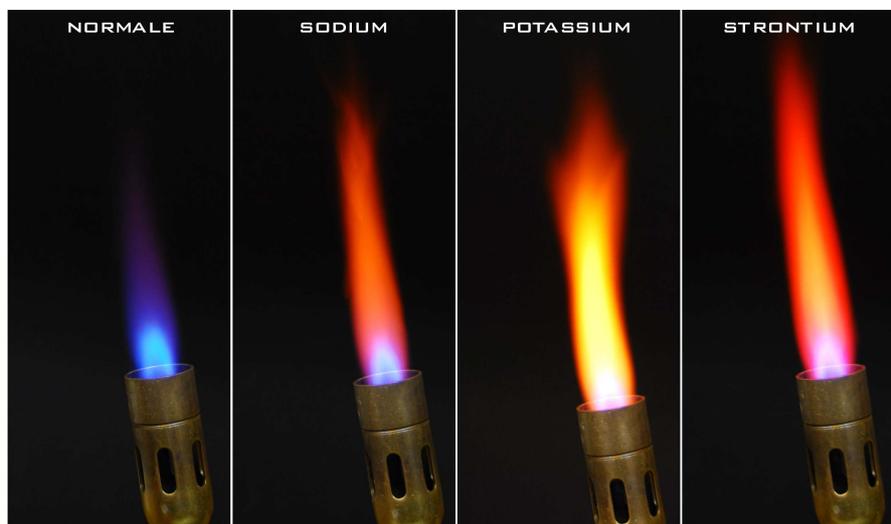


IMAGERIE D'EMISSION DE FLAMME



Etudiants :

Etienne BRES

Pierre CHEVALIER

Alexandre FONTENAY

Thibault HALLOUIN

Guillaume TEXIER

Enseignant-responsable du projet :

David HONORE



Date de remise du rapport : 22/06/2009

Référence du projet : STPI/P6-3/2008 –2009

Intitulé du projet : *Imagerie d'émission de flamme.*

Type de projet : *expérimental*

Objectifs du projet :

Le but de ce projet est d'étudier l'imagerie d'émission d'une flamme produite par un petit chalumeau. On va, à partir d'un montage optique permettant de concentrer le plus d'intensité lumineuse dans le spectrophotomètre, étudier le spectre obtenu lors de l'ajout de particules d'éléments chimiques, tel que du métal. Cela va nous permettre d'étudier différentes configurations, et différents spectres.

TABLE DES MATIERES

1. Introduction	6
2. Méthodologie / Organisation du travail	6
2.1. Méthodologie et répartition.	6
3. Travail réalisé et résultats.....	7
3.1. Le montage principal	7
3.2. Les expériences réalisées	7
3.2.1. Titre 3.....	7
3.2.2. Titre 4.....	8
4. Conclusions et perspectives	8
5. Bibliographie	9
6.1. Documentation technique	10
6.2. Listings des programmes réalisés.....	10
6.3. Schémas de montages, plans de conception... ..	10
6.4. Propositions de sujets de projets (en lien ou pas avec le projet réalisé).....	10

NOTATIONS, ACRONYMES

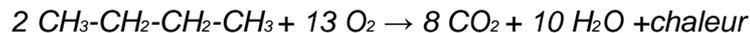
f_1'	distance focale de L1
f_2'	distance focale de L2
O_1A	distance entre la flamme du chalumeau et le centre optique de L1
O_1A'	distance entre le centre optique de L1 et l'objet virtuel
O_1O_2	distance entre les centres optiques de L1 et L2
O_2A'	distance entre le centre optique de L2 et l'objet virtuel
O_2A''	distance entre le centre optique de L2 et l'objet final(ou la fibre optique)

1. INTRODUCTION

Le but de ce projet de physique est d'étudier l'imagerie d'émission d'une flamme. Notre choix s'est porté, pour des raisons pratiques, sur l'étude de la flamme produite par un chalumeau contenant du butane, de formule $CH_3-CH_2-CH_2-CH_3$.

Une flamme, pour exister, a besoin de trois facteurs combinés (le triangle du feu). Il s'agit du combustible, du comburant, et de l'énergie d'activation. Dans notre étude, on utilise le butane comme combustible, le dioxygène de l'air comme comburant, et l'énergie d'activation est apportée par la flamme du briquet (qui provient elle-même d'une combustion de butane).

La formule de la combustion est alors :



Cette réaction ne se fait pas instantanément, il y a formation de composés intermédiaires, qui sont dans un état excité. Lorsqu'ils perdent cette excitation, il y a émission d'énergie sous forme de chaleur et/ou de flamme. Les composés intermédiaires qui engendrent la flamme sont principalement les radicaux CH , OH et C_2 . La réaction de combustion peut alors s'écrire de la manière suivante :



Dans cette formule, $h\nu$ correspond au rayonnement lumineux émis par la désintégration des radicaux pendant la réaction.

Nous souhaitons nous intéresser plus particulièrement au rayonnement émis par la combustion d'autres produits, tels que ceux utilisés en pyrotechnie. Pour cela, nous allons dans un premier temps réaliser un montage capable de capter et d'analyser le rayonnement produit par la flamme du chalumeau, puis, à partir de ce montage, nous allons essayer d'ajouter les différentes espèces que l'on peut trouver dans le laboratoire pour pouvoir étudier le spectre émis par ces différents produits.



2. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

2.1. Méthodologie et répartition.

L'organisation a été dans un premier temps un petit peu floue. Ne sachant pas trop dans quelle direction mener notre projet, nous nous sommes retrouvés à travailler tous les cinq au même endroit, à enchaîner les parties théorie avec des calculs et parties plus expérimentales avec des tentatives de montages. Cette méthode de travail s'est révélée assez contre-productive.

À partir de là, nous nous sommes répartis les tâches plus ou moins naturellement. La partie plus calculatoire et mathématique, à propos de la recherche des lentilles nécessaires au montage et du positionnement optimal des différents composants sur le banc optique, a été réalisée par Pierre, Thibault et Alexandre. Pendant ce temps, Étienne et Guillaume se sont plus concentrés sur le montage du poste de travail puis le début de rédaction de ce dossier.

Ensuite, les personnes ayant dans un premier temps effectué toute la partie théorique ont essayé de mettre en pratique et de réaliser l'expérience correspondant à leurs calculs, tandis que Étienne et Guillaume ont continué la rédaction du dossier. En parallèle à la rédaction du dossier, Étienne et Guillaume se sont aussi renseignés en profondeur sur les produits utilisables pour pouvoir obtenir des flammes colorées.

Nous avons travaillé suivant ce schéma pendant une période de quelques semaines. En effet, Thibault, Alexandre et Pierre n'arrivant pas à obtenir un montage efficace et utile, ils se sont concentrés sur comment améliorer celui-ci pour enfin pouvoir réaliser les expériences qui nous seront nécessaires. Pendant ce temps là, Étienne et Guillaume ont réfléchi sur les expériences qui pourraient être réalisées pour obtenir des spectres intéressants.

3. TRAVAIL REALISE ET RESULTATS

Comme il a déjà été signalé en introduction, les manipulations se dérouleront en deux parties. Dans un premier temps, nous avons cherché à effectuer un montage qui permet, à partir de la flamme du chalumeau, d'obtenir un spectre correct grâce au logiciel. Dans un deuxième temps, lorsque cette partie a été effectuée, nous nous sommes concentrés sur les moyens d'ajouter de nouveaux produits, et l'étude des spectres qui correspond à ceux-ci.

3.1. Le montage

3.1.1. *Principal*

Le montage a été assez long à réaliser. En effet, en partant uniquement avec un petit chalumeau, le matériel d'optique du laboratoire et un spectrophotomètre, il fallait arriver à réaliser un montage permettant de laisser passer assez de flux de photons pour pouvoir obtenir des résultats convenables sur le logiciel de l'ordinateur.

Plusieurs séances ont été consacrées au travail sur les différents calculs, en fonction du positionnement des lentilles, de leurs distances focales, et aussi des caractéristiques physiques du spectrophotomètre.

A partir de toutes ces données, nous sommes arrivés aux calculs suivants:

$$\frac{1}{\overline{OF'}} = \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}}$$

C'est de cette formule que découle logiquement la distance de la lentille à l'image :

$$\overline{OA'} = \frac{1}{\frac{1}{\overline{OF'}} + \frac{1}{\overline{OA}}}$$

De la même manière il est possible de déduire la distance entre l'image de la première lentille (qui est l'objet de la deuxième) et son image captée par le spectrophotomètre.

Cependant, même en effectuant le montage le plus précis possible correspondant au calcul théorique, il était impossible de capter assez de lumière émise par le chalumeau avec le logiciel pour pouvoir obtenir un résultat convenable. Pour que le montage soit efficace, il fallait qu'il soit effectué dans une pièce où le noir total règne.

Finalement, après avoir enfin trouvé un lieu propice (assez sombre, sans passage) pour effectuer le montage, nous avons pu enfin mettre en pratique notre travail théorique. Les premières acquisitions effectuées n'étaient pas très convaincantes. Les variations observées sont faibles. Le spectrophotomètre était alors réglé pour une acquisition sur 500ms avec une moyenne sur 2 acquisitions. Il fallait laisser un temps d'acquisition plus long, et prendre une moyenne sur plus d'acquisitions. En prenant des paramètres logiciel de 8000 ms et une acquisition pour la moyenne, nous avons obtenu un résultat correct. Ces réglages étaient efficaces pour une flamme de couleur toujours identique et d'intensité constante.

Néanmoins la brièveté et la luminosité plus importante du phénomène de combustion des sels ajoutés oblige à réduire le temps d'acquisition pour ne pas avoir un spectre saturé.

Finalement le logiciel du spectrophotomètre a été réglé sur une seule acquisition de 5000 ms. Les résultats sont concluants.

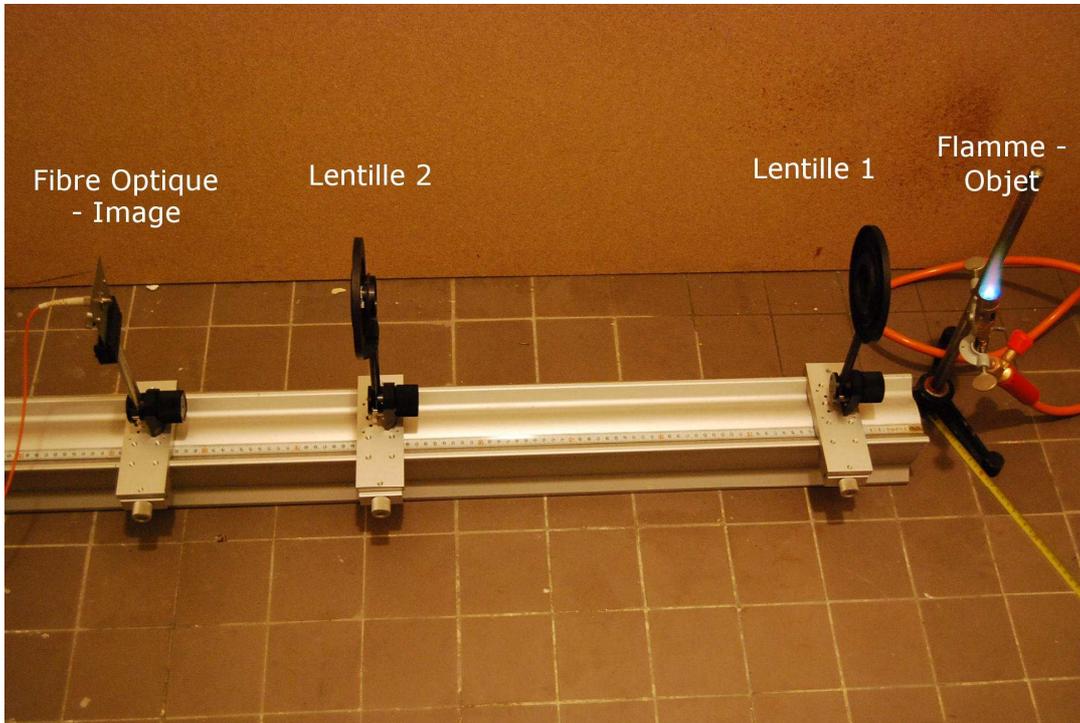


Photo du montage optique utilisé

3.1.2. Supplément pour l'ajout des substances

Pour l'ajout des produits, plusieurs méthodes existent, en fonction de la forme sous laquelle elles se présentent et de comment l'opérateur souhaite l'ajouter sur la flamme.

Pour les sels, il existe trois méthodes différentes¹ :

- Le bâton de bois imbibé.

Préparer une solution à l'aide de sel et d'éthanol ou méthanol, tremper le bâton et/ou le mettre sur la flamme du chalumeau.

- Le photophore:

Préparer une solution de la même manière mais au lieu d'imbiber un bout de bois il faut imbibier du coton puis lui mettre le feu. La flamme se colore au fur et à mesure que la température augmente.

- Le lance flamme

Toujours préparer une solution, la mettre dans un flacon avec spray (par exemple un bouteille de lave verre) après c'est le même principe que pour un pulvérisateur de déodorant,

on projette la solution sur la flamme. Cette méthode, bien que la plus pratique à mettre en œuvre reste la plus dangereuse.



Photo des vaporisateurs utilisés lors de nos expériences, selon la méthode du « lance-flamme »

Pour les poudres métalliques:

On remplit une saïère d'une de ces poudres et on en projette une petite quantité sur la flamme. Les particules métalliques s'échauffent puis s'enflamment. Cette méthode, la seule facile de réalisation pour les poudres métalliques est néanmoins assez dangereuse.

Comme signalé plus haut toutes ces méthodes d'introduction de sels dans la flamme comportent des risques. Il fallait en savoir plus, c'est pourquoi nous nous sommes rendus dans le département de Chimie des Procédés afin d'obtenir des informations supplémentaires.

Les produits utilisés pour la coloration des flammes sont tous irritants, corrosifs ou bien toxiques. C'est pourquoi lors des manipulations il est essentiel de porter des lunettes de protection et des gants. Des projections dans les yeux ou sur la peau peuvent se révéler dangereuses. En consultant le catalogue en ligne d'un fabricant de produits chimiques il est possible d'avoir accès aux fiches sanitaires de chaque espèce mise en jeu lors des expériences. Ainsi on peut découvrir que le Baryum peut aussi provoquer des irritations des voies respiratoires. Il est donc important de travailler sous hotte ou au moins dans une grande pièce bien aérée.

Dès lors que l'on manipule ces produits chimiques il faut savoir réagir en cas d'accident lors de la manipulation. Tout d'abord il faut appliquer les principes de précaution, c'est à dire protection des parties sensibles du corps telles que les yeux, le nez et la peau. De plus, il

faut instaurer un périmètre de sécurité autour des zones de manipulation. Dans ce périmètre le minimum de personnes sont autorisées à se déplacer ou à intervenir. Dans le cas où l'un des manipulateurs recevrait des projections sur le corps, on parle de brûlure chimique, il faut immédiatement rincer pendant 15 minutes minimum avec de l'eau froide sur la partie touchée. Si on est brûlé par la flamme ou des projections chaudes il faut appliquer le même protocole, c'est à dire rinçage intensif. Il est fortement conseillé d'appeler un médecin ou les pompiers si la brûlure, qu'elle soit chimique ou due à la chaleur, s'avère douloureuse et étendue.

3.2. Les expériences réalisées

3.2.1. Utilisation du spectrophotomètre

Pour pouvoir comparer, puis étudier les spectres obtenus avec la flamme du chalumeau et les différents produits que l'on ajoute, il faut partir d'une référence, d'un témoin. Nous avons décidé d'en prendre deux. La première a pour but de tester le spectrophotomètre, pour voir quel est le rendu d'un spectre dans les conditions de luminosité ambiante du laboratoire.

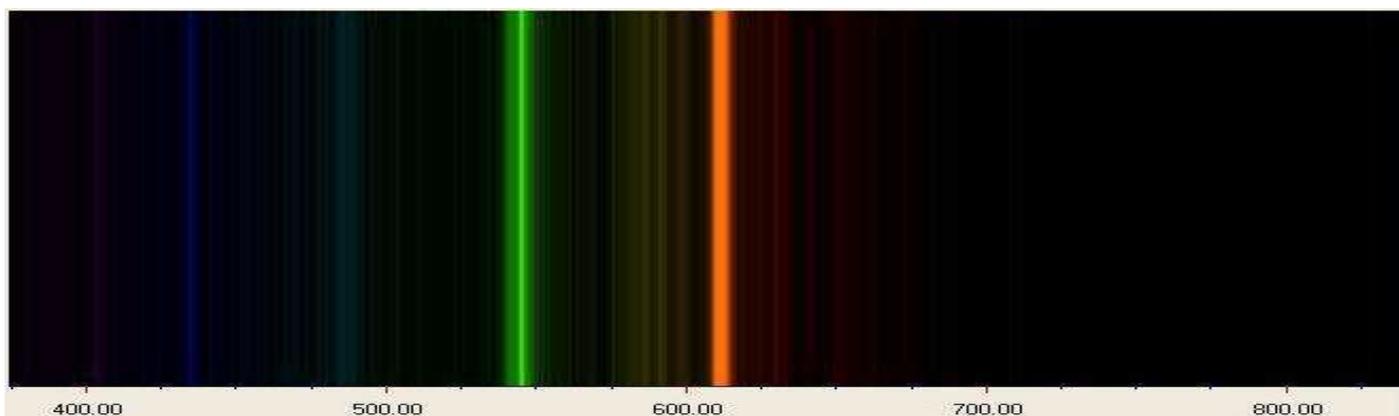
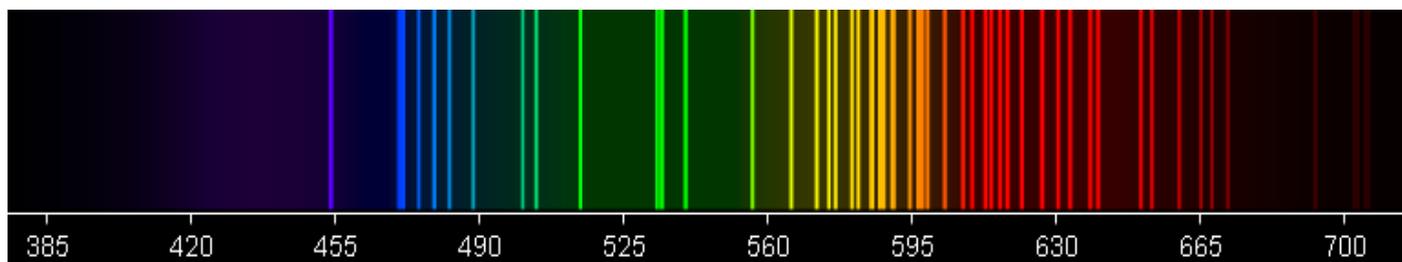


figure 1 : Spectre d'émission de la lumière du néon du laboratoire (longueur d'onde en nanomètre).

La lumière émise par le néon donne un spectre de raies. Ce spectre capté par le spectrophotomètre correspond assez bien (si l'on retire certaines imperfections sans doute dues à d'autres sources de lumière, provenant de l'extérieur du laboratoire) au spectre



théorique du néon.

figure 2 : Spectre d'émission théorique du néon (longueur d'onde en nanomètre)

D'autre part, il faut connaître le spectre d'émission de la lumière blanche. Ce spectre est continu sur toute la partie visible des ondes électromagnétiques

Une fois le montage principal en état de fonctionner, nous avons effectué une première acquisition concernant la lumière ambiante du laboratoire.

Pour pouvoir comparer puis étudier les spectres obtenus avec la flamme du chalumeau, on peut aussi utiliser le spectre visible par l'humain :

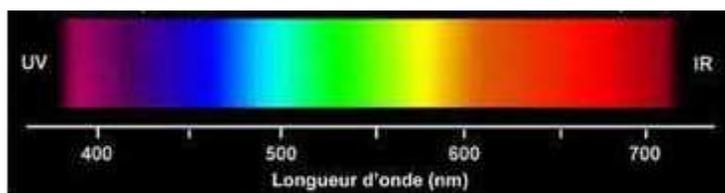
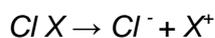


figure 3 : Spectre visible

3.2.2. Coloration de flamme

Test

Pour une première approche des flammes colorées nous avons demandé conseil aux préparateurs du département Chimie des Procédés pour qu'ils nous indiquent quelles procédures mettre en œuvre. Ceux-ci nous ont conseillé de pulvériser une solution aqueuse sur la flamme. Cette solution est composée uniquement de sels métalliques dilués dans de l'eau. La réaction de dilution est :



(où X est l'atome de métal)

Ensuite, le montage est simple à réaliser étant donné qu'il suffit de fixer le chalumeau et de protéger les surfaces susceptibles d'être aspergées par la solution. Le résultat est immédiat et nous avons obtenu des couleurs dans les flammes. Grâce à l'appareil photo du laboratoire nous avons pu prendre quelques clichés des flammes.

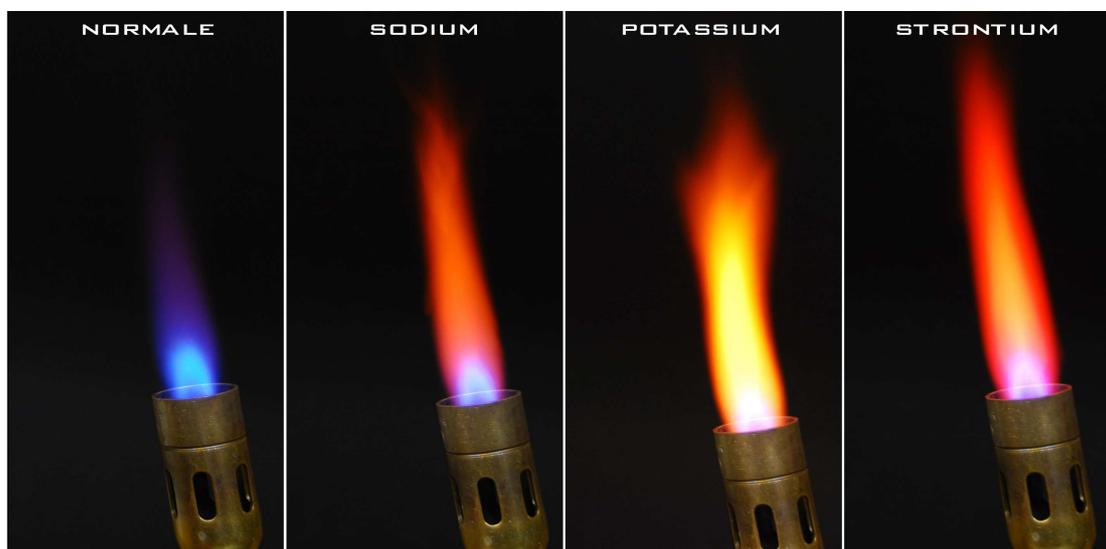
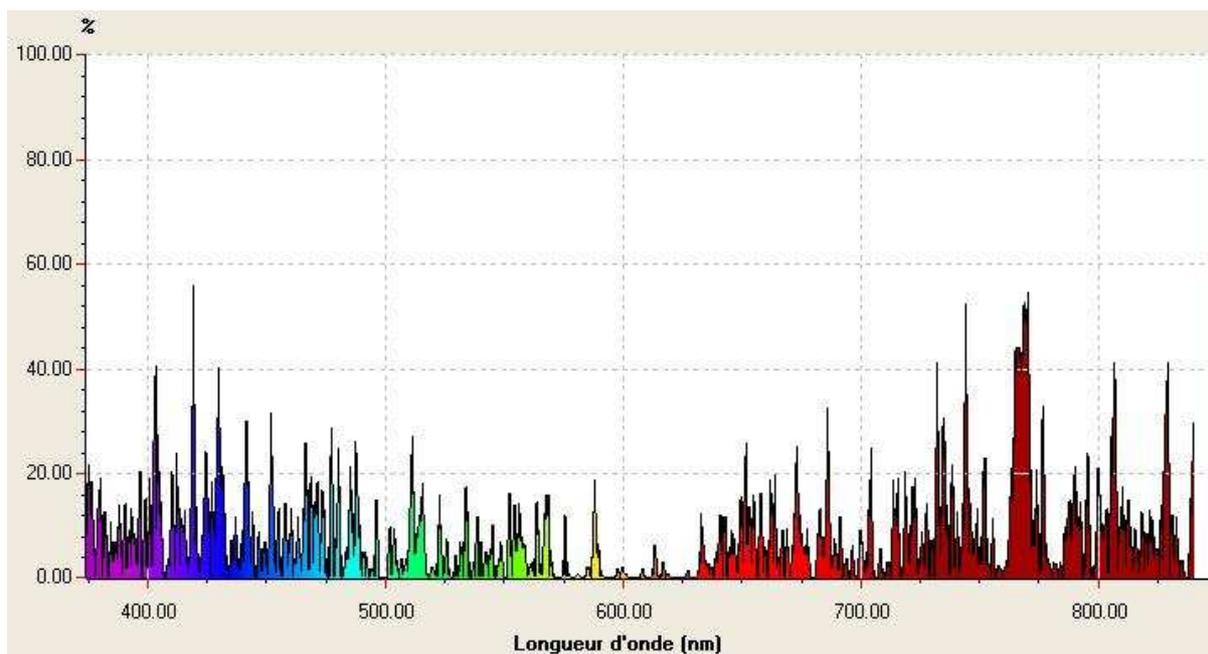


figure 4 : Résultat des premiers tests de pulvérisation de solution sur la flamme du chalumeau.

3.2.3. Résultats avec des spectres

Etude préliminaire de la flamme issue de la combustion du butane

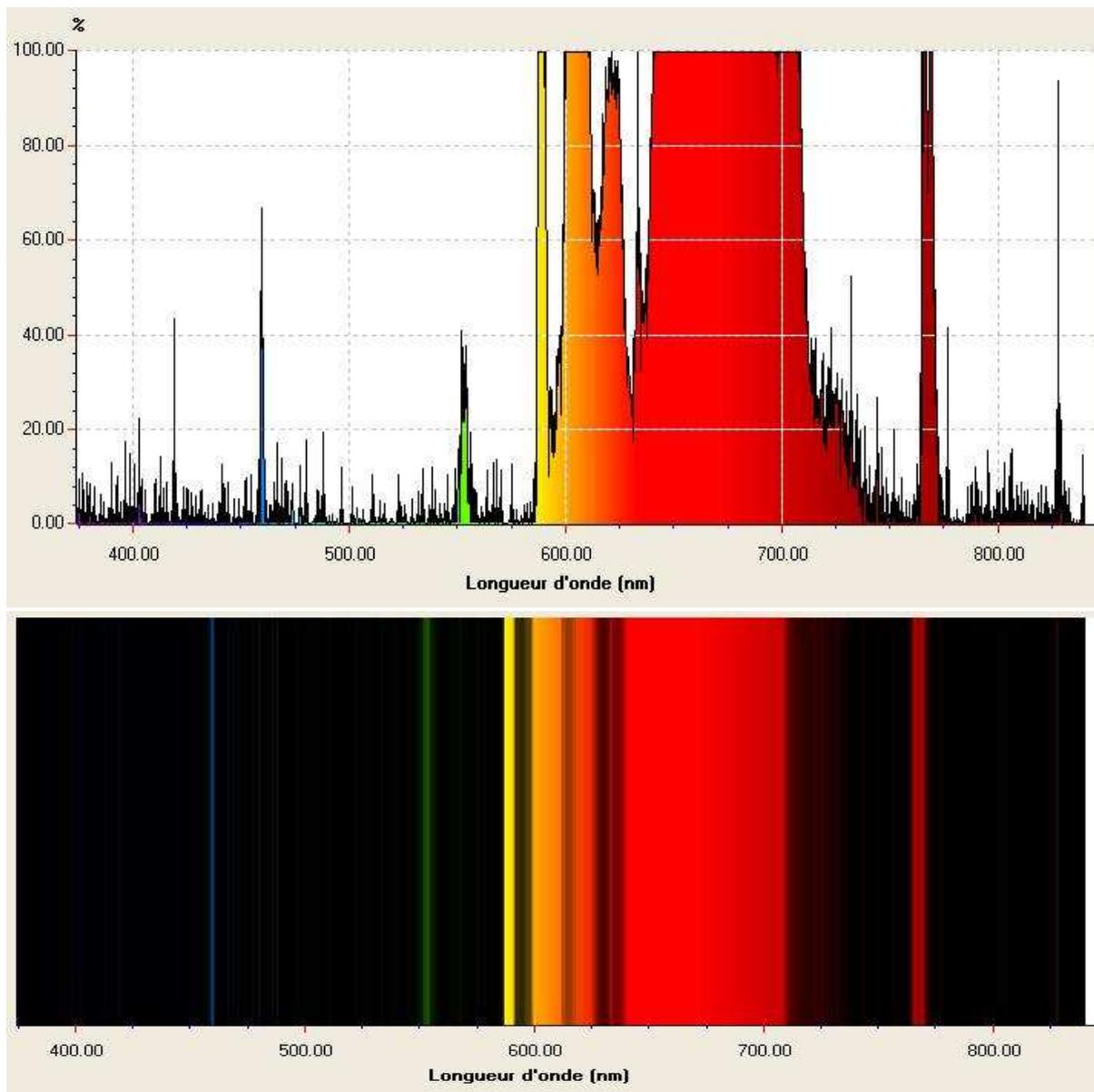


Ce spectre d'émission présente une gamme de longueurs d'ondes très étendue, pratiquement toutes les couleurs du visible sont présentes. Cette variété de couleurs s'explique par la présence des radicaux provenant de la combustion du butane comme expliqué dans l'introduction. Certaines valeurs de longueur d'onde restent cependant absentes : le spectre n'est pas continu.

Remarque générale avant l'analyse des spectres

Lors des expériences réalisées au D1, nous avons utilisés des solutions ioniques, nous avons demandé à une chimiste de nous préparer des solutions avec des espèces telles que le calcium, le cuivre, la potassium, etc. Cependant il ne faut pas oublier que pour assurer la neutralité de ces solutions, elles possèdent des contre ions, souvent Cl^- . Cette espèce possède aussi son spectre d'émission. Et la raie la plus intense se situe proche des 580nm. C'est pourquoi dans la suite des expériences vous retrouvez quasi systématiquement cette raie de couleur jaune.

Etude du spectre du strontium



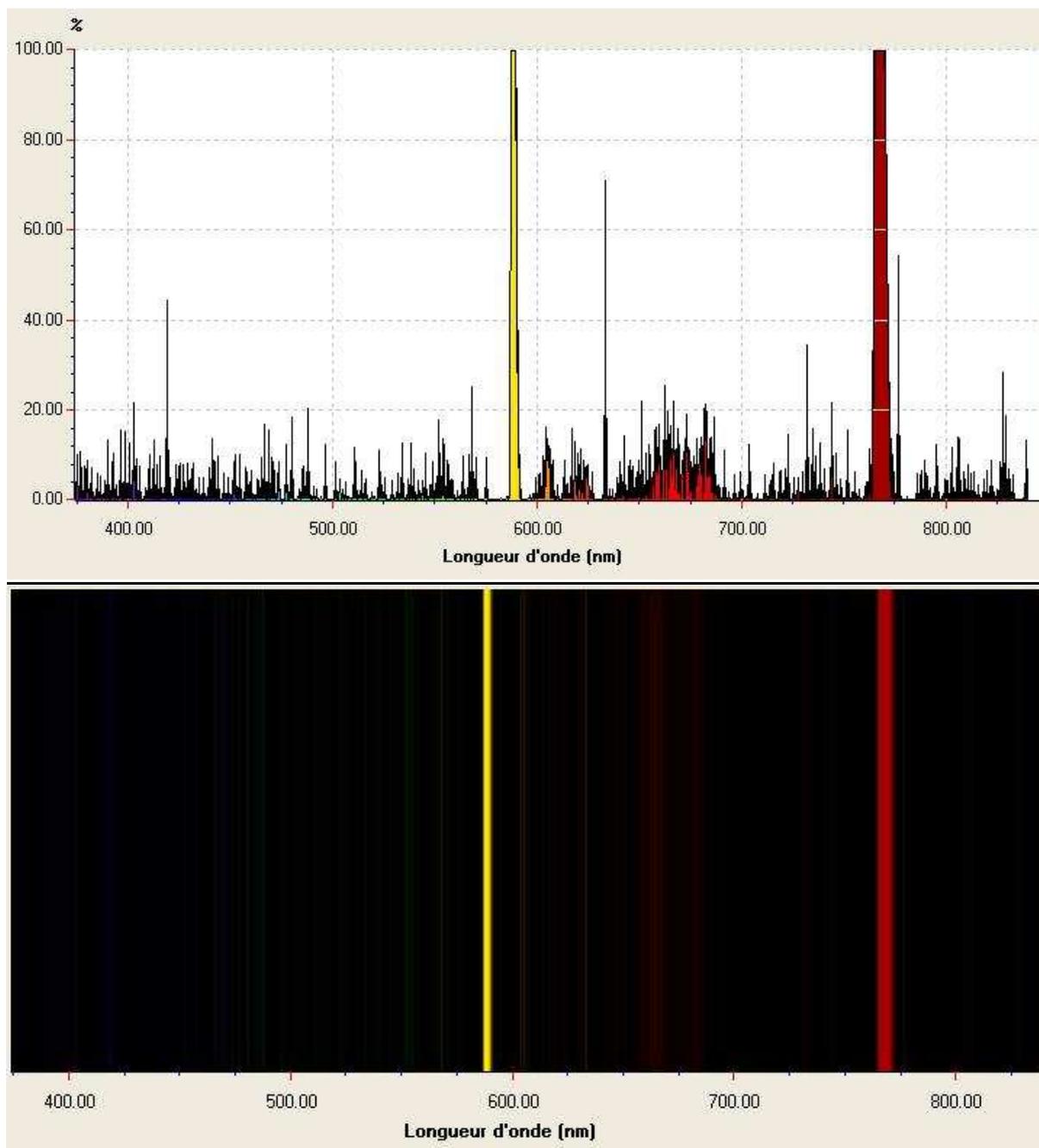
Le spectre d'émission du strontium fait apparaître plusieurs raies dans le domaine du visible :

- à 420nm de couleur violette
- à 460nm de couleur bleue
- à environ 555nm de couleur verte
- de 610nm à 710nm environ de couleur rouge: le spectre présente ici une large bande
- à 770nm de couleur rouge

Les raies situées aux extrémités du spectre expérimental manquent d'intensité ce qui rend leur exploitation impossible. Cependant, il est possible de distinguer de faibles raies à 420 nm, entre 475 nm et 500 nm.

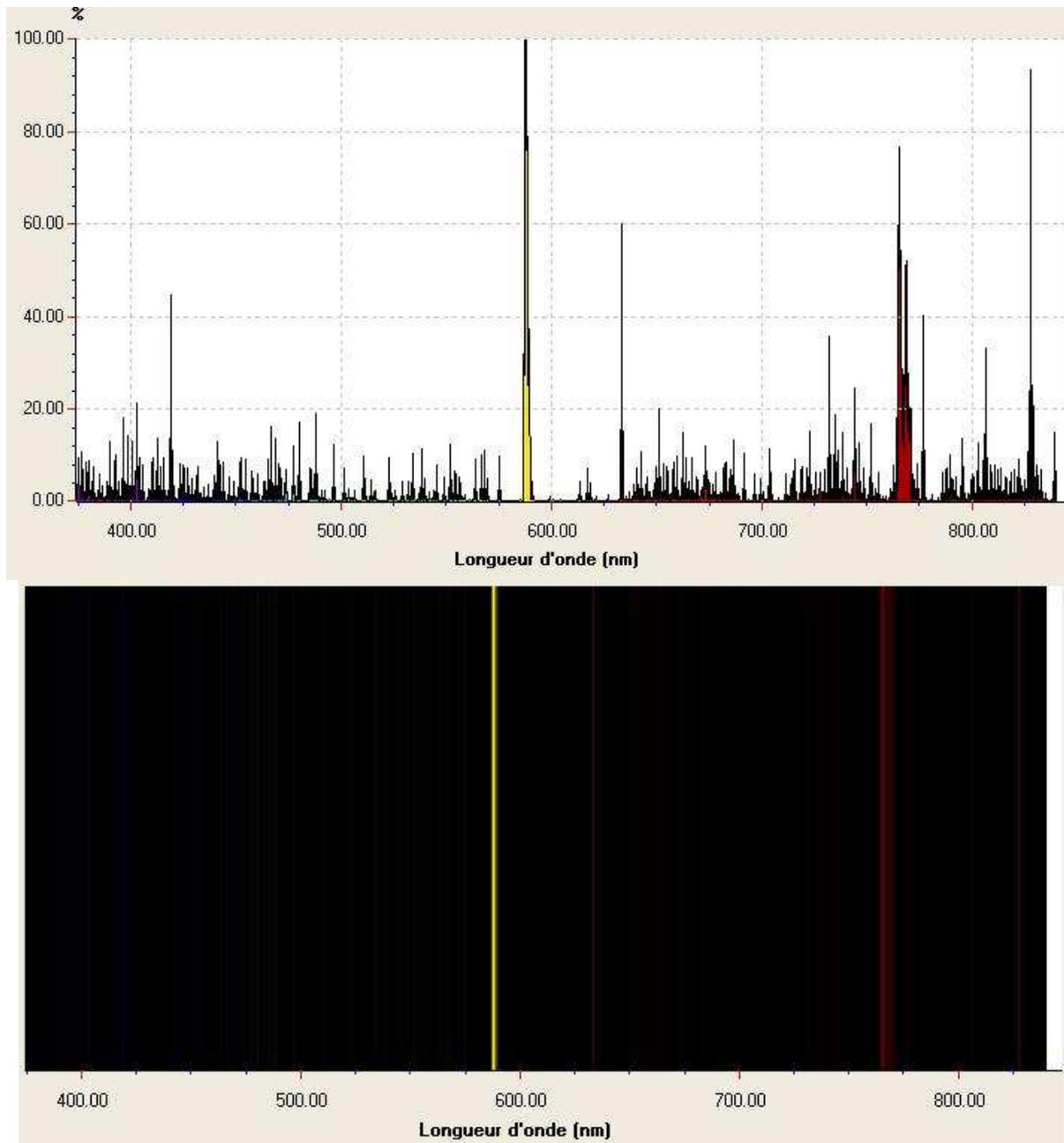
Les deux spectres présentent des similitudes pour certaines longueurs d'ondes: à 460 nm, 555 nm, 640 nm et 660 nm. Les plus importantes sont indiquées sur chacun des spectres.

Etude du spectre du cuivre



Le spectre d'émission du cuivre est un spectre de raies qui présente une dominante jaune et Rouge. La raie jaune autour de 585nm et la raie rouge se trouvent à 765 nm. On remarque aussi des raies à 446nm et 632nm. Elles mettent en évidence des sauts d'énergie caractéristiques de la combustion du cuivre.

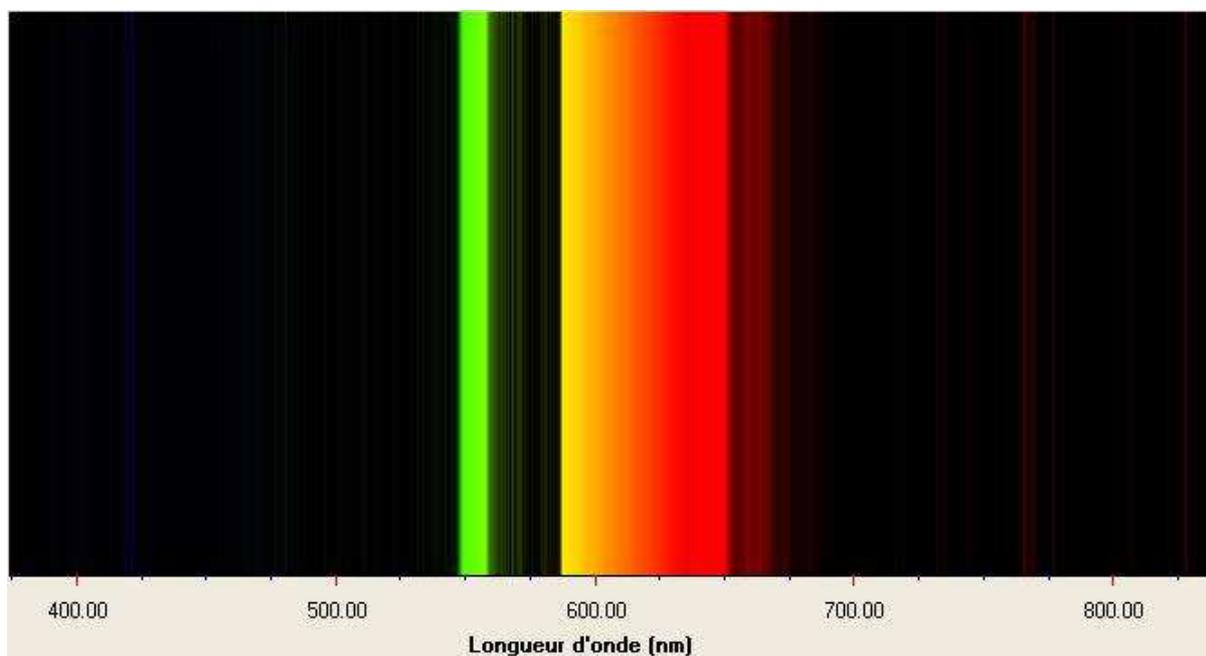
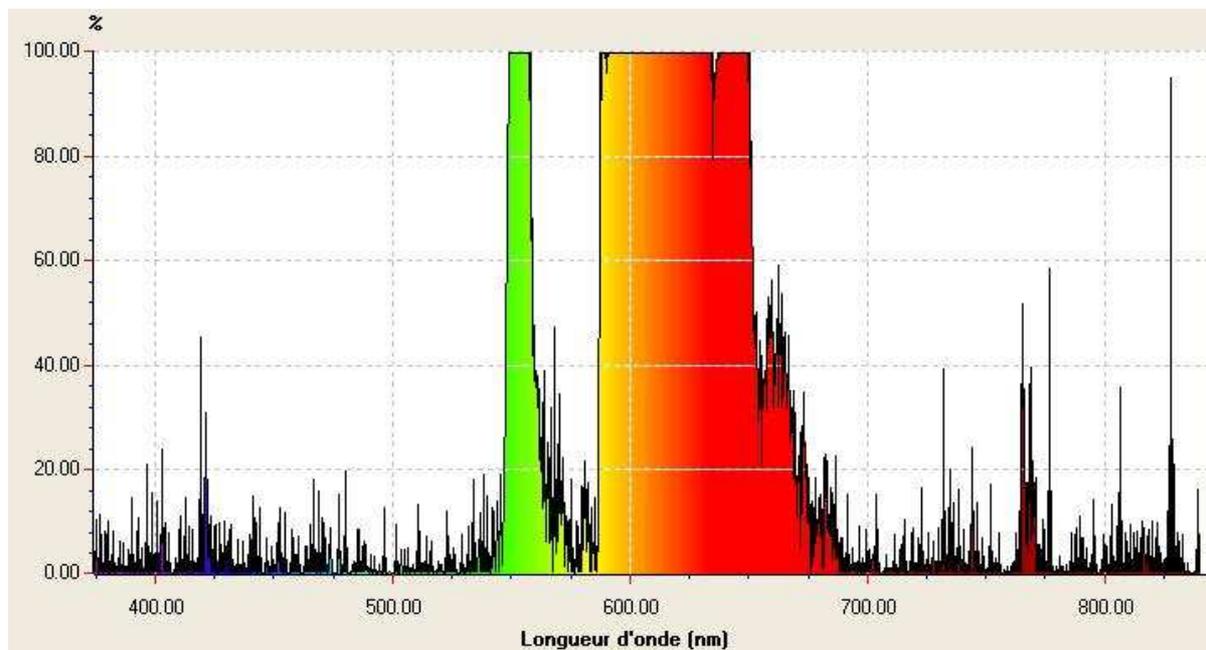
Etude du spectre du potassium



Ce spectre comporte deux raies principales et particulièrement intenses dont les longueurs d'onde sont les suivantes : 587nm (couleur jaune) et 761nm (couleur rouge). Deux familles de radicaux principales émettent des photons pour redescendre en énergie. En comparaison avec les spectres d'émission fournis dans les tables, la raie jaune est bien présente sur ces spectres tabulés, en revanche la raie dans le rouge est absente des tables, et d'autres raies dans le domaine du vert et du bleu (de 450 à 550nm environ) sont présentes. En comparant la différence d'amplitude des différentes raies, on constate toutefois que dans les tables, la raie majoritaire et la plus intense est celle émise dans le jaune (580nm). Il y a donc correspondance entre ces deux spectres.

Cependant deux autres raies sont observées (422nm et 829nm) et apparaissent clairement sur le premier spectre (présentant les intensités des raies). Elles appartiennent également au spectre d'émission du potassium présent dans les tables.

Etude du spectre du calcium



La correspondance des spectres théoriques et expérimentaux est assez évidente. Des raies sont observées principalement pour des longueurs d'onde de 560nm (jaune), mais aussi de 600 à 660 nm (rouge). De plus, on a aussi une raie de longueur d'onde de 420nm qui est de couleur bleue. Sur le spectre théorique plus de raies sont observées dans ce

domaine, mais comme on a pu le constater expérimentalement, le spectrophotomètre n'est pas très sensible aux faibles longueurs d'ondes.

3.2.4. *Interprétation*

Pourquoi y a-t-il une flamme?

Généralité : l'architecture d'un atome

L'atome, la plus petite partie d'un corps simple, se compose:

- d'un noyau central: constitué de neutrons (charges neutres) et de protons (charges positives). La cohésion du noyau est assurée par une force interne, non newtonienne ni électromagnétique, appelée l'interaction forte.
- d'un nuage électronique qui correspond à une zone de probabilité forte de rencontre de ou des électrons qui gravitent autour du noyau. Le nuage électronique, pour une meilleure compréhension des phénomènes quantiques est représenté en couches électroniques. Chaque couche représente un niveau d'énergie défini, de l'état fondamental stable, c'est-à-dire d'énergie la plus basse, à l'état excité.

Ces couches sont désignées par une lettre (de K à Q) et par un nombre n appelé nombre quantique principal.

La dualité onde-corpuscule de la lumière²

La lumière possède les propriétés d'une onde: réflexion, réfraction, diffraction et interférences. En effet, la lumière est une onde électromagnétique: elle se propage selon un champ magnétique B perpendiculaire à un champ électrique E; la direction de propagation de l'onde est orthogonale aux deux champs. La lumière, en tant qu'onde, possède donc une périodicité temporelle T telle que:

$$\text{eq. 1 } \nu = \frac{1}{T}$$

avec ν : la fréquence temporelle

T : la période

et une périodicité spatiale : la longueur d'onde λ telle que :

$$\text{eq. 2 } \lambda = c \cdot T$$

avec c / la célérité de la lumière.

Cependant, certains phénomènes, notamment l'effet photovoltaïque, ne peuvent pas être interprétés par le modèle ondulatoire.

En effet, pour comprendre ces phénomènes, il faut se tourner vers les explications données par la mécanique quantique. D'après la théorie des quantas, développée par Planck puis par Einstein, la lumière est constituée d'un ensemble de particules de masse nulle, ni onde ni corpuscule mais qui possèdent les propriétés des ondes et des corpuscules. Le photon transporte un quantum d'énergie égal à:

$$\text{eq. 3 } E = h \cdot \nu$$

avec E : énergie du photon

ν : la fréquence

h : constante de Planck

Dualité onde corpuscule de la matière et équation de Schrödinger

Selon la mécanique quantique, toute particule possède les propriétés d'un corpuscule de quantité de mouvement p et les propriétés d'une onde de périodicité spatiale lambda telle que:

$$\text{eq. 4 } p = \frac{h}{\lambda}$$

avec p : quantité de mouvement

h : constante de Planck

λ : longueur d'onde

Or toute onde peut être décrite par une fonction d'onde. Par conséquent, toute particule peut être décrite par une fonction d'onde qui dépend du temps et de la position de la particule.

Une fonction d'onde peut décrire la particule si elle est solution de l'équation de Schrödinger.

Lors de la résolution de l'équation de Schrödinger pour les électrons, il apparaît que l'énergie de l'atome ne peut prendre que des valeurs discrètes qui dépendent du nombre quantique principal. On dit que l'énergie est quantifiée.

Si on prend le cas de l'atome à un électron:

Les énergies possibles sont données par la relation:

$$\text{eq. 5 } E_n = - \frac{Z^2 \cdot m \cdot e^4}{8 \cdot h^2 \cdot \epsilon_0 \cdot n^2}$$

avec

- Z : numéro atomique de l'atome à 1 électron
- m : masse de l'électron
- e : charge élémentaire
- h : constante de Planck
- ϵ_0 : permittivité du vide
- n : nombre quantique principal

Interprétation d'un spectre atomique

Lors de l'échauffement d'un atome, celui-ci va absorber de l'énergie. Les électrons passent de l'état fondamental à un état excité. Puis l'atome retombe à son état stable, les électrons passent des couches électroniques externes à celles plus proches du noyau. Or, les niveaux d'énergie sont quantifiés; lorsque l'électron passe d'une couche à une autre, il restitue son énergie sous forme de photon dont l'énergie est clairement définie.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Conclusions sur le travail réalisé

La réalisation de ce projet nous a permis d'approfondir nos connaissances concernant les spectres lumineux, ou images d'émissions de flammes.

De part l'utilisation du spectrophotomètre, et l'interprétation des spectres obtenus, nous avons en effet dû nous intéresser plus précisément aux mécanismes d'ondes lumineuses afin de comprendre ce qu'étaient les flammes, et leurs émissions lumineuses (propagation, couleurs visibles...). Par ailleurs, les bases de l'optique nous ont également été indispensables lors de la réalisation du montage. Cela nous a d'ailleurs amené à utiliser un logiciel de type Excel afin de pouvoir modifier rapidement des paramètres du montage (vergence de lentille, distances...).

La partie la plus intéressante pour nous a cependant été celle des flammes dopées. Une fois le montage au point, il nous a fallu faire des recherches qui nous ont menés vers la chimie, et nous ont également fait découvrir des domaines tels que la pyrotechnie. Les expériences avec les différents « dopants » se sont d'ailleurs révélées impressionnantes sur le plan visuel.

Après avoir passé beaucoup de temps à réunir les bonnes conditions d'expériences (noir complet), et un montage optique performant, nous avons pu obtenir des spectres de qualité acceptable. Cependant, ils sont loin d'être aussi complets que les spectres théoriques. Les résultats auraient certainement pu être améliorés grâce à un travail plus approfondi sur les solutions chimiques que nous avons utilisées pour doper les flammes, et une plus grande optimisation du montage optique (passant peut-être par du matériel optique différent, et plus adapté à nos types d'expériences).

Enfin, l'utilisation d'un spectrophotomètre plus sensible aurait permis d'obtenir des spectres plus riches (notamment dans les faibles longueurs d'onde), et moins « pollué » par les émissions lumineuses des impuretés brûlant dans les flammes (en limitant le temps d'exposition).

Conclusions sur l'apport personnel de cette U.V. projet

Sur le plan personnel, ce projet nous a permis, tout en réalisant un travail de groupe, d'aborder, et même de découvrir par nous mêmes des domaines de la physique et de la chimie. Il nous a également permis de mettre en pratique des connaissances acquises en cours d'optique et de chimie.

Sur le plan de l'organisation, nous avons réalisé que la meilleure solution pour un travail efficace était de séparer les tâches, tout en faisant régulièrement le point ensemble sur l'avancement du projet.

Enfin, sur le plan expérimental, le fait d'être totalement indépendant nous a permis d'effectuer beaucoup de tests expérimentaux parallèlement aux calculs théoriques pour optimiser les résultats.



Pour conclure, ce projet a été pour nous une bonne opportunité de découvrir de façon plus approfondie le sujet d'imagerie d'émissions de flammes, en l'abordant d'une façon différente des TP classiques effectués jusque là. C'est certainement pour beaucoup d'entre nous un aperçu du fonctionnement et de l'organisation des projets que l'on aura à mener durant notre vie professionnelle.

Perspectives pour la poursuite de ce projet

- optimiser le montage optique en utilisant d'autres lentilles que celles disponibles en salle d'optique, et les conditions d'expériences (trouver un local sombre plus approprié)
- poursuivre les recherches en matière d'espèces dopantes (tester d'autres modes opératoires de « dopage » de flamme), et pourquoi pas approfondir la partie chimie en réalisant les dopants
- utiliser un spectrophotomètre plus performant pour obtenir des spectres plus riches

5. BIBLIOGRAPHIE

http://scienceamusante.net/wiki/index.php?title=Flammes_color%C3%A9es (valide à la date du 17/05/2009).

¹http://scienceamusante.net/wiki/index.php?title=Les_%C3%A9tincelles (valide à la date du 17/05/2009).

³http://www.ostralo.net/3_animations/swf/spectres_soleil.swf (valide à la date du 28/05/2009)

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Flamme_\(combustion\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Flamme_(combustion)) (valide à la date du 15/06/2009)

<http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=2751> (valide à la date du 15/06/2009)

<http://www.cchst.ca/oshanswers/chemicals/poisonou.html> (valide à la date du 16/06/2009)

<http://www.emarketlabo.com> (valide à la date du 16/06/2009)

²Cours de C1 de Mme Angel

6. ANNEXES

6.1. Documentation technique

Spectres théoriques des espèces chimiques utilisées³

