



HAL
open science

Mesures sur le phénomène de Zeeman. Changements magnétiques des raies d'émission des corps à l'état gazeux
A. Cotton

► **To cite this version:**

A. Cotton. Mesures sur le phénomène de Zeeman. Changements magnétiques des raies d'émission des corps à l'état gazeux. Radium (Paris), 1911, 8 (2), pp.33-43. 10.1051/radium:019110080203300 . jpa-00242447

HAL Id: jpa-00242447

<https://hal.science/jpa-00242447>

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MÉMOIRES ORIGINAUX

Mesures sur le phénomène de Zeeman

Changements magnétiques des raies d'émission des corps à l'état gazeux

Par A. COTTON

[École Normale Supérieure. — Laboratoire de Physique.]

J'ai été chargé de résumer les principaux résultats numériques des mesures faites jusqu'ici sur le phénomène de Zeeman (Spectres des gaz) pour le *Volume des Constantes* que prépare la *Société française de physique*. Il fallait nécessairement faire un choix parmi les données rassemblées dans les nombreux mémoires publiés sur cette question : les spectres étudiés sont déjà nombreux, quelques-uns comprennent un nombre considérable de raies dont on a fait l'étude patiente. J'ai surtout cherché à donner une idée de l'ensemble des résultats actuellement acquis : les uns sont relativement simples et mettent tout à fait hors de doute l'existence de relations numériques entre les phénomènes de Zeeman et les expériences faites sur les électrons, les autres présentent une complexité en apparence inextricable.

J'ai choisi, parmi les différents types de changements, les plus caractéristiques, ceux qui ont été soumis à des mesures, et spécialement ceux qui se retrouvent identiques (dans l'échelle des fréquences) pour plusieurs raies d'un même corps ou de corps différents. Je n'ai pas rassemblé les résultats sous la forme de tableaux numériques, mais sous la forme de figures : j'ai fait toutes ces figures à la même échelle de façon à ce qu'elles indiquent dans chaque cas la grandeur du changement magnétique dans un champ connu. La précision des mesures, surtout celles des champs magnétiques, n'est en général pas supérieure à 1 pour 100; de telles figures peuvent par suite remplacer complètement des données numériques, et se prêtent mieux que des tableaux à des comparaisons entre les divers types de changements.

Dans ce qui va suivre je reproduirai ces figures et leurs légendes, après avoir donné des indications sur la façon dont on peut les utiliser. Mais j'ajouterai en outre des indications relatives à chacun des cas signalés, en indiquant ce qu'ils présentent d'intéressant, et en faisant quelques remarques complémentaires¹.

1. J'ai indiqué déjà quelques-unes d'entre elles dans une communication à la Société française de physique [Séance du 7 mai 1909 (fasc. 4, p. 55)].

Remarques sur les figures représentant les divers types de changements magnétiques.

Ces figures représentent dans chaque cas les diverses composantes magnétiques qui apparaissent lorsqu'on observe une raie normalement aux lignes de force du champ magnétique. Ces composantes sont alors polarisées rectilignement : les composantes formées par des vibrations de Fresnel perpendiculaires aux lignes de force sont représentées en traits pleins, celles formées par des vibrations parallèles aux lignes de forces en traits interrompus. (Il y a un petit nombre de cas où il y a coïncidence entre les deux sortes de composantes : dans ce cas la lumière correspondant à ces composantes n'est pas polarisée, ou bien est polarisée incomplètement.)

Lorsque l'observation est faite suivant les lignes de force du champ les composantes figurées en traits interrompus disparaissent complètement, les composantes en traits pleins persistent seules; elles correspondent alors à des vibrations circulaires, qui, d'un côté de la raie primitive, ont le sens des courants d'Ampère, et le sens opposé de l'autre côté. Les figures suffisent donc pour représenter complètement le phénomène de Zeeman dans les deux cas principaux d'observation (effet *transversal*, effet *longitudinal*) si l'on connaît de plus le *signe* de l'effet. On dit que l'effet Zeeman est *négalif*, lorsque les vibrations circulaires ayant le sens du courant d'Ampère sont, par rapport à la raie primitive, du côté du violet. Dans tous les cas de spectres d'*atomes*, lorsque l'observation longitudinale a été faite, c'est ce signe qui a été trouvé. On peut admettre que toutes les figures qui sont reproduites ici, sauf les deux dernières, se rapportent à des spectres d'*atomes*. Les deux dernières correspondent au contraire à des spectres que l'on est conduit, par des raisons probantes, à attribuer à des molécules : comme on le sait, l'effet Zeeman peut alors avoir le signe *positif*.

On n'oubliera pas, en examinant ces figures, leur caractère schématique. On n'a pas tenu compte en

général des *intensités* relatives des diverses composantes : les *mesures* à ce sujet font d'ailleurs presque complètement défaut. D'autre part les composantes ne sont pas toujours également *nettes* : il est même possible que, pour certaines des raies indiquées ici, l'emploi d'un champ plus intense ou d'un spectroscopie plus puissant permette plus tard de pousser plus loin la résolution magnétique. On sait que les exemples de ce fait sont déjà nombreux, et que les premières observations montraient, le plus souvent confondues, des composantes qui sont représentées ici nettement séparées.

En revanche ces figures schématiques donnent *en vraie grandeur* les écarts entre les composantes magnétiques reconnues jusqu'ici : toutes les figures sont faites à la même échelle, et se rapportent à une même valeur du champ. L'échelle adoptée pour les abscisses n'est pas celle des longueurs d'onde, mais celle des *fréquences*, c'est-à-dire que les abscisses sont proportionnelles aux *inverses* des longueurs d'onde. Cette considération des fréquences apporte ici, comme on sait, une simplification considérable, puisqu'une figure unique suffit pour représenter les changements éprouvés par un nombre considérable de raies distinctes. Les écarts figurés entre les composantes de chaque raie indiquée ne sont donc pas proportionnels à la différence $\delta(\lambda)$ de leurs longueurs d'onde λ' λ'' (toujours très voisines), mais à la différence de leurs fréquences $\frac{1}{\lambda'} - \frac{1}{\lambda''} = \frac{\delta(\lambda)}{\lambda^2}$. Les figures représentent donc en réalité ce qu'on verrait avec un appareil spectroscopique puissant dont les déviations seraient proportionnelles aux fréquences, appareil qui sera, lorsqu'on arrivera à le réaliser¹, aussi précieux pour l'étude du changement magnétique des raies spectrales que pour la découverte de ces familles, de ces *séries*, dans lesquelles ces raies se groupent parfois naturellement.

Ces figures permettent de trouver la valeur de l'écart entre les composantes dans l'échelle des fréquences, pour un champ H quelconque d'intensité connue, puisque, à part certains phénomènes de dissymétrie auxquels je ne m'arrêterai pas aujourd'hui, toutes les composantes s'écartent proportionnellement à l'intensité du champ magnétique; et que même pour des raies présentant cette dissymétrie l'écart entre deux composantes *polarisées de la même manière* est proportionnel à cette intensité. Il suffit donc de connaître la valeur absolue de l'écart pour l'une des raies figurées. Or l'écart des composantes extrêmes

des raies bleues du zinc, représentées par les figures 4, 5, 6, est le même pour les trois (Runge et Paschen); sa valeur, d'après la mesure absolue que nous avons faite, P. Weiss et moi¹, du changement magnétique de ces raies, est :

$$\frac{\delta(\lambda)}{H\lambda^2} = 1,88 \times 10^{-4} \text{ (U.E.M.)}$$

Cette valeur doit être exacte à quelques millièmes près : elle a été confirmée, indépendamment de toute théorie, par les mesures récentes². Cette confirmation était nécessaire, car la valeur en question s'écartait notablement de la valeur alors admise. Je l'ai utilisée pour réduire les résultats que l'on trouve dans les différents mémoires, où le plus souvent on ne s'est pas occupé de faire des mesures du champ magnétique, et où on ne donne que des mesures relatives. C'est ainsi que l'on peut, partant de là, donner les valeurs des champs magnétiques utilisés par Runge et Paschen dans leurs recherches dont il sera question plus loin, champs voisins respectivement de 23 000 et de 50 000 gauss. Il suffit, par exemple, que lors de l'étude d'un spectre on ait photographié en même temps, sinon les raies du zinc dont il s'agit, du moins l'une des raies étudiées par ces physiciens, pour que l'on puisse calculer les valeurs absolues des changements magnétiques.

On verra que cet écart entre les composantes extrêmes des raies du zinc est le double de l'écart *normal* prévu par la théorie de Lorentz. Pour cette raison, dans les figures qui suivent, on a représenté à diverses places cet écart double de l'écart normal, et l'écart normal lui-même. Pour chacune des raies dont on voudra calculer la grandeur du changement magnétique, on mesurera successivement sur la figure dans une région voisine³ l'écart double de l'écart normal, et l'écart entre les composantes mêmes de la raie étudiée. On en déduira aussitôt la différence des fréquences dans un champ connu, et par un calcul simple, la différence des longueurs d'onde.

Exemples d'application. — Proposons-nous de chercher, dans un champ H de 10 000 gauss, la différence des longueurs d'onde des composantes latérales du quadruplet donné par la raie D₁ du sodium. Sur la figure 3 on trouve que cet écart est les $\frac{4}{5}$ de l'écart normal. D'autre part, la longueur d'onde de cette

1. P. WEISS et A. CORTON, *Journ. de Phys.*, 6 (1907) 429.

2. Voir GMELIN, *Ann. de Phys.*, 28 (1909) 1079. Une correction légère était à apporter aux mesures de M. Stettenheimer faites indépendamment des nôtres sur les mêmes raies et publiées peu après : en en tenant compte Gmelin montre que ces mesures de M. Stettenheimer sont en accord excellent avec les nôtres, et avec celles qu'il a faites de son côté sur les raies correspondantes du mercure.

3. Cette précaution doit être prise pour tenir compte de petits changements d'échelle qui peuvent survenir lors de la reproduction des trois planches.

1. Ce qui montre bien que le problème est résoluble, c'est qu'un réseau de Soret à traits circulaires convenablement espacés, comme Wood notamment en a fait [*Phil. Mag.*, 45 (1898) 511], comme j'en ai moi-même obtenus en photographiant des ondes stationnaires [*Bull. Soc. fr. de physique*, 4^e fa-c. (1902, 70)] constitue une lentille dont la distance focale est proportionnelle à la fréquence.



Cette échelle qu'on retrouve çà et là dans les figures représente l'écart normal et le double de cet écart.



Fig. 1. — Ex. He 6678. Ce triplet pur d'écart normal est donné par les raies du spectre visible de l'hélium, appartenant à des séries, étudiées par Lohmann.

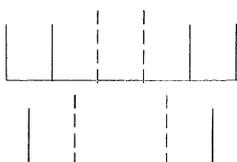


Fig. 2. — Ex. Na 5890 (D₂) — Cu 5248 — Ag 5281 — Mg 2795 — Ca 5934 (K) — Sr 4077 — Ba 4551

Fig. 5. — Ex. Na 5896 (D₁) — Cu 5274 — Ag 5585 — Mg 2802 — Ca 5969 (H) — Sr 4215 — Ba 4951.
Les types 2 et 5 (raies jaunes du sodium) représentent les changements subis par les raies appartenant aux deux séries formant la série principale double des métaux alcalins et d'autres métaux (Runge et Paschen). Ils représentent aussi les changements subis par les raies appartenant aux deuxièmes séries secondaires doubles, les raies étant disposées en ordre inverse :

Exemples : fig. (2) — Cu 4551 — Ag 4669 — Al 5962 — Tl 5551 — Mg 2956 — Ca 5757 — Sr 4505 — Ba 4900.
fig. (5) — Cu 4481 — Ag 4176 — Al 5944 — Tl 5776 — Mg 2928 — Ca 5706 — Sr 4162 — Ba 4525.



Fig. 4. — Ex. : Zn 4680 ou encore Mg 5168 — Cd 4678 — Hg 4047 — Hg 2752, etc... Sr 4527.



Fig. 5. — Ex. : Zn 4722 ou encore Mg 5175 — Cd 4800 — Hg 4559 — Hg 2895, etc.... Sr 4562.



Fig. 6. — Ex. : Zn 4810 ou encore Mg 5184 — Cd 5086 — Hg 5460 — Hg 5541, etc.... Sr 4556.

Les figures 4, 5, 6 représentent les changements éprouvés par les raies appartenant aux secondes séries secondaires triples des métaux du groupe du zinc (Runge et Paschen).



Fig. 7. — Ex. : Mg 5829,5.



Fig. 8. — Ex. : Mg 5852,4

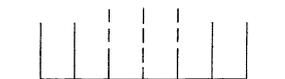


Fig. 9. — Ex. : Mg 5858,4.

Les figures 7, 8, 9 se rapportent aux raies de la première série secondaire (triple) du magnésium étudiées par Miller. Ici encore les écarts sont en relation simple avec l'écart normal. On notera les coïncidences entre certaines composantes vibrant parallèlement et perpendiculairement au champ, et dans la fig. 8 le fait qu'une composante vibrant normalement au champ occupe la place de la raie primitive.

raie¹ est 5896 unités d'Angström (1U.A. = 10⁻⁸ cm).
On a donc

$$\delta(\lambda) = H\lambda^2 \times \frac{2}{5} \times 1,88 \times 10^{-4}$$

$$= 10^8 \times 5896^2 \times 10^{-16} \times \frac{2}{5} \times 1,88 \times 10^{-4}$$

$$\delta(\lambda) = 4,35 \cdot 10^{-9} \text{ cm} = 0,435 \text{ U.A.}$$

Dans ce champ l'écart cherché est donc $\frac{1}{44}$ environ de la distance des deux raies D qui sont distantes d'à peu près 6 unités d'Angström.

1. Je donne dans les légendes des figures toutes les longueurs d'onde avec cette unité, telles qu'elles sont données par les auteurs, sans faire aucune réduction.

On trouvera de même que, dans le même champ de 10 000 gauss, la distance entre les composantes latérales du triplet donné par la raie 4680 du zinc (fig. 4) est 0,412 U. A; que celle des composantes extrêmes de la raie 4269 du wolfram que l'on trouvera plus loin (fig. 25) est 0,75 U. A., etc....

Examen des principaux types de changements magnétiques : I. Raies appartenant à des séries.

Les figures 1 à 15 se rapportent à des raies que l'on a déjà, grâce aux relations trouvées entre les fréquences correspondantes, réussi à grouper en séries

(Rydberg, Kayser et Runge). On ne connaît actuellement aucune exception à la règle suivante qui résulte des travaux de Preston et surtout de Runge et Paschen : *Les raies d'un même corps appartenant à une même série présentent des changements magnétiques identiques et de même grandeur dans l'échelle des fréquences.* Cette règle semble donc tout à fait générale, bien que le nombre des raies étudiées dans chaque série soit parfois assez restreint, et bien que certaines séries n'aient jamais été étudiées à ma connaissance : l'exemple le plus frappant me paraît être la première série découverte, celle formée par les raies de l'Hydrogène obéissent à la loi de Balmer : je ne sache pas qu'on ait fait sur l'ensemble de ces raies des mesures précises du phénomène de Zeeman.

Le cas représenté par la figure 1 est celui où le phénomène de Zeeman paraît le plus simple. Il se rapporte à l'Hélium dont les raies ont été étudiées dans le champ magnétique par plusieurs physiciens : les résultats admis sont ceux indiqués par Lohmann¹ pour les 9 raies les plus importantes du spectre visible. Ces raies donnent des triplets purs identiques dans l'échelle des fréquences, dont l'écart est la moitié de celui qui sépare les composantes extrêmes des raies bleues du zinc. Or l'écart moitié de celui trouvé pour le zinc est celui qu'on peut calculer d'après la théorie élémentaire de Lorentz, si l'on admet pour le rapport de la charge à la masse d'un électron la valeur

$$\frac{e}{m} = 1,77 \times 10^7$$

et c'est précisément ce nombre qu'ont donné les mesures récentes de Classen, Voltz, Malassez, sur les rayons cathodiques lents. On admettait auparavant, comme on sait, une valeur notablement plus élevée, mais elle était inexacte : c'est la valeur déduite de la mesure absolue du phénomène de Zeeman pour le zinc qui était correcte².

L'hélium est donc un corps pour lequel cette théorie de Lorentz paraît se vérifier complètement : ce résultat est d'autant plus frappant que les 9 raies étudiées³ par Lohmann appartiennent à 5 des 6 séries découvertes dans le spectre entier de l'hélium : toutes ces séries semblent ici se comporter de la même manière.

Il serait utile de reprendre ces recherches avec des champs plus intenses, et de les étendre aux raies de l'hélium situées dans l'ultra-violet, notamment à des

raies intenses telles que 5889 et 5187 qui appartiennent à la dernière série.

Les autres éléments mono-atomiques et « zéro-valents » ne se comportent pas aussi simplement que l'hélium. Certaines des raies du Néon ont donné à Lohmann, comme on le verra plus loin, des changements qui figurent parmi les plus compliqués. Cependant parmi ces raies (non encore sériées) on en trouve (5855 du néon, 5871 du krypton) qui paraissent donner ici encore le même triplet pur d'écart normal.

Les types de changements magnétiques représentés par les figures 2 à 6 se rapportent à des raies de séries qui donnent en général des changements plus compliqués que les triplets purs, mais qui ont ici encore des relations étroites avec l'écart normal. Ces résultats sont surtout le fruit des travaux de Runge et Paschen⁴.

Séries principales doubles. — On a représenté en 5 les six composantes de la moins réfrangible (D_2) des deux raies D du sodium, en 4 le quadruplet donné par l'autre raie D_1 (moins intense). Ces deux raies appartiennent, comme on sait, à une famille de doublets naturels semblables, dont la différence des fréquences décroît rapidement quand on avance vers l'ultra-violet et dont Wood a récemment trouvé des représentants nombreux dans le spectre d'absorption ultra-violet de la vapeur de sodium. On l'appelle généralement série principale double des métaux alcalins. Il est plus correct de parler de *deux séries* principales distinctes et associées, puisqu'il y a en fait une série correspondant à D_1 et une série correspondant à D_2 ; à chacune d'elles se rapportent les changements magnétiques figurés.

Ces changements sont les mêmes, non seulement pour toutes les raies d'une même série d'un même corps, mais aussi quand on considère les séries correspondantes dans les spectres d'autres métaux. On retrouve en effet ces séries dans les spectres d'autres métaux alcalins et de métaux appartenant à la même colonne du tableau de Mendeleïeff⁵. On a retrouvé le même type de changement magnétique, avec la même valeur des écarts, pour des doublets de l'argent et du cuivre. Purvis a signalé une raie de l'or qui se comporte comme D_1 . Mais pour d'autres corps aussi, n'appartenant pas à cette colonne du tableau de Mendeleïeff, on retrouve des raies qui se comportent dans le champ magnétique comme l'indiquent les figures 2 et 5. Comme l'ont remarqué Runge et Paschen, les mesures sur le phénomène de Zeeman permettent de retrouver ces séries principales doubles dans des spectres où on ne les a pas encore mises en évidence. Deux raies du magnésium, les deux raies

1. LOHMANN, *Thèse de Halle*, 1907 et *Phys. Zeitschr.*, 9 (1908) 147.

2. P. WEISS et A. COTTON, *C. R.*, 147 (1908) 968.

3. Les raies satellites plus faibles qui accompagnent certaines de ces raies, celles notamment qui accompagnent la raie D_2 (5876), se comportent d'après Lohmann d'une façon particulière : les vibrations parallèles et perpendiculaires au champ donnent *toutes deux des triplets* d'écart normal, mais les intensités ne sont pas symétriques.

4. RUNGE et PASCHEN, *Anhang zu der Abhand. d. K. Ak. d. Wiss.*, Berlin, 6 fév. 1902. — *Sitzungsberichte*, 10 avril et 26 juin 1902. — *Phys. Zeitschr.*, 3 (1902) 441.

5. Cette colonne comprend Li, Na, K, Cu, Rb, Ag, Cs, Sa, Tm, Au.

bien connues du calcium au commencement de l'ultra-violet (H et K du spectre solaire), deux raies du strontium, deux raies du baryum, se comportent exactement comme les raies D et Purvis a signalé des raies du plomb et de l'antimoine qui donnent le quadruplet caractéristique de D₁.

Deuxièmes séries secondaires doubles. — Les métaux alcalins, et aussi l'aluminium, le thallium présentent, à côté de la série principale double, deux autres séries de doublets : l'une d'entre elles, la deuxième série secondaire double, présente des relations étroites avec la série principale, comme Rydberg l'avait montré il y a longtemps, mais, dans ces doublets (dont la différence des fréquences est cette fois constante), c'est la raie de la plus grande longueur d'onde qui est cette fois la plus intense. Or le phénomène de Zeeman pour ces raies est exactement le même que celui présenté par les raies D, sauf que inversement c'est la raie de la plus grande longueur d'onde qui se comporte maintenant comme D₁. On a déjà trouvé, en profitant de cette remarque, des doublets appartenant à ces séries dans les spectres de différents corps : Magnésium, Calcium, Strontium, Baryum¹.

Deuxièmes séries secondaires triples. — On retrouve les mêmes résultats généraux : identité des changements des raies correspondantes d'un même corps ou de corps différents — relations très simples avec l'écart normal, dans les raies formant les deuxièmes séries secondaires triples des métaux du groupe du zinc, appartenant à la troisième colonne du tableau de Mendeleïeff². Les trois séries distinctes que forment en réalité ces raies, auxquelles appartiennent notamment les trois raies bleues du zinc, les trois raies vertes du Magnésium, trois raies importantes du mercure, etc., ont été aussi appelées séries *étroites*, parce que les raies peuvent être obtenues très fines, quoique assez intenses : c'est sur ces raies que Runge et Paschen ont établi avec le plus de certitude les relations simples qu'ils ont signalées entre leurs changements magnétiques. Ce qui en outre facilite ici l'étude, c'est que les changements sont grands : ainsi les raies les moins réfrangibles dans chaque groupe naturel des trois raies donnent un triplet pur double de l'écart normal (fig. 4). Les composantes extérieures pour les deux autres raies présentent encore le même écart (fig. 5 et 6). Les figures montrent suffisamment quelles relations simples existent entre les écarts des diverses composantes ; il faut noter que les intensités des diverses composantes diffèrent systématiquement ; les composantes extérieures dans le cas de la figure 6 n'apparaissent même pas sur les clichés quand la pose est trop courte.

1. RUNGE in KAYSER. *Handbuch der Spektroskopie*, II, p. 671.

2. Troisième colonne de Mendeleïeff : Gl, Mg, Ca, Zn, Sr, Cd, Ba, Eu, Yt. Hg. Ra.

Premières séries secondaires triples. — Si enfin on examine les premières séries secondaires, également triples, des mêmes corps, qui ont été étudiées par Miller¹, on constate que les résultats sont moins simples. Les raies dont il s'agit sont diffuses, elles se trouvent souvent loin dans l'ultraviolet, enfin leur étude dans le champ magnétique est rendue souvent plus difficile par la présence des raies *satellites* plus faibles qui subissent elles aussi, dans le champ magnétique, des changements particuliers.

Le cas du magnésium est le seul où on n'ait pas observé ces raies satellites. Les changements magnétiques sont plus compliqués : il y a des coïncidences entre les deux sortes de composantes vibrant parallèlement et perpendiculairement aux lignes de force, de sorte que la lumière correspondante n'est pas polarisée complètement ; pour une des trois raies, la composante centrale vibre perpendiculairement (figures 7, 8, 9). Mais ici encore il y a des relations simples entre les écarts et l'écart normal.

Au contraire les raies correspondantes du calcium, du zinc, du cadmium donnent, d'après Miller, des triplets *purs*, identiques pour les raies correspondantes (figures 10, 11, 12), mais qui ne présentent aucune relation simple avec l'écart normal².

Les raies du mercure appartenant à ces séries n'ont pas à ma connaissance été étudiées d'une façon complète ; elles donnent en tout cas, de même que quelques-uns de leurs satellites (Miller), des changements plus compliqués dont un exemple curieux, se rapportant à la raie la moins réfrangible du groupe naturel de 5 raies, est figuré en 15 (la composante centrale est diffuse).

Pour ces raies formant les premières séries secondaires triples, on vérifie donc encore que les raies d'un même corps appartenant à une même série subissent le même changement magnétique, mais le travail de Miller montre que ces changements ne sont plus les mêmes pour les raies correspondantes de divers éléments voisins. Déjà, il est vrai, les spectres en dehors du champ magnétique présentent des différences, le nombre des raies satellites varie d'un métal à l'autre. On peut se demander si la classification des raies, qui a servi à Miller, est tout à fait correcte ; remarquer aussi que les résolutions magnétiques n'ont peut-être pas été complètes, que les raies en dehors

1. MILLER, *Ann. de Phys.*, 24 (1907) 105.

2. On trouve pour les écarts de ces triplets, exprimés en fonction de l'écart normal, les valeurs 0,51 — 0,95 — 1,07.

Je signale à cette occasion que les *premières séries secondaires doubles* des métaux tels que Cu, Ag, Al, Tl, qu'on retrouve encore dans Mg, Ca, Sr, Ba, avaient déjà donné à Runge et Paschen des triplets purs paraissant identiques pour les raies correspondantes. Les écarts n'ont pas été encore mesurés exactement, ils ne paraissent pas en relation simple avec l'écart normal (environ 1,06 et 0,85 normal). Les satellites qu'on observe ici encore ont une décomposition plus compliquée.

du champ sont diffuses et peut-être complexes elles-mêmes.

Mais, dans l'état actuel de la question, on peut conclure que la règle plus générale reliant entre eux les changements magnétiques des raies correspondantes pour différents éléments chimiques, et aussi les relations simples avec le triplet normal, ne paraissent plus valables lorsqu'il s'agit de ces raies, accompagnées de satellites, formant les premières séries secondaires doubles ou triples.

II. Raies n'appartenant pas à des séries (ou non encore sériées).

Il y a beaucoup de raies qui n'ont pas encore été rattachées à des séries, même pour les éléments dont on a déjà essayé de débrouiller les spectres. D'après ce qu'on a vu plus haut, on peut espérer que l'étude du phénomène de Zeeman viendra faciliter ce travail de classification : en fait, on a déjà obtenu des résultats dans cette voie. Mais ces résultats sont en somme fort peu nombreux.

Cela tient peut-être à ce que les raies appartenant à des familles naturelles ne sont peut-être pas toujours reliées par des formules analogues à celles par lesquelles Rydberg, Kayser et Runge, Ritz ont représenté les séries étudiées précédemment.

Rydberg¹ appelle *spectres de lignes du type II* des spectres dont les raies obéissent à des lois différentes, caractérisées par des différences constantes entre les fréquences. Il donne comme exemple des raies du cuivre, et le spectre « rouge » de l'argon.

De même on a signalé, parmi les spectres à raies nombreuses, des groupes de raies qui se répètent un grand nombre de fois : c'est ainsi que le rhodium, d'après Snyder², présente un groupe de 19 raies qui se répètent (avec bien des lacunes il est vrai) 52 fois dans le spectre. Ce serait utile, ce me semble, d'étudier et de comparer les champs magnétiques de ces raies constituant des groupements distincts des séries habituelles. En ce qui concerne le rhodium, Parvis a publié des mesures sur l'effet Zeeman, mais la comparaison avec l'essai de classification de Snyder n'a pas été faite encore.

Dans ce qui va suivre, quand je parlerai de raies non sériées, il faudra entendre que ces raies appartiennent peut-être bien, elles aussi, à des familles naturelles, mais que les lois de leur répartition ne sont pas encore connues.

Raies non sériées donnant des triplets purs. — On a cru pendant quelque temps, tout à fait à tort, que les raies non sériées donnent toutes des triplets

purs d'écart normal. Cette erreur provenait de ce que le premier cas étudié a été celui des raies non sériées du mercure ; Runge et Paschen¹ trouvaient que ces raies donnaient des triplets dont l'écart ne s'écartait pas beaucoup de la valeur normale (d'ailleurs mal connue à cette époque). Ces savants remarquaient eux-mêmes pourtant que cette remarque n'était valable que pour 7 raies (4 autres étant laissées de côté) et que les différences dépassaient les erreurs d'expérience.

Les recherches ultérieures ont montré qu'il ne fallait accorder aucun crédit à cette règle : c'est ainsi que, sur 29 triplets de l'osmium mesurés par Moore², 28 ont un écart supérieur à l'écart normal. En réalité les raies non sériées donnent en effet le plus souvent des triplets purs³, mais dont l'écart varie dans de larges limites. Dans quelques cas on a mesuré un grand nombre de ces triplets : Moore a mesuré 410 triplets du zirconium, 800 triplets du thorium, Jack⁴ 521 triplets du wolfram (tungstène) et 533 triplets de molybdène. Ces physiciens ont dressé des tableaux donnant, pour une valeur donnée du champ, les valeurs de $\frac{1}{2} \frac{\delta(\lambda)}{\lambda^2}$ ou $\delta(\lambda)$ représente encore la différence des longueurs d'onde des composantes latérales.

Ces tableaux sont restés jusqu'ici à peu près inutilisés. Les auteurs signalent cependant çà et là, quelques écarts paraissant plus fréquents, puis quelques coïncidences remarquables. Comme exemple de ces coïncidences, je donne les figures 14, 15, 16 qui se rapportent aux trois raies violettes intenses caractéristiques du chrome⁵. Il y a dans le spectre ultraviolet de ce corps un autre triplet naturel formé lui aussi de raies très intenses : ces raies n'ont pourtant pas été sériées. Or, d'après Miller, les triplets magnétiques donnés par ces raies se retrouvent identiques pour les deux groupes. Les écarts de ces triplets

1. RUNGE et PASCHEN, *Anhang zu der Abh. der K. Ak. d. Wiss.*, Berlin 1902.

2. MOORE, *Ann. d. Phys.*, 25 (1908) 509. — *Astroph. Journ.*, 28 (1908) 8; 30 (1909) 145 et 178.

3. Il est possible que, avec des moyens d'action plus puissants, certains de ces triplets se montrent résolubles : on verra plus loin par exemple que cela s'est produit pour une raie verte du Chrome, de même Lohmann a montré que la raie jaune 5769 du mercure donne en réalité un monoplet.

4. JACK, *Thèse de Göttingen*, 1908. — *Ann. der Phys.*, 28 (1902) 1052.

5. Le triplet vert bien connu caractéristique du chrome, formé aussi de raies intenses mais beaucoup plus serrées, ne se comporte pas de même. La raie médiane donnait à Miller un triplet ayant encore l'écart double de l'écart normal, mais la raie de plus grande longueur d'onde subit un changement bien plus faible que les deux autres. Ces trois raies étant visibles en même temps dans le champ de l'oculaire, c'est un bon exemple à choisir pour montrer le phénomène de Zeeman. Elles ont été étudiées d'une façon plus approfondie par Dufour [*Le Radium*, 6 (1909) 298], qui a montré que la résolution pouvait être poussée plus loin et a signalé la dissymétrie remarquable de l'une des raies latérales modifiée par le champ.

1. RYDBERG, *Rapports au Congrès de Physique de 1900*, II, p. 220.

2. SNYDER, *Astroph. Journ.*, 14 (1901) 179. — Voir KAYSER, *Handbuch d. Sp.*, II, p. 578.

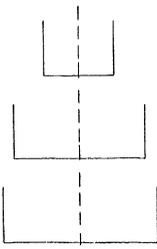


Fig. 10. — Ex. : Zn 5282.4.

Fig. 11. — Ex. : Zn 5502.6.

Fig. 12. — Ex. : Zn 5343.1.

Ces figures 10, 11, 12 se rapportent aux raies de la première série secondaire (triple) du calcium, du zinc, du cadmium étudiées par Miller. A l'inverse des raies correspondantes du magnésium et du mercure, ces raies ont donné des triplets purs dont l'écart, le même pour toutes les raies correspondantes, ne paraît plus en relation simple avec l'écart du triplet normal.

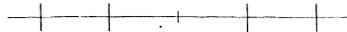


Fig. 13. — Hg 2967,5. Exemple des changements généralement plus compliqués observés par Miller sur les raies du mercure appartenant aussi à la première série secondaire.

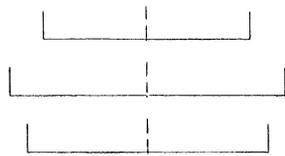
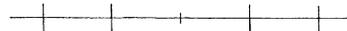


Fig. 14. — Cr 4254,5 et 5378,8.

Fig. 15. — Cr 4271,9 et 5593,6.

Fig. 16. — Cr 4289,9 et 5603,5.

Raies non encore sériées : Deux triplets naturels du chrome (Miller) pour lesquels on retrouve les mêmes modifications magnétiques. Triplets en relations assez simples avec l'écart normal.

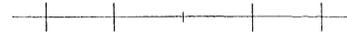


Fig. 17. — Zirconium : Cette figure donne une idée de la façon dont se répartissent, d'après leurs écarts, les triplets purs que donnent 110 raies du zirconium mesurées par Moore (v. p. 40).

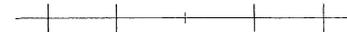


Fig. 18. — Fer : Figure analogue à la précédente. Les triplets purs du fer (Bildeberk van Meurs) ont eux aussi des écarts très variés : il semble qu'il y ait encore ici des valeurs privilégiées.

sont en relation assez simple avec l'écart normal : celui du milieu a l'écart double, et les trois écarts sont entre eux comme 6, 8 et 7.

On peut ajouter que, parmi les raies du Molybdène étudiées par Jack, les trois raies 5798,4 5864,5 5905,1, qui forment un triplet naturel d'une disposition analogue, éprouvent approximativement les mêmes changements magnétiques que ces deux triplets violets et ultraviolets du chrome.

Mais ce sont là des faits isolés : dans leur ensemble, les résultats donnés par les spectres à raies nombreuses non sériées présentent une complexité paraissant décourageante : on peut se donner *a priori*, entre des limites écartées, une valeur quelconque pour

l'écart, on trouve aussitôt dans le tableau une ou plusieurs raies pour lesquelles l'écart a cette valeur à 1 pour cent près et cette erreur est inférieure à celle des mesures.

La seule remarque générale que l'on puisse faire est qu'il est extrêmement rare que l'on observe des triplets purs dont l'écart dépasse le double de la valeur normale. Il y a un si petit nombre d'exceptions que l'on peut se demander si elles ne proviennent pas d'erreurs accidentelles ou de résolutions incomplètes, et une vérification serait utile¹, d'autant que

1. Une raie du fer donnant un triplet pur de grand écart est la raie 5497,99 mesurée par B. Van Meurs [*Proc. Ac. Amsterdam*, 11 '1908' 225 et *Thèse d'Amsterdam*].

Ritz était conduit par des considérations théoriques à prévoir que le double de la valeur normale devait être en effet une valeur maxima pour les écarts.

J'ai fait en 1908 quelques essais pour voir comment les écarts donnés dans les tableaux publiés à cette époque se répartissaient d'après leur grandeur même (sans m'occuper de la place dans le spectre des raies correspondantes). Sur une feuille de papier quadrillé j'ai porté en abscisses les valeurs de $\frac{1}{2} \frac{\delta(\lambda)}{\lambda^2}$ avec des unités convenables, puis sur chaque ordonnée correspondante je marquais un point pour chaque triplet ayant la valeur correspondante de l'écart. Les points représentatifs obtenus paraissent aussitôt se serrer davantage en certaines régions, ce qui prouve que les écarts des triplets paraissent se grouper autour d'un certain nombre de valeurs privilégiées. Pour représenter graphiquement cette répartition, on peut opérer de la façon suivante : on compte le nombre de points compris entre deux abscisses, 70 et 80 par exemple, on en trouve 15, entre deux abscisses 120 et 150 on en trouve 55,5, etc. (les points situés sur les ordonnées limites seront comptés pour moitié). On construit alors la courbe où l'ordonnée 15 correspond à l'abscisse 75, l'ordonnée 55,5 à l'abscisse 125, etc..., courbe qui donne une idée de la façon dont les points sont répartis.

Les figures 17 et 18 sont des réductions de courbes ainsi obtenues : j'ai de plus divisé les valeurs trouvées par la valeur du champ de façon que l'échelle fût la même que pour les autres figures. La figure 17 se rapporte aux 410 triplets du zirconium mesurés par Moore dans son premier travail déjà cité (j'ai seulement laissé de côté quelques résultats indiqués comme incertains par l'auteur lui-même); la valeur (corrigée) que j'ai admise pour le champ est 25 600. La figure 18 se rapporte à 97 triplets du fer mesurés par B. Van Meurs au laboratoire de Zeeman; le champ ayant été déduit de l'étude des raies bleues du zinc, aucune correction n'était nécessaire. Le même travail a été fait pour les triplets du tungstène mesurés par Jack, pour les 40 triplets du chrome, les 40 triplets du manganèse mesurés par Miller, bien que dans ces cas (comme dans celui du fer) le nombre des triplets mesurés ne soit pas assez grand.

Le résultat a été que certaines valeurs privilégiées paraissent se retrouver dans les spectres de différents corps. C'est ainsi que la valeur $\frac{\delta(\lambda)}{H\lambda^2} = 1,41 \times 10^{-4}$ qui correspond à $\frac{3}{2}$ de l'écart normal (puisque pour l'écart normal $\frac{\delta(\lambda)}{H\lambda^2} = 0,94 \times 10^{-4}$) est voisine d'un maximum de toutes les courbes obtenues¹.

1. Pour le zirconium, le tungstène, le fer on trouve aussi en particulier des maxima correspondant respectivement aux

Il me semble donc qu'une telle étude pourrait peut-être conduire à quelques résultats intéressants. Elle comporterait moins d'incertitude si les auteurs s'occupaient avec plus de soin de la valeur des champs employés, et serait faite avec plus de fruit par les physiciens eux-mêmes qui n'ont pas reculé devant de semblables mesures qui exigent beaucoup de patience. Ils pourraient alors tenir compte des erreurs possibles commises lors des mesures des divers triplets : le procédé que j'ai adopté, faute de mieux, revient en somme à admettre pour tous les écarts la même erreur absolue. On pourrait alors voir si ces erreurs expliquent que l'on n'ait pas trouvé les valeurs privilégiées elles-mêmes¹.

La comparaison de spectres analogues, de métaux chimiquement voisins, serait intéressante à ce point de vue, si le domaine spectral étudié était aussi grand que possible.

Raies non sériées ne donnant pas de triplets purs. — Beaucoup de raies que l'on n'a pas encore rattachées à des séries éprouvent des changements plus compliqués que le triplet pur, et souvent on observe encore des relations simples avec l'écart normal et des répétitions remarquables.

C'est ainsi que Moore a trouvé que deux raies de l'yttrium, du zirconium, une du baryum se comportent exactement de même dans le champ magnétique. La figure 19 représente leur changement : on voit que le doublet formé par les vibrations *parallèles* aux lignes de force a l'écart normal.

La figure 20 représente le changement remarquable, avec 4 composantes vibrant parallèlement au champ, d'une raie du titane signalée par Purvis². Elle paraît avoir des relations simples avec l'écart normal si l'on tient compte que la valeur admise par Purvis pour le champ employé (59 980) est certainement beaucoup trop grande. C'est par comparaison avec des raies du zinc, du chrome, du manganèse étudiées par le même physicien que j'ai calculé le champ (50 000 environ) réellement utilisé.

La figure 21 donne un autre exemple de relations simples avec l'écart normal; il se rapporte à deux raies du zirconium (Moore) : c'est un nouvel exemple du cas où c'est une composante vibrant perpendiculairement au champ qui occupe la place de la raie primitive.

Les figures 22 et 24 représentent des raies du néon (Lohmann) pour lesquelles on n'observe plus ces relations simples avec l'écart normal, et où le nombre

valeurs 1,04 — 1,06 — $1,10 \times 10^{-4}$. Le rapport à l'écart normal n'est plus aussi simple. On peut remarquer que certaines raies des premières séries secondaires ont des écarts voisins.

1. Moore dans son second travail (*loc. cit.*) s'est posé cette question et incline plutôt vers une réponse négative.

2. Purvis. *Proc. Cambridge*, 44 (1907) 45. — Autres travaux du même auteur : *Proc. Cambridge*, 13 (1906) 82 : 525; 354. — *Cambr. Trans.*, 20 (1906) 195.

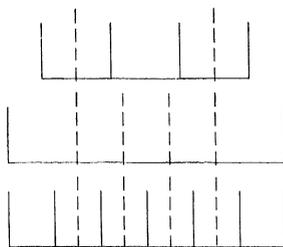
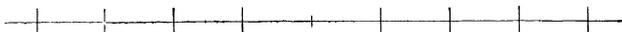


Fig. 19. — Yttrium 3195,8 et 4558,9, Zirconium 4458,2 et 4590,8, Baryum 5997,4 (Moore). (Relations simples avec l'écart normal).

Fig. 20. — Titane 5232,05 (Purvis). La valeur indiquée pour le champ est trop élevée, la correction est incertaine et les relations simples avec l'écart normal ne sont pas hors de doute.

Fig. 21. — Zirconium 5272,4 et 5575,5 (Moore). Ici encore relations simples avec l'écart normal.

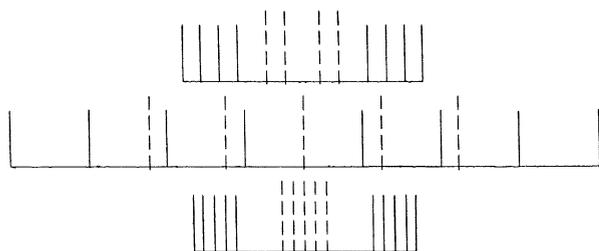
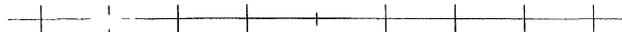


Fig. 22. Néon 6143,28 (Lohmann). Exemple de raies à 12 composantes magnétiques, sans composante occupant la place de la raie primitive.

Fig. 23. — Wolfram 4269,6 (Jack). Cette raie du tungstène à 15 composantes est remarquable par la grandeur du changement de fréquences.

Fig. 24. — Néon 6402,4 (Lohmann). Exemple de raies à 15 composantes.



Fig. 25.

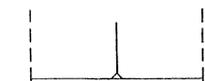


Fig. 26.



Fig. 27.

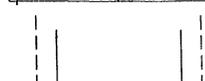


Fig. 28.

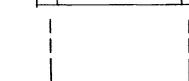


Fig. 29.

Fig. 25. — Fer 5767,4 et 5850,2 (H. Becquerel et Deslandres, Reese, B. van Meurs). Raies du fer qui ne paraissent subir aucun changement magnétique. Au même type appartient d'autres raies du fer p. ex. 5454 (Dufour), de l'hydrogène (id.), du tungstène, p. ex. 5716,2 et du molybdène 4294 (Jack) et les raies des bandes résolubles de C et Az (H. Becquerel et Deslandres, Purvis, etc.).

Fig. 26. — Fe 5587,41 (id.). Exemple de raie présentant l'inversion signalée d'abord par H. Becquerel et Deslandres. La composante centrale vibrant perpendiculairement au champ est diffuse. D'autres raies, 5888,69 du fer, 4024,25 du molybdène (Jack) donnent qualitativement le même phénomène.

Fig. 27. — Fe 5865,75 (mêmes auteurs). A peu près le même type que le précédent, mais en plus deux composantes latérales très faibles. (Fe 5755,47 à peu près identique.)

Fig. 28. — CaF² 6064,5 (Dufour). Exemple d'arêtes de bandes de spectres de molécules donnant un quadruplet. Le sens dans l'observation longitudinale est le sens habituel.

Fig. 29. — CaF² 6076,9 — CaCl² 6184,6 — SrF² 6544,8 — SrCl² 6615,6 et 6649,8 — PaF³ 4950,8 et 4992,2 — BaCl² 5159,1 (Dufour). Arêtes de bandes de spectres de molécule donnant perpendiculairement au champ des doublets ayant l'écart normal aussi bien pour des vibrations parallèles que pour des vibrations normales aux lignes de force : mais parallèlement au champ les composantes à vibrations circulaires inverses les plus intenses se disposent en sens inverse du sens trouvé pour les autres raies (effet Zeeman positif).

des composantes s'accroît. On a trouvé depuis des changements plus compliqués encore. La figure 25 représente d'après les données de Jack une raie du tungstène remarquable par la grandeur du changement dans l'échelle des fréquences. C'est à ma connaissance, parmi toutes les raies étudiées, celle pour laquelle ce changement est le plus grand. Cette raie présente aussi une autre particularité intéressante : les composantes latérales les plus écartées sont les plus intenses. Dufour a étudié cette raie parallèlement au champ : toutes les composantes qui vibraient perpendiculairement aux lignes de force se retrouvent avec les mêmes caractères, avec la polarisation circulaire habituelle.

Je pense inutile de donner d'autres exemples de ces modifications plus compliquées. Y a-t-il quelque loi qui les régit? On a cherché d'abord si les distances (en fréquences) des diverses composantes à la raie primitive n'étaient pas en relation simple avec l'écart normal. On a cherché à représenter ces distances par des expressions de la forme $\frac{p}{q} a$, où $2 a$ est l'écart normal, p et q des nombres entiers simples. Il y a en effet des cas assez nombreux où il en est ainsi; c'est ce que Runge¹ a remarqué le premier. Mais ceux qui ont cherché, coûte que coûte, à vérifier dans tous les cas, pour toutes les composantes ma-

1. RUNGE, *Phys. Zeitschr.*, 8 (1907) 252.

gnétiques, cette règle de Runge, sont arrivés à des fractions $\frac{p}{q}$ de la forme $\frac{67}{21}$ par exemple. Il est difficile de voir là des nombres entiers simples.

Cette règle se trouve d'ailleurs en défaut dans le cas relativement simple des quadruplets. On a rencontré et mesuré un assez grand nombre de quadruplets en étudiant les raies non sériées. Ces quadruplets n'ont plus la disposition simple trouvée plus haut pour les raies du type de D_1 (fig. 5); les écarts, pour les deux sortes de vibrations, varient dans de larges limites et présentent la même complexité, au moins apparente, que les triplets purs.

Ritz¹ a été plus heureux en cherchant à représenter d'une autre manière, par des formules où figurent il est vrai deux constantes, les divers types plus ou moins compliqués des changements magnétiques. Il y a été conduit par des considérations théoriques dont je ne parlerai pas aujourd'hui, mais le seul examen des figures aurait pu suffire à en suggérer l'essai : Examinons les changements les plus compliqués où d'un même côté de la raie primitive on observe pour les deux sortes de vibrations plusieurs composantes : on voit que la distance entre deux composantes consécutives vibrant parallèlement aux lignes de force se retrouve entre deux composantes vibrant dans la direction perpendiculaire. Examinant ensuite les cas où, pour l'une des deux sortes de vibrations, le nombre des composantes est moindre, on trouve qu'on est conduit dans tous les cas à représenter les fréquences des diverses composantes par les deux formules :

$$N_0 \pm mc \text{ (vibr. parallèles au champ).}$$

$$N_0 \pm \omega' \pm m'c \text{ (vibr. perpendiculaires).}$$

ou N_0 est la fréquence de la raie primitive, c et ω' deux constantes, m et m' des nombres entiers. Ces nombres entiers sont effectivement très simples, ils se réduisent à 0, 1, 2, rarement ils atteignent 3 ou 4, ils sont en tout cas beaucoup plus simples que ceux auxquels on est conduit lorsqu'on admet que la règle de Runge est valable dans tous les cas. Cette règle elle-même correspond au cas particulier où il y a un rapport simple entre les constantes c et ω' , et l'écart normal.

Il y a une certaine latitude dans le choix des constantes et des nombres entiers figurant dans ces formules : il est évident qu'on peut changer à la fois ω' et les entiers m' . Il est fort possible — c'est ce que je crois du moins d'après l'examen de quelques cas — que l'on puisse toujours choisir les constantes de façon que la valeur de ω' soit en relation simple avec l'écart normal². On voit facilement, en particulier,

sur les figures reproduites ici, que dans tous ces cas l'écart d'une des composantes vibrant perpendiculairement au champ se trouve en rapport simple (aux erreurs possibles près) avec l'écart normal.

Quelle que soit l'opinion que l'on ait des vues théoriques de Ritz, les formules qu'il a données représentent d'une façon satisfaisante les décompositions magnétiques plus ou moins compliquées¹ des raies étudiées jusqu'ici.

Quelques cas remarquables. — Les trois figures suivantes se rapportent à des types de changements assez rares, mais présentant un intérêt particulier.

La figure 25 a pour but de rappeler que même dans le cas des spectres attribués aux atomes, un certain nombre de raies ont été signalées comme tout à fait insensibles au champ magnétique (dans le spectre du fer et de quelques autres métaux).

La figure 26 représente l'inversion remarquable trouvée par H. Becquerel et Deslandres². Cette inversion, telle qu'ils l'avaient décrite d'abord, a été observée sur la même raie par Reese³, et mesurée à nouveau par B. Van Meurs : il s'agit d'un triplet dans lequel la composante qui occupe la place de la raie primitive (en devenant seulement un peu diffuse) est formée par des vibrations perpendiculaires au champ. Une raie du tungstène, d'après Jack, présente le même type de changement et à peu près le même écart.

Le cas représenté par la figure 27, qui se distingue du précédent par deux composantes latérales très faibles, signalé aussi par H. Becquerel et Deslandres, se rencontre aussi à diverses reprises (mais avec des valeurs différentes pour les écarts) dans le spectre du fer.

Spectres de bandes. — Enfin les deux dernières figures 28 et 29 se rapportent à des corps gazeux donnant des spectres de bandes. On sait que les premières recherches sur ces spectres avaient donné un résultat négatif. C'est ainsi que H. Becquerel et Deslandres ont signalé que les raies formant les bandes résolubles du carbone (spectre de Swan), de l'azote (pôle positif et pôle négatif), du cyanogène (bande 3883) sont tout à fait insensibles au champ magnétique, alors que dans les mêmes conditions les raies de l'air,

y a, comme dans le cas des triplets, des valeurs privilégiées pour ω' . Ritz, pour des raisons théoriques, est conduit à supposer que m' pour les quadruplets est différent de zéro, et qu'il y a deux composantes supplémentaires plus faibles qui ont échappé aux observations : on pourrait les rechercher avec des poses prolongées.

1. Il faut faire une restriction : il conviendrait plutôt de dire les décompositions *symétriques*. Les cas où les raies deviennent dissymétriques sous l'action du champ n'ont pas été encore l'objet d'un assez grand nombre de mesures pour qu'on puisse actuellement voir si des formules analogues conviendraient encore.

2. H. BECQUEREL et DESLANDRES, *C. R.*, **126** (1898) 997 et **127** (1898) 18.

3. REESE, *Astrophys. Journ.*, **12** (1900) 132.

1. W. RITZ, *Magnetische Atomfelder und Serienspectra. Ann. d. Phys.*, **25** (1908) 660.

2. Le cas des quadruplets est embrassé par ces formules si l'on donne à m' la valeur unique 0. On pourrait chercher s'il

par exemple, étaient nettement divisées¹. Ces résultats ont été confirmés depuis (recherches de Purvis sur le spectre de l'azote).

D'autres bandes, au contraire, ont été trouvées par Dufour² sensibles au champ magnétique; celles que je prendrai ici comme exemples, parce que leurs changements magnétiques ont pu être mesurés avec quelque précision, sont celles des composés des halogènes avec les métaux alcalino-terreux: ces bandes sont dues à la *molécule* elle-même de ces composés, comme Mitscherlich l'avait montré, il y a longtemps, par des raisons tout à fait convaincantes.

Les figures 28 et 29 représentent les changements observés normalement au champ par les arêtes de ces bandes, les valeurs des écarts étant celles que Dufour³ a mesurées récemment. Aucune de ces arêtes ne donne de composante occupant la place de la raie primitive: dans les cas représentés figure 28 on a des quadruplets; l'effet Zeeman longitudinal a alors le sens habituel (effet négatif). Dans les cas correspondant à la figure 29 on a des doublets égaux pour les deux sortes de vibrations; l'effet longitudinal est alors positif⁴.

Comme l'a fait remarquer Dufour, l'écart correspondant est égal à l'écart normal, aux erreurs des mesures près. On peut ajouter que pour les quadruplets tels que celui représenté figure 28, la *moyenne* des écarts des deux sortes de doublets (vibrations parallèles et perpendiculaires aux lignes de force) a encore, d'après les nombres donnés par Dufour, à peu près cette même valeur. Au moins dans le cas de ces bandes, il y a donc, même pour ces spectres de mo-

lécules, des relations simples avec la valeur normale.

Conclusions. — L'ensemble des résultats relatifs à ces changements magnétiques des spectres d'émission des corps à l'état gazeux apparaîtra sans doute comme bien compliqué. Deux faits principaux cependant s'en dégagent, et montrent qu'il y aura profit à poursuivre ces mesures sur le phénomène de Zeeman⁵:

En premier lieu, des relations numériques précises existent entre les changements magnétiques de certaines au moins des raies spectrales, et les propriétés des électrons déduites de l'étude des phénomènes cathodiques. La théorie élémentaire de Lorentz, qui avait déjà fait prévoir le fait important de la polarisation des composants magnétiques, indiquait *a priori* l'existence de ces relations. Quel que soit le sort qui est réservé à cette théorie, elle aura eu le grand mérite d'établir une relation entre des phénomènes qui semblent au premier abord tout différents.

En second lieu, les résultats remarquables obtenus pour les raies appartenant à des séries et ceux, encore incomplets, obtenus parfois pour des raies non encore classées, montrent déjà que le phénomène de Zeeman, quand les mesures seront plus nombreuses encore, aidera certainement à débrouiller ce chaos formé par les spectres à raies nombreuses. Cette conclusion est valable, même si on ne réussit pas d'ici longtemps à donner une théorie d'ensemble tout à fait satisfaisante de ces phénomènes. Une théorie complète devrait, d'après ce qu'on a vu, rendre compte à la fois des changements magnétiques des raies, et des lois qui président à leur répartition dans le spectre.

[Manuscrit reçu le 13 janvier 1911.]

1. Ces changements des raies de l'air n'ont pas été mesurés à ma connaissance.

2. DUFOUR, *Le Radium*, 5 (1908) 291. — Je rappelle que Dufour a trouvé également sensibles au champ des bandes du fluorure de silicium, de l'oxyde de fer, et des raies comprises dans le second spectre (molécule non dissociée) de l'hydrogène. Jean Becquerel a observé les changements des bandes 5790 et 6151 de l'Yttrium.

3. DUFOUR, *Ann. de Ch. et Ph.*, 21 (1910) 568.

4. Dans le cas des bandes dont il s'agit l'effet positif ne s'observe pas dans toute sa pureté: les composantes polarisées circulairement dans un sens sont accompagnées de composantes plus faibles, occupant la même place, polarisées en sens inverse. La lumière envoyée par une des composantes du doublet observé suivant les lignes de force n'est donc pas, dans ce cas, polarisée circulairement d'une façon complète: c'est l'analogie des quelques cas rencontrés plus haut où il y avait coïncidence entre deux composantes propageant des vibrations rectilignes à angle droit.

5. Les mesures sur le phénomène de Zeeman ont en outre l'intérêt de permettre un rapprochement entre les changements magnétiques des raies et leurs autres propriétés, telles que leur déplacement par la pression. A ce dernier point de vue il convient de signaler les mesures récentes de King sur le spectre du titane où les deux phénomènes ont été étudiés parallèlement [KING, *Astroph. Journ.*, 30 (1909) 1].

D'autres travaux récents dont je n'ai pu rapporter ici les résultats sont ceux de NAGAOKA [*Proc. Tokyo*, 5 (1910) 272 et 287 et de NAGAOKA et TAKAMINE [id. 278], analysés dans le dernier numéro du *Radium* [8 (1910) 20]. Enfin dans un travail actuellement à l'impression DUFOUR a montré que, au moins dans les champs intenses et uniformes, obtenus avec des pièces polaires sans trous, l'effet Zeeman a bien *exactement* la même valeur dans l'observation longitudinale et dans l'observation transversale.