

# Imagerie multispectrale par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)

---

S. Chevalier / Durée : 2h

## Objectifs

Le but de ce TP est de prendre en main un banc d'imagerie multispectrale infrarouge. Cela inclura la mesure des spectres infrarouges de différents matériaux afin d'identifier leur signature spectrale, de quantifier leur absorptivité monochromatique, et d'imager les champs de réflectivité d'une surface hétérogène. En particulier, il sera abordé :

- La prise en main d'un spectromètre à transformée de Fourier FTIR ;
- La mesure d'un spectre d'absorbance IR pour l'identification d'un matériau ;
- La mesure de du coefficient d'absorptivité à partir de la loi de Beer-Lambert ;
- L'imagerie multispectral de la réflectivité d'un métal.

## Description et rappels théoriques

### Principe de fonctionnement d'un spectromètre à transformée de Fourier

Le spectromètre infrarouge à transformée de Fourier permet l'étude de l'interaction de la lumière infrarouge avec la matière. L'analyse du spectre infrarouge permet d'obtenir à la fois une analyse quantitative et qualitative du type de molécules présentes au sein ou à la surface d'un échantillon et d'en mesurer la concentration. Cette technique est utilisée pour une large gamme d'échantillon : des liquides, gaz et solides pour étudier leur structure et leur composition.

La Figure 1 présente un schéma de principe du spectromètre à transformée de Fourier le plus couramment utilisé : l'interféromètre de Michelson. La lumière émise pour une source infrarouge (assimilable à un corps noir) est divisée par la séparatrice (beamsplitter) de manière égale en théorie. Une moitié de la lumière est envoyée vers un miroir fixe et parcourt alors la distance  $2L$ . L'autre moitié du flux lumineux est envoyée sur un miroir mobile de distance  $L \pm \Delta$ , puis est réfléchi vers la séparatrice après avoir parcouru la distance  $2(L \pm \Delta)$ . Les deux faisceaux se recombinaient alors, et grâce à la différence de chemin optique entre les deux bras de l'interféromètre, crée une interférence destructive ou constructive à la sortie de l'interféromètre. On appellera différence de marche, aussi appelée différence de chemin optique, le paramètre  $\delta$ , défini comme :

$$\delta = 2\Delta$$

L'intensité lumineuse,  $I(\delta)$ , d'une source polychromatique ayant une distribution spectrale  $S(\nu)$  à la sortie de l'interféromètre est alors :

$$I(\delta) = \int_0^{\infty} S(\nu)(1 + \cos(2\pi\nu\delta))d\nu,$$

où  $\nu = 1/\lambda$  est le nombre d'onde d'unité  $\text{cm}^{-1}$ . C'est à partir de cette intensité lumineuse mesurée par le détecteur pour plusieurs différences de marche qu'est déduit le spectre infrarouge de la source polychromatique.

A titre d'exemple, Dans le cas d'une source monochromatique de longueur d'onde  $\lambda_0 = 1/\nu_0$ , l'intensité lumineuse en sortie de l'interféromètre est alors simplement  $I(\delta) = I_0(1 + \cos(2\pi\nu_0\delta))$  caractéristique d'une interférence alternativement constructive et destructive. Elle est composée d'une composante continue  $I_0$  et d'une composante périodique  $I_0 \cos(2\pi\nu_0\delta)$ . C'est à partir de la transformée de Fourier de cette composante qu'il est possible d'extraire le spectre infrarouge de la source passant au travers de l'interféromètre : une raie d'intensité  $I_0$  centrée sur la fréquence  $\nu_0$ . Un raisonnement similaire peut être fait pour une source polychromatique.

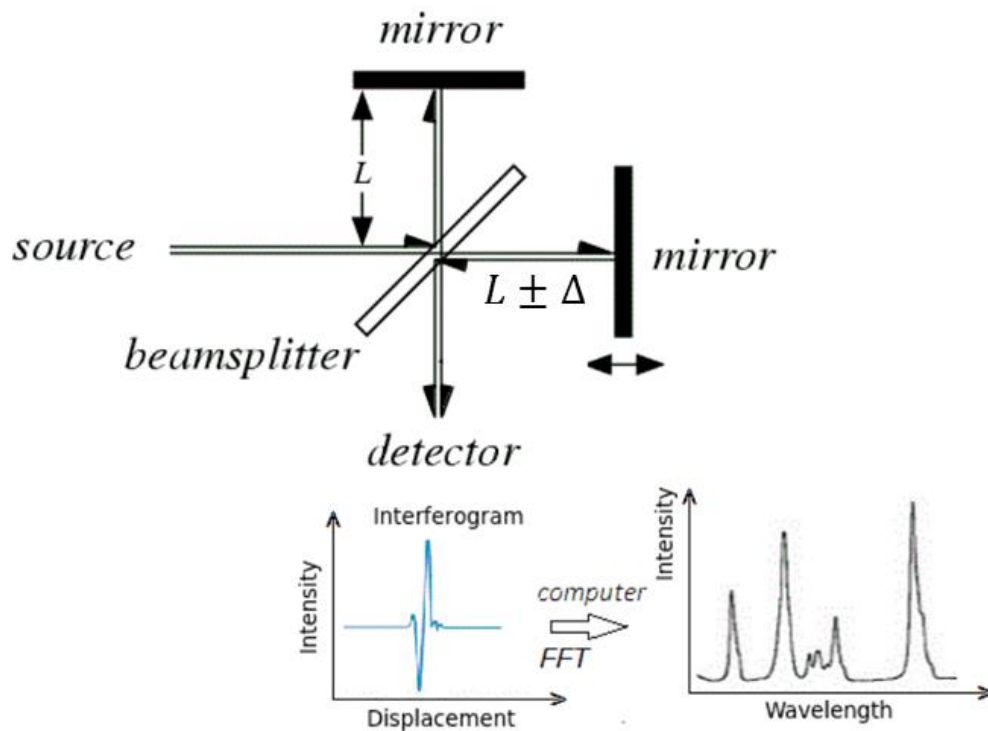


Figure 1. Schéma de principe d'un interféromètre de Michelson<sup>1</sup>

Une fois l'interférence générée par le spectromètre, le spectre IR de la source se déduit donc de la transformée de Fourier de l'intensité lumineuse reçue par le capteur comme suit :

$$S(\nu) = \mathcal{F}\{I(\delta)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} I(\delta) e^{-i2\pi\nu\delta} d\delta.$$

Dans le cas d'un déplacement fini du miroir et symétrique de part et d'autre de sa position  $L$  (comme c'est généralement le cas en pratique), le spectre infrarouge se calcule alors :

$$S'(\nu) = \int_{-\delta}^{+\delta} I(\delta) e^{-i2\pi\nu\delta} d\delta.$$

Cette relation sera calculée numériquement par FFT.

En pratique, la finitude du déplacement du miroir n'est pas anodine pour la résolution du spectre. Elle induit une finitude dans la transformée de Fourier qui engendre un phénomène d'étalement des raies

<sup>1</sup> Partialement repris de <http://scienceworld.wolfram.com/physics/MichelsonInterferometer.html>

du spectre infrarouge de tel sorte que la résolution spectrale des raies sera d'autant meilleure que le déplacement du miroir est grand. Nous pouvons définir la résolution,  $R$ , du spectre qui sera obtenu par la relation :

$$R \propto \frac{1}{\Delta_{\max}}$$

où  $\Delta_{\max}$  est le déplacement maximal du miroir par rapport à sa position  $L$ . Il y a donc un compromis entre temps de mesure acceptable (déplacement du miroir faible) et résolution spectrale. Dans la pratique, une résolution de  $4 \text{ cm}^{-1}$  pour l'infrarouge est un bon compromis.

### Dispositif expérimental

Le dispositif d'imagerie multispectrale utilise un spectromètre pour produire les interférences à partir d'une source polychromatique et colimatée, et une caméra infrarouge pour imager les interférogrammes au cours du temps. La transformée de Fourier des images permettra d'obtenir une image multispectrale du faisceau infrarouge réfléchi par un échantillon (voir Figure 2). A noter, que dans le cas où une étude thermique de l'échantillon est nécessaire, il est possible de combiner les images thermique et multispectrales afin de travailler en thermospectroscopie.

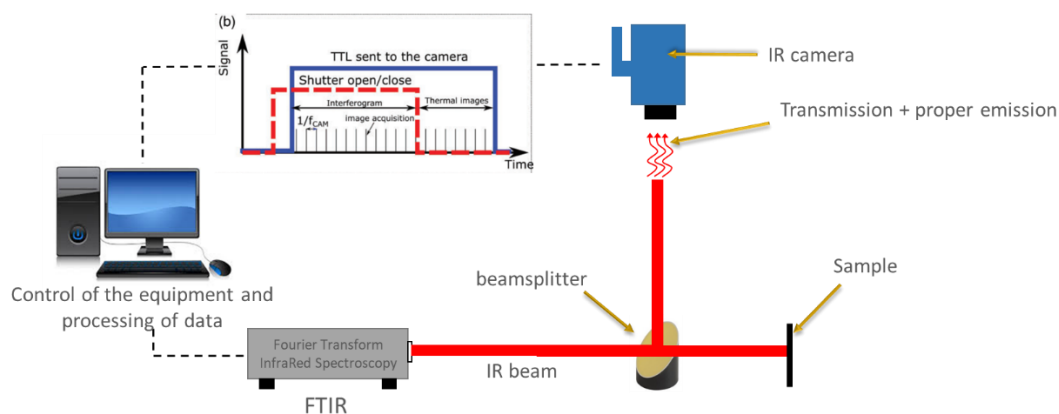


Figure 2. Schéma du dispositif d'imagerie multispectrale.

Le contrôle du dispositif se fera via une interface Labview. Le traitement des données se fera via un programme Matlab et une interface ImageJ.

## Travail demandé

### Identification d'un matériau à partir de sa signature IR (aspect qualitatif)

Un échantillon inconnu est à votre disposition (fourni par l'animateur lors du TP). Placer celui-ci dans la chambre du spectromètre FTIR pour mesurer l'absorbance multispectrale du matériau dans la gamme  $2.5 - 15 \mu\text{m}$ . La mesure se fera via l'utilisation du logiciel OMNIC.

A partir du Tableau 1 et de la localisation des pics obtenus par la mesure, identifier la nature du matériau testé.

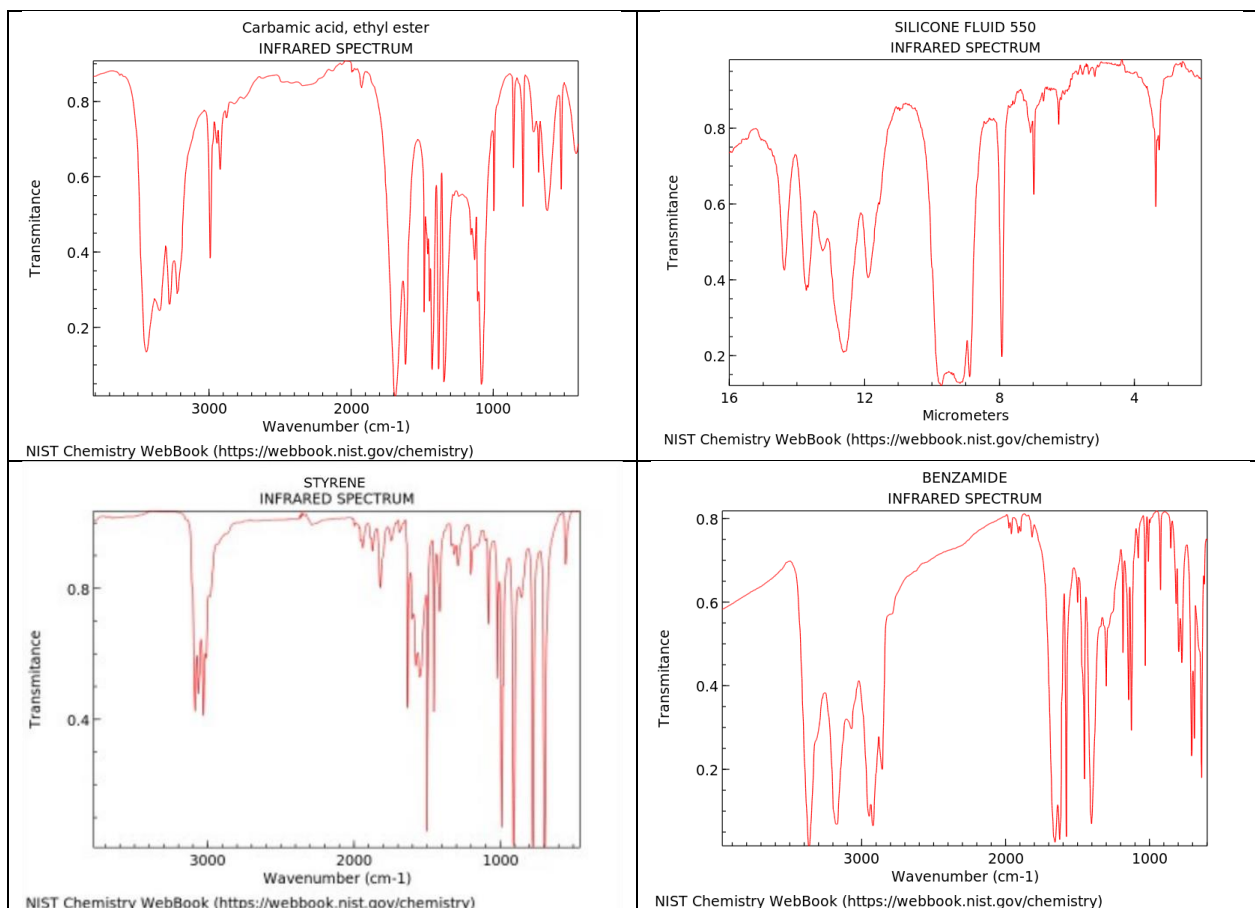


Tableau 1. Spectre IR de différents composés chimiques

## Mesure de l'absorptivité monochromatique (aspect quantitatif)

### Rappel théorique

La loi de Beer-Lambert lie l'absorbance à une longueur d'onde donnée et à un coefficient d'absorptivité de la façon suivante :

$$A(\nu_0) = -\log_{10}(I(\nu_0)/I_0(\nu_0)) = \mu(\nu_0)e$$

où  $A$  est l'absorbance monochromatique,  $I$  et  $I_0$  sont respectivement les intensités lumineuses monochromatiques de l'échantillon et du fond,  $\mu$  le coefficient d'absorptivité et  $e$  l'épaisseur du matériau transversée. Cette relation est valable uniquement dans le cas monochromatique à une fréquence  $\nu_0$ . En effet, il est connu que  $\mu$  dépend de la longueur d'onde : un matériau absorbe plus ou moins la lumière selon la fréquence de celle-ci.

Afin de mesurer ce coefficient pour deux fréquences (i.e.  $1942 \text{ cm}^{-1}$  et  $3082 \text{ cm}^{-1}$ ), placer plusieurs échantillons de polystyrène d'épaisseur connue dans la chambre du spectromètre. Relever la valeur de l'absorbance aux fréquences demandées. Tracer la loi de Beer-Lambert et par régression linéaire, en déduire la valeur du coefficient d'absorptivité. Qu'en concluez-vous ?

## Imagerie multispectrale de métaux

Dans cette dernière étape, le faisceau IR du spectromètre est porté à l'extérieur vers un montage optique et une caméra thermique InSb, de gamme spectrale 2.5-5.5  $\mu\text{m}$ . Nous avons à notre disposition un métal dont la surface a été plus ou moins peinte. Nous allons étudier l'effet de cette peinture sur le spectre IR de réflectivité.

Rappel théorique de la loi de Kirchhoff.

La conservation de l'énergie appliquée au rayonnement thermique conduit à la relation suivante :

$$\rho + \alpha + \tau = 1$$

Où  $\rho$  est la réflectivité,  $\alpha$  l'absorptivité et  $\tau$  la transmittivité. Dans le cas des métaux d'épaisseur supérieur au mm, la transmittivité est nulle puisqu'au rayonnement ne peut le traverser. La réflectivité peut alors se mesurer comme  $\rho = 1 - \alpha = I/I_0$  où  $I$  est l'intensité réfléchi par l'échantillon et  $I_0$  est celle réfléchi par un miroir. La mesure de la réflectivité permet alors de déduire la quantité d'énergie lumineuse absorbé par un matériau selon la fréquence de la lumière qui l'impact.

### Manipulations

Afin de mesurer la réflectivité de la surface d'un métal, deux étapes sont nécessaires :

1. Mesurer l'intensité réfléchi par un miroir
2. Mesurer l'intensité réfléchi par l'échantillon placé exactement au même endroit que le miroir.

Calculer les images de réflectivité multispectrale. Identifier les spectres IR caractéristiques de chacune des zones. En déduire l'intérêt de changer l'état de surface d'un matériau pour changer ses propriétés radiatives. Quels types d'applications pouvez-vous envisager ?

Résultats attendus pour la discussion :

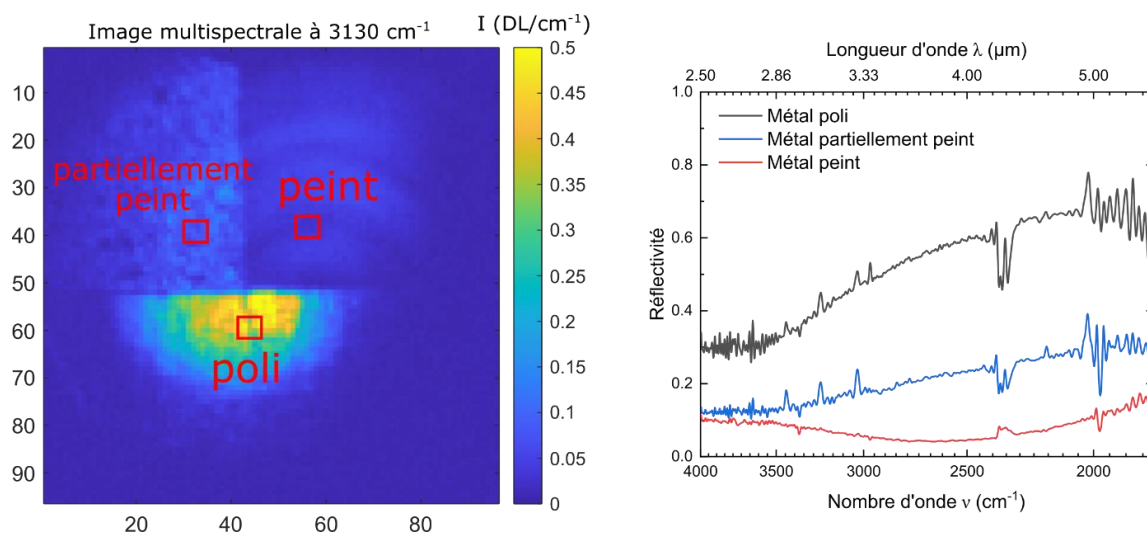


Figure 3. Exemple de résultats obtenus en imagerie multispectral par réflexion.