

Avertissements :

- **Ce TP doit être préparé avant devenir manipuler. Si cette préparation n'est pas faite, il n'est pas possible d'espérer manipuler à profit.**
 - **Enfin, il est demandé une rédaction personnelle du compte rendu.**
-

Ce texte comprend plusieurs parties distinctes :

- **A : Travail préliminaire a effectuer ;**
- B : Description (et liste) du matériel utilisé et buts du TP ;
- C : Rappels théoriques concernant l'appareil ;
- D : Réglage de l'appareil et mesures à effectuer ;
- E : Exploitation des résultats.

Partie A : travail préliminaire à effectuer

Travail préliminaire : lire attentivement tout le texte, refaire (au besoin) toutes les démonstrations nécessaires et préparer les questions qui se trouvent dans celui-ci.

Cette préparation devra apparaître dans le compte-rendu, obligatoirement rendu en fin de séance.

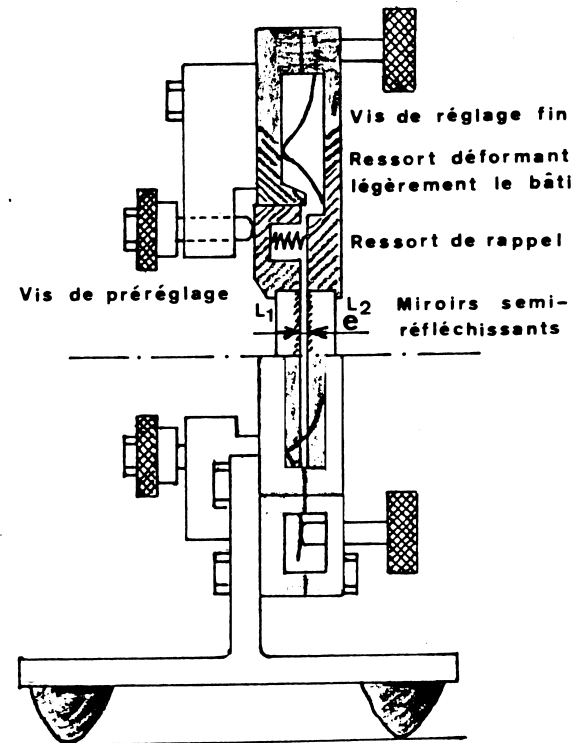
Partie B : description (et liste) du matériel utilisé, buts du TP

1) Description de l'interféromètre

Il est constitué essentiellement par deux lames de verre planes L_1 et L_2 séparées par une lame d'air d'épaisseur e réglable. Sur les faces des lames de verre en regard, un dépôt métallique de très faible épaisseur rend celles-ci partiellement réfléchissantes (miroirs semi-réfléchissants).

L'appareil comporte deux dispositifs pour le réglage du parallélisme des lames de verre :

- l'un pour le pré-réglage comprend trois vis moletées, au pas de 1 mm, dont une est graduée en $\frac{1}{10}$ ème de mm (molettes côté écran de projection) ;
- l'autre pour le réglage fin comprend 3 vis moletées qui appuient chacune sur un ressort déformant légèrement le bâti.



2) Liste du matériel nécessaire aux différentes mesures.

- interféromètre Fabry-Pérot, protégé par un carter en bois qui supporte une lentille collimatrice ($f' = 150$ mm) et une lentille de projection ($f' = 491$ mm) ;
- tablette support en bois, avec écran de projection ;

Pour le pré-réglage :

- un laser Hélium-Néon ;
- une lentille mince convergente de distance focale image $f_1' = 5$ mm ;
- une lentille mince convergente de distance focale image $f_2' = 50$ mm ;

Réglage à l'aide de la lampe à vapeur de sodium (Na) et mesures des anneaux obtenus avec cette source :

- lampe Na et son alimentation
- carter protecteur
- lentille mince convergente, de distance focale image $f_3' = 50$ mm ;
- une lentille mince convergente de distance focale image $f_4' = 200$ mm ;

Mesure des anneaux obtenus avec la lampe à vapeur de mercure (Hg) :

- lampe à vapeur de mercure (Hg) ;

- filtres colorés montés sur glissière ;

3) Buts du TP :

- vérifier expérimentalement le modèle mathématique expliquant la théorie de l'interféromètre ;
- régler le dispositif et mesurer les grandeurs caractéristiques pour chaque source utilisée ;
- mesurer l'épaisseur d'une lame d'air de quelques centaines de micromètres avec une incertitude de l'ordre du $\frac{1}{100}$ ème de micromètre.

Partie C : rappels théoriques concernant l'appareil

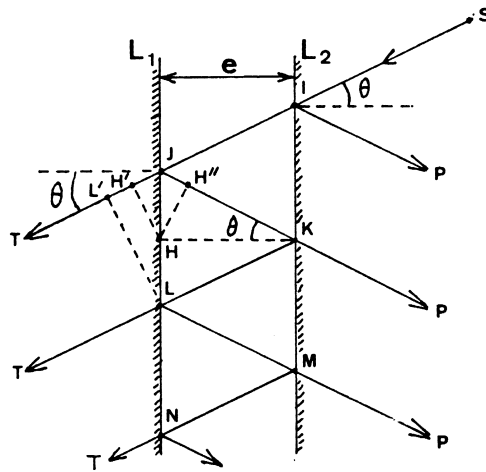
1) Relations fondamentales

A) Position angulaire des anneaux d'interférences

Supposons les lames L_1 et L_2 rigoureusement parallèles et une source S ponctuelle envoyant sous une incidence θ un rayon lumineux SIJT à travers l'instrument. Ce rayon se réfléchit partiellement en I suivant IP, en J suivant JKP, en K suivant KLT...

Tous les rayons transmis JT, LT, NT... d'une part, et réfléchis IP, KP, MP.... d'autre part sont parallèles, ces derniers étant d'ailleurs perdus pour une observation par transmission.

Evaluons la différence de marche δ entre deux rayons voisins transmis, par exemple, entre JT et LT.



En J, les trajets se séparent, en LL' les chemins se rejoignent suivant l'onde plane LL'.

Nous aurons donc $\delta = JKL - JL' = 2 (JK - JH') = 2 (JK - JH'') = 2H''K$.

Pour que les rayons transmis interfèrent tous en phase, il faut satisfaire :

$$2e \cos \theta_k = k\lambda \quad (2)$$

où k est un entier positif pouvant être très grand (plusieurs milliers).

Pour e et λ donnés, la condition (2) ne fait intervenir que l'angle θ_k du rayon incident avec la normale commune aux deux lames L_1 et L_2 :

- l'image d'interférence obtenue sera de révolution autour de cette normale et nous observerons des anneaux brillants, rejetés à l'infini (puisque les rayons qui interfèrent sont parallèles entre eux) de rayon angulaire (ou diamètre apparent) θ_k .
- tous les points sources S donnent la même image d'interférences, donc ils peuvent être multiples et non cohérents entre-eux sans que les anneaux se brouillent. Nous pourrions utiliser une source étendue bien lumineuse, les anneaux d'interférence seront alors bien contrastés et faciles à observer.

Pour l'observation commode des anneaux, on en recueille l'image dans le plan focal image d'une lentille de grande distance focale image ($f \approx 500$ mm).

Au centre de la figure d'interférences, l'ordre n 'est pas un entier. Donc, en général le centre n'est ni brillant ni sombre. Au centre $\theta = 0$, donc $2e \cdot 1 = p_0 \lambda$, avec p_0 non entier en général.

$$2e = p_0 \lambda \quad (3)$$

Et en retranchant (2) de (3), on a :

$$2e(1 - \cos \theta_k) = (p_0 - k) \lambda \quad (4)$$

B) Contraste et finesse des anneaux

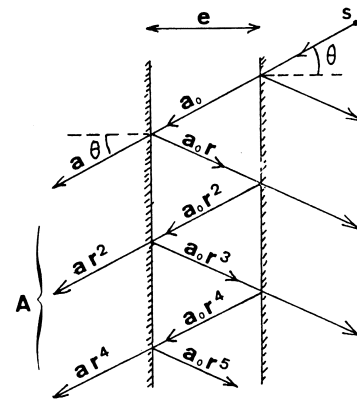
D'après l'équation (1), la différence de marche entre deux rayons émergents successifs vaut $\lambda = 2e \cos \theta$. Donc le déphasage entre ces deux rayons vaudra :

$$\varphi = 2\pi \frac{\delta}{\lambda} = 2\pi \frac{2e \cos \theta}{\lambda} \quad (5)$$

Si nous tenons compte des amplitudes en progression géométriques décroissante, de l'infinité des rayons émergents, la théorie de l'addition de ces rayons, faite dans le cours de physique nous montre que :

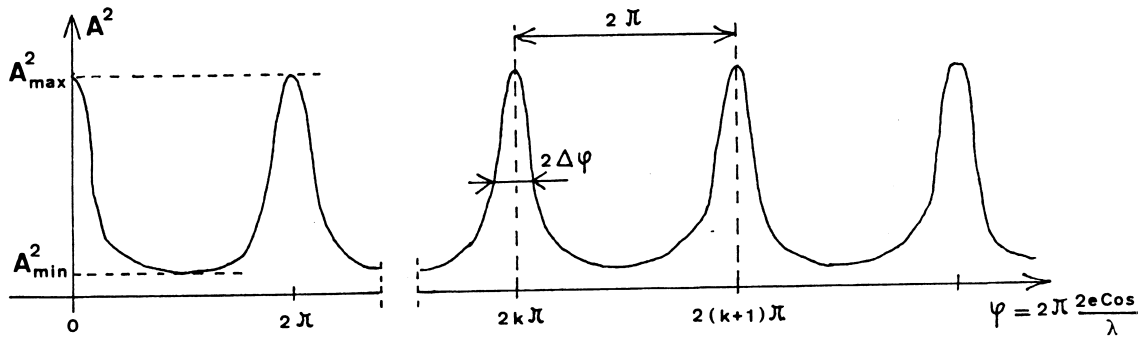
L'amplitude A du faisceau émergent vérifie :

$$A^2 = \frac{a^2}{(1 - R)^2 + 4R \sin^2 \frac{\varphi}{2}} \quad (6)$$



Equation dans laquelle $R = r^2$ est le carré du coefficient de réflexion des lames, puisqu'un rayon qui sort subit deux réflexions de plus que celui qui le précède.

La courbe $A(\varphi)$ a l'aspect :



La position des pics d'éclairement satisfait $\varphi = 2k\pi$, soit $2e \cos \theta_k = k\lambda$, ainsi on retrouve l'équation (2).

Contraste :
$$C = \left(\frac{A_{\max}}{A_{\min}} \right)^2 = \left(\frac{1+R}{1-R} \right)^2 \quad (7)$$

Pour e et λ donnés, A^2 ne dépend que de θ et le contraste indique le rapport entre l'éclairement des zones les plus éclairées (anneaux brillants) et l'éclairement des zones les plus sombres.

Exemples : $r = 0,85$ $R = (0,85)^2 = 0,7225 \Rightarrow C = \left(\frac{1,7225}{0,2775} \right)^2 = 38$

Finesse d'un pic :

$$N = \frac{\text{intervalle entre 2 pics successifs}}{\text{largeur à mi-hauteur}} = \frac{2p}{2Dj} = \frac{p \sqrt{R}}{1-R} \quad (8)$$

On peut avoir une idée approximative de la signification de la finesse, en divisant la distance séparant deux anneaux successifs par l'épaisseur estimée de ceux-ci.

N grand \Rightarrow anneaux fins et brillants, donc faciles à pointer.

Exemple : $r = 0,85$ $R = 0,7225 \Rightarrow N = \frac{p \cdot 0,85}{0,2775} = 9,6 \approx 10$

Pour les meilleurs interféromètres, N est limité à environ 50.

2) Conséquences des équations (2) et (4)

Si, pour un λ donné, on se fixe k , en suivant des yeux un anneau brillant, tout en faisant diminuer e , l'équation (2) nous donne :

$k\lambda$ constant $\Rightarrow e$ décroît $\Rightarrow \cos \theta_k$ augmente $\Rightarrow \theta_k$ diminue \Rightarrow le diamètre des anneaux semble diminuer.

Donc, quand on rapproche les lames, les anneaux diminuent de diamètre et disparaissent au centre

Inversement, les anneaux apparaissent au centre et se dilatent quand on écarte les lames.

Remarque : cette conséquence permet de régler l'interféromètre de Michelson au contact optique.....

Par ailleurs, l'équation (4) montre que l'expression :

$$y = 1 - \cos \theta_k = (p_0 - k) \frac{\lambda}{2e} \quad (8) \quad \Leftrightarrow y \text{ est une fonction affine de l'entier } k.$$

Partie D : réglage de l'appareil et mesures à effectuer

Les mesures doivent être faites très rapidement, car le réglage de l'interféromètre est très sensible. Dans l'ordre, on effectuera :

- le préréglage à l'aide du laser ;
- la mesure des anneaux obtenus avec le laser ;
- le réglage et la mesure des anneaux avec la lampe à vapeur de sodium ;
- le réglage et la mesure des anneaux avec la lampe à vapeur de mercure ;
- une deuxième série de mesures, en respectant l'ordre, pour chacune des sources : laser, sodium et mercure ;
- une troisième mesure avec la lampe à vapeur de sodium servira à contrôler que l'interféromètre ne s'est pas dérégulé entre temps.

1) Préréglage à l'aide du laser

Attention aux yeux : il ne faut jamais regarder directement le faisceau laser, même si ce dernier est de faible puissance...

Le but du réglage est de réaliser le parallélisme de la lame. On effectue d'abord un réglage approché au moyen du laser (Hélium-Néon). Le réglage parfait sera obtenu avec une source étendue, par exemple à vapeur de sodium.

L'interféromètre de Fabry-Pérot (F.P.) comporte sur chacune des faces trois vis de réglage : réglage grossier d'un côté et réglage fin de l'autre. Sur les modèles comportant une variation d'épaisseur, par vis micrométrique, seules deux vis sont réglables de chaque côté.

En se plaçant au départ avec une épaisseur **e voisine de 0,2 mm**, éclairer le F.P. avec le faisceau laser sous une incidence normale, comme décrit sur le schéma ci-dessous (figure 1). **On observe sur l'écran** une série de taches lumineuses correspondant aux réflexions multiples sur les deux faces de la lame (on observe d'ailleurs plusieurs séries de taches plus faibles provenant de réflexions sur les faces externes des lames de verre qui sont légèrement prismatiques afin de rejeter ces réflexions parasites).

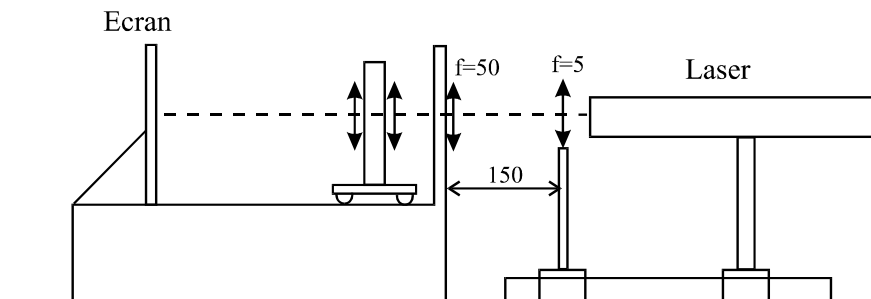


Figure 1 : schéma du montage, la source étant le laser Hé-Né

Placer les vis de réglage fin à mi-course et agir sur le réglage grossier pour n'obtenir qu'une seule tache. On peut améliorer le parallélisme

obtenu en élargissant (avec une lentille de très courte focale) le faisceau laser : on doit observer des franges rectilignes que l'on écarte jusqu'à avoir des anneaux très fins.

Quand les anneaux sont bien visibles sur tout leur pourtour, agir sur les molettes « petits mouvements », pour obtenir finalement un contraste bien marqué des anneaux et une grande netteté sur toute la circonférence.

2) Mesure des rayons des anneaux avec le laser.

Le réglage doit permettre d'observer au moins 6 anneaux complets. Pour mesurer leurs diamètres :

- placer la feuille de mesure, en centrant au mieux le cercle et les axes dessinés sur celle-ci sur le système d'anneaux ;
- **pointer soigneusement, avec un crayon bien taillé deux diamètres perpendiculaires de chaque anneau, en marquant le milieu de la partie éclairée ;**
- procéder de la même manière pour les 6 premiers anneaux du système, en partant du centre.

Attention : la qualité des mesures faites avec le laser conditionne la précision des résultats obtenus sur la mesure de e . Il est donc fortement recommandé de soigner les pointés.

3) Mesure des rayons des anneaux avec la lampe à vapeur de sodium.

Il faut une dizaine de minutes pour que la lampe prenne son intensité lumineuse normale.

Le montage à réaliser est décrit ci-dessous (figure 2) :

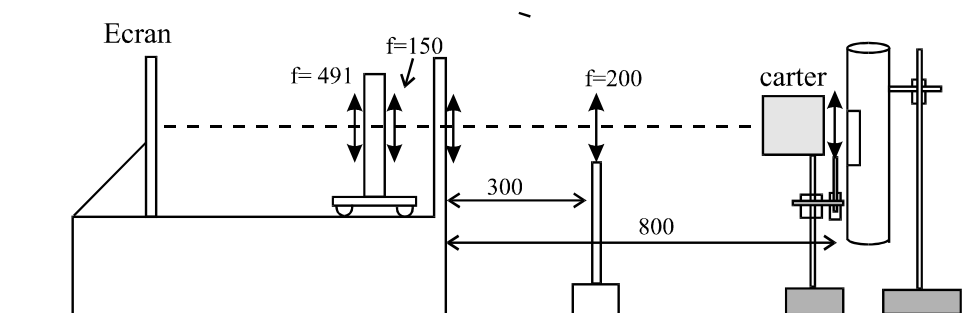


Figure 2 : schéma du montage, la source étant la lampe à vapeur de sodium

Mode opératoire :

- Placer la lampe à environ 80 cm de la tablette support afin de limiter l'influence nocive d'une source de chaleur près de l'interféromètre. une lentille $f = 150$ mm est montée à demeure sur le carter du F.P.
- interposer entre la lampe et l'interféromètre :
 - une lentille $f = 50$ mm munie d'un carter contre la lampe à sodium ;
 - une lentille $f = 200$ mm, diamètre 120 mm à environ 30 cm de la tablette.
- aligner convenablement les centres de ces différentes lentilles et mettre au point la lentille $f = 200$ pour observer une tache lumineuse d'environ 15 cm de diamètre sur l'écran.

L'interféromètre ayant été réglé pour le laser, les faces des parois semi-réfléchissantes sont parallèles entre elles, et l'on doit observer les anneaux.

Si ce n'est pas le cas : on doit au moins observer des stries d'interférences dans le champ lumineux, à travers les lames. Manoeuvrer délicatement les deux vis de réglage fin pour que les stries s'écartent et que les anneaux apparaissent.

- En se plaçant bien dans l'axe du F.P. et en fermant un œil, centrer au mieux la figure d'interférences en anneaux ainsi obtenue.
- Vérifier que le socle de l'interféromètre est en butée contre l'extrémité de la tablette : l'écran de projection est alors dans le plan focal de la lentille $f = 491 \pm 1$ mm ($= \Delta f$) fixée sur le carter de l'interféromètre.
- Si les réglages précédents sont bons, on doit apercevoir sur l'écran des anneaux ou des arcs d'anneaux, au moins d'une manière floue. Agir maintenant très délicatement sur l'une des deux vis « grand mouvement » tout en observant attentivement l'image sur l'écran, afin d'améliorer la visibilité, puis la netteté des anneaux. Passer à la deuxième vis et procéder de la même manière, puis revenir à la première, ...etc. jusqu'à obtenir le meilleur réglage possible.

Attention : si les anneaux disparaissent complètement lors de la rotation d'une vis, ne pas abandonner le réglage de celle-ci avant de les avoir fait réapparaître, bien visibles sur l'écran. Si l'on passe prématurément à la vis suivante, on risque d'être obligé de revenir tout au début du réglage.

- quand les anneaux sont bien visibles sur tout leur pourtour, agir sur les molettes « petit mouvement » pour obtenir finalement un contraste bien marqué des anneaux, une grande netteté sur toute la circonférence, et un **dédoublement bien visible** de chaque anneau.
(la lumière jaune du sodium est constituée en fait, dans le visible, de deux raies de longueurs d'ondes très voisines et l'on obtient donc deux systèmes d'anneaux imbriqués l'un dans l'autre. Exceptionnellement, ces systèmes peuvent être superposés : cela arrive lorsque la distance e entre les miroirs du F.P. est un multiple entier de $e_0 = 0,3$ mm.

Remarque : un critère de très bon réglage est le suivant : quand le réglage précédent est parfait, un léger déplacement de la lampe ou de la lentille $f = 200$ mm ne doit pas faire varier

le diamètre des anneaux, notamment celui du premier anneau pour lequel ce critère est très sensible.

Explication : quand le réglage est parfait, l'aspect de la figure d'interférences ne dépend pas de la position de la lampe puisque l'image est rejetée à l'infini par la composition des rayons parallèles entre-eux.

- mesurer les diamètres des 5 ou 6 premières paires d'anneaux (jusqu'à $D \approx 80$ ou 90 mm)
- pointer avec un crayon bien taillé en suivant la même démarche que celle utilisée avec le laser.

4) Mesure des anneaux avec la lampe à vapeur de mercure

Il faut faire les mesures très rapidement. En effet, la lampe à vapeur de mercure demande environ une minute pour prendre son éclat normal, et hélas, après 4 à 5 minutes de fonctionnement, la pression monte dans la lampe et les raies spectrales s'élargissent au point que les anneaux se brouillent et ne sont plus observables. On ne disposera donc que de très peu de temps pour faire les mesures des diamètres d'anneaux. Eteindre la lampe deux à trois minutes puis la rallumer pour observer à nouveau les anneaux.

Le montage est peu différent du précédent : il suffit d'oter la lentille $f = 200$ mm et de placer la source avec les filtres montés sur le support en bois.

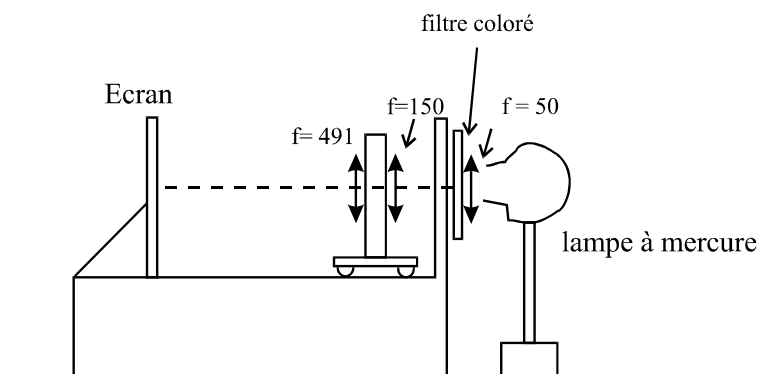


Figure 3 : schéma du montage, la source étant la lampe à vapeur de mercure

- Placer tout d'abord le filtre jaune. Constaté qu'il y a, comme pour le sodium, deux longueurs d'ondes jaunes. Mesurer ensuite les diamètres des 5 ou 6 anneaux visibles pour chaque système, de la même manière que pour les autres sources ;
- Ensuite, placer le filtre vert et recommencer la mesure (un seul système d'anneaux) ;
- Enfin placer le filtre bleu (un seul système d'anneaux) et mesurer les diamètres correspondants.

5) Recommencer au plus vite une seconde fois toute la série de mesures, en respectant l'ordre des sources utilisées.

6) pour vérifier que l'interféromètre ne s'est pas déréglé pendant une série de mesures, régler une troisième fois le dispositif pour la lampe à vapeur de sodium.

Partie E : exploitation des résultats expérimentaux

1) Diamètres des différents anneaux

Une fois les trois séries de pointés terminées, mesurer sur les feuilles les diamètres D en retenant pour chaque anneau la moyenne des deux diamètres perpendiculaires. Reporter ensuite ces résultats sur les feuilles prévues. Pour les anneaux jaunes du sodium et du mercure, tenir compte du fait que deux systèmes sont imbriqués l'un dans l'autre, le premier système étant désigné jaune A et le second jaune B.

Remarque : c'est d'après les calculs faits à l'ordinateur que l'on pourra décider lequel correspond à λ_1 et lequel correspond à λ_2 .

2) Saisie des valeurs sur à l'ordinateur

Les valeurs sont traitées à l'aide du logiciel Excel, qui est un tableur. Pour saisir les valeurs, il faut ouvrir Excel, et ouvrir ensuite le fichier Fabry, situé dans le répertoire physique\tpélèves.

Il suffit ensuite de saisir les valeurs obtenues au cours de ce TP. La feuille de calcul fera ensuite apparaître les valeurs cherchées. Il suffira d'imprimer cette feuille de calcul et de la glisser dans le compte rendu, rendu en fin de séance.

3) Interprétation des résultats

- Si des erreurs apparaissent dans la feuille de calcul, c'est parce que les systèmes jaune A et jaune B sont permutés. Pour remédier au problème, il suffit de rentrer pour jaune A ce qui avait été rentré pour jaune B et inversement pour jaune B.
- Excel calcule aussi une estimation de l'incertitude ΔD sur le diamètre en faisant l'addition des causes partielles suivantes :

- demi-différence des mesures de deux diamètres perpendiculaires ;
- demi-différence des mesures entre la 1ère et la 2ème série ;
- valeur correspondant à l'épaisseur du trait de crayon du pointé (ou à l'incertitude de lecture) estimé à 0,25 mm.

- Cette incertitude ΔD sera aussi calculée d'une autre manière. Cette autre valeur correspondrait à une fluctuation de l'épaisseur optique e égale à $\Delta e = 0,02 \mu\text{m}$, par la formule :

$$\Delta D = \left(D + \frac{4f^2}{D} \right) \frac{\Delta e}{e} = \left(D + \frac{4f^2}{D} \right) \frac{2m}{\lambda} \Delta e$$

Remarque : pour établir cette équation, on considère que e est la seule variable.

La valeur $m = \frac{\lambda}{2e}$ étant la pente de la droite $y = 1 - \cos \theta_K = (p_0 - k) \frac{\lambda}{2e}$ que l'ordinateur détermine par régression linéaire.

Travail demandé : comparer les deux estimations de ΔD et juger si la dispersion des diamètres mesurés est acceptable, ou si elle correspond à un dérèglement prohibitif de l'interféromètre pendant la série de mesures.