agissant pour un quart sur la vis calante V_c et pour l'autre quart sur la vis V_ℓ , puis en tournant la plate-forme d'un demi-tour afin de présenter l'autre face réfléchissante du miroir et en réduisant une nouvelle fois de moitié l'écart entre les deux traits horizontaux. En répétant l'opération plusieurs fois, le trait horizontal du réticule finit par coïncider avec celui du réticule réfléchi sur les deux faces du miroir.

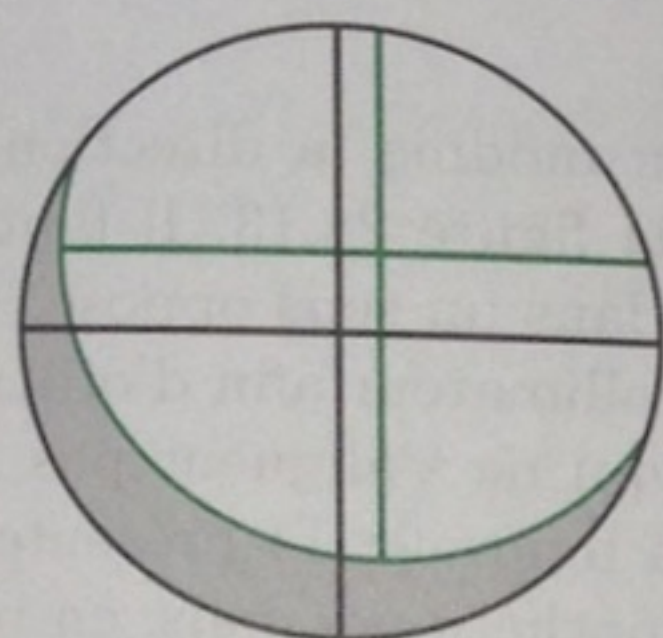


FIG. 28.12. Réticule (en noir) et réticule réfléchi dans le miroir (en couleur pour une plus grande lisibilité de la figure) observés à travers la lunette. Lorsque le réglage est correct, les deux traits horizontaux se superposent.

En supposant que l'axe de rotation de la plate-forme est vertical, l'axe de la lunette est alors parfaitement horizontal et il ne faut donc plus toucher à V_ℓ .

Attention

Vis calante

Si le réseau est utilisé en guise de miroir, le réglage précédent permet d'assurer que l'axe de rotation de la plate-forme appartient au plan du réseau. Il ne faut alors plus toucher à la vis calante.

L'objectif est de rendre la direction des fentes du réseau parallèle à l'axe de rotation de la plate-forme. Dans le cas où l'axe de rotation de la plate-forme est contenu dans le plan du réseau (c'est le cas si le réglage précédent a été effectué avec le réseau plan en guise de miroir), il ne reste plus qu'à incliner la direction des fentes avec les deux autres vis de réglage de la plate-forme (V' et V'' , voir figure 28.11) afin de rendre les fentes parallèles à l'axe de rotation, sans pour autant modifier la position du plan du réseau¹³. Il faut donc seulement modifier la « gîte » de la plate-forme¹⁴ comme on parle de la gîte (inclinaison transversale) d'un navire, la vis V_c étant par exemple la proue du bateau.

Réglage de la « gîte » de la plate-forme

À l'aide du réglage précédent, l'axe de rotation du plateau est maintenant dans le plan du réseau ; la situation est représentée sur la figure 28.13, l'axe de rotation de la plate-forme, vertical, est en noir, les fentes sont en couleur. Les deux vis V' et V'' ainsi que la plate-forme sont aussi représentées.

Pour redresser le réseau afin d'aligner les fentes avec l'axe de rotation, il n'est pas possible de jouer uniquement sur l'une des deux vis V' ou V'' , contrairement à ce que pourrait suggérer

¹³De manière plus rigoureuse : sans modifier la direction de la normale au réseau.

¹⁴En supposant que l'axe de rotation de la plate-forme est vertical.

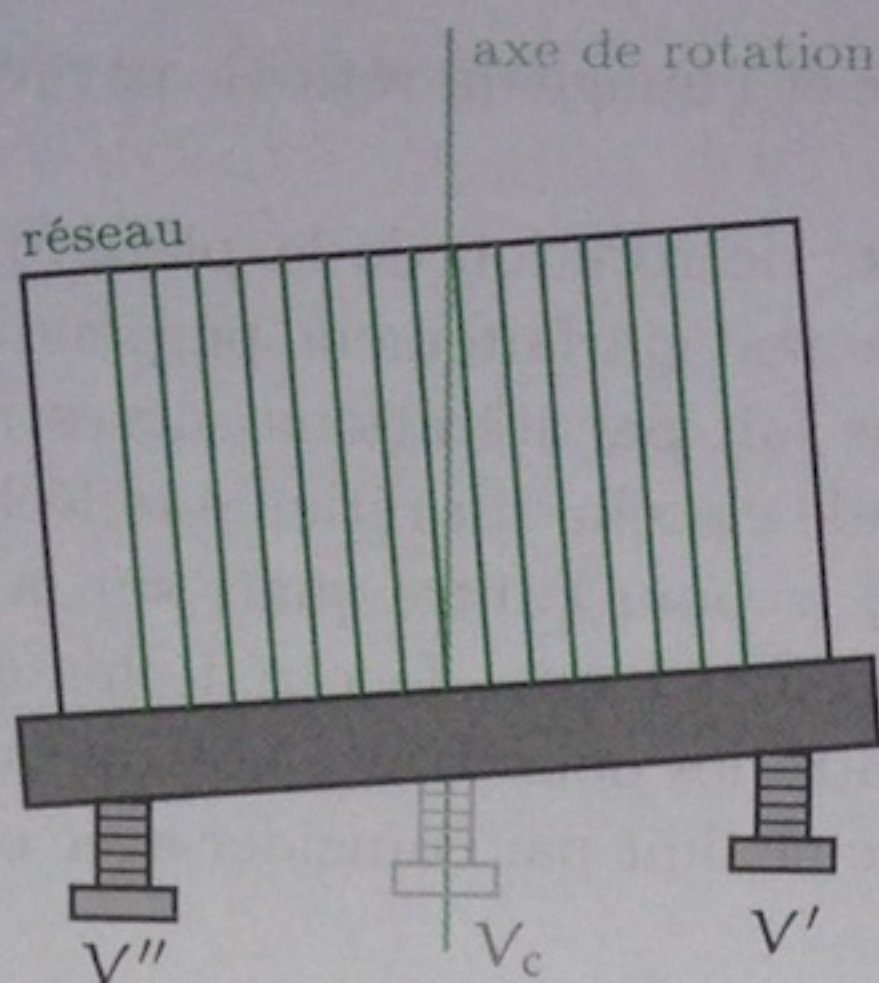


FIG. 28.13. Réseau (les fentes sont en couleur foncée), plate-forme et ses vis de réglage (en gris) et axe de rotation de la plate-forme (en couleur claire). L'objectif est d'aligner la direction des fentes avec l'axe de rotation de la plate-forme.

la figure 28.13. En effet, la figure 28.11 montre qu'une telle action modifie la direction de la normale au miroir. Le réseau ne reste alors plus dans le plan de la figure 28.13. Il faut donc conjointement agir sur V' et V'' , dans les mêmes proportions mais dans un sens opposé. La méthode la plus simple est d'occulter une partie de la fente du collimateur afin d'obtenir un point source. Le spectre est alors constitué de points de couleurs qui ne s'alignent pas nécessairement horizontalement si les fentes du réseau sont penchées. La figure 28.14 présente cette situation telle qu'elle serait observée dans la lunette dans un cas hypothétique, mais, en réalité, il faut tourner la lunette afin d'observer les différents ordres pour estimer correctement la direction suivant laquelle s'alignent les points de couleurs. En agissant conjointement sur V' et V'' , en sens opposé, il suffit de redresser cette série de points.

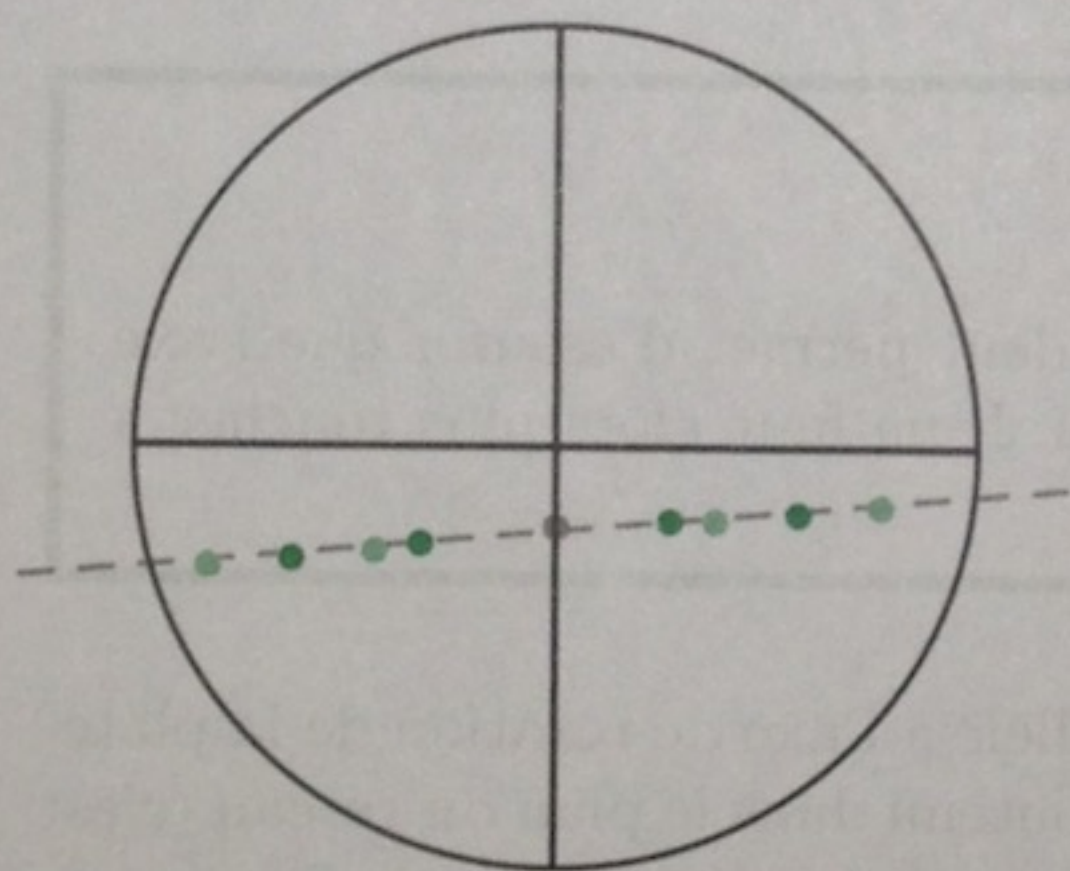


FIG. 28.14. Réticule (en noir) et points de couleurs. Ici, plusieurs ordres apparaissent dans le champ de vision de la lunette, ce n'est pas le cas avec les réseaux utilisés en travaux pratiques (voir texte). Les points s'alignent suivant une direction soulignée par des tirets. Le réglage consiste à rendre cette direction horizontale.

II.3.5. Mesure d'un angle

Le goniomètre, comme son nom l'indique, a pour fonction de mesurer avec précision des angles. Nous allons décrire dans cette section le vernier angulaire permettant une mesure à la minute d'arc près. Il existe d'autres dispositifs qui n'ont pas cette précision; ils ne présentent pas de difficulté, la lecture de l'angle étant directe.

Le goniomètre permet de déterminer la direction dans laquelle pointe la lunette. À chaque direction est associé un angle. Cette mesure d'angle est une mesure relative : seule la différence entre deux angles a un sens, par exemple la différence entre l'angle dans lequel pointe un faisceau lumineux dévié par un instrument et l'angle correspondant à la direction de la lumière incidente sur l'instrument (direction de la source lumineuse) : il s'agit alors d'un angle de déviation. Sur le socle de l'appareil apparaissent des graduations en demi-degrés (voir la partie inférieure de la figure 28.15, page 787); d'autres graduations sont solidaires de la lunette (c'est-à-dire solidaires de la partie pouvant tourner avec la lunette). Les 30 graduations de la partie mobile (voir partie supérieure de la figure 28.15) correspondent à 29 graduations sur la partie fixe. La position de la graduation 0 de l'échelle mobile indique la valeur de l'angle mesuré arrondie au demi-degré.

inférieur (valeur d). À cette valeur, il convient d'ajouter le nombre de minutes m indiqué par la graduation de l'échelle mobile; il faut pour ce faire repérer la graduation sur l'échelle mobile qui s'aligne parfaitement avec une graduation de l'échelle fixe (le fait qu'à 30 graduations de l'échelle mobile correspondent 29 graduations de l'échelle fixe assure un décalage pour les autres graduations). L'angle cherché est alors $d + m$; sur l'exemple de la figure 28.15, $d = 207,5^\circ$, soit $207^\circ 30'$ auquel il faut ajouter $m = 18'$, ce qui donne finalement un angle de $207^\circ 48'$. Remarquons que $m = 19'$ ou $m = 17'$ auraient pu convenir aussi; la mesure se fait donc à une minute d'arc près.

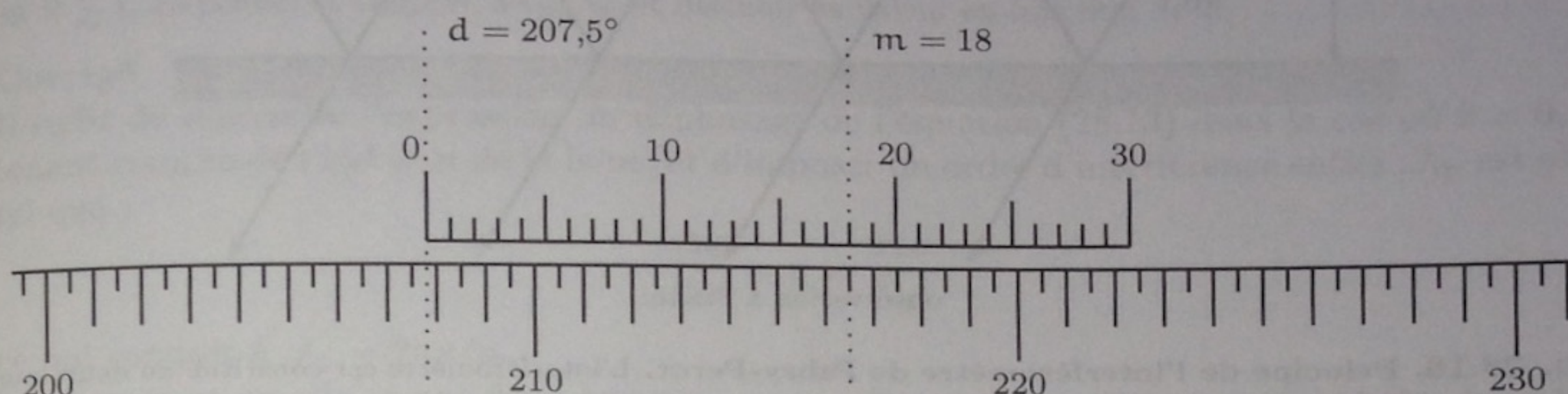


FIG. 28.15. Présentation du vernier.

III. INTERFÉROMÈTRE DE FABRY-PEROT



Charles Fabry

L'interféromètre de Fabry-Perot n'est pas au programme. Il s'agit cependant d'un interféromètre historiquement très important car il a permis à la spectrométrie de faire de grands progrès.

Il s'agit d'autre part d'un exemple assez simple d'interférences à ondes multiples, vous pourriez le retrouver dans un problème de concours. Dans cette hypothèse, la mise en équation est proposée dans le problème 28.1. Vous trouverez ici le principe, les résultats et l'interprétation.

Alfred Perot¹⁵ (1863-1925) et Charles Fabry (1867-1945) sont deux physiciens français. Outre la mise au point de l'interféromètre, Fabry s'est aussi distingué pour avoir montré l'existence de la couche d'ozone.

III.1. Principe

L'interféromètre de Fabry-Perot est schématiquement constitué de deux surfaces hautement réfléchissantes. Ces surfaces sont symbolisées sur la figure 28.16 par deux miroirs, mais une faible partie de la lumière est transmise à chaque incidence sur l'une des surfaces. Il s'agit donc d'un interféromètre qui va permettre de faire interférer une infinité d'ondes entre elles. Plus une onde aura subi de réflexions entre les deux lames, plus son amplitude sera faible. En envisageant le cas limite où le coefficient de réflexion est nul, l'onde incidente est intégralement transmise et il n'y a pas de phénomène d'interférences. *A contrario*, si le coefficient de transmission tend vers zéro, les ondes tendent à avoir la même amplitude et les interférences auront lieu entre une infinité d'ondes qui ont à peu près la même amplitude; le phénomène d'interférences va être extrêmement marqué, avec une amplitude très grande lorsque les interférences sont totalement constructives (par analogie avec ce que nous avons obtenu dans le cas du réseau). C'est cette situation qui est recherchée.

¹⁵ Alfred Perot utilisait l'orthographe « Pérot » mais, d'après le registre de l'état civil, le nom ne prend pas d'accent.