



Un aperçu des découvertes de Fabry et Perot

Philippe Amram et Yvon Georgelin
Observatoire de Marseille

Lors de l'assemblée générale 1999 à Marseille, Philippe Amram a fait une conférence sur l'histoire de l'interférométrie. Cet exposé avait déjà été présenté. Il nous a confié le compte-rendu en anglais de ce travail commun avec Yvon Georgelin. C'est Jacques Vialle qui a eu la gentillesse de traduire ce texte pour les lecteurs des Cahiers.

Résumé.

Il y a un siècle, Fabry et Perot inventèrent l'interféromètre qui porte leur nom. Avant cela, il avait fallu deux siècles pour en arriver à la naissance de l'instrument.

Actuellement, des centaines de scientifiques de par le monde l'utilisent journalièrement, probablement sans accorder une pensée à ses inventeurs de génie.

Fabry et Perot construisirent l'instrument, en firent la théorie, développèrent des méthodes d'analyse, et surtout l'utilisèrent pour faire des découvertes scientifiques majeures, liant ainsi définitivement cet interféromètre à leurs noms.

Ils s'occupèrent de physique, d'astronomie et de géophysique et contribuèrent fortement à réduire le fossé qui séparait l'astronomie de la physique, contribuant ainsi à donner un statut à une science qui commençait à émerger au début du siècle : l'astrophysique.

Leur oeuvre majeure reste la détermination de la température et de la cinématique des nébuleuses d'Orion, la mesure du décalage vers le rouge d'origine gravitationnelle et une contribution à la métrologie.

D'autres découvertes qui leur sont dues sont moins connues, comme la détermina-

tion de l'altitude et de l'épaisseur des couches d'ozone atmosphérique, la calibration du flux provenant de la Lune, du Soleil, des étoiles et de la Voie lactée; le perfectionnement de la photométrie stellaire hétérochromatique, le développement d'électromètres mesurant des potentiels faibles, l'élaboration d'un atlas des raies spectrales en émission; la vérification directe au laboratoire de l'effet Doppler-Fizeau...

1. Introduction.

En astronomie, on peut utiliser les interféromètres Fabry-Perot chaque fois qu'il faut détecter une émission faible et étalée.

Lorsque le signal est détecté, même s'il est faible, on obtient une information sur les longueurs d'onde qui le composent et on peut ainsi étudier son spectre. C'est un grand plaisir pour nous, utilisateurs quotidiens du Fabry-Perot, de rendre hommage à ses ingénieux inventeurs. Chaque jour, nous restons fascinés par la puissance de cet instrument qui se compose principalement de deux blocs de verre semi-réfléchissants. Nous entreprendrons cette étude selon un double point de vue, mi-scientifique et mi-historique, et avec les yeux de l'astronome.

Entre les premières observations et descriptions d'interférences à ondes multiples et la découverte finale de l'interféromètre, il s'écoula deux siècles. Manifestement, la compréhension du phénomène d'interférences à ondes multiples était intimement liée au progrès de l'électromagnétisme et des techniques de dépôt d'argent en couches minces. Au siècle dernier, des milliers d'articles traitant de la théorie, de la pratique et des applications du Fabry-Perot furent publiés dans le monde dans les domaines de la physique, de l'astronomie, de la métrologie, de la géophysique, de la chimie ou de la biologie. Hernandez (1986) et Vaughan (1989) ont publié deux excellents livres sur la théorie et la mise au point du Fabry-Perot. Cette étude se propose un double objectif : replacer la découverte de l'interféromètre dans son contexte historique et donner des exemples de l'immense travail scientifique accompli par Fabry, Perot et d'autres.

2. Eléments biographiques succincts.

A la mort de Perot et de Fabry, de chaleureux éloges funèbres furent prononcés par Fabry (1926) et par de Broglie (1946), respectivement.

Alfred Perot (1863-1925).

Perot était un peu plus âgé que Fabry. Il naquit à Metz (France) le 4 novembre 1863. Pour l'anecdote, le nom de Perot est transcrit sur son acte de naissance sans aucun accent sur le "e" mais on prononce [Pérot], exactement comme on écrit Clemenceau, prononcé [Clémenceau].

Il fut élève de l'Ecole polytechnique à Paris. Sa thèse de thermodynamique, soutenue à Nancy (France) en 1888 est une vérification expérimentale brillante et rigoureuse de l'équivalence entre la mécanique et la calorimétrie.

En 1888, âgé de 25 ans, un an après s'être marié, il obtint un poste de maître de conférences à l'Université de Marseille, où il enseigna et poursuivit ses recherches pendant 13 ans. En 1894, il fut nommé professeur titulaire. A la même époque, Charles Fabry était un de ses étudiants.

Perot travailla d'abord sur la théorie et les applications industrielles de l'électricité, une science en plein développement au début du XXe siècle. Il développa à des fins pédagogiques des expériences sur les moteurs électriques et les dynamos. Au cours de l'hiver 1900, 37 lignes électriques furent installées pour fournir le courant aux tramways de la ville. Elles perturbaient le réseau téléphonique et Perot résolut le problème en tant qu'ingénieur.

En 1892, Fabry fut le premier à comprendre le lien entre le facteur de réflexion et la visibilité des franges d'interférences. Toutefois, Fabry lui-même déclara que c'est grâce à Perot que l'instrument fut construit.

Dans l'éloge funèbre de Perot, Fabry déclara : " Nos esprits se complétaient, Perot était un expérimentateur génial qui lisait peu et détestait écrire mais son activité réelle (et presque fébrile) se déroulait au laboratoire. "

En 1901, Perot fut nommé à Paris. Premier directeur du Laboratoire d'essai qui venait d'être créé, il consacra une grande partie de son temps à des tâches administratives. Néanmoins, il poursuivit sa carrière scientifique et ses travaux, principalement sur l'électricité, mais aussi en continuant avec Fabry ses mesures interférométriques. A l'Observatoire de Meudon, il travailla principalement à la mesure des raies d'absorption du spectre solaire.

Pendant et après la Première Guerre mondiale, Perot se consacra à l'étude du problème des communications : application au tube à trois électrodes et appareil destiné à mesurer le champ magnétique terrestre.

Perot mourut en 1925, à l'âge de 62 ans.

Charles Fabry (1867-1945).

Charles Fabry naquit à Marseille en juin 1867, dans une famille de scientifiques. Charles Fabry était un cousin direct d'Edmond Rostand. L'année même où Fabry et Perot découvrirent l'interféromètre, Cyrano de Begerac connaissait un énorme succès à Paris. Fabry étudia pendant quelques années dans le laboratoire de Macé de Lépinay (1852-1904) à Marseille et fut professeur de lycée à Pau, Nevers, Bordeaux, Marseille et Paris.

Fabry fut aussi élève à l'Ecole polytechnique trois ans après Perot. En 1892, il soutint en Sorbonne un thèse sur la visibilité et l'orientation des franges d'interférence, alors que Michelson était à Paris.

En 1894, Fabry obtint un poste de maître de conférences, succédant à Perot qui obtenait une chaire de professeur titulaire, puis en 1904 il fut nommé professeur titulaire à l'Université de Marseille où il passa trente années de sa vie, y accomplissant la majeure partie de son travail scientifique.

Pendant la Grande Guerre, Fabry créa des stations radio mobiles.

En 1920, il devint le premier directeur de l'Institut d'Optique de Paris et en 1921, il fut nommé professeur de physique à la Sorbonne (jusqu'à sa retraite en 1937).

A la mort de Perot en 1925, Fabry reprit le poste de ce dernier à l'Ecole Polytechnique. Il consacra alors beaucoup de temps à enseigner et à écrire des livres pour les étudiants. Il était membre de l'Académie des sciences. Il mourut en 1945 à l'âge de 78 ans.

3. Le contexte scientifique à Marseille avant la découverte du Fabry-Perot.

L'Université de Marseille se trouvait rue Sénac de Meilhan (1880-1940), près de la Canebière. En 1886, Macé de Lépinay était le seul professeur de physique à l'Université de Marseille. Il dirigeait le groupe dans lequel Perot et plus tard Fabry et Henri Buisson (1873-1944) accomplirent leurs premiers travaux scientifiques. Macé de Lépinay avait fait la connaissance du docteur en médecine Nicati. Ensemble, ils étudièrent les problèmes liés au daltonisme et à la perception des couleurs.

Ils découvrirent de nouvelles formes de daltonisme affectant la perception du vert et du bleu. Ces travaux validèrent définitivement la théorie trichromique de Young. Macé et Nicati réexaminèrent le phénomène de Purkinje et montrèrent que dans l'obscurité l'oeil humain est plus sensible dans le bleu que dans les autres couleurs. Aussi proposèrent-ils de modifier le vieil adage : "la nuit, tous les chats sont bleus", et non gris !

Macé et Perot étudièrent aussi le phénomène des mirages (1892). Ils firent l'hypothèse que l'indice de l'air varie asymptotiquement avec l'altitude. De plus, Macé et Perot montrèrent qu'un rayon lumineux n'est pas totalement réfléchi par une couche atmosphérique spécifique mais suit une trajectoire parabolique : ainsi, le "point de mirage" n'est pas un point de réflexion.

Ils montrèrent aussi que le faisceau formé par les différents rayons lumineux ne reste pas parallèle au cours de sa propagation.

Macé améliora d'un facteur 10 la précision des mesures de longueurs d'onde, et d'un facteur 1000 celle de la valeur de la masse d'un décimètre cube d'eau en se servant de techniques fondées sur les franges d'interférence.

Ces travaux influencèrent ceux, ultérieurs, de Fabry et de Perot en métrologie. De 1892 à 1940, Macé, Perot, Fabry, Buisson et d'autres collaborateurs publièrent près de 400 articles scientifiques.

4. La découverte de l'interféromètre Fabry-Perot.

On peut admettre que l'invention de l'interféromètre à ondes multiples procède de la convergence de deux développements indépendants.

Premièrement, à partir du XVIII^e siècle, la production en nombre de plus en plus important de miroirs, aboutissant finalement à la réalisation de films d'argent semi-transparents (point qui ne sera pas développé ici, Foucault, 1858).

Deuxièmement, on observait depuis deux siècles des phénomènes d'interférence à ondes multiples (et même on les calculait), mais avant Fabry, on ne comprenait pas une caractéristique importante et qui leur est propre : le rétrécissement des franges (fringe sharpening).

Duffieux (1969) et P. Connes (1986) ont étudié de manière très rigoureuse et exhaustive l'histoire des interférences à ondes multiples jusqu'à la découverte de l'interféromètre. On observait depuis l'Antiquité des phénomènes colorés sur des bulles de savon. Lorsqu'on fait varier la taille des bulles, les couleurs réfléchies changent.

Bien avant Isaac Newton (1643-1727), Robert Hooke (1635-1703) avait entrepris des travaux préliminaires sur la gravité et sur les interférences à ondes multiples. Hooke et Newton observèrent des franges entre deux lentilles mais ils ne pouvaient pas les interpréter en terme d'optique ondulatoire. Il est curieux que la notion de périodicité, décrite plus tard par une théorie ondulatoire, fut en fait due à Newton avec sa théorie des accès (fits) alors que Huygens n'y prêta aucune attention. En termes modernes, on peut interpréter les accès de Newton comme une combinaison de la phase et de la période de l'onde. Newton découvrit l'achromatisation (qui a lieu lors de la production de franges de n'importe quelle couleur autres que noir ou blanc).

Thomas Young (1773-1829) observa des franges d'interférence avec sa fameuse expérience des deux trous.

Augustin Fresnel (1788-1827) élabora une théorie unique rendant compte à la fois des interférences, de la diffraction et de la polarisation.

Léon Foucault (1819-1868) et Armand Fizeau (1819-1896) observèrent des interférences produites par des couches minces.

William Herschel (1788-1822) observa les interférences produites dans une mince couche d'air entre deux lames de verre.

Les premiers calculs mathématiques d'interférences à ondes multiples sont attribués à Poisson et à Airy. Simeon-Denis Poisson (1781-1840) découvrit que dans une couche mince la lumière se divise en un nombre indéfini de réflexions et de réflexions et que les figures d'interférences sont produites par l'ensemble des rayons. Il détermina les intensités maximum de ces figures. George Airy (1801-1892) donna une expression complète de l'intensité de la lumière transmise. Malheureusement, il ne prit jamais en considération la forme particulière de la fonction (Airy se référait à la théorie de Fresnel). Il ne fit aucun rapprochement entre la forme et la sélectivité de la fonction.

A Bordeaux, Raymond Boulouch (1861-1937) enseignait dans le même lycée que Fabry, juste avant que ce dernier soutienne sa thèse. Il est difficile de savoir exactement dans quelle

mesure les travaux de Boulouch influencèrent ceux de Fabry et réciproquement.

Il semble difficile de penser qu'à Bordeaux ils n'eurent entre eux aucun échange de caractère scientifique. Le problème est de savoir quel fut le contenu exact de ces discussions. Boulouch publia ses observations en ondes multiples cinq mois après que Fabry eut quitté Bordeaux. A en juger par les excellentes relations qu'il eurent par la suite, il semble difficile de croire que quelque chose qui n'ait pas été conforme à l'éthique scientifique ait pu se passer entre les deux hommes (Boulouch dédia sa thèse à Fabry en 1923).

Boulouch fut le premier à observer des franges d'ondes multiples à travers un verre semi-argenté mais il ne décrivit pas la finesse des franges (courbe d'Airy). Ses observations restaient vagues, ressemblaient à des expériences virtuelles, sans mesures, et ne concernaient pas vraiment les interférences à ondes multiples.

Dans sa thèse, Fabry fut le premier à comprendre la relation entre la finesse des franges (le rapport de contraste) et le pouvoir réfléchissant élevé des lames argentées.

L'invention de l'interféromètre eut lieu lorsque Fabry et Perot essayèrent de résoudre le problème des décharges électriques entre deux surfaces séparées d'un micromètre ou moins. Fabry était convaincu que seule des méthodes interférométriques pourraient résoudre le problème. Fabry et Perot observèrent les positions des franges à l'infini et les spectres cannelés, comprirent la raison de la finesse des franges et la calculèrent (en se référant à la fonction d'Airy). Ils mesurèrent le pouvoir séparateur de l'instrument, découvrirent la superposition des franges et les techniques de mise en coïncidence; ils perfectionnèrent le réglage du parallélisme des interfaces et construisirent un bloc de verre étalon.

Ils inventèrent même le premier interféromètre Fabry-Perot à balayage (une poche en caoutchouc reliée à un entonnoir; en faisant varier la hauteur de l'entonnoir, de petites flexions agissant sur les pinces qui maintenaient l'ensemble déplaçaient légèrement une des deux plaques).

Un an après la découverte de Fabry et de Perot, le même phénomène fut découvert et expliqué pour les longueurs d'onde du domaine hertzien.

5. Aperçu des découvertes de Fabry et de Perot.

Il est évidemment impossible de passer en revue l'ensemble des réalisations dues à Fabry, à Perot et à leurs nombreux collaborateurs. Nous ne pouvons avoir qu'une vue d'ensemble de leurs travaux, les classer par domaines et en donner quelques exemples significatifs. On trouvera une bibliographie plus précise dans Georgelin et Amram (1995) et dans Georgelin et Tachoire (1999, en français), mais les publications de Fabry les plus importantes se trouvent dans la compilation qu'il fit de ses articles (Fabry, 1938).

Les quatre domaines principaux dans lesquels ils travaillèrent furent la métrologie, la spectroscopie de laboratoire, la photométrie et la spectrométrie astrophysiques et la géophysique.

En métrologie, ils développèrent des méthodes de mesures d'épaisseur et des méthodes de calibration du mètre étalon, mesurèrent la masse d'un décimètre cube d'eau, établirent des équivalences entre les unités de longueur et les grandeurs électriques; ils publièrent un atlas de raies d'émission, mesurèrent des structures spectrales fines, définirent des unités internationales de longueurs d'onde, étudièrent la théorie cinétique des gaz et le spectre d'étincelle.

En astrophysique, ils étudièrent la physique solaire : intensité bolométrique du rayonnement, intensité des raies d'émission, de la couronne solaire dans le visible et dans l'ultra-violet, la température et la pression, la rotation différentielle, la photométrie hétérochromatique et le décalage vers le rouge d'origine gravitationnelle; ils mesurèrent la luminosité des étoiles; ils déterminèrent la brillance de la Voie lactée; ils déduisirent la rotation, la température des nébuleuses d'Orion et la présence de nébulium. Ils mesurèrent la dimension des météorites et celle des atmosphères planétaires lors d'occultations d'étoiles. Ils étudièrent la diffusion de la lumière par les gaz et appliquèrent

leurs travaux à des mesures de densité des queues cométaires, de la luminosité du ciel nocturne, de la lumière zodiacale et de la couronne solaire.

En Géophysique, ils étudièrent les propriétés de la couche d'ozone.

5.1. Métrologie

La découverte de l'interféromètre est liée à des mesures de longueur d'onde (couches d'air minces et épaisses). Ces mesures de haute précision furent en outre appliquées à une meilleure définition des unités du système métrique (mètre, kg, ohm) et à les relier entre elles. Des électromètres furent aussi conçus afin de mesurer des potentiels faibles. Ces électromètres donnaient une mesure absolue : une force électrique contrôlée par l'observation des franges était mise en relation avec une force mécanique. On trouvera une étude des travaux de Fabry en métrologie dans Bouchareine (1986).

5.1.1. Phénomènes d'interférences.

La théorie de la visibilité et de l'orientation des franges fut développée par Fabry dans sa thèse; le rétrécissement des franges et l'acuité de la résonance correspondante furent les découvertes qui permirent la naissance de l'interféromètre. La technique de la superposition des franges et la méthode des coïncidences furent mises au point : le décalage de longueur d'onde créé par l'effet de phase lors de la réflexion fut expliqué et le premier interféromètre à balayage fut inventé.

5.1.2. La "longueur" du mètre-étalon en invar.

Le système métrique décimal naquit sous la Révolution française, avec pour but la création d'un système universel. L'esprit de grands savants tels que Borda, Lagrange, Laplace, Condorcet et Monge était toujours vivace au début du 20^e siècle. Bien entendu, à cette époque, le laser n'existait pas encore, aussi la cohérence des sources lumineuses dans le domaine temporel restait le principal problème à résoudre lorsque la distance à mesurer était trop grande.

Pour mesurer la valeur exacte d'un mètre, il était hors de question de déplacer les lames de l'interféromètre de 0 à 1 mètre en comptant les 1 553 164, 13 franges. Cela est en fait impossible à cause du recouvrement des franges, même avec la raie très fine du cadmium à 643,8 nm. On eut recours à cinq étalons pour produire des franges superposées en lumière blanche (les épaisseurs des cinq étalons étaient de 62,5 mm, 125 mm, 250 mm, 500 mm et 1 mètre). On mesura l'épaisseur d'un étalon donné sans déplacer les lames en utilisant les méthodes de coïncidence et de superposition des franges. Ensuite, il fallut appliquer ces mesures aux quatre autres étalons. Ces mesures furent menées à Paris, au Laboratoire d'essai dont Perot était le directeur. Benoît, comme il l'avait déjà fait pour Michelson 20 ans auparavant, aidait Fabry et Perot. La vibration du sol parisien limitait la précision des mesures. L'erreur relative sur la mesure de la raie du cadmium était de 10^{-7} . Ils trouvèrent une valeur de la longueur d'onde de la raie du cadmium de 643, 846 960 nm au lieu de la valeur 643, 847 220 nm trouvée par Michelson. Leurs résultats confirmèrent ceux de Michelson mais ils étaient cinq fois plus précis.

Ceci conduisit Fabry, Perot et Benoît à proposer une nouvelle définition du mètre, 20 ans après l'expérience historique de Michelson : la longueur de l'étalon valait 1 553 164, 13 fois la longueur d'onde de la raie du cadmium à 644 nm.

5.1.3. Première valeur exacte de la masse d'un décimètre cube d'eau.

Le fondateur du système métrique avait choisi comme unité de masse la masse d'un décimètre cube d'eau à 4°C. La masse d'un dm³ d'eau était encore mal connue, avec une précision de un millième. Perot, Fabry et Macé de Lépinay mesurèrent cette masse en immergeant un cube de quartz dans de l'eau à 4°C. Le problème, néanmoins, était de mesurer avec précision les dimensions exactes d'un dm³ de quartz. Ils réussirent à le faire grâce à leur interféromètre et portèrent la précision de leur mesure à 1 millionième. Pour atteindre une telle précision, ils mesurèrent la dimension d'un cube de quartz

de 40 mm. Ils firent la cartographie de l'épaisseur du cube avec une précision meilleure que un micromètre; ils obtinrent ainsi une représentation en deux dimensions avec des courbes d'égales épaisseurs séparées par un intervalle de 0,1 micromètres. Ils trouvèrent que la masse d'un décimètre cube d'eau à 4°C était inférieure de 21,4 mg à la masse du kilogramme étalon. Des mesures plus récentes établissent cette différence à 27 mg au lieu de 21,4 en utilisant une sphère et non plus un cube, une sphère étant plus facile à réaliser qu'un cube!

Une fois la masse spécifique de l'eau mieux connue, ils déduisirent la masse spécifique du mercure et en outre déterminèrent l'unité électrique de résistance (en ohm) en faisant passer un courant électrique dans une colonne de mercure.

5.2. Spectroscopie de laboratoire

A cause de son contraste et de son pouvoir de résolution élevé, l'interféromètre Fabry-Perot est parfaitement adapté aux mesures spectroscopiques.

Les études au laboratoire et les études dans les domaines terrestres, solaires et astronomiques ont toujours été intimement liées. La compacité de l'instrument et sa facilité d'emploi, comparée à l'interféromètre de Michelson par exemple, autorisent différents champs d'application. Les auteurs eurent pour ambition de relier la physique du laboratoire à l'astrophysique et la géophysique.

5.2.1. Standards spectroscopiques.

Fraunhofer (1787-1826) découvrit les raies d'absorption du Soleil (1814) et Fizeau les raies d'émission du sodium (1864). Michelson (1852-1931) et Rowland (1841-1901) mesurèrent pour la première fois les longueurs d'onde dans les spectres d'arc métalliques. Les valeurs données par Michelson et par Rowland, présentaient une différence connue d'environ 1/30 000 à cause d'une erreur commise par Rowland dans la détermination, à l'aide d'un réseau, de la valeur absolue, fondamentale, de la longueur d'onde de la raie du sodium. Fabry et Perot tentè-

rent d'abord une comparaison directe entre le spectre solaire et des sources standard de laboratoire en utilisant un réseau concave mais le problème était inextricable! Plus tard, ils le résolurent en appliquant des méthodes interférentielles aux raies d'absorption solaires et aux sources de laboratoire. Ils trouvèrent une faible erreur systématique de 0,004 nm dans les tables de Rowland. La précision de leurs mesures est en moyenne de 5×10^{-8} . Pour les astronomes, cela équivaut à un décalage vers le rouge de 15 mètres par seconde.

De plus, ils donnèrent une explication aux différences aléatoires existant entre les raies solaires et les raies d'un spectre d'arc, différences dues aux particularités de ce type de spectre. Buisson et Fabry publièrent un atlas de spectres métalliques obtenus avec un réseau, un outil extrêmement précieux pour la spectroscopie. Au cours de ce travail, ils remarquèrent que cet arc est produit par un champ électrique de forte valeur plutôt que par une température élevée, comme on l'avait cru jusqu'alors.

5.2.2. Largeur des raies spectrales.

Fabry et Buisson (1912) mesurèrent la largeur des raies des gaz rares monoatomiques (He, Ne, Kr) en utilisant la visibilité des franges avec un interféromètre dont la résolution était de 10^7 .

Ils observèrent que la largeur des raies décroît avec la température. A la température de l'air liquide, la largeur de la raie atteint 6×10^{-4} nm. D'après la théorie cinétique des gaz, connaissant la masse atomique du gaz analysé et la largeur de la raie étudiée, ils montrèrent que la température à l'intérieur d'un tube de Geissler est semblable à la température externe.

5.2.3. Première vérification directe au laboratoire de l'effet Doppler-Fizeau.

Théoriquement prévu par Fizeau en 1848, l'effet Doppler appliqué aux champs électromagnétiques n'avait jamais été observé au laboratoire.

En 1914, Fabry et Buisson fixèrent un morceau de papier sur le bord d'une centrifugeuse tournant à 200 tours par seconde et éclairèrent ce papier avec une lampe à mercure. Le montage don-

nait une vitesse de rotation de ± 100 m/s, ce qui entraînait un effet Doppler-Fizeau mesurable de 1/5 de frange avec un interféromètre de 65 mm d'écartement. Les mesures sont en accord à mieux que 2% avec la valeur calculée. Perot (1924) monta douze prismes sur la centrifugeuse. Ainsi, la lumière traversait les prismes à des distances différentes de la base. On avait alors affaire à un milieu dont l'indice variait rapidement avec le temps. L'accord des mesures avec la théorie était meilleur que 10^{-8} .

5.3. Photométrie astrophysique et spectroscopie.

Courtés (1986) a fait une revue des applications de l'interféromètre à l'astrophysique.

5.3.1. Température du Soleil.

Abbot (1913) mesura pour la première fois la température de corps noir du Soleil; il trouva une température de 5740 K. Toutefois, cette mesure ne tenait pas compte de la lumière absorbée par la photosphère.

En 1922, Fabry refit les mesures avec un spectromètre à haute résolution pour évaluer cette absorption et trouva une valeur de 6000 K. Cette valeur fut confirmée par Plaskett l'année suivante, la mesure moderne donnant 5770 K.

5.3.2. "Plages de Fabry".

Depuis Bouguer (1698-1758), la photométrie avait fait peu de progrès. Fabry fit plusieurs découvertes, notamment en photométrie hétérochromatique.

Pour comparer les flux émis à différentes longueurs d'onde par des sources différentes, Fabry développa en 1910 une nouvelle méthode, connue aujourd'hui sous le nom de "plages de Fabry": au lieu de mesurer le flux d'une source dans le plan focal, Fabry mesurait ce flux dans un plan pupillaire. A cause de l'inversion champ-pupille, le plan du film photographique est une pupille uniformément illuminée et non plus un champ illuminé localement.

Cette méthode permet une mesure beaucoup plus précise du flux global. La luminosité des étoiles était rattachée à des standards photométriques.

5.3.3. Luminosité des étoiles.

Appliquant la technique des "plages de Fabry", Fabry compara

i) la luminosité de l'étoile Véga à celle d'une source de 1 candela située à une distance de 780 m. (1 candela = $1 / 683 \text{ W sr}^{-1}$ à 5401012 Hz);

ii) la luminosité de la Lune à celle d'une source de 41.016 candelas;

iii) la luminosité du Soleil à celle d'une source de 1027 candelas (ou 1 mm^2 de la surface solaire à une source de 1800 candelas);

iv) la luminosité de l'étoile brillante Sirius à 26 fois la luminosité du Soleil;

v) la luminosité de la couronne solaire à 75% de la luminosité de la Pleine Lune;

vi) la luminosité du plan galactique à 3 ~ 4 fois celle du pôle galactique. Il estima que l'oeil humain est assez sensible pour détecter une source de 1 candela située à 27 km. A l'oeil nu, Fabry observa une étoile de magnitude 8,2 à l'aide d'un tube muni d'un diaphragme afin de bloquer la luminosité du ciel nocturne qui limite la magnitude à 6, même lors de la Nouvelle Lune.

5.3.4. Décalage gravitationnel vers le rouge des raies solaires.

La théorie générale de la relativité d'Einstein (1915) avait prédit deux phénomènes résultant de l'action du Soleil sur la propagation d'un rayon lumineux à la distance 1 rayon solaire.

Premièrement, une déviation de sa trajectoire dans l'espace de l'ordre de 1,75 secondes d'arc pour un observateur terrestre. Eddington observa effectivement une déviation de 1,98 secondes d'arc lors de l'éclipse totale de Soleil du 29 mai 1919.

Deuxièmement, un décalage vers le rouge des raies solaires. La fréquence ν_0 d'un photon en dehors d'un champ gravitationnel est, au premier ordre, décalée vers une fréquence

$\nu \sim (1 - \alpha / r) \nu_0$ en présence d'un champ gravitationnel, où $\alpha = GM/c^2$ avec M la masse du Soleil, c la vitesse de la

lumière, G la constante de gravitation et r le rayon du Soleil.

La théorie d'Einstein prédit pour un photon observé à proximité de la surface solaire une déviation relative de $2,12 \times 10^{-6}$ à 550 nm par rapport à un photon observé depuis la Terre.

L'interféromètre utilisé à cette époque permettait de mesurer des décalages relatifs beaucoup plus faibles que $3,0 \times 10^{-8}$. Néanmoins, la mesure est compliquée par le fait que trois processus physiques sont en concurrence :

1) l'élargissement Doppler-Fizeau causé par la rotation de la Terre et par celle du Soleil;

2) un effet dû à la pression, et bien entendu :

3) les effets gravitationnels.

La difficulté consistait à faire la part de chaque effet. Perot résolut ce problème en trois étapes : premièrement, il observa (et c'était alors un effet jusque là inconnu) que la vitesse de la rotation du Soleil sur lui-même est fonction de la distance au centre. Cela implique des mouvements de convection radiaux qui compliquent encore l'effet d'élargissement Doppler.

Deuxièmement, en observant les raies Mg, Fe et CN, il remarqua que celles-ci sont plus fines dans le vide qu'à la pression atmosphérique. Il remarqua également que leurs longueurs d'onde sont plus rouges aux faibles pressions qu'à la pression atmosphérique, de même que leurs longueurs d'onde sont plus rouges dans l'atmosphère solaire que dans l'atmosphère terrestre. En outre, il conclut que la pression des couches externes du Soleil est nulle.

Troisièmement, prenant en considération ces différences de pression, il compara les longueurs d'onde dans le Soleil et sur Terre. Le décalage mesuré était compatible avec la valeur annoncée par Einstein.

Illustrons la méthode par un exemple pour montrer combien celle-ci était simple et astucieuse : Soit λ et Λ deux longueurs d'onde différentes et $\delta\lambda$ et $\delta\Lambda$ les variations respectives de ces deux longueurs d'onde.

Dans les effets Doppler et gravitationnels, le rapport entre deux lon-

gueurs d'onde différentes reste le même lorsqu'on augmente légèrement les longueurs d'onde. Il écrivit donc :

$$\frac{\lambda + \delta\lambda}{\Lambda + \delta\Lambda} = \frac{\lambda}{\Lambda} \times \frac{1 + \frac{\delta\lambda}{\lambda}}{1 + \frac{\delta\Lambda}{\Lambda}} = \frac{\lambda}{\Lambda} \Leftrightarrow \frac{\delta\lambda}{\lambda} = \frac{\delta\Lambda}{\Lambda}$$

Perot (1911) savait que ceci n'était plus vrai en présence d'effets de pression ; les différentes raies métalliques ne sont pas également décalées lorsque la pression augmente, aussi on devrait écrire que la variation de la longueur d'onde dépend de coefficients mesurables $a(\lambda)$ et $A(\lambda)$.

$$\frac{\delta\lambda}{\lambda} = a(\lambda)\delta p \quad ; \quad \frac{\delta\Lambda}{\Lambda} = A(\lambda)\delta p$$

$$\frac{\lambda + \delta\lambda}{\Lambda + \delta\Lambda} \approx \left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right) \frac{1 + a\delta p}{1 + A\delta p}$$

$$\frac{\delta\left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)}{\frac{\lambda}{\Lambda}} \approx (a - A)\delta p$$

La variation de pression δp était égale à la différence entre la pression atmosphérique et cette dernière moins 60 cm de mercure. En utilisant les raies b_1 , b_2 et b_4 du magnésium, les coefficients a et A furent mesurés.

Pour Mg : $1 = (a - A) \times 108$

Appliquant les fameuses relations fondamentales

$$K\Lambda = 2\epsilon \cos I \text{ et } k\lambda = 2\epsilon \cos i,$$

il obtint :

$$\frac{\Lambda}{\lambda} \approx \frac{K \cos I}{k \cos i} \approx \frac{K}{k} \left(1 - \frac{I^2 - i^2}{2}\right)$$

considérant que

$$dP \approx 0 \Rightarrow K \approx k$$

La pression solaire est donc directement mesurable à partir de la position des anneaux sur les interférogrammes :

$$P_{Soleil} = P_{Atm} - \frac{1}{(a-A)} \left[\frac{I^2 - i'^2}{2} + \frac{I^2 - i^2}{2} \right]$$

De cette manière il est possible d'isoler les effets dus à la pression des effets qui produisent le même décalage pour l'ensemble des raies.

Pour la raie b_2 du magnésium, la théorie d'Einstein prédit un décalage de 0,011 nm; la longueur d'onde mesurée sur Terre à la pression de 1 atmosphère (517,2690 nm) est décalée de 0,0007 nm si la pression est réduite jusqu'au vide.

Donc, la longueur d'onde mesurée sur Terre dans le vide à la pression 0 atmosphère est 517,2683 nm, et la différence entre les longueurs d'onde mesurées sur le Soleil et sur la Terre, pour une pression nulle, et uniquement due à des effets gravitationnels débarrassés de tout effet de pression est de 0,013 nm.

La théorie d'Einstein prédisait un décalage relatif de $2,12 \times 10^{-6}$ que Perot confirma à mieux que 20% en mesurant une valeur de $2,5 \times 10^{-6}$. Ce résultat fut plus tard confirmé pour les raies du fer par Fabry et Buisson en 1921.

5.3.5. La nébuleuse d'Orion.

En 1911, Fabry et Buisson utilisèrent le réflecteur équatorial de 26 cm de l'observatoire de Marseille équipé de leur interféromètre et d'un filtre et ils observèrent visuellement les nébuleuses d'Orion. En 1914, Fabry, Buisson et Bourget installèrent leur instrument au foyer principal du télescope de Foucault. Ce télescope célèbre, installé à l'observatoire de Marseille en 1862 et dont le diamètre est de 80 cm, fut le premier à être équipé avec un miroir mince réglable. Leur instrument était composé de :

- i) leur interféromètre consistant en deux lames argentées de 4 cm séparées de 0,1 et 3 mm et placées entre un collimateur et une chambre photographique ;
- ii) un filtre d'absorption pour isoler la raie d'émission adéquate ;
- iii) une plaque photographique.

Ils firent 14 poses de 1 à 2 heures, observant les raies $H_\gamma + H_\beta$, et celles du nébulium [OIII] à 500,7 nm et du nébulium [OII] à 372,8 nm. Ces observations historiques les amenèrent à formuler plusieurs conclusions :

Cinématique de la nébuleuse :

Ils conclurent que les nébuleuses d'Orion présentent :

- i) une vitesse de fuite relativement au Soleil de 15,8 km s⁻¹;
- ii) une vitesse de dispersion de l'ordre de 10 km s⁻¹;
- iii) un grand axe orienté SE-NW autour duquel se fait la rotation de l'ensemble.

Température de la nébuleuse :

A partir de considérations théoriques. Arrhenius pensait que la température des régions HII se situait autour 50 K. En déterminant l'ordre pour lequel les anneaux d'interférences deviennent invisibles (aux environs de 10 000), ils mesurèrent la largeur des raies et conclurent à une température du gaz inférieure à 15 000 K. La valeur moderne est de 10 000 K.

Nature du nébulium :

Ils tentèrent d'identifier la nature du nébulium et la masse atomique de cet élément inconnu. A cet effet, ils mesurèrent avec une grande précision les longueurs d'onde des raies du nébulium et trouvèrent 372, 6100 ± 0,0001 nm pour la première et 372,8838 ± 0,02 nm pour la seconde, améliorant ainsi considérablement les mesures de Wright (372,62 ± 0,02 et 372,88 ± 0,02 nm).

La précision de leurs mesures les conduisit à un paradoxe : ces raies n'appartenaient à aucune des raies connues de l'oxygène donc elles ne pouvaient être la signature de l'oxygène !

En utilisant les raies violettes et vertes du nébulium, ils déduisirent une masse entre 1 et 3 fois la masse atomique de l'hydrogène. Bowen donna en 1927 une interprétation correcte des raies du nébulium : celles-ci n'étaient aucunement dues à un élément inconnu sur Terre mais étaient produites par l'oxygène et l'azote dans un milieu à

très faible pression permettant ainsi l'observation des raies interdites.

Fabry, Buisson et Bourget conclurent à "la simplicité de l'appareillage utilisé et la facilité avec laquelle il peut être monté sur le télescope ... le dispositif interférométrique n'entraîne pas une grande perte de lumière et autorise l'étude d'objets de très faible intensité lumineuse intrinsèque...".

Ils ne pouvaient pas savoir à quel point leurs prédictions étaient justes puisque 86 ans plus tard, cette technique est toujours utilisée partout dans le monde à commencer par les auteurs de cet article !

5.4. Géophysique : la découverte de la couche d'ozone.

Dans l'environnement des machines électrostatiques, on connaît bien l'odeur caractéristique qui s'en dégage : celle de l'ozone.

En 1840, Schoenben (1799-1868), un chimiste suisse, découvrit que ces machines émettaient un gaz. Il proposa de le nommer Ozone, de la racine grecque ozein, signifiant "qui produit une odeur" !

Cornu (1879) découvrit la coupure du rayonnement ultra-violet à 300 nm due à l'absorption par l'atmosphère.

Hartley (1881) découvrit O₃ au laboratoire et fit l'hypothèse que ce gaz était responsable de l'absorption UV et Fabry et Buisson (1913) observèrent cette coupure. Ils utilisèrent des plaques photographiques et mesurèrent le spectre UV solaire à des longueurs d'onde inférieures à 290 nm. L'ozone absorbait l'UV entre 232 et 293 nm. L'atmosphère absorbe le rayonnement UV à 99,999% et dans le domaine optique O₃ est plus opaque aux UV que les métaux.

En tenant compte de la diffusion Rayleigh, Fabry et Buisson (1921) mesurèrent la distribution de l'énergie dans le domaine UV du spectre solaire ($\lambda < 315$ nm), comparée à l'absorption produite par l'ozone sur le rayonnement émis par une lampe de laboratoire au mercure.

Fabry et Buisson conclurent que, ramenée à la pression atmosphérique,

l'absorption atmosphérique est équivalente à une couche d'ozone d'environ 3 mm d'épaisseur.

Ils mesurèrent le très fort pouvoir absorbant de l'UV par l'ozone dans les conditions du laboratoire : 50% pour une couche de 0,025 mm d'épaisseur. Pour une épaisseur de 3 mm, l'intensité d'un rayonnement serait réduite dans une proportion de 1036.

Comme ils connaissaient la dilution extrême ($2,5 \times 10^{-8}$) de l'ozone de l'air au niveau du sol, ils déduisirent la présence d'ozone en plus forte concentration dans les couches supérieures de l'atmosphère.

Dans l'atmosphère, trois corps peuvent absorber l'UV : l'eau, l'air et l'ozone. La difficulté était de séparer la contribution de chaque composant.

Une fois déterminée l'épaisseur réduite de l'ozone, Fabry et Buisson trouvèrent l'altitude de la couche d'ozone par une méthode très astucieuse : à cause de la courbure de la Terre, la loi de Bouguer varie (de 30% pour $h = 5^\circ$) avec l'altitude de la couche atmosphérique considérée. Que la couche d'ozone se trouve à basse altitude (entre 0 et 5 km par exemple) ou à une altitude élevée (entre 40 et 50 km par exemple), la profondeur optique de cette couche reste la même si on observe au zénith. Au contraire, si on observe près de l'horizon, à cause de la courbure de la Terre, la profondeur optique de la couche d'ozone est 30% plus courte, ce qui implique une absorption différente. Ils déterminèrent une altitude de 40 km, confirmée de nos jours par des mesures satellitaires.

Fabry et Perot signalèrent une variation saisonnière, annuelle et selon l'azimut et soulignèrent le rôle joué par cette couche dans l'absorption quasi-totale de l'UV (1/70 000 seulement transmis).

Vers la fin de sa carrière, Fabry consacra son temps à l'étude de l'ozone atmosphérique. Il organisa même un colloque sur le sujet qui eut lieu à Paris en 1929. Fabry fut donc un physicien, un astronome, un métrologue mais aussi un géophysicien.

6. Conclusions.

Hooke, Newton, Herschel, Young, Fresnel, Poisson, Airy, Fizeau, Foucault, Boullouch contribuèrent à la découverte des interférences à ondes multiples. Toutefois, sans Fabry et sans Perot, il aurait fallu beaucoup plus de temps encore pour aboutir à des conclusions aussi importantes.

Fabry et Perot inventèrent, construisirent, expérimentèrent et perfectionnèrent leurs interféromètres et ils les utilisèrent abondamment en métrologie, en photométrie et en spectroscopie. Il est impressionnant de constater à quel point ils furent des pionniers dans de nombreux domaines d'application. Ils firent d'importantes découvertes scientifiques dans divers domaines et/ou furent des pionniers en physique, en astrophysique et en géophysique.

Les carrières scientifiques de Fabry et de Perot contribuèrent fortement à réduire le fossé qui séparait la physique et l'astronomie, à fonder l'astrophysique au début du siècle, à développer et à appliquer à l'étude du ciel les méthodes de spectroscopie du laboratoire. Ces relations réciproques entre la physique et l'astronomie donnèrent naissance à l'astrophysique.

Sauf le développement du laser, il est difficile de trouver quoi que ce soit en rapport avec l'interféromètre qu'ils n'aient découvert ou au moins envisagé.

leurs successeurs".

[4] de Broglie, L. -1946, ApJ 64, 209 - "La vie et l'œuvre de Charles Fabry (éloge funébre)".

[5] Duffieux, P.M. -1969, Applied Optics, 8 - "Origine des appareils interférentiels à ondes multiples".

[6] Fabry, C. 1926 - "La vie et l'œuvre d'Alfred Perot".

[7] Fabry, C. Œuvres choisies, à l'occasion de son Jubilé scientifique, 1938, Gauthier-Villars, Paris.

[8] Foucault, L. Annales de l'observatoire impérial de Paris, 1858, 5, p. 232

[9] Georgelin, Y.P., Tachoire, H. "La naissance de la spectroscopie interférentielle, Macé, Perot, Fabry, Buisson", in Marseille 2600 ans de découvertes scientifiques tome III, Publications de l'Université de Provence, 1999 sous presse.

[10] Georgelin, Y.P., Amram, P. IAU Symposium, 1995, p. 400 - A review of Fabry and Perot's discoveries.

[11] Hernandez, G. - "Fabry-Perot interferometers" - Cambridge Studies in Modern Optics (1986).

[12] Vaughan, J.M. - "The Fabry-Perot Interferometer History, Theory, Practice and Applications". Ed. Adam Hilger, 1989.

Références :

[1] Bouchareine, P.-J. Optics, 1986, 17, 1, 35-42 - "Les travaux de métrologie de C. Fabry".

[2] Connes, P.-J. Optics, 17, 1, 5-28 - "The history of multiple-beam interference".

[3] Courtés, G. Optics, 17, 1, 29 - "Applications à l'astrophysique d'observations des méthodes interférentielles à ondes multiples de Fabry-Perot par Fabry, ses collaborateurs et