Fiche pédagogique

INTERFEROMETRE DE MICHELSON ET SPECTROSCOPIE

Niveau :

1ère année de BTS systèmes photoniques.

Objectifs :

En possession des documents et des informations techniques complémentaires nécessaires, l'élève doit être capable de mettre en œuvre un système de contrôle dimensionnel par caméra intelligente et de déterminer le cadencement maximal des mesures.

- → C1.1 : Analyser un cahier des charges
- → C1.2 : Définir l'architecture fonctionnelle d'un système
- → C1.3 : Proposer des solutions techniques
- → C1.5 : Simuler et valider les solutions techniques
- → C2.1 : Assembler les composants
- → C2.3 : Régler le système
- → C3.1 : Mettre en œuvre un système optique
- → C3.2 : Valider un système
- → C5.3 : Synthétiser des données techniques.

Forme :

TP de 6 heures, par binôme ou trinôme.

Pré-requis :

- Lecture de dossiers ressources.
- Connaissance en mathématiques, optique, mécanique, informatique et électronique.

Méthode :

On donne :	On demande :	On évalue :
- Un sujet de T.P., - Un dossier technique. - Les logiciels associés au TP - Tout le matériel nécessaire à la mise en œuvre du système.	- De faire l'analyse fonctionnelle du système. - De mettre en œuvre le système. - D'analyser les performances du système.	- La compréhension du principe de la spectroscopie par transformation de Fourier. - La mise en œuvre du système. - L'analyse des résultats obtenus lors de la mise œuvre du système. - L'attitude, l'autonomie. - Le résultat obtenu. - Le respect des règles de sécurité - La présentation du compte rendu.

INTERFEROMETRE DE MICHELSON ET SPECTROSCOPIE

1. Éléments à votre disposition

1.1. Matériel

Voir ***Erreur ! Source du renvoi introuvable.***.

Liste du matériel
Interféromètre de Michelson de Sopra muni d'un miroir à déplacement motorisé avec alimentation
Récepteur à photodiode + boitier électronique
Oscilloscope
Port USB 6009
Lampe à vapeur de sodium
Condenseur
Dépoli
Lentilles f = 500 mm, f = 150 mm
Spectroscope FT IR IFS 28 BRUKER
Micro-ordinateur
Imprimante

cadre 1.

1.2. Logiciels

Voir ***Erreur ! Source du renvoi introuvable.***.

Liste des logiciels
MichesonLV
Opus
Excel

Cadre 2.

1.3. Documentation

Voir ***Erreur ! Source du renvoi introuvable.***.

Liste de la documentation
Dossier technique
Introduction à la spectroscopie FT-IR

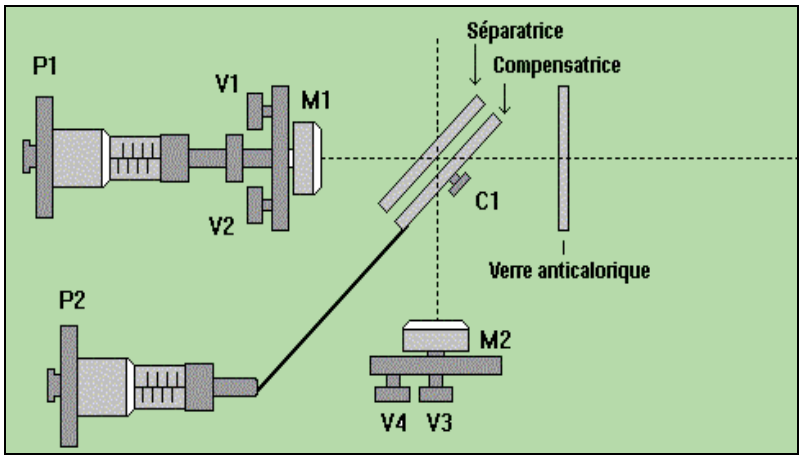
Cadre 3.

2. Présentation du contexte

Faire le lien avec le site :
http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/ perso/charrier /tp/ michelson/theoric.html
ou
http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/optiphy/ michelson.html.

L'interféromètre de Michelson est constitué des éléments décrits *cadre 2*.

- M_1 : miroir mobile dont le déplacement est commandé par la vis micrométrique P_1. Il peut être orienté grâce aux vis V_1 et V_2 (réglage grossier). La vis micrométrique P_1 peut être couplée à un moteur synchrone muni d'un réducteur qui l'entraîne à une vitesse de 1/10 de tour par minute.
- M_2 : miroir fixe dont la position peut être préréglée. Il peut être orienté grâce aux vis V_3 et V_4 (réglage fin).
- Sp : lame séparatrice, sa face réfléchissante regarde M_2.
- Cp : lame compensatrice pouvant être orientée par les vis C_1 et P_2.
- Ac : verre anticalorique.



cadre 2 : Description interféromètre.

L'interféromètre de Michelson est un système qui permet d'observer des franges d'interférences à deux ondes par division d'amplitude sur une séparatrice. La différence de marche δ entre 2 rayons qui interfèrent est donnée par :

$$\boxed{\delta = 2.e.\cos(i) + \frac{\lambda}{2}}$$

avec :

- e : différence d'épaisseur d'air traversée (celle-ci varie en translatant un miroir) ;
- i : angle d'incidence (i=0 pour un faisceau parallèle) ;
- λ : longueur d'onde de la source.

Lorsque la différence de marche δ est nulle, on dit que l'on est à **l'ordre zéro** ou que l'on a le **contact optique**. Au voisinage de l'ordre zéro, il est possible de voir des franges, même en lumière très polychromatique (lumière blanche d'une lampe à filament). Lorsqu'un miroir se déplace en translation, on observe un défilement des franges.

En lumière monochromatique, chaque fois que l'on passe d'une frange claire (ou sombre) à la frange suivante de même nature, δ varie de λ. *(Application à la mesure d'une longueur d'onde λ).*
En lumière complexe (polychromatique), le défilement des franges créées par chaque radiation sur un capteur permet d'obtenir un signal électrique complexe dont l'étude permet l'analyse de la lumière. *(Application à la spectroscopie par transformée de Fourier).* Nous en verrons des exemples d'applications en utilisant par la suite le spectroscope infrarouge à transformée de Fourier BRUKER, dont le principe de fonctionnement est le même. La documentation de l'appareil est disponible sur le bureau du poste informatique associé.

3. Analyse du système :

3.1. Etude préliminaire sur l'interféromètre de Michelson

D'après la documentation précédente (« Interférences localisées avec une source étendue »), répondre aux questions suivantes :

- Le miroir M_1 reste immobile. Les deux miroirs sont parfaitement perpendiculaires. On observe des "Anneaux d'égale inclinaison ou franges d'Haidinger". Dans l'expression de la différence de marche δ, quels sont les facteurs constants et quel est celui qui varie ? Quel type de franges observe-t-on ? Où sont-elles localisées ? Comment les observer avec une lentille et un écran ?
- Le miroir M_1 reste immobile. Les miroirs sont fixes et ne sont pas tout à fait perpendiculaires. On observe des "Franges d'égale épaisseur ou franges de Fizeau". Dans l'expression de la différence de marche δ, quels sont les facteurs constants et quel est celui qui varie ? Quel type de franges observe-t-on ? Où sont-elles localisées ? Comment les observer avec une lentille et un écran ?
- Le miroir M_1 mobile se déplace à la vitesse v. La source est monochromatique de longueur d'onde λ. Pendant la durée Δt, on observe le défilement de N franges. Justifier la relation $\boxed{v \cdot \Delta t = N \cdot \frac{\lambda}{2}}$.

3.2. Etude préliminaire sur le spectroscope FT IR BRUKER

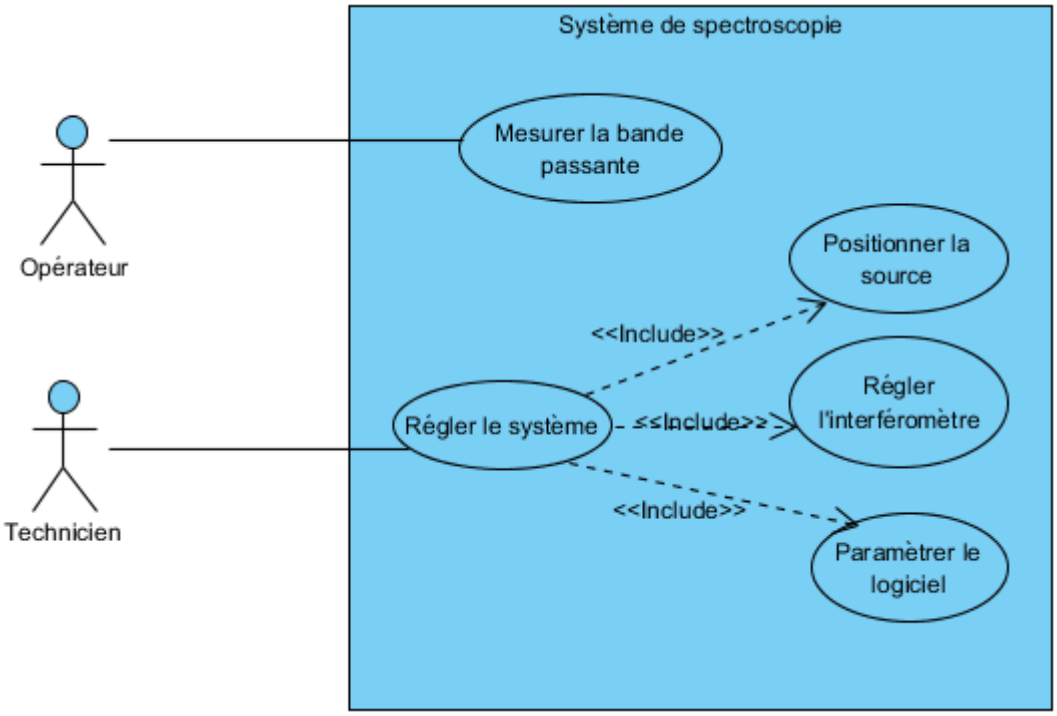
Répondre aux questions suivantes après avoir consulté le fichier exécutable "Introduction à la spectroscopie FT-IR" (sur l'ordinateur associé au spectro Bruker) ou la documentation résumée "Document BRUKER" :

- Quel est, en résumé du premier paragraphe, le principal avantage d'un spectro FT IR par rapport à un spectro IR à dispersion par réseau ?
- Identifier les différents composants qui composent chacune des 5 cellules du FT IR et définir le rôle fonctionnel de chaque cellule.
- Quels sont les éléments communs du principe de fonctionnement du FT IR avec l'étude précédente ?

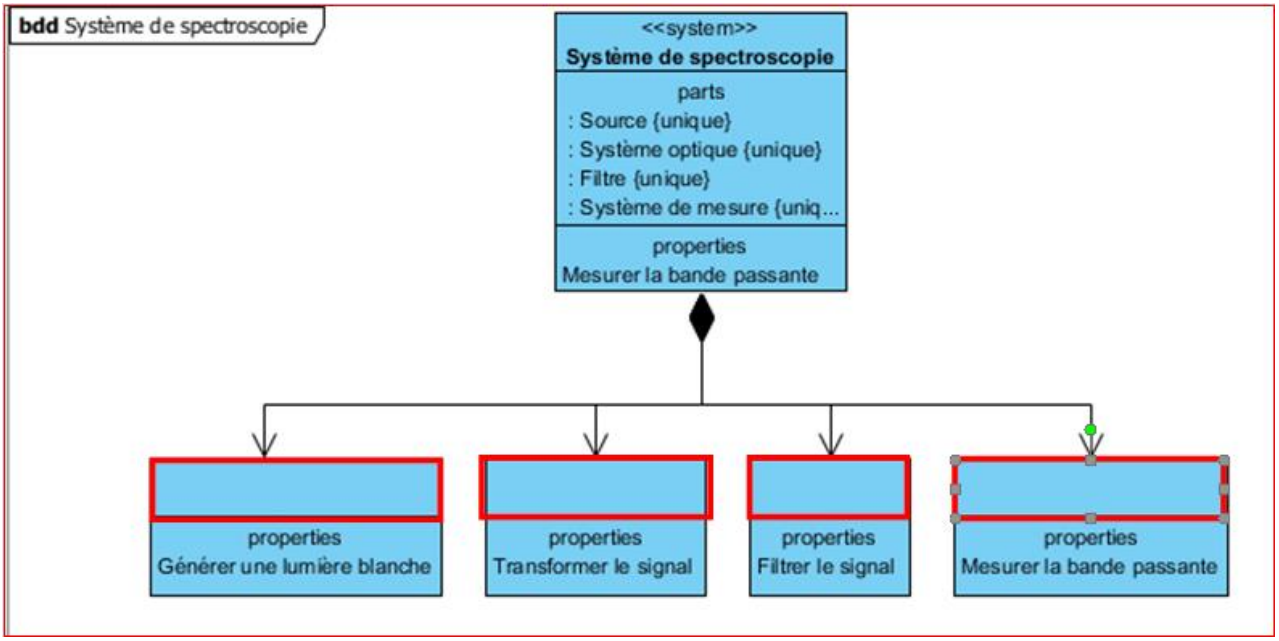
- Quelles grandeur et unité associée sont utilisées par les spectroscopistes (qui travaillent habituellement dans l'infrarouge) pour caractériser les ondes électromagnétiques ?
- Quelles sont, en µm et en eV $\boxed{E(eV) = \frac{1{,}24}{\lambda(\mu m)}}$, les limites des 3 domaines d'analyse dans l'infrarouge ?
- Les énergies mises en jeu correspondent-elles à des transitions entre les niveaux d'énergie électronique d'un atome, à des transitions entre les niveaux d'énergie vibratoire d'une molécule ou à des transitions entre les niveaux de rotation d'une molécule ?
- Quels sont les domaines d'application de la spectroscopie IR ?
- Pourquoi faut-il toujours faire un spectre de référence avant d'obtenir le spectre de transmittance (ou transmission) de l'échantillon ?
- Définir la transmittance et l'absorbance d'un échantillon. Dans le produit $\boxed{\varepsilon \cdot b \cdot c}$, quel est le terme qui dépend de la longueur d'onde et qui caractérise l'échantillon ?

3.3. Analyse fonctionnelle

On donne le diagramme de cas d'utilisation suivant :



Compléter le diagramme de blocs :

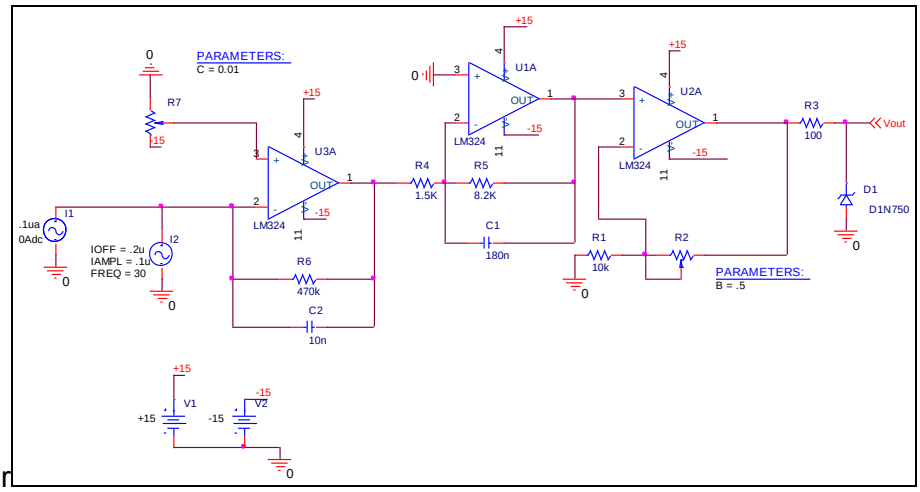


4. Mise en œuvre du système :

4.1. Etude simulée de l'amplificateur

Nous allons maintenant analyser le fonctionnement de l'amplificateur destiné à mettre en forme le signal du détecteur des franges pour le rendre compatible avec une acquisition informatique.

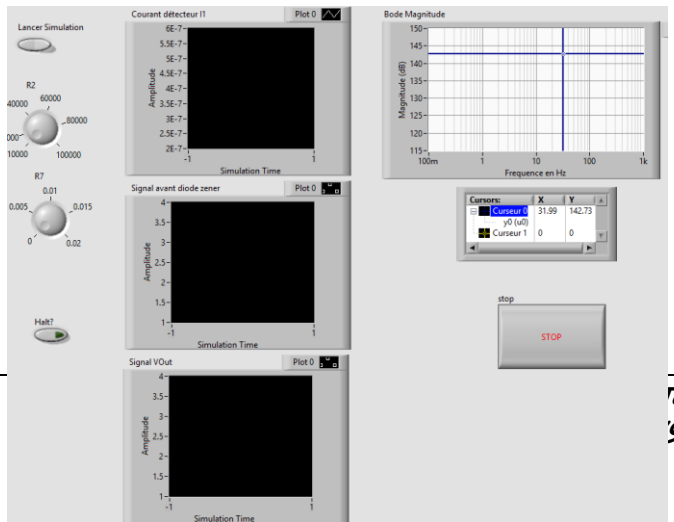
Le schéma du module amplificateur est donné *cadre 7*.



Le schéma de l'amplificateur a été modélisé sous labview.

- Ouvrir sous labview le fichier ampli_michelson.vi
- Appuyer sur le bouton lancer la simulation pour que celle-ci s'exécute.

1. Mesurer sur le diagramme de Bode, la fréquence de coupure de votre amplificateur (fréquence pour laquelle le gain en dB=Gmax-3dB)
2. Préciser alors la bande passante de votre amplificateur.



- Donner le rôle des potentiomètres R_7 et R_2 (vous pourrez modifier R2 et R7 en direct pendant la simulation).
- Quelle est l'amplitude crêtemaximum de I_1, quelle est l'amplitude maximum de V_{OUT} (R2 = 10000 et R7=0) ?

- En déduire le coefficient de transimpédance du montage($Vout_{max}/I1_{max}$).
- Sachant que le signal de sortie est fait pour être acquis par un convertisseur analogique numérique supportant au maximum 10 V en entrée en mode unipolaire, donner alors le rôle de la diode Zener placée en sortie de l'amplificateur.

4.2. Etude d'interférogrammes et de spectres par transformation de Fourier

La manipulation suivante étudie le principe de fonctionnement des spectroscopes modernes, tels que le spectroscope FT IR BRUKER. La source à analyser sera une lampe à vapeur de sodium (une fois allumée, laisser la lampe à vapeur de sodium en fonctionnement jusqu'à la fin de cette partie).

Remarque :

L'interféromètre *SOPRA* est préréglé. Ne pas toucher aux réglages ; le principe du réglage est expliqué dans le dossier technique.

4.2.1. Acquisition du signal

Le principe du montage est décrit *cadre 8.*

La source S est placée au voisinage du foyer du condenseur C et éclaire l'interféromètre de Michelson à travers le verre anticalorique Ac.

Dans le plan focal de la lentille L, on doit voir des anneaux jaunes et noirs bien contrastés.

Si ce n'est pas le cas, faire appel à un professeur.

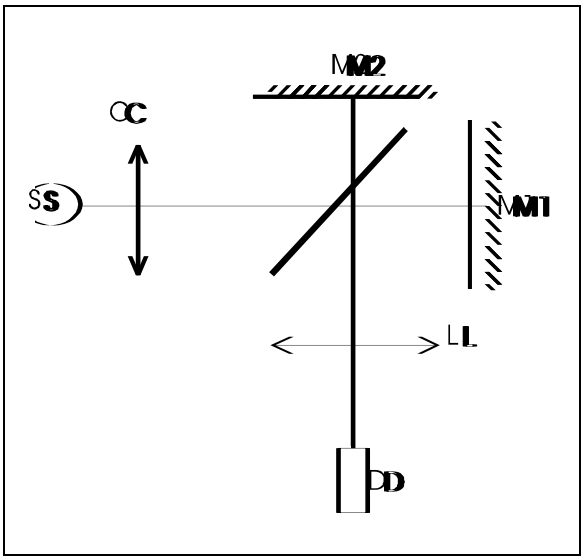
Enlever l'écran E. Au centre des anneaux, dans le plan focal de la lentille (*Cadre*), placer la fibre détectrice D du détecteur à photodiode (choisir le boitier gris qui possède sa propre alimentation).

Faire défiler les anneaux en alimentant le moteur synchrone qui entraîne le miroir mobile M_2 d'un mouvement uniforme (1 tour en 10 min soit $v_M = 50$ µm/min).

Rq.: le moteur (220V) est muni d'un interrupteur et d'un commutateur permettant de changer le sens de rotation. Il est indispensable de s'assurer que l'aimant de couplage entre l'axe du moteur et la vis P_1 est bien en place.

Observer à l'oscilloscope le signal transmis. Régler correctement la composante continue et le gain de l'amplificateur (la tension doit rester compatible avec le port USB 6009).

Charger le logiciel *MichelsonLV*. Ouvrir Paramètres afin de configurer l'interface.



Cadre 8 : Schéma du système avec détecteur.

4.2.2. Application à la mesure d'une longueur d'onde

La lampe à vapeur de sodium est considérée comme étant quasi monochromatique :

$$\lambda = 0{,}5893\ \mu m \text{ ; fréquence } \nu = c/\lambda.$$

Placer la fibre au centre des anneaux, au voisinage de l'ordre 0.

Paramétrer l'Acquisition du signal d'entrée de la manière suivante : **512** échantillons de la tension v fournie par l'amplificateur avec une temporisation T_e de **10 ms** entre les acquisitions. Lancer le moteur puis l'acquisition par Démarrer.

Sous Graphe, observer le signal v = f(t). Il est quasi sinusoïdal. Sa fréquence est celle d'apparition des anneaux :

$$\boxed{f_0 = \frac{2v_M}{\lambda_0}}$$

Il apparaît en effet un anneau lorsque le miroir se déplace de $\lambda/2$ après une durée (période τ) de

λ/2v.

- Sauvegarder l'enregistrement sous *lambda*.

4.2.3. L'interférogramme de la source à vapeur de sodium et son spectre de Fourier

a. L'interférogramme

- Paramétrer l'Acquisition du signal d'entrée de la manière suivante : **5000** échantillons de la tension v fournie par l'amplificateur avec une temporisation T_e de **10 ms** entre les acquisitions.
- Sauvegarder le fichier sous *sodium*
- Observer le graphe de la tension v = f(t) : c'est **l'interférogramme**. . Il est presque sinusoïdal.

b. Le spectre de Fourier

- Sous Graphe, demander la FFT v' = f(λ). Formater l'axe des abscisses entre 300 nm et 1200 nm de chacun des 2 fichiers précédents. Ce programme calcule la TF de v(t) : par l'algorithme FFT.

$$TF[v(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} v(t)\exp(-2i\pi ft)dt$$

Il analyse ainsi le signal acquis ; il calcule les fréquences électriques dont ce signal est constitué, donne la longueur d'onde lumineuse $\boxed{\lambda = \frac{2v_M}{f}}$ correspondant à chaque fréquence électrique, et calcule le module m (l'importance) de chaque fréquence ou longueur d'onde.

Sauvegarder le nouveau graphe sous *FFT.*

Observer le graphe du module m = f(λ) : c'est **le spectrogramme.** Vérifier que l'on obtient des pics aux alentour des longueurs d'onde 0,59 (doublet D) et 0,82 µm.

Rq : m est noté v' dans le logiciel.

- Faire vérifier le montage et l'enregistrement par un professeur.

c. Visualisation des battements entre les 2 raies jaunes et mesure de l'écart Δλ entre les 2 longueurs d'onde (doublet du sodium),

La lampe à vapeur de sodium est essentiellement bichromatique ; les 2 principales raies sont 2 raies jaunes d'intensité voisines et espacées d'environ 0,6 nm autour de la longueur d'onde :λ = 0,5893 µm (fréquence ν = c/λ).

En déplaçant manuellement M_1, par action sur P_1, on note un brouillage périodique de la figure d'interférence.

Il y a brouillage chaque fois que les systèmes de franges dus à λ_1 et λ_2 sont en ***anticoïncidence***.

Mesure

Revenir à l'ordre 0 approximatif en agissant légèrement sur P_1. Lancer le moteur.

Vérifier que la fibre est toujours au centre des anneaux et que le gain est toujours optimisé.

Paramétrer l'Acquisition du signal d'entrée de la manière suivante : 2**500** échantillons de la tension v fournie par l'amplificateur avec une temporisation T_e de **200 ms** entre les acquisitions. Lancer le moteur puis l'acquisition par Démarrer.

Remarque : cette mesure prend environ 8 minutes. Pendant l'enregistrement, on peut aller brancher le spectro FT-IR de BRUKER et se familiariser avec le fonctionnement des spectroscopes modernes à transformée de Fourier.

Montrer l'acquisition à un professeur.

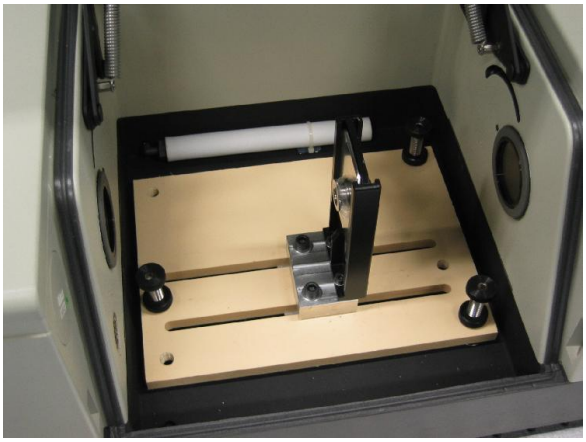
- Observer le signal v = f(t). Sauvegarder l'enregistrement sous *battements.*

4.3. Spectroscope FT IR IFS 28 - BRUKER

Mettre en marche le spectro Bruker. Pendant que la source se stabilise et que la cavité se débarasse de l'essentiel de la vapeur d'eau (circulation d'air sur un sel dessicateur), observer le système (isostatique) de positionnement du support porte-échantillon.

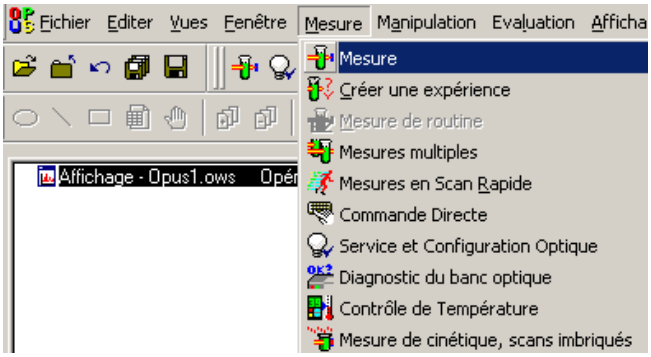
Spectre de l'échantillon de polystyrène

- Ouvrir la logiciel *Opus*. Mot de passe : *OPUS*.
- Faire des enregistrements entre 8000 et 400 cm^{-1}.
- Faire Mesure/Mesure ou cliquer sur le raccourci correspondant.
- Vérifier que le support porte-échantillon est vide.
- Valider dans un premier temps l'acquisition d'un "blanc" ou spectre de référence, c'est-à-dire d'un spectre sans échantillon. Le spectre obtenu est un spectre qui correspond à l'absorption des composants et de l'air et qui tient compte de l'émissivité de la source et de la sensibilité spectrale du détecteur.
- Faire des acquisitions entre 8000 et 400 cm^{-1}.
- Le moteur du Michelson fait plusieurs allers-retours (scans). Combien et dans quel but ?
- Placer le film de polystyrène de 38,1 µm d'épaisseur dans le porte-échantillon adapté. Ce film sert à l'étalonnage du spectroscope. Valider dans un deuxième temps l'acquisition du spectre de transmission de l'échantillon.



Cadre 9 : Support porte-échantillon.

- Le logiciel fait le quotient du spectre en transmission de l'échantillon sur celui de la référence. L'enregistrer sous *polystyrène*.
- Faire Evaluation/Recherche spectrale.
- Faire glisser à l'aide de la souris le spectre obtenu dans le champ de la recherche spectrale.
- Le logiciel compare le spectre enregistré aux spectres présents dans sa banque de données.
- Essayer plusieurs spectres de la banque de données. Sur quel principe se base-t-il pour effectuer la comparaison ? Cette comparaison dépend-elle de l'épaisseur ? Obtient-on une certitude ?



5. Analyse des performances du système :

On exploite les fichiers enregistrés en 4. (ou les enregistrements de secours fournis).

5.1. Etudes d'interférogrammes et de spectres par transformation de Fourier

5.1.1. Mesure d'une longueur d'onde

Charger le fichier *lambda*.

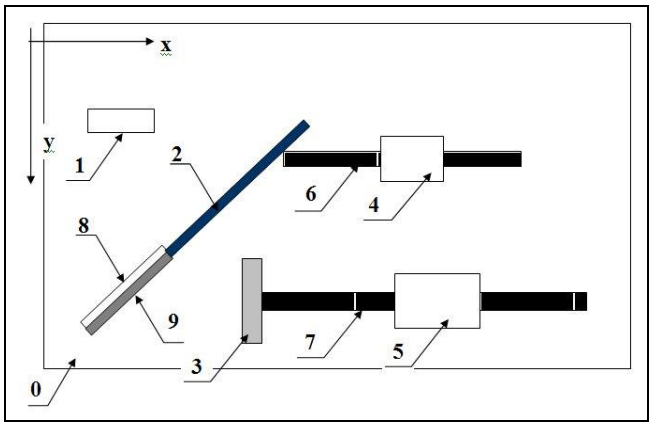
- Sous Graphe, observer le signal v = f(t)
- Mesurer sa période T_0 (ms) (faire une moyenne sur un grand nombre de périodes)
- En déduire la fréquence électrique des anneaux f_0. $\boxed{f_0 = \frac{2v_M}{\lambda_0}}$

- Retrouver la longueur d'onde lumineuse λ_0.
- Comparer à la valeur attendue (λ = 589,3 nm)

5.1.2. Le spectre de Fourier

Charger le fichier *FFT*.

- Imprimer le spectre.
- Marquer (par un segment de couleur) le domaine visible.
- Marquer le domaine de réponse du capteur au silicium (Photodiode SFH250).
- Indiquer la longueur d'onde des principaux pics observés.
- Comparer aux longueurs d'onde attendues : 0,33 ; 0,45 ; 0,57 ; 0,59 (doublet D) ; 0,82 ; 1,14 ; 1,85 µm.
- Expliquer en quoi le dernier signal diffère de celui du spectro BRUKER et préciser ce qui empêche le Michelson de travailler dans l'infrarouge.



cadre 3 : Schéma interféromètre.

Rep.	Désignation
0	Socle
1	Groupe miroir M1
2	Porte lames
3	Groupe miroir M2
4	Écrou
5	Écrou
6	Vis de réglage
7	Vis de déplacement
8	Groupe compensatrice
9	Groupe séparatrice

Cadre 6 : Nomenclature interféromètre.

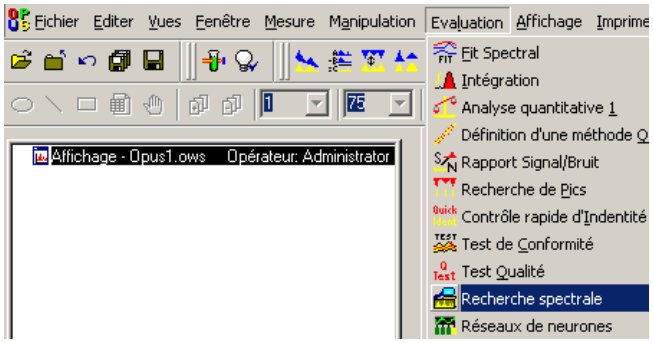
5.1.3. Mesure de l'écart $\Delta\lambda$ entre les deux longueurs d'onde du doublet du sodium

Charger le fichier *battements*.

- Observer le signal v = f(t). Tracer les enveloppes des battements et l'imprimer.
- Mesurer à l'aide des curseurs la durée Δt entre 2 nœuds ou entre 2 ventres. Calculer le déplacement correspondant $\Delta e = v_M.\Delta t$.
- En déduire une valeur plus précise de $\Delta\lambda$ en prenant λ_{moyen} = 589,3 nm :

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_{moy}^2}{2\Delta e}$$

5.2. Etude cinématique

À partir du schéma donné *cadre 3* et de la nomenclature de l'interféromètre donné *cadre O6* :

- Définir les groupes cinématiques (A={……} , B={….})
- Établir le graphe des liaisons du système étudié.
- Établir le schéma cinématique de l'interféromètre.
- La liaison entre la vis 7 et l'arbre de son moteur d'entraînement est réalisée par l'intermédiaire d'un accouplement élastique. Repérer cet élément sur le système. Indiquer quels sont les degrés de liberté autorisés par cet accouplement entre la vis 7 et l'arbre de son moteur d'entraînement.