

DIPLOME J. BAETENS

M E M O I R E

présenté à la

Faculté des Sciences de l'Université de Paris

pour obtenir le

Diplôme d'Etudes Supérieures de

Sciences Physiques

par

Jocelyne BAETENS

1er sujet : Spectre Infra-rouge du Néodyme.

2ème sujet : Application de la spectrométrie Infra-rouge à l'analyse
chimique quantitative.

Soutenu le

devant la commission d'examen

Mrs. P. Jacquinet Président

H. Brusset ...

..... Examineurs

R. Chabbal ...

Cette étude a été réalisée au Laboratoire Aimé Cotton à Bellevue, sous la direction de Monsieur le Professeur P. Jacquinot, qui m'a constamment guidée dans mon travail, et à qui je suis heureuse d'exprimer toute ma reconnaissance.

Je remercie également tous les membres du laboratoire pour l'aide précieuse qu'ils m'ont apportée.

SPECTRE INFRA ROUGE DU NEODYME

I - INTRODUCTION.

Le but du travail présenté ici est la mesure des longueurs d'onde des raies émises par le Néodyme dans l'Infra-Rouge proche. Ces mesures constituent un travail préliminaire à l'étude de l'effet Zeeman sur le spectre de cet élément.

Le Néodyme est l'élément de numéro atomique 60. Il fait partie de la série des terres rares. Les raies du spectre qu'il émet sont connues dans le domaine des longueurs d'onde visibles. Mais le Néodyme, comme la plupart des éléments des terres rares, émet une grande quantité de raies, peu intenses, dont les plus importantes se trouvent dans l'Infra-Rouge proche.

Pour pouvoir étudier l'effet Zeeman sur ces raies, il faut qu'elles soient suffisamment fines.

Sous l'action d'un champ magnétique extérieur, une raie spectrale se décompose en plusieurs autres, ceci parce que chaque niveau d'énergie a fourni $2J+1$ niveaux composants. J étant le nombre quantique interne correspondant. Dans le cas de l'effet Zeeman normal (singulets), l'énergie des niveaux composants est donnée par $W = W_0 + h_0 M$, M prenant les valeurs entières de $-J$ à $+J$. L'écart entre 2 niveaux composants consécutifs est toujours le même. La règle de sélection $\Delta M = 0$ ou ± 1 montre alors que la

décomposition Zeeman est un triplet.

Dans le cas de l'effet Zeeman non normal, $W = W_0 + h_0 M g$, g étant le facteur de Landé. L'écart entre les niveaux composants n'est donc plus le même pour tous les niveaux. Une raie spectrale donne lieu à des composantes dont le nombre dépend des nombres quantiques. La décomposition Zeeman d'une raie permet de préciser les nombres quantiques des deux termes spectraux qui ont concouru à sa formation. Toutes les raies d'une même série subissent le même effet Zeeman. L'étude de l'effet Zeeman est donc une méthode d'analyse du spectre.

L'étude de l'Infra-Rouge présente des difficultés car les récepteurs dont on dispose sont beaucoup moins sensibles que les détecteurs du visible. Cette difficulté est encore aggravée parce que les raies sont peu intenses, l'énergie du rayonnement se trouvant répartie en un grand nombre de raies.

Dans le cas du proche infra-rouge, auquel nous nous sommes bornés, les lentilles peuvent encore être utilisées. Au delà de 2 à 3 microns, elles devraient être remplacées par des miroirs sphériques à cause de la non transparence du verre à ces longueurs d'onde.

Nous allons successivement décrire l'appareillage utilisé, et donner les résultats obtenus.

L'appareillage comprend trois grandes parties :

- La source émettant le spectre du Néodyme
- le spectromètre isolant les radiations
- la partie électronique détectant ces radiations.

Nous donnerons ensuite deux séries de résultats correspondant aux deux types de sources que nous avons utilisées, ainsi qu'une brève comparaison entre elles.

II - APPAREILLAGE.

A) Moyens de production des spectres. Sources utilisées.

Il y a émission d'une raie lorsque l'atome passe d'un état excité à un état d'énergie plus faible. L'excitation de l'atome s'obtient en général en le bombardant par des électrons ou des ions positifs accélérés dans un champ électrique (chocs inélastiques).

Les procédés d'excitation sont nombreux. Nous avons employé deux types de sources : la cathode creuse et le tube sans électrodes excité par un champ électromagnétique de haute fréquence. Ces sources sont été choisies pour leurs qualités de stabilité, pour la finesse des raies émises, et enfin pour leur grande brillance.

1°) La cathode creuse.

a) Description

L'appareil comprend :

- le tube à décharge
- une alimentation haute tension
- un banc de pompage destiné à y faire le vide.

Le tube à décharge est un long cylindre vertical dont l'extrémité supérieure est une fenêtre de verre par où passe la lumière. A l'extrémité inférieure est fixée par l'intermédiaire d'un joint d'indium, une sorte de petit pot qui constitue la cathode. Il n'est pas nécessaire que celle-ci soit faite entièrement du métal à étudier. Il suffit d'en introduire une parcelle. Nous avons utilisé une cathode en aluminium où l'on avait déposé une petite quantité d'oxyde de néodyme. La forme de l'anode n'a pas

une très grosse importance. C'était ici un cylindre métallique creux suspendu par un fil, très près de la cathode pour réduire la colonne positive dans la décharge.

Le tube est relié au banc à vide qui comprend une pompe primaire, et une pompe à diffusion à mercure. Cette association permet d'obtenir un bon vide dans l'appareil : 10^{-6} mm.

Toutes les impuretés restantes sont piégées par du charbon actif refroidi à la température d'ébullition de l'azote. C'est le charbon qui est le principal agent de purification : il adsorbe N_2 , O_2 , CO_2 notamment.

Une ampoule de néon est adjointe à l'appareil et permet, au moyen d'un jeu de robinets, l'introduction de gaz à pression convenable. Cette pression est lue sur un manomètre, simple tube en U rempli de phtalate de butyle.

b) Mécanisme de la décharge

La décharge entre les deux électrodes provoque une ionisation des atomes de néon comme dans un tube à décharge ordinaire. Ce flot d'ions positifs, Ne^+ par exemple, dirigé par le champ, vient frapper la cathode. Ce sont ces ions qui sont responsables du phénomène de "pulvérisation de la cathode" ; on désigne ainsi le fait qu'il y ait, au voisinage de la cathode plus d'atomes métalliques que la tension ne permet de prévoir. En effet même à la température d'ébullition de l'azote, l'action pulvérisante des ions provoque l'apparition d'un spectre intense du métal, alors que sa tension de vapeur à cette température est excessivement faible. Ce qui se passe peut s'expliquer de la façon suivante : les ions positifs frappant la cathode, en éjectent des particules métalliques. Celles-ci atteignent la région où le

champ est plus intense et y rencontrent les ions Ne^+ . Il y a alors excitation par chocs de 2^{nde} espèce. Les chocs entre ions et atomes du métal portent les électrons de ceux-ci à des niveaux d'énergie plus élevés. Lorsque les électrons retombent sur des niveaux inférieurs, il y a émission du spectre du métal.

c) Conditions optima du fonctionnement

Nous disposons de 3 paramètres

- la nature du gaz qui sert de support à la décharge
- la pression de ce gaz
- l'intensité du courant passant dans la lampe.

- choix de la nature du gaz

L'excitation du spectre dépend de chocs inélastiques.

La nature de l'émission (spectre d'arc ou d'étincelle) dépend donc du potentiel d'excitation du gaz support. Ce sont les gaz rares qui ont les potentiels d'excitation les plus élevés. Mais on doit également choisir le gaz en fonction de sa plus ou moins grande aptitude à pulvériser la cathode et cette propriété fait intervenir la masse des ions gazeux. C'est cette raison qui a fait préférer le néon à l'hélium en dépit de son moins haut potentiel d'excitation. En utilisant un petit spectrographe à prisme, on a pu vérifier sur des photos que les raies métalliques visibles étaient plus intenses quand on utilise le néon. L'hélium est impropre à pulvériser suffisamment le métal à cause de sa masse trop petite.

- choix de la pression

L'expérience montre qu'il existe une pression optimum du gaz excitateur. Pour une grande pression, on obtient une colonne positive comme dans le tube de Geissler. Si on réduit progressivement la pression, tout en maintenant une intensité de

courant constante, la décharge change d'aspect brusquement pour une certaine valeur critique : la région illuminée se concentre dans la cathode. La brillance de la décharge dépend étroitement de la pression. Si on l'abaisse au dessous de la valeur optimum, l'intensité lumineuse décroît jusqu'à un point critique à partir duquel elle devient très faible.

Remarquons que la valeur optimum de la pression pour laquelle le spectre du métal a son maximum d'intensité, n'est pas forcément celle qui donne le maximum d'intensité au spectre du gaz. Pour régler la pression, il est donc nécessaire d'avoir déjà repéré une raie autre que celles du néon.

D'autre part l'intensité des raies baisse relativement beaucoup moins vite en fonction d'un écart par rapport à la pression optimum, lorsque l'intensité de courant est grande que lorsqu'elle est faible. (Référence : Chantrel : Thèse). Dans les conditions où nous avons travaillé, la pression optimum trouvée par expérience était de 1,6 cm de phtalate de butyle (de l'ordre du mm de mercure). Mais pratiquement cette valeur n'est pas critique et l'intensité lumineuse varie peu pour l'intervalle de pressions 1,2 cm - 2 cm.

- choix de l'intensité du courant

La cathode que nous avons utilisée, était alimentée sous une tension de 450 Volts, par l'intermédiaire d'un rhéostat de 450 Ohms, placé en série. A cette résistance il faudrait ajouter les résistances propres des lampes de l'alimentation. L'intensité du courant dans la lampe, était, dans ces conditions, de 200 milliampères.

Cette intensité a été choisie élevée d'abord parce

qu'on avait besoin d'une source assez intense pour le spectromètre. Il faut que les raies métalliques aient une intensité suffisante par rapport à celles du néon. En effet l'intensité des raies du gaz varie à peu près linéairement en fonction de l'intensité du courant, tandis que l'intensité des raies du métal varie suivant une courbe d'allure parabolique, telle que cette intensité devient pratiquement très faible pour des valeurs encore notables de l'intensité de courant. Il y a d'ailleurs là un moyen de savoir si une raie donnée doit être attribuée au néon ou bien au néodyme.

d) Aspect de la décharge. Finesse des raies.

Pour une densité de courant donnée la chute de potentiel, dans le cas de la cathode creuse, est beaucoup moindre que pour une cathode plane car moins d'ions sont perdus. La lumière n'est pas uniformément répartie. La lueur a est la lueur cathodique. Puis en b on a l'espace obscur de Crookes. La région la plus brillante se trouve au centre. Dans l'espace c, le gradient du champ électrique est plus faible que dans la colonne positive d'une décharge. Au voisinage immédiat de la cathode, le potentiel ne varie presque pas, et grâce à ce champ très faible, les raies émises ne seront pour ainsi dire pas élargies par effet Stark. Avec un courant trop important, l'effet Stark peut apparaître, car la chute de potentiel à la cathode augmente.

La cathode creuse a été refroidie à l'azote liquide. L'élargissement des raies du à l'effet Doppler, augmente proportionnellement à la racine carrée de la température. Lorsqu'on refroidit, ou diminue donc cet effet et les raies sont plus fines. Le tube à décharge est placé verticalement, ce qui est

plus commode pour l'introduire dans un vase Dewar contenant l'azote liquide. Le faisceau lumineux est ensuite renvoyé à angle droit par un miroir.

En fait dans notre cas, il est probable que la température à l'intérieur de la lampe est notablement supérieure à la température d'ébullition de l'azote, ceci à cause de l'intensité élevée du courant.

Dans ce cas l'intérêt principal du refroidissement est la purification de l'atmosphère du tube. Les atomes métalliques ont en effet la propriété d'adsorber des atomes de gaz, plus particulièrement l'azote que le néon et ce phénomène se produit de façon d'autant plus favorable que la température est basse.

En conclusion, la cathode creuse est la source de choix lorsqu'on veut obtenir des raies d'une grande finesse.

2°) Le tube sans électrodes.

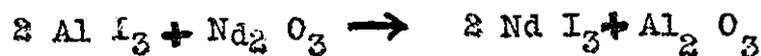
Le deuxième type de source convient bien en général pour exciter le spectre des gaz ou de matériaux à pression de vapeur basse. Quand on veut étudier le spectre d'un élément métallique, on peut introduire dans le tube soit le métal lui même, soit un de ses sels toujours sous atmosphère de gaz rare. L'intérêt réside dans le fait qu'on obtient ainsi une source intense qui peut servir à l'étude de raies faibles, résultant par exemple de transitions entre niveaux élevés. Ce genre de source a déjà été utilisé pour étudier les spectres des métaux des ^{terres} rares et ceux des métaux lourds comme le mercure.

L'absence d'électrodes internes simplifie la construction et l'emploi de ces tubes : on ne risque pas d'introduire d'impuretés en même temps que les électrodes et le danger de corrosion de celles-ci par les produits placés dans le tube n'existe plus.

a) Construction du tube.

La pression de vapeur du néodyme est extrêmement basse comme pour la plupart des éléments des terres rares. C'est un iodure du néodyme qu'on introduit dans le tube.

Il est préparé par action de l'iodure d'aluminium sur l'oxyde de néodyme



L'iodure d'aluminium est préparé par synthèse. La réaction se fait en tube scellé à la température de 200-250°.

Puis la préparation de l'iodure de néodyme s'effectue également dans un tube scellé, qu'on chauffe pendant 8 heures à la température de 500°.

On distille l'iodure obtenu dans l'ampoule de quartz qui servira de source, et qu'on remplit de néon sous une pression voisine du mm de mercure. Cette ampoule doit être auparavant très bien dégazée. En effet les impuretés, même en quantité infime, tendent à supprimer le spectre du néodyme, en émettant leur propre spectre. C'est le cas par exemple des spectres moléculaires qui sont facilement excités : gaz ou vapeurs diatomiques (O_2 , N_2) qui émettent un spectre intense même en présence d'autres gaz, de sorte que des traces minimales ont une grande influence. En conséquence la préparation des tubes nécessite un dégazage soigné, qu'on obtient, d'abord en chauffant l'ampoule pendant plusieurs heures puis en faisant passer une décharge dans le néon de l'ampoule, celle-ci restant en communication avec le piège à charbon actif.

b) Fonctionnement.

Les iodures de terres rares ne sont pas facilement volatils. Pour qu'il y ait suffisamment de vapeur dans le tube pour produire un spectre intense, on utilise le tube en le chauffant à 800° par un dispositif de chauffage à air chaud. Ce système a été choisi parce que l'encombrement autour du tube est faible et qu'il est donc facile de l'introduire entre les pôles de l'Electro Aimant pour étudier l'effet Zeeman. Il comporte un four en silice dans lequel sont enroulées des résistances. Un courant d'air comprimé passe sur les résistances, s'échauffe, et chauffe ensuite le tube avec lequel il est en contact sur toute sa surface. Des rhéostats placés en série avec les résistances permettent de régler l'intensité du chauffage. Il s'établit un régime permanent.

La décharge dans le tube est produite par un champ électromagnétique oscillant, de haute fréquence : 2450 mégacycles.

Le tube, ainsi que la gaine de quartz qui l'entoure et qui sert à canaliser l'air chaud, sont placés dans un guide d'ondes à section rectangulaire, possédant une fente pour permettre le passage de la lumière et l'amorçage de la décharge. Le guide est relié à un générateur à magnétron. (Raythéon Microtherm Microwave Generator).

L'illumination du tube soumis ainsi aux oscillations est très intense.

La propriété la plus caractéristique du tube sous électrodes est la facilité avec laquelle il est excité. Il peut l'être en particulier à des pressions notablement plus basses que celles requises par tout autre mode de décharge. Là où il faut une pression de 0,1 mm de mercure dans un tube de Geissler, on peut descendre jusqu'à 0,001 avec le tube sans électrodes, en ayant même une plus grande brillance. Tous les effets d'élargissement des raies, dus à une pression de vapeur élevée, sont donc réduits. D'autre part les champs sont trop faibles pour que l'effet Stark soit appréciable. Il ne subsiste donc que l'effet Doppler qui est plus marqué que dans le cas de la cathode creuse. Néanmoins les raies émises sont très fines, et la source est utilisable dans les recherches à haute résolution.

Un autre intérêt de ce type de source est qu'on peut donner au tube la forme désirée et l'adapter au spectromètre utilisé. Dans le cas présent la forme allongée des tubes convient bien au spectromètre à fentes.

Remarquons que la décharge à un maximum de brillance

à une pression déterminée mais que l'émission reste cependant très intense si on s'en écarte légèrement. La pression de néon qui est donné les meilleurs résultats, est voisine de 2 cm de phtalate de butyle.

c) Nature du spectre obtenu.

Les raies excitées sont celles du spectre d'arc du néodyme. Si la pression est basse, le libre parcours des ions augmente, et ils peuvent acquérir des énergies plus grandes entre deux collisions. Ceci se traduit par l'apparition du spectre d'étincelles. La variation de température peut parfois provoquer une variation de pression suffisante pour qu'on puisse distinguer deux stades.

- à basse pression le spectre du néon et le spectre d'étincelles du néodyme sont excités.

- à haute pression le spectre du néon disparaît pratiquement, le spectre d'arc du néodyme se renforce. On observe d'autant plus facilement les termes élevés des séries que la pression est plus basse.

Nous avons observé en effet qu'à froid, les seules raies qui apparaissent sont celles du néon : le tube possède la couleur rouge caractéristique.

Au fur et à mesure qu'on chauffe la lumière émise devient progressivement blanche et blafarde. On constate que seules quelques raies très intenses du néon, sont encore présentes sur les enregistrements, tandis qu'une grande quantité d'autres apparaissent avec beaucoup plus d'intensité.

Le tube sans électrodes n'a pas une durée de vie illimitée. Quand il a été chauffé une quinzaine d'heures, il devient de plus

en plus difficile à amorcer. La pression à l'intérieur a du croître à cause d'impuretés émanant du quartz et de l'iode libéré. Mais le tube sans électrodes constitue une source du plus haut intérêt grâce à sa commodité d'emploi et à sa grande brillance.

B) Le spectromètre.

1°) Description du montage.

L'appareil spectral utilisé est un spectromètre classique, dont les organes essentiels sont :

- le disperser
- les fentes d'entrée et de sortie
- un système optique approprié

a) Le disperser.

C'est un réseau échelle gravé de $n : 600$ traits par millimètre. Ses dimensions sont 21 cm pour la largeur, 13 cm pour la hauteur. Le nombre total de traits est donc

$$N : 210 \times 600 = 126000.$$

L'angle de blaze vaut 48°

Le montage utilisé est celui d'Ebert Fastie, remarquable pour ses qualités de luminosité, et pour l'avantage qu'il présente d'être compact. On sait que dans ce montage, le réseau travaille approximativement "en Littrow", ce qui signifie que l'angle de diffraction i_2 est peu différent de l'angle d'incidence i_1 , ou encore que les rayons diffractés choisis sont ceux qui reviennent sur eux mêmes.

La formule fondamentale des réseaux

$$\sin i_1 + \sin i_2 = n p \lambda$$

s'écrit donc dans ce cas particulier :

$$2 \sin i = n p \lambda$$

b) Le montage optique.

Il est destiné à faire travailler le réseau sur l'infini.

car c'est la meilleure condition d'emploi d'un réseau. Il faut donc un premier système optique jouant le rôle de collimateur : il donne de la fente d'entrée une image à l'infini. Un deuxième système joue le rôle de focalisateur et fait converger les faisceaux de rayons parallèles qu'il reçoit dans le plan de la fente de sortie.

Ici on emploie deux miroirs concaves de distance focale F : 160 cm, assez grands pour ne pas diaphragmer le faisceau issu du réseau. Le contour de celui-ci constitue donc le seul diaphragme. En fait les deux miroirs sont réglés de manière à avoir le même centre, de sorte que leur ensemble est équivalent à un miroir unique. Comme les conditions de Gauss ne sont pas réalisées, on prévoit qu'on aura les aberrations suivantes :

- la coma
- l'astigmatisme
- l'aberration de sphéricité

L'aberration de sphéricité transversale est inversement proportionnelle au cube de la distance focale. Comme F est grand, cette aberration est négligeable.

Grâce à la symétrie du montage, la coma est supprimée, mais l'astigmatisme est doublé. Le système ne fournit pas une image ponctuelle, d'un point de la fente d'entrée. A un point de la fente d'entrée correspondent deux pseudo images : la focale sagittale et la focale tangentielle, cette dernière se trouvant dans le plan de la fente de sortie.

c) Les fentes.

Pour remédier à l'astigmatisme, on n'utilise pas des fentes rectilignes mais des arcs de cercle. Si la fente d'entrée

est un arc de cercle centré sur l'axe C du système, et situé dans un plan perpendiculaire à cet axe, à un point A de cette fente correspond une focale tangentielle qui est un petit segment perpendiculaire à AC. L'enveloppe de toutes ces focales, est un arc de cercle identique à la fente d'entrée, ayant pour centre C. Il suffit de donner à la fente de sortie le profil de cet arc pour résoudre le problème.

D'autre part, on peut démontrer que, lorsque la fente d'entrée est rectiligne, le réseau produit une courbure des raies parce que tous les rayons qu'il reçoit ne sont pas forcément dans un plan de section principale. Mais avec des fentes circulaires, cette difficulté n'existe plus.

Les fentes d'entrée et de sortie sont de largeur (l_1 et l_2) réglable. Leur hauteur (h_1 et h_2) est égale à 5 cm.

On se sert plus couramment des largeurs angulaires.

$$\alpha_1 = \frac{l_1}{F} \quad \text{et} \quad \alpha_2 = \frac{l_2}{F}$$

ainsi que des hauteurs angulaires

$$\beta_1 = \frac{h_1}{F} \quad \text{et} \quad \beta_2 = \frac{h_2}{F}$$

On peut également caractériser les fentes par leurs largeurs spectrales :

$$w_1 = \frac{l_1}{D_1} \quad \text{et} \quad w_2 = \frac{l_2}{D_2}$$

D_1 et D_2 étant des dispersions linéaires à l'entrée et à la sortie du spectromètre, définies plus loin.

2°) Qualités du spectromètre.

Nous examinerons successivement :

- la dispersion linéaire et angulaire
- la résolution
- la luminosité

a) Dispersion.

On peut définir la dispersion angulaire donnée par le réseau par $\Delta_2 = \frac{\partial i_2}{\partial \lambda}$ à incidence constante

ce qui s'écrit $\Delta_2 = \left(\frac{\partial i_2}{\partial \lambda} \right)_{i_1}$

Il n'y a pas de raison pour ne pas introduire la dispersion angulaire à l'entrée

$$\Delta_1 = \left(\frac{\partial i_1}{\partial \lambda} \right)_{i_2} \quad (\text{à émergence constante})$$

A ces dispersions angulaires, correspondent des dispersions linéaires dans le plan des fentes :

$$D_1 \approx F \Delta_1$$

$$D_2 = F \Delta_2$$

$$\sin i_1 + \sin i_2 = n p \lambda$$

$$\Delta_2 = \left(\frac{\partial i_2}{\partial \lambda} \right)_{i_1} = \frac{n p}{\cos i_2}$$

Comme ici $i_1 = i_2 = i$

$$\Delta_1 = \Delta_2 = \frac{np}{\cos i} = \frac{600 \cdot 10^{-7} \times 2}{\frac{\sqrt{2}}{2}}$$

$$\Delta_1 = \Delta_2 = 17 \cdot 10^{-5} \text{ radian par Angström}$$

$$D_1 = D_2 = 160 \cdot 10^8 \times 17 \cdot 10^{-5} = 27 \cdot 10^5$$

Pour des fentes de 1 mm, la largeur spectrale vaut donc

$$W_1 = W_2 = \frac{10^7}{27 \cdot 10^5} = 3,7 \text{ Angströms}$$

b) Résolvance.

La qualité essentielle d'un spectromètre est de séparer les différentes radiations. Cette qualité peut se traduire quantitativement par la valeur du plus petit intervalle de longueurs d'onde entre 2 radiations monochromatiques séparées par l'appareil. C'est la limite de résolution $\delta\lambda$. Il est plus intéressant d'introduire un rapport sans dimensions: la résolvance

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda}$$

- Résolvance théorique

On qualifie de théorique, la résolvance qu'on obtiendrait avec un appareil parfaitement réglé, sans aberrations, et des fentes infiniment fines

$$R_0 = \frac{\lambda}{\delta\lambda_0}$$

La résolvance théorique est caractéristique du disperseur, de ses dimensions et angles d'utilisation.

Pour un réseau $R_o = N_p = M \frac{\sin i_1 + \sin i_2}{\lambda}$

M étant la largeur du faisceau tombant sur le réseau.

Nous verrons que le réseau a été utilisé dans l'ordre 2 pour des longueurs d'onde voisines de 12000 Å. Les ordres supérieurs à 2 ne sont pas détectés dans la région explorée, car, à l'entrée du spectromètre, le faisceau lumineux traverse un verre qui arrête la lumière visible au dessous de 9000 Å

$R_o = 126000 \times 2, R_o = 252000.$

$$\delta\lambda_o = \frac{\lambda}{R_o} = \frac{12000}{252000} \neq \frac{1}{20} \text{ Å}$$

-Résolution effective

La résolution effective tient compte des largeurs de fente et des aberrations. En fait dans les conditions où nous avons travaillé, les aberrations ne limitent pratiquement pas la résolution. Pour caractériser les fentes nous introduirons leur largeur réduite u , obtenue en faisant le rapport de la largeur (linéaire l , angulaire α ou spectrale W), à la largeur (linéaire d , angulaire ϵ , ou spectrale $\delta\lambda_o$) de la figure de diffraction.

$$u_1 = \frac{l_1}{d_1} = \frac{\alpha_1}{\epsilon_1} = \frac{W_1}{\delta\lambda_o} \qquad u_2 = \frac{l_2}{d_2} = \frac{\alpha_2}{\epsilon_2} = \frac{W_2}{\delta\lambda_o}$$

La figure de diffraction est celle produite par le passage du faisceau à travers un diaphragme qui est la projection du réseau parallèlement à l'axe du système. Soit L la largeur de ce diaphragme, ϵ est alors donné par la formule classique

D'où l'expression de u

$$u = u_1 = u_2 = \frac{L}{F\lambda}$$

avec les données suivantes

$$L = 15 \text{ cm}$$

$$\lambda = 12000 \text{ \AA}$$

$$F = 160 \text{ cm}$$

$$l = 1 \text{ mm}$$

$$u \neq 80$$

Dans ces conditions c'est la largeur des fentes, et non la diffraction qui limite la résolution.

Or, on peut dire que, si $u_1 = u_2$, tout le flux entrant par la première fente, passe par la fente de sortie lorsque l'appareil est juste réglé sur la longueur d'onde λ de la raie étudiée.

La variation du flux, lorsque λ augmente, est représentée par la courbe ci-contre. C'est la fonction d'appareil du spectromètre. C'est aussi la forme que prendraient les raies sur un enregistrement si elles étaient rigoureusement monochromatiques. Comme la fonction d'appareil est triangulaire, la limite de résolution est donnée par la largeur à mi hauteur, soit $\delta\lambda$. En effet si on ajoute les flux dus à deux raies séparées de $\delta\lambda$, on obtient un trapèze : les 2 raies ne sont plus séparées par l'appareil. Sur la courbe, on remarque que $\delta\lambda$ est égal à la largeur spectrale des 2 fentes :

$$\delta\lambda = W$$

D'où la résolution

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{\lambda}{w} = \frac{\lambda}{u \delta\lambda_0} = \frac{R_0}{u}$$

u exprime la fraction de résolution théorique qu'on utilise, pour des fentes de 1 mm

$$R = \frac{252000}{80} = 3150$$

$$\delta\lambda = \frac{\lambda}{R} = \frac{12000}{3150} = 3,8 \text{ \AA}$$

La limite de résolution peut aussi bien s'exprimer en nombre d'ondes

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = \frac{d\lambda}{\lambda}$$

$$\delta\sigma = 2,6 \text{ cm}^{-1}$$

En conclusion, disons que la résolution n'est ici limitée que par la largeur des fentes. La diffraction joue un rôle totalement négligeable. Les aberrations ne viennent pas non plus affecter la fonction d'appareil, grâce à la grande distance focale des miroirs. Elles ne deviendraient gênantes que pour des u notablement plus faibles. ($u=3$ ou 4 ce qui correspond à une largeur linéaire de 50 microns environ).

c) Luminosité

Elle s'exprime par le flux tombant sur le récepteur à la sortie du spectromètre

$$\phi = \tau_B \beta H \lambda u$$

- τ est un coefficient de transmission de l'appareil

- B est la brillance de la raie
- H est la hauteur du disperser

$$\text{Or } R = \frac{R_0}{u}$$

Le produit ϕR est donc invariant

$$\phi R = C B \beta H \lambda R_0$$

Il est commode de l'écrire sous la forme suivante

$$\phi R = \phi_0 R_0$$

La formule nous montre qu'il y a intérêt à utiliser des fentes aussi hautes que possible. Ceci n'est pas commode avec la cathode creuse qui donne une lueur localisée dans un petit cercle. Le tube sans électrodes est mieux adapté au spectromètre à fentes, grâce à sa forme allongée dont on fait l'image sur la fente d'entrée, par un système de lentilles approprié. On choisit le grandissement de manière à ce que l'image du tube recouvre la fente.

Pour avoir suffisamment de luminosité, on a été obligé de recourir à des fentes larges. Le produit ϕR étant constant, si on gagne en luminosité, on perd en résolution. Cela n'a pas une très grande importance pour le travail actuel qui vise à localiser les raies importantes du néodyme. Pour les problèmes de structure exigeant de hautes résolutions, on pourrait penser à s'approcher très près de R_0 en diminuant les fentes. Mais il n'est pas recommandé d'utiliser ainsi un tel spectromètre. Diffraction et aberrations prennent alors une grande importance et le flux diminue beaucoup. Pour les recherches demandant une résolution élevée, l'appareil décrit ici ne suffit donc pas ;

il serait utilisé seulement comme prémonochromateur devant un ou plusieurs Fabry-Perot par exemple. (ou il serait remplacé par un SISAM).

C) Partie Electronique

L'appareillage servant à la détection du signal se compose des parties suivantes :

- un récepteur pour l'infra-rouge
- un amplificateur
- un enregistreur

1° Le récepteur.

Pour le proche infra-rouge, la cellule photoconductrice à sulfure de plomb, constitue un récepteur d'une bonne sensibilité.

Le faisceau issu de la fente de sortie, passe à travers une lentille de champ collée sur la fente, puis par une lentille de faible distance focale qui forme l'image du réseau sur la partie rectangulaire sensible de la cellule.

a) Fonctionnement de la cellule.

Dans les cellules photoconductrices, le phénomène utilisé est la variation de conductivité d'un matériau lorsqu'il est exposé à la lumière. Dans les semi-conducteurs, un photon incident est capable de provoquer le passage d'un électron de la bande de valence, dans la bande de conduction. Il suffit pour cela que son énergie $h\nu$ soit supérieure à l'intervalle ΔW qui sépare ces deux bandes.

La fréquence minimum du photon pour que cet effet puisse se produire est donc :

$$\nu_m = \frac{\Delta W}{h}$$

ou son nombre d'ondes :

$$\sigma_m = \frac{\Delta W}{hc}$$

Le phénomène se traduit par la production de paire électron-trou, et la conductivité de la substance s'accroît.

b) Domaine de sensibilité.

Nous venons de voir qu'il existe une fréquence minimum pour l'effet photoconducteur. Ceci évite la détection de l'ordre 1 du réseau dans les régions où nous avons opéré (entre 25000 et 30000 Å).

Nous savons que les ordres supérieurs à 2 n'étaient pas détectés non plus. Nous sommes par conséquent assurés de ne recevoir que l'ordre 2 du réseau (entre 10000 et 16000 Å environ). Le maximum de sensibilité de la cellule à sulfure de plomb se situe vers 20000 Å.

Lorsque la cellule est mise en série avec une tension elle laisse passer un courant I qui dépend de l'éclairement qu'elle reçoit. A éclairement constant, la variation de I en fonction de V n'est pas linéaire comme l'exigerait la loi d'Ohm.

A tension constante I n'est pas fonction linéaire de l'éclairement. La sensibilité $\left(\frac{\partial I}{\partial E}\right)_V$ est maximum pour les faibles valeurs de E et ne cesse de décroître ensuite quand E augmente. La sensibilité de la cellule exposée à la lumière modulée, décroît lorsque la fréquence de modulation augmente.

La sensibilité de ces cellules est notable mais elles présentent un phénomène de fatigue, c'est à dire une diminution de la sensibilité après une exposition prolongée à la lumière.

Cette diminution est d'autant plus marquée que l'éclairement a été plus intense. Les cellules photoconductrices présentent donc le défaut de ne pas être parfaitement stables dans le temps.

En amplifiant le courant I donné par la cellule on amplifie également le bruit de fond. Mais on peut augmenter notablement le rapport "signal sur bruit" en refroidissant la surface sensible. Celle ci se trouve au fond d'une cavité cylindrique où on place de la neige carbonique. Les parois de la cavité sont argentées pour que la neige se conserve mieux. Grâce à ce refroidissement le rapport signal sur bruit est multiplié par un facteur 10.

2°) Amplificateur.

On utilise un amplificateur alternatif, sélectif sur une fréquence de 125 périodes. La lumière est modulée à l'entrée du spectromètre, par un disque à cinq secteurs tournant à 1500 tours par minute ce qui donne la fréquence convenable de 125 cycles. Un signal de référence est fourni par une cellule photoémissive éclairée par une lampe auxiliaire à travers le disque à modulation.

Les deux signaux après amplification sont envoyés dans un détecteur synchrone qui donne un signal définitif proportionnel au cosinus de leur déphasage et à l'amplitude du signal étudié, mais indépendant de l'amplitude du signal de référence. Les conditions les meilleures sont réalisées lorsque le déphasage est nul c'est à dire lorsque les deux cellules se trouvent au même instant démasquées par le disque.

Les lumières parasites non modulées à la fréquence 125 n'ont aucune influence.

Il n'y a pas de dérive de zéro comme dans les amplificateurs à courant continu.

2 boutons de réglage, l'un continu, l'autre à plots, permettent de faire varier le gain de l'amplificateur. Il ne faut pas amplifier de manière excessive ce qui risque d'amener une saturation de l'ampli : au lieu d'avoir un signal augmentant régulièrement en fonction de l'éclairement, on a au contraire une décroissance qui donne l'impression d'une raie renversée. Si on observe alors le signal à l'oscillographe, on constate qu'il est fortement perturbé. Au lieu d'arcs réguliers de sinusoïde, on obtient des arcs extrêmement distordus. On vérifie

qu'on fait disparaître la distorsion en diminuant l'amplification. Outre la distorsion des signaux, il se produit une perturbation dans la sélectivité de l'appareil. On peut éviter ces ennuis en surveillant la tension à la sortie contrôlée.

En employant des sensibilités notables, on est gêné par le bruit de la cellule, même en l'absence de signal. On peut y remédier en augmentant la constante de temps de l'amplificateur. Mais lorsqu'on augmente la constante de temps, la réponse des appareils est moins rapide. Il faut donc explorer le spectre d'autant plus lentement.

La vitesse d'exploration est aussi liée à la luminosité. Lorsqu'on ouvre largement les fentes, on peut augmenter cette vitesse, même avec une grande constante de temps.

III - Exploration du spectre.

A) Exploration linéaire en nombre d'ondes.

Pour une position donnée du réseau, les angles d'incidence i_1 , et de diffraction i_2 sont déterminés ; l'appareil est réglé sur la longueur d'onde définie par :

$$\sin i_1 + \sin i_2 = n\lambda$$

i_1 et i_2 étant assez voisins pour qu'on puisse les confondre, :

$$2 \sin i = n\lambda$$

ou encore

$$\sigma = \frac{np}{2 \sin i}$$

Pour faire défiler les nombres d'ondes, on fait tourner le réseau autour d'un axe vertical, ce qui est plus commode que de déplacer les fentes.

Lorsque le réseau tourne, i varie, donc σ varie aussi. Le dispositif d'entraînement du réseau a été construit de telle façon que cette variation de σ soit linéaire en fonction du temps.

Ce dispositif comporte une vis micrométrique, entraînée par un petit moteur. La vis pousse la tige Ax (voir la figure), qui est normale au réseau, en un point variable C.

Ax est fixée en A perpendiculairement à une deuxième tige fixée en B à l'axe de rotation du réseau. La longueur AB est fixe et égale à 13 cm. La longueur CB diminue linéairement en fonction du temps, lorsque la vis, entraînée par le moteur synchrone, avance régulièrement.

$$CB = l - vt$$

L'angle d'incidence $i = \widehat{CBN}$ se retrouve en \widehat{BCA} .

$$\text{Donc } \sin i = \frac{AB}{BC} = \frac{AB}{1-vt}$$

$$\sigma = \frac{np}{2 AB} (1-vt)$$

On explore donc le spectre linéairement en nombres d'ondes en fonction du temps, ce qui est mécaniquement plus facile à réaliser qu'une exploration linéaire en longueurs d'ondes.

La course de la vis n'est que de 25 mm. Pour explorer au delà de ce domaine, on fait effectuer une translation à l'ensemble du dispositif : vis micrométrique et moteur. Il peut occuper diverses positions, numérotées 1, 2, 3..... et distantes de 10 mm l'une de l'autre. On remarque qu'elles se recouvrent en partie et qu'on peut n'utiliser qu'une position sur deux.

En employant au mieux ces possibilités on peut faire varier BC entre 21,5 cm et 14 cm.

Cherchons quelles sont les valeurs extrêmes correspondantes σ et σ'

$$\sin i = \frac{13}{21,5} = 0,604$$

$$\sigma = \frac{np}{2 \sin i} = \frac{6000 \times 2}{2 \times 0,604} = 9840 \text{ cm}^{-1}$$

$$\sin i' = \frac{13}{14} = 0,93$$

$$\sigma' = \frac{6000 \times 2}{2 \times 0,93} = 6460 \text{ cm}^{-1}$$

B) Repérage d'une raie.

A chaque division de la vis micrométrique, il faut pouvoir attribuer un nombre d'ondes. Le spectromètre nécessite donc un étalonnage préalable. Celui-ci a été effectué en enregistrant des raies connues du spectre du mercure. On peut utiliser non seulement les raies infra-rouge, mais aussi les raies visibles d'ordre plus élevé, puisqu'il y a superposition des ordres.

Pour chaque position du dispositif : vis moteur, on peut construire une courbe d'étalonnage en portant en ordonnées les divisions en mm de la vis, et en abscisses les nombres d'ondes en cm^{-1} . La courbe obtenue est une droite d'après le paragraphe précédent. Pour connaître le nombre d'ondes d'une raie il suffirait donc en principe de se reporter à ces courbes. Nous allons voir que le défaut de reproductibilité des mesures exige des précautions.

C) Fidélité et précision de la mesure.

1°) La pente des droites d'étalonnage est bien déterminée quoiqu'elle varie très légèrement d'une droite à l'autre. En effet quand on change tout le dispositif de position, la linéarité ne reste pas vérifiée d'une manière absolument rigoureuse.

Mais on remarque que si on change plusieurs fois de position, il n'y a pas reproductibilité : la courbe d'étalonnage ne change pas de pente mais subit une petite translation. Pour pallier cet inconvénient, il suffit de repérer un point de la courbe avant de commencer l'enregistrement, et on a aussi la possibilité de retracer la courbe entière.

2°) Pour connaître la valeur du nombre d'ondes d'une raie, on pourrait penser à ne regarder que l'enregistrement. En effet le papier enregistreur se déroule à vitesse constante, et il doit indiquer une échelle linéaire de nombres d'ondes. Il n'en est rien, car la vis, entraînant le réseau, n'avance pas à vitesse rigoureusement constante. Ces irrégularités sont sans doute d'origine mécanique. Pour avoir des résultats plus précis, il vaut mieux se référer pour chaque raie à la division correspondante de la vis micrométrique, que faire une mesure sur l'enregistrement lui-même.

La vis a un pas d'un demi-millimètre. Le tambour est gradué en 50 divisions. La plus petite division correspond donc à une avance de la vis d'un centième de millimètre. Pour tout le parcours de la vis (25 mm), la variation du nombre d'ondes tombant au centre de la fente de sortie est de

1040 cm^{-1} . $\frac{1}{100}^e$ de mm représente donc $0,4 \text{ cm}^{-1}$.

On compte donc une erreur $\Delta\sigma$ d'environ un demi centimètre⁻¹ sur les mesures. C'est effectivement l'écart qu'on a obtenu par rapport à la valeur moyenne lorsqu'on a fait plusieurs mesures.

IV - RESULTATS

A) Résultats obtenus avec la cathode creuse.

La cathode creuse donne en principe le spectre de 3 éléments :

- celui du néon qui emplit la lampe
- celui de l'aluminium dont est faite la cathode.
- celui du néodyme.

Pour différentier ces 3 spectres, on a d'abord fait des enregistrements avec une cathode vide. On n'obtient alors que le spectre du néon et celui de l'aluminium. On refait ensuite les mêmes enregistrements après avoir introduit de l'oxyde de néodyme dans la cathode, mais, toutes choses restant égales par ailleurs (pression de néon, intensité de courant dans le tube à décharge, gain d'amplificateur etc...), des raies supplémentaires qui apparaissent ne peuvent être dues qu'au néodyme.

Elles sont en petit nombre. En effet les raies du néodyme sont perdues au milieu des raies du néon beaucoup plus nombreuses et plus intenses, en dépit de la forte intensité de courant. Mais ce sont encore les raies de l'aluminium qui apparaissent avec la plus grande intensité, car pour cet élément l'énergie du rayonnement se répartit en un petit nombre de raies, tandis que pour le néodyme les possibilités de transition sont très variées et chacune des raies est faible.

Une autre difficulté expérimentale intervient : les ions du néon pulvérisent l'aluminium et au bout de peu de temps, celui-ci recouvre complètement l'oxyde de néodyme. Il se peut

très bien que si l'on n'a rien trouvé dans certaines régions, ce soit à cause de ce phénomène. Il faut très souvent dévisser la cathode et ajouter une nouvelle quantité d'oxyde de néodyme.

La cathode creuse n'étant pas une source d'une grande brillance, il a fallu utiliser des fentes larges (largeur linéaire égale à 1 mm, $u = 80$). Et d'autre part on a dû amplifier au maximum, ce qui ne va pas sans quelques irrégularités de la part de l'amplificateur. Enfin avec une telle amplification, le bruit de la cellule était très marqué, ce qui nous a amenés à augmenter la constante de temps jusqu'à 16 secondes. Il a fallu par conséquent balayer le spectre très lentement. Les 25 mm de course de la vis étaient parcourus en 8 heures, soit $\frac{1040}{8} = 130 \text{ cm}^{-1}$ par heure.

Position 9 de la vis.

Les 25 mm de course de la vis correspondent à une variation de nombres d'ondes de $1047,5 \text{ cm}^{-1}$. La pente de la droite d'étalonnage est donc de $\frac{1047,5}{25} = 41,9 \text{ cm}^{-1}$ par mm.

Avant de commencer l'enregistrement nous avons repéré la raie verte du mercure (18315 cm^{-1}) qui se trouve dans l'ordre 4 dans cette région. La radiation de l'ordre 2 qui se trouverait en coincidence avec cette raie, aurait pour nombre d'ondes :

$$18315 \times \frac{2}{4} = 9157,5 \text{ cm}^{-1}$$

Ce repérage permet de tracer la droite d'étalonnage. Dans un premier enregistrement (cathode vide); on retrouve les raies du néon. Les nombre d'ondes de ces raies, déduits de

l'examen de la droite d'étalonnage, seront désignés par σ_{exp} .

Ces nombres nous permettent d'identifier les raies et de leur attribuer un nombre d'ondes : $\sigma_{\text{réel}}$ calculé par différence entre 2 niveaux d'énergie.

Dans l'enregistrement II (cathode contenant de l'oxyde de néodyme) les nombres d'ondes des raies supplémentaires qui apparaissent, seront calculées d'après les $\sigma_{\text{réel}}$ des 2 raies du néon qui les encadrent.

Position 7.

Pente de la droite d'étalonnage : 41,8 cm^{-1}/mm .

Raies servant à l'étalonnage : on peut se servir d'une raie du néon déjà trouvée entre 0 et 5 mm. Elle se retrouve ici avec 20 mm de plus puisque les positions se recouvrent en partie.

Position 5.

Pente de la droite d'étalonnage : 41,8 cm^{-1}/mm .

Repérage : raie verte du mercure dans l'ordre 5 : 7326 cm^{-1}

Position 3.

Pente de la droite d'étalonnage : 41,8 cm^{-1}/mm .

Repérage : raie verte du mercure dans l'ordre 5 à 24,83 mm.

ENREGISTREMENT I

ENREGISTREMENT II

Position	lu sur la vis en mm	σ_{exp} cm ⁻¹	$\sigma_{réel}$		lu sur la vis	cm ⁻¹
9					19,31	9621
					17,65	9482
					15,98	9552
	15,65	9467	9467,9	Néon		
	10,73	9260	9261,0	"		
	9,79	9221	9221,6	"		
	3,92	8975	8974,2	"		
	3,28	8947	8946,9	"		
7	24,07	8973	8974,2	Néon		
	23,43	8946	8946,9	"		
	21,98	8885	8884,9	Aluminium		
	19,46	8779	8779,7	Néon		
	19,10	8764	8765			
	17,04	8677	8667,9			
	16,78	8666,5	8668,5			
	15,66	8619	8619,9			
	15,42	8610	8610,3			
	14,15	8557	8556,6			
	12,75	8497,5	8499			
	12,38	8483	8482,4			
	7,65	8286	8287,7			
						6,57
					5,48	8193
					5,35	8189
					4,50	8152
	1,48	8026	8026	Néon		

ENREGISTREMENT I

ENREGISTREMENT II

Position	lu sur la vis	σ_{exp} cm ⁻¹	σ_{riel}		lu sur la vis	
5	21,42	8026	8026	Néon		
	19,37	7938	7937	"		
	17,95	7879	7879	"		
	16,77	7829	7829	"		
	14,69	7742	7742,6	"		
	11,79	7620	7619	Aluminium		
	11,39	7604	7604	"		
					5,63	7363
3	22,88	7244	7243	Aluminium		
					20,97	7165
					18,77	7072
	6,70	6567	6566	Néon		

B) Résultats obtenus avec le tube sans électrodes.

Le tube sans électrodes est beaucoup plus lumineux que la cathode. On a pu à la fois réduire les fentes de moitié ($\frac{1}{2}$ mm) et diminuer aussi d'un facteur 2 le gain sur l'ampli. Le bruit étant en conséquence, moins amplifié, on a pu réduire la constante de temps. On l'a choisie égale à 8 secondes, ce qui permet d'explorer le spectre plus rapidement, les 25 mm permis à la vis sont parcourus en 2 heures environ d'où une vitesse d'exploration d'environ 500 cm^{-1} en 1 heure.

Les raies ayant servi de repère sont les mêmes qu'avec la cathode creuse, mais leur position a quelque peu changé, comme on l'a fait remarquer. Nous ne reviendrons pas sur ces détails d'étalonnage. Nous avons signalé dans les tableaux de mesure les raies particulièrement intenses, et également les raies très faibles, plus incertaines.

L'important est de savoir si toutes ces raies font partie du spectre du néodyme. On peut craindre d'exciter le spectre d'autres éléments. Nous avons effectué deux séries d'expériences à montrer que le spectre relevé était réellement celui du néodyme.

En premier lieu, les terres rares sont difficiles à séparer et on peut penser que dans l'oxyde du néodyme, il est resté un certain pourcentage d'oxydes voisins. Les éléments qui encadrent le néodyme dans la classification périodique sont le prométhéum qui est radioactif, et le praséodyme. Les raies les plus faibles enregistrées avec le tube sans électrodes pourraient faire partie du spectre du praséodyme. S'il en est ainsi, en

mettant de l'oxyde de praséodyme dans la cathode creuse on doit retrouver ces raies avec une augmentation d'intensité. L'expérience a été faite, mais on n'a pas trouvé de coïncidence avec les raies précédemment observées.

D'autre part comme le tube contient de l'iodure de néodyme, on peut se demander si le spectre de l'iode atomique est excité. Pour répondre à cette question on a construit un tube contenant de la vapeur d'iode et du néon et on l'a excité par la haute fréquence. L'enregistrement a révélé, qu'outre les raies du néon, apparaissent des raies qui sont probablement dues à l'iode mais qui ne coïncident jamais avec les raies des enregistrements antérieurs.

En conclusion, les raies du praséodyme et de l'iode ne sont pas excitées dans le tube sans électrodes, et il y a tout lieu de penser que les mesures indiquées donnent réellement le spectre du néodyme.

Position 9

Position	σ	Intensité
23,02	9765,5	forte
22,94	9762,5	forte
21	9681	
19,92	9635,5	forte
19,53	9619	forte
19	9597	
18,56	9578,5	
17,96	9553,5	forte
17,86	9549	forte
16,85	9506	faible
16,31	9482	faible
13,20	9553	faible
6,54	9074	forte
5,14	9016	forte
4,74	8999	
3,93	8965	

Position 7

Position	σ	Intensité
24,74	8998	
23,96	8965	
22,39	8899,5	forte
22,20	8891,5	forte
20,94	8839	
20,14	8805,5	
19,74	8788,5	forte
19,13	8763	forte
19,06	8760	forte
18,97	8756,5	forte
18,73	8746,5	forte
18,38	8731,5	
16,40	8648,5	
15,91	8628	
12,55	8491	
8,92	8335	
7,74	8286	forte
7,24	8265	
6,61	8238,5	
5,50	8193	
5,40	8189	
4,55	8152	forte
3,94	8126,5	forte

Position 5

Position 3

Position	σ	Intensité
23,58	8126,5	forte
21,92	8057	faible
	7943	faible
11,53	7607,5	
8,42	7494	faible
7,90	7472	faible
6	7393	faible
5,30	7363,5	forte
4,50	7330	forte
4,23	7318	
0,60	7166	
0,07	7143	

Position	σ	Intensité
24,95	7317	forte
21,32	7165	
20,79	7142	faible
19,13	7072,5	faible
17,53	7005,5	faible
17,37	6999	
16,09	6945,5	faible
15,37	6925	faible
15,22	6909	
15,16	6906,5	forte
13,82	6850,5	forte

En conclusion nous avons relevé une soixantaine de raies infra-rouges du néodyme dont le nombre d'ondes est compris entre 6800 et 9800 cm^{-1} environ. Ceci représente un intervalle spectral assez faible et il s'agit donc d'un travail très incomplet. Mais comme l'a déjà fait remarquer, c'est un travail préparatoire et qui était nécessaire.