

ANNALES SCIENTIFIQUES DE L'É.N.S.

C ANDRÉ

A. ANGOT

Origine du ligament noir dans les passages de Vénus et de Mercure et moyen de l'éviter

Annales scientifiques de l'É.N.S. 2^e série, tome 10 (1881), p. 323-382

http://www.numdam.org/item?id=ASENS_1881_2_10__323_0

© Gauthier-Villars (Éditions scientifiques et médicales Elsevier), 1881, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Annales scientifiques de l'É.N.S. » (<http://www.elsevier.com/locate/ansens>) implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques
<http://www.numdam.org/>

ORIGINE DU LIGAMENT NOIR

DANS LES PASSAGES DE VÉNUS ET DE MERCURE

ET MOYEN DE L'ÉVITER,

PAR M. CH. ANDRÉ,

DIRECTEUR DE L'OBSERVATOIRE DE LYON,

ET M. A. ANGOT,

MÉTÉOROLOGISTE TITULAIRE AU BUREAU CENTRAL MÉTÉOROLOGIQUE DE FRANCE.



Lors de l'observation du passage de Vénus que l'Académie m'avait chargé de faire à Nouméa, les aspects physiques suivant lesquels les différents observateurs de la mission virent le phénomène présentaient des divergences considérables, et telles qu'il était impossible de les faire concorder avec les conclusions du travail que M. Wolf et moi avions présenté en 1869 à l'Académie. Des cinq observateurs qui avaient pris part à l'observation du passage, trois s'étaient trouvés en présence d'un phénomène simple et identique avec celui qu'aurait offert le passage géométrique d'un cercle obscur, parcourant avec une vitesse déterminée une corde d'un cercle lumineux de diamètre trente fois plus considérable; les deux autres, au contraire, avaient été en présence d'un phénomène tout différent, compliqué, d'une observation difficile; et, si les causes, que M. Wolf et moi avions pensées être déterminantes pour la reproduction de ces irrégularités, pouvaient être invoquées à l'égard de l'un d'eux, elles ne pouvaient expliquer les phénomènes aperçus par l'autre observateur.

A mon retour, M. Dumas, président de la Commission du passage de Vénus, voulut bien m'engager à reprendre l'étude de ces apparences singulières. On essaya d'abord d'installer les expériences nécessaires

dans le laboratoire de Physique du Collège de France; mais, à cause du peu de stabilité du sol, on les exécuta plus tard dans les caves de l'École Normale. Leurs couloirs, qui ont le même développement longitudinal que le bâtiment et qui mesurent environ 100^m de longueur (97^m, 25), forment, en effet, une longue chambre noire merveilleusement préparée pour l'étude de phénomènes optiques qui exigent l'emploi de lunettes de grande puissance.

D'ailleurs les causes qui influençaient l'observation astronomique devaient, tout au moins à un certain degré, modifier les épreuves photographiques prises pendant le passage.

M. Angot, qui avait dirigé les opérations photographiques de la mission de Nouméa, voulut bien étudier cette partie du problème.

Nous sommes tous deux heureux de pouvoir exprimer ici à MM. Henri Sainte-Claire Deville et Mascart notre reconnaissance pour la bienveillance avec laquelle ils nous ont accueillis et l'appui constant que nous avons trouvé auprès d'eux.

Avant de décrire les expériences qui font l'objet de ce Mémoire, on croit devoir rappeler et discuter les travaux récents qui les ont précédées.

CHAPITRE PREMIER.

HISTORIQUE.

La lecture des Rapports concernant les observations du dernier passage de Vénus montre que la principale et peut-être la seule cause de divergence entre les différents observateurs d'une même station provient de la formation, au moment des contacts internes, entre les bords du Soleil et ceux de la planète, d'un obscurcissement plus ou moins intense, ressemblant plus ou moins à une sorte de nuage estompé sur les bords, à une *goutte noire*, à un *ligament noir*, qui relie les bords des deux astres et masque aux yeux de l'observateur le moment du contact réel.

En effet, si, grâce aux précautions prises par la Commission de l'Académie, la plupart des observateurs français furent mis en présence d'un phénomène pour ainsi dire géométrique, il n'en fut pas de même dans les autres pays : par exemple, la moitié au moins des observateurs appartenant aux expéditions anglaises virent se produire, soit un assombrissement plus ou moins intense, soit un véritable ligament.

Voici ce que dit à ce sujet M. Stone, dans sa discussion des observations du passage de Vénus en 1874, faites dans les expéditions organisées par le gouvernement britannique ⁽¹⁾ :

« Il me semble qu'après l'examen des observations anglaises, tout aussi bien que celui des observations françaises, il n'y a pas lieu d'insister plus longtemps sur ce fait que les contacts dans un passage de Vénus ne sont pas des contacts géométriques, mais que, lorsqu'ils sont bien vus sur un champ bien éclairé et lorsque l'attention de l'observateur est dirigée sur ce point, la liaison entre les bords apparents de Vénus et du Soleil se fait et se défait graduellement. Le nom exact qu'il a plu aux différents observateurs de donner aux phénomènes observés importe peu, pourvu que nous puissions identifier les observations qui correspondent à la même distance angulaire des deux bords. »

Si la principale difficulté consiste à savoir retrouver dans les divers récits du passage, faits d'ailleurs sous des impressions différentes, celles des apparences qui correspondent à des distances égales des bords du Soleil et de la planète, il importe de connaître quelle est l'origine physique de cette complexité.

Pendant les années qui avaient précédé le passage de 1874, un certain nombre d'astronomes, MM. Stone en Angleterre, Wolf et André en France, Van de Sande Bakhuyzen en Hollande, avaient entrepris de résoudre cette question. Voici le résumé de leurs travaux.

L'observation du passage de Mercure du 4 novembre 1868, ainsi que la discussion des observations du passage de Vénus en 1769, avaient

⁽¹⁾ *On the telescopic observations of the transit of Venus 1874, made in the expeditions of the British Government and the conclusions to be deduced from those observations, by E.-T. Stone, M. A., F. R. S., Her Majesty's astronomer, Cape of Good Hope (Monthly Notices of the royal astronomical Society, t. XXXVIII, p. 279 et suiv.).*

conduit M. Stone à admettre ⁽¹⁾ que le phénomène présentait à l'entrée et à la sortie deux phases principales, qui devaient être observées avec le plus grand soin :

1° Les *contacts internes réels*;

2° Les *contacts internes apparents*.

« En effet, dit-il en appliquant son raisonnement au contact interne de sortie, le diamètre apparent du Soleil est augmenté et le diamètre apparent de Vénus (pendant le temps que cette planète est sur le disque du Soleil) est diminué, par l'effet des mêmes causes qui produisent l'image diffuse d'une étoile au foyer d'une lunette; mais, lorsque le bord vrai de Vénus coïncide avec le bord vrai du Soleil, la lumière est enlevée brusquement, l'élargissement diffus du disque solaire et la diminution de celui de Vénus sont détruits au point de contact; en conséquence, un ligament noir apparaît, qui réunit les bords apparents de Vénus et du Soleil : cela est le *contact réel interne* (phase I).

» La largeur du ligament précédent augmente rapidement, et, après environ dix-huit secondes, l'intervalle exact dépendant des circonstances du passage et du succès de l'observation de la phase I, les bords de Vénus et du Soleil apparaîtront en contact : c'est la seconde phase d'une observation soignée, le *contact apparent interne* (phase II).

» L'observation de cette phase présente de grandes difficultés, par suite de la présence du ligament qui la précède. Mais son observation est très importante, surtout en raison de la probabilité de la perte de la phase I dans beaucoup de stations, par suite des ondulations atmosphériques. »

Et plus loin : « Il faut conclure de là que le passage d'un contact interne réel au contact interne apparent correspondant est *graduel*, tandis que les contacts réels doivent paraître se produire *instantanément* pour tous les observateurs. »

Quoi qu'il soit des règles indiquées par M. Stone pour l'observation du passage de Vénus et adoptées d'ailleurs par la Commission

⁽¹⁾ *Monthly Notices of the royal astronomical Society*, t. XXVIII, p. 255 et suiv.; t. XXIX, p. 47; t. XXXV, p. 311.

officielle d'Angleterre ⁽¹⁾, et quoique cet astronome ait appelé, comme Lalande, *irradiation* la cause productrice du ligament noir, il faut se garder de confondre l'explication qu'il en donne avec celle qu'on avait admise jusque-là d'après Lalande et que M. Powalky résume ainsi : « En vertu de l'irradiation, la forte lumière émise par le Soleil produit sur la rétine l'effet de nous faire voir le disque solaire plus grand qu'il ne l'est en réalité; le disque solaire paraît entouré d'un anneau d'une intensité constante, offrant une largeur plus ou moins considérable suivant la bonté des instruments, mais ne disparaissant pas même dans les meilleurs. »

Pour M. Stone comme pour M. Powalky, le ligament noir est un phénomène nécessaire. Mais, pour M. Powalky, son origine serait dans l'œil de l'observateur; pour M. Stone, au contraire, elle est dans la lunette qui sert aux observations.

Or, il y a longtemps que M. Wolf a reproduit par projection toutes les particularités du ligament noir : c'est la preuve la plus directe que l'origine de ce ligament n'est point dans l'œil de l'observateur.

D'un autre côté, comment comprendre, en admettant l'opinion de M. Stone, que, dans un grand nombre de cas, on n'ait point aperçu trace de ligament noir ?

L'explication de M. Stone est donc incomplète; mais, pour savoir si elle est admissible dans le cas où un ligament se produit, il fallait vérifier que, dans une lunette, l'image d'un cercle obscur est plus petite que l'image de ce même cercle fortement éclairé. Pour répondre à cette question, MM. Wolf et André ont fait l'expérience suivante : « Dans la couche de tain d'une glace mince à faces parallèles on enlève un disque circulaire, que l'on observe de loin avec une lunette. Si on éclaire l'ouverture par derrière avec une forte lampe, on voit un cercle brillant sur un fond obscur, et l'on peut amener un fil en contact avec le bord de l'image focale. Qu'on place alors cette lampe en avant, l'ouverture apparaît en noir sur la face éclairée du miroir, et, si l'irradiation avait l'effet prétendu, le fil devrait être séparé du bord par une distance égale au double de l'irradiation. Or, quelle que soit

(1) Les recommandations de M. Stone ont été scrupuleusement suivies par le Rév. M. Abbay, l'un de nos collaborateurs pour l'observation du passage à Nouméa.

l'intensité de la lumière, le fil et le bord restent en contact parfait (1). »

Cette expérience, si ingénieuse qu'elle soit, ne saurait conduire à une conclusion définitive et absolue; elle prouve seulement que, dans les conditions d'éclairement où l'on s'est placé, avec la lunette dont on s'est servi, la différence entre les diamètres du cercle lumineux et du même cercle obscur est trop petite pour être immédiatement perceptible et s'apercevoir sans qu'on ait recours à des mesures précises.

Or, on sait que, si le pouvoir séparateur d'une lunette dépend de son ouverture, à laquelle il est proportionnel, il dépend aussi de la grandeur des étoiles avec lesquelles on le mesure, c'est-à-dire de leur intensité lumineuse; les belles séries de mesures micrométriques exécutées en Angleterre par M. Dawes ont mis hors de doute ce point, d'ailleurs conforme à la théorie ondulatoire. Si le diamètre du disque lumineux, qui représente la partie importante de l'image d'une étoile dans le plan focal d'une lunette, dépend à la fois de l'ouverture de la lunette et de l'intensité de la source lumineuse, on est, *a priori*, porté à croire qu'il doit en être ainsi pour un objet lumineux de diamètre apparent plus ou moins considérable.

C'est d'ailleurs la conclusion à laquelle Schwerd était arrivé en 1835, à la fin de son beau Mémoire sur la diffraction de la lumière (2); il y calcule l'augmentation qu'éprouvent, par suite de cette cause :

1° Un disque lumineux de diamètre infiniment grand;

2° Un disque lumineux dont le diamètre est égal à $\frac{4'',53}{O}$, O étant l'ouverture de la lunette exprimée en pouces parisiens.

Depuis lors, un certain nombre d'astronomes ont cherché à vérifier expérimentalement cette conclusion de la théorie.

En 1851, Laugier fit sur le diamètre de Jupiter une série de mesures, soit avec l'ouverture entière de sa lunette (0^m, 162), soit en réduisant cette ouverture jusqu'à 0^m, 03.

(1) *Recueil de Rapports et Documents relatifs au passage de Vénus sur le Soleil* : Recherches sur l'observation des contacts, par MM. C. Wolf et C. André, p. 128.

(2) *Die Beugungserscheinungen aus den Fundamentalgesetzen der Undulationstheorie analytisch entwickelt und in Bildern dargestellt*, par F.-A. Schwerd. Mannheim, 1836.

En 1853, Liouville et Mathieu ⁽¹⁾ mesurèrent, avec un micromètre à fils, le diamètre du Soleil au moyen d'une lunette de 0^m,100, qu'ils diaphragmaient jusqu'à 0^m,060 et 0^m,012.

Malgré ces réductions considérables de l'ouverture, aucun de ces trois observateurs ne put constater le moindre agrandissement dans le diamètre de l'astre observé.

En 1872, Kaiser, directeur de l'Observatoire de Leyde, revint sur ce sujet à l'occasion d'une série de mesures de diamètres des différentes planètes; il rappelle la théorie de Schwerd et montre que les résultats négatifs des expériences de Laugier, Liouville et Mathieu ne sauraient être considérés comme infirmant la théorie émise par le physicien de Mannheim.

« D'après les recherches de Schwerd, dit-il, recherches auxquelles on a, d'après moi, porté trop peu d'attention, il n'est pas douteux que les diamètres des planètes ne soient, même dans les lunettes déjà assez puissantes, augmentés d'une manière sensible par la diffraction de la lumière. Cet accroissement dépend, pour chaque planète, de l'intensité de sa lumière, et ne peut être mesuré que sur celles dont la distance à la Terre est très variable.

» Il serait certainement très important d'obtenir, par l'observation, l'influence de la diffraction sur les diamètres du Soleil, de la Lune et des planètes; mais cette mesure n'aura de signification pratique que si l'on pouvait donner la même intensité à la lumière de l'image focale, quelque différentes que soient les grandeurs des ouvertures employées ⁽²⁾. »

Kaiser institua, en effet, à l'Observatoire de Leyde, une série d'expériences (qui dura de 1863 à 1866) destinées à mettre en évidence cet élargissement dû à la diffraction.

Le principe de sa méthode consiste à comparer les valeurs des diamètres de disques lumineux plus ou moins éclairés, obtenues avec

⁽¹⁾ *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. XXXVIII, p. 283, et t. XXXIX, p. 371.

⁽²⁾ *Annalen der Sternwarte in Leiden* (*Bemerkungen über die scheinbaren Durchmesser von Lichtscheiben in einem Fernrohr und deren Berücksichtigung bei der Untersuchung eines Micrometers*, par le Dr Kaiser, professeur d'Astronomie, directeur de l'Observatoire; t. III, p. 143 et suiv.)

un micromètre à double image d'Airy adapté à une lunette de 7 pouces, à leurs diamètres angulaires réels, déduits de la mesure linéaire de leurs dimensions et de leur distance au centre optique de l'objectif.

Il arriva ainsi à reconnaître que toujours le diamètre obtenu au micromètre était plus grand que le diamètre réel et que, comme l'indiquait la théorie, la différence croissait avec l'éclairement du disque lumineux.

Ainsi, avec des disques lumineux faiblement éclairés, l'élargissement était en moyenne de $0'',024$, tandis qu'avec des disques fortement éclairés (Kaiser n'indique pas exactement en quoi consiste cet éclairissement, mais il me semble qu'il se servait pour cela de la lumière solaire) l'élargissement obtenu fut en moyenne de $0'',165$.

Kaiser ajoute que le mode d'éclairement peut avoir une certaine influence sur ses résultats, et il termine en disant que la démonstration de l'élargissement du diamètre planétaire lui paraît néanmoins encore exiger des recherches spéciales.

Malheureusement, ces conclusions, données pour ainsi dire comme accessoires au milieu d'une longue et belle série d'autres travaux, eurent peu de retentissement. Je ne les ai connues moi-même que longtemps après et dans des circonstances que j'indiquerai plus tard ; aussi je suis heureux de pouvoir contribuer aujourd'hui à leur divulgation.

Les expériences que je décrirai plus loin ont eu, en partie, pour but de définir ce point de doctrine encore controversé ; mais le fait fondamental qui, pour MM. Wolf et André, démontrait la non-existence d'un élargissement optique de l'image d'un disque lumineux au foyer d'une lunette, étant ainsi pour le moins mis en doute, il convient d'examiner avec soin les expériences faites par ces deux astronomes, afin de voir si leur méthode expérimentale n'a pas dû systématiquement les empêcher d'apercevoir la majeure partie des effets de cet élargissement. On trouve dans ce Mémoire les résultats de deux sortes d'expériences :

1° *Expériences entre le Luxembourg et l'Observatoire.* — Le fond éclairé, représentant le disque solaire, était alors formé par un papier

translucide tendu en avant d'un réflecteur parabolique et sur lequel celui-ci renvoyait la lumière d'une lampe modérateur.

« Dans ces conditions, on n'observe qu'un ligament noir extrêmement étroit. »

2° *Expériences faites dans la chambre noire.* — Le fond éclairé était alors une lame de glace bien travaillée, qu'on éclairait vivement à l'aide d'une lampe placée assez près pour que ses rayons, en divergeant de chaque point, vinssent couvrir la surface entière du collimateur.

« Avec l'ouverture entière, les bords de l'écran et du disque sont fortement illuminés, la vivacité de la lumière fatigue beaucoup la vue, et l'on n'observe encore entre le disque solaire et le disque de la planète qu'un filet sombre très étroit; mais, si l'on réduit l'ouverture à 0^m, 10, le filet lumineux s'assombrit beaucoup avant le contact; en réduisant encore l'ouverture, le filet lumineux devient très sombre, de manière à former une espèce de pont. »

Ainsi, lorsqu'on emploie une source lumineuse plus intense, les apparences du phénomène se rapprochent de celles décrites par les astronomes qui ont observé les passages, soit de Vénus, soit de Mercure, avec des lunettes de même ouverture.

On doit conclure de là que dans ces expériences on n'a point suffisamment pris garde à l'influence de l'éclairement du fond au devant duquel étaient les appareils destinés à simuler le contact et qui représentait le disque solaire.

Cette conclusion se trouve confirmée par les résultats obtenus dans une série d'expériences analogues faites à peu près à la même époque à l'Observatoire de Greenwich, sous la direction de M. Stone. Les appareils destinés à simuler le contact y étaient éclairés par la lumière solaire, réfléchi par un miroir placé derrière eux. Or, dans ces expériences, on observa toujours un ligament très large et très foncé relativement à celui qu'avaient observé MM. Wolf et André.

Quant au *ligament noir*, ces astronomes concluaient à ce que cette apparence était un phénomène accidentel, dont la plus grande part était due soit à l'aberration de l'objectif ou du miroir, soit à un défaut dans la mise au point de l'oculaire.

Telles ne sont point les conclusions auxquelles M. van de Sande Bakhuyzen, successeur de Kaiser à l'Observatoire de Leyde, est arrivé dans le travail qu'il a publié au printemps de 1874⁽¹⁾.

Pour lui, le ligament noir est un phénomène nécessaire, dû à la diffraction.

« Désirant étudier, dit-il, les apparences qui se produisent au voisinage des contacts dans les passages de Vénus, j'avais observé, l'été dernier, un appareil à passages artificiels, analogue à celui que Struve a recommandé, placé à 230^m environ de l'Observatoire devant un fond très vivement éclairé, avec différentes lunettes, dont la plus grande était un réfracteur de 7 pouces d'ouverture et dont la plus petite avait une ouverture de 2 pouces. Avec toutes, je vis toujours la formation et la rupture du ligament se faire de la même manière.

» Pour déterminer quelle influence l'aberration pouvait avoir sur le phénomène, je couvris l'objectif du réfracteur de 7 pouces avec des diaphragmes d'ouvertures décroissantes jusqu'à 2 pouces. Il se trouve alors que le ligament noir, au lieu de diminuer, augmente considérablement de largeur. Ce fait ne pouvait avoir sa raison d'être dans une diminution générale de l'intensité lumineuse, car, si, employant l'ouverture entière de l'objectif, on interposait un verre noir entre l'oculaire et l'œil, on ne pouvait observer aucune augmentation sensible dans la dimension du ligament.

» L'idée me vint alors que la formation du ligament était en grande partie due à la diffraction. »

Pour prouver la vérité de cette hypothèse, M. van de Sande Bakhuyzen calcula, d'après les principes donnés autrefois par Schwerd, les intensités de la lumière en différents points de l'intervalle qui sépare le bord du Soleil de celui de Vénus. On donnera plus loin les résultats de ces calculs. Sa conclusion est « qu'il y a concordance absolue entre les phénomènes que l'on observe au moment du contact avec l'appareil artificiel et ceux qui doivent se produire en vertu de la diffraction ».

Ainsi, le ligament noir est un phénomène nécessaire, qui a son origine dans la forme même des surfaces réfringentes ou réfléchissantes

(1) *Die Bildung des sogenannten schwarzen Tropfens beim Venusvorübergang*, par H.-G. van de Sande Bakhuyzen (*Astronomische Nachrichten*, t. LXXXIII, p. 305 et suiv.).

des objectifs ou des miroirs employés à l'observation, et qui s'explique tout naturellement au moyen des principes de la théorie ondulatoire.

M. van de Sande Bakhuyzen détermine ensuite expérimentalement quelle est celle des phases du passage qui correspond au contact géométrique et la distance qui l'en sépare, distance qu'il trouve être de 0",05 pour un objectif de 4 pouces; en outre, il étudie théoriquement quelques particularités que doit offrir la détermination de l'heure du contact, au moyen de la mesure des longueurs d'une série de cordes parcourues par Vénus. On trouvera plus loin la description et les résultats d'expériences plus complètes que celles de l'astronome hollandais. Aussi le point saillant de son remarquable Mémoire est-il la conclusion importante que je viens de rappeler tout à l'heure, conclusion identique avec celle à laquelle j'ai été moi-même conduit plus tard.

A l'époque où ce Mémoire fut publié, j'étais exclusivement occupé des préparatifs matériels de l'expédition de Nouméa, et il passa inaperçu pour moi, si bien que je n'en eus connaissance qu'après avoir communiqué à l'Académie des Sciences les résultats des expériences que je vais maintenant décrire ⁽¹⁾, par une lettre de M. van de Sande Bakhuyzen, où il voulait bien en même temps appeler mon attention sur les travaux antérieurs du D^r Kaiser.

Je n'étais point d'ailleurs seul dans cette ignorance, car, dans un Mémoire daté du 18 janvier 1878 et que j'ai déjà cité ⁽²⁾, M. Stone dit : « Je ne vois aucune raison pour abandonner mes conclusions anciennes, que les deux phases les plus importantes sont celles que j'ai appelées *contacts apparents* et *contacts réels*, cette dernière phase étant de beaucoup plus importante. » Évidemment, M. Stone ne connaissait point non plus le travail de M. Van de Sande Bakhuyzen.

⁽¹⁾ *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXXXIII, p. 946 et 1230; 1876.

⁽²⁾ *Monthly Notices of the royal astronomical Society*, t. XXXVIII, p. 280.

CHAPITRE II.

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES PASSAGES DE VÉNUS ET DE MERCURE.

I. — DIAMÈTRES.

A. — Vérification directe.

Une étude complète de la question exigeait que l'on mit tout d'abord hors de doute ce fait fondamental, que le diamètre de Vénus, mesuré pendant le passage, est moindre que dans les conditions ordinaires d'observation, et que la différence est fonction de l'ouverture de l'instrument employé.

D'ailleurs, à cause de la petitesse des quantités que l'on avait à mesurer, il fallait assurer une grande stabilité soit aux disques dont on devait comparer les diamètres, soit aux lunettes avec lesquelles on devait faire ces mesures. Il fallait, en même temps, se mettre à l'abri des agitations de l'air, qui auraient pu faire onduler les images et enlever toute précision aux déterminations.

Dans nos expériences les disques à mesurer et les lunettes d'observation étaient portés, ainsi que le montre la *Pl. I*, sur des piliers solides en maçonnerie élevés aux deux extrémités d'un des longs couloirs des caves de l'École Normale.

On a employé deux procédés différents de vérification.

Premier mode de vérification. — Dans une lame de cuivre, argentée et polie sur l'une de ses faces, on a fait tailler une ouverture rectangulaire à arêtes bien rectilignes, de 0^m,02 de haut sur 0^m,015 de large; on éclairait cette ouverture avec la lumière d'une lampe Drummond, tantôt par derrière pour avoir une source lumineuse directe, tantôt en avant et par réflexion pour avoir l'analogue d'une planète sur le disque du Soleil. On a obtenu ainsi :

Ouverture en centimètres.	Diamètre.		Différence des diamètres.
	Éclairage direct.	Éclairage réfléchi.	
6,5.....	35",53	30",76	4",77
1,7.....	39,62	26,93	12,69
6,5.....	37,12	30,26	6,86
2,9.....	38,67	29,80	8,87
1,7.....	42,05	27,54	14,51

Second mode de vérification. — Dans une lame de laiton noircie, on a fait pratiquer deux ouvertures rectangulaires de 0^m,03 de hauteur sur 0^m,015 de large, séparées par un espace de 0^m,015, et dont leurs bords étaient bien rectilignes et taillés en biseau. En éclairant cette lame par derrière avec la flamme d'une lampe Drummond, on avait ainsi deux sources lumineuses d'un certain diamètre apparent, séparées l'une de l'autre par un intervalle obscur. Le diamètre extérieur était celui d'une source lumineuse directe; le diamètre intérieur correspondait évidemment au cas d'une planète passant sur le Soleil.

Cette disposition expérimentale était d'ailleurs préférable à la précédente, car pour les deux diamètres les conditions d'éclairement étaient identiques. On a obtenu ainsi, avec une excellente lunette de 4 pouces qui nous avait été prêtée par MM. Brunner frères :

Ouverture en centimètres.	Diamètre	
	extérieur.	intérieur.
6,5.....	121",15	36",13
3,0.....	122,17	34,48
1,7.....	125,86	31,46

Avec une lunette de 4 pouces, de foyer un peu plus long, on a eu :

Ouverture en centimètres.	Diamètre	
	extérieur.	intérieur.
5,1.....	131",20	39",63
2,4.....	134,98	37,18
1,2.....	141,51	21,58

Influence de l'intensité de la source. — L'intensité de la source lumineuse a une grande influence sur les résultats.

Ainsi, en plaçant en avant de la double fente dont il vient d'être question un verre vert assez foncé, de manière à réduire notablement l'intensité de la lumière incidente, on a constaté que le diamètre apparent variait beaucoup moins avec l'ouverture et même était sensiblement constant. C'est ce que montrent les nombres suivants :

Ouverture en centimètres.	Diamètre	
	extérieur.	intérieur.
11,5.....	120",50	36",36
3,2.....	119,68	35,06

On obtient la même constance dans les diamètres apparents si, au lieu de réduire l'intensité de la lumière incidente, on diminue, au moyen d'un verre noir suffisamment absorbant interposé entre l'oculaire et l'œil, l'intensité de la lumière reçue par cet organe.

Objections. — On pourrait objecter à ce mode de démonstration que, en réduisant ainsi à 0^m,012 l'ouverture d'une lunette de 4 ou 6 pouces. on se met complètement en dehors des conditions ordinaires d'observation, et que, d'autre part, le foyer de cette petite portion d'objectif diffère peut-être du foyer correspondant à une ouverture plus grande. On a fait, pour répondre à ces objections, les deux séries d'expériences qui suivent :

1° On a comparé entre elles différentes lunettes, en leur laissant une ouverture relativement grande. Voici les résultats obtenus :

		Diamètre	
		extérieur.	intérieur.
Lunette de Rossi.....	16 ^{cm} ,6	119",58	36",278
Lunette de Brunner, réduite à.....	6,6	125,20	34,70
Lunette de Rossi (1), ouverture réduite à....	11,5	99,10	27,56
Petite lunette de Brunner, ouverture entière.	6,0	102,64	20,12

(1) Dans cette seconde expérience, la distance entre la lunette et la double fente avait été considérablement augmentée.

Non seulement le sens du phénomène subsiste, mais les différences sont même plus considérables que celles que nous avons obtenues en diaphragmant une lunette déterminée.

2° On a cherché l'effet que peut produire une variation considérable et graduée du foyer lorsque l'ouverture d'une lunette de long foyer est réduite dans une proportion plus considérable.

On a pris, dans ce but, l'une des lunettes de 4 pouces qui avaient servi à l'observation du passage de Vénus à Nouméa, et, après avoir déterminé avec soin les positions de son foyer pour chacun des diaphragmes employés, on l'a diaphragmée, jusqu'à ne plus laisser en son centre qu'une ouverture de 0^m,012. Déplaçant alors progressivement l'oculaire, on a mesuré les diamètres extérieur et intérieur de la double fente; on a obtenu ainsi les résultats suivants :

Position du foyer.

	cm	Division du tirage.
Ouverture entière.....	10,0	40,0
» réduite à.....	5,1	40,0
» »	2,4	40,5
» »	1,2	40,7

Mesure des diamètres avec l'ouverture de 0^m,012.

Division du tirage.	Diamètre	
	extérieur.	intérieur.
10.....	134",25	34",22
20.....	138,25	31,68
25.....	137,93	30,96
30.....	139,84	30,18
36.....	140,77	31,57
40.....	140,84	30,97
45.....	141,82	30,11
50.....	142,01	31,17
55.....	140,26	31,04
60.....	137,61	34,00

Aux divisions extrêmes 10 et 60 du tirage, l'image avait complètement perdu sa netteté et les pointés étaient fort incertains. Négligeons

les mesures faites dans ces deux positions; les autres diffèrent peu l'une de l'autre, et les valeurs qui correspondent au foyer adopté coïncident presque exactement avec les moyennes

$$140'',21, \quad 31'',08$$

des diamètres obtenus successivement.

Conclusions. — Ces expériences démontrent que :

1° Le diamètre apparent d'un disque lumineux, suffisamment éclairé, augmente d'une façon continue quand on diminue progressivement l'ouverture de la lunette d'observation;

2° Le diamètre apparent d'un disque obscur, mesuré sur un fond suffisamment lumineux, diminue d'une façon continue quand on diminue progressivement l'ouverture de la lunette d'observation;

3° Le diamètre apparent du même disque est toujours plus petit dans le second cas que dans le premier.

En ce qui regarde le passage de Vénus, nous dirons que d'un côté le diamètre apparent du Soleil s'étend au delà de ses limites géométriques en une zone lumineuse d'intensité graduellement décroissante et d'étendue variable avec l'ouverture de l'instrument employé, tandis que le diamètre apparent de Vénus est terminé en deçà de ses limites géométriques par une zone lumineuse d'intensité décroissante et variable avec l'ouverture de l'instrument employé.

Si l'éclairement du fond du ciel et celui du disque de Vénus étaient identiques, ces deux zones auraient, d'ailleurs, sensiblement la même étendue.

Ces résultats sont entièrement conformes à la théorie ondulatoire, telle qu'elle a été autrefois donnée par Schwerd dans son important Mémoire sur la diffraction, et que j'ai complétée il y a quelques années ⁽¹⁾.

D'après cette théorie, chaque objectif ou chaque miroir est en effet caractérisé, pour la mesure des diamètres des astres d'une certaine étendue angulaire, par une constante déterminée, qui diffère de son

⁽¹⁾ *Étude de la diffraction dans les instruments d'Optique*, par M. Ch. André (*Annales scientifiques de l'École Normale supérieure*, 2^e série, t. V, p. 275 et suiv.).

pouvoir séparateur et qui varie comme lui avec l'intensité même de la source.

Cette constante, que j'ai appelée *Constante de diffraction instrumentale*, a théoriquement une valeur de

$$2'',8$$

pour un objectif ou un miroir de $0^m,10$ d'ouverture.

Remarque. — Lorsque, en diaphragmant l'objectif d'une quelconque des lunettes employées, on en réduisait l'ouverture à n'avoir plus que $0^m,05$ ou $0^m,06$, on a toujours vu les deux rectangles lumineux de la double fente entourés d'une ou plusieurs franges brillantes dont le nombre, la largeur et l'éloignement du bord lumineux du rectangle allaient en augmentant à mesure que l'ouverture diminuait.

Ce phénomène, déjà aperçu par Baden Powell ⁽¹⁾ et que MM. Wolf et André avaient aussi remarqué en 1869 ⁽²⁾, en lui assignant une autre cause, est également une conséquence directe de la théorie mathématique de la diffraction.

B. — Vérification astronomique.

Quelque convaincants que soient les résultats des expériences que nous venons de citer, il est intéressant de rechercher dans les observations astronomiques elles-mêmes des preuves nouvelles de ces variations nécessaires des diamètres apparents de Vénus et de Mercure obtenus par les astronomes dans les conditions diverses que nous avons indiquées plus haut.

Nous réunirons pour cela les mesures qui nous ont paru les plus exactes des diamètres de Vénus et de Mercure, déterminés soit dans les conditions ordinaires d'observation, c'est-à-dire la nuit ou le jour, les planètes se projetant sur le fond du ciel, soit lorsque, passant sur le Soleil, elles se projettent sur son disque lumineux. Les nombres donnés

⁽¹⁾ *On irradiation*, by the Rev. Baden Powell (*Memoirs of the royal astronomical Society*, vol. XVIII, p. 69).

⁽²⁾ *Loc. cit.*, p. 137.

dans ce Tableau sont les valeurs des diamètres réduites à l'unité de distance.

1° VÉNUS.

Conditions ordinaires d'observation.

Observateur.	Instrument.	Micromètre.	Diamètre.
Robert Main ⁽¹⁾ (nuit).	Équatorial.. 0 ^m , 170	Double image	17", 620
Wichmann ⁽²⁾ (nuit)..	Héliomètre. 0 ^m , 162	Héliomètre	17", 392

Diamètres mesurés pendant les passages.

a. — PASSAGE DE 1761 ⁽³⁾.

Observateur.	Instrument.		Diamètre.
Mallet et Canton....	Télescope.....	1 ^{pl} , 5 de foyer	16", 310
Mason et Dixon....	Télescope.....	2 ^{pl} , 0 de foyer	16", 812

b. — PASSAGE DE 1769 ⁽⁴⁾.

Maskelyne.....	Télescope.....	2 ^{pl} de foyer	16", 103
Rittenhouse.....	Réfracteur.....	3 ^{po} d'ouverture	16", 552
Hornsley.....	Réfracteur.....	12 ^{pl} de foyer	16", 783

c. — PASSAGE DE 1874.

Amiral Mouchez ⁽⁵⁾ .	Équatorial.....	0 ^m , 217 d'ouv.	16", 992
Colonel Tennant ⁽⁶⁾ .	Équatorial.....	0 ^m , 152 d'ouv.	16", 904

2° MERCURE.

Les déterminations du diamètre de Mercure faites dans les conditions ordinaires d'observation sont trop difficiles et trop peu nombreuses

⁽¹⁾ *On the values of the diameters of the planets having measurable disks, as determined with a double image micrometer attached to the East equatorial of the royal Observatory Greenwich (Memoirs of the royal astronomical Society, vol. XXV, p. 21 et suiv.).*

⁽²⁾ *Messungen von Durchmessern mit dem Königsberger Heliometer (Astronomische Nachrichten, vol. XXXII, n° 749; 1851).*

⁽³⁾ *Die Entfernung der Sonne von der Erde aus dem Venusdurchgange von 1761, hergebeitet von J.-F. Encke, vice-Director der Sternwarte Seeberg, p. 74.*

⁽⁴⁾ *Philosophical Transactions, pour 1769, 1770 et 1771.*

⁽⁵⁾ *Recueil de Mémoires, Rapports et Documents relatifs à l'observation du passage de Vénus sur le Soleil, vol. II.*

⁽⁶⁾ *Monthly Notices of the royal astronomical Society, vol. XXXI, p. 343.*

pour que nous les fassions entrer en comparaison ; il en existe, au contraire, un grand nombre de valeurs obtenues pendant les différents passages de cette planète sur le Soleil.

d. — PASSAGE DE 1832.

Observateur.	Instrument.		Diamètre.
Bessel ⁽¹⁾	Héliomètre.....	0 ^m ,160	6",697
Gambart ⁽²⁾	Équatorial.....	0 ^m ,070	5",184

e. — Passage de 1845.

Mitchel.....	Équatorial.....	0 ^m ,265	6",522
Madler ⁽³⁾	Équatorial.....	0 ^m ,244	6",542
J. Schmidt ⁽⁴⁾	Équatorial.....	0 ^m ,068	6",057

f. — PASSAGE DE 1868 ⁽⁵⁾.

C. Wolf.....	Équatorial.....	0 ^m ,204	6",367
J. Plummer.....	Équatorial.....	0 ^m ,165	6",077
O. Struve.....	Équatorial.....	0 ^m ,064	4",618

L'examen de ces Tableaux montre que :

1° Toujours le diamètre de Vénus, mesuré dans les conditions ordinaires d'observation, est plus grand, quelque grande que soit l'ouverture de la lunette, que celui que l'on obtient lors des passages de cette planète sur le disque du Soleil ;

2° Les diamètres de Vénus et de Mercure, mesurés pendant les passages de ces planètes sur le disque du Soleil, décroissent en même temps que les ouvertures des lunettes employées ;

3° Si l'on calcule, à l'aide des observations du passage de Mercure de 1868 et du passage de Vénus de 1874, la *constante de diffraction*

(1) *Astronomische Nachrichten*, vol. X, n° 228.

(2) *Astronomische Nachrichten*, vol. X, n° 332.

(3) *Astronomische Nachrichten*, vol. XXIII.

(4) Ce diamètre est déduit de la moyenne des durées d'un grand nombre de passages de la planète derrière les fils du micromètre (*Astronomische Nachrichten*, vol. LVI.

(5) *Recherches sur les apparences singulières qui ont souvent accompagné l'observation des contacts de Mercure et de Vénus avec le bord du Soleil*, par MM. C. Wolf et Ch. André.

instrumentale relative à une lunette de 0^m,10 d'ouverture, on trouve

Pour le passage de Mercure..... 2",8

Pour le passage de Vénus..... 2",5

soit en moyenne

2",6,

valeur qui s'accorde de la manière la plus satisfaisante avec celle qu'indique la théorie.

II. — APPARENCES QUE PRÉSENTENT LES CONTACTS DE VÉNUS ET DE MERCURE AVEC LE DISQUE DU SOLEIL.

G. — Étude expérimentale.

L'étude directe des apparences que présentent les contacts de Vénus avec le bord du Soleil a été faite dans les mêmes conditions que celle des variations de diamètre de cette planète.

Mais, les recherches que nous avons décrites précédemment ayant démontré l'importance considérable qu'il y avait à pouvoir augmenter, autant que possible, l'intensité de la source lumineuse, nous avons ajouté aux appareils d'éclairement dont nous nous étions servis jusque-là, lumière Drummond et lampe ordinaire, une machine électromagnétique de l'Alliance. Cette machine était placée dans l'une des pièces extérieures du laboratoire de M. Henri Sainte-Claire Deville et au voisinage d'un moteur à vapeur, qui entretenait son mouvement; des câbles ordinaires amenaient l'électricité dans une lampe régulateur de Serrin, placée derrière l'appareil qui devait simuler le contact, et la lumière produite était projetée sur une lame de verre dépolie intermédiaire, qui servait de fond lumineux et sur laquelle on obtenait ainsi un éclairément régulier et excessivement intense.

Nous étudierons d'abord les contacts internes.

Description de l'appareil d'observation. — Le but que l'on se proposait était de pouvoir reproduire le passage de Vénus sur le Soleil, non seulement à partir du contact géométrique, pendant la période qui le suit pour l'entrée et pendant celle qui le précède pour la sortie, mais d'é-

tudier aussi ce qui se passe avant le contact pour l'entrée et après le contact pour la sortie.

Il fallait, en même temps, obtenir automatiquement l'instant du contact géométrique aussi bien à l'entrée qu'à la sortie.

On a réalisé ces conditions à l'aide de l'appareil suivant, que MM. Brunner frères ont construit avec leur habileté ordinaire.

Un petit disque métallique V (*Pl. I et II*), de 0^m,028 de diamètre, taillé en biseau sur son limbe du côté de l'observateur et soigneusement noirci, mais dont l'autre face est parfaitement plane, est porté par un chariot *c*, lequel glisse sur deux rails d'acier dont l'un est plan, tandis que l'autre est terminé à sa partie supérieure en une arête prismatique. On est ainsi assuré d'avoir, pour le chariot et pour le disque représentant la planète, un déplacement rectiligne.

Le chariot *c* est muni à son intérieur d'un écrou de bronze que traverse une vis micrométrique en acier; celle-ci est reliée par un ensemble de rouages R à un axe sur lequel se fixe une tige E, à laquelle un régulateur isochrone du système de M. Yvon Villarceau, fixé sur un pilier de pierre spécial, communique un mouvement uniforme de rotation dans un sens déterminé (¹).

La vitesse du régulateur et les dimensions des rouages R étaient calculées de telle sorte que le déplacement rectiligne du chariot, et par conséquent du petit disque V, correspondît dans la lunette d'observation à un déplacement angulaire sensiblement le même que le déplacement angulaire relatif de Vénus sur le Soleil lors du passage de 1874.

Rouage de transmission. — Le mécanisme transmettant à la vis micrométrique le mouvement du régulateur était tel que, la tige E tournant toujours dans le même sens, la vis micrométrique tournât au contraire alternativement dans les deux sens, et de plus que ce changement de sens pût se faire automatiquement.

Un premier pignon *p* communique son mouvement par l'intermédiaire d'une roue centrale R, d'un diamètre environ quatre fois plus grand, à une seconde roue R' de même diamètre. L'axe de la roue R' porte, du côté du chariot, une autre roue *r'*, de 0^m,02 de diamètre,

(¹) Ce régulateur avait été obligeamment mis à notre disposition par M. Breguet.

qui communique son mouvement au moyen d'un pignon intermédiaire à la roue r'' , centrée sur le même axe que la roue R. Les deux roues r'' et R ont donc le même mouvement angulaire, mais elles tournent en sens inverse l'une de l'autre. Pour obtenir le résultat demandé, il suffit, par conséquent, de faire commander l'axe de la vis micrométrique tantôt par l'une, tantôt par l'autre de ces deux roues. A cet effet, les deux roues r'' et R s'emboîtent librement et à frottement doux sur l'axe de la vis; mais entre les deux est une pièce de bronze b , glissant longitudinalement sur l'axe au moyen d'une disposition à baïonnette, et par suite entraînant toujours celui-ci dans son mouvement de rotation. Les faces opposées de cette pièce de bronze portent extérieurement, vers R et vers r'' , un petit doigt cylindrique d'acier z ; les faces des deux roues R et r'' qui regardent cette pièce de bronze sont armées de doigts identiques z : dès lors, si la pièce intermédiaire est poussée vers R, le doigt porté par cette roue viendra, à un moment de sa révolution, accrocher le doigt correspondant de la pièce de bronze; l'axe de la vis sera alors rendu solidaire de la roue R et tournera librement autour de l'axe, tandis que celui-ci sera rendu solidaire de l'autre roue, et il effectuera son mouvement dans le même sens qu'elle, c'est-à-dire en sens inverse du premier.

Le mouvement longitudinal de la pièce de bronze était obtenu au moyen d'un levier coudé Z , dont l'une des branches, mobile autour d'un axe horizontal, était intercalée entre les deux lames extérieures de la pièce de bronze, et dont l'autre branche B, également mobile autour d'un axe horizontal, était située entre deux arrêts à vis, portés aux extrémités du chariot et qui la poussaient l'un à droite, l'autre à gauche, suivant que le chariot était à peu près arrivé soit à l'une, soit à l'autre des deux extrémités de sa course. Celle-ci était réglée pour que les changements de sens se produisissent à 15 minutes environ du contact géométrique.

Tout cet ensemble de mécanismes était installé sur un bâti solide en fonte, qu'on scellait lui-même sur le pilier de pierre dont nous avons déjà parlé.

Mécanisme produisant le contact et l'inscrivant automatiquement. — Le bord du Soleil était formé par une plaque métallique noircie M,

parfaitement plane du côté de l'observateur, circulaire à sa partie inférieure et taillée en biseau sur l'autre face, de façon à présenter aux rayons lumineux venant de la source un tranchant très mince. On se mettait ainsi à l'abri des petites erreurs pouvant provenir d'un léger défaut de perpendicularité entre l'axe optique de la lunette d'observation et le plan de cette lame.

Cette lame métallique était vissée, comme le montre la *Pl. II*, sur un pied solide en fonte A, scellé sur le même massif de pierre que le support de la planète; et on l'avait fixée, au moyen d'expériences préliminaires, dans une position telle que la surface antérieure de la lame métallique fût parallèle au plan parcouru par la face postérieure du disque représentant la planète (la distance entre la face antérieure de la lame et la face postérieure de la planète était d'environ $\frac{2}{10}$ de millimètre).

De cette façon, la course de la planète, par rapport à la portion éclairée du verre dépoli que définit la lame métallique représentant le fond du ciel, n'est point limitée par cette lame elle-même, et il suffit de régler convenablement à l'avance la position du pilier de fonte qui porte la lame métallique pour que la course totale de la planète artificielle soit divisée en deux parties sensiblement égales par la position qu'occupera cette planète au moment du contact géométrique ⁽¹⁾.

Quant au moment de ce contact géométrique, on l'obtenait comme il suit : on doublait, pour ainsi dire, le bord du Soleil par une lame additionnelle L, dont le bord inférieur était travaillé suivant le même cercle, et qui, mobile autour d'un point de la lame métallique, venait s'appuyer à l'autre extrémité sur un arrêt fixe au moyen d'une vis de réglage. A l'aide de cette vis on réglait au microscope la position de la lame L, de telle façon que son bord inférieur et le tranchant de la lame M qui lui servait de support fussent sur la surface du cylindre mené par ce tranchant perpendiculairement à la lame M; ou, en d'autres termes, de façon que, vus d'un point situé sur une perpendiculaire à la lame

(1) Le rayon du disque de la planète et celui du cercle qui limitait la lame métallique à sa partie inférieure étaient calculés de façon à donner, du centre optique de l'objectif, les mêmes diamètres apparents que le Soleil et la planète dans l'observation du passage réel.

figurant le fond du ciel et passant par celui où devait se produire le contact, ces deux bords n'en figurassent exactement qu'un seul. Cette lame additionnelle était équilibrée par un contre-poids P convenable porté par un fil passant sur une poulie très mobile (*Pl. II*).

D'un autre côté, la lame métallique M d'une part et le support de la planète d'autre part communiquaient, par l'intermédiaire de bornes convenablement isolées, avec les deux pôles d'une pile. Au moment où le bord de la planète arrivait à toucher le bord inférieur de la lame mobile L, le courant se trouvait brusquement fermé; mais, la planète continuant sa course, cette lame était progressivement soulevée et se déplaçait en avant du fond obscur du ciel, sans que l'observateur placé à la lunette eût conscience de ce déplacement.

Dans le circuit allant de la pile à l'appareil à passages artificiels, et à portée de l'observateur, était interposé un chronographe de Breguet, dont l'une des plumes était commandée par le contact dont nous venons de parler.

Une pendule astronomique (¹), placée aussi à portée de l'observateur, commandait une autre aiguille du chronographe et inscrivait la seconde, d'une façon continue, en regard des signaux correspondant aux contacts géométriques.

En outre, un manipulateur de Morse, placé à côté de la lunette d'observation sur l'un des piliers de pierre qui la portaient, commandait une troisième aiguille du chronographe et servait à l'observateur pour enregistrer, parallèlement aux deux premiers, tel signal de temps qu'il jugeait convenable de noter pendant l'observation.

Enfin, j'ajouterai qu'un bras extérieur B du levier directeur du sens du mouvement de la vis micrométrique permettait à l'observateur de faire changer à sa volonté celui-ci, lorsqu'il jugeait utile de ne point attendre que l'interversion fût produite par l'appareil lui-même.

(¹) Cette pendule, qui nous avait déjà servi pour l'observation du passage de Vénus à Nouméa, nous avait été prêtée par le cabinet de Physique de l'École Normale.

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX.

Les lunettes dont on s'est servi pour l'observation étaient les mêmes que dans les expériences que nous avons déjà décrites :

Lunette de Rossi.....	6	pouces	d'ouverture.
Lunette de Nouméa... ..	4	»	»
Lunette de Brunner.....	4	»	»
Lunette du Collège de France..	2	»	»

Nous supposons le champ éclairé par la lumière électrique et la planète loin du bord du Soleil, tout entière sur la portion lumineuse du disque. A un moment donné, on met cette planète en mouvement en desserrant la vis d'arrêt du régulateur, et, au moyen du levier, on donne au mouvement de rotation de la vis micrométrique le sens qui force la planète à se rapprocher du bord du Soleil. L'observateur note d'ailleurs au manipulateur les phases qui lui paraissent importantes.

Lunette de 6 pouces. — A une distance du contact géométrique qui varie avec l'état de l'œil et les petites irrégularités de l'éclairement du fond, mais qui dans nos expériences est comprise entre 50^s et 55^s, on voit apparaître un assombrissement léger entre le bord de Vénus et celui du Soleil. A mesure que la planète se rapproche du Soleil, cet assombrissement se fonce peu à peu au centre en devenant estompé sur les bords.

Bientôt la planète dépasse visiblement le bord de l'écran qui limite le fond du ciel; mais les angles formés au point d'intersection des deux arcs sont peu nets, comme arrondis et également estompés, si bien que l'on n'a la sensation réelle du phénomène géométrique que présenterait l'intersection de deux cercles que 1^m30^s après le contact réel.

Lunette de 4 pouces. — L'assombrissement commence plus tôt, 65^s en moyenne avant le contact géométrique; il est plus large que dans le cas précédent et procure bientôt la sensation d'un ligament noir, estompé sur les bords, reliant le bord de la planète à celui du Soleil, ligament dont la largeur et l'intensité vont en aug-

mentant progressivement. Enfin la planète paraît avoir nettement dépassé le bord du Soleil; mais, au point d'intersection des deux cercles les angles sont beaucoup plus arrondis que tout à l'heure et ce n'est qu'environ 2^m après le contact réel que l'on commence à avoir la sensation à peu près nette de deux cercles qui se coupent.

Lunette de 2 pouces. — L'assombrissement commence beaucoup plus tôt encore, 2^m 10^s avant le contact géométrique, et il se transforme très-rapidement en un véritable ligament noir, estompé sur les bords, beaucoup plus large, relativement au diamètre de la planète.

Lorsque celle-ci a visiblement dépassé le bord du Soleil, les apparences que nous avons signalées dans les deux cas précédents sont ici encore exagérées, et ce n'est que très longtemps après le contact géométrique que la sensation due au phénomène se rapproche notablement de celle de l'intersection de deux cercles.

La *Pl. III* donne les apparences que l'on a observées avec la lunette de 4 pouces (*fig. 1, 2, 3*) et avec la lunette de 6 pouces (*fig. 4, 5, 6*) aux trois époques suivantes :

Quarante secondes avant le contact;

Quinze secondes avant le contact;

Au moment même du contact.

Phénomènes observés avec une même lunette dont on diaphragme l'objectif. — Si, au lieu d'employer des lunettes différentes et d'ouverture décroissante, on réduit de plus en plus, par des diaphragmes, l'ouverture d'une même lunette, le sens général du phénomène est absolument le même : la durée, la teinte et les dimensions de l'assombrissement vont en augmentant à mesure que l'ouverture diminue; et, à première vue, il semblerait que ces deux ordres de faits soient inversement proportionnels l'un à l'autre.

Influence de l'intensité lumineuse de la source. — Avec la lumière Drummond, à cette différence près que l'observation est plus facile, l'œil étant moins vivement ébloui, les phénomènes sont de tous points analogues aux précédents : l'assombrissement commence en moyenne

quelques secondes plus tard, et l'œil ne remarque point une différence bien sensible dans son intensité et ses dimensions avec ce qu'il avait vu précédemment.

Mais si, empêchant l'accès du gaz oxygène dans le chalumeau, on éclaire la lame de verre dépoli avec le gaz seul, on n'aperçoit plus de trace sensible d'assombrissement ni avec la lunette de 6 pouces ni avec la lunette de 4 pouces; et, même avec la lunette de 2 pouces, cet assombrissement est très faible.

Les apparences sont les mêmes si l'on réduit progressivement, au moyen de diaphragmes, l'ouverture de la lunette de 6 pouces.

D. — Discussion de ces résultats

Ces faits sont contradictoires avec les explications, que nous avons rappelées en commençant, des apparences singulières que présentent quelquefois les passages de Vénus et de Mercure.

La continuité absolue du mode de formation du ligament pas plus que la gradation successive de sa teinte ne peuvent se comprendre, en effet, dans l'hypothèse de M. Stone; elles sont d'ailleurs aussi inexplicables avec l'ancienne hypothèse de l'irradiation de Lalande et Powalky.

L'augmentation de la durée et des dimensions du ligament obtenue quand on réduit, au moyen de diaphragmes, l'objectif de la lunette à ne plus servir que par ses parties centrales, exclut à son tour l'idée que, comme M. Wolf et moi l'avons publié autrefois, les défauts résultant d'une aberration de sphéricité sont la cause principale de production du ligament.

D'un autre côté, l'augmentation progressive des mêmes éléments, observée lorsqu'on étudie le phénomène avec des lunettes d'ouverture décroissante, la disparition complète de ces apparences singulières dès que l'intensité de la source lumineuse est suffisamment faible, montrent bien qu'elles sont, comme les variations des diamètres des astres mesurés dans une lunette, des phénomènes de diffraction. Il semble même que ces apparences singulières doivent être considérées comme l'une des preuves les plus certaines de l'influence que peut avoir la diffraction sur les observations d'astres à diamètre apparent sensible, faites avec

nos lunettes, et l'un des moyens les plus commodes de la mettre en évidence dans un cas particulier, éminemment favorable.

Mais la démonstration de cette dépendance est trop importante, dans l'étude de la question actuelle, pour qu'on n'ait point cherché à en multiplier les preuves expérimentales.

E. — Dimensions du ligament noir.

L'une d'elles consiste à comparer les dimensions du ligament limité à un même éclaircissement et mesuré avec différentes ouvertures sur une planète immobile par rapport aux bords du Soleil. C'est ce que l'on a fait avec la lunette de Rossi.

Après avoir dirigé le fil mobile du micromètre perpendiculairement à l'axe du ligament (sensiblement vertical par la disposition même des appareils d'expérience), on a pointé le bord supérieur du ligament avec le bord supérieur du fil, et le bord inférieur du ligament avec le bord inférieur du fil, en diaphragmant l'objectif de la lunette aux valeurs successives suivantes :

$$0^m,115, \quad 0^m,080, \quad 0^m,060, \quad 0^m,040.$$

On avait d'ailleurs arrêté la planète à la position où elle est en contact géométrique avec le bord du Soleil. On obtint ainsi les nombres suivants, exprimés en parties du micromètre :

1876, Octobre 6.

Ouv. = 0 ^m , 115.		Ouv. = 0 ^m , 080.		Ouv. = 0 ^m , 060.		Ouv. = 0 ^m , 040.	
Haut.	Bas.	Haut.	Bas.	Haut.	Bas.	Haut.	Bas.
^p 53,0	^p 63,7	^p 55,0	^p 65,0	^p 57,1	^p 66,9	^p 55,9	^p 67,0
53,9	62,6	54,9	65,0	55,0	67,8	56,0	67,9
54,9	65,3	54,0	64,9	56,0	67,4	54,8	68,9
54,2	64,1	55,4	63,2	55,4	70,0	59,1	68,8
53,1	66,2	53,9	68,1	55,0	70,9	54,9	67,0
56,2	64,9	58,2	69,0	60,3	67,9	54,6	67,9
57,4	67,8	56,0	66,2	59,2	72,0	54,8	69,1
58,5	68,9	54,0	67,2	54,0	70,1	55,0	72,2
57,0	69,3	55,9	69,6	53,2	62,0	56,3	68,8
58,0	68,1	57,1	69,0		65,0	56,1	69,9
Moy.	55,62 66,09	55,44 66,72		55,12 68,00		55,75 68,75	
Diff..	10 ^p , 47	11 ^p , 28		11 ^p , 88		13 ^p , 00	

D'autre part, l'épaisseur du fil, qu'il faut retrancher des nombres précédents pour avoir la longueur vraie, a été trouvée égale à 1^p,97 : les longueurs du ligament, exprimées en parties du micromètre, sont donc les suivantes :

^m 0,115.....	^p 8,50
0,080.....	9,31
0,060.....	10,91
0,040.....	11,03

D'un autre côté, la valeur en secondes d'arc d'une partie du micromètre dans les conditions de l'observation a été trouvée de 0'',3102.

Les longueurs du ligament sont donc, en secondes :

^m 0,115.....	["] 2,88
0,080.....	3,16
0,060.....	3,70
0,040.....	3,74

Or, si l'on se rappelle que dans les conditions du passage de Vénus, qui sont sensiblement celles de notre expérience, *une seconde d'arc* correspond environ à *vingt-cinq secondes de temps*, on verra qu'au moment du contact géométrique les distances des bords apparents du Soleil et de la planète sont, pour les différentes ouvertures, exprimées en temps par les nombres suivants (1) :

^m 0,115.....	^m 1.12,0
0,080.....	1.19,0
0,060.....	1.42,5
0,040.....	1.33,5

Quelque difficiles que soient les pointés faits dans les conditions que nous venons d'indiquer, l'augmentation dans la longueur du ligament, et par suite dans la distance du bord apparent de la planète au bord apparent du Soleil au moment du contact, obtenue en réduisant

(1) Dans ces expériences, l'angle de la ligne que décrit le centre de Vénus avec la tangente au Soleil menée au point de contact était de 34°39'. Le chemin parcouru par le centre de la planète en deux minutes était de 14^p,08 du micromètre, soit très sensiblement une seconde d'arc en vingt-cinq secondes de temps.

l'ouverture de la lunette, est complètement mise en évidence, ainsi que l'influence exercée par la formation du ligament sur l'observation de l'instant du contact.

Mais, dans les expériences que nous venons de citer, la quantité de lumière reçue dans la lunette diminue progressivement à mesure que l'on réduit l'ouverture libre de l'objectif. Il y avait donc lieu de croire que, en ramenant cette quantité de lumière à être la même dans chaque cas, on obtiendrait des résultats plus différents encore.

Aussi a-t-on repris les mesures précédentes en interposant, entre la lame de verre dépoli et la lentille qui projetait sur elle la lumière de la lampe, des lames métalliques circulaires, concentriques à la lentille, et percées de petits trous en nombre tel, que la quantité de lumière envoyée par la lampe sur la lame de verre dépoli fût, dans chaque cas, inversement proportionnelle à la surface laissée libre de l'objectif.

L'apparence générale du phénomène était d'ailleurs la même, soit que ces lames métalliques fussent interposées, soit qu'elles ne le fussent point.

On obtint ainsi les nombres suivants :

1876. Octobre 8.

Ouv. = 0 ^m , 100. 54 trous.				Ouv. = 0 ^m , 060. 146 trous.			
Haut.	Bas.	Haut.	Bas.	Haut.	Bas.	Haut.	Bas.
^p 21,4	^p 28,3	^p 24,5	^p 31,2	^p 19,3	^p 31,6	^p 29,8	^p 37,5
18,8	31,0	20,0	30,0	22,1	30,2	25,4	37,2
22,0	30,4	21,0	34,0	21,4	33,3	27,3	38,4
22,2	29,3	26,5	34,1	22,5	33,0	27,3	38,0
22,6	29,7	26,4	32,0	24,9	34,0	28,4	38,1
19,7	30,8	27,0	36,0	24,2	36,1	28,9	40,0
23,0	31,5	28,4	36,3	25,3	37,9	27,8	40,0
22,0	31,0	27,0	36,0	26,4	36,1	28,3	39,0
23,0	31,3	28,1	37,0	25,0	37,0	29,2	39,0
22,1	31,0	32,3	38,2	26,0	38,0	29,3	40,4
Moy.	22,68 30,43	26,12 34,48		23,41 34,72		28,11 38,66	
Diff..	7 ^p ,75	8 ^p ,36		11 ^p ,31		10 ^p ,65	

soit en moyenne :

0 ^m , 100.....	8 ^p , 05
0 ^m , 060.....	10 ^p , 98

et en tenant compte de l'épaisseur du fil :

0 ^m , 100.....	6 ^p , 08 = 2'', 07
0 ^m , 060.....	9 ^p , 01 = 3'', 07

La différence des longueurs du ligament est, en effet, à peu près la même que dans les premières expériences; mais il faut remarquer que les longueurs absolues du ligament sont au contraire moindres. Ce résultat, dû à ce que l'éclairement du fond lumineux est évidemment beaucoup plus faible, prouve toute l'influence qu'a sur ces phénomènes l'intensité de la lumière incidente.

Traduites en temps, comme nous l'avons fait plus haut, ces valeurs correspondent aux intervalles

0 ^m , 100.....	0 ^m , 51 ^s , 8
0 ^m , 060.....	1 ^m , 6 ^s , 2

pour les distances du bord de la planète au bord du Soleil.

F. — Influence de différentes imperfections de l'observation.

Il résulte de la discussion précédente que la formation du ligament noir est bien un phénomène de diffraction et que les défauts de l'objectif ou du miroir ne peuvent que modifier faiblement les apparences qui le caractérisent; il convient néanmoins d'étudier en détail les effets que peuvent produire les différentes imperfections de l'observation.

Défauts de la mise au point. — L'influence d'un défaut dans la mise au point a été étudiée de la façon suivante.

La planète étant laissée immobile à 0^s, 8 du contact interne de sortie, on a mesuré les longueurs successives du ligament, correspondant à des positions successives de l'oculaire marquées par des divisions de son tirage différant de centimètre en centimètre. Le point normal répond à la division 4,9 du tirage, et l'oculaire est le plus enfoncé lorsqu'on lit zéro sur la même échelle. On a obtenu les résultats suivants :

Tirage.	Longueur du ligament.
4, 2.....	Les images, ainsi que le ligament, manquent totalement de netteté, et toute mesure est impossible.
5, 2.....	2", 16
6, 2.....	2", 14
7, 2.....	Les images ont perdu leur netteté, et les mesures sont impossibles; d'ailleurs les deux bords se sont visiblement écartés, et le ligament semble composé d'anneaux obscurs successifs.

Défauts de l'objectif. — De plus, on a observé le passage artificiel avec des lunettes dont on écartait à dessein les deux lentilles de l'objectif et aussi avec une lunette à trois verres dans laquelle on changeait l'ordre des surfaces : toujours les résultats ont été les mêmes que précédemment. En d'autres termes, tant que les défauts des lunettes ou de la mise à point n'ont pas été assez grands pour que les images ne fussent plus tolérables, l'ensemble général des apparences ne s'est pas modifié sensiblement.

On doit conclure de là que, dans les conditions habituelles d'observation, les imperfections ordinaires des lunettes et les petites différences de mise au point n'ont pas sur les apparences que présentent les passages de Vénus et de Mercure une influence prépondérante ni même bien considérable. Nous en trouverons plus loin de nouvelles preuves.

Défauts de l'œil. — L'une des imperfections les plus générales de l'œil est ce qu'on appelle la *polyopie* : elle consiste en ce qu'un point lumineux donne lieu dans l'œil à plusieurs images distinctes les unes des autres. Afin d'étudier son influence, M. van de Sande Bakhuyzen a procédé ainsi.

Le ligament noir étant produit, il interposait entre l'œil et l'oculaire une lame métallique percée d'un trou très petit ($0^{\text{mm}}, 2$). Il vit alors le ligament noir s'élargir, fait absolument contraire à l'idée que la polyopie pût intervenir sur la formation du ligament, puisque l'on réduisait dans une grande proportion les parties de la rétine affectées par l'agent lumineux. « Et d'ailleurs, dit-il, cela se comprend de soi, car une diminution de l'objectif diminue le faisceau de rayons qui passent par la pupille de la même manière qu'une petite ouverture placée devant l'œil. »

Cette explication nous laissant quelque doute, nous avons repris l'expérience précédente, et ce que nous avons vu ne concorde pas absolument avec l'affirmation de M. van de Sande Bakhuyzen. Si ce petit diaphragme est bien centré sur l'axe optique de la lunette, la seule modification produite est une définition plus géométrique du ligament, dont les parties estompées latérales sont alors enlevées; si le diaphragme ne reçoit au contraire qu'une partie non symétrique du faisceau lumineux, le ligament s'élargit et devient lui-même dissymétrique.

Il n'en est pas moins prouvé que la formation du ligament noir ne saurait être attribuée à la polyopie.

G. — Phase du passage qui correspond au contact géométrique.

Reste maintenant à déterminer quelle est la phase du passage qui correspond au contact géométrique et l'erreur probable de son observation.

Considérons un contact interne de sortie.

Il existe dans ce phénomène une phase de peu de durée qu'après une observation attentive on sépare pour ainsi dire forcément, parce qu'elle se produit d'une manière un peu plus brusque que toutes les variations continues qui la précèdent et la suivent : c'est le moment où, la partie centrale du ligament ayant pris son maximum de teinte, ses arêtes contiguës au Soleil commencent à se courber. D'ailleurs, la théorie montre que le contact géométrique coïncide avec une des portions de cette phase : c'est donc sur elle qu'ont porté nos déterminations. Au bout d'un petit nombre d'essais, on arrive à distinguer assez nettement le moment où se produit la courbure dont nous venons de parler, pour que la différence entre l'instant observé et l'instant du contact enregistré automatiquement par l'appareil devienne sensiblement constante.

Je citerai par exemple la série suivante, obtenue avec la lunette de 4 pouces de Nouméa, à l'éclairage électrique (').

(') On prend pour origine la seconde qui précède le premier des deux signaux électriques.

1876. Septembre 9.

Ouverture.	Contact observé.	Contact enregistré.	Obs. — Err.
m	s	s	s
0, 10.....	0, 4	2, 8	— 2, 4
0, 10.....	0, 2	2, 2	— 2, 0
0, 10.....	0, 0	1, 0	— 1, 0
0, 10.....	0, 7	2, 5	— 1, 8
0, 10.....	0, 2	1, 5	— 1, 3
0, 10.....	0, 9	1, 9	— 1, 0
		Moyenne.....	— 1, 6

La phase que nous indiquons précède donc le contact géométrique de 1^s,6 en moyenne, et l'appréciation de l'instant où elle se produit se fait à moins de 0^s,8 d'erreur moyenne.

Quant au contact d'entrée, nous observions le moment où, la teinte de la partie centrale du ligament n'ayant point encore diminué, les bords de ce ligament devenaient rectilignes au voisinage du Soleil : c'est évidemment la phase correspondante de la précédente. On a obtenu les nombres suivants ⁽¹⁾ :

1876. Septembre 2.

Ouverture.	Contact enregistré.	Contact observé.	Obs. — Err.
m	s	s	s
0, 10.....	0, 0	0, 1	+ 0, 1
0, 10.....	0, 0	1, 4	+ 1, 4
0, 10.....	0, 6	1, 7	+ 1, 1
0, 10.....	0, 0	0, 8	+ 0, 8
0, 10.....	0, 9	1, 7	+ 0, 8
0, 10.....	0, 0	— 0, 2	— 0, 2
		Moyenne.....	+ 0, 7

L'instant choisi suit donc le contact géométrique en moyenne de 0^s,7, et l'erreur moyenne de l'observation est de 0^s,6.

D'ailleurs, il faut remarquer qu'à l'entrée il se rapproche plus du contact géométrique qu'à la sortie.

L'intervalle qui sépare la phase observée de l'instant du contact

(1) On prend pour origine la seconde qui précède le contact enregistré.

géométrique augmente quand on réduit l'ouverture, et, en même temps, l'observation se fait avec moins de précision. Ces résultats étaient faciles à prévoir; ils sont mis en évidence par le Tableau suivant, où l'on a inscrit les différences (Obs. — Enr.) :

1876. Septembre 2.

Ouv. = 0 ^m ,060.	Ouv. = 0 ^m ,035.
^s	^s
+ 0,3	+ 2,0
+ 1,8	+ 1,7
+ 1,2	+ 1,6
+ 1,6	+ 1,9
+ 1,7	+ 2,8
+ 0,7	+ 2,8
Moyenne... + 1,2	Moyenne... + 2,1

Influence d'un défaut de mise au point. — Il est intéressant de déterminer l'influence d'un défaut de la mise au point sur l'observation du contact, tel que nous l'avons défini plus haut. Voici la série qui s'y rapporte, faite avec la lunette de 4 pouces de Nouméa. La mise au point exacte étant à la division 34,5 du tirage, on a fait varier systématiquement la position de celui-ci dans son coulant.

1876. Septembre 6.

Tirage.	Obs. — Enr.	Remarques.
40,0.....	+ 16,0 ^s	Observation presque impossible; le ligament est formé d'une série d'anneaux. On note la séparation apparente des anneaux et du disque.
39,0.....	+ 5,9	Observation presque impossible. On note le même effet.
37,0.....	»	Observation encore impossible.
36,0.....	— 0,7	L'observation devient possible. Les anneaux que l'on voyait entre le bord de la planète et celui du Soleil sont presque insensibles.
35,0.....	+ 1,0	Observation nette.
34,5.....	+ 1,2	Id.
34,0.....	+ 0,0	Observation nette. Les colorations, qui jusqu'ici étaient vertes, sont maintenant rouges.
33,0.....	+ 1,3	L'observation devient un peu moins commode. Les images commencent à perdre de leur netteté.
32,0.....	+ 2,2	Les anneaux commencent à réapparaître.
31,0.....	»	L'observation est redevenue tout à fait impossible.

Ces expériences montrent que, dès que la mise au point est tolérable, les petites différences qui peuvent exister entre les mises au point des différents observateurs n'ont pas sur l'exactitude du résultat une influence bien considérable.

Influence des ondulations. — Il en est tout autrement des ondulations des images dans le plan focal de la lunette. En effet, le 14 septembre 1876, je fis une série d'observations, après avoir placé au milieu du couloir qui séparait les lunettes de l'appareil à passages un fourneau de laboratoire bien allumé. Les images devinrent peu à peu fort ondulantes; le ligament paraissait parfois se segmenter de façon à former comme une série de franges. Dans ces conditions, l'observation est très difficile; les meilleures de la série donnent comme différence (Obs. — Enr.) $+ 4^s,6$ et $+ 4^s,7$.

Influence du grossissement. — Quant au grossissement employé, son influence est la même que dans les observations astronomiques où l'on veut étudier en détail un objet dont les différentes parties sont diversement éclairées.

H. — Passages de Mercure.

Les apparences que doivent offrir les passages de Mercure sont évidemment les mêmes que celles des passages de Vénus et s'expliquent de la même manière; mais, à cause du petit diamètre apparent de Mercure ($\frac{1}{6}$ environ de celui de Vénus, lors de leurs passages), il était utile d'étudier le phénomène expérimentalement. Dans ce but, on a substitué au disque métallique représentant Vénus un autre disque de diamètre six fois moindre.

On a vu alors, comme pour Vénus, un ligament se produire dans les mêmes conditions, mais avec des dimensions relatives plus grandes, ce qui est, d'ailleurs, conforme à la théorie.

L'observation est un peu plus difficile que pour le passage de Vénus, et les différences entre les contacts observés (tels que nous les avons définis) un peu plus considérables : c'est ce que montrent les résultats suivants, obtenus avec une ouverture de $0^m,10$:

1876. Octobre 25.

Entrée, Obs. — Enr.	Sortie, Obs. — Enr.
^s — 1,6	^s + 0,7
+ 0,1	— 0,6
— 1,4	+ 0,7
+ 0,0	+ 1,6
+ 1,2	+ 0,4
+ 1,8	— 2,6
— 0,7	+ 2,4

Les écarts extrêmes des différentes observations sont 3^s,4 pour l'*entrée* et 5^s,0 pour la *sortie*.

I. — Contacts externes.

On ne voit, au moment des contacts externes, aucun phénomène extraordinaire, aucune irrégularité; mais leur observation est très difficile et la détermination de l'instant du contact toujours fort peu exacte.

Pour obtenir l'erreur d'une pareille observation, on a employé le dispositif suivant.

La lame mobile qui servait à indiquer les contacts internes a été enlevée, et on lui en a substitué une autre que montre la *Pl. II*; elle est extérieure à la lame métallique fixe figurant le bord du Soleil et vient s'appuyer sur son tranchant par une petite facette polie qui s'applique exactement sur lui. Cette lame est, d'ailleurs, équilibrée à son autre extrémité par un contre-poids convenable P.

Au moment où, lors des contacts externes d'entrée, la planète dépasse le bord du Soleil, elle soulève la lame mobile et le courant électrique, brusquement établi, donne un signal sur l'enregistreur. Inversement, lorsqu'au moment du contact externe de sortie la planète dépasse le bord du Soleil pour entrer tout entière sur le fond du ciel, elle abandonne la lame mobile, le courant est brusquement interrompu et un signal lancé dans l'enregistreur.

Aussi bien à l'entrée qu'à la sortie, la différence entre le moment du contact observé et le moment du contact enregistré a toujours été grande. En général, on observait le contact externe de sortie trop tôt

et le contact externe d'entrée trop tard. L'erreur moyenne, sensiblement la même dans les deux cas, oscille, pour les différentes séries, entre douze et dix-sept secondes.

J. — Étude théorique.

Les résultats qui précèdent sont complètement d'accord avec ceux du calcul basé sur la théorie ondulatoire : c'est ce que nous allons prouver, après avoir rappelé la règle à laquelle elle conduit ⁽¹⁾.

L'observation a montré que les différents éléments ou points lumineux dont se compose une source lumineuse de dimensions finies sont, à un instant quelconque, dans des phases différentes de leur période de vibration, de telle sorte que les mouvements qu'ils envoient en un point quelconque du plan focal d'une lunette ne peuvent jamais interférer, et que l'intensité lumineuse en ce point est la somme des intensités qu'y produirait chacun des éléments de la source pris isolément.

L'intensité lumineuse sur un élément superficiel du plan focal est donc représentée par la somme des volumes des parallélépipèdes élémentaires qui lui correspondraient successivement dans le *solide de diffraction* caractéristique de l'ouverture employée ⁽²⁾ si l'on plaçait son axe successivement au centre de chacun des éléments lumineux dont la source est formée; en d'autres termes, quelle que soit la forme donnée à l'ouverture de l'instrument dont on se sert, l'intensité lumineuse en un point quelconque M du plan focal s'obtient comme il suit :

THÉORÈME. — *On place le solide de diffraction caractéristique de l'ouverture de façon que son axe, perpendiculaire au plan focal, passe par le point M; toute la portion du volume de ce solide comprise dans l'image de la source, telle qu'elle résulte des lois de l'Optique géométrique, mesure l'intensité lumineuse au point M.*

⁽¹⁾ SCHWERT, *Beugungserscheinungen*, p. 136 et suiv. — CH. ANDRÉ, *Étude de la diffraction dans les instruments d'Optique*, p. 305 et suiv.

⁽²⁾ En théorie, ce solide de diffraction s'étend indéfiniment dans un sens perpendiculaire à son axe. En pratique, on doit le limiter au minimum à partir duquel l'intensité lumineuse est insensible.

L'application de cette règle nécessite, dans le cas actuel, deux séries différentes de calculs :

1° On étudie les apparences qu'offre un instant déterminé du passage, observé à différentes lunettes; en d'autres termes, l'image géométrique de la source lumineuse restant la même, on change les dimensions du solide de diffraction.

2° On étudie les divers instants du passage, observés avec une même lunette; en d'autres termes, avec un solide de diffraction déterminé on fait varier l'image géométrique de la source lumineuse.

Quant au mode de détermination des points du plan focal dont on cherche successivement l'intensité lumineuse, c'est-à-dire où l'on place successivement l'axe du solide de diffraction, on adoptera celui qu'a choisi M. van de Sande Bakhuyzen et qui est le suivant :

Soit C le point du bord de Vénus où se produit le contact géométrique. A partir de C on divise la circonférence de Vénus par des points équidistants B_1, B_2, B_3, \dots , on joint les points B_1, B_2, B_3, \dots au centre de Vénus, et l'on prolonge ces rayons jusqu'à leur rencontre avec le bord du Soleil en D_1, D_2, D_3, \dots : les milieux E_1, E_2, E_3, \dots des lignes $B_1 D_1, B_2 D_2, B_3 D_3, \dots$ sont les points successifs dont on cherche les éclaircissements.

D'ailleurs, on définit les positions des points B_1, B_2, B_3 par les longueurs en secondes de grand cercle des arcs CB_1, CB_2, CB_3, \dots .

Les résultats de ces calculs, que nous empruntons au Mémoire de l'astronome de Leyde, après les avoir vérifiés, sont réunis dans les Tableaux suivants, où l'unité d'éclairement adoptée est l'intensité lumineuse de la partie centrale de l'image focale du Soleil, où l'éclairement est constant et maximum.

1° On suppose la planète au contact et l'observation faite avec des lunettes dont les ouvertures sont successivement 10 pouces, 7 pouces et 4 pouces; les positions des points dont on détermine les éclaircissements, inscrits dans les colonnes E, sont définies par les arcs CB_1, CB_2, CB_3, \dots évalués en secondes de grand cercle et inscrits dans la colonne A.

A.	E.	E.	E.
	Ouv. = 10 ^P .	Ouv. = 7 ^P .	Ouv. = 4 ^P .
0,0	0,0015	0,0021	0,0037
0,2	0,0027	0,0029	0,0041
0,4	0,0067	0,0057	0,0057
0,6	0,0127	0,0109	0,0081
0,8	0,0206	0,0155	0,0113
1,0	0,0313	0,0226	0,0157
1,2	0,0444	0,0321	0,0209
1,4	0,0603	0,0433	0,0273
1,6	0,0785	0,0561	0,0345
1,8	0,0983	0,0699	0,0425
2,0	0,1209	0,0859	0,0517
2,2	0,1461	0,1037	0,0619
2,4	0,1735	0,1229	0,0728
2,6	0,2020	0,1435	0,0844
2,8	0,2337	0,1659	0,0975
3,0	0,2668	0,1899	0,1116
3,2	0,3014	0,2149	0,1260
3,4	0,3380	0,2417	0,1421
3,6	0,3753	0,2694	0,1587
3,8	0,4135	0,2980	0,1760
4,0	0,4524	0,3280	0,1934
4,2	0,4924	0,3590	0,2131
4,4	0,5320	0,3913	0,2329
4,6	0,5713	0,4244	0,2538
4,8	0,6114	0,4570	0,2751
5,0	0,6485	0,4900	0,2970
5,4	0,7195	0,5565	0,3426
5,8	0,7819	0,6222	0,3906
6,2	0,8311	0,6843	0,4404
6,6	0,8663	0,7413	0,4909
7,0	0,8980	0,7911	0,5409
8,0	0,9303	0,8789	0,6642
9,0	0,9457	0,9193	0,7697
10,0	0,9668	0,9336	0,8470
11,0	0,9806	0,9511	0,8985
12,0	0,9875	0,9686	0,9232

2° On calcule les intensités lumineuses aux différents points du plan focal d'une lunette de 4 pouces pour deux instants du passage définis par les valeurs 0", 1 et 0", 2 de la plus courte distance des bords du Soleil et de Vénus. Dans les conditions du passage de 1874, ces

distances correspondent à des intervalles de $2^s,5$ et $5^s,0$ du contact géométrique. Les résultats sont inscrits dans le Tableau qui suit, où les lettres A et E ont la même signification que plus haut :

Plus courte distance des deux bords : $0'',1$.		Plus courte distance des deux bords : $0'',2$.	
A.	E.	A.	E.
0,0	0,0831	0,0	0,1617
0,2	0,0835	0,2	0,1621
0,4	0,0851	0,4	0,1637
0,6	0,0875	0,6	0,1659
0,8	0,0909	0,8	0,1691
1,0	0,0949	1,0	0,1733
1,2	0,1001	1,2	0,1783
1,4	0,1061	1,4	0,1845
1,6	0,1137	1,6	0,1917
1,8	0,1216	1,8	0,1994
2,0	0,1308	2,0	0,2084
2,2	0,1408	2,2	0,2184
2,4	0,1518	2,4	0,2290
2,6	0,1636	2,6	0,2406
2,8	0,1762	2,8	0,2528
3,0	0,1896	3,0	0,2660
4,0	0,2715	4,0	0,3435
5,0	0,3695	5,0	0,4397
6,0	0,4820	6,0	0,5428
7,0	0,5995	7,0	0,6505
8,0	0,7092	8,0	0,7480
9,0	0,8022	9,0	0,8272
10,0	0,8658	10,0	0,8826
12,0	0,9259	12,0	0,9305

Ces Tableaux montrent que, en vertu de la diffraction, il existe nécessairement un ligament noir au point de contact, que les dimensions de ce ligament augmentent à mesure que l'ouverture de la lunette diminue, qu'enfin le ligament subsiste au voisinage du contact, et que l'éclairement d'un même point du plan focal situé entre le Soleil et la planète va en diminuant graduellement à mesure que diminue la distance des deux astres.

Lorsque la planète est sur le disque du Soleil, l'éclairement d'un point du plan focal situé entre elle et le Soleil varie d'ailleurs encore beaucoup avec l'ouverture de la lunette d'observation, comme le

montrent les nombres suivants, qui se rapportent aux deux plus courtes distances précédentes $d = 0'', 1$ et $d = 0'', 2$:

Ouverture.	$E(d = 0'', 1).$	$E(d = 0'', 2).$
ρ		
10.....	0,1982	0,3825
7.....	0,1405	0,2676
4.....	0,0831	0,1617

K. — Méthodes d'observation déduites des recherches précédentes.

Les expériences que nous venons de décrire nous ont conduit à un mode d'observation qui permet de déduire, de passages compliqués par la formation d'un ligament, des résultats comparables entre eux et au contact géométrique. Mais un tel procédé nécessite, même dans les conditions éminemment favorables où l'on était placé, une éducation spéciale; de plus, il est à craindre que, dans l'observation d'un passage réel, des complications ne surgissent qui rendent l'application de la méthode difficile. Or, il est possible et même avantageux de procéder autrement, et cela de deux manières :

1° En faisant servir, pour ainsi dire, le ligament à assurer l'exactitude de l'observation;

2° En modifiant l'ouverture libre de l'objectif de façon à substituer aux phénomènes normaux de diffraction d'autres phénomènes du même ordre, mais dans lesquels l'influence du ligament est considérablement amoindrie.

Première méthode.

On a vu que, en diminuant suffisamment l'intensité de la source lumineuse incidente, on arrivait à faire disparaître les variations des diamètres du Soleil et de Vénus dues à la diffraction et aussi le ligament noir qui en résulte. En diminuant l'intensité de la lumière envoyée par le Soleil dans le plan focal, soit par une lame de verre absorbante, soit en déposant à sa surface une couche d'argent convenable, on obtiendrait donc ce résultat que le passage de la planète s'observerait de la façon la plus simple, d'une manière toute géométrique et sans aucune trace de ligament noir.

Mais on peut atteindre le même but plus simplement.

Si l'on munit l'oculaire de la lunette d'un verre noir ordinaire d'observation, on voit le ligament diminuer et même disparaître complètement lorsque le verre noir est suffisamment foncé : tout se passe comme si l'on avait graduellement fait décroître l'intensité de la lumière éclairant le plan focal.

Par conséquent, en employant un verre noir de pouvoir absorbant gradué, on pourra réduire à sa volonté les dimensions du ligament noir et obtenir que le phénomène observé diffère à chaque instant infiniment peu du phénomène géométrique. C'est le principe de la première méthode d'observation.

1° *Contact interne d'entrée.* — On commencera l'observation en poussant le verre noir gradué vers la partie la moins absorbante, afin de donner aux images l'intensité lumineuse maximum que l'œil peut supporter; puis, dès que, le bord de la planète ne dépassant plus que faiblement le bord du Soleil, le ligament noir aura apparu, on poussera le verre noir progressivement du côté le plus absorbant, et l'on réduira successivement le ligament à un filet obscur, excessivement délié.

La planète continuant à avancer sur le disque du Soleil, le ligament se reformera peu à peu et reprendra une largeur et une intensité plus grandes. En poussant progressivement le verre noir du côté de la partie absorbante, on s'opposera d'une manière continue aux progrès que ferait le ligament, et on le ramènera toujours à n'être à chaque instant qu'un simple filet obscur très délié. La planète, dont on suit pour ainsi dire avec le verre noir la course pas à pas, continuant à pénétrer sur le disque solaire, il arrivera un moment où elle est en contact avec le bord du Soleil; presque immédiatement après, le filet obscur, très délié, se rompt brusquement : c'est le moment que l'on observe pour le contact interne d'entrée.

On substitue ainsi à l'observation d'un phénomène continu, comme celui que présente le contact purement géométrique, un phénomène instantané, dont l'observation est beaucoup plus précise. Reste à savoir quel est l'intervalle de temps qui sépare le moment ainsi observé de celui du contact géométrique enregistré par l'appareil.

Les nombreuses séries d'expériences que j'ai faites à ce sujet donnent toutes sensiblement les mêmes résultats. Je reproduis l'une d'elles :

1876. Octobre 28.

Ouv. = 0 ^m , 10.		Ouv. = 0 ^m , 06
Obs. — Entr.		Obs. — Entr.
^s		^s
+ 0,3		+ 0,6
+ 0,0		+ 1,1
+ 0,6		+ 1,0
+ 0,1		+ 1,0
+ 0,3		+ 0,9
+ 0,1		+ 0,5
Moyenne... + 0,23	Moyenne...	+ 0,85

La différence peut donc être considérée comme négligeable dès que l'ouverture de l'instrument atteint 0^m, 10.

2^o *Contact interne de sortie.* — Dès que le ligament apparaîtra, on poussera le verre noir vers les parties absorbantes, et cela d'une façon continue et progressive, de manière à réduire encore le ligament à un simple filet obscur très délié. Mais lorsque, la distance apparente des bords de la planète et du Soleil étant devenue très petite, il sera évident que le moment du contact n'est plus éloigné que de quelques secondes (dix à quinze secondes), on poussera le verre noir un peu plus fort que jusque-là, de manière à faire disparaître aussi, mais à peine, cette dernière trace de ligament. On suit alors doucement la planète avec le verre noir afin de s'opposer à la reproduction du pont, et l'on observe le contact géométrique que l'on s'est ainsi préparé.

Le Tableau suivant donne un exemple des résultats obtenus :

1876. Octobre 28.

Ouv. = 0 ^m , 10.		Ouv. = 0 ^m , 06
Obs. — Entr.		Obs. — Entr.
^s		^s
+ 0,7		+ 1,2
+ 0,1		+ 1,6
— 0,8		— 1,6
— 1,0		— 1,0
— 0,8		— 0,3
+ 0,6		— 0,9
— 0,2		— 1,2
Moyenne... — 0,18	Moyenne...	— 0,30

L'observation est un peu moins précise que celle de l'entrée; on

observe le contact, tantôt avant, tantôt après le contact réel, mais la différence maximum, même avec une ouverture réduite à $0^m,06$, est d'environ une seconde et demie.

On remarquera que, dans l'un et l'autre de ces deux cas, on a laissé aux images observées l'intensité lumineuse la plus grande possible; cette condition est, en effet, très importante pour assurer l'exactitude des observations. Pour le contact de sortie, par exemple, si, au lieu de réduire le pouvoir absorbant du verre noir à ce qui est strictement nécessaire pour faire disparaître le ligament, on pousse plus loin le verre noir, on obtient évidemment encore un contact géométrique, mais dont l'observation est de moins en moins nette à mesure que l'éclairement des images diminue.

Deuxième méthode.

En étudiant la diffraction dans les instruments d'Optique, j'ai décrit les propriétés d'un écran *en réseau*, formé d'un très grand nombre d'anneaux égaux, de $0^m,002$ à $0^m,005$ de largeur, alternativement vides et pleins (¹). Placé en avant de l'objectif d'une lunette, cet écran modifie complètement la forme du solide de diffraction correspondant à un point lumineux; les hauteurs des parties marginales deviennent comparables aux hauteurs des parties centrales; en d'autres termes, une portion de la lumière, qui, dans le cas normal, forme le disque central de l'image d'un point lumineux, se trouve reportée à une grande distance angulaire du centre et y forme un anneau brillant dont l'intensité lumineuse est comparable à celle de la partie centrale, de dimensions angulaires alors bien moindres. Cet écran est d'un emploi avantageux pour la mesure des distances d'un certain nombre d'étoiles doubles.

Les astres à diamètre apparent sensible (le Soleil, la Lune et les planètes), paraissent, au travers d'un pareil écran, entourés de deux ou trois bandes annulaires, d'intensités lumineuses rapidement décroissantes, et dont la lumière est évidemment empruntée à la partie centrale.

(¹) *Étude de la diffraction dans les instruments d'Optique*, p. 294 et suiv.

Un écran ainsi construit devait donc réduire dans une notable proportion les dimensions et la durée du ligament noir : c'est, en effet, ce qui a lieu.

Avec cet écran, le fond du ciel, aussi bien que le disque de la planète, est envahi par une bande lumineuse dont la largeur est sensiblement la moitié du diamètre de Vénus, de sorte que, comme le montre la *Pl. I* (*fig. 7*), si la planète est très voisine du bord du Soleil, ces deux bandes lumineuses offrent à très peu près le même éclaircissement. Un peu avant le contact, un faible ligament vient les réunir; mais, en raison de leur éclaircissement, la phase que nous avons signalée plus haut et qui correspond pour l'entrée au foncement du ligament, et pour la sortie au moment où cette teinte foncée passe au gris, est plus facile à observer.

Dans nos expériences, la différence entre le contact observé tel que nous venons de le définir et le contact enregistré a été, en moyenne, d'une seconde, tant à l'entrée qu'à la sortie.

D'ailleurs, l'emploi d'un verre noir gradué offre ici les mêmes avantages que plus haut. Le moment de la rupture du ligament donne encore le contact d'entrée; et le contact des deux cercles à la sortie est plus facile à observer, parce qu'il se produit entre deux surfaces assez fortement éclairées.

Remarque. — De ces deux méthodes, nous conseillons la première pour l'entrée; il ne conviendrait point, en effet, de s'interdire l'observation des phénomènes physiques d'une autre nature qui pourraient se présenter. A la sortie, au contraire, nous pensons que la seconde est préférable.

D'ailleurs, si l'une ou l'autre de ces deux méthodes d'observation est *indispensable* pour obtenir avec les petites ouvertures des observations comparables, il sera toujours bon, même avec un équatorial de 8 à 10 pouces d'ouverture, de se servir, comme il vient d'être dit, d'un verre noir gradué.

Conclusions.

1° Les expériences précédentes conduisent à une explication rationnelle des apparences singulières qu'ont présentées parfois les passages de Vénus et de Mercure et montrent quelle est la *phase caractéristique*

de ce phénomène compliqué, c'est-à-dire celle qui correspond au *contact géométrique*.

2° Elles donnent le moyen de faire servir ces phénomènes à assurer l'exactitude de l'observation d'un contact; et, par suite, elles permettent d'utiliser certains instruments (équatoriaux de 4 et de 3 pouces) dont l'usage était presque condamné.

3° Elles prouvent que, même avec des équatoriaux de 6 et 8 pouces d'ouverture, il convient de suivre les règles données plus haut pour l'observation d'un contact.

CHAPITRE III.

ÉTUDE PHOTOGRAPHIQUE DU PHÉNOMÈNE.

Ces effets de diffraction devaient probablement se retrouver dans les images fixées sur les plaques photographiques, quel que soit d'ailleurs le procédé de fixation. Les travaux récents de lord Lindsay et A. Cowper Ranyard d'une part, de MM. Vogel et Lohse d'autre part ⁽¹⁾, sur l'irradiation photographique des plaques surposées, paraissaient bien le démontrer; on retrouve, en effet, sur les images photographiques que ces savants ont obtenues, les franges de diffraction aperçues autrefois par Baden Powell et dont il a été question plus haut.

Mais il n'y avait là, pour ainsi dire, qu'une indication et non point

(1) LORD LINDSAY and A. COWPER RANYARD, *On Photographic irradiation in overexposed plates* (*Monthly Notices of the royal astronomical Society*, t. XXXII, p. 313 et suiv.).

H. VOGEL und O. LOHSE, *Untersuchungen über die Verwendbarkeit der Kollodionphotographie zur Beobachtung des bevorstehenden Venus-Vorüberganges, nebst Vorschlägen über die Einrichtung einiger diesem Zwecke dienender Apparate* (*Vierteljahrsschrift der astronomischen Gesellschaft*, t. VIII, Jahrgang 1873, p. 228 et suiv.).

une démonstration directe; celle-ci résulte des expériences suivantes, faites par M. Angot.

I. — ÉTUDE PHOTOGRAPHIQUE DES PHÉNOMÈNES DE DIFFRACTION.

Méthode expérimentale. — La méthode expérimentale consiste à prendre, dans des circonstances variées, l'image photographique d'une source lumineuse formée de deux rectangles séparés par un intervalle obscur. L'augmentation de dimension que l'on observe pour chaque rectangle lumineux est égale à la diminution de l'espace obscur compris entre eux; la somme des deux quantités doit donc être constante, ce qui est une vérification donnant le degré d'approximation de chaque expérience.

On s'est servi de l'une des lunettes photographiques adoptées par la Commission du passage de Vénus (*Pl. I*). L'objectif a 0^m,013 d'ouverture, et il est achromatisé par l'écartement des deux lentilles qui le composent; sa longueur focale a 3^m,80, de sorte que, les épreuves étant prises sans le secours d'aucun grandissement, $\frac{1}{500}$ de millimètre mesuré sur l'épreuve correspond à 0'',109.

Les épreuves obtenues ont été mesurées avec les machines micrométriques de la Commission du passage de Vénus; mais on a négligé quelques-unes des précautions employées dans la mesure des épreuves du passage, l'approximation que l'on voulait obtenir se réduisant au dixième de seconde, c'est-à-dire au cinq-centième de millimètre, dans les épreuves photographiques.

Augmentation des dimensions des images avec la durée de pose.

Le fait capital est que la dimension de l'image photographique croît notablement lorsqu'on augmente la durée de pose. Cet accroissement est tel, que dans les circonstances où l'on opère il a pu dépasser 0^{mm},2 (environ 10'').

Voici, par exemple, les résultats des mesures de sept images obtenues

successivement sur une même plaque daguerrienne et pour lesquelles on n'a fait varier que la durée de pose.

Durée de pose.	Largeur en cinq-centièmes de millimètre		Somme $l + o$.
	du rectangle lumineux. l .	du rectangle obscur o .	
10 secondes.....	593,5	192,6	786,1
30 secondes.....	618,5	168,6	787,1
40 secondes.....	624,0	163,6	787,6
1 minute.....	632,6	155,2	787,8
2 minutes.....	645,7	141,4	787,1
4 minutes.....	656,4	130,0	786,4
7 minutes.....	673,8	113,4	787,2

L'unité est le cinq-centième de millimètre, qui correspond à $0'',109$. La dernière colonne ($l + o$), dont la valeur devrait être constante, montre que l'erreur moyenne est d'environ $0^{\text{mm}},001 = 0'',05$.

Ces faits sont dus en grande partie à la diffraction.

Ces résultats s'expliquent de la façon la plus simple quand on applique à la formation des images photographiques les mêmes règles qui permettent de prévoir la grandeur et l'intensité des images au foyer d'une lunette ordinaire.

En effet, d'une part, l'image obtenue au foyer de la lunette se compose d'une portion, formant presque toute l'étendue de l'image géométrique, où l'intensité lumineuse est constante, puis d'une zone estompée qui commence à l'intérieur de l'image géométrique et où l'intensité lumineuse va graduellement en décroissant. Aux limites mêmes de l'image géométrique, l'intensité lumineuse est moitié de ce qu'elle est dans la partie constante; dans les autres parties de cette zone estompée, les points où l'intensité lumineuse a la même valeur $\frac{4}{5}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, ... forment une série de courbes dont la forme, pour une ouverture donnée, dépend de celle de l'objet lumineux, mais qui sont les limites successives auxquelles s'arrête l'objet pour tout procédé d'observation qui ne perçoit pas les intensités lumineuses inférieures à celle qui leur correspond; en d'autres termes, l'image d'un objet se trouve ainsi limitée par une série de *courbes de niveau lumineuses*, et sa dimension apparente dépend uniquement de celle de ces courbes de niveau à laquelle s'arrête le procédé d'observation.

D'autre part, une plaque photographique, exposée à la lumière pendant un temps déterminé, donne une image qui comprend tous les points dont l'intensité lumineuse est supérieure à une certaine limite. L'impression photographique s'arrête donc à une des courbes de niveau dont on a parlé plus haut et comprend des courbes de niveau correspondant à des intensités lumineuses de plus en plus faibles à mesure que l'on augmente la durée de la pose.

Augmentation des dimensions des images avec l'intensité de la source lumineuse.

De même, pour une ouverture et une durée de pose données, les dimensions de l'image doivent augmenter avec l'intensité de la source.

Pour faire varier à volonté l'intensité de la source on plaçait, en avant de la lame de verre dépoli sur laquelle était projeté le faisceau de rayons provenant de la lampe électrique, une série d'écrans percés de trous d'environ 0^m,005 de diamètre, en nombre convenable et uniformément répartis sur la surface de l'écran.

De cette manière, on obtient, en effet, des images d'autant plus grandes que l'intensité lumineuse est plus grande. Ainsi, en opérant avec une même plaque sur collodion sec et posant dans les deux cas le même temps, une minute, on a eu :

Intensité lumineuse.	Largour de la partie lumineuse.
$\frac{1}{4}$	558,0
1.....	622,7

Loi de l'intensité lumineuse aux différents points de l'image.

Mais il y a plus : la même méthode expérimentale permet de trouver la loi des intensités lumineuses dans les différents points de l'image photographique de l'objet lumineux, c'est-à-dire la loi de succession des courbes de niveau lumineuses dont nous avons parlé plus haut.

En effet, dans tous les cas, la somme de l'intervalle lumineux et de l'intervalle obscur de l'objet photographié est constante et égale à la valeur qu'elle aurait dans l'image géométrique. D'autre part, on peut mesurer directement sur la source lumineuse le rapport de largeur entre

les rectangles lumineux et l'intervalle obscur qui les sépare. On détermine ainsi en valeur absolue les dimensions qu'aurait l'image géométrique, et l'on peut leur comparer l'image obtenue dans les différents cas.

D'un autre côté, si, laissant constante la durée de pose, on fait varier l'intensité de la source lumineuse, on obtient sur une plaque déterminée des images d'autant plus grandes que l'intensité de la source est elle-même plus grande, et, comme dans ces conditions les limites de l'image correspondent à des rayons lumineux reçus d'intensité constante, on peut déduire de la mesure de ces plaques photographiques le rapport des intensités lumineuses aux différents points de la zone diffractée.

Voici le résultat d'une de ces déterminations :

Plaque daguerrienne iodée et bromée (durée de pose : 1^m).

Intensité lumineuse. au point considéré.	Distance au bord géométrique	
	en cinq-centièmes de millim.	en secondes d'arc.
1.....	+ 116,1	+ 12,66
4.....	+ 81,0	+ 8,84
9.....	+ 41,5	+ 4,52
9,5.....	+ 39,2	+ 4,27
38.....	— 22,4	— 2,44

Le signe — correspond au cas où le point considéré est en dedans de l'image géométrique.

L'expérience montre donc que l'image est généralement dilatée, mais qu'en réduisant suffisamment l'intensité de la lumière incidente on peut obtenir, comme le veut la théorie, des images plus petites que l'image géométrique.

D'ailleurs, la courbe qui représente l'intensité lumineuse des différents points de la zone diffractée photographique a une analogie frappante avec la courbe théorique ; mais elle est plus élargie. Cet effet est dû à l'aberration de l'objectif.

REMARQUE. — Si, laissant constante l'intensité, on se borne à faire varier la durée de pose, on obtient, comme nous l'avons déjà dit, des résultats analogues aux précédents, mais non identiques ; l'ensemble des expériences montre que l'influence du temps de pose et celle de l'intensité sont loin d'être réciproques.

Une pose de durée 1 avec une intensité réduite à $\frac{1}{2}$ produit une dilatation de l'image notablement moindre que l'intensité 1 avec une durée de pose $\frac{1}{2}$. La différence s'accroît encore à mesure que l'intensité décroît, et, si l'on veut obtenir un effet constant avec une intensité lumineuse de plus en plus faible, il faut que la durée de pose augmente beaucoup plus rapidement que la raison inverse de l'intensité.

Variation des dimensions de l'image avec l'ouverture de l'objectif.

La théorie montre que la distance au bord géométrique d'un point de l'image dont l'intensité lumineuse est une fraction déterminée de l'intensité maximum et constante doit varier en raison inverse de l'ouverture.

Pour vérifier cette loi, on a photographié le double rectangle dont il a déjà été question, en laissant d'abord entièrement libre l'ouverture de l'objectif et ensuite en la diaphragmant à moitié; mais on avait soin, dans le second cas, de quadrupler l'intensité de la lumière, afin que l'éclat de l'image fût toujours le même dans la partie où l'intensité de la lumière est constante. La durée de pose était d'ailleurs la même dans les deux cas.

Voici les résultats des deux expériences où les durées de pose et les intensités ont été différentes :

	Ouverture.	Excès de l'image sur l'image géométrique	
		en cinq-centièmes de millimètre.	en secondes d'arc.
Première expérience (pose, 70 ^s).	1.....	27,0	2,94
	$\frac{1}{2}$	43,0	4,69
	1.....	50,2	5,47
	$\frac{1}{2}$	72,0	7,85
Deuxième expérience (pose, 40 ^s).	1.....	28,6	3,12
	$\frac{1}{2}$	35,1	3,83

Les dimensions de l'image obtenue avec l'ouverture $\frac{1}{2}$ sont loin d'être doubles de celle que donne l'ouverture entière; mais l'expérience n'est pas moins décisive en faveur de la théorie, car l'effet de l'aberration diminue, et cela très rapidement, avec l'ouverture de la lunette, et même

on, aurait pu s'attendre à voir cette diminution masquer complètement l'augmentation due à la diffraction.

Influence d'une exposition antérieure à la lumière.

On sait aussi que le diamètre d'une planète mesuré pendant le jour est toujours plus petit, toutes choses égales d'ailleurs, que celui que l'on mesure la nuit; cette différence est due à la différence d'éclairement du fond sur lequel se fait la mesure.

Si la théorie de la diffraction s'applique à la formation des images photographiques, on doit donc s'attendre à voir les images obtenues sur une portion de plaque qui a subi une exposition antérieure à la lumière (ce qui produit le même effet que l'éclairement général du fond) être de dimensions moindres que celles obtenues sur une portion de la même plaque qui n'a point vu le jour.

L'expérience a pleinement confirmé cette induction, ainsi que le montrent les nombres suivants :

	Durée de pose.	Largeur de l'image	
		dans la partie exposée antérieurement à la lumière.	dans la partie non exposée.
1 ^{re} Plaque daguerrienne iodée et ombrée.	30 ^s	514,9	535,6
	1 ^m	537,3	560,4
	4 ^m	563,0	581,5
2 ^{re} Plaque de collodion sec	1 ^m	584,5	622,7
	4 ^m	620,5	641,0
3 ^{re} Même plaque de collodion, avec une intensité lumineuse environ quatre fois moindre que la précédente	1 ^m	516,5	558,0
	2 ^m	558,5	579,0

Remarque. — Ces résultats sont contradictoires avec l'hypothèse admise par certains savants, lord Lindsay par exemple, que l'agrandissement des images photographiques surposées est dû à un *cheminement de proche en proche* de l'action photographique, cheminement qui devrait augmenter, lui aussi, les dimensions de l'image avec l'intensité et la durée de pose. Mais, si cette hypothèse était exacte, les dimensions de l'image seraient plus grandes sur la portion de la plaque antérieurement exposée à la lumière que sur la portion qui n'a point vu le

jour. Dans le premier cas, en effet, l'action ayant commencé devrait se continuer plus facilement.

II. — ÉTUDE PHOTOGRAPHIQUE DU LIGAMENT NOIR.

Si l'on suppose que Vénus se réduit à un sphéroïde opaque sans atmosphère et que le Soleil, pris en lui-même, a une intensité lumineuse constante en chacun de ses points, la théorie de la diffraction permet, comme nous l'avons vu plus haut, de calculer toutes les phases du contact.

En effet, considérons, par exemple, dans la zone diffractée la courbe de niveau lumineuse dont l'intensité est la moitié de ce qu'elle est au centre du Soleil. Pour tous les points du Soleil un peu éloignés du point de contact, cette courbe de niveau se confond avec le bord de l'image de cet astre; dans les régions de Vénus un peu éloignées du même point, cette courbe est circulaire et concentrique au bord géométrique de la planète, mais elle est un peu intérieure à ce bord; enfin, aux environs du point de contact, ces deux branches de courbes se raccordent de façon à produire l'apparence désignée sous le nom de *goutte noire* ou *ligament noir*.

Cette apparence sera évidemment exagérée si l'on considère des courbes de niveau d'intensité plus faible.

Des phénomènes analogues se produisent d'ailleurs à tous les instants du passage, contenus dans les limites qui dépendent de l'étendue de la zone diffractée.

Pour vérifier ces conclusions par la photographie, on a procédé comme il suit: l'appareil à passages artificiels étant amené à une position convenable, puis fixé, on a fait sur une même plaque cinq épreuves successives correspondant à des durées de pose variables; on obtient ainsi la forme de cinq courbes de niveau successives, et il est frappant de voir avec quelle fidélité l'expérience réalise les formes indiquées par la théorie.

La *Pl. I* montre les résultats obtenus lorsque, la planète étant au contact réel du bord du Soleil, on a éclairé le disque de verre dépoli

avec la lumière électrique, en prenant pour durées de pose successives les intervalles :

5 secondes.....	n° 8
10 secondes... ..	n° 9
20 secondes.....	n° 10
1 minute.....	n° 11
2 minutes.....	n° 12

La même expérience a d'ailleurs été répétée avec les mêmes durées de pose, en donnant à la planète les positions qu'elle occupe de quinze secondes en quinze secondes aux environs du contact, depuis une minute avant le contact jusqu'à une minute après. Dans tous les cas, l'influence de la durée de pose est la même que celle que met en évidence la *Pl. I*; plus la durée de pose est faible et plus les phénomènes se rapprochent de ce qu'ils seraient avec les images telles que les conçoit la théorie de l'Optique géométrique : la photographie donne bien certainement un ligament longtemps après que le contact géométrique a eu lieu (il s'agit ici du contact interne d'entrée).

La photographie a même à ce point de vue, dans l'observation du passage, un désavantage considérable sur l'observation optique directe. L'œil, en effet, à côté d'une lumière très vive comme celle du Soleil, devient incapable de percevoir des intensités lumineuses assez faibles. La perception optique s'arrêtera donc à des courbes de niveau relativement peu distantes du bord géométrique, tandis qu'en augmentant la sensibilité de la plaque photographique ou la durée de pose on ira chercher des courbes d'intensité de plus en plus faibles.

Dans l'observation du passage, même avec des plaques identiques et une durée de pose constante, il suffira du moindre changement de transparence dans l'atmosphère pour que l'impression photographique s'arrête à des courbes d'intensité différentes et que, de deux épreuves successives, la dernière semble correspondre à une époque antérieure du phénomène.

Les effets indiqués diminuent si l'on augmente l'ouverture de la lunette; mais ils croissent considérablement pour peu que l'objectif employé ait la moindre aberration. Avec un objectif non rigoureusement aplanétique, on a pu obtenir, *même avec des durées de pose très*

faibles, un contact apparent alors que Vénus était déjà *entrée sur le Soleil depuis une minute de temps.*

REMARQUE. — Il résulte de ce qui précède que la détermination de l'instant du contact, faite en étudiant comment varie dans les épreuves successives prises aux environs du contact la corde commune à Vénus et au Soleil, doit présenter des difficultés particulières, puisque pour un même instant la longueur de cette corde peut varier entre des limites considérables avec la sensibilité de la plaque, la durée de pose ou la transparence de l'atmosphère.

Conclusions.

L'ensemble de ces expériences nous paraît ramener à une cause physique connue, la diffraction, la majeure partie des singularités signalées jusqu'ici dans les photographies du Soleil prises soit en dehors du passage, soit pendant le passage lui-même.

Il faut d'ailleurs remarquer que le diamètre de Vénus n'est point assez grand par rapport à l'étendue angulaire de la zone diffractée pour que la loi des intensités le long de la zone de lumière diffractée relative à Vénus soit la même que le long de la zone de lumière diffractée relative au Soleil, dont la courbure est assez grande pour qu'on puisse en considérer le bord comme rectiligne. La diminution du diamètre de Vénus due à la diffraction n'est donc pas la même que l'augmentation du bord du Soleil, de telle sorte que la somme des diamètres de Vénus et du Soleil n'est rigoureusement constante, en théorie, que si on les mesure sur des épreuves prises avec des instruments aplanétiques de même ouverture.

CHAPITRE IV.

OBSERVATION D'UN PASSAGE DE MERCURE SUR LE SOLEIL.

I. — INTRODUCTION.

Les expériences précédentes, qui avaient pour but de résoudre quelques-unes des difficultés qu'offre l'observation, soit *directe*, soit *photographique*, des passages de Vénus ou de Mercure, laissaient prise à une objection sérieuse.

Dans la réalité, la planète, Vénus ou Mercure, est à une grande distance du disque lumineux au-devant duquel elle passe et du bord obscur au contact duquel elle paraît venir. Dans nos expériences, au contraire, la planète, Vénus ou Mercure, venait toucher réellement le bord obscur simulant le fond du ciel.

Les phénomènes nets et précis que l'on avait observés à l'École Normale se reproduiraient-ils dans les conditions si différentes de la réalité? La proximité du prochain passage de Vénus rendait désirable une prompt solution de cette difficulté.

Il nous parut que le meilleur moyen d'arriver à ce résultat était l'observation du passage de Mercure du 6 mai 1878, faite spécialement en vue de contrôler les conclusions théoriques et expérimentales auxquelles nous étions arrivés.

Voici, en ce qui concerne le *ligament noir*, les résultats de cette observation, faite à Ogden (Utah), et pour laquelle l'Académie voulut bien nous adjoindre M. Hatt, qui avait été, en 1874, le collaborateur de M. Bouquet de la Grye, à l'île Campbell ⁽¹⁾.

M. Hatt et moi disposions de deux lunettes de 6 pouces d'ouverture,

(1) Voir, pour l'ensemble des opérations : *Rapport sur le passage de Mercure, observé à Ogden (Utah) le 6 mai 1878*, par M. Ch. André (*Archives des Missions scientifiques*, 1880).

que l'Académie nous avait prêtées et dont l'une était montée équatorialement.

II. — PLAN D'ENSEMBLE.

Le plan d'ensemble que nous avons adopté pour l'observation était le suivant :

L'observation du premier contact interne était destinée à vérifier :

Qu'avec une lunette de 6 pouces d'ouverture, le *ligament noir* se produit forcément aux environs du contact, si l'on donne à l'image solaire reçue par l'œil toute l'intensité lumineuse que cet organe peut supporter ;

Que les dimensions et l'intensité de ce *ligament* augmentent quand on diminue l'ouverture de la lunette ;

Qu'on peut réduire à volonté les dimensions et l'intensité de ce *ligament* en augmentant graduellement le pouvoir absorbant du verre noir employé pour l'observation.

Dans ce but, on avait armé chaque lunette d'un verre noir formé de deux prismes égaux, moitiés d'un même parallélépipède, réunis par la face diagonale de séparation, et dont l'un était formé de verre coloré, tandis que l'autre était de verre ordinaire. Ce double prisme se déplaçait en avant de l'oculaire, normalement à l'axe optique, au moyen d'une crémaillère et d'un pignon fixé sur le tube porte-oculaire.

L'observation du second contact interne devait servir à compléter les vérifications précédentes et à comparer la précision de l'observation faite à l'aide du *ligament noir* à celle faite au moyen d'un écran formé d'anneaux très étroits (0^m,005 de large), alternativement vides et pleins, que j'avais été conduit à croire excellent pour l'observation des passages de Vénus et de Mercure.

On devait, en outre, observer avec soin les contacts externes et, pendant la durée du passage, examiner attentivement les surfaces du Soleil et de Mercure, et surtout les portions du disque solaire avoisinant la planète.

III. — RÉSULTATS.

L'état du ciel ne nous a point permis de réaliser complètement ce programme, en nous masquant le Soleil au moment de l'entrée de la planète. L'observation des contacts de sortie nous étant seule possible, nous nous sommes limités à la partie la plus importante de ce programme, l'étude du *ligament noir*, dont la seconde partie est une conséquence théorique.

M. Hatt conserve entière l'ouverture de son équatorial. A $3^h 14^m 9^s$, temps moyen d'Ogden, il aperçoit la première trace de *ligament*; c'est une simple traînée obscure, réunissant le bord du Soleil et celui de la planète : amenant alors en face de son œil une portion du verre noir plus absorbante pour la lumière, il voit le *ligament* disparaître. Bientôt après, le *ligament* réapparaît ; M. Hatt le fait disparaître de nouveau par le même moyen, et ainsi de suite jusqu'au moment où les deux astres lui paraissent en contact géométrique, à $3^h 14^m 28^s$.

M. André avait diaphragmé à 4 pouces l'ouverture de son équatorial. A $3^h 14^m 5^s$, il voit la première trace de *ligament*; au bout de quelques secondes, celui-ci devient très large, très obscur et de dimensions sensiblement comparables à celles de la planète.

Enlevant le diaphragme, on voit le *ligament* se réduire de plus de moitié. Remettant en place le diaphragme et se servant ensuite du verre noir gradué, on fait disparaître le *ligament noir*, et les deux astres paraissent alors très nettement distants l'un de l'autre.

Ramenant le verre noir à sa position primitive, on voit le *ligament* réapparaître très large et très intense, et de même une seconde fois.

M. André a noté le contact à $3^h 14^m 32^s$.

Quant au contact externe de sortie, aucun phénomène particulier ne l'a accompagné, et il s'est présenté à nous avec son apparence géométrique.

M. Hatt l'a noté à $3^h 17^m 25^s$, et M. André à $3^h 17^m 18^s$.

On n'a d'ailleurs rien observé de spécial ni sur la planète ni sur les régions du disque solaire qui l'entouraient successivement.

IV. — CONCLUSIONS.

Il résulte des observations précédentes que le phénomène réel du passage de Mercure sur le disque solaire ne diffère pas sensiblement de celui que nous avons étudié artificiellement dans les caves de l'École Normale. Le procédé expérimental que l'on avait alors employé reçoit ainsi sa consécration définitive, et les conclusions qu'on en a déduites doivent être considérées comme vérifiées.

Le *ligament noir* est donc bien un *phénomène de diffraction*, toujours sensible avec les ouvertures habituelles des instruments d'observation, si le pouvoir absorbant du verre noir employé est suffisamment faible; mais on peut le faire disparaître à volonté. Et, en employant le procédé simple et méthodique dont s'est servi M. Hatt, les observations d'un *contact interne de sortie* de Vénus, d'ailleurs beaucoup plus faciles que celles d'un contact analogue de Mercure, semblent devoir atteindre une approximation d'au moins *deux secondes* de temps.

Les données numériques de ces observations sont résumées dans le Tableau suivant :

	M. Hatt.	M. André.
Troisième contact.....	3 ^h 14 ^m 28 ^s	3 ^h 14 ^m 32 ^s
Quatrième contact.....	3 ^h 17 ^m 25 ^s	3 ^h 17 ^m 18 ^s
