
MP 29

Mesure de longueurs

Robin* et Michel

2011/2012

Prérequis

- optique
- acoustique
- cristallographie

Table des matières

1	Télémétrie laser	2
2	Méthode de la parallaxe	3
3	Télémétrie par ondes acoustiques	5
4	Diamètre d'un fil par diffraction	6
5	Épaisseur d'une lame mince par interférométrie	7
6	Diffraction d'électrons - méthode de Debye-Scherrer	7

Remarques liminaires

Un certain nombre de manipulations ne sont pas ou peu décrites dans la littérature. On a tenté de mettre les références adéquates autant que possible. (Souvent, les modes d'emploi nous sauvent.) Il y a au moins une manipulation de trop dans le plan, qui ne sera pas présentée. Cela dit, il y a encore d'autres possibilités : dans les montages des années précédentes, certains utilisent le banc hyperfréquences pour mesurer la largeur d'un guide d'ondes ; on peut utiliser l'interféromètre de Michelson en lumière monochromatique et déplacer son chariot en comptant les franges pour mesurer son déplacement (cela revient à vérifier que le vernier marche bien) ; on peut aussi utiliser l'effet Faraday pour, en connaissant le champ magnétique dans l'entrefer d'un électroaimant et la constante de Verdet d'un barreau de verre flint, mesurer sa longueur (cela marche aussi avec la loi de Biot).

Quant au plan, nous avons choisi l'originalité (voire l'extravagance) en allant de l'infiniment grand à l'infiniment petit. Mise à part l'évidente permutation des échelles, nous avons du mal à voir ce qui pourrait tenir la route à part cela.

Introduction

La *métrologie* est la science qui étudie la mesure, tant du point de vue théorique que dans ses applications pratiques. Ce nom illustre l'importance paradigmatique de la mesure de longueur (dont l'unité est le *mètre*) en tant qu'archétype du processus de mesure même.

Qu'est-ce qu'une mesure ? Il s'agit de déterminer une valeur numérique qui compare la grandeur d'une quantité physique⁽¹⁾ à celle d'un **étalon**, choisi comme référence arbitraire, et qui définit l'**unité** associée à cette mesure. Dans le cas de la mesure de longueur, l'étalon qu'on utilise est le *mètre*, qui a été défini lors de sa création en fonction du diamètre de la Terre, puis par un prototype en métal⁽²⁾, puis redéfini comme la distance parcourue par la lumière dans le vide en $1/299792458$ s⁽³⁾.

1. Télémétrie laser

référence : notice du boîtier « mesure de la vitesse de la lumière » P18.6

On va illustrer la mesure d'une distance à partir de la définition du mètre par une expérience reproduisant le principe de la télémétrie laser. Il s'agit d'envoyer un faisceau laser pulsé à une fréquence bien choisie⁽⁴⁾ sur un miroir, puis de récupérer le faisceau réfléchi sur un capteur situé juste à côté du laser. On mesure alors le temps d'aller-retour, et, connaissant la vitesse de la lumière, on en déduit une estimation de la distance au miroir. On utilise un système déjà monté⁽⁵⁾ contenant le laser pulsé (néodyme-YAG à 532 nm) et le capteur.

- Il faut alimenter le boîtier et placer le commutateur de modulation sur la position « int 500 kHz ».
- Deux sorties permettent de récupérer (sur un oscilloscope par exemple) le signal correspondant à la commande du laser, et le signal reçu par le photorécepteur.
- Le montage électrique effectué (le laser devrait être allumé), on place un miroir à une distance d_0 (environ 15 cm) du boîtier (qu'on mesure) et on l'aligne de sorte à ce que le faisceau laser tombe sur le capteur. On mesure alors le temps de propagation τ_0 en déterminant avec l'oscilloscope le temps de retard entre les signaux⁽⁶⁾
- On place alors le miroir un peu plus loin (à une distance D d'environ un ou deux mètres, qu'on mesure aussi au mètre ruban ; c'est cette mesure qu'on essaie d'évaluer par télémétrie laser) et on

(1). Qu'est-ce qu'une *quantité physique* ? C'est bien entendu une propriété de la réalité qui peut être quantifiée par une mesure ... La définition est circulaire, et je crains qu'on ne puisse pas y échapper. Par exemple, qu'est-ce que la réalité ?

(2). Une magnifique barre en un alliage de platine et d'iridium, conservée au Pavillon de Breteuil à Sèvres, et dont il existe une reproduction (en aluminium) dans la collection.

(3). En fait, il y a eu plusieurs prototypes en différents métaux ; puis en 1960, le mètre a été redéfini comme $1\,650\,763.73$ fois la longueur d'onde de la lumière émise par la transition atomique entre les niveaux de structure hyperfine $2P_{10}$ et $5D_5$ du Krypton 86. Ensuite, en 1983, la BIMP définit le mètre comme énoncé, fixant ainsi la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide.

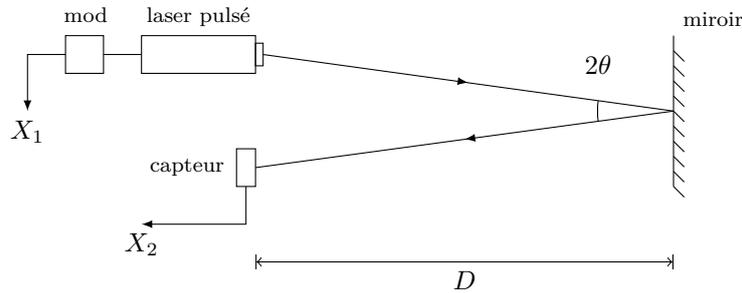
(4). Il faut que je ne sais plus quoi. (Mise à jour : en gros, la fréquence est choisie pour qu'une impulsion dure moins d'un temps de vol, sinon les impulsions se mélangent et on ne peut plus rien faire.)

(5). Il s'agit du boîtier « mesure de la vitesse de la lumière » (P18.6).

(6). Il s'agit, à mon avis, de la principale source d'incertitude. Soyons honnêtes et appelons un chat un chat : les signaux sont moches, surtout celui de retour (il faut moyenniser avec l'oscilloscope pour espérer faire quelque chose) et déterminer sans équivoque le déphasage entre eux est difficile, pour ne pas dire impossible. On obtient les ordres de grandeurs attendus, l'intérêt pédagogique de la méthode est difficile à nier, mais on ne peut pas prétendre *mesurer* une longueur par cette méthode. Tout au plus peut-on espérer l'estimer. (Il y a peut-être un mode opératoire qui rend la manipulation de qualité métrologique ; si c'est le cas, nous sommes vivement intéressés.) On a choisi de mesurer le déphasage entre les instants où les signaux (plus ou moins des créneaux triangulaires) ont diminué de moitié.

réitère l'opération pour obtenir un temps τ . Il peut être utile d'utiliser une lentille de courte focale pour refocaliser le faisceau laser sur le capteur (surtout si le miroir est éloigné).

- Le capteur a un temps de réponse qui fait que $c_0 \neq d_i/\tau_i$. Par contre, ce temps est toujours le même, de sorte qu'on a $c_0 = \Delta d/\Delta \tau$



La laser parcourt une distance $L \approx 2D$ ⁽⁷⁾ à la vitesse c_0 de la lumière dans le vide ⁽⁸⁾, pendant un temps τ qu'on mesure à l'oscilloscope. On estime donc la distance D par

$$D = d_0 + c_0 \frac{\tau - \tau_0}{2}$$

où d_0 et τ_0 correspondent à une mesure de référence permettant de s'affranchir du temps de réponse du capteur ⁽⁹⁾. On mesure $\tau = \pm$ s, ce qui correspond à $D = \pm$ m. Une mesure au mètre ruban donne $D = \pm$ m.

Cette méthode de mesure de longueur est très utilisée, que ce soit dans le génie civil, les applications industrielles ou de grandes pièces doivent être mesurées (construction navale, grosse chaudronnerie), ou la mesure de distance de cible dans le domaine militaire. Elle est cependant limitée par plusieurs facteurs : il faut pouvoir détecter le faisceau réfléchi, ce qui nécessite une importante puissance optique ou un matériau spécifiquement réfléchissant pour de grandes distances. La diffusion perturbe la propagation du faisceau et provoque des réflexions parasites. Enfin, pour des raisons de sécurité, on ne peut pas envoyer un laser de puissance notable n'importe où. Cela limite les distances qui peuvent être atteintes, et en général, cette méthode est utilisée pour mesurer des distances allant du mètre à quelques kilomètres. [Techniques de l'ingénieur R 1333] Une exception notable est la télémétrie laser sur satellites : on place des coins de cube sur les satellites, ce qui permet par exemple de contrôler leur altitude [Techniques de l'ingénieur C 5 010]. On voit aussi que cette méthode ne convient pas pour des mesures de faibles distances : comme la lumière va très vite, le temps de parcours est tout petit, et on a du mal à le mesurer ⁽¹⁰⁾. Il est donc nécessaire de disposer d'autres méthodes pour mesurer des longueurs à des échelles variées, et on va en présenter quelques-unes, en partant du grand et en allant vers le petit.

2. Méthode de la parallaxe

références : [Bellier Optique] : Jean-Paul Bellier, *Capes de Physique et Chimie - Montages de physique - Optique, mécanique, statique des fluides*

Les plus grandes distances mesurées directement ⁽¹¹⁾ (par exemple celles qui séparent la Terre d'étoiles) sont obtenues par la méthode de la parallaxe. On veut mesurer la distance h qui sépare un objet lointain

(7). On a en fait

$$D = \frac{L}{2} \cos \theta = \frac{L}{2} \left(1 - \frac{\theta^2}{2} + \dots \right)$$

de sorte que si le capteur et le laser sont éloignés d'une distance e de l'ordre du centimètre et que le miroir est situé à une distance D de l'ordre du mètre de l'ensemble, on a $2\theta = \arctan e/D \sim 10^{-2}$ rad et l'erreur commise en supposant $L \approx 2D$ vaut environ 0.1 %.

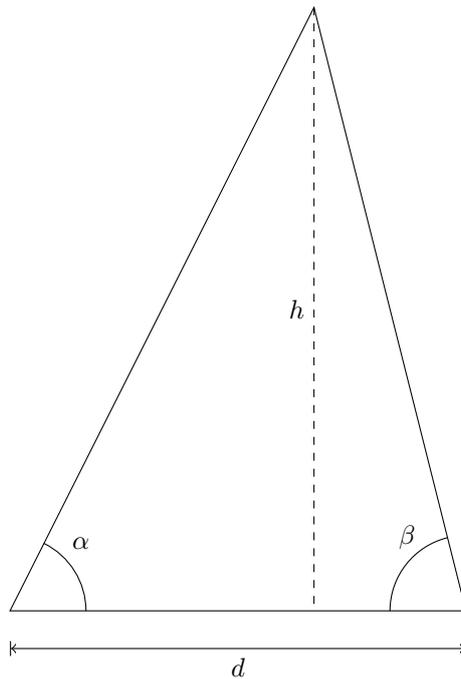
(8). En réalité, la vitesse de la lumière dans l'air est c_0/n où n varie, selon la longueur d'onde, entre 1.000 27 et 1.000 28 à température ambiante. Négliger la différence entre l'indice de l'air et l'indice du vide conduit donc à une erreur d'environ 0.03 %.

(9). On est donc en train d'utiliser la télémétrie laser pour mesurer D avec comme étalon d_0 , et pas d'appliquer la définition du mètre. Cela dit, si le temps de réponse du capteur est connu ($\tau_0 \rightarrow \tau_r$ et $d_0 \rightarrow 0$), on peut s'affranchir de cette référence, et on illustre donc quand même la définition du mètre. Un peu. Bref.

(10). Pour une distance $D = 1$ mm on a $\tau = 7 \times 10^{-12}$ s soit 150 GHz.

(11). En astronomie, des méthodes indirectes sont aussi utilisées. Elles ont l'inconvénient de dépendre d'un modèle particulier (on peut arguer que la méthode de la parallaxe suppose implicitement certaines caractéristiques géométriques de l'espace-temps, mais il faut être de mauvaise foi pour mettre en cause la différence fondamentale entre ces types de mesure) : par exemple, les mesures utilisant les céphéides (étoiles dont la luminosité (moyenne) est proportionnelle à la période de variation de sa luminosité).

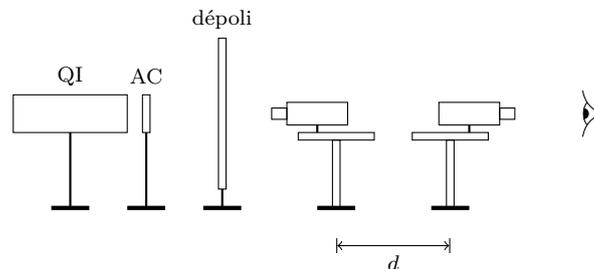
d'un segment de longueur connue. Il s'agit de faire des mesures d'angles, qui permettent de remonter à la distance recherchée.



La trigonométrie permet de montrer que

$$h = d (\tan \alpha \parallel \tan \beta) = d \frac{1}{1/\tan \alpha + 1/\tan \beta}$$

On mesure les angles α et β grâce à deux goniomètres préalablement alignés (dont on n'utilise que la partie « lunette » (et le vernier)).



- On place les goniomètres à une distance relativement faible (de l'ordre de la cinquantaine de centimètres), et on mesure la distance d entre les axes de rotation des goniomètres⁽¹²⁾. On ne translate plus les goniomètres à partir de ce moment.
- On aligne grossièrement les lunettes des goniomètres de manière à ce que l'une regarde vers l'objectif de l'autre.
- On utilise une lampe quartz-iodine (suivie d'un filtre anticalorique et d'un dépoli) pour éclairer un des goniomètres par son oculaire⁽¹³⁾.
- On aligne⁽¹⁴⁾ l'autre goniomètre (on doit éventuellement aussi modifier les réglages angulaires du premier) de manière à ce que les deux réticules soient confondus (il faut régler la lunette du goniomètre où on regarde de manière à ce qu'elle focalise sur le réticule de l'autre goniomètre)⁽¹⁵⁾.

(12). Une méthode qui nous semble raisonnable consiste à utiliser les pieds cylindriques du goniomètre.

(13). Donc à l'envers, en effet.

(14). Il y a un degré de liberté de rotation dans le plan horizontal et un degré de liberté d'inclinaison orthogonalement à ce plan.

(15). Une autre méthode d'alignement, plus facile à montrer au jury mais qui nous a semblé moins précise consiste à envoyer un faisceau laser dans le premier goniomètre (au lieu de la lumière de la lampe QI) et de placer un écran en sortie du deuxième goniomètre (au lieu d'un œil). Il y a un certain nombre de points dus à des réflexions sur les différents systèmes optiques ; pour aligner les goniomètres, il faut s'arranger pour que ces points soient confondus.

- On ôte la lampe, et on note les positions angulaires des goniomètres sur le vernier, à partir desquelles on va faire les mesures.
- On place un objet assez loin des deux goniomètres (par rapport à la distance entre eux), à la bonne hauteur pour le voir avec les lunettes ; puis on pointe les lunettes vers l'objet et on mesure les angles correspondants.

On mesure $\alpha = \pm \quad$ et $\beta = \pm \quad$; on obtient donc ⁽¹⁶⁾ une distance $h = \pm \quad$ m. Pour comparer, on effectue une mesure au mètre ruban, ou avec un télémètre acoustique qui donne $h = \pm \quad$ m.

Cette méthode permet de mesurer des distances allant du mètre à la centaine d'années-lumière ⁽¹⁷⁾. Maintenant, plongeons lentement dans l'infiniment petit.

3. Télémétrie par ondes acoustiques

référence : notice du module « mesure de la vitesse du son dans l'air et dans l'eau » P73.21

La méthode de la parallaxe a l'inconvénient de nécessiter deux points de mesure, et d'être relativement lente. On peut mesurer des longueurs à échelle humaine en utilisant des ondes sonores, selon un principe similaire à celui de la télémétrie laser. Il s'agit d'envoyer une onde ultrasonore sur un récepteur, de détecter l'écho de cette onde, et de calculer le temps de parcours ⁽¹⁸⁾. La détection de l'écho n'étant pas facile à mettre en œuvre, on va illustrer une méthode plus simple en mesurant le temps nécessaire à un son pour se propager d'un émetteur à un récepteur ⁽¹⁹⁾

- On branche un générateur de signaux basses fréquences (GBF) sur le générateur d'ultrasons ⁽²⁰⁾, et on le règle pour qu'il génère des signaux sinusoïdaux d'amplitude 10 V à une fréquence 40.4 kHz (fréquence de fonctionnement de l'oscillateur piézoélectrique), qu'on module en amplitude par un signal créneau à une fréquence de l'ordre de 1 Hz. On visualise le signal généré par le GBF avec un oscilloscope. Dans l'eau, on fait la même chose, mais avec des sinus de fréquence 31.5 kHz.
- On branche le récepteur sur l'autre voie de l'oscilloscope, et on s'arrange pour voir la modulation à 1 Hz.
- En utilisant le déclenchement de l'oscilloscope et le mode « single » (une seule acquisition), on affiche la partie du signal où le son commence à être généré, puis commence à être reçu. Cela permet de mesurer le temps de propagation.

(16). Pour les incertitudes, on effectue le calcul avec la dérivée logarithmique, et en notant $w = \tan \alpha \parallel \tan \beta$, on a

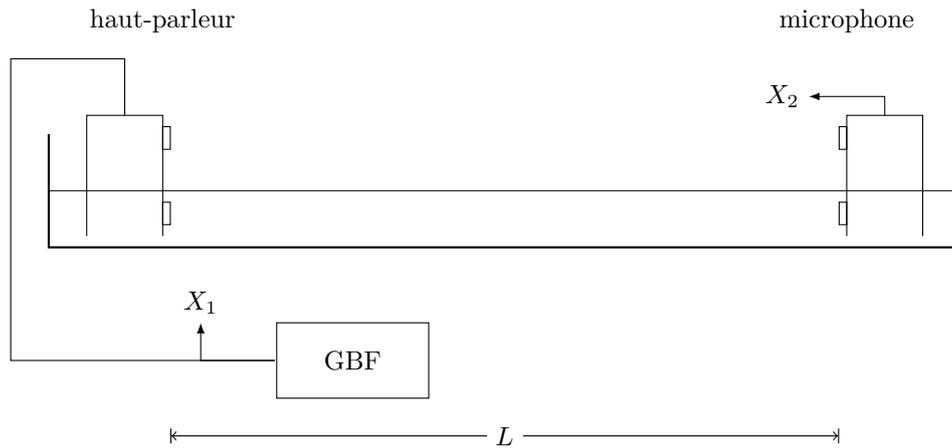
$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{\Delta d}{d} + w \left(\frac{\Delta \alpha}{\sin^2 \alpha} + \frac{\Delta \beta}{\sin^2 \beta} \right)$$

(17). On mesure les angles en pointant vers un objet céleste d'intérêt à un instant t , puis six mois plus tard, pour être de l'autre côté du même diamètre de l'orbite Terre-Soleil (qui n'est pas exactement elliptique, certes). Dans ce cas, $d \approx 300 \times 10^6$ km. Au passage, un parsec est la distance h correspondant à un angle θ d'une seconde d'arc, soit $1/3600^\circ$. Pour h plus grand que quelques centaines d'années-lumières (une a.l. vaut environ 9.4 Pm i.e. 9.4×10^{15} m) les angles sont trop petits. Encore au passage, notre cerveau utilise essentiellement la méthode de la parallaxe pour nous permettre de voir en trois dimensions.

(18). C'est le principe de fonctionnement des chauves-souris et autres sonars.

(19). On a utilisé un système permettant de générer et de recevoir des ultrasons dans l'eau. Cela devrait permettre, en faisant une mesure différentielle dans l'air et dans l'eau, de s'affranchir d'une éventuelle erreur systématique due aux temps d'émission, de réception, de propagation dans les câbles coaxiaux. En fait, ça ne marche pas très bien, du moins lors de nos essais ; alors que la mesure par propagation dans l'air seule marche bien. Si on se passe de la mesure différentielle, on peut très bien utiliser deux microphones et un haut-parleur, ou même un bout de bois et une table, ou un diapason, plutôt que les systèmes à ultrasons. On pourrait d'ailleurs faire la même manip avec le banc hyperfréquences (et illustrer le radar).

(20). On peut utiliser le boîtier de commande prévu pour la manipulation de mesure de la vitesse du son dans l'air et dans l'eau, soit utiliser un GBF et faire ce qu'on veut. Cela nous a paru préférable après avoir bataillé avec le boîtier.



On mesure un temps de propagation dans l'air $t_{\text{air}} = \pm$ ms. Comme la vitesse du son dans l'air est $c_{\text{air}} = 340 \text{ m s}^{-1}$, on en déduit une estimation de la distance L séparant émetteur et récepteur par $L = c_{\text{air}} t_{\text{air}}$, ce qui donne $L = \pm$ m.

On mesure ensuite un temps de propagation dans l'eau $t_{\text{eau}} = \pm$ μs . Comme la vitesse du son dans l'eau est $c_{\text{eau}} = 1480 \text{ m s}^{-1}$, on estime $L = \pm$ m.

En fait, le temps t qu'on mesure n'est pas le temps de propagation du son τ , mais $\tau + T$ où T collecte les temps de réponse des appareils. Si ce temps est le même pour la mesure dans l'air et celle dans l'eau, on peut s'en débarrasser en calculant

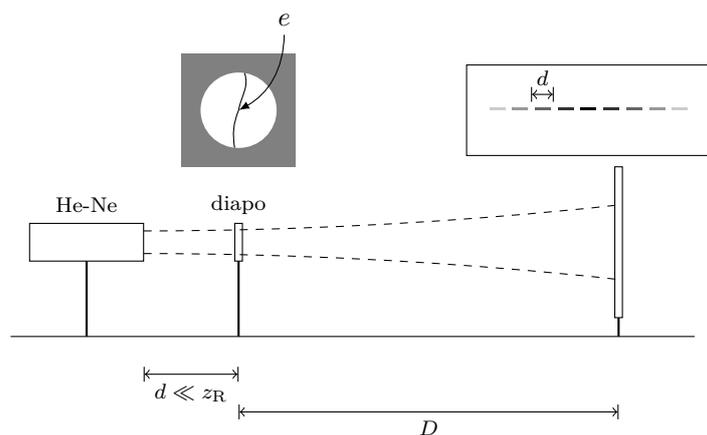
$$L = \frac{\tau_{\text{air}} - \tau_{\text{eau}}}{1/c_{\text{air}} - 1/c_{\text{eau}}} = \frac{t_{\text{air}} - t_{\text{eau}}}{1/c_{\text{air}} - 1/c_{\text{eau}}}$$

ce qui donne $L = \pm$ m.

4. Diamètre d'un fil par diffraction

références : Sextant, Bruhat, *Optique*, [Bellier Optique]

Il s'agit d'utiliser la diffraction par un fil pour en mesurer le diamètre. Pour simplifier, on assimile le fil à un rectangle occultant, et on utilise le théorème de Babinet pour appliquer les résultats correspondant à une fente mince, dans le cadre de la diffraction de Fraunhofer.



- Sur un banc optique, on place un laser (Hélium-Néon de longueur d'onde $\lambda_0 = 632.8 \text{ nm}$, un écran, et un porte-diapositives.
- On place le porte-diapositives le plus près possible du waist du laser (cf. Sextant IV.1.5). On ajoute une diapositive portant un fil de cuivre, et on fait passer le faisceau laser à travers le fil. On s'arrange ensuite pour que l'image soit jolie.
- On mesure la distance D entre la diapositive et l'écran, ainsi que la distance Δx entre deux minima sur l'écran (ou entre $N + 1$ minima en divisant par N).

L'épaisseur du fil de cuivre est donnée par

$$e = \frac{\lambda_0 D}{\Delta x}$$

Pour $D = \pm$ m, on obtient $\Delta x = \pm$ m et donc $e = \pm$ m.

On peut faire cette mesure pour différents fils de diamètres connus⁽²¹⁾ (ce qui valide la méthode de mesure), en préparation, tracer $e_{\text{mesuré}}$ en fonction de $e_{\text{tabulé}}$ (ou en fonction de $1/\delta x$), puis mesurer le diamètre d'un cheveu.

5. Épaisseur d'une lame mince par interférométrie

références : Sextant, Duffait, *Optique*

Pour mesurer l'épaisseur d'objets transparents, on peut utiliser des méthodes interférométriques simples. Il s'agit de régler un interféromètre de Michelson au contact optique, puis d'intercaler une lame (assez mince) dans un des bras, puis de déplacer le chariot de l'interféromètre jusqu'à ce qu'on retrouve le contact optique. On a alors déplacé le chariot d'une distance δ , et

$$e = \frac{\delta}{n - n_{\text{air}}}$$

On utilise une lame de microscope en verre borosilicaté D 263 d'indice optique $n_D = 1.5230$ ⁽²²⁾. Une fois le réglage du Michelson en coin d'air en lumière blanche⁽²³⁾ effectué, il n'y a presque plus rien à faire. Il est nécessaire de déplacer lentement le chariot pour éviter de loucher les franges rectilignes sur la lame ; on constate à mi-chemin des interférences sur le bord de la lame (explications dans [Duffait Optique]).

On mesure une différence de marche $\delta = \pm$ cm, qui correspond à une épaisseur de lame $e = \pm$ μm . On en profite pour constater que les irrégularités d'épaisseur de la lame vont jusqu'à $\Delta e = \pm$ μm . Le fabricant assure que les lames ont une épaisseur comprise entre 130 μm et 170 μm . Par ailleurs, une mesure au Palmer⁽²⁴⁾ donne $e = \pm$ μm .

6. Diffraction d'électrons - méthode de Debye-Scherrer

références : notice du système de diffraction d'électrons Leybold 555 626 (P93.6) ; fiche Phywe⁽²⁵⁾ LEP 5.1.13 sur la diffraction d'électrons ; pour la théorie, N. Ashcroft, N. Mermin *Physique des solides* ; L. Landau et E. Lifchitz, *Électrodynamique des milieux continus* (ch. XV) ; V. Pecharsky et P. Zavaliy *Fundamentals of Powder Diffraction and Structural Characterization of Materials*, et Bruhat, *Optique*

Allons encore plus loin dans notre exploration des petites échelles de longueur ! On va estimer les paramètres de maille des couches de graphène composant le graphite par diffraction d'électrons sur une poudre de graphite (méthode de Debye-Scherrer). En fait, les distances auxquelles on va pouvoir remonter sont les distances entre plans réticulaires du graphène.

- Il faut disposer du tube pour la diffraction d'électrons, du porte-tube adapté, et d'une alimentation haute tension adaptée (les références sont dans la notice), et placer le tube dans le porte tube.
- On branche l'alimentation au tube en suivant scrupuleusement les instructions.
- On allume l'alimentation et on règle la différence de potentiel (si l'alimentation est la bonne, elle varie entre 0 V et 5 kV, qui est précisément la tension maximale à imposer au tube.
- On observe de magnifiques anneaux de diffraction sur l'écran fluorescent⁽²⁶⁾

(21). On dispose de fils de diamètres 40 nm, 60 nm, 80 nm, 100 nm and 120 nm (Jeulin) dans la collection.

(22). Un des rapports du jury précise qu'il est ridicule de faire une mesure interférométrique pour déterminer l'épaisseur d'une lame dont on ne connaît pas précisément l'indice. En effet, l'indice du « verre » varie entre 1.4 et 1.8, ce qui correspond à une erreur d'un facteur 2. Au passage, l'indice dépend de la longueur d'onde ... je ne sais pas quelle longueur d'onde utiliser pour le calcul dans le cas du coin d'air en lumière blanche, il y a probablement une modification bizarre de la figure d'interférence, qu'on passe sous silence et dans la case incertitudes générales. On prend la valeur donnée pour la raie D du sodium. Dans les applications industrielles, on utilise un éclairage monochromatique (ce qui nécessite de faire la mesure progressivement), ou on étudie l'intensité de la figure d'interférence (cf. [Techniques de l'ingénieur R333]).

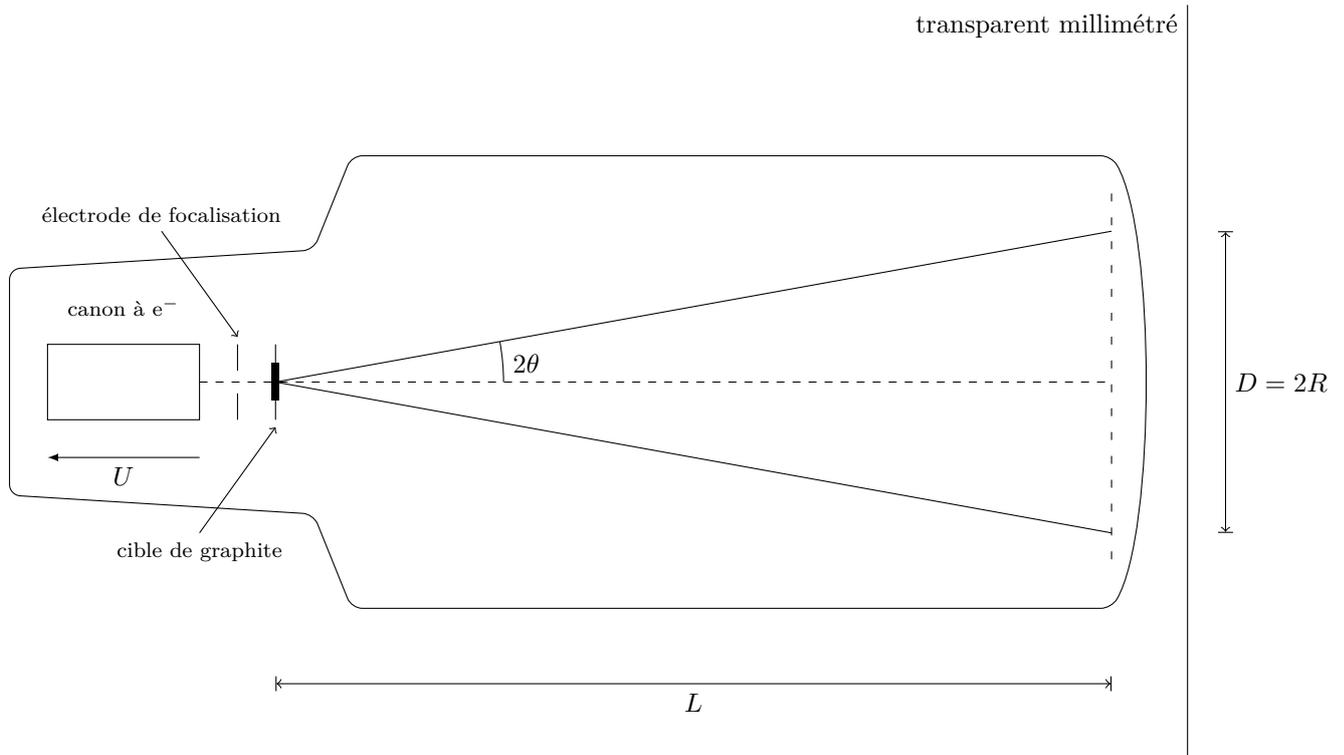
(23). Il faut utiliser la lumière blanche pour avoir un point de repère sans équivoque, i.e. savoir précisément où est l'ordre zéro.

(24). On appelle aussi cet appareil micromètre. Son nom vient de Jean-Laurent Palmer, qui l'a inventé (1848). (Mise à jour : au passage, d'après les correcteurs, il ne faut pas confondre *vernier* (comme sur un pied à coulisse) et *vis micrométrique* (comme sur un Palmer ou un interféromètre de Michelson) ; et il faut bien sur savoir en expliquer le fonctionnement.)

(25). Il y a un classeur Phywe dans la BU Agreg où sont les fiches correspondant à toutes les manipulations proposées par Phywe, même celles que l'on n'a pas. On peut aussi trouver ces documents sur internet.

(26). On peut aussi s'extasier en sachant qu'on est en train de faire une *fucking electron diffraction experiment, young man* ! (Bragg) et qu'on démontre donc le comportement ondulatoire de la matière. Au passage, approcher (doucement) un aimant du tube permet de dévier le faisceau d'électrons (le spot bouge), et donc de prouver qu'il s'agit d'un faisceau de particules chargées ($q\vec{v} \times \vec{B}$), donc pas de photons par exemple.

- On annule la différence de potentiel pour ne pas abimer l'écran fluorescent en laissant trop longtemps le spot central dessus.
- Pendant toute la manipulation, on fait attention à ne pas faire subir de choc à l'ampoule (elle est sous vide, fragile, et risque d'imploser si on tape dessus). On évite d'imposer une tension supérieure à 5 kV, seuil au delà duquel il y a production de rayons X néfastes.
- En présentant la manipulation, on veille, par principe, à ne pas diriger le faisceau vers le jury, bien qu'il n'y ait pas de risque a priori.
- On place un transparent millimétré devant l'écran fluorescent (pour pouvoir faire des mesures de longueur à notre échelle, qui permettront d'obtenir des estimations de longueurs très petites).



La loi de Bragg-Wulff donne une relation entre la longueur d'onde λ des électrons, l'écartement d des plans réticulaires du graphite, l'angle de Bragg θ (i.e. le demi-angle de déviation des anneaux de diffraction), et l'ordre n de l'anneau

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

La distance séparant l'échantillon de graphite en poudre et l'écran étant notée L , le rayon d'un anneau est donné par

$$2\theta \approx \tan 2\theta = \frac{R}{L}$$

et la longueur d'onde (de de Broglie) est reliée à la différence de potentiel U imposée par le générateur par

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2meU}}$$

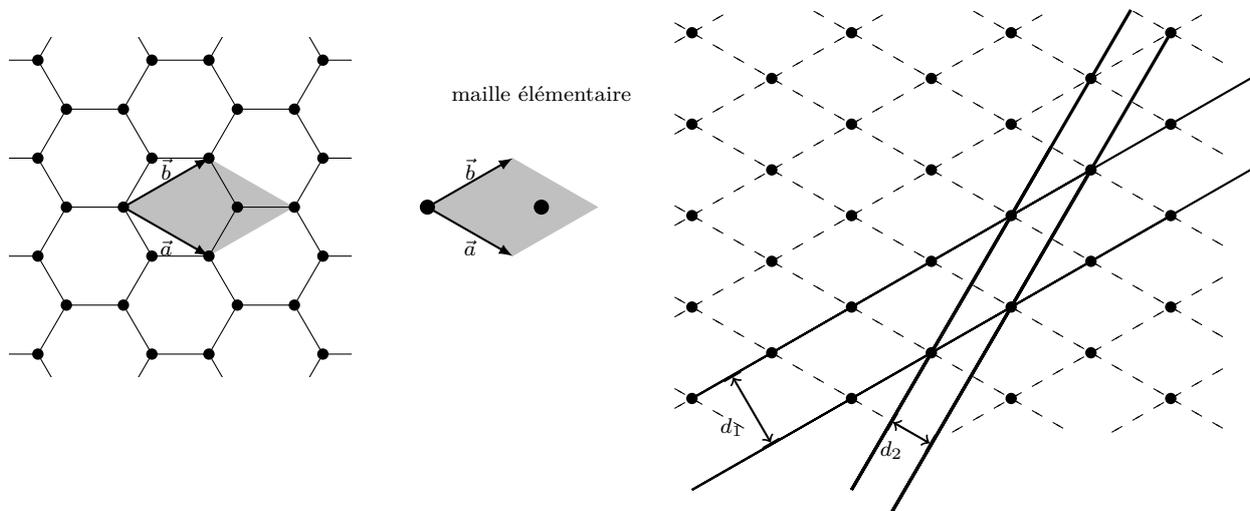
où h est la constante de Planck, p l'impulsion des électrons, m leur masse, e la charge élémentaire. On a donc

$$\underbrace{\frac{1}{R}}_Y = \underbrace{\frac{\sqrt{2meU}}{Lh}}_X \cdot d$$

la grandeur qu'on contrôle étant U et celle qu'on mesure R . En traçant Y en fonction de X , on devrait obtenir une droite de pente d (ce qu'on fait en préparation).

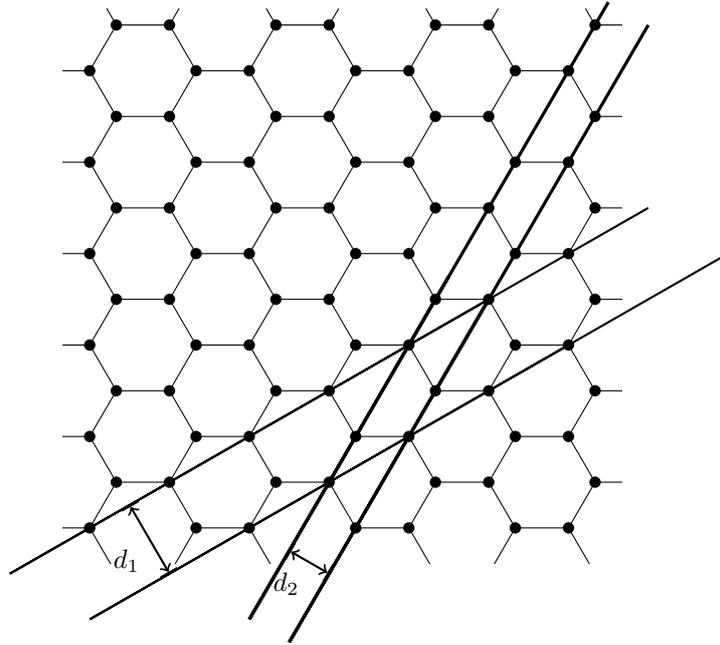
On observe deux anneaux, qui correspondent aux deux premières familles de plans réticulaires du graphène⁽²⁷⁾ (les distances interréticulaires correspondantes sont notées $d_1 = 213 \text{ pm}$ et $d_2 = 123 \text{ pm}$), et on n'observe que le premier ordre ($n = 1$), et on n'observe pas les autres pics de Bragg soit parce qu'ils correspondent à des distances trop grandes (par rapport à celle de l'écran) soit parce qu'ils ne provoquent pas assez de luminosité, ou encore parce que la figure de diffraction est trop petite⁽²⁸⁾. La principale source d'incertitude est l'élargissement des anneaux⁽²⁹⁾ ; par ailleurs, l'écran étant courbe, il s'ajoute une légère erreur due à la lecture ; enfin, il y a une incertitude sur la valeur de la différence de potentiel imposée entre l'anode et la cathode du canon à électrons⁽³⁰⁾

(27). Pour bien représenter les plans réticulaires, il faudrait éviter de les dessiner sur le graphène, et plutôt dessiner le réseau de Bravais correspondant (définis comme les plans contenant au moins trois points non alignés du réseau de Bravais (en dimension 3)), qui est un réseau hexagonal primitif (hp), avec deux atomes par maille (qui ne sont donc pas équivalents). Il faudrait donc plutôt dessiner la figure de droite.



Cela explique pourquoi on ne prend pas en compte tous les plans possibles qui passent par une rangée d'atomes de carbone. (28). En particulier, on devrait pouvoir remonter à la distance entre deux plans de graphène. En fait, ces plans sont séparés de 335.4 pm et sont organisés dans une structure de type ABAB, où le plan B est décalé par rapport à A de sorte qu'un atome de carbone de B soit au milieu d'un hexagone de A. La distance interréticulaire est donc 670.8 pm , ce qui devrait provoquer un anneau dont le diamètre est au mieux légèrement inférieur au centimètre, ce qui n'est pas exploitable (il y a une lueur diffuse sur environ un demi centimètre autour du spot géométrique).

(29). L'élargissement des anneaux, qui limite essentiellement la résolution de la mesure, est dû à plusieurs facteurs (outre les facteurs de forme et de structure, qui contiennent des informations pertinentes) : la divergence du faisceau d'électrons et son écart à la monochromaticité ; la taille ℓ des cristallites composant la poudre (le cristal ne peut plus être considéré comme infini, avec la formule de Sherrer, on obtient (à un facteur numérique près) la largeur à mi-hauteur $\lambda/(\pi \ell \cos \theta)$). [Pecharsky] (30). Nous avons utilisé l'afficheur de l'alimentation pour déterminer quelle tension est appliquée (d'où une erreur de 2% à 10%). Il serait plus sérieux d'utiliser un instrument de mesure, j'ai nommé le Fluke 187 (Comme disait Otto Stern pendant ses travaux avec Walther Gerlach sur la quantification du spin, « Use the Fluke 187. »), mais nous n'avons pas eu le temps de vérifier s'il supporte des tensions de l'ordre du kilovolt. Demain (cela correspond à aujourd'hui pour vous, du moins à la première lecture et dans la majorité des cas) peut-être. (Mise à jour : il existe une sonde qui permet de mesurer des tensions importantes au voltmètre, mais qui nécessite un certain nombre de manipulations (il faut utiliser une pointe de mesure métallique pour la connexion) et augmente de beaucoup les incertitudes (et on n'a pas trouvé de notice).)



Pour une tension $U = \pm$ kV, on lit $R_1 = \pm$ cm et $R_2 = \pm$ cm, qu'on reporte sur la courbe tracée en préparation. On tire de ces courbes des estimations des distances interréticulaires $d_1 = \pm$ pm et $d_2 = \pm$ pm.

Conclusion

Pendant ce montage, on a illustré des méthodes de mesure de longueurs allant du parsec (10^{16} m) à l'Angström (10^{-10} m), soit vingt-six décades. Les mesures de longueur sont essentielles en ce que la distance est ce qui est le plus accessible à l'intuition, de par notre habitude à utiliser la vision comme organe principal de perception et de cognition. De l'ensemble de ces méthodes, on peut faire ressortir une caractéristique commune essentielle, qu'on avait déjà évoquée dans l'introduction : directement ou indirectement, on se réfère toujours à une référence, un étalon auquel on se rapporte pour la mesure. Dans l'expérience de diffraction de la lumière, par exemple, on ne fait que reporter la mesure d'une épaisseur très petite à une échelle où une simple règle est utilisable. De même, la mesure de la parallaxe ne donne accès à une distance que dans la mesure où celle qui sépare les deux goniomètres est connue. Cette façon de procéder est générale en métrologie, où il s'agit moins de « mesurer des grandeurs physiques » que de mesurer des *rappports* entre des grandeurs physiques. Ainsi, nous dépendons, pour faire le lien entre l'expérience et la théorie, du système d'unités dans lequel on travaille, dont le caractère arbitraire est évident. Se détacher autant que possible de cet arbitraire permet d'accéder à une meilleure compréhension des phénomènes physiques et de leurs modélisations. C'est l'objet de l'analyse dimensionnelle et le but de l'introduction de paramètres sans dimension.