SUR LES

MODIFICATIONS QU'ÉPROUVE LA LUMIÈRE

PAR SUITE

DU MOUVEMENT DE LA SOURCE LUMINEUSE ET DU MOUVEMENT DE L'OBSERVATEUR

(PREMIÈRE PARTIE);

PAR M. MASCART,

PROFESSEUR SUPPLÉANT AU COLLÉGE DE FRANCE.

I. — *Introduction.*

La question qui fait l'objet de ce travail a été traitée par la plupart des savants qui se sont préoccupés des progrès de l'optique, soit au point de vue de la théorie de la lumière, soit au point de vue des observations astronomiques. Je n'ai pas la prétention de l'avoir résolue d'une manière définitive, mais je rapporterai toutes les expériences que j'ai tentées, ne serait-ce que pour épargner une grande perte de temps à ceux qui voudraient entrer dans la même voie. Le problème se subdivise naturellement en plusieurs autres plus simples, dans lesquels on considérera le mouvement de la source lumineuse seule, l'observateur étant immobile, ou bien le déplacement de l'observateur en présence d'une source fixe, ou enfin la combinaison de deux mouvements simultanés. Je vais chercher dans un court historique, non pas à passer en revue tous les travaux qui ont été publiés à ce sujet, mais seulement à mettre en relief ceux qui se rattachent d'une manière plus directe à la théorie et à discuter les expériences les plus importantes.

Le phénomène de l'aberration des étoiles, le premier dont on ait cherché à rendre compte, s'explique sans difficulté dans les deux systèmes de l'émission et des ondulations, au moins tant qu'on suppose que les observations ont lieu dans le vide ou dans l'air, la lumière n'ayant pas à traverser de milieux pondérables dans lesquels la vitesse de propagation éprouverait un changement notable. L'explication devient au contraire très-délicate si la lumière qui nous vient des étoiles subit une réfraction, comme cela a lieu dans les objectifs de lunettes; les observations astronomiques apprennent que la direction apparente d'un astre est la même quand on la détermine avec une lunette à réfraction, ou un télescope à réflexion, ou simplement par la vision directe; c'est là un premier point sur lequel toutes les théories devaient s'accorder. Or, la théorie de l'émission semble indiquer que la déviation apparente imprimée à un rayon de lumière par un prisme réfringent participant au mouvement de translation de la Terre doit être différente suivant que la lumière incidente se propage dans le sens ou en sens contraire du mouvement du prisme (1). Arago a essayé de vérifier cette conséquence en observant des étoiles situées en différents points de l'écliptique et dont la Terre s'éloigne ou se rapproche en vertu de son mouvement de translation, et il est arrivé à cette conséquence que la déviation imprimée par un prisme à la lumière provenant d'une étoile n'éprouve aucune modification quand on passe d'une étoile à une autre. Cette expérience d'Arago est devenue célèbre par les considérations remarquables qu'elle a suggérées à Fresnel, mais je crois qu'elle n'a été décrite nulle part. Arago lui-même en parle d'une manière trop concise (2) dans sa Notice sur Fresnel, sans dire quel était le procédé d'observation. La seule indication que je connaisse à ce sujet est la phrase suivante de M. Fizeau (3) : « En cherchant si la

(1) Il n'y a lieu de considérer dans tout ce qui suit que l'effet produit par le mouvement de translation de la Terre. En effet, d'après les observations de Struve, l'aberration ou le rapport de la vitesse de translation de la Terre à la vitesse de propagation de la lumière est égale à 21″,445, ou environ $\frac{1}{10000}$. La vitesse d'un point de l'équateur due au mouvement de rotation de la Terre n'est pas $\frac{1}{60}$ de la vitesse de translation; l'influence qu'elle peut exercer est donc inférieure à $\frac{1}{60}$ de l'aberration, et par suite absolument négligeable.

(2) *Œuvres complètes d'Arago*, t. I, p. 157.

(3) *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. XIX, p. 211.

déviation produite par un prisme achromatique sur la lumière d'une étoile est différente lorsque la Terre se meut vers cette étoile ou lorsqu'elle s'en éloigne, M. Arago a constamment trouvé que cette déviation est la même dans les deux cas. » Or, la vitesse, relative au prisme, de la lumière qui provient d'une étoile, ne change pas de plus de $\frac{1}{5000}$ dans les cas les plus favorables; l'indice de réfraction et la déviation elle-même ne peuvent varier, quelle que soit la théorie, que de fractions de même ordre, et il paraît bien difficile d'apprécier des changements aussi faibles avec le seul secours d'un prisme achromatisé. Malgré toutes les ressources que donne aujourd'hui l'analyse spectrale, ces changements sont encore à la limite de précision des expériences lorsqu'il s'agit de la lumière des étoiles; je ne crois pas que l'observation d'Arago ait pu être faite dans des conditions assez rigoureuses pour avoir une force démonstrative, et la faveur dont elle a joui dans la science me paraît surtout due à la démonstration qu'en a donnée Fresnel.

Fresnel a fait voir en effet (¹) que l'on peut rendre l'expérience d'Arago, ainsi que le phénomène de l'aberration à travers les milieux réfringents, compatible avec la théorie des ondulations, à l'aide d'une hypothèse particulière sur l'entraînement de l'éther par la matière pondérable. Il avait déjà été conduit, pour expliquer la réfraction, à admettre que la densité de l'éther dans un milieu croît avec l'indice de réfraction, et que la vitesse de propagation de la lumière est en raison inverse de la racine carrée de la densité de l'éther.

Fresnel assimile ainsi l'élasticité de l'éther, qu'il suppose la même dans tous les milieux, à la pression d'un gaz, et applique aux phénomènes lumineux la formule démontrée par Newton pour la propagation des ondes sonores, bien que les vibrations soient dans le premier cas transversales, et dans le second cas parallèles à la direction de la propagation. Il admet ensuite que, lorsqu'un corps est en mouvement, il entraîne avec lui, non pas la totalité de l'éther qu'il contient, mais une partie seulement, l'excès de cet éther sur celui qui existe dans le même volume du milieu ambiant.

A l'aide de ces deux hypothèses, on peut trouver l'expression de la

(¹) *Œuvres de Fresnel*, t. II, p. 627.

vitesse de propagation de la lumière dans un milieu mobile, par le raisonnement suivant, qui équivaut à celui de Fresnel :

Soit Δ la densité de l'éther et V la vitesse de la lumière dans le vide, Δ' et V' les grandeurs analogues pour un corps dont l'indice de réfraction est n. Si ce corps est animé d'un mouvement de translation dont la vitesse est u, la masse d'éther en mouvement dans l'unité de volume est $\Delta' - \Delta$, d'après l'hypothèse de Fresnel; la quantité de mouvement correspondante est $(\Delta' - \Delta)\, u$. La quantité de mouvement serait la même si l'éther total du corps se transportait avec la vitesse u' donnée par l'équation

$$\Delta' u' = (\Delta' - \Delta)\, u,$$

d'où

$$u' = u\left(1 - \frac{\Delta}{\Delta'}\right).$$

Si ce corps est parcouru par des ondes lumineuses qui cheminent dans le sens ou en sens contraire des déplacements du corps, la vitesse de propagation se trouvera augmentée ou diminuée de la vitesse u' de transport de l'éther.

La première hypothèse de Fresnel donne aussi

$$\frac{\Delta}{\Delta'} = \frac{V'^2}{V^2} = \frac{1}{n^2};$$

il en résulte

$$u' = u\left(1 - \frac{1}{n^2}\right). \tag{1}$$

Les raisonnements et les hypothèses sur lesquels est basée cette démonstration ne sont pas à l'abri d'objections, mais la formule parait avoir un grand degré de probabilité.

En s'appuyant sur cette formule, Fresnel a montré que le mouvement de la Terre influe sur la réfraction absolue de la lumière dans un prisme, mais que le changement de déviation est exactement compensé par le phénomène de l'aberration. En d'autres termes :

« La réfraction *apparente* dans un prisme mobile est égale à la réfraction *absolue* dans un prisme fixe. »

Cet énoncé est la traduction de l'expérience d'Arago.

En 1839, M. Babinet a publié dans les *Comptes rendus de l'Académie* *des Sciences* (¹) une expérience sur laquelle j'aurai l'occasion de revenir et qui est décrite dans les termes suivants :

« J'ai constaté que le mouvement de la Terre n'influe en rien sur la vitesse des rayons qui traversent un milieu réfringent entraîné par la terre, ou du moins que deux rayons interférents, qui traversent deux épaisseurs de verre égales entre elles, mais parcourues par les deux rayons dans des sens opposés relativement à la direction de ces rayons, produisent les mêmes franges et à la même place que si la Terre eût été immobile, ce qui est en opposition directe avec une des explications que l'on a données de la fameuse expérience négative de M. Arago, aussi bien qu'avec celle que j'avais donnée moi-même dans le Mémoire lu à l'Institut le 2 novembre 1829. Ce sera une nouvelle condition à remplir pour toutes les théories de la propagation de la lumière dans les milieux réfringents. Dans mon expérience, suivant les théories admises ou proposées, le déplacement de franges eût été de plusieurs largeurs de franges, c'est-à-dire de plusieurs millimètres, tandis que par l'observation il a été complétement nul. »

M. Stokes (²) est revenu à plusieurs reprises sur l'aberration pour montrer que ce phénomène est compatible avec la théorie des ondulations et l'hypothèse de Fresnel sur l'entraînement partiel de l'éther. M. Stokes rend compte de l'expérience négative de M. Babinet à l'aide des principes ordinaires et démontre, par des calculs très-simples, que les lois de la réflexion et celles de la réfraction dans les milieux uniréfringents ne sont dans aucun cas modifiées par le mouvement de la terre. Fresnel n'avait démontré cette propriété que pour un cas particulier de réfraction, mais sa méthode est facile à généraliser; il ajoute d'ailleurs qu' « on peut s'assurer par un calcul très-simple qu'il doit en être de même de la réflexion. »

L'explication de Fresnel semble avoir reçu une confirmation éclatante de l'expérience par laquelle M. Fizeau a démontré en 1851 (³) que la vitesse de propagation de la lumière dans l'eau en mouvement est augmentée ou diminuée suivant que la propagation s'effectue dans

(¹) T. IX, p. 774.
(²) *Philosophical Magazine*, 3ᵉ série, t. XXVII, p. 9; t. XXVIII, p. 76 et *passim*.
(³) *Annales de Chimie et de Physique*, 3ᵉ série, t. LVII, p. 385.

le sens ou en sens contraire du transport de l'eau. En appliquant les raisonnements de Fresnel au calcul du déplacement des franges dans les conditions où l'observation était faite, on trouve 0,92 ou 0,42 de frange, suivant que l'on suppose que l'eau entraîne la totalité de l'éther qu'elle contient ou seulement la fraction indiquée par Fresnel. Or, M. Fizeau a observé un déplacement de 0,46 de frange, et comme on n'a guère de choix qu'entre ces deux hypothèses, on peut considérer les principes de Fresnel comme confirmés par l'expérience. Toutefois, pour être rigoureux, il faut remarquer que l'expérience n'a fait que vérifier que l'entraînement des ondes par les milieux en mouvement est conforme à la formule (1) et que l'on peut substituer aux hypothèses de Fresnel toute autre hypothèse qui conduira finalement soit à la même formule, soit à une autre peu différente. Dans tous les cas, les conséquences que Fresnel a déduites de sa théorie se trouvent confirmées, et il semble en résulter que la réflexion et la réfraction seront impuissantes à mettre en évidence le mouvement de translation de la terre [1].

M. Hoek a fait tout récemment une expérience [2] qui lui paraît démontrer que la formule de Fresnel est exacte à moins de $\frac{1}{60}$ près. L'appareil se compose de deux lunettes identiques à celles que M. Fizeau a employées dans l'expérience qui précède. Entre les deux est disposé, de manière à n'intercepter que la moitié du faisceau lumineux, un tube renfermant une colonne d'eau. Les rayons partis d'une fente traversent une lame transparente, puis l'objectif de la première lunette, vont se réfléchir sur le miroir de la deuxième et reviennent, après s'être réfléchis sur la lame transparente, former une image de la fente. Les deux moitiés du faisceau total ont, comme on le voit aisément,

---

(1) Toutes ces questions sont très-délicates et ont souvent conduit à des interprétations contradictoires. Ainsi M. Huggins (*Annales de Chimie et de Physique*, t. XV, p. 495) a observé que la raie F du spectre de Sirius n'est pas située rigoureusement au même point que la raie correspondante dans les autres spectres d'étoiles ou de sources terrestres, et il a attribué ce déplacement au mouvement *relatif* de Sirius et de la Terre. Je crois que l'interprétation de M. Huggins est exacte, mais il importe de remarquer qu'elle est contraire à la formule de Fresnel et à l'expérience d'Arago, d'après lesquelles le mouvement de la Terre serait sans influence.

(2) *Archives néerlandaises*, t. III, p. 180 (1868).

traversé l'eau en sens contraires; si donc la colonne liquide est parallèle à la direction du mouvement de la Terre, les deux faisceaux pourront avoir éprouvé des retards différents et produire des effets d'interférence que l'on apercevra en examinant avec un spectroscope l'image de la fente produite par le concours des rayons. L'expérience indique que les rayons sont en parfaite concordance, ce qui permet d'établir une relation entre les retards éprouvés par les deux faisceaux, suivant le sens dans lequel ils ont traversé le liquide qui participe au mouvement de la Terre; or la formule de Fresnel satisfait pleinement à cette condition. Je ne rapporte pas les calculs de M. Hoek, parce que l'expérience me paraît devoir être interprétée d'une manière un peu différente, à cause de cette circonstance que l'on opère avec une source terrestre; j'y reviendrai plus tard.

La compensation qui doit se produire dans les expériences précédentes, d'après la théorie de Fresnel, n'a pas lieu nécessairement pour tous les phénomènes d'optique. D'autres effets dépendent de l'indice de réfraction, par exemple la rotation qu'une lame à faces parallèles imprime au plan de polarisation d'un rayon lumineux qui la traverse dans une direction différente de la normale. Si l'indice de réfraction augmente, la rotation du plan de polarisation est modifiée; si le changement de l'indice est dû au déplacement de la lame, il ne paraît pas qu'il doive se produire dans la rotation du plan de polarisation une compensation analogue à celle qui avait lieu pour la direction apparente du rayon réfracté. En d'autres termes, la rotation du plan de polarisation doit dépendre de l'indice de réfraction *absolue*, non de l'indice *apparent*, et si l'on multiplie l'effet en employant une série de piles de glace convenablement disposées, on pourra mettre en évidence un changement dans la rotation selon que l'observateur, par suite du mouvement de la Terre, marchera vers la source de la lumière ou dans la direction opposée. Tel est le principe d'une expérience entourée de difficultés pratiques, par laquelle M. Fizeau [1] a essayé de mettre en évidence le mouvement de translation de la Terre. Les moyennes des observations ont indiqué, en effet, un changement de

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. LVIII, p. 129.

rotation dans le sens prévu par la théorie et avec une valeur de même ordre que celle qui résultait du calcul.

M. Babinet, à qui l'on doit l'explication élémentaire des phénomènes remarquables que présentent les réseaux, a montré aussi le premier [1] que le mouvement du réseau produit un changement appréciable dans la déviation des rayons diffractés ou *paragéniques*. Dans ce cas, il se trouve heureusement que l'aberration produite par le déplacement de la lunette s'ajoute au changement de déviation absolue produit par le mouvement du réseau, de sorte que, loin d'établir une compensation, le phénomène de l'aberration exagère l'effet que l'on veut apprécier. En disposant convenablement l'expérience, le changement de direction que l'on doit mettre en évidence peut être égal à

$$4a \tang \delta,$$

expression dans laquelle a désigne l'aberration, et δ la déviation de la lumière considérée à travers le réseau en repos. Or, il n'est pas impossible, comme on le verra plus loin, d'observer des spectres de diffraction très-intenses à une distance de 45 degrés de la direction des rayons incidents; on voit donc que l'angle qu'il s'agit d'apprécier peut être de

$$4 \times 20'',445 = 81'',7,$$

c'est-à-dire de plus d'une minute. Il suffirait alors d'appareils de mesure d'une précision très-ordinaire pour constater ce déplacement.

M. Angström [2] et M. van der Willigen [3] sont parvenus, chacun de leur côté et par des méthodes un peu différentes, au même résultat que M. Babinet. M. Angström a fait aussi un certain nombre d'expériences dans lesquelles il a cherché à mesurer le déplacement dont il s'agit, et il a cru constater un déplacement d'environ 10 secondes, parfaitement conforme à celui qu'indiquait le calcul. Toutefois M. Angström ajoute que la question ne lui paraît pas suffisamment élucidée au point de vue des considérations théoriques.

---

[1] *Sur la paragénie* (*Cosmos*, 13 et 20 octobre 1864).
[2] *Pogg. Annalen*, t. CXXIII, p. 500 (1864).
[3] *Archives du Musée Teyler*, vol. I, fascicule I (Harlem).

Dans tout ce qui précède on a supposé implicitement, et c'est ainsi que les expériences de M. Fizeau et celles de M. Angström ont été réalisées, que l'on fait réfléchir la lumière solaire dans la direction est-ouest ou dans la direction opposée, en profitant de l'heure (midi) à laquelle le mouvement de translation de la Terre est le plus voisin d'être perpendiculaire au méridien. C'est cette lumière réfléchie que l'on utilise, par exemple, en la faisant tomber sur un réseau situé dans le plan du méridien (1). On verra plus loin l'importance de cette observation.

Enfin Döppler (2) a fait faire un grand pas à la question en remarquant que le mouvement de la source de lumière modifie la longueur d'ondulation. On conçoit aisément que, si une source vibrante est en mouvement, les ondes successives seront plus resserrées en avant, plus écartées en arrière, et conserveront à droite et à gauche les mêmes distances que si la source était en repos. Le déplacement de la source équivaut donc à un changement de ton ou de couleur de la lumière, et Döppler a cru pouvoir expliquer ainsi par le mouvement des astres la coloration des étoiles changeantes et des étoiles doubles. Il est facile de montrer que cette théorie ne peut pas rendre compte de la couleur des étoiles, mais la modification produite sur la longueur d'onde ne paraît pas douteuse. La théorie s'applique d'ailleurs tout aussi bien aux vibrations sonores, et cette conséquence a été confirmée par les expériences de M. Buys-Ballot (3), M. Scott Russel et M. Fizeau (4). Un son paraît plus aigu quand le corps vibrant s'approche de l'observateur et plus grave quand il s'éloigne; les mêmes phénomènes se produisent quand l'observateur se rapproche ou s'éloigne du corps

(1) A l'époque des solstices, le mouvement de la Terre à midi et à minuit est perpendiculaire au méridien. Aux équinoxes, la vitesse de translation de la Terre aux mêmes heures fait avec la normale au méridien un angle inférieur à 23° 30′ dont le cosinus est 0,9171. La composante perpendiculaire au méridien de la vitesse de la Terre diminue donc de moins de $\frac{1}{10}$ dans le cours d'une année, et il n'y a pas à se préoccuper beaucoup de la date des expériences.

(2) *Abhandlungen der Königl. Böhm. Gesellschaft der Wissenschaften*, V. Folge Bd 2 (1842).

(3) *Pogg. Annalen*, t. LXVI, p. 321.

(4) *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. XIX, p. 211.

sonore. M. Fizeau a émis aussi dès 1848 l'idée que les considérations de Döppler pourraient conduire à la mesure de la vitesse absolue des étoiles par le déplacement des raies du spectre; je n'ai pas besoin de rappeler les travaux nombreux et importants qui ont été publiés sur cette question depuis quelques années.

II. — *Premières expériences.*

Avant d'exposer aucune théorie, je vais rapporter quelques expériences qui m'ont conduit à modifier en plusieurs points importants les idées généralement adoptées sur l'emploi de la lumière solaire et de celle des sources terrestres. Comme j'avais à ma disposition des réseaux d'une grande perfection, j'ai cherché d'abord à vérifier par expérience la théorie de M. Babinet, ainsi que M. Angström l'avait fait déjà; mais j'ai rencontré dès le début des difficultés et des circonstances inattendues qui m'amenèrent peu à peu à multiplier et à varier les procédés d'observation.

Les déplacements qu'il s'agissait de mettre en évidence ne devaient pas atteindre 1 minute dans les cas les plus favorables, et provenaient de la différence de deux angles très-grands; il était donc nécessaire de recourir à des instruments très-précis. Les goniomètres ordinaires, dont la lunette a une longueur focale de 25 à 30 centimètres, donnent habituellement 10 secondes par les verniers et permettent quelquefois d'évaluer une demi-division, c'est-à-dire 5 secondes; cette précision ne m'a pas paru suffisante. Le cabinet du Collége de France possède un grand théodolite construit en 1854 par Brunner sur les indications de M. Regnault et disposé de manière à permettre l'observation de tous les phénomènes d'optique. Le cercle divisé de cet instrument a 35 centimètres de diamètre; les verniers donnent directement 3 secondes et permettent d'estimer des angles un peu plus petits; les objectifs des lunettes ont 55 centimètres de longueur focale et 55 millimètres de diamètre. L'une des lunettes a été munie d'une fente et adaptée à l'instrument à la manière des collimateurs de spectroscopes.

Les réseaux dont je me servais alors étaient deux réseaux de Nobert tracés sur verre au diamant; l'un d'eux porte 1801 traits, l'autre 3601;

le premier appartient à l'École Polytechnique, le second à l'Association Scientifique; les traits ont 15 millimètres de longueur et couvrent un espace de $6^{mm},77$ de largeur.

Je me suis aperçu après coup que les éléments que j'avais entre les mains étaient loin de répondre à la précision que j'avais d'abord espérée. La largeur du réseau n'étant que de $6^{mm},77$, la lumière diffractée dans une direction déterminée ne couvrait que le $\frac{1}{8}$ de la largeur totale de l'objectif et moins que le $\frac{1}{5}$ du diamètre qui donne le pouvoir optique maximum, l'expérience ayant montré que la lunette gagne à être un peu diaphragmée; de sorte que le pouvoir optique utilisé n'était pas le $\frac{1}{5}$ du pouvoir optique maximum de la lunette. Il aurait fallu pouvoir employer un réseau divisé sur une largeur égale à celle de l'objectif; je n'ai pas besoin d'insister sur la difficulté d'obtenir un pareil instrument. Cependant MM. Brunner construisent actuellement des réseaux tout à fait comparables à ceux de Nobert, et j'espère qu'ils parviendront à leur donner les dimensions qui m'eussent été nécessaires. Quoi qu'il en soit, les spectres de diffraction obtenus dans les conditions que je viens d'indiquer étaient très-dispersés, mais les raies étaient un peu moins nettement découpées que si l'on eût employé une lunette plus courte et un grossissement plus faible.

L'expérience étant faite vers midi, le collimateur était dirigé vers l'ouest, par exemple, et le réseau placé normalement à l'axe du collimateur. On faisait réfléchir la lumière solaire suivant l'axe du collimateur, de l'ouest à l'est, et l'on mesurait la double déviation d'une raie bien nette, du groupe D ou du groupe b, dans le premier spectre du réseau, à 3601 traits ou, dans le second spectre du réseau, à 1801 traits. (Le premier réseau étant bien inférieur au second, je ne citerai que les nombres relatifs au dernier). Le collimateur était ensuite dirigé vers l'est et l'on recommençait la même mesure sur la même raie; puis l'on revenait à la direction primitive, de manière à obtenir une série de résultats alternatifs pour éliminer les causes d'erreurs accidentelles. Le réseau était le plus souvent normal aux rayons incidents, ce qui correspond à un cas où la théorie est plus simple; mais dans d'autres expériences on a mesuré la déviation minimum et les résultats ont été les mêmes. La déviation de la raie D dans le cas précédent était d'environ 18 degrés dont la tangente est 0,3249. La double-déviation aurait dû, d'après M. Babinet, éprouver un changement de

$$4 \times 20'',445 \times 0,3249 = 26'',57.$$

Or, l'expérience n'a donné entre les deux séries de mesures relatives aux deux directions est et ouest que des différences qui variaient d'une manière irrégulière, tantôt en plus, tantôt en moins, et de même ordre que celles qui se manifestaient dans les nombres d'une même série. Malgré tous les soins, les différences extrêmes dans une même série atteignaient quelquefois 15 secondes; dans d'autres cas plus rares, elles n'étaient plus que de 8 secondes, chacune des mesures ne s'écartant au plus de la valeur moyenne que de 4 secondes. Ces petits écarts s'expliquent aisément par diverses circonstances. Les raies n'avaient pas la netteté qu'on leur voit habituellement dans des spectres moins dilatés; l'expérience que je rapporte étant faite pendant l'été (août 1869), la lumière solaire qui pénétrait dans la chambre noire et la présence prolongée de l'observateur dans le voisinage du théodolite pouvaient y causer des variations de température et des dilatations inégales; enfin, les grandes dimensions de l'appareil le rendaient trop sensible aux trépidations extérieures. En tout cas, il paraît difficile qu'une différence de 26 secondes ait pu échapper, surtout dans une moyenne de 15 ou 20 expériences alternatives, parce que cette différence est supérieure à tous les écarts des mesures individuelles.

Toutefois, avant de conclure, il m'a paru nécessaire de modifier la méthode expérimentale, parce que les erreurs restaient de même ordre de grandeur que la quantité qu'il s'agissait de mettre en évidence. Comme cette quantité est très-petite, j'ai cherché à l'observer directement au lieu de la déduire comme différence de deux mesures indépendantes. Le théodolite a été placé sur une table solide qui pouvait tourner autour d'un axe vertical. Le support de cette table était un manchon en fonte, de 15 centimètres de diamètre extérieur, terminé par deux plates-formes de 30 centimètres de diamètre; la plate-forme supérieure portait la table, la plate-forme inférieure reposait sur une plaque de fonte parfaitement dressée. La table pouvait tourner doucement et sans secousses sous la simple pression du doigt, même quand elle était chargée du théodolite; il ne se produisait donc ni flexions ni vibrations. On vérifiait d'ailleurs que, la lunette étant pointée sur le collimateur, on pouvait faire tourner l'appareil en bloc dans une direction quelconque, sans produire aucun dépointement. L'expérience est maintenant très-simple.

Le collimateur étant dirigé vers l'ouest à midi, et le réseau placé normalement à l'axe du collimateur, on fait réfléchir la lumière solaire dans la direction voulue et on pointe la lunette sur une raie d'un spectre de diffraction. L'appareil étant fixé dans cet état, on tourne la table de 180 degrés, le collimateur se trouve dirigé vers l'est et on le fait traverser par de la lumière solaire. Si le mouvement de la Terre a de l'influence, la raie que l'on a visée ne doit plus se trouver sur le réticule de la lunette.

Le dépointement, s'il existe, doit être double du changement de déviation simple ou moitié du changement de double déviation; ce serait pour la raie D, dans le cas de l'expérience précédente, un déplacement de 13 secondes. Cette quantité est moitié moindre que celle qu'on avait à évaluer dans la première méthode, mais, au lieu de faire quatre mesures à l'aide de huit lectures sur les verniers, il suffit de constater si le réticule se maintient exactement au milieu d'une raie, observation qui comporte une extrême rigueur. Cette manière d'opérer n'exige pas, comme on le voit, l'emploi d'un cercle divisé.

L'expérience a été faite un très-grand nombre de fois, les observations à l'est et à l'ouest se succédant rapidement, car il suffisait qu'un aide tournât un miroir pour que la lumière fût réfléchie dans l'appareil vers l'est ou vers l'ouest; on a visé des raies du second, du troisième et du quatrième spectre du réseau à 1801 traits et le résultat a été constamment négatif. On voyait bien de temps en temps de petits dépointements du réticule, mais il était facile de s'assurer qu'on devait les attribuer à des causes accidentelles, car ils se conservaient dans les observations suivantes, et il suffisait de rétablir le fil au milieu de la raie considérée pour constater que le pointé se conservait rigoureusement pendant cinq ou six inversions de l'appareil dans les deux directions opposées.

Je rapporterai plus loin une expérience dans laquelle il est plus facile de se rendre compte du degré de précision que comporte cette observation du dépointement; mais, sans discuter l'expérience actuelle, il ne paraît pas douteux qu'un déplacement de 5 secondes ne fût pas resté inaperçu, et cela suffit pour montrer que l'explication de M. Babinet est insuffisante. On peut dire, je crois, que *les rayons solaires éprouvent la même diffraction dans un réseau quand on les amène par la réflexion à marcher dans le sens ou en sens contraire du mouvement de translation de la Terre.*

J'ajoute que la diffraction de la lumière solaire est la même que celle d'une source terrestre de même période. On verra plus loin que cette conséquence résulte de l'énoncé qui précède, mais je m'en suis assuré par expérience.

La moitié de la fente du collimateur a été couverte par un prisme rectangle de 45 degrés, qui recevait la lumière solaire et la réfléchissait dans le collimateur. L'autre moitié de la fente était éclairée directement par de puissantes étincelles d'induction produites entre deux fils de magnésium; les raies vertes de ce métal correspondent, comme on sait, à trois raies du groupe *b* du spectre solaire. On avait ainsi dans la lunette deux spectres de diffraction superposés. Cela étant, le collimateur a été dirigé vers l'est, vers l'ouest ou vers le sud, à une heure quelconque de la journée, et l'on n'a pu apercevoir le moindre défaut de coïncidence entre les raies brillantes du magnésium et les raies obscures correspondantes du spectre solaire. Je citerai encore plus tard une autre expérience plus rigoureuse que celle-ci, mais chacun peut se faire une idée de l'exactitude avec laquelle on peut constater ces sortes de coïncidences, et je me suis cru autorisé à énoncer la proposition suivante:

Dans les phénomènes de diffraction, la lumière solaire réfléchie dans une direction quelconque se comporte exactement comme celle d'une source de lumière terrestre de même période.

J'ai cherché ensuite à rendre compte par la théorie de ce résultat inattendu; je crois que l'explication se trouve dans cette simple circonstance que les miroirs sur lesquels on fait réfléchir la lumière solaire participent nécessairement au mouvement de la Terre, et que ce déplacement de la surface réfléchissante modifie la longueur d'onde de la lumière réfléchie. D'un autre côté, la longueur d'onde de la lumière émise par une source terrestre dépend aussi de l'angle que fait la direction de la propagation avec le déplacement de la Terre, et il se trouve que la lumière solaire réfléchie et celle d'une source terrestre éprouvent exactement les mêmes effets.

A la suite de cet insuccès, j'ai été conduit à passer en revue la plupart des phénomènes d'optique et à chercher quels sont ceux d'entre eux sur lesquels le mouvement de la Terre peut avoir une influence appréciable. Il n'y a guère qu'un genre d'expériences que je n'aie pas tenté : c'est celle qui a été imaginée et réalisée par M. Fizeau sur la rotation du plan de polarisation par les piles de glace; il ne m'appartenait pas de répéter cette expérience, et les difficultés considérables qu'elle présente, tant théoriques que pratiques, auraient suffi, à défaut d'autre motif, pour me faire hésiter à l'entreprendre. Pour rendre plus facile la lecture de ce Mémoire et éviter de renvoyer à des sources étrangères, je vais reprendre maintenant la question d'une manière complète; je rappellerai brièvement les démonstrations qui me paraissent bien établies, et je décrirai les différentes expériences à propos des théories auxquelles elles se rapportent. Dans cette première Partie, je ne m'occuperai pas des phénomènes dans lesquels il y a lieu de faire intervenir le déplacement d'un milieu réfringent; je me bornerai, pour la théorie du moins, à l'examen des changements de longueur d'onde produits par le mouvement des sources de lumière, à l'étude de l'action des miroirs mobiles et à celle des phénomènes de diffraction. Dans tous ces cas, les principes sur lesquels on s'appuie ne paraissent pas douteux et les conséquences sont rigoureuses. Au contraire, dans l'étude des effets de réfraction, que je remets à une deuxième Partie, il faut avoir recours à l'hypothèse de Fresnel, et les raisonnements sont beaucoup plus difficiles.

On verra que dans la plupart des cas, en particulier pour ceux de diffraction, les effets que l'on recherche seraient beaucoup plus marqués si l'on pouvait employer une source de lumière fixe, comme celle d'une étoile. Quelques-unes de ces expériences me paraissent réalisables, mais il faudrait pour cela des ressources d'appareils et d'installation dont je n'ai pas encore pu disposer.

III. — *Influence du déplacement d'une source de lumière sur la longueur d'onde des rayons qui se propagent dans différentes directions.*

Considérons une source S (*fig.* 1) de lumière homogène placée dans le vide; désignons par T la période de vibration et par V la vitesse de propagation. Si la source est fixe, les vibrations produites à deux époques distantes d'une période sont parvenues au bout d'un certain

Fig. 1.

temps t à des points A et B dont les vibrations sont identiques, et dont la distance est égale à VT, l'espace parcouru par la propagation pendant une période; cette distance est la longueur d'onde λ de la lumière. Mais si la source se meut avec une vitesse u parallèle à la direction considérée SA, elle parcourt l'espace $SS' = uT$ pendant une période, de sorte que l'onde qui devait se trouver en B au bout du temps t est parvenue en B' à la distance $BB' = SS' = uT$; les deux points A et B' sont maintenant en vibrations concordantes, et la nouvelle longueur λ' est devenue

$$\lambda' = AB' = AB - BB' = (V - u)T = VT\left(1 - \frac{u}{V}\right), \quad \lambda' = \lambda\left(1 - \frac{u}{V}\right).$$

De même, dans une direction opposée à celle du déplacement de la source, la longueur d'onde λ'' est devenue

$$\lambda'' = \lambda\left(1 + \frac{u}{V}\right).$$

Si l'on considère la propagation dans une direction perpendiculaire à celle du déplacement de la source, on voit aisément que la longueur d'onde n'est pas modifiée, et enfin, dans une direction quelconque, le changement de longueur d'onde est dû à la composante du déplacement de la source parallèle à la direction considérée.

Cette démonstration de Döppler a été adoptée par tous les physiciens, mais il importe de remarquer qu'elle ne s'applique exactement qu'au cas où la propagation a lieu dans le vide, car en écrivant que BB′ est égal à SS′, on suppose implicitement que la vitesse de la propagation de la lumière est indépendante de la longueur d'onde, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de dispersion dans le milieu que l'on considère. Sauf cette restriction, la théorie est presque évidente et s'applique sans difficulté au déplacement des étoiles.

Des phénomènes analogues se produisent à la surface de la Terre. Une source de lumière terrestre, un corps qui subit une transformation chimique, par exemple, participe en même temps au mouvement de la Terre. Si cette source de lumière est située dans l'air, on peut encore appliquer le calcul qui précède, car l'indice de réfraction des gaz est tellement voisin de l'unité, que l'influence de la matière pondérable est alors absolument négligeable; le changement de longueur d'onde a lieu comme si la source était dans le vide. Si donc on désigne par a l'aberration ou le rapport $\frac{u}{V}$ de la vitesse de translation de la Terre à la vitesse de propagation de la lumière dans le vide, la longueur d'onde de la lumière émise dans la direction du mouvement de la Terre sera

$$\lambda' = \lambda(1 - a)$$

et celle de la lumière qui se propage dans la direction opposée

$$\lambda'' = \lambda(1 + a).$$

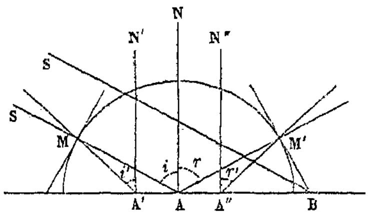
λ désigne ici la longueur d'onde que produirait dans l'air la source considérée, si elle était en repos.

IV. — *Réflexion sur un miroir mobile.*

Direction de la lumière réfléchie. — Il n'y a lieu de chercher l'influence du déplacement d'un miroir sur les lois de la réflexion que dans le cas où l'observateur est animé du même mouvement que le miroir, c'est-à-dire dans le cas du mouvement de translation de la Terre. Pour calculer cette influence sur les lois de la réflexion et de la réfraction, M. Stokes suppose que l'on imprime à l'éther et au miroir ou au milieu réfringent une vitesse égale et contraire à celle de la Terre; mais cette manière d'envisager le problème ne me paraît pas simplifier les raisonnements, et la démonstration est tout aussi rapide quand on sait exactement la marche indiquée par Fresnel [1].

1° Supposons d'abord que le mouvement de la Terre soit parallèle au plan d'incidence et à la surface réfléchissante. Soient SA et SB (*fig.* 2) deux rayons incidents qui tombent sur le miroir à deux époques

Fig. 2.



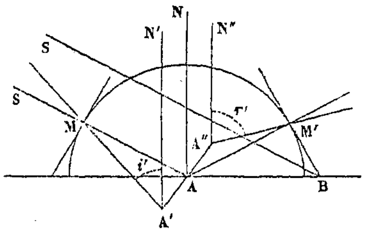
distantes d'une unité de temps. On sait que, pour construire le rayon réfléchi, il suffit de décrire du point A comme centre une sphère d'un rayon égal à V et de mener par le point B un plan tangent à cette sphère; la droite AM', qui joint le point A au point de contact, est le rayon réfléchi. D'ailleurs le plan tangent BM' n'est autre chose que l'une des ondes réfléchies, de même que le plan tangent en M est une onde incidente. Les rayons incident et réfléchi MA et AM' sont normaux aux ondes correspondants, et l'angle d'incidence i est égal à l'angle de réflexion r. Mais si le miroir est mobile, comme nous l'avons supposé, suivant la direction AB, pendant que la vibration a été de A en M' en suivant le rayon réfléchi, le point A du miroir est venu en A'', de sorte que, par rapport au miroir et à tous les objets qui se meuvent avec lui, la direction *apparente* du rayon réfléchi est A''M', et l'angle apparent r' de réflexion est M'A''N''. De même, pendant que la vibration incidente est venue de M en A, le point A' du miroir est venu aussi au point A, la direction *apparente* du rayon incident est MA' et

[1] *Voir* les Leçons autographiées de Verdet à l'École Normale supérieure.

l'angle apparent i' d'incidence est MA'N'. Comme les deux chemins A'A et AA'' sont égaux, l'angle apparent de réflexion est encore égal à l'angle apparent d'incidence. Il faut seulement remarquer que les directions apparentes des rayons incident et réfléchi ne sont plus normales aux ondes correspondantes; la même chose aura lieu dans presque tous les cas.

2° Si le mouvement de la Terre a lieu suivant la droite A'A'' (*fig.* 3) perpendiculaire au plan d'incidence, la direction apparente du rayon

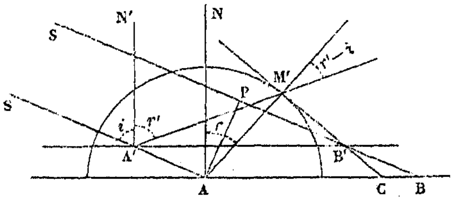
Fig. 3.



incident est encore MA' et celle du rayon réfléchi A''M'. Les deux plans d'incidence apparente MA'N' et de réflexion apparente N''A''M' sont parallèles entre eux par raison de symétrie, et les angles d'incidence et de réflexion apparentes i' et r' égaux entre eux.

3° Supposons le mouvement de la Terre parallèle aux rayons incidents, de sens contraire par exemple. Soient SA et SB (*fig.* 4) deux

Fig. 4.



rayons incidents qui tombent sur le miroir à des époques distantes d'une unité de temps. Le miroir se trouve en AB quand il est frappé en A par le premier rayon, en A'B' quand il est frappé en B' par le second, et l'on a

$$AA' = BB' = u.$$

Le rayon réfléchi s'obtiendra en menant par le point B' un plan tangent à la sphère décrite du point A avec un rayon égal à V. Les rayons incidents, apparent et réel, se confondent; le rayon réfléchi réel est AM′, le rayon réfléchi apparent est A′M′. Comme les angles de réflexion apparente et réelle r' et r diffèrent très-peu, on obtient, en considérant le triangle AA′M′, la relation

$$r' - r = \frac{AA'}{AM'}\sin(i + r),$$

ou, en remarquant que le rapport $\frac{AA'}{AM'}$ est égal à l'aberration a,

$$r' - r = a\sin(i + r). \tag{1}$$

Si l'on abaisse du point A la perpendiculaire AP sur le rayon SB, la longueur PB′ est égale à V. Le triangle APB donne

$$V + u = AB\sin i = (AC + CB)\sin i.$$

Les deux angles AM′C, B′CB donnent aussi

$$AC = \frac{V}{\sin r} \quad \text{et} \quad CB = -u\,\frac{\cos(i + r)}{\sin r}.$$

On obtient, en substituant ces valeurs dans l'équation précédente,

$$(1 + a)\sin r = \sin i[1 - a\cos(i + r)]. \tag{2}$$

Les équations (1) et (2) montrent que les différences qui existent entre les angles r', r et i sont de l'ordre de l'aberration a; on pourra donc remplacer r et r' par i dans tous les termes qui contiennent a en facteur, et les équations (1) et (2) peuvent s'écrire

$$\sin r' = \sin r + a\sin 2i\cos i, \tag{1'}$$

$$\sin i = \sin r + a(\cos 2i\sin i + \sin i). \tag{2'}$$

Comme les seconds membres sont égaux, il en résulte que $r' = i$; l'angle apparent de réflexion est égal à l'angle d'incidence.

4° Enfin, si le mouvement de la Terre a lieu dans une direction quelconque, on pourra le remplacer par trois autres parallèles aux trois directions considérées déjà, chacun de ces mouvements partiels étant sans influence sur les lois de la réflexion, et il en sera de même pour le mouvement résultant.

On en conclut donc que, dans tous les cas, le mouvement de translation de la Terre n'a pas d'influence sur les lois de la réflexion, du moins en ce qui concerne la direction des rayons incidents et réfléchis.

Le raisonnement s'applique, bien entendu, à une source de lumière quelconque, fixe ou mobile, puisqu'il est indépendant de la longueur d'onde des rayons incidents.

Modification de la longueur d'onde par la réflexion. — Le changement de longueur d'onde produit par la réflexion sur un miroir mobile est la cause pour laquelle la théorie de M. Babinet, sur le déplacement des rayons paragéniques, ne s'applique pas à la lumière solaire réfléchie par un miroir terrestre. J'ai cherché si ce mouvement du miroir avait attiré l'attention des physiciens : le passage suivant d'un Mémoire de M. Fizeau [1] est la seule circonstance dans laquelle on me paraît s'en être préoccupé, mais au point de vue du chemin parcouru, et non pas du changement de longueur d'onde :

« Une expérience de M. Babinet (celle qui a été rapportée p. 161) paraissait en contradiction avec l'hypothèse d'un changement de vitesse conforme à la loi de Fresnel. Mais, en considérant les circonstances de cette expérience, j'ai remarqué l'existence d'une cause de compensation qui devait rendre insensible l'effet dû au mouvement. Cette cause réside dans la réflexion que la lumière subissait dans cette expérience. En effet, on peut démontrer que, lorsque deux rayons ont entre eux une certaine différence de marche, cette différence est altérée par l'effet de la réflexion sur un miroir en mouvement. Or, en calculant séparément les deux effets dans l'expérience de M. Babinet, on trouve qu'ils ont des valeurs sensiblement égales et de signes contraires. »

L'influence du déplacement du miroir peut se déduire très-simplement du principe d'Huyghens, que Fresnel énonce de la manière suivante [2] :

---

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. LVII, p. 403.

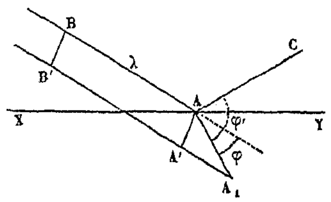
[2] *Œuvres complètes*, t. I, p. 293.

« Les vibrations d'une onde lumineuse dans chacun de ses points peuvent être regardées comme la somme des mouvements élémentaires qu'y enverraient au même instant, en agissant isolément, tous les points de cette onde considérée dans une quelconque de ses positions antérieures. »

Ce principe est encore vrai lorsque la surface vibrante que l'on substitue à la source de lumière est, non pas seulement une surface d'onde, mais une surface quelconque entourant la source, et dont chacun des points est artificiellement entretenu dans l'état de vibration que lui communique la source; cette surface elle-même peut d'ailleurs être réduite à sa partie efficace. Pour calculer les phénomènes de réflexion en particulier, on peut supprimer la source, à condition de considérer le miroir comme une surface vibrante dont chaque point aurait un état vibratoire de même période que celui qu'il reçoit de la source.

Soient donc XY (*fig.* 5) la surface du miroir, BA un rayon incident dont les deux points B et A sont situés sur deux ondes successives, de

Fig. 5.



sorte que leur distance est égale à la longueur d'onde λ. Si le miroir était immobile, la vibration qui est actuellement en B arriverait au miroir au bout d'une période T. Mais, à cause du mouvement du miroir, le point A est parvenu en A_1 quand il est atteint par l'onde B; la vibration que reçoit alors le point A_1 provient, non du point B, mais d'un autre point B' de la même onde. Désignons, comme précédemment, par u la vitesse du miroir; appelons φ l'angle que fait la direction de cette vitesse avec le prolongement de la normale BA aux ondes incidentes, et T' le temps que met la vibration pour aller de B' en A_1; ce temps T' sera la période de vibration d'un point du miroir. On a

$$B'A_1 = VT' = B'A' + A'A_1 = VT + u\cos\varphi T';$$

on en déduit

$$T' = \frac{T}{1 - \frac{u}{V}\cos\varphi},$$

ou sensiblement

$$T' = T\left(1 + \frac{u}{V}\cos\varphi\right).$$

Le miroir se comporte donc comme une source de lumière de période T′, c'est-à-dire émettant à l'état de repos des vibrations dont la longueur d'onde serait

$$\lambda_1 = VT' = \lambda\left(1 + \frac{u}{V}\cos\varphi\right).$$

Il faut tenir compte maintenant du déplacement du miroir pour évaluer la longueur d'onde λ_2 de la lumière réfléchie. En désignant par φ' l'angle que fait la vitesse du miroir avec la normale AC aux ondes réfléchies dans le sens de la propagation, on aura, d'après ce qui a été dit plus haut (p. 173),

$$\lambda_2 = \lambda_1\left(1 - \frac{u}{V}\cos\varphi'\right),$$

ou bien, en remplaçant λ_1 par sa valeur et négligeant les termes qui renferment le carré de $\frac{u}{V}$,

$$\lambda_2 = \lambda + \frac{u}{V}\lambda(\cos\varphi - \cos\varphi').$$

On voit aussi que la direction absolue BA du rayon incident est normale aux ondes incidentes, tandis que la direction apparente BA_1 fait avec la normale un angle de l'ordre du rapport $\frac{u}{V}$; il en est de même pour les rayons réfléchis absolu ou apparent.

Application à la lumière solaire. — Il résulte du calcul précédent que la lumière solaire réfléchie dans une direction quelconque par un miroir qui participe au mouvement de la Terre est *identique* à celle qu'émet dans la même direction une source terrestre de même période. En effet, comme le mouvement de la Terre est sensiblement circulaire, l'angle φ est toujours très-voisin de 90 degrés, et, le rapport $\frac{u}{V}$ étant alors égal à l'aberration, la formule devient

$$\lambda_2 = \lambda - a\lambda \cos\varphi'.$$

Si le miroir se déplace dans le sens ou en sens contraire du mouvement de la Terre, l'angle φ' est égal à zéro ou à 180 degrés, et la longueur d'onde de la lumière réfléchie devient alors $\lambda(1 - a)$ ou $\lambda(1 + a)$. Ces formules sont précisément celles auxquelles on arrive, en considérant l'influence du mouvement de la Terre sur les ondes d'une source terrestre. Il en résulte donc cette conséquence importante :

« Au point de vue de l'influence que peut exercer le mouvement de la Terre sur les phénomènes d'optique, la lumière solaire réfléchie dans une direction quelconque se comporte exactement comme celle d'une source terrestre de même période. »

Il ne faut pas conclure de ce théorème qu'il n'y ait aucune expérience à tenter pour mettre en évidence le mouvement de la Terre, mais nous verrons que les phénomènes de diffraction sont impuissants, comme ceux de réflexion. On ne peut espérer un effet appréciable qu'en faisant intervenir le milieu réfringent et la théorie présente alors beaucoup moins de certitude.

Les mêmes conséquences s'appliquent aux planètes, qui n'ont pas de lumière propre et nous réfléchissent la lumière solaire [1]. Les trajectoires des planètes étant sensiblement circulaires, la lumière que chacune d'elles réfléchit dans une direction quelconque a la même longueur d'onde que si la planète était une source de même période que le Soleil. Il en résulte des déplacements de raies qu'il ne paraît pas impossible de constater par expérience, et, pour éclaircir cette théorie par quelques exemples, je vais en faire l'application aux principales planètes, bien que des calculs analogues aient déjà été faits par divers

---

[1] M. Fizeau avait admis implicitement cette proposition (*Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 16 mai 1870).

physiciens. En prenant pour unité la vitesse de translation de la Terre, les vitesses des planètes sont environ :

Mercure	0,62
Vénus	0,78
Terre	1
Mars	1,35
Jupiter	3,45
Saturne	5,40
Uranus	9,15
Neptune	13

Pour une planète qui aurait la même vitesse que la Terre, le changement de longueur d'onde serait, dans le cas le plus favorable, de $\frac{1}{10000}$. Comme la différence des longueurs d'onde des deux raies du groupe D est de $\frac{1}{983}$ d'après M. Fizeau, c'est-à-dire d'environ $\frac{1}{1000}$, on voit que, dans cette région du spectre, une planète marchant comme la Terre pourrait donner lieu à un déplacement de raie égal au dixième de la distance des deux raies D. Le déplacement serait plus apparent dans la région la plus réfrangible du spectre, où les changements de déviation sont plus grands pour une même modification de longueur d'onde. Dans l'observation de M. Huggins relative à Sirius, le changement de longueur d'onde a été déduit du déplacement de la raie F et évalué à $\frac{1}{4463}$, c'est-à-dire à peu près le double de celui que donnerait un astre marchant comme la Terre. L'observation de Jupiter ou de Saturne donnerait un effet une fois et demie ou deux fois et demie plus grand que celui qu'a obtenu M. Huggins pour Sirius. L'effet serait encore bien plus manifeste pour Uranus et Neptune, mais ces astres ont un éclat si faible que l'observation serait très-difficile. Les planètes présentent d'ailleurs, dans les observations spectroscopiques, une difficulté particulière : c'est qu'elles ont un angle apparent sensible ; il est nécessaire alors de limiter l'image de l'astre par une fente, ce qui enlève beaucoup de lumière.

La Lune donne lieu à des résultats un peu différents, parce qu'elle tourne autour de la Terre en même temps qu'elle participe à son mouvement de translation. Comme la vitesse de rotation de la Lune est d'environ 1 kilomètre, c'est-à-dire trente fois moindre que celle de la Terre, il y aurait, à l'époque du premier ou du dernier quartier, un changement de longueur d'onde de $\frac{1}{3000000}$, ce qui causerait un déplacement de $\frac{1}{300}$ de distance des deux raies D; c'est là une quantité bien difficile à apprécier.

Enfin, quelques observateurs, entre autres le P. Secchi ([1]), ont cherché à constater, par un déplacement de raies, la rotation du Soleil sur lui-même. La vitesse d'un point de l'équateur solaire est d'environ 2 kilomètres, c'est-à-dire $\frac{1}{15}$ de la vitesse de translation de la Terre; les longueurs d'onde émises par le milieu et le bord de l'équateur différeraient donc de $\frac{1}{150000}$, et la différence des longueurs d'onde émises par les deux bords opposés serait de $\frac{1}{75000}$, ce qui donnerait lieu à un déplacement de $\frac{1}{75}$ de la distance des deux raies D.

On verra que dans la plupart des phénomènes, sinon dans tous, la seule circonstance qui influe est la vitesse relative de la source et de l'observateur. Cette nécessité de tenir compte du mouvement de la Terre contribue à amoindrir les effets que l'on peut attendre de l'observation des planètes. De même, nous n'avons pas fait intervenir le mouvement de translation du système solaire; ce mouvement général paraît aussi n'avoir aucune influence.

V. — *Phénomènes de diffraction.*

M. Babinet appelle *paragéniques* les ondes latérales produites par la diffraction des réseaux, et il les envisage de la manière suivante, qui se prête facilement à l'étude de l'influence du mouvement.

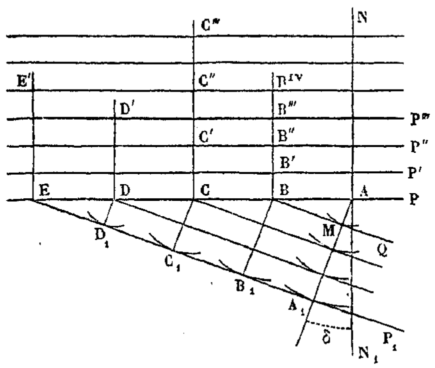
Soient A, B, C, D, E,... (*fig.* 6) les points homologues des ouvertures successives d'un réseau situé normalement sur le trajet d'un faisceau de rayons parallèles, et supposons que les traits du réseau sont équidistants et perpendiculaires au plan de figure. Les différentes ondes planes P, P′, P″, P‴, ..., qui constituent la lumière incidente, sont distantes l'une de l'autre d'une longueur d'onde λ. Les vibrations des différents points A, B′, C′, D′, E′,... de ces ondes successives arrivent au réseau au bout d'intervalles de temps égaux à 0, T, 2T, 3T,

---

([1]) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* (1870). *Voir* aussi les travaux tout récents de M. Zöllner.

$4T, \ldots$ Quand la vibration E′ est parvenue au point E, la vibration diffractée provenant du point A est alors sur une sphère de rayon

Fig. 6.



$AA_1 = 4\lambda$, celle du point B sur une sphère de rayon $BB_1 = 3\lambda, \ldots$ Sur toutes ces sphères les vibrations sont concordantes; leur enveloppe est un plan qui passe par le point E et forme l'onde plane diffractée EP_1.

En appelant δ la déviation N_1AA_1, c'est-à-dire l'angle de la normale à cette onde avec la normale aux ondes incidentes, et ε l'intervalle AB de deux traits du réseau, on a

$$AA_1 = AE \sin\delta,$$

ou

$$\sin\delta = \frac{AA_1}{AE} = \frac{4\lambda}{4\varepsilon} = \frac{\lambda}{\varepsilon}. \tag{1}$$

On voit aussi que, pour déterminer la direction de l'onde paragénique EP_1 ou BQ, il suffit de mener par le point B un plan tangent à la sphère décrite du point A comme centre avec un rayon égal à λ; le point de contact M détermine le rayon diffracté AM.

En menant par ce même point B des plans tangents à des sphères décrites du point A avec des rayons égaux à 2λ, 3λ, $4\lambda, \ldots$, on obtient une série d'ondes parageniques qui correspondent aux spectres successifs des réseaux, et dont les déviations δ_2, δ_3, δ_4 sont données par les formules

$$\sin\delta_2 = \frac{2\lambda}{\varepsilon}, \quad \sin\delta_3 = \frac{3\lambda}{\varepsilon}, \ldots;$$

ces ondes sont produites par la réunion sur un même plan des vibrations qui sont actuellement en A, B″, C″,... ou en A, B‴, C‴,....

Influence du déplacement de la source. — Supposons d'abord que le réseau soit fixe et la source mobile. Si la source s'approche ou s'éloigne du réseau, la longueur d'onde de la lumière incidente (qui serait λ, la source étant en repos) devient $\lambda\left(1 \mp \frac{u}{V}\right)$; la déviation δ' imprimée par le réseau aux ondes paragéniques est alors

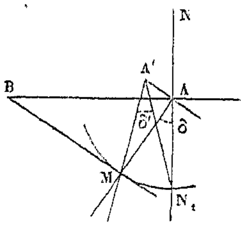
$$\sin\delta' = \frac{\lambda\left(1 \mp \frac{u}{V}\right)}{\varepsilon} = \sin\delta\left(1 \mp \frac{u}{V}\right).$$

Telles sont les déviations que l'on obtiendrait en observant avec un réseau fixe la lumière des étoiles qui ont un mouvement propre.

Influence du déplacement du réseau. — Supposons maintenant que le réseau soit mobile et la source fixe, et considérons les trois cas auxquels on pourra ramener un déplacement quelconque :

1° Le mouvement du réseau est perpendiculaire au plan de diffraction. Soient encore A et B (*fig.* 7) deux points homologues de deux

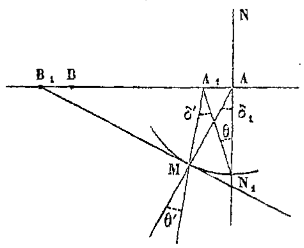
Fig. 7.



ouvertures voisines; au bout d'une période T la vibration du point A parvient à la surface d'une sphère de rayon λ à laquelle on mènera un plan tangent par le point B; le point A est alors en A′, à une distance égale à $uT = u\frac{\lambda}{V} = a\lambda$, de sorte que AM est la direction absolue et A′M la direction apparente du rayon diffracté. Comme $A'N_1$ est aussi la direction apparente du rayon incident, on voit que la déviation réelle δ et la déviation apparente δ' ne diffèrent que d'une quantité de l'ordre de a^2, la droite AA′ étant perpendiculaire au plan MAN_1.

2° Le mouvement du réseau est perpendiculaire au rayon incident et dans le plan de diffraction. Lorsque la vibration du point A (*fig.* 8)

Fig. 8.



est parvenue sur la sphère de rayon λ, ce point A a parcouru l'espace $AA_1 = a\lambda$, et le point B un espace égal BB_1. Comme le point B_1 est maintenant dans le même état vibratoire que celui que nous avons considéré en A, on mènera le plan tangent B_1M à la sphère précédente; AM sera la direction absolue et A_1M la direction apparente du rayon diffracté, MAN_1 la déviation absolue δ_1 et MA_1N_1 la déviation apparente δ'. On a, en négligeant toujours le carré de l'aberration,

$$(2) \qquad \sin\delta_1 = \frac{\lambda}{AB_1} = \frac{\lambda}{\varepsilon + a\lambda} = \frac{\dfrac{\lambda}{\varepsilon}}{1 + a\dfrac{\lambda}{\varepsilon}} = \sin\delta(1 - a\sin\delta).$$

L'examen de la figure donne les relations

$$\delta' + \theta' = \delta_1 + \theta, \quad \theta = \frac{AA_1}{\lambda} = a, \quad \theta' = \frac{AA_1\cos\delta_1}{A_1M} = a\cos\delta.$$

On en déduit

$$\delta' = \delta_1 + a(1 - \cos\delta), \quad \sin\delta' = \sin\delta_1 + a(1 - \cos\delta)\cos\delta.$$

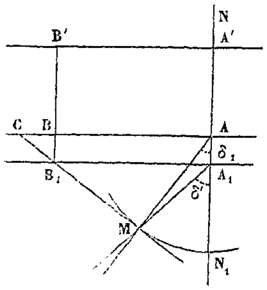
En remplaçant $\sin\delta_1$ par sa valeur tirée de l'équation (2), il reste

$$\sin\delta' = \sin\delta, \quad \text{ou} \quad \delta' = \delta.$$

La déviation apparente est donc la même que si le réseau était immobile.

3° Le mouvement du réseau est parallèle aux rayons incidents. Si le réseau marche dans le sens de la lumière, il s'éloigne des ondes incidentes et parcourt un espace AA_1 (*fig.* 9) pendant le temps que met

Fig. 9.



la vibration de la deuxième onde B' à atteindre la deuxième ouverture qui est venue en B_1. On a encore, sans erreur sensible,

$$AA_1 = BB_1 = a\lambda.$$

Quand la vibration B' est en B_1, la vibration du point A se trouve donc sur une sphère de rayon égal à $\lambda + a\lambda$, à laquelle il faut mener du point B_1 un plan tangent BM pour avoir la direction absolue AM du rayon diffracté, A_1M étant la direction apparente. Désignons par δ_1 la déviation absolue, et par δ' la déviation apparente. En prolongeant MB_1 jusqu'à la rencontre de AB au point C, on a

$$BC = BB_1 \cot\delta_1 = \frac{a\lambda}{\operatorname{tang}\delta}.$$

Le triangle AMC donne

$$\sin\delta_1 = \frac{\lambda + a\lambda}{\varepsilon + BC} = \frac{\lambda(1+a)}{\varepsilon\left(1 + \frac{\lambda}{\varepsilon}\frac{a}{\operatorname{tang}\delta}\right)} = \sin\delta\,\frac{1+a}{1 + a\cos\delta},$$

ou bien

$$\sin\delta_1 = \sin\delta + a(1 - \cos\delta)\sin\delta,$$

d'où l'on déduit

$$\delta_1 = \delta + a(1 - \cos\delta)\operatorname{tang}\delta = \delta + a\operatorname{tang}\delta - a\sin\delta.$$

Le triangle AMA_1 donne aussi

$$\delta' - \delta_1 = \frac{AA_1 \sin\delta_1}{A_1 M} = a \sin\delta.$$

En remplaçant dans cette dernière équation δ_1 par sa valeur, il vient

$$\delta' - \delta = a \tang\delta.$$

Il est clair que la même chose a lieu de l'autre côté de la normale, de sorte que le changement de double déviation est

$$2a \tang\delta.$$

De plus, si dans une expérience le réseau se rapproche de la source et que dans une autre il s'en éloigne, la déviation sera augmentée dans le premier cas, diminuée dans le second, de sorte que le changement total, quand on passera d'une expérience à l'autre, sera

$$4a \tang\delta.$$

C'est là le résultat auquel était parvenu M. Babinet. Si le mouvement du réseau est quelconque, on ramènera le problème aux précédents en remplaçant ce mouvement par ses projections sur le plan du réseau et sur la normale à ce plan; cette dernière composante aura seule de l'influence sur la direction du rayon diffracté.

Cas d'une source terrestre. — Le changement de déviation que l'on vient de trouver est d'un ordre de grandeur qu'il serait très-facile de mettre en évidence; malheureusement, ce changement s'évanouit quand on opère avec une source de lumière terrestre, ou, ce qui revient au même, avec la lumière solaire convenablement réfléchie.

Supposons, en effet, que le réseau et la source marchent dans le sens des rayons incidents, la longueur d'onde de la lumière incidente est alors $\lambda(1 - a)$, et la déviation que l'on observerait si le réseau était immobile est donnée par l'équation

$$\sin\delta = \frac{\lambda}{\varepsilon}(1 - a). \tag{3}$$

D'autre part, la déviation apparente δ' est

$$\delta' - \delta = a \operatorname{tang} \delta,$$

d'où l'on déduit

$$\sin \delta' = \sin \delta + a \sin \delta.$$

Remplaçons enfin $\sin \delta$ par sa valeur tirée de l'équation (3), il vient

$$\sin \delta' = \frac{\lambda}{\varepsilon}.$$

On a donc pour la déviation apparente δ' la même expression que si la source et le réseau étaient immobiles.

Le résultat est le même pour le cas où le réseau et la source marchent en sens contraire de la propagation des ondes incidentes, car il suffit alors de remplacer dans les calculs qui précèdent a par $-a$, ce qui ne change rien. Il en serait de même enfin si le réseau et la source avaient un mouvement dans une direction quelconque, puisque l'on pourrait remplacer le déplacement par deux autres, l'un parallèle et l'autre perpendiculaire au plan du réseau, lesquels seraient sans influence.

On peut donc énoncer la proposition suivante, qui rend compte de l'insuccès de mes premières expériences:

La lumière solaire et celle des sources artificielles sont impuissantes à manifester par les phénomènes de diffraction le mouvement de translation de la Terre.

VI. — *Nouvelles expériences.*

Malgré cette démonstration, je n'ai pas cru inutile de faire encore quelques expériences pour vérifier, avec toute la précision possible : 1° que la lumière solaire et celle d'une source terrestre de même période éprouvent toujours la même diffraction; 2° que le mouvement de la Terre n'a pas d'influence sur cette diffraction. Ces nouvelles vérifications n'auront d'intérêt que si les erreurs expérimentales rigoureusement évaluées se trouvent inférieures au déplacement que l'on avait déduit d'une théorie incomplète, c'est-à-dire à $\frac{1}{10000}$.

Première expérience. — 11 janvier 1870; 11 heures du matin.

La lumière solaire, réfléchie dans la direction est-ouest par un prisme à réflexion totale, éclaire la moitié de la fente d'un collimateur, dont l'autre moitié est éclairée par une étincelle d'induction entre deux fils de magnésium. La lumière tombe normalement sur le réseau à 1801 traits, et l'on observe dans le cinquième spectre la correspondance des raies brillantes du magnésium aux raies obscures du Soleil. On croit, d'après la pureté du phénomène, pouvoir affirmer que la coïncidence a lieu à moins de $\frac{1}{10}$ de la distance de deux raies (*voir* le spectre de M. Angström), ce qui ferait environ 13 secondes. La déviation du groupe *b* étant d'environ 44 degrés, la théorie de M. Babinet donnerait un changement de 20 secondes.

Deuxième expérience. — 29 janvier 1870; 1 heure du soir.

La même expérience a été répétée avec un réseau qui m'a été fourni par MM. Brunner, et qui porte 200 traits par millimètre sur une largeur de 15 millimètres, ce qui permet de mieux utiliser le pouvoir optique de la lunette d'observation. En outre, la lumière solaire, avant d'entrer dans le collimateur, traverse un prisme à vision directe qui permet de ne laisser tomber sur la fente que de la lumière verte; les spectres successifs n'empiètent plus, et l'on peut les observer plus loin.

On a suivi les mêmes raies obscures et brillantes jusque dans le neuvième spectre, où la déviation était d'environ 68 degrés, sans constater le moindre défaut de coïncidence. Le calcul donnerait alors un angle de 50 secondes, c'est-à-dire une quantité bien supérieure à l'erreur possible.

Troisième expérience. — 3 avril 1870; $11^h 30^m$ du matin.

Dans les expériences précédentes, il n'y avait pas continuité entre les raies dont on devait établir la coïncidence, puisque les unes étaient obscures et les autres brillantes, ce qui rendait l'observation plus difficile. On a pris cette fois pour lumière artificielle une série d'étincelles d'induction entre deux morceaux de sodium. La lumière ainsi obtenue est très-éclatante; elle se compose, quand on l'analyse, d'une bande jaune sur laquelle se détachent deux traits noirs parfaitement nets, correspondant aux deux raies D et d'une largeur tout à fait comparable à celles du spectre solaire. Le reste de l'expérience a été disposé de la même manière que précédemment, et l'on a observé le cinquième spectre. Un changement de coïncidence de 5 secondes eût été parfaitement apprécié : on n'en a vu aucun. Comme la déviation était d'environ 36 degrés, l'erreur relative est inférieure à $\frac{1}{25000}$.

L'identité des deux sources de lumière me paraissant ainsi vérifiée, j'ai cherché jusqu'à quel point on pouvait affirmer que le mouvement de la Terre ne produit point de déplacement.

Quatrième expérience. — 25 avril 1870 ; midi.

Le goniomètre a été installé sur l'axe tournant que j'ai décrit précédemment, et l'on a observé, avec une excellente lunette de 27 centimètres de longueur focale, la déviation des raies D dans le cinquième spectre du réseau de MM. Brunner. Le réticule de la lunette était formé de quatre fils d'araignée, dont trois parallèles et équidistants, et l'autre perpendiculaire aux trois premiers. Les fils parallèles du réticule étaient un peu obliques à la direction des raies ; les deux raies D étaient situées sensiblement sur le croisement de deux des fils parallèles avec le fil horizontal, et l'on n'a aperçu aucun dépointement quand l'appareil était dirigé alternativement vers l'est ou vers l'ouest.

La déviation de l'une des raies D était.........	35°52′40″
Celle de l'autre..........................	35°50′10″
Différence..........................	2′30″

La distance des deux raies D dans le second spectre était d'environ 1 minute, et l'on distinguait très-nettement la raie du nickel, qui est située entre les deux précédentes et partage leur distance en deux parties qui sont à peu près comme 2 et 3.

Le pouvoir optique du réseau et de la lunette combinés est donc mesuré par un angle inférieur à 25 secondes ; prenons 20 secondes, par exemple. L'objectif de la lunette a 30 millimètres de diamètre et permet de distinguer deux traits distants d'un millimètre et situés à une distance de 30 mètres, ce qui correspond à un angle de 7 secondes : c'est à peu près, d'après Foucault, le maximum de pénétration d'une lentille de cette dimension. Comme la lumière diffractée par le réseau ne couvrait que la moitié de l'objectif, il n'y a pas à s'étonner que le pouvoir optique ait au moins diminué de moitié. Si l'instrument peut séparer un angle de 20 secondes, il permet de constater une coïncidence avec une erreur moindre que 3 secondes. Les astronomes ont constaté très-souvent que la précision de pointé d'une lunette est bien supérieure à ce que l'on pourrait déduire de sa pénétration, et je crois que l'on peut aisément pointer avec une erreur inférieure au dixième de l'angle minimum que la lunette dont on se sert permet de séparer. Dans des expériences que je rapporterai plus loin sur des mesures d'épaisseur, on visait au millième de millimètre avec un microscope qui ne pouvait pas distinguer les traits d'un réseau au centième de millimètre. Je crois donc qu'un déplacement de 3 secondes n'aurait pas échappé dans cette expérience, qui a été faite avec le plus grand soin et répétée un grand nombre de fois. L'erreur expérimentale était ici bien inférieure à l'aberration et au déplacement auxquels on aurait pu s'attendre.

VII. — *Double réfraction rectiligne.*

Je n'ai pas l'intention de discuter ici les théories qui ont été proposées pour évaluer l'influence du mouvement des corps réfringents sur la vitesse de la lumière qui les traverse. Mais j'ai réalisé avec le spath d'Islande et le quartz un certain nombre d'expériences que je puis publier maintenant, parce que je n'ai pas l'intention de les répéter. Comme j'espérais y trouver quelque effet produit par le mouvement de translation de la Terre, il est nécessaire que je dise quelques mots de la théorie pour faire comprendre les raisons qui m'ont conduit à cette tentative.

Nous avons vu plus haut qu'en s'appuyant sur la formule de Newton pour la propagation des ondes sonores et sur certaines hypothèses relatives à la densité et à l'élasticité de l'éther, Fresnel a montré que la vitesse de propagation de la lumière dans un milieu en mouvement était modifiée de la quantité $u\left(1-\frac{1}{n^2}\right)$. Les raisonnements de Fresnel ne s'appliquent plus sans modification aux milieux biréfringents, puisqu'on est obligé d'y supposer une élasticité variable suivant les différentes directions pour expliquer la double réfraction; mais la formule finale peut servir de guide pour faire comprendre au moins l'ordre de grandeur des effets que produirait le mouvement de la Terre. En tout cas on peut faire quelques hypothèses et voir si les conséquences auxquelles elles conduisent sont compatibles avec les résultats de l'expérience.

L'idée la plus simple est d'appliquer aux deux systèmes d'ondes fournies par la double réfraction la formule trouvée par Fresnel pour les corps isotropes, sans se préoccuper de la manière dont il sera possible d'établir cette formule. En tenant compte de la variation de longueur d'onde de sources terrestres avec la direction suivant laquelle la lumière se propage, on trouve alors que les phénomènes d'interférence produits par une lame de spath d'Islande taillée parallèlement à l'axe doivent être altérés de $\frac{1}{24000}$ suivant que la lumière incidente marche dans le sens ou en sens contraire du mouvement de translation de la Terre.

Une deuxième hypothèse assez naturelle serait d'admettre que la vitesse d'entraînement est la même pour les deux systèmes d'ondes; il est facile de démontrer que l'effet produit est alors plus grand qu'avec la première hypothèse.

Les méthodes généralement employées pour étudier les phénomènes d'interférence dus à la double réfraction ne permettent pas d'apprécier des changements aussi petits. Dans les expériences de MM. Fizeau et Foucault relatives à l'observation des phénomènes d'interférence à l'aide du spectre, la différence de marche des rayons interférents a atteint 7400 longueurs d'onde pour la région du spectre voisin de la raie G, ce qui ferait environ 8000 longueurs d'onde pour l'extrémité la plus réfrangible du spectre. Supposons même que l'on parvienne à produire des bandes avec une différence de marche de 12000 longueurs d'onde pour cette région. Il est facile de voir qu'il y aurait alors dans le spectre tout entier environ 6000 bandes obscures; le déplacement qu'il faudrait observer serait d'un quart de la distance de deux bandes pour le rouge extrême, et d'une demi-bande pour le violet, c'est-à-dire qu'il y aurait dans ce dernier cas substitution d'une bande obscure à une bande brillante. L'expérience serait très-difficile, parce qu'il faudrait multiplier les prismes pour arriver seulement à distinguer des raies aussi fines.

D'un autre côté, les microscopes polarisants avec lesquels on observe les courbes d'interférence produites par la double réfraction ont habituellement des objectifs à courts foyers, parce qu'on n'emploie en général que des lames cristallines minces. Mais si le cristal est un peu épais, les courbes deviennent très-resserrées et cessent bientôt d'être visibles, même avec l'emploi d'une lumière homogène; pour les apercevoir, il suffit d'observer avec une lunette à long foyer. La disposition de l'expérience est la suivante.

On prend pour source de lumière soit la flamme de l'alcool salé, soit la flamme d'un mélange d'alcool et d'esprit de bois, comme l'a fait M. Fizeau, soit plus simplement encore la flamme d'un bec de gaz à courant d'air, dans lequel on introduit un sel de soude, du phosphate par exemple; ce dernier procédé est celui qui m'a donné la lumière la plus constante et la plus homogène. Les rayons incidents sont polarisés par un large prisme de Nicol, et traversent ensuite une ou plusieurs lames de spath d'Islande taillées parallèlement à l'axe et dont les sections principales sont parallèles entre elles et à 45 degrés du plan primitif de polarisation, puis une lunette astronomique de 30 centimètres environ de longueur focale. En observant à l'aide d'un oculaire à réticule muni d'un analyseur, on aperçoit de très-belles franges hyperboliques, même avec des cristaux très-épais. Le champ de l'observation est considérablement rétréci, mais les franges sont très-larges.

Première expérience. — Juillet 1869.

Ces premières expériences ont eu surtout pour but d'étudier les circonstances du phénomène. J'avais alors à ma disposition trois lames de spath dont les épaisseurs étaient :

N° I..................................	$e = \overset{\text{mm}}{4,8}$
N° II..................................	$e = 18,0$
N° III..................................	$e = 34,0$

Les deux premières donnent de très-belles hyperboles. Avec la troisième le phénomène est confus, mais on l'améliore singulièrement en y ajoutant la première, ce qui donne une épaisseur totale de $38^{mm},8$. Cette réapparition des franges par un accroissement de différence de marche a été expliquée, comme on sait, par M. Fizeau, par la coïncidence de deux longueurs d'onde différentes dans la lumière des sels de soude. La différence de marche dans cette expérience est égale au produit de l'épaisseur par la différence des deux indices de réfraction ordinaire et extraordinaire, ce qui donne 11330 longueurs d'onde, ou bien 22660 franges brillantes et obscures. L'appareil a été dirigé alternativement, et un grand nombre de fois, dans le sens ou en sens contraire du mouvement de la Terre, et les franges n'ont pas éprouvé le moindre déplacement par rapport au réticule. Un changement d'un quart de frange eût été distingué sans hésitation; or la formule de Fresnel donnerait un déplacement de près d'une frange, c'est-à-dire qu'il y aurait substitution des franges obscures aux franges brillantes.

Deuxième expérience. — 25 mars 1870; $11^h\,30^m$ du soir.

On s'est servi d'une nouvelle lame de spath plus épaisse

N° IV .... $e = 55^{mm}$

La différence de marche est 16060 longueurs d'onde, ce qui fait 32000 franges. L'appareil étant dirigé alternativement vers l'est ou vers l'ouest, on n'a observé aucun déplacement. On aurait aperçu un changement de $\frac{1}{6}$ de frange : la formule de Fresnel donnerait $1\ \frac{1}{2}$ frange.

En ajoutant les lames n° II et n° IV, ce qui fait une épaisseur totale de 73 millimètres, les franges sont plus nettes, et l'on aurait pu distinguer un déplacement de $\frac{1}{10}$ de frange. Le résultat est encore négatif. La différence de marche est alors de 21300 longueurs d'onde.

Troisième expérience. — 4 avril 1870; $11^h\,45^m$ du matin.

J'avais alors une cinquième lame

N° V .... $e = 81^{mm}$

L'expérience a été faite en ajoutant les deux lames n° IV et n° V, ce qui faisait une épaisseur de 136 millimètres. Les franges sont très-nettes et un déplacement de $\frac{1}{4}$ de frange serait apprécié. Résultat négatif. La différence de marche est de 39 700 longueurs d'onde.

Quatrième expérience. — Même jour; midi.

On a ajouté les trois lames nº II, nº IV et nº V, ce qui fait une épaisseur de 154 millimètres. La différence de marche est d'environ 45 000 longueurs d'onde, le nombre de franges 90 000; les franges sont très-belles, et l'on juge qu'il n'y a pas un déplacement de $\frac{1}{10}$ de frange, quand l'appareil est alternativement dirigé vers l'est ou vers l'ouest. Le changement, s'il existe, n'est donc pas de $\frac{1}{900000}$, ou en nombres ronds $\frac{1}{1000000}$.

Il me paraît résulter de ces observations que, dans les limites de précision que l'expérience peut atteindre, le mouvement de la Terre est absolument sans influence sur la différence de marche apparente qui s'établit entre les ondes ordinaires et extraordinaires dans la double réfraction. Comme la formule de Fresnel donnerait dans les dernières expériences un déplacement de plusieurs franges, on peut en conclure aussi que cette formule n'est pas applicable aux milieux biréfringents.

Étant parvenu à cette différence de marche de 45 000 longueurs d'onde, voisine de celle à laquelle on était arrivé pour les anneaux de Newton, sans que l'interférence cessât de se produire, j'ai essayé si l'on pouvait aller plus loin, et je me suis procuré trois nouvelles lames de spath :

Nº VI	$e = 55^{\text{mm}}$
Nº VII	$e = 50$
Nº VIII	$e = 118$

En prenant pour source de lumière la flamme d'un bec de gaz faiblement colorée par du phosphate de soude, j'ai observé encore des franges très-nettes avec les combinaisons suivantes :

1° Avec les lames nº IV, nº VI et nº VIII ajoutées, ce qui faisait une épaisseur de 228 millimètres, et une différence de marche de 66 576 longueurs d'onde;

2° En ajoutant aux précédentes la lame nº V, ce qui faisait une épaisseur totale de 309 millimètres et une différence de marche de 90 228 longueurs d'onde;

3° Enfin, en ajoutant encore la lame n° VII : l'épaisseur est alors de 359 millimètres et la différence de marche de 104 828 ou, en nombres ronds, 105 000 longueurs d'onde.

A l'époque où ces dernières expériences ont été faites, l'appareil n'était plus disposé pour étudier l'influence du mouvement de la Terre. Je n'ai pas jugé utile de le rétablir, parce que je n'étais parvenu qu'à une différence de marche à peu près double et que l'accroissement de sensibilité qui résultait de cette circonstance était compensé par une moins grande netteté des franges; on n'aurait pas atteint en réalité une précision plus grande.

Je terminerai ce sujet par une dernière remarque. On peut s'étonner que la double réfraction du spath d'Islande se prête si facilement à la production de phénomènes d'interférence à grande différence de marche, malgré les épaisseurs énormes (36 centimètres) de cristal qu'il faut employer. Cela tient, je crois, à ce que le spath d'Islande est peut-être la substance transparente la plus homogène que l'on puisse se procurer et que les surfaces n'ont pas besoin d'être travaillées avec une très-grande perfection, parce que de petites variations d'épaisseur n'ont qu'une faible influence sur la différence de marche, tandis que, si l'on produit des anneaux de réflexion avec des lames de verre, les moindres irrégularités des surfaces, leur manque de parallélisme et les défauts d'homogénéité ne tardent pas à empêcher toute interférence régulière.

VIII. — *Double réfraction circulaire.*

J'ai cherché si le pouvoir rotatoire du quartz ne donnerait pas non plus de résultat positif dans la question du mouvement de la Terre. L'expérience présente des difficultés nouvelles, et la théorie sera encore plus douteuse que dans le cas de la double réfraction ordinaire. Il y a néanmoins dans la double réfraction circulaire une circonstance avantageuse; c'est que la rotation éprouvée par le plan de polarisation du rayon qui traverse le quartz dans la direction de l'axe est à peu près en raison inverse du carré de la longueur d'onde. Comme le mouvement de la Terre influe directement sur la longueur d'onde, on peut espérer que le pouvoir rotatoire variera plus rapidement que la différence de marche due à la double réfraction.

On sait par quelle ingénieuse hypothèse Fresnel a expliqué les phénomènes particuliers que présente le quartz dans le voisinage de l'axe de cristallisation. Il admet qu'une onde plane perpendiculaire à l'axe, polarisée rectilignement, se partage dans le cristal en deux ondes planes polarisées circulairement en sens contraires, et se propageant avec des vitesses différentes; ces deux rayons circulaires peuvent même être séparés par la réfraction, malgré la faible différence qui existe entre leurs vitesses de propagation.

Cette théorie de Fresnel n'est peut-être qu'une image, une représentation géométrique du phénomène, ne correspondant pas à la véritable interprétation mécanique. Quoi qu'il en soit, en partant de l'hypothèse de Fresnel, on peut chercher, par des considérations analogues à celles qui ont servi de guide pour la double réfraction ordinaire, quelle sera l'influence du mouvement de la Terre sur la vitesse de propagation des deux systèmes d'ondes polarisées circulairement, et par suite sur la rotation du plan de polarisation. On trouve ainsi que, si la formule de Fresnel relative à l'entraînement des ondes lumineuses est applicable aux deux rayons polarisés circulairement, le pouvoir rotatoire du quartz doit varier de $\frac{1}{5000}$ quand la lumière marche dans le sens ou en sens contraire du mouvement de la Terre, et qu'il doit varier d'une quantité plus grande encore si l'on peut admettre que l'entraînement est le même pour les deux systèmes d'ondes.

Discussion des méthodes d'observation. — Pour que l'expérience conduise à un résultat concluant, il faut donc pouvoir manifester un changement de $\frac{1}{5000}$ dans la rotation du plan de polarisation, c'est-à-dire un changement d'un demi-degré pour une rotation de 2500 degrés, ou de 7 circonférences, ce qui correspond à une épaisseur de quartz de 115 millimètres. L'expérience m'a paru mériter d'être tentée. J'ai cherché d'abord à modifier les méthodes d'observation habituelles qui ne comportent pas une précision suffisante, et à me procurer des morceaux de quartz homogènes sous de grandes épaisseurs. On sait combien il est difficile de trouver un canon de quartz, jouissant sous une certaine épaisseur d'un pouvoir rotatoire bien défini; parmi un grand nombre d'échantillons essayés, j'en ai trouvé quelques-uns dans lesquels on pouvait ménager des régions assez pures, en particulier un quartz droit, de 110 millimètres d'épaisseur, appartenant à M. Fizeau.

Le pouvoir rotatoire du quartz a été déterminé par un assez grand nombre d'observateurs ; je ne rapporterai que les résultats relatifs à la raie D, en insistant sur les procédés de mesure.

Biot a opéré surtout avec la lumière blanche, et, en appliquant la formule de dispersion rotatoire qu'il avait découverte au calcul des rotations relatives aux différentes raies de Frauenhofer, il a obtenu pour la rotation du plan de polarisation de la raie D, produite par une lame de quartz de 1 millimètre d'épaisseur, le nombre 20°,98.

M. Broch (1), en 1846, a appliqué le premier une méthode rigoureuse à la mesure des rotations relatives aux différentes raies. Cette méthode consiste à produire la rotation à l'aide d'un quartz épais, et à recueillir la lumière après qu'elle a traversé l'analyseur sur un prisme réfringent. On voit ainsi dans le spectre une ou plusieurs bandes obscures correspondant aux rayons qui sont éteints par l'analyseur. Dans ces expériences, la rotation relative à la raie D, pour une épaisseur de 1 millimètre, a été trouvée de 21°,67.

M. Wiedeman (2) a amélioré la méthode en observant le spectre avec une lunette à réticule, que l'on pointait d'abord sur une des raies de Frauenhofer, et sur laquelle on amenait, en tournant l'analyseur, le milieu d'une des bandes d'extinction. Les mesures de M. Wiedeman n'ont d'ailleurs pas porté sur le quartz.

M. Stephan (3) a indiqué, pour déterminer les rotations, une méthode singulière, qui consiste à faire tomber le faisceau de lumière qui sort du corps actif sur un cône de verre dont l'ouverture angulaire est double de l'angle de polarisation par réflexion. Ceux des rayons qui sont polarisés dans un plan perpendiculaire au plan d'incidence ne sont pas réfléchis par le cône, de sorte qu'en recevant ces rayons sur un écran on y produit des colorations variées. M. Stephan a d'ailleurs obtenu pour la raie D le même nombre que M. Broch.

---

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XXXIV, p. 119.
(2) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XXXIV, p. 121.
(3) *Pogg. Annalen*, t. CXXII, p. 631.

Dans la méthode de M. Broch, la lumière incidente traverse d'abord une fente étroite, ce qui affaiblit beaucoup l'intensité de la lumière. M. Gernez [1], dans un travail remarquable sur le pouvoir rotatoire des liquides et des vapeurs, a singulièrement augmenté la précision des mesures en opérant de la manière suivante. La lumière incidente était un large faisceau de rayons solaires qui, après avoir traversé le polariseur, le corps actif et l'analyseur, tombaient sur une lentille cylindrique au foyer de laquelle se trouvait la fente d'un spectroscope. Le spectre avait ainsi un grand éclat, et les bandes d'extinction étaient beaucoup plus étroites, ce qui permettait d'en viser le milieu avec plus d'exactitude.

M. Fizeau [2], à propos de ses recherches sur la dilatation et la double réfraction du quartz, a déterminé aussi le pouvoir rotatoire relatif à la lumière jaune de la soude, et a trouvé le nombre 21°,76, qui diffère notablement des précédents.

M. Wild (1865) a répété cette expérience à l'aide d'un appareil imaginé par lui, le *polaristrobomètre*, dont la pièce originale est une double lame de quartz produisant les franges de Savart, et il a retrouvé exactement le nombre de M. Broch, comme moyenne de plusieurs expériences très-concordantes.

Enfin, tout récemment, M. Pape [3], dans un travail sur la polarisation circulaire de quelques sels cristallisés, a repris encore la mesure relative à la raie D pour le quartz, et a trouvé cette fois 21°,64.

Il suffit de comparer les résultats obtenus par les différents observateurs, pour être assuré que la plupart des méthodes employées manquaient de précision ; on peut le voir aisément par la discussion des expériences.

Supposons, en effet, qu'on emploie la lumière solaire ou celle d'une lampe. Les bandes que l'on observe dans le spectre correspondent à des rayons pour lesquels la rotation diffère d'un nombre entier de demi-circonférences ; quand on tourne l'analyseur de 180 degrés, une bande noire vient se mettre à la place de la suivante, en marchant vers le

---

(1) *Annales scientifiques de l'École Normale supérieure*, t. I; 1864.

(2) *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. II, p. 176.

(3) *Pogg. Annalen*, t. CXXXIX, p. 227.

violet ou vers le rouge, suivant que l'on a tourné l'analyseur dans le sens ou en sens contraire de la rotation elle-même. Or, si la rotation est faible, il n'y aura dans le spectre qu'un petit nombre de bandes, deux ou trois; ces bandes se déplaceront beaucoup pour une petite rotation de l'analyseur, mais il sera difficile de déterminer le point qui correspond au maximum d'extinction. Si la rotation est considérable, les bandes seront nombreuses, mais elles se déplaceront très-peu quand on tournera l'analyseur de plusieurs degrés. Toutefois, la précision sera d'autant plus grande qu'il sera plus facile de mettre en évidence la différence des rotations pour deux rayons voisins, c'est-à-dire le déplacement d'une bande, quand on passe d'un rayon à l'autre; le déplacement sera d'autant plus sensible, que les bandes seront plus étroites, et il y aura toujours avantage à opérer sur de grandes rotations. On peut préciser ce raisonnement par un exemple. La rotation étant à peu près en raison inverse du carré de la longueur d'onde, deux rayons dont les carrés des longueurs d'onde sont entre eux comme 1 et 2 éprouveront des rotations qui seront entre elles comme 2 et 1. On trouve ainsi que le rayon dont la longueur d'onde est égale à $0^{mm},0004164$, et qui est situé à peu près à égale distance des raies G et H, c'est-à-dire sensiblement sur le bord du spectre que l'on peut facilement observer, éprouve une rotation double de celle qui correspond à la raie D. En particulier, si l'on voulait déterminer les rotations à $\frac{1}{2000}$ près, il faudrait pouvoir constater un déplacement de bandes qui serait la $\frac{1}{2000}$ partie de la distance de la raie D à l'extrémité la plus réfrangible du spectre; il est clair que ce déplacement sera d'autant plus apparent que les bandes seront plus étroites. Si la rotation relative à la raie D était de 20 circonférences, il y aurait dans le spectre environ 50 bandes, le déplacement serait de $\frac{1}{40}$ de bande seulement, et l'épaisseur du quartz de 32 centimètres.

L'emploi d'une source de lumière homogène présente des difficultés analogues. En effet, il est nécessaire d'abord que la source ait un grand éclat, car la direction du plan de polarisation étant déterminée par l'extinction de la lumière, cette extinction se maintiendra pour une rotation de plusieurs degrés de l'analyseur, si la lumière est faible. On peut bien prendre aussi les moyennes des directions pour lesquelles la lumière reparaît à droite et à gauche, mais les nombres isolés sont alors très-discordants, et la moyenne en est évidemment affectée. Or, pour la lumière jaune des sels de soude en particulier (il en serait de même pour toute autre source homogène), quand on veut augmenter l'éclat par un moyen quelconque, on produit en même temps des rayons nouveaux, violets, bleus, et surtout orangés et rouges, même quand on reste très-loin des circonstances dans lesquelles il y a élargissement ou renversement de deux raies D; quand on éteint cette lumière par un analyseur, après qu'elle a traversé une plaque de quartz, on laisse passer, surtout si la rotation est considérable, la plus grande partie des rayons étrangers aux rayons jaunes; les images prennent alors une teinte lilas qui présente une certaine analogie avec la *teinte sensible* de Biot, mais qui n'est pas une *teinte de passage*. La présence de cette lumière étrangère nuit beaucoup à la précision des mesures.

On peut même aller plus loin et prévoir le sens des erreurs dans les divers modes d'observation. Avec la lumière solaire, le maximum d'intensité du spectre est un peu plus réfrangible que la raie D (¹). Pour une bande d'absorption qui ne coïncide pas avec le maximum d'intensité, le milieu apparent de la bande sera un peu plus éloigné du maximum que les rayons réellement éteints par l'analyseur. On obtiendra donc pour les rayons moins réfrangibles que ceux qui correspondent au maximum d'intensité du spectre des rotations trop grandes et pour les rayons plus réfrangibles des rotations trop petites. De plus, la forme de la courbe des intensités déterminée par Frauenhofer montre que cet effet sera surtout marqué pour les rayons peu éloignés du maximum. C'est précisément le cas de la raie D, et l'on doit s'attendre à ce que les rotations obtenues pour cette raie avec la lumière solaire soient trop grandes. Or les nombres donnés par M. Broch et tous les physiciens allemands que j'ai cités sont au contraire trop faibles.

Il se passe quelque chose d'analogue dans l'appareil de M. Wild, où, en employant la lumière jaune des sels de soude, on détermine la direction du plan de polarisation par la disparition des franges de Savart. On ne peut juger de la disparition des franges qu'avec une approximation de même ordre que celle des expériences photométriques, et la

(¹) *Voir* pour cette discussion le Mémoire de M. Gernez et un Mémoire de Verdet (*Annales de Chimie et de Physique*, 3ᵉ série, t. LXIX).

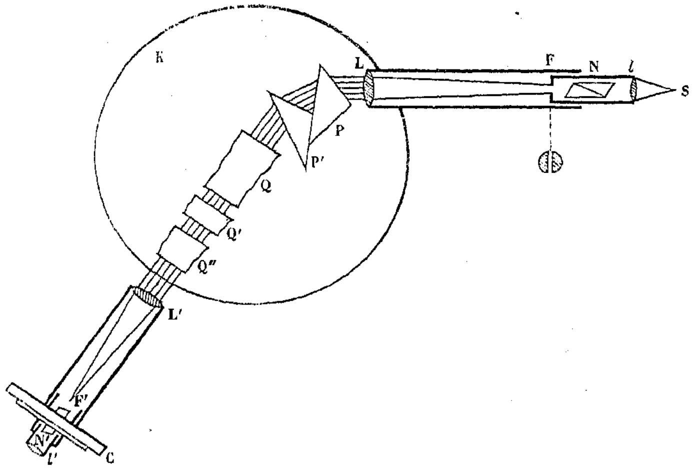
persistance des impressions sur la rétine conserve l'effet physiologique alors même que les franges ont disparu, ce qui constitue une première difficulté. Mais si la lumière est un peu éclatante, ce qui est nécessaire, les franges existeront encore pour la lumière rouge, quand celles du jaune auront disparu. On est entraîné alors à déplacer un peu l'analyseur, pour affaiblir les bandes rouges sans faire dominer les franges jaunes. Ce compromis donne évidemment une rotation trop faible. Enfin la méthode est inapplicable aux grandes rotations, parce qu'alors les franges ne disparaissent jamais.

Le même raisonnement s'applique au cas où l'on détermine le plan de polarisation par l'extinction maximum pour de faibles rotations. Mais, si les rotations sont très-grandes, les petits déplacements de l'analyseur dans le voisinage de la position qui éteint la lumière jaune n'ont pas d'influence sur l'éclat moyen des rayons étrangers, rouges ou bleus, et l'erreur doit être plus faible. Le nombre donné par M. Fizeau, ayant été calculé « d'après plusieurs mesures prises sur des cristaux très-épais » doit donc être beaucoup plus exact ; il me paraît en effet très-voisin de la vérité.

Quoi qu'il en soit, les méthodes habituelles ne paraissent pas assez sensibles pour manifester des changements de rotation de $\frac{1}{2000}$: je m'en suis assuré par plusieurs essais préliminaires, et j'ai cherché à les modifier. On obtient très-facilement une source de lumière d'un grand éclat, et absolument homogène, en élargissant la fente d'un spectroscope dans lequel on observe le spectre d'une vapeur incandescente. Si les raies ou plutôt les bandes colorées que l'on obtient alors n'empiètent pas les unes sur les autres, on pourra juger de l'extinction avec une très-grande exactitude. L'empiétement des bandes n'est même pas un grand obstacle, si leurs bords sont bien nets, parce qu'on les éteint successivement par l'analyseur ; ainsi en se servant des raies brillantes du magnésium, on peut voir très-nettement disparaître chacune à leur tour, quand on tourne l'analyseur, les bandes qui correspondent aux trois raies brillantes que ce métal possède dans le groupe *b*. La différence des longueurs d'onde des deux raies les plus voisines est d'environ $\frac{1}{1000}$, et le changement de rotation, de $\frac{1}{500}$. Néanmoins il y a tout avantage à choisir des spectres comme ceux du sodium, du thallium ou de l'argent, dans lesquels se trouve quelque raie isolée très-éclatante. Les deux sources qui m'ont le mieux réussi sont : 1° un bec de gaz à grand débit, brûlant sans éclat, et dans lequel on introduit soit un sel de soude peu volatil (phosphate de soude) à l'aide d'un fil de platine ou d'un bâton d'amiante, soit plus simplement un tube de verre à la soude; 2° une série de puissantes étincelles d'induction entre deux fils de thallium.

La disposition qui m'a paru la plus avantageuse est représentée par la *fig.* 10, qui me dispensera d'une longue description.

Fig. 10.



S Étincelle entre des fils de thallium.

l Petite lentille dont le foyer est en S, afin que les rayons soient à peu près parallèles en entrant dans l'appareil.

N Polariseur.

F Fente verticale large.

L Objectif du collimateur ayant son foyer principal en F.

P, P′ Prismes de flint placés sur une plate-forme K, par l'intermédiaire d'un support qui peut tourner autour d'un axe vertical.

Q, Q′, Q″ Quartz différents.

L′ Objectif de la lunette, au foyer principal F′ de laquelle se produit un spectre pur.

N′ Nicol analyseur pouvant tourner sur un cercle gradué C, à l'aide d'alidades dont les verniers donnent la minute.

l′ Oculaire pour observer le spectre en F′ à travers l'analyseur.

Si l'on prend comme source de lumière une flamme chargée de soude, la lentille *l* n'a plus d'utilité.

Il y a quelques précautions à prendre, parce que, pour la commodité des observations et la pureté du phénomène, les deux objectifs L et L' et les prismes à réfraction ont été placés entre le polariseur et l'analyseur.

On s'assure d'abord que les objectifs L et L' n'influent pas sur la polarisation d'un rayon de lumière qui les traverse dans la direction de l'axe. Quant aux prismes P, P', ils peuvent, par réfraction, faire tourner le plan de polarisation des rayons incidents, ce qui n'aurait aucun inconvénient, mais ils peuvent donner lieu à une polarisation elliptique, et même, s'ils étaient trempés, à des modifications encore plus complexes. On évite tous ces inconvénients en ayant soin que le plan primitif de polarisation soit parallèle, ou mieux, perpendiculaire au plan de réfraction, et l'on vérifie ensuite que le faisceau qui sort du prisme P' est encore parfaitement polarisé.

Les morceaux de quartz ne sont jamais homogènes dans toute leur étendue. On les étudie séparément et on couvre les faces terminales de feuilles de papier, découpées de manière à isoler les régions qui paraissent plus pures. On s'assure, par les procédés connus, que les faces sont parallèles entre elles et perpendiculaires à l'axe de cristallisation. Enfin, on reconnaît que la lumière se propage exactement suivant l'axe, quand les bandes d'extinction sont bien verticales et que la rotation du plan de polarisation est un minimum.

J'ai essayé un grand nombre d'échantillons de quartz; les seuls qui aient pu servir sont les suivants, qui sont encore de qualités très-inégales. La plupart de ces quartz m'ont été prêtés très-obligeamment par différentes personnes, entre autres les n^{os} I et II par M. Gernez, le n^{o} IV par M. Fizeau, les n^{os} VI et VII par M. Cornu.

		Épaisseur.
		mm
Quartz gauches...	N° I...........	29,995
	N° II..........	30,482
	N° III..........	42,619
	N° IV..........	110,579
Quartz droits	N° V...........	36,524
	N° VI..........	37,458
	N° VII.........	81,278

Les épaisseurs ont été déterminées dans les ateliers de MM. Brunner à l'aide d'une excellente machine à diviser, le long de laquelle était une règle graduée en demi-millimètres. Un microscope porté par le chariot visait sur la règle et permettait de donner au chariot des déplacements d'un nombre entier de demi-millimètres. On visait les quartz avec un autre microscope à micromètre oculaire porté par le même chariot, et l'on évaluait les fractions de demi-millimètre en déplaçant le réticule. On a eu soin de déterminer les valeurs du pas de vis du micromètre, et les pointés se faisaient au millième de millimètre. Pour déterminer les épaisseurs à l'endroit même qui avait été utilisé dans la mesure des rotations, on disposait deux aiguilles très-fines dans le voisinage des surfaces, comme la pointe d'ivoire des bains de mercure, et l'on amenait le fil du microscope au milieu de la distance de la pointe d'aiguille et de son image. Chacun des quartz a été mesuré plusieurs fois en utilisant des régions différentes de la règle, et les résultats n'ont différé au plus que de 2 ou 3 millièmes de millimètre. Pendant toute la durée des expériences, la température indiquée par un thermomètre placé sur la machine n'a varié que de $13^\circ,5$ à $14^\circ,6$, de sorte que les mesures sont comparables entre elles sans correction.

Cette règle de Brunner a été comparée plusieurs fois au mètre étalon; je donne ici les résultats d'une comparaison faite en 1867 par M. Angström.

Une règle en laiton (le mètre d'Upsal), construite sur la règle de Brunner, laquelle est aussi en laiton, est à zéro plus courte que le mètre des Archives de $0^{mm},190$. Le coefficient de dilatation de la règle étant de 0,00001872, il en résulte que la règle d'Upsal a la longueur métrique à la température de 10 degrés; il en est de même pour la règle de Brunner. A la température de 15 degrés, à laquelle nos expériences ont été faites, chaque division de la règle vaut environ $1^{mm},000093$. Toutes les épaisseurs devraient donc être augmentées de $\frac{1}{10000}$ et les pouvoirs rotatoires relatifs à la température de 15 degrés diminués dans le même rapport. Cette correction n'a pas d'utilité, parce qu'elle est bien inférieure aux erreurs d'expérience.

Détermination du pouvoir rotatoire du quartz. — Pour juger de la précision des expériences, j'ai d'abord déterminé le rapport des pouvoirs rotatoires du quartz pour les deux sources que j'employais. Il n'est pas nécessaire, dans ce cas, que l'appareil soit réglé avec une aussi grande précision. On détermine d'abord l'azimut primitif de polarisation de la lumière qui sort des prismes P, P′, puis on interpose un ou plusieurs quartz, et l'on mesure le nouvel azimut de polarisation; on substitue la deuxième source à la première, et l'on tourne un peu les prismes P, P′ pour que la nouvelle bande brillante se produise au même point dans la lunette, et l'on détermine un troisième azimut de polarisation; enfin on supprime les quartz, et l'on vérifie que le changement de source et la rotation des quartz P, P′ n'ont pas modifié l'azimut primitif. On connaît ainsi, dans les deux cas, de combien la rotation dépasse un nombre entier de demi-circonférences; on ajoute alors de part et d'autre un certain nombre de fois 180 degrés, ce que l'on connaît facilement d'après l'épaisseur du quartz et la valeur approchée du pouvoir rotatoire.

Dans le cas actuel, il n'y a guère à se préoccuper de la température, puisque les deux expériences se suivent rapidement et que les variations de température ambiante ne peuvent avoir qu'une faible influence sur le rapport des rotations. Il n'est pas nécessaire non plus que la lumière marche rigoureusement suivant l'axe du cristal, car le changement de rotation pour une très-faible inclinaison doit être sensiblement proportionnel à la rotation elle-même.

QUARTZ.		SODIUM.		THALLIUM.		R_{Na}	R_{Th}	$\frac{R_{Th}}{R_{Na}}$
Gauches.	N° I....	113°,77	3	82°,18	4	653°,77	802°,18	1,22701
	N° II...	122,25	3	92,56	4	662,25	812,56	1,22698
	N° III..	25,57	5	55,98	6	925,57	1135,98	1,22744
	N° IV...	62,21	13	67,10	16	2402,21	2947,10	1,22683
				Moyenne.................				1,22706
Droits...	N° V...	73,44	4	74,59	5	793,44	974,59	1,22830
	N° VI...	94,65	4	99,32	5	814,65	999,32	1,22670
	N° VII..	149,16	9	9,75	12	1769,16	2169,75	1,22644
				Moyenne.................				1,22714

Les expériences contenues dans le tableau précédent ont été exécutées comme on vient de l'indiquer; la deuxième et la troisième colonne donnent les rotations apparentes et le nombre de demi-circonférences qu'il faut y ajouter pour avoir la rotation elle-même; la quatrième et la cinquième colonne donnent ces rotations totales pour les raies jaunes du sodium et la raie verte du thallium, et la dernière leur rapport.

La température a varié entre 18 et 19 degrés.

Il résulte de ce tableau que le rapport des rotations est le même pour les quartz droits et les quartz gauches, et qu'avec les deux sources employées ce rapport est sensiblement égal à

$$1,2271.$$

Plus tard, j'ai pu essayer encore deux quartz nouveaux, l'un droit, d'environ 177 millimètres, et l'autre gauche, de 99 millimètres. Ces deux quartz m'ayant paru de très-belle qualité, j'ai déterminé le rapport des rotations pour les mêmes raies, et j'ai trouvé :

Pour le quartz droit, à la température de 23 degrés,

$$1,22756;$$

pour le quartz gauche, à la température de 22 degrés,

$$1,22753.$$

Les deux expériences ont été faites avec un grand soin, à cause de la beauté des matières, et les résultats sont presque identiques.

La rotation relative à la lumière jaune de la soude correspond évidemment à une longueur d'onde intermédiaire entre celles des deux raies D, c'est-à-dire environ $0^{mm},00058911$; la longueur d'onde de la raie verte du thallium étant $0^{mm},00053488$, le rapport des carrés des longueurs d'onde est

$$\left(\frac{58911}{53488}\right)^2 = 1,21306.$$

Ce rapport diffère d'environ $\frac{1}{85}$ du rapport des rotations. On sait en effet que la dispersion rotatoire varie plus vite que l'inverse des carrés des longueurs d'onde.

Le tableau qui précède ne peut pas servir à déterminer les pouvoirs rotatoires en valeurs absolues, parce que les quartz n'y étaient pas suffisamment réglés. J'ai fait un grand nombre de mesures à des températures supérieures ou inférieures à 15 degrés, et je ne rapporterai que les moyennes des nombres qui ont été déterminés dans le voisinage de cette température. Il y a là une cause d'erreur à laquelle il faut prendre garde, parce qu'une variation de quelques degrés produit des changements de rotation parfaitement appréciables. Ainsi, avec le quartz n° IV, la moyenne des mesures relatives à la raie verte du thallium pour la température de 12°,5 était de 64°,64, la moyenne des mesures faites à 15 degrés a été 65°,68, et les mesures faites à la température de 18 degrés ont donné 67°,10. En faisant entrer en ligne de compte les nombres extrêmes, j'ai pris pour la température de 15 degrés le nombre 65°,80. Il y a d'ailleurs trop peu de différence entre cette température et celle (14 degrés) à laquelle on a déterminé les épaisseurs pour qu'il y ait lieu de faire la correction qui conviendrait.

Dans le tableau qui suit, α désigne la rotation apparente ou le changement d'azimut, n le nombre de demi-circonférences qu'il faut ajouter pour avoir la rotation totale R, et R_1 est la rotation pour une épaisseur de 1 millimètre.

Lumière jaune de la soude.

QUARTZ.		α	n	R	R_1
Gauches...	N° I..........	111°,90	3	651°,90	21°,734
	N° II..........	122,03	3	662,03	21,719
	N° III........	25,95	5	925,95	21,727
	N° IV........	60,82	13	2400,82	21,713
		Moyenne..................			21,723
Droits.....	N° V..........	73,79	4	793,79	21,733
	N° VI..........	94,20	4	814,20	21,736
	N° VII........	147,78	9	1767,78	21,741
		Moyenne..................			21,737

Raie verte du thallium.

QUARTZ.		α	n	R	R_1
Gauches...	N° I..........	79°,45	4	799°,45	26°,652
	N° II.........	91,79	4	811,79	26,632
	N° III........	55,05	6	1135,05	26,633
	N° IV........	65,80	16	2945,80	26,641
			Moyenne..................		26,639
Droits.....	N° V.........	73,87	5	973,87	26,664
	N° VI........	99,29	5	999,29	26,677
	N° VII........	10,05	12	2170,05	26,699
			Moyenne..................		26,680

Le rapport des rotations pour les moyennes des quartz droits est 1,2263, les quartz gauches donnent 1,2274. Toutes ces différences tiennent, comme on peut aisément s'en convaincre par l'accord des expériences isolées, non pas au défaut d'exactitude des mesures, mais à la qualité des échantillons. En tenant compte de cette circonstance et en accordant une plus grande confiance aux nombres qui résultent des quartz les plus purs, je crois que la rotation imprimée par une épaisseur de 1 millimètre de quartz à la température de 15 degrés est :

21°,73 pour la lumière jaune de la soude,
26°,65 pour la raie verte du thallium.

Le dernier chiffre doit être exact à moins d'une unité, ce qui fait une approximation de $\frac{1}{2000}$.

Influence du mouvement de la Terre. — Je reviens maintenant à la question principale, l'influence du mouvement de la Terre, dont je ne me suis écarté que pour montrer la précision à laquelle on peut parvenir dans la mesure des rotations. La sensibilité de la méthode devient bien plus grande encore lorsqu'on se propose, non pas d'évaluer la grandeur absolue d'une rotation, mais simplement de constater des changements très-petits produits par une cause accessoire. Il suffit, par exemple, de faire une série de mesures dans une salle dans laquelle on vient d'allumer un foyer pour constater un accroissement rapide des rotations dû à l'élévation progressive de la température. Il en sera de même pour l'influence de la Terre, si elle produit un effet appréciable.

J'ai fait d'abord plusieurs expériences par la méthode indiquée avec les quartz précédents et avec d'autres de moins bonne qualité; je déterminais l'azimut de polarisation à la sortie des quartz, quand l'appareil était dirigé de manière que le passage de la lumière à travers le cristal se fît dans le sens ou en sens contraire du mouvement de la Terre. Comme le résultat a été constamment négatif ou douteux, je n'en citerai que quelques-uns.

Première expérience. — 30 décembre 1869; de $11^h 30^m$ à minuit.

On vise directement, sans prismes, la flamme d'un bec de gaz dans laquelle on a placé un tube de verre. On ajoute trois quartz gauches donnant ensemble une rotation d'environ 2240 degrés. Les nombres du tableau qui suit donnent l'azimut de l'analyseur qui produit l'extinction dans les expériences successives.

Source à l'ouest.	Source à l'est.
$19°.24'$	
	$20°.15'$
19.52	
	20. 1
19.38	
	20.15
19.31	
	19.26
19.26	

Il semble qu'il y ait une différence qui indiquerait une rotation plus grande quand la source est à l'ouest. (Les numéros des divisions du cercle marchent dans le sens du mouvement des aiguilles d'une montre.) Je l'ai cru d'abord, bien que quelques-uns des azimuts de droite et de gauche soient à peu près identiques; mais, comme le changement que l'on cherche à manifester est d'environ $\frac{1}{5000}$, l'accord des nombres d'une même série n'est pas suffisant.

Deuxième expérience. — 8 janvier 1870; de $10^h 30^m$ à 11 heures du soir.

On observe la raie verte du thallium avec prismes réfringents et quatre quartz gauches dont la somme des épaisseurs est d'environ 177 degrés, ce qui donne une rotation de 4720 degrés.

Source à l'ouest.	Source à l'est.
18°.31′	18°.16′
	18.32

On modifie un peu l'appareil :

Source à l'ouest.	Source à l'est.
81°.29′	19°. 7′
18.37	18.21

Cette expérience me paraît démontrer que le changement, s'il existe, n'est pas de $\frac{1}{2}$ degré, ce qui ferait sur la rotation totale une altération de $\frac{1}{10000}$.

Troisième expérience. — 1er avril 1870; de $11^h 15^m$ à $11^h 45^m$ du soir.

On ajoute les quatre quartz gauches du tableau, et l'on observe la raie verte du thallium, pour laquelle la rotation est de 4640 degrés.

Source à l'ouest.	Source à l'est.
62°.34′	63°. 2′
63.40	63.10
62.34	63
63.45	62.44
63.44	62.44
63.31	

On modifie l'appareil :

Source à l'ouest.	Source à l'est.
64°. 1′	63°. 5′
63.26	63.36

Nouveau changement :

64. 1
64.11

Il me semble résulter de cette expérience que le changement n'est pas de $\frac{1}{3}$ de degré, c'est-à-dire de $\frac{1}{15000}$ de la rotation totale.

N'ayant pas alors à ma disposition un plus grand nombre de quartz homogènes de même sens, j'ai cherché à ajouter les rotations des quartz de sens contraires, ce qui m'a réussi avec une facilité inespérée. Il suffit pour cela de faire tomber la lumière polarisée sur une série de quartz de même sens, gauches par exemple, puis sur une lame de mica d'une demi-onde, et ensuite sur des quartz droits. De cette façon, le plan de polarisation tourne de la même quantité que si tous les quartz étaient de même sens ([1]). Il est facile aussi de montrer que, si l'on adopte l'interprétation de Fresnel, l'influence de la Terre doit être la même que si tous les quartz étaient de même sens. En effet, la lumière incidente, qui est polarisée rectilignement, se partage en pénétrant dans les premiers quartz en deux rayons polarisés circulairement, l'un à droite, l'autre à gauche. Si ces premiers quartz sont gauches, le rayon circulaire gauche y marche plus vite que le rayon droit, de sorte qu'à la sortie il s'établit entre eux une certaine différence de marche Δ. Ces deux rayons, en traversant la lame d'une demi-onde, sont transformés, le rayon gauche en rayon droit et le droit en gauche. Le rayon droit, qui allait moins vite dans les premiers quartz, est devenu gauche dans les suivants et marche encore moins vite; il y éprouve une nouvelle différence de marche Δ'; le retard final est donc le même que si tous les quartz étaient du même sens. Si le mouvement de la Terre a pour effet d'augmenter ou de diminuer la différence de marche, l'influence produite par les deux séries de quartz sera aussi la somme des influences produites séparément par les deux espèces de quartz.

L'expérience prend ainsi une forme un peu paradoxale. En faisant traverser par un faisceau de lumière polarisée deux séries de quartz d'épaisseurs égales et de rotation contraire, la lumière émergente reste polarisée dans le plan primitif. Si cette lumière est étalée en

---

([1]) MM. Fizeau et Foucault avaient réalisé cette expérience avec deux parallélépipèdes de Fresnel, dont l'effet est le même que celui d'une lame cristalline d'une demi-onde.

spectre, on reconnaît que, pour une orientation convenable de l'analyseur, on éteint le spectre tout entier. Il suffit alors d'intercaler entre les deux systèmes de quartz une lame de mica d'une demi-onde pour que le spectre soit couvert de bandes d'extinction. On a donc dans une même expérience ces deux circonstances presque contradictoires, de grandes épaisseurs de cristal qui ne produisent pas de différence de marche, et une lame extrêmement mince qui donne lieu à une différence de marche considérable. En tout cas, le phénomène est tellement net que j'ai cherché à l'utiliser.

Quatrième expérience. — 15 avril 1870; de 11 heures à $11^h 30^m$ du soir.

On a ajouté les quartz droits n° V et n° VII; à la suite, on a mis le quartz gauche n° IV et une lame gauche peu épaisse, de manière à produire à peu près la compensation, puis encore la lame n° II. Entre les deux systèmes est une lame d'une demi-onde, et l'on observe avec la lumière jaune de la soude. La rotation totale est d'environ 5785 degrés.

Source à l'ouest.	Source à l'est.
191°.22′	191°.10′
191.37	190
191.17	190.20
190	190.32
190	190.36
190.22	190.14

On enlève le quartz n° II, ce qui rétablit la compensation. La rotation est alors de 5123 degrés.

Même date, $11^h 35^m$ du soir.

Source à l'ouest.	Source à l'est.
129°.37′	130°.31′
129.22	130. 7
128	129.32
	128.40

On prend pour source de lumière la raie verte du thallium. La rotation est de 6287 degrés.

Même date, $11^h 45^m$ du soir.

Source à l'ouest.	Source à l'est.
49°.36'	49°.21'
50.26	50.17
50.42	50.27
50. 4	50.10

Si l'on reconnaît que ces expériences démontrent que le changement de rotation n'est pas de $\frac{1}{3}$ de degré, il en résultera que le mouvement de rotation n'altère pas de $\frac{1}{20000}$ le pouvoir rotatoire du quartz, c'est-à-dire d'une quantité quatre fois plus faible que celle que l'on obtiendrait en appliquant à la propagation des ondes polarisées circulairement la formule démontrée par Fresnel pour le cas des corps isotropes.

Je ne veux déduire aucune conséquence théorique des expériences contenues dans ce premier Mémoire, mais on reconnaîtra, j'espère, que quelques-unes de ces expériences ont été faites avec un degré de précision qu'il est difficile de dépasser, et que l'on peut énoncer comme conclusion la proposition suivante :

« Les phénomènes de réflexion de la lumière, de diffraction, de double réfraction rectiligne et de double réfraction circulaire sont également impuissants à mettre en évidence le mouvement de translation de la Terre quand on opère avec la lumière solaire ou avec une source de lumière terrestre. »