

Projet de Physique P6-3
STPI/P6-3/2011 – 2012

**Principe de Fonctionnement et
utilisation d'un spectromètre**



Etudiants :

Luc Balluais

Camille Jacquelin

Louis Nivon

Bérangère Duhamel

Quentin Muller

Bruno Rodrigues

Enseignant-responsable du projet :

Jérôme Yon

Date de remise du rapport : 18/06/2012

Référence du projet : **STPI/P6-3/2011 – 2012**

Intitulé du projet : **Principe de fonctionnement et utilisation d'un spectromètre**

Type de projet : **Bibliographique et expérimental**

Objectifs du projet : **Le but du projet est de lister les différentes familles de spectrométries existantes à travers leur différent principe de fonctionnement et leur domaine d'utilisation. Une ou deux expériences ont été envisagées afin de mettre en pratique, dans la mesure du possible, les connaissances acquises sur certains types de spectromètre. Nous pouvons ainsi mettre en lumière les différences notables entre les spectromètres que nous étudions.**

Mots-clefs du projet : **Bibliographie, expérimentations, découverte.**

TABLE DES MATIERES

| | |
|--|----|
| 1. Introduction..... | 5 |
| 2. Méthodologie / Organisation du travail..... | 6 |
| 3. Travail réalisé et résultats..... | 9 |
| 3.1. La spectrométrie optique..... | 9 |
| 3.1.1. Principe de fonctionnement..... | 9 |
| 3.1.2. Composition | 9 |
| 3.1.3. Utilisation..... | 12 |
| 3.2. La spectrométrie de masse..... | 14 |
| 3.2.1. Principe de fonctionnement..... | 14 |
| 3.2.2. Composition | 15 |
| 3.3. La spectrométrie acoustique..... | 18 |
| 3.3.1. Principe de fonctionnement..... | 18 |
| 3.3.2. L'ultrasizer | 19 |
| 3.3.3. Domaine d'Utilisation..... | 19 |
| 3.4. Expérience du spectromètre d'absorption atomique..... | 20 |
| 3.5. Expérience du spectromètre optique..... | 23 |
| 3.5.1. Expérience 1 : Le spectre d'émission..... | 23 |
| 3.5.2. Expérience 2 : Le principe d'absorption (la transmittance) | 26 |
| 4. Conclusions et perspectives..... | 28 |
| 5. Bibliographie..... | 29 |
| 6. Crédits d'illustration..... | 31 |

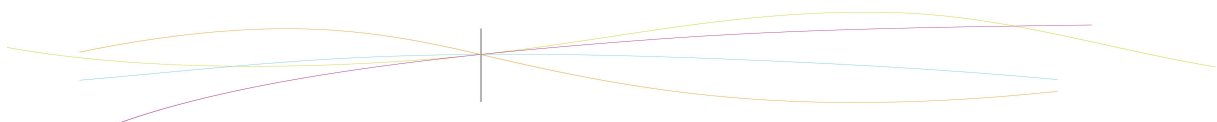
1. INTRODUCTION

Au cours de notre deuxième année à l'INSA, nous sommes amenés à réaliser un projet de physique. Nous avons pu choisir 5 sujets parmi toute une liste proposée puis nous avons été affectés dans un groupe. Ce projet s'étend sur 14 semaines soit tout un semestre. Chaque groupe est composé de 6 personnes et se réunit, au minimum 1h30 par semaine à un créneau imposé et encadré par un professeur. Des créneaux supplémentaires sont très souvent nécessaires pour un bon avancement du projet.

Notre sujet est « Principe de fonctionnement et utilisation d'un spectromètre ». Nous avons donc cherché à comprendre et connaître tous les différents spectromètres : comment sont-ils construits? Pour obtenir quelle grandeur? Mais avant tout, il fallait savoir ce qu'était un spectromètre. Il faut différencier spectroscopie et spectromètre. En effet un spectroscopie est un instrument permettant seulement d'observer la lumière un spectromètre au contraire mesure. Un spectromètre est un appareil de mesure qui permet de décomposer une quantité observée en ses éléments simples qui constituent son spectre. On appelle alors l'étude des spectres, la spectrométrie. On peut utiliser cet instrument en optique, pour obtenir des longueurs d'ondes ou, en chimie, pour obtenir les masses spécifiques de chacune des molécules mais encore, en acoustique pour analyser la composition d'un signal sonore.

Une fois que nous avons bien compris les différents types de spectromètres, nous avons pu utiliser certains spectromètres et faire quelques expériences que nous développerons dans ce dossier.

Nous verrons donc dans une première partie de ce dossier, les grandes familles de spectromètres : optique, de masse et acoustique. Nous développerons 2 spectromètres en particulier sur lesquels nous avons pu faire des expériences. Puis, nous expliquerons ces dernières ainsi que les résultats que nous avons obtenus.



2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Après avoir défini notre domaine de recherche pour notre sujet nous nous sommes répartis le travail de la façon suivante :

Bérangère, Camille : Spectromètres chimiques et expérience

Luc, Quentin : Spectromètres optiques et expérience

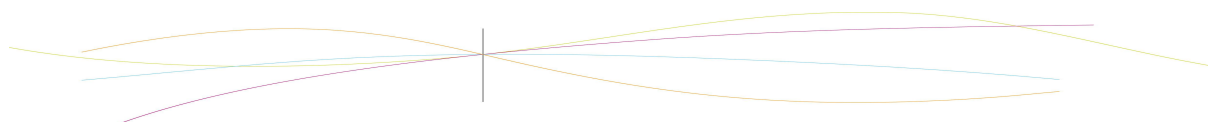
Louis : Spectromètres acoustiques et expérience avec Luc et Quentin

Bruno : Spectromètres de Masse et Mise en page du rapport.

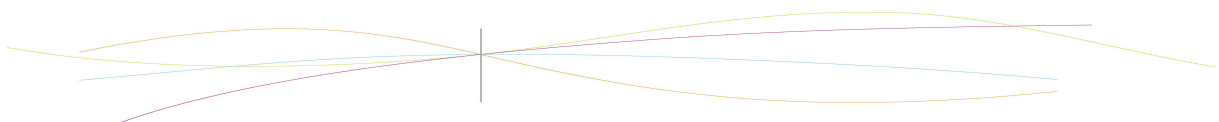
Nous avons choisi d'avancer en parallèle, c'est à dire que nous avons commencé par les recherches sur les familles de spectromètres choisies, pour finir par les processus expérimentaux.

Vous trouverez ci-dessous un carnet de bord de notre projet, qui résume les différentes tâches effectuées en cours de projet :

| Séance | Travail effectué | Problèmes | Objectifs |
|--------|---|---|---|
| 1 | Définition des contours du sujets, ses enjeux, ses limites. Répartition sommaire des rôles. | Bien appréhender le sujet afin de ne pas digresser. | Être capable de répartir des tâches en adéquation avec le sujet, et des thèmes cohérents. |
| 2 | Répartition des recherches bibliographiques dans le groupe: Spectromètres de masses, ultraviolets, optiques, chimiques, rayon X, gamma + une partie Historique récapitulative. | Accès à différents types de spectromètres. | Réalisation d'expérience en plus des recherches bibliographiques. Choix d'une expérience avec l'interféromètre de Michelson? |
| 3 | Organisation de la rédaction du Rapport du projet. Poursuite des recherches dans les domaines choisis. Envoie d'e-mails à des laboratoires de recherches afin de voir leurs matériels de spectrométrie. | ... | Réalisation de 2 expériences sur les spectromètres disponibles: - Absorption Atomique - Spectromètre optique de Mr YON |
| 4 | Poursuite des recherches, avancées dans le rapport. Prise de contact avec Mme Delaroche et Mr Niveliers afin d'organiser des expériences dans le batiment Darwin de l'INSA | Réponses négatives de la part des laboratoires. | Compréhension des systèmes d'absorption atomique avant de réaliser les expériences. |



| | | | |
|---|---|--|---|
| 5 | Finalisation du plan du rapport, avancée dans les différentes parties. Réalisation des protocoles expérimentaux | ... | Réaliser les expériences en séance 6 (au moins celle avec le spectromètre optique) |
| 6 | Réalisation de l'expérience d'émission de lampe de mercure et de sodium avec le spectromètre optique | Compréhension du logiciel Mauvaise représentation des courbes de couleur. | Finir l'expérience sur l'émission et réaliser celle d'absorption atomique |
| 7 | Fin de l'expérience sur l'émission. Explications par Camille et Béragère de leur expérience sur le spectre d'absorption atomique en DARWIN. Poursuite de la rédaction du rapport. | Mise en page du dossier | Rendre une ébauche complète du rapport pour une évaluation préliminaire de Mr Yon et prévoir un plan de soutenance. |
| 8 | Préparation de la soutenance orale afin de s'entraîner. Présenter un dossier complet à l'enseignant. | | |



3. TRAVAIL RÉALISÉ ET RÉSULTATS

3.1. La spectrométrie optique

3.1.1. Principe de fonctionnement

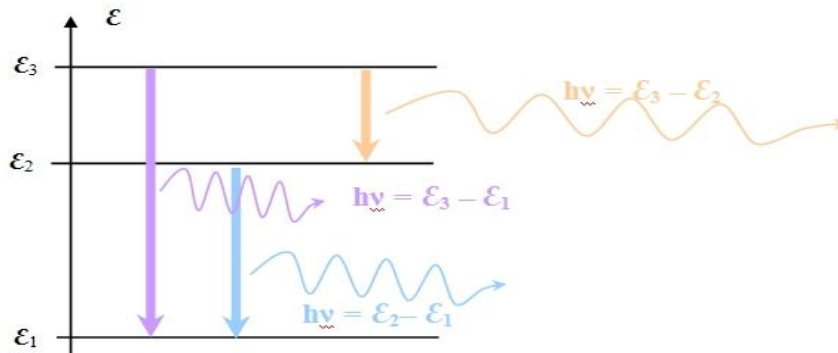


figure 1.1

Pour comprendre la spectrométrie optique, il faut s'intéresser à la théorie des quantas en physique quantique. L'énergie d'un atome ne peut avoir que certaines valeurs qu'on appelle valeurs discrètes. Les électrons peuvent sauter d'un niveau d'énergie à un autre suivant leur excitation. L'énergie prend des valeurs par paliers. L'état le plus bas est l'état fondamental.

Lorsque l'électron passe d'un niveau d'énergie plus élevé à un niveau d'énergie plus faible, il y a alors émission d'un photon. La longueur d'onde, et donc la couleur, de ce photon dépend de la différence d'énergie entre les deux niveaux d'énergie. On aperçoit alors une raie de lumière. C'est un spectre d'émission. Dans les faits, on observe ce genre de spectre lorsque l'on a à faire à un gaz ionisé qui émet différentes longueurs d'onde. La matière utilisée (ici un gaz) est initialement dans un état excité et cherche à diminuer son niveau d'énergie pour se rapprocher de son état fondamental.

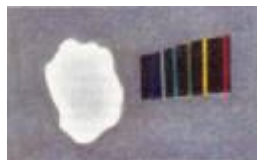


figure 1.2

Inversement, le spectre d'absorption sera observé lorsque le gaz est placé entre une source de lumière émettant un spectre continu d'énergie. On a ici le cas d'un électron qui passe d'un niveau d'énergie plus faible à un niveau plus élevé par absorption d'un photon.

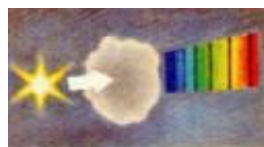
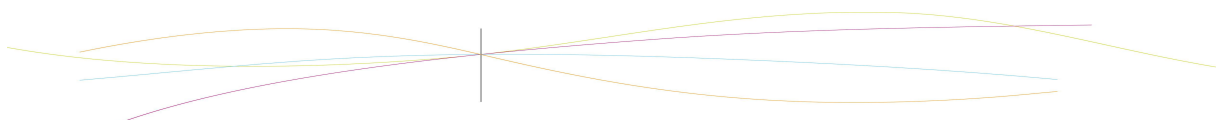


figure 1.3

C'est l'excitation de la matière par absorption qui permet ce passage de niveau d'énergie. On obtient alors un spectre continu avec des raies sombres en lieu et place des longueurs d'ondes des photons absorbés.



Chaque atome émet ou absorbe à des valeurs d'énergie qui lui sont propres. Le spectre obtenu est donc en quelque sorte, la carte d'identité d'un atome. La constante de Planck, h , est utilisée pour décrire la taille des quanta. La formule de l'énergie des différents niveaux d'énergie (loi de Bohr) :

$$E = h * \text{fréquence} = \frac{hc}{\lambda}$$

Par exemple, en astronomie l'utilisation du spectromètre a permis en 1859 au chimiste Robert Bunsen et au physicien Gustav Kirchhoff d'observer le spectre d'émission de la photosphère du soleil et ainsi d'en déduire sa composition. Le soleil est composé en partie de 73,46% d'hydrogène, et de 24,85% d'hélium.

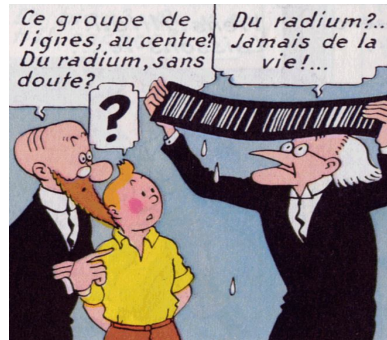


Figure 1.4

3.1.2. Composition du spectromètre optique

Le prisme

Pour comprendre les spectromètres en optique, il faut d'abord s'intéresser aux prismes. Ceux-ci permettent en effet de réfracter la lumière. Le prisme est bien souvent représenté par un triangle d'une certaine matière (le verre par exemple), mais il s'agit surtout de deux dioptrés (deux des côtés du triangle) plans et non parallèles entre eux.

Pour observer le phénomène de diffraction des ondes lumineuse par le prisme, on projette une onde lumineuse blanche sur une des faces du prisme. La lumière blanche, qui contient toutes les longueurs d'onde monochromatiques des différentes couleurs sera une première fois réfractée selon la loi de Descartes : $\sin i = n \sin r$ où i est l'angle d'incidence, r l'angle de réfraction et n est l'indice de réfraction du milieu, c'est à dire la matière dans laquelle est fabriquée le prisme. L'indice de réfraction de l'air est 1.

On sait par ailleurs que l'indice de réfraction d'un milieu dépend de la longueur d'onde. Cette observation peut être modélisée par la loi de Cauchy : $n(\lambda) = a + b/\lambda^2$

Lorsque l'onde passe à travers le premier dioptré du prisme, elle subit donc une dispersion chromatique. Les différentes longueurs d'onde, et par extension, les différentes couleurs, sont donc séparées. L'onde est à nouveau réfractée en passant par le second dioptré du prisme. Les différentes longueurs d'onde ressortent du prisme avec chacune un angle émergent différent.

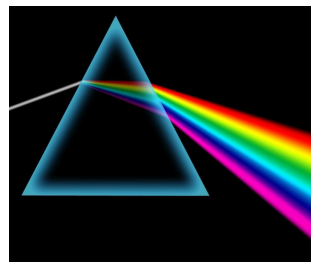
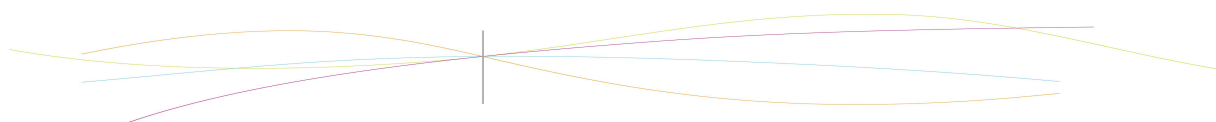


Figure 1.5



Les différentes réfractions, et donc la qualité voulue du prisme, dépendent des angles des dioptries, ainsi que du matériau utilisé pour fabriquer le prisme. Ainsi un prisme en verre n'aura pas les mêmes propriétés qu'un prisme fabriqué avec un élément à base de fluorure. Certains matériaux, comme le germanium ou le silicium sont par exemple utilisés pour réfracter des longueurs d'onde situées dans le domaine de l'infrarouge.

Dans les spectromètres actuels, les prismes sont bien souvent remplacés par des réseaux. Ils sont toutefois encore utilisés en complément de ces derniers pour séparer les différents ordres de diffraction produits par les réseaux.

Le réseau de diffraction

Un réseau est un composant majeur d'un spectromètre optique. En effet, c'est cette pièce qui permet l'éclatement de la lumière (qu'elle soit visible ou « invisible » à l'œil). Un réseau est constitué par une répétition d'un motif diffractant, appelé trait. L'écart entre deux traits successifs est appelé le pas du réseau (noté a).

Il existe principalement deux familles de réseaux, il y a les réseaux par transmission et ceux par réflexion. La nature de leur trait est ce qui les différencie. Les réseaux par transmission sont composés d'une série de fentes parallèles, les rayons réfractés sont « de l'autre côté du réseau » par rapport aux rayons incidents (cf schéma). Les réseaux par réflexions sont composés de rayures réfléchissantes (de petits miroirs), les rayons réfractés sont « du même côté » que les rayons incidents (cf schéma).

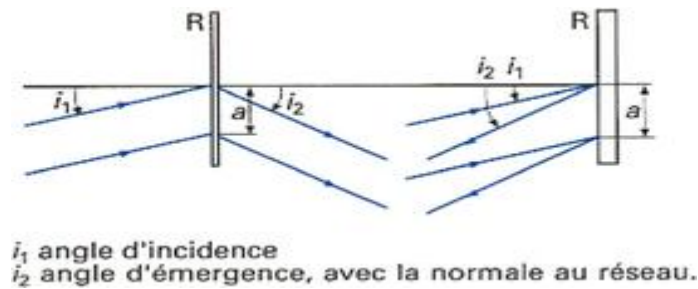
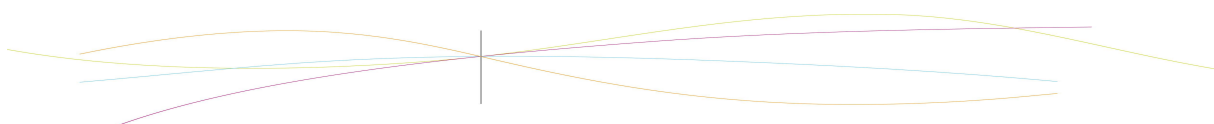


Figure 1.6

Lorsqu'un faisceau lumineux frappe un réseau, la lumière est transmise (ou réfléchi) au niveau des traits du réseau. Chaque trait est en fait une source secondaire qui émet la lumière dans toutes les directions selon le principe de diffraction (de Huygens-Fresnel). Les ondes émergentes interfèrent entre elles et du fait que les traits soient disposés de manière régulière, il y a une alternance entre des interférences constructives et destructives. La condition d'interférences constructives s'écrit :

$$\sin i \pm \sin i' = m \frac{\lambda}{p}$$

Où p est la période du réseau (distances entre deux milieux de traits successifs), i et i' sont les angles incident et réfracté, λ est la longueur d'onde et m est l'ordre d'interférence (entier). Le signe - dans cette relation concerne un réseau par transmission, le signe + un réseau par réflexion. D'après cette relation, la déviation dépend de la longueur de l'onde incidente, du pas et de l'ordre d'interférence. Pour comprendre ce qu'est l'ordre d'interférence, il suffit de regarder ce schéma :



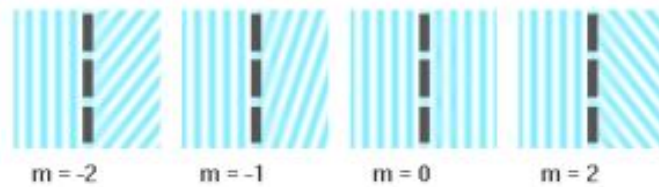


Figure 1.7

A noter que plus un ordre d'interférence est grand, plus la diffraction est grande. De plus, avec l'ordre d'interférence, le réseau, contrairement au prisme, a plusieurs spectres. Ce phénomène peut avoir pour conséquence des superpositions de spectre. Pour éviter ces recouvrements, qui rendent les mesures impossibles, il faut soit travailler aux petits ordres (le domaine visible est réduit à l'ordre 1), soit réduire la gamme de longueurs d'onde que l'on étudie, appelée intervalle spectrale.

Parmi les deux types de réseaux (transmission et réflexion), ceux par transmission ne sont pas très efficaces car la plupart de l'énergie passe par l'ordre 0 (où il n'y a pas de diffraction). C'est pourquoi, la grande majorité des spectromètres optiques ont un réseau par réflexion. Parmi les réseaux par réflexion, il existe un type de réseau dit « blazé ». Celui-ci est construit de façon à ce que l'essentiel de la lumière se concentre dans un ordre m donné, ce qui rend le spectre plus lumineux et moins sensible aux recouvrements d'ordres. Cependant la difficulté avec ce type de réseau de savoir quel ordre d'interférence choisir pour un nombre quelconque d'ondes lumineuses.

Enfin, quelques paramètres permettent de différencier la qualité entre les réseaux, qui dépend principalement de leur résolution et de leur diffraction. D'après la formule écrite au début, la dispersion est d'autant plus grande que le pas est petit et/ou que la longueur d'onde et l'ordre d'interférence sont grands. En outre, plus un réseau comporte des traits, plus la largeur des tâches seront fines et meilleure sera la résolution. De plus, les grands réseaux (qui ont très une grande largeur mais aussi un prix très cher) ainsi que ceux qui peuvent travailler sous de grands angles ont également une meilleure résolution.

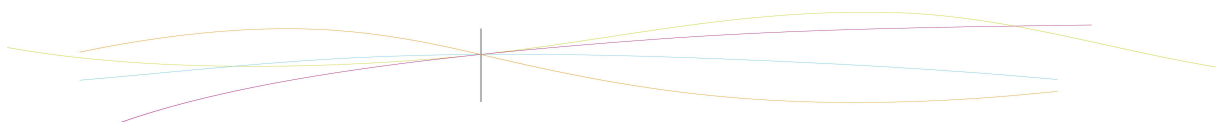
Le collimateur

En général, une source lumineuse émet des rayons lumineux dans toutes les directions. Le collimateur a pour but de réaliser un faisceau parallèle. Il est possible de le construire en plaçant une fente fine dans le plan focal objet d'une lentille convergente. La direction de cette fente doit être perpendiculaire au plan dans lequel la lumière sera dispersée. Le réglage de sa largeur permet de modifier la luminosité et la résolution.

Plus une fente est large, plus il y a de luminosité mais moins il y a de résolution. Moins une fente est large, plus il y a de résolution mais moins il y a de luminosité.

Le capteur

Le capteur est la seconde partie importante qui compose un spectromètre optique. Les capteurs utilisés sont CCD (*Charge-Coupled Device*). Le rôle du capteur est de transformer les photons captés en un signal électrique. Les capteurs sont donc photosensibles. Il existe aussi des capteurs CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*), mais ceux-ci sont pour l'instant peu utilisés dans les domaines scientifiques du fait de leur plus faible sensibilité comparée au CCD, mais ceci est susceptible d'évoluer.



Le premier critère de qualité d'un capteur CCD est sa résolution. C'est le nombre de pixels. Plus il est élevé, plus la qualité d'image obtenue sera importante. Toutefois, ce critère dépend de tous les autres. Ainsi, si le nombre de pixels est proportionnellement trop important à côté d'autres critères comme la taille du capteur, la qualité d'image ne s'en ressentira pas.

Le second critère de qualité d'un capteur CCD est sa sensibilité. Plus la sensibilité d'un capteur est élevée, plus l'intensité lumineuse nécessaire pour visualiser un phénomène est faible. Ce critère de sensibilité est d'autant plus important que l'on peut observer des phénomènes lointains (astronomie) ou de faibles intensités dans les différents domaines scientifiques.

Pour mesurer la qualité d'un capteur, il faut aussi prendre en compte son bruit, qui peut être lié à la résolution (plus la résolution est élevée, plus le bruit peut être visible). Il faut donc prendre en compte les éléments du spectromètre qui permettent de diminuer le bruit, notamment des systèmes de refroidissement, le bruit étant directement lié à la chaleur des CCD.

Enfin, la taille du capteur est aussi un critère à prendre en compte dans la comparaison des différents spectromètres.

3.1.3. Utilisation

Avec ce principe de spectromètre, il existe plusieurs « familles » de spectromètres selon différentes techniques de spectroscopie.

Dans les domaines visible et ultraviolet :

La **spectroscopie UV-visible** est une technique de spectroscopie mettant en jeu les photons dont les longueurs d'onde se trouvent dans l'UV(200nm-400nm) ou dans le visible (400nm-750nm). Soumis à un rayonnements de cette gamme de longueur d'onde, Les molécules, ions, complexes que l'on analyse peuvent subir une transition électronique (passage d'un électron d'un niveau d'énergie à un autre). A la fin, un spectre électronique qui relie intensité lumineuse et longueur d'onde est obtenu afin de connaître l'absorption des molécules, ions ou complexes.

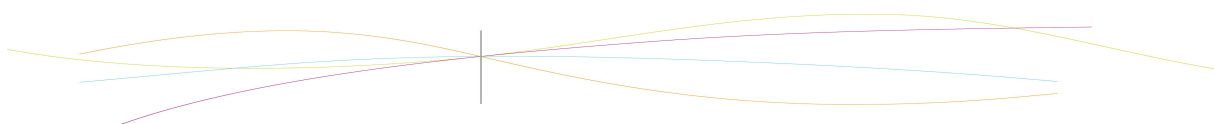
La **spectroscopie de fluorescence** est un type de spectroscopie électromagnétique qui analyse la fluorescence d'un échantillon. Le but de cette méthode est d'exciter les électrons (avec un laser par exemple) des molécules de certains composés en les éclairant d'un rayon lumineux (généralement UV) afin qu'ils émettent de la lumière (de plus basse énergie, généralement de la lumière visible). L'appareil qui permet de connaître les propriétés de fluorescence de composés chimiques est un spectrofluoromètre. Cette spectroscopie est aussi utilisée avec les rayons X.

La **spectrophotométrie** est une méthode analytique quantitative qui consiste à mesurer l'absorbance d'une substance chimique. Plus l'échantillon est concentré, plus il absorbe de la lumière et plus l'absorbance est grande. Pour mesurer l'absorbance, qui donne des informations sur la concentration d'une espèce chimique, on utilise un spectrophotomètre,

Toujours avec ce principe il existe aussi d'autres techniques beaucoup plus sophistiquées :

- **La spectroscopie Raman** (et hyper raman).
- **La spectroscopie Brillouin** (ou diffusion Brillouin).
- **La spectroscopie de corrélation de fluorescence** (FCS).

Voici, ci-après, quelques techniques un peu plus développées :



La spectroscopie RMN

Pour simplifier au maximum le principe de la RMN, nous n'entrerons pas dans les détails dans ce paragraphe.

Tous les noyaux atomiques possèdent une charge lorsqu'ils sont en rotation. Cette charge, appelée spin nucléaire, permet au noyau atomique de détenir un moment magnétique nucléaire. Sous l'action du champ magnétique créé par un aimant permanent ou un électro aimant, ce moment magnétique peut alors prendre différentes orientations. Si le moment magnétique est parallèle et de même sens que le champ extérieur, le niveau d'énergie est bas. Si le sens est contraire, le niveau d'énergie est haut.

Entre ces deux états, la différence d'énergie est proportionnelle au champ extérieur. Lorsque l'énergie passe du niveau bas au niveau haut, par absorption d'une radiation de fréquence ν telle que : $\Delta E = h\nu$, alors on dit qu'on a une transition, et donc qu'il y a résonance du noyau.

Dispositif

Un spectromètre de RMN comporte principalement :

- Un générateur radiofréquence Δ
- Une sonde contenant l'échantillon à analyser qui est placée dans la partie la plus homogène du champ magnétique directeur provenant d'un aimant permanent ou d'un électro aimant.
- Un système de détection et d'amplification du signal connecté à un oscilloscope et un enregistreur.

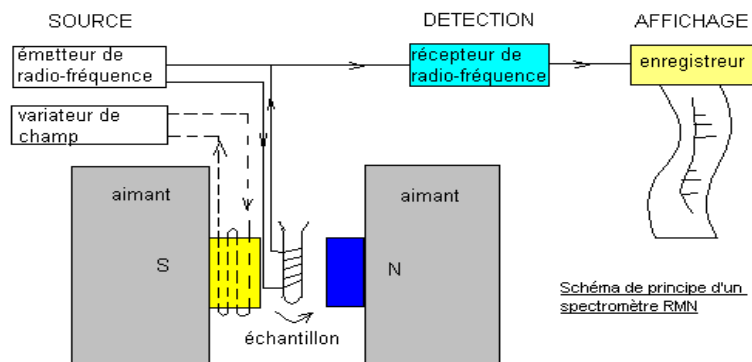


Figure 1.8

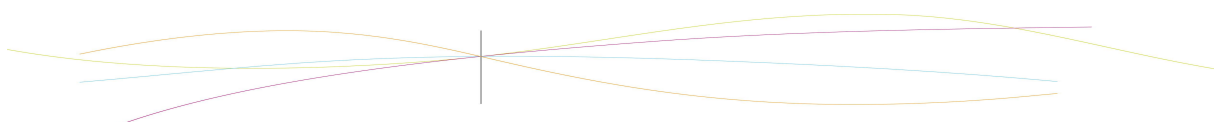
Applications :

Dans le domaine de la chimie, cette spectrométrie permet d'identifier des composés organiques. Elle ne nécessite pas l'obtention de monocristaux et permet d'étudier des protéines, des acides nucléiques à des concentrations millimolaires.

Elle est également utilisée en médecine dans l'étude conformationnelle des molécules organiques ou biologiques ainsi que des macromolécules en solution. D'autre part, on peut avoir une vue 2D ou 3D d'une partie du corps d'un individu grâce à l'imagerie par résonance magnétique nucléaire (IRM), notamment pour observer le cerveau.

Dans la dynamique nucléaire, les études par RMN des liquides mettent en œuvre la relaxation nucléaire (phénomène d'évolution d'un système de spins nucléaires vers l'équilibre thermodynamique suite aux interactions avec son environnement).

Dans les polymères, on utilise la RMN pour étudier les mouvements moléculaires. On peut également y rechercher le taux de cristallinité.



Spectrométrie de Mössbauer

L'effet Mössbauer est la possibilité d'absorption puis d'émission d'un photon **sans recul** par des noyaux de même nature dans un réseau cristallin.

Ce spectromètre fonctionne selon ce fonctionnement. Une source émet un rayonnement continu et on la fait se déplacer par oscillations. D'autre part, un détecteur possède en donnée une énergie de transition électronique. Lorsque l'énergie du rayonnement incident correspond à cette transition, le rayonnement est alors absorbé et on collecte ainsi une intensité. On peut donc, par la résonance, identifier le composé, étudier des changements de phase de certains matériaux et étudier des surfaces.

Un aspect important de la spectrométrie Mössbauer est qu'elle ne détruit en aucun cas l'échantillon, qui peut donc ainsi être réutilisé.

Applications :

- En géophysique, il permet de déterminer différentes formes chimiques du fer présentes dans les minéraux et les roches, ainsi que dans les météorites.
- En métallurgie, il permet d'analyser des phases existantes dans les alliages à différents stades du traitement de ceux-ci.
- En catalyse, il permet l'étude des propriétés physico-chimiques de films, surfaces et grains ultrafins.
- En biophysique, il permet l'étude des atomes de fer des certaines molécules, comme l'hémoglobine par exemple.
- En archéologie, il permet l'étude de poteries anciennes.

Spectroscopie ESCA

Les atomes d'un solide que l'on étudie émettent, lors de l'irradiation par des photons X, des électrons. On cherche, dans la spectroscopie ESCA, à analyser leur énergie cinétique.

D'après la relation de conservation de l'énergie, on a : $E_b = h\nu - E_c$ où h est l'énergie des photons X incidents et E_c l'énergie cinétique mesurée. Chaque atome possède un seul spectre des énergies de liaisons des électrons de cœur, ce qui permet ainsi son identification et son dosage dans un composé donné. L'ESCA permet donc d'analyser tous les composés que l'on a à étudier.

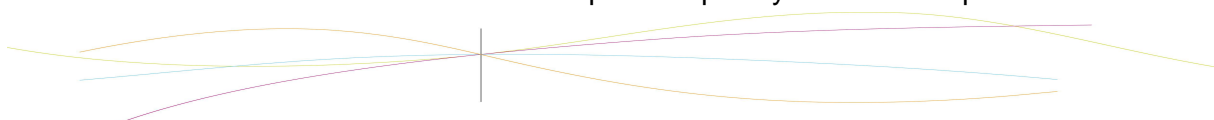
L'ESCA permet d'analyser n'importe quel type de surface compatible avec l'ultraviolet, c'est-à-dire : les céramiques, les matériaux composites, les semi-conducteurs, les métaux ou encore les polymères.

3.2. La spectrométrie de masse

La spectrométrie de Masse ou MS (Mass Spectrometry) est une technique physique d'analyse permettant de détecter et d'identifier des molécules d'intérêt par mesure de leur masse et de caractériser leur structure chimique.

3.2.1. Principe de Fonctionnement

Un composé organique introduit dans le spectromètre de masse est ionisé par bombardement électronique à 70eV. L'ion ainsi obtenu, appelé ion moléculaire, permet la détermination de la masse molaire du composé. Il peut y avoir des ruptures des liaisons



chimiques au sein de l'ion moléculaire, formant ainsi des ions fragments caractéristiques puisque cette dissociation éventuelle ne se fait pas au hasard mais selon des mécanismes bien déterminés. Ces ions fragments sont ensuite séparés en fonction de leur rapport masse/charge par l'application d'un champ magnétique et/ou électronique, puis collectés par un détecteur. L'ensemble de ces ions fragments constitue le spectre de masse dont la lecture permet l'identification de la structure moléculaire.

La composition de base d'un spectromètre de masse:

- Un système d'introduction de l'échantillon
- Une source d'ions ou chambre d'ionisation
- Un analyseur qui sépare les ions en fonction de leur masse et de leur charge
- Un détecteur qui détecte les ions sortant de l'analyseur

Chacun de ces éléments étant dans les conditions de vide.



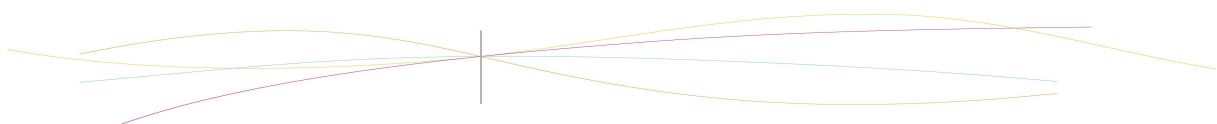
Figure 2.1

3.2.2. Composition

Première étape

Introduire l'échantillon dans la source d'ion. Cette introduction dépendra de l'état physique de l'échantillon (gaz, solide ou liquide).

1. Pour les gaz et les liquides volatils, l'introduction s'effectue à l'aide d'un ballon chauffé mis en relation avec la source d'ion.
2. Pour les solides, on utilisera une canne d'introduction possédant un filament sur lequel on déposera l'échantillon préalablement dissout dans un solvant organique. L'échantillon peut être également introduit par un système séparatif comme la chromatographie en phase gazeuse, liquide, ou électrophorèse capillaire couplée à la spectrométrie de masse.



Deuxième étape

Vaporiser les molécules et les ioniser. Une source d'ionisation peut être utilisée soit en mode positif pour étudier les ions positifs, soit en mode négatif pour étudier les ions négatifs. Plusieurs types de sources existent et sont utilisés en fonction du résultat recherché et des molécules analysées.

1. L'impact électronique (EI-MS) consiste à obtenir, sous vide, l'interaction d'une molécule et d'un électron accéléré à quelques dizaines de volts.
2. La ionisation chimique (CI-MS) est une méthode qui utilise un gaz réactif (à la pression d'environ 1 mm Hg) qui est ionisé par un faisceau d'électrons et donne une série d'ions qui à leur tour réagissent avec les substances à analyser. On peut utiliser divers gaz, parmi lesquels l'ammoniac, le méthane et l'isobutane.
3. L'électrospray est une technique qui permet de désolvater et d'ioniser, sous pression atmosphérique, les molécules d'échantillons dissoutes dans un solvant sous l'influence d'un champ électrique.
4. La spectrométrie de masse à ions secondaires avec cible liquide (L.S.I.M.S) est une technique de désorption-ionisation par des ions rapides (Cs^+ accélérés à 30kV) en présence d'une matrice liquide.
5. Le bombardement par atomes rapides (F.A.B) est une technique dont le matériau à analyser est dissout dans une matrice liquide puis bombardé sous vide avec une énergie élevée par un faisceau d'atomes.
6. La désorption-ionisation laser assistée par matrice (MALDI) est une technique permettant de ioniser un échantillon solide préalablement dispersé dans une grande quantité de matrice en l'irradiant par des photons émis par un laser dont la longueur d'onde est située dans la bande d'absorption de la matrice.

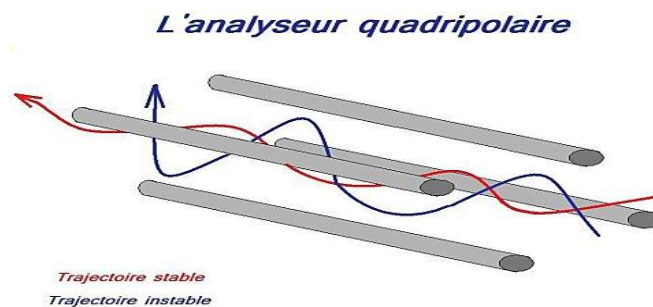
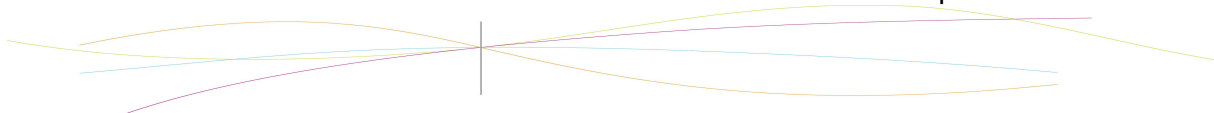


Figure 2.2

Troisième étape

Analyser les échantillons. Pour cela, il existe 3 analyseurs majoritaires.:

1. L'analyseur quadripolaire est constitué de 4 barres parallèles ayant idéalement une section hyperbolique, disposées symétriquement autour d'un axe. Ces 4 barres sont associées électriquement 2 par 2 et créant ainsi un champ électrique d'oscillation laissant passer certaines masses tandis que d'autres sont sur une trajectoire instable ne leur permettant pas d'atteindre le détecteur. Le quadripôle est donc un filtre de masse.
2. L'analyseur à piégeage d'ions est un quadripôle à 3 dimensions constitué d'une électrode annulaire et de 2 électrodes "chapeaux" de sections



hyperbolique. Le mouvement des ions en 3 dimensions à l'intérieur du piège dépend de la masse m de l'ion, ainsi que de sa charge Z . Il existe des zones de stabilité dans lesquelles des ions de masse m peuvent avoir un mouvement vibratoire stable et donc rester piégés dans la trappe ionique. Les ions sont d'abord tous piégés à l'intérieur de la trappe, confinés dans une certaine gamme de masse puis éjectés sélectivement en direction du détecteur. Le spectre de masse est obtenu en augmentant progressivement la tension pour déstabiliser les trajectoires des ions en fonction de leurs masses croissantes.

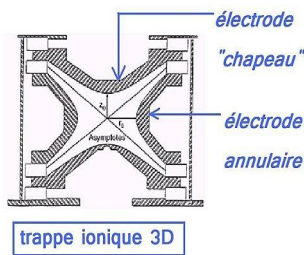


Figure 2.3

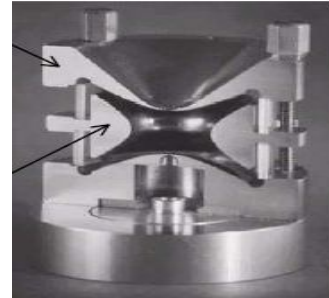


Figure 2.4

3. L'analyseur à temps de vol (time-of-flight, TOF-MS) est un système qui utilise la désintégration d'atomes de ^{252}Cf (isotope du californium qui est un puissant émetteur de neutrons ce qui le rend particulièrement dangereux. Chaque microgramme de ^{252}Cf émet spontanément 2 314 000 neutrons par seconde) qui peuvent dans 3% des cas se désintégrer en deux particules Tc (Technétium) et Ba (Baryum) émises simultanément et dans deux directions opposées. L'une des deux est immédiatement détectée et donne un signal de départ, tandis que l'autre frappe une "cible" sur laquelle est déposé l'échantillon. Celui-ci va alors émettre de 1 à 10 ions secondaires, qui vont se déplacer à une vitesse inversement proportionnelle à la racine carrée de leur masse. Le temps qu'ils mettent pour atteindre le détecteur (=leur temps de vol) permet donc de déterminer la masse des ions.

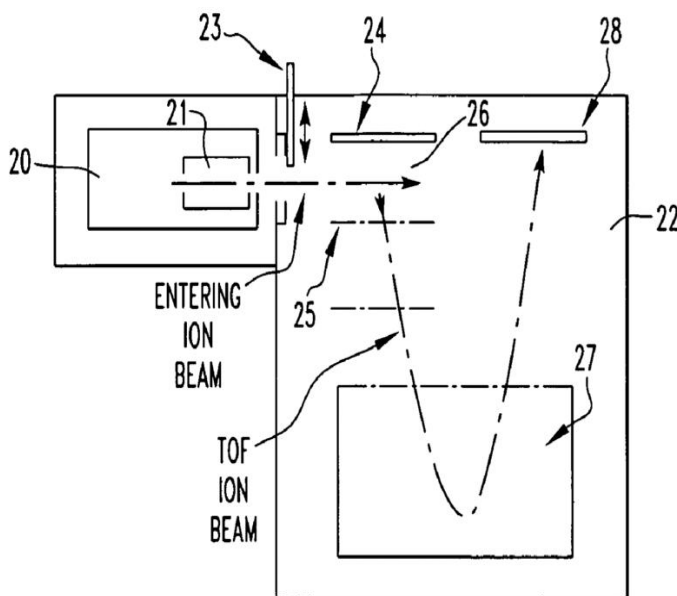


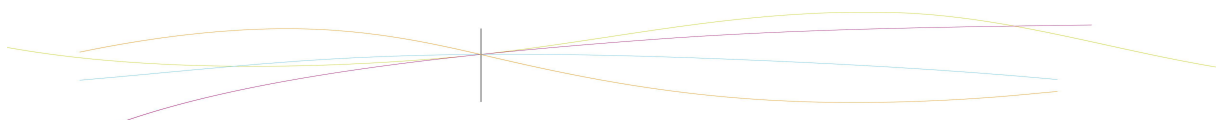
Figure 2.5

Avantage:

Cet analyseur offre la possibilité unique de détecter la présence simultanée d'un grand nombre de composés en mélange.

Limites:

La transmission, l'efficacité de détection décroît avec la vitesse pour les ions de haut poids moléculaire. Cette technique nécessite de disposer d'un mode de production des ions impulsionsnels afin de déclencher la mesure des temps de vol.



Les avantages de la spectrométrie de masse:

- Sa versatilité
- Sa sensibilité
- Sa capacité à être couplée aux techniques séparatives

Les inconvénients de la spectrométrie de masse:

La mesure de masse ne peut être effectuée que sur la molécule isolée, il est donc nécessaire de transformer un échantillon généralement liquide ou solide en gaz dilué nécessitant un vide poussé.

Secteurs professionnels utilisant cette technique:

- Hôpitaux (permet de déceler des cellules cancéreuses, des tumeurs, des éléments toxiques)
- Musées (permet de mettre en évidence la présence d'huiles, de cires, de résines terpéniques, de gommes polysaccharidiques et de colles animales, à partir de micro-prélèvements effectués sur des œuvres d'art).
- Aéroports (Spectrométrie mobile permettant de déceler des stupéfiants)
- Polices scientifiques (Permet de déceler les traces de sang dans les échantillons, des traces d'explosifs)
- Archéométrie (datations; analyses élémentaires et isotopiques; identifications de matériaux organiques complexes)

3.3. La spectrométrie acoustique

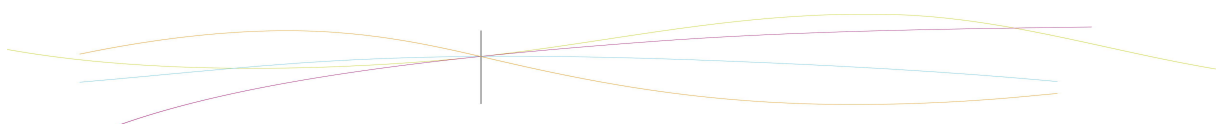
Elle est consacrée à l'étude des ondes sonores. Bien que les théories liées au son sont relativement anciennes (les propriétés sonores des matériaux étaient connues des grecs à l'époque de Pythagore, au VI^{ème} siècle avant J.C.), les théories acoustiques sur le comportement des particules dans des milieux hétérogènes sont plus récentes et datent pour la plupart du XX^{ème} siècle. La théorie ECAH, du nom de quatre physiciens, Epstein, Carhart, Allegra et Hawley, est une théorie qui décrit le comportement d'une particule isolée dans une suspension traversée par une onde acoustique à partir des transformées de Fourier. Pour cette théorie en particulier, la suspension est un milieu dilué, c'est-à-dire un milieu où on néglige l'interaction entre les particules. Des résultats de cette théorie, on a observé l'apparition d'une nouvelle technique de spectrométrie, la spectrométrie acoustique.

3.3.1. Principe de fonctionnement

Ce type de spectrométrie analyse les spectres d'atténuation ultrasonores et permet de définir les tailles des différentes particules contenues dans un milieu donné, ici un milieu dilué. C'est une méthode de la mesure d'une distribution de taille qui met en relation l'atténuation d'une onde acoustique avec la taille et de la concentration de différentes particules en solution.

Les mécanismes de cette atténuation sont classés en trois groupes en fonction de leurs propriétés physiques, et de leurs spécificités de réaction avec des fréquences d'ondes et des tailles de particules différentes :

- Les pertes par absorption



- Les pertes par dispersion
- Les pertes par dissipation d'énergie mécanique.

Pour ces trois mécanismes le comportement des particules et leur taille influent sur la prédominance d'un mécanisme en particulier. Ainsi, pour des particules ayant une taille variant du domaine nanométrique au domaine millimétrique, les pertes seront surtout mécaniques. Et pour les particules les plus grosses, les pertes se feront par diffraction des ondes acoustiques.

Par ailleurs, pour les pertes par dissipation d'énergie mécanique, si les pertes sont liées à la compression ou la décompression des particules soumises au passage de l'onde acoustique, les pertes seront sous forme thermo-élastique. En revanche, si elles sont liées à la résistance au déplacement de la particule, les pertes seront visco-inertielle. De plus, le mode de dissipation entre thermo-élastique et viscoinertiel dépend également du rapport de densité entre les particules et le fluide dispersant. Si ce rapport est élevé, les pertes sont visco-inertielle. Si au contraire, ce rapport est faible, elles seront thermo-élastiques.

3.3.2. *L'Ultrasizer*

La machine la plus utilisée dans le domaine de la spectroscopie acoustique est l'Ultrasizer, qui est séparée en deux parties, comme le montre la figure AAA ci-dessous.

Une substance est insérée dans la machine de gauche. Une onde sonore est envoyée à travers la substance à analyser, et les résultats sont envoyés sur l'ordinateur sous la forme de spectres d'atténuation. Puis, avec des calculs utilisant les principes de la théorie ECAH, l'ordinateur examine les spectres et détermine alors la taille des particules contenues dans le milieu.

Si ce principe est simple à expliquer, les théories qui constituent son fonctionnement sont très complexes et extrêmement difficiles à étudier. C'est pourquoi on ne s'intéressera pas ici aux calculs nécessaires à la conversion des spectres, mais uniquement à l'étude des domaines d'utilisation de ce type de spectrométrie.

3.3.3. *Domaines d'utilisation*

Le premier spectrographe utilisant les principes de l'acoustique a été développé pendant la Seconde Guerre Mondiale et était employé surtout en science de la parole et dans le domaine de la recherche en matière d'audiologie. Mais ce principe a été aujourd'hui remplacé par des techniques numériques de traitement du signal.

Aujourd'hui, la spectroscopie acoustique est surtout utilisée comme complément pour des études sur des fluides visqueux, et il n'y a pas encore de domaine réel d'application pour ce type de spectroscopie. Mais c'est un domaine encore jeune qui ne demande qu'à être étudié. Peut-être lui trouvera-t-on une utilisation majeure dans quelques dizaines d'années.

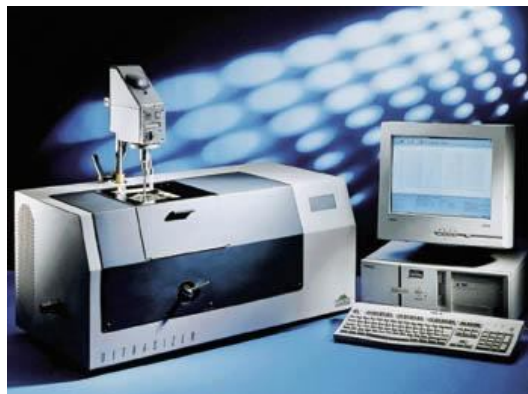
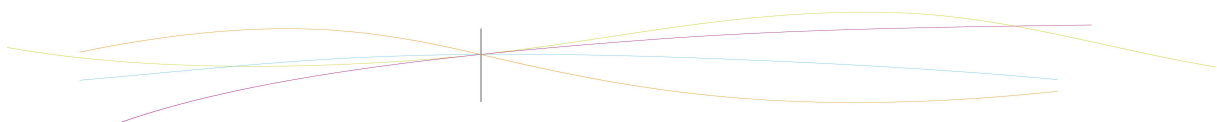


Figure 3.1



3.4. Expérience du Spectromètre d'absorption atomique

Nous avons choisi d'expliquer en détails le fonctionnement d'un spectromètre d'absorption atomique car nous allons réaliser une expérience avec cet appareil.

Le spectromètre d'absorption atomique est utilisé pour connaître les concentrations d'espèces dans un échantillon.

Le principe repose sur l'absorption par les éléments à l'état atomique d'un rayonnement issu d'une lampe à cathode creuse ou à décharge.

Un spectromètre est constitué de :

- d'une lampe
- d'une flamme ou d'un four
- d'un monochromateur
- d'un détecteur



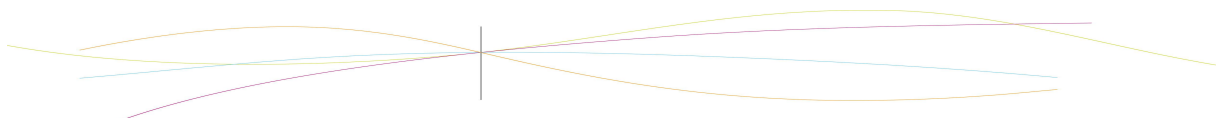
Figure 4.1

Tout d'abord la lampe doit contenir l'élément à analyser. En effet lors d'une spectrométrie de ce type on cherche l'existence d'un élément spécifique. Ainsi le spectre d'émission de la lampe correspond au spectre d'absorption de l'élément à analyser. De ce fait les photons issus de la lampe remplissent les conditions de résonance de l'élément visé et provoquent l'absorption. De plus cette lampe à cathode creuse contient un gaz rare. On crée alors une différence de potentiel. Le gaz rare est alors ionisé et s'entrechoquent avec les ions de l'élément à analyser présents dans la lampe.

L'échantillon est porté à haute température, par la flamme, de façon à avoir un gaz d'atomes libres c'est-à-dire quand les atomes sont indépendants les uns des autres. Une partie de ces atomes sont alors à l'état excité. Toutefois ces atomes ne peuvent pas rester à l'état excité et retournent à leur état fondamental et en délivrant un rayonnement. Lorsque la source de lumière passe à travers la flamme, le gaz absorbe la longueur d'onde caractéristique lors du rayonnement.



Figure 4.2



On a, d'autre part, précisé qu'il était nécessaire d'apporter une énergie thermique pour atomiser les éléments. Dans le cas de ce spectromètre d'absorption atomique, les éléments sont atomisés par nébulisation dans une flamme. On utilise alors un brûleur. Il est alimenté par un mélange gazeux combustible/comburant pour créer une flamme de 100mm de longueur sur un 1mm d'épaisseur. L'échantillon est alors aspiré et nébulisé par ce système. Les éléments à l'état atomique se retrouvent alors dans la flamme. Toutefois seulement une partie est utilisée pour l'analyse (les plus fines gouttelettes qui se retrouvent en haut de la flamme). Le reste est évacué dans la chambre de mélange à l'aide d'un drain.

Attention ! Il est important qu'un liquide soit aspiré par le nébuliseur lorsque la flamme est allumée afin d'éviter tout risque d'endommager la tête du brûleur. De plus, avant d'éteindre la flamme, il faut nettoyer le brûleur avec de l'eau distillée pendant quelques minutes.

De plus, la composition de la flamme a une certaine importance. Chaque flamme ne correspond pas à toutes les analyses. Il faut donc optimiser l'analyse en adaptant le couple combustible/comburant.

Le réglage du brûleur comporte l'alignement de la flamme avec le faisceau, l'optimisation de la hauteur de la tête du brûleur et l'ouverture du nébuliseur. Dans chaque analyse, on cherche à avoir l'absorbance la plus élevée.

Place de la flamme horizontale qui contient les atomes de l'échantillon

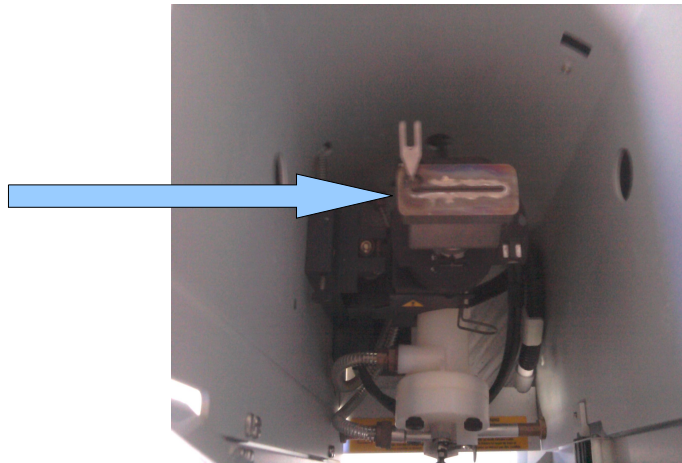


Figure 4.3

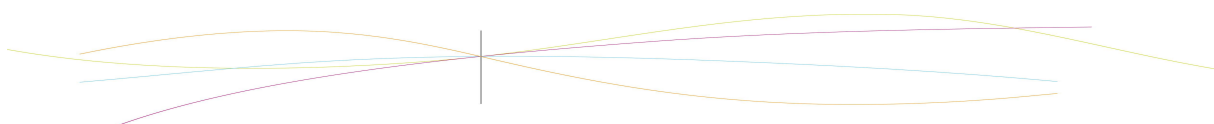
Auparavant, il faut régler le monochromateur de façon à sélectionner une bande de longueurs d'ondes qui contient la longueur correspondante à l'élément à analyser. Il faut essayer d'être le plus précis possible, la bande contient la longueur d'onde désirée + ou - un nanomètre. Il faut modifier cette bande et la source lumineuse à chaque fois qu'on change l'élément cible. Le monochromateur est composé de miroirs et réseaux.

En fait le faisceau lumineux issu de la flamme, lui même issu de la lampe, entre dans le monochromateur par une fente et est réfléchi par un miroir sur le réseau. Il y a alors dispersion des longueurs d'ondes ; l'angle d'émergence du réseau dépend de la longueur d'onde. Après le second miroir, la fente de sortie ne laisse sortir que les longueurs d'ondes comprises dans la bande choisie.

Enfin le détecteur mesure l'intensité transmise. Pour cela, on mesure avant l'intensité transmise sans échantillon avec une solution tampon.

On peut alors définir différentes équations :

- la transmittance T : $T = I/I_0$
- Le pourcentage de transmission est relié au pourcentage d'absorption par la relation suivante :



$$A = \log(I/I_0)$$

On sait que la loi de Beer Lambert est $A = klc$

Avec k le coefficient d'absorption

l longueur de la flamme ou du four graphite

c la concentration de l'élément voulu

On peut donc avec la mesure de l'intensité retrouvée la concentration d'un élément.

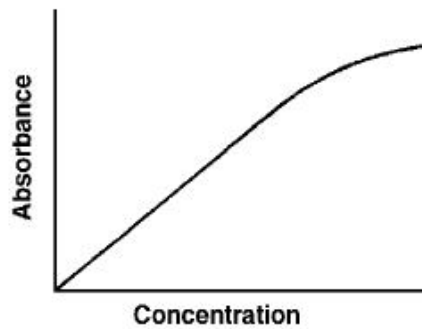


Figure 4.4

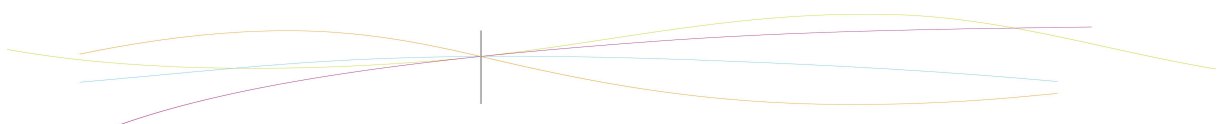
Le laboratoire de chimie de l'INSA de Rouen est muni d'un spectromètre d'absorption atomique. Nous avons alors décidé de réaliser une expérience sur cet appareil.

Dans le cadre d'un cours de thématique CFI, nous avons pu réaliser l'expérience suivante. Dans ce TP de chimie minérale, on a cherché, entre autres, à savoir la concentration en cuivre du complexe $K_2[Cu(C_2O_4)_2] \cdot 2H_2O$ ou le dioxalatocuprate II de potassium.

Tout d'abord nous avons réalisé ce complexe. Par la suite, nous avons cherché à savoir la concentration de chacun élément de ce complexe par diverses méthodes. Pour le cuivre nous avons utilisé le spectromètre d'absorption atomique.

Pour ce faire nous avons réalisé une solution de concentration en élément cuivre de 3,5 ppm. Avant de réaliser la manipulation nous avons étalonné l'appareil en plaçant un capillaire dans un bécher de solution tampon. Nous avons alors réalisé la manipulation en plaçant le capillaire dans la solution à étudier. Nous avons alors mesurer l'absorbance. En réalité, le spectromètre mesure l'intensité reçue par le détecteur pour finalement relier cette mesure à la concentration de cuivre à l'aide de la courbe d'étalonnage.

Dans notre cas, la valeur d'absorbance était de 0,175 (valeur plutôt faible). Grâce à la courbe d'étalonnage que nous avons réalisé avec quelques valeurs données, $f(C) = A$, on a pu obtenir la concentration en cuivre en ppm. En divisant par la masse molaire du cuivre, nous avons pu obtenir la concentration, en mol/L, de 3,83 mol/L



3.5. Expérience du spectromètre optique

Objectif : Réaliser une expérience avec un spectromètre optique
 Étudier le spectre d'émission de 2 espèces chimiques : le sodium et le mercure
 Étudier le phénomène de transmittance avec plusieurs filtres de couleur.

Matériel : une lampe à vapeur de sodium
 une lampe à vapeur de mercure
 une lampe de lumière blanche
 un spectromètre optique
 un ordinateur
 des filtres de couleur (cyan, jaune et magenta)

Protocole expérimental : pendant cette expérience, on va apprendre à utiliser un spectromètre optique à travers deux principes de spectrométrie: l'émission et l'absorption. Le but étant d'obtenir le spectre d'émission de deux espèces chimiques au moyen de deux lampes à vapeur : le sodium et le mercure, afin de constater la qualité des deux spectres. Dans une autre expérience, on utilisera des filtres de trois couleurs différentes pour observer le principe d'absorption.

3.5.1. Expérience 1 : Le spectre d'émission

Schéma expérimental :

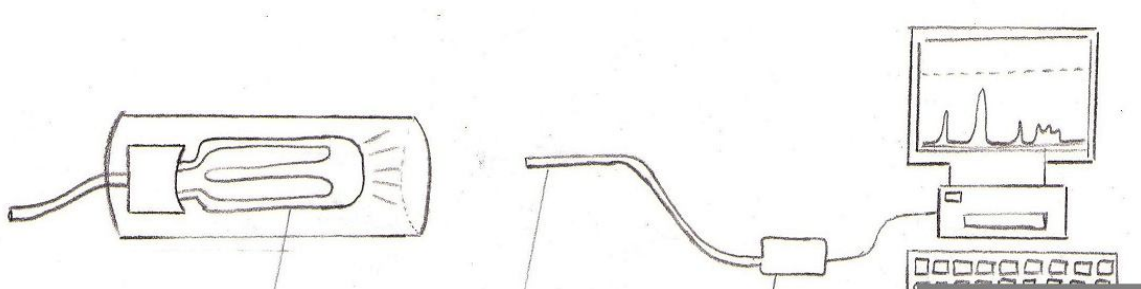
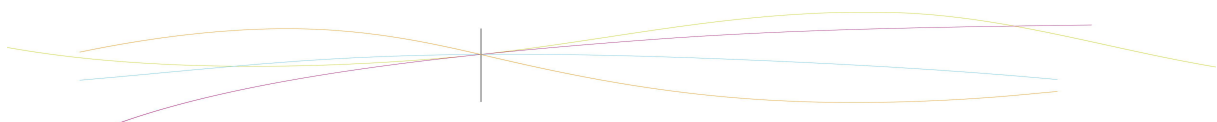


Figure 5.1

Dans cette expérience, nous utilisons un spectromètre optique relié à un ordinateur. Ce spectromètre capte les différentes longueurs d'onde via une fibre. La première étape consiste à mesurer les différentes intensités sans aucune lumière (I_0) à l'aide du spectromètre. Les données sont ensuite stockées sur l'ordinateur. On allume ensuite une lampe de sodium ou de mercure dont nous prenons les mesures d'intensité (I_2). La dernière étape est de réaliser, via un logiciel de tableur, une soustraction des valeurs sans la lampe allumée (I_0) aux valeurs avec la lampe (I_2). Cette opération permet d'enlever le bruit ambiant et d'isoler les rayons lumineux de la lampe.

$$I_1 = I_2 - I_0$$



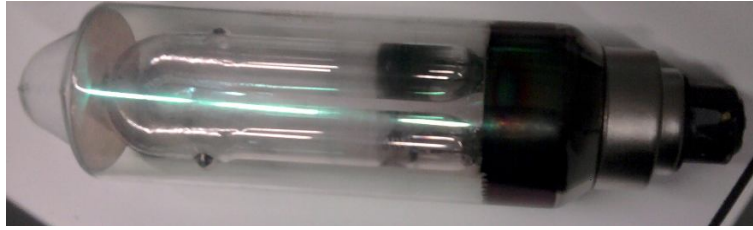


Figure 5.2

Résultats attendus :

Pour le sodium ou pour le mercure, nous connaissons les principales longueurs d'onde caractéristiques de ces espèces. Elles peuvent être trouvées dans la documentation (doc.). Dans notre expérience, nous allons vérifier si les longueurs d'onde expérimentales sont bien les mêmes que celles théoriques.

| Espèce Chimique | Mercure | Sodium |
|------------------------|---------|--------|
| Longueur d'onde (nm) | 365,4 | 568,8 |
| | 404,7 | 589 |
| | 435,8 | 589,6 |
| | 546,1 | |
| | 577,1 | |
| | 579,1 | |



Figure 5.3

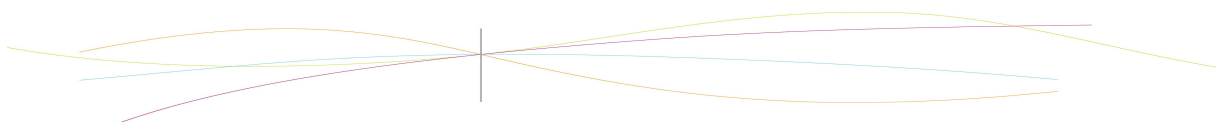


Figure 5.4

Résultats obtenus :

Le pas du spectromètre que nous utilisons, et donc sa précision, est de 0,5 nm.

Pour le mercure, nous avons décidé de faire apparaître une courbe incluant toute la gamme de fréquence du spectromètre utilisé. Pour le sodium, cette gamme est réduite au niveaux des longueurs d'onde visibles, c'est à dire entre 400 et 700 nm.



Pour le mercure :

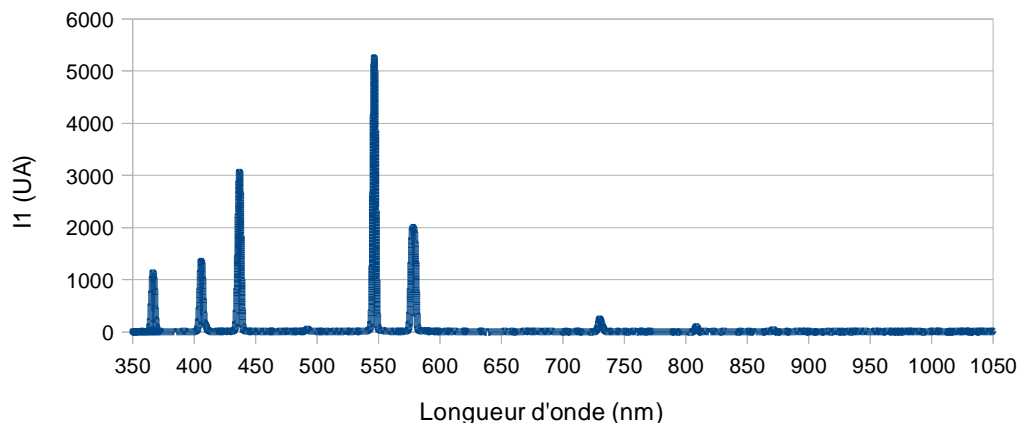


Figure 5.5

On obtient les 3 plus importantes raies lumineuses à 436,7 nm, 546,0 nm et 577,7 nm.

Deux autres pics sont observés à 366,4 nm et à 405,6 nm.

Remarque : Les deux raies dans le domaine du jaune n'apparaissent que comme un seul pic dans notre graphique (Le pic étant à 577,7 nm). Ceci est dû au pas du spectromètre qui ne permet pas de les différencier.

Pour le sodium :

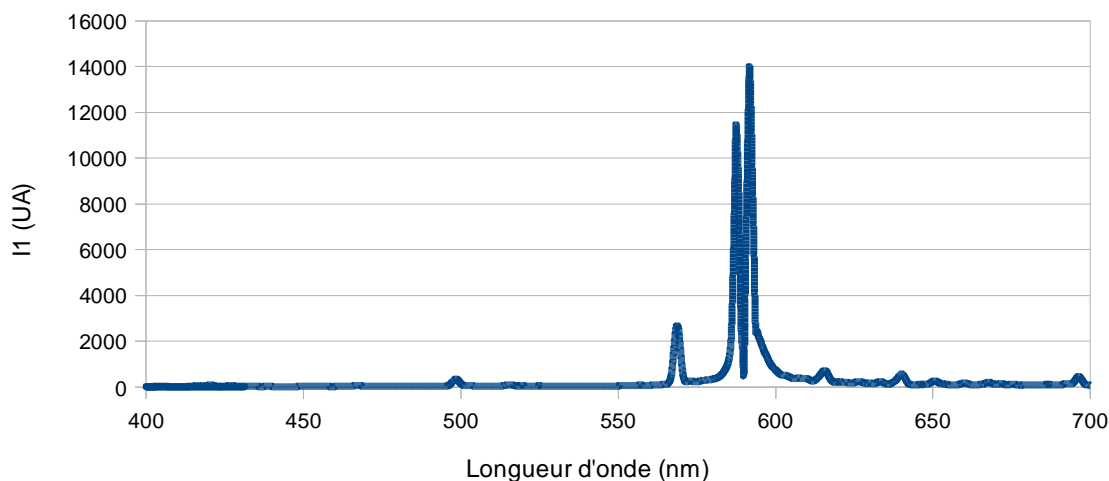
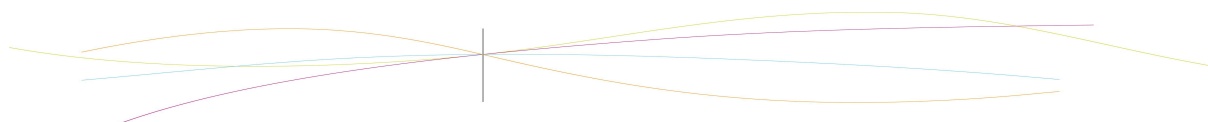


Figure 5.6

Un pic est particulièrement visible. Quand on l'étudie de plus près, on voit qu'il s'agit en fait de deux longueurs d'onde distinctes. Ces deux longueurs d'onde sont de 587,7 nm et de 591,5 nm.

Un pic d'intensité plus faible est observé également à 568,9 nm.



Remarque : Il y a une légère différence entre les résultats théoriques pour les deux pics dans le jaune et les résultats expérimentaux. On peut faire l'hypothèse que cette différence, supérieure au pas du spectromètre, est due aux effets thermiques inhérents à l'utilisation d'un spectromètre.

Conclusion : Les résultats de l'expérience nous donnent des longueurs d'onde d'émission des principales raies lumineuses de ces deux espèces très proches des valeurs théoriques. Certaines raies lumineuses semblent émettre de plus forte intensité que d'autres. On peut aussi s'apercevoir que le spectromètre qui nous utilisons capte des longueurs d'onde plus faibles que 400 nm (domaine de l'ultraviolet) et plus élevées que 700 nm (domaine de l'infrarouge). Ainsi, ce spectromètre a une gamme de longueur d'onde observable plus grande que l'oeil humain.

3.5.2. *Expérience 2 : Le principe d'absorption (la transmittance)*

Dans cette expérience, nous avons besoin du même spectromètre que pour la première expérience, toujours relié à l'ordinateur. Il faut ensuite une source de lumière blanche et des filtres magenta, cyan et jaune, les trois couleurs primaires en ce qui concerne la lumière. On commence par faire des mesures sans lumière (I_0). Pour le phénomène de transmittance, il faut aussi mesurer l'intensité de la lumière blanche seule (I_1). Pour chaque filtre étudié, il faut ensuite prendre les mesures d'intensité (la couleur) avant d'utiliser un logiciel de tableur pour réaliser les calculs de transmittance soit :

$$I_{couleur} = \frac{(I'_{couleur} - I_0)}{(I_1 - I_0)}$$

Les couleurs des filtres étudiés sont : cyan, vert et rouge.

Résultat obtenu : Le pas du spectromètre est toujours de 0,5 nm. La lumière filtrée par le cyan est étudiée dans toute la gamme de longueurs d'onde du spectromètre. Pour le vert et le rouge, la gamme est limitée au domaine du visible.

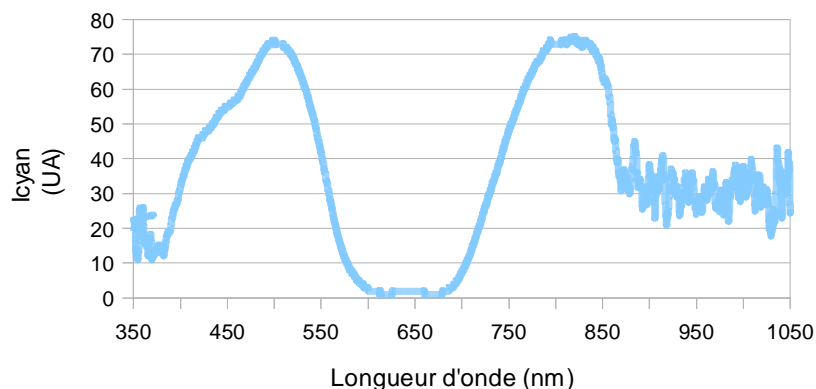
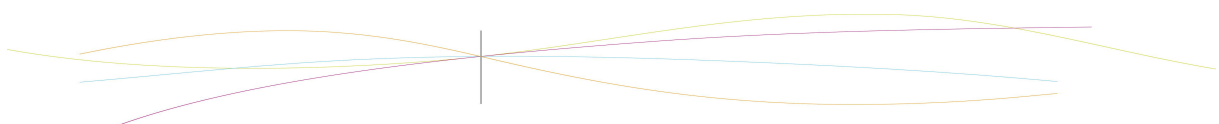


Figure 5.7



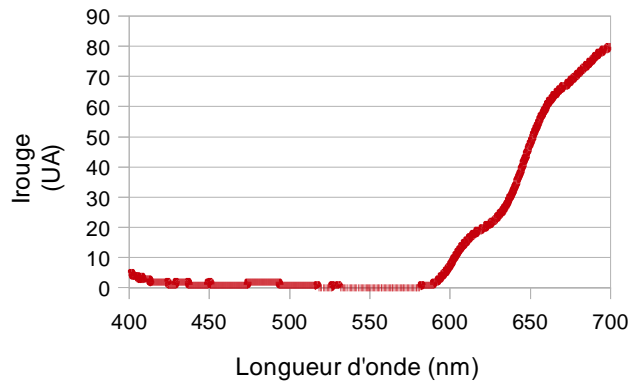


Figure 5.8

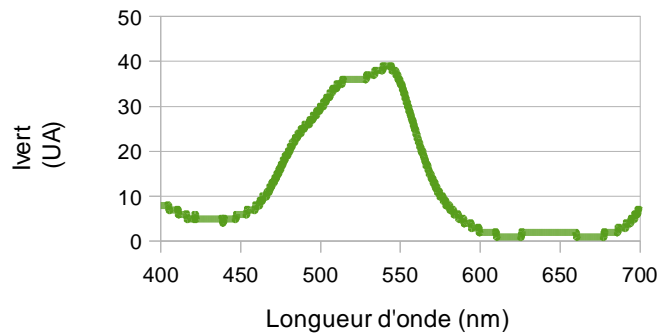


Figure 5.9

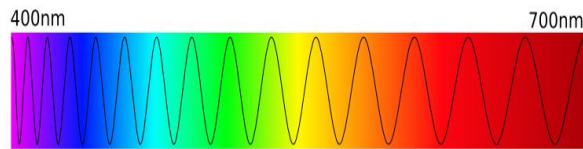
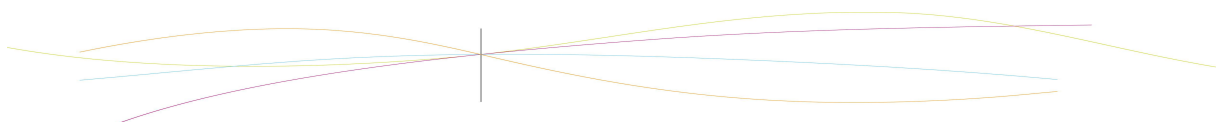


Figure 5.10

D'après les résultats, le maximum d'intensité pour le cyan se situe à 502 nm, le maximum d'intensité pour le vert se situe à 542 nm et le maximum d'intensité pour le rouge à environ 700 nm.

Conclusion : Comme on peut le voir avec la courbe du cyan, le filtre, ou plus généralement les filtres, de couleur que nous utilisons laissent passer des longueurs d'onde dans les domaines de l'infrarouge et des ultraviolets. Expérimentalement, nous avons aussi remarqué que le mélange des trois couleurs primaires permettait de bloquer complètement les longueurs d'onde du visible.

Avec cette expérience, on peut mieux appréhender le phénomène de transmittance observable par les spectromètres optiques. On note également que le spectromètre optique utilisé est efficace car le domaine qu'il capte pour chaque couleur correspond au domaine théorique de longueurs d'onde des différentes couleurs.

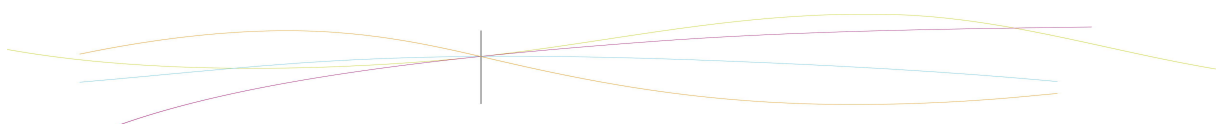


4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce projet sur le principe de fonctionnement des spectromètres nous a permis de mieux comprendre ces appareils qui sont, finalement, très utilisés aujourd'hui et dans de nombreux domaines. Nous avons donc pu mieux appréhender leur mode de fonctionnement et leurs applications. Nous avons aussi pu apprendre à les différencier et apprendre l'existence de certains et leur utilité. En effet, certains spectromètres sont plus adaptés que d'autres à une situation.

D'autre part, comme tout autre, ce projet nous a appris à travailler en groupe, à communiquer et à séparer les différentes tâches afin d'optimiser le travail. Toutefois, un projet implique aussi d'apprendre à travailler seul sur un sujet bien précis. De plus, réaliser un projet impose des dates butoires et nous oblige à être ponctuel. Il nous a alors permis d'assimiler une fois de plus ces qualités qui nous seront vitales dans notre futur statut d'ingénieur.

Dorénavant, nous savons comment les spectromètres fonctionnent et de quoi ils sont constitués. Il pourrait alors être intéressant de construire un spectromètre simple mais de toutes pièces. En fait, mettre nos connaissances à profit et réaliser quelque chose de concret.



5. BIBLIOGRAPHIE

Sites Internet :

Prisme (optique). *Wikipedia*. 20 mai 2012. [date de consultation : 11 avril 2012].
http://fr.wikipedia.org/wiki/Prisme_%28optique%29

Capteur photographique. *Wikipedia*. 27 mai 2012. [date de consultation : 29 avril 2012].
http://fr.wikipedia.org/wiki/Capteur_photographique

La Spectro. 11 décembre 2011. [date de consultation : 11 avril 2012].
<http://bmauclaire.free.fr/astonomie/spectro/>

E2. Raie spectrale. *Wikipedia*. 27 mai 2012. [date de consultation : 30 mai 2012].
http://fr.wikipedia.org/wiki/Raie_spectrale

Utilisation de la spectroscopie acoustique pour la caractérisation de suspensions denses. 2007. [date de consultation : 25 avril 2012]. http://oatao.univ-toulouse.fr/1501/1/Schetrite_1501.pdf

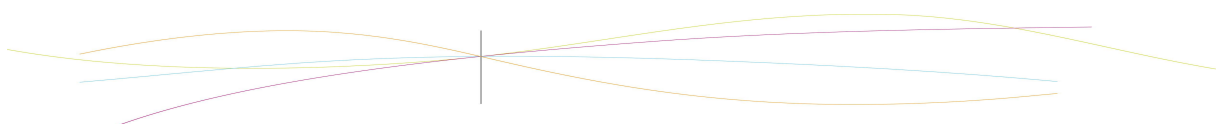
Thèse de Mallorie Tourbin sur la "caractérisation et comportement de suspensions concentrées de nanoparticules sous écoulement ". 14 décembre 2006. [date de consultation : 16 mai 2012].
<http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00000505/01/tourbin.pdf>

Absorption atomique et émission de flamme. 2011. [date de consultation : 7 mai 2012]. <http://www.iut-acy.univ-savoie.fr/fileadmin/DUT/MPH/fichiers/semestre3/techniques-spectroscopiques/Absorption-atomique-Emission-flamme.pdf>

Notions d'optique pour les astronomes amateurs. [date de consultation : 25 avril 2012].
<http://serge.bertorello.free.fr/optique/diffrac/diffrac.html>

Le réseau diffraction et interférences. [date de consultation : 5 mai 2012].
http://media4.obspm.fr/public/FSU/pages_interference/reseau-apprendre.html

Effet Mossbauer et applications à la physique du solide. 1976. [date de consultation : 17 mai 2012].
<http://www.iupac.org/publications/pac/pdf/1976/pdf/4801x0053.pdf>



Microsonde électronique de Castaing. [date de consultation : 13 mai 2012]. <http://mon.ftp.a.moi.chez-alice.fr/Ecole/LSM3/Microscope/Micro3.pdf>

Analyse ESCA. [date de consultation : 4 avril 2012]. <http://www.biophyresearch.com/pdf/esca.pdf>

Spectrométrie de fluorescence atomique. 2011. [date de consultation : 18 avril 2012]. <http://www.iut-acy.univ-savoie.fr/fileadmin/DUT/MPH/fichiers/semestre3/techniques-spectroscopiques/Spectrometrie-Fluorescence-Atomique.pdf>

Spectrométrie d'émission des rayons X. Fluorescence X . 10 septembre 2000. [date de consultation : 17 avril 2012]. <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mesures-analyses-th1/spectrometries-42390210/spectrometrie-d-emission-des-rayons-x-fluorescence-x-p2695/>

(S-5) Ondes et Photons . 13 décembre 2001. [date de consultation : 17 avril 2012]. <http://www.phy6.org/stargaze/Fsun5wave.htm>

Spectromètre à fluorescence X à dispersion d'énergie (EDXRF). [date de consultation : 17 avril 2012]. <http://www.directindustry.fr/prod/skyray-instrument/spectrometres-a-fluorescence-x-a-dispersion-d-energie-edxrf-54641-375677.html>

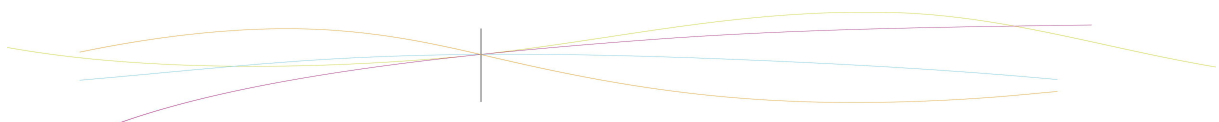
Effet Mosbauer. [date de consultation : 17 mai 2012]. <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=3613>

TP 4 Spectrométrie dispersive : prisme et réseau. août 2007. [date de consultation : 23 avril 2012]. http://physique-eea.ujf-grenoble.fr/intra/Organisation/CESIRE/OPT/DocsOptique/TextesTP/TextesTP_L3PC/TP4_Spectrometrie_prisme_reseau.pdf

Systèmes dispersifs en spectrométrie atomique. 10 mars 2002. [date de consultation : 17 mai 2012]. <http://www.iut-acy.univ-savoie.fr/fileadmin/DUT/MPH/fichiers/semestre3/techniques-spectroscopiques/Absorption-atomique-Emission-flamme.pdf>

Autres :

E1. Données de la salle de physique optique de l'INSA de Rouen.



6. CRÉDITS D'ILLUSTRATION

1.1 - Valeurs discrètes de l'énergie.

http://s.bourdreux.free.fr/lycee/Terminale_S/TermS_Physique/TermS_phy_chap15/TermS_phy_chap15.htm

1.2 - Principe de l'émission. <http://bmauclaire.free.fr/astonomie/spectro/>

1.3 - Principe de l'absorption. <http://bmauclaire.free.fr/astonomie/spectro/>

1.4 - Tintin et l'étoile

mystérieuse. <http://regards.sur.sciences.free.fr/astonomie/etoiles/composition.htm>

1.5 - Le prisme. http://4.bp.blogspot.com/_zx3fMUEvOR0/S7eJI74rVml/AAAAAAAAABCQ/Wz4K5u-6QY4/s1600/prisme.jpg

1.6 - Angles dans un réseau. <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mesures-analyses-th1/spectrometries-42390210/systemes-dispersifs-en-spectrometrie-atomique-p2660/reseaux-de-diffraction-p2660niv10002.html>

1.7 - Variation de l'angle de dispersion en fonction de l'ordre d'interférence.

http://media4.obspm.fr/public/FSU/credit_asm.html

1.8 - Schéma du spectromètre RMN.

2.1 - Structure d'un spectromètre de masse.

2.2 - L'analyseur quadripolaire.

2.3 - Trappe ionique 3D.

2.4 - Trappe ionique 3D (2).

2.5 - Analyseur à temps de vol.

3.1 - Ultrasizer. http://www.prozesstechnik-online.de/image/image_gallery?img_id=32019887

4.1 - Les différentes lampes du spectromètre d'absorption atomique du laboratoire.

4.2 - Le spectromètre d'absorption atomique du laboratoire.

4.3 - Intérieur du spectromètre d'absorption atomique du laboratoire.

4.4 - Courbe de l'absorbance par rapport à la concentration.

5.1 - Schéma d'expérience de l'émission.

5.2 - Lampe à sodium.

5.3 - Spectre théorique du mercure. <http://www.web-sciences.com/fiches2d/fiche4/fiche4.php>

5.4 - Spectre théorique du sodium. <http://www.web-sciences.com/fiches2d/fiche4/fiche4.php>

5.5 - Résultats obtenus pour l'émission du mercure (Intensité/Longueur d'onde).

5.6 - Résultats obtenus pour l'émission du sodium (Intensité/Longueur d'onde).

5.7 - Résultats obtenus pour la transmittance du cyan (Intensité/Longueur d'onde).

5.8 - Résultats obtenus pour la transmittance du vert (Intensité/Longueur d'onde).

5.9 - Résultats obtenus pour la transmittance du rouge (Intensité/Longueur d'onde).

5.10 - Spectre du visible. http://fr.wikipedia.org/wiki/Lumi%C3%A8re_visible

