acoustique. M. de Corti a démontré qu'il y en avait environ trois mille; on les appelle *fibres de Corti*.

394. **Mécanisme de l'audition.** — Le pavillon recueille les ondes sonores venues de l'extérieur, les rassemble, les réfléchit et les dirige dans le conduit auditif.

Le conduit auditif externe transmet les ondes, en les renforçant, à la membrane du tympan. Celle-ci se met à vibrer et ses vibrations sont transmises par la chaîne des osselets jusqu'à l'oreille interne. Non seulement les osselets transmettent les vibrations plus fidèlement que ne le ferait un corps gazeux, mais ils règlent, en quelque sorte, la sensibilité des membranes de la caisse sonore en les tendant plus ou moins, suivant l'intensité ou l'acuité des sons extérieurs. Enfin la perception définitive du son se fait par l'intermédiaire des trois mille filets du nerf acoustique. M. Helmholtz admet que chaque fibre, accordée comme un petit résonnateur pour une note particulière, ne vibre qu'à l'unisson de cette note, et est sourde par toutes les autres. Chaque son simple ne fait donc vibrer qu'une seule fibre, tandis que les sons composés en font vibrer plusieurs. C'est par suite de cette perception propre des sons simples par chacune des fibres de Corti que l'oreille distingue un son entre plusieurs autres et perçoit, dans leur ensemble, les sons les plus complexes et les plus riches en harmoniques.

Remarque. — Les divers organes qui constituent l'oreille sont utiles à divers degrés pour rendre la sensation plus complète et le sens de l'ouïe plus délicat; mais il n'y en a qu'un parmi eux qui soit indispensable : c'est l'*oreille interne* et même le *vestibule*. Ainsi la perte ou la déchirure du *tympan* et la suppression des *osselets* n'entraînent pas la surdité complète.

Chez les crustacés et chez les céphalopodes[1], le sens de l'ouïe n'a pas d'autre organe que le *vestibule*. Les autres parties de l'oreille interne n'apparaissent successivement que chez les êtres de plus en plus élevés dans l'échelle animale, et on ne les trouve au complet que chez l'homme.

1. Chez les autres mollusques, il n'y a pas de sens auditif. On ne connaît pas non plus d'organe auditif chez les *insectes*; mais on sait que la fonction existe.

LIVRE VII

OPTIQUE

CHAPITRE PREMIER

PROPAGATION DE LA LUMIÈRE.

395. **Définitions générales.** — *Lumière.* — On appelle *lumière* la cause des phénomènes qui provoquent en nous, par l'intermédiaire du sens de la vue, les sensations *de la vision*. Ces phénomènes sont appelés eux-mêmes *phénomènes lumineux*.

Corps lumineux, corps éclairés. — On nomme corps *lumineux* ceux qui émettent de la lumière par eux-mêmes, comme le soleil, les étoiles et les corps en ignition. Les corps lumineux ne sont pas les seuls visibles pour nous; les corps non lumineux peuvent aussi le devenir, mais à la condition d'être *éclairés*, c'est-à-dire de recevoir, d'une source quelconque, de la lumière qu'ils renvoient ensuite dans toutes les directions. La lune, les planètes et presque tous les objets terrestres sont dans ce dernier cas.

Corps transparents, corps translucides. — Les corps *transparents* ou *diaphanes* sont ceux qui laissent facilement passer la lumière; à travers ces corps on distingue nettement les objets : tels sont l'eau, les gaz, le verre poli. Les corps *translucides* sont ceux au travers desquels on perçoit encore la lumière, mais sans pouvoir reconnaître la forme des objets : tels sont le verre dépoli, le papier huilé.

Corps opaques. — Enfin, on appelle *corps opaques* ceux qui ne se laissent nullement traverser par la lumière, comme le bois, les métaux. Toutefois il n'y a pas de corps absolument opaques. L'opacité des corps dépend de leur épaisseur : tous sont plus ou moins translucides lorsqu'ils sont réduits en feuilles assez minces. Foucault a fait voir qu'en argentant, sous une très faible épaisseur, la surface extérieure des objectifs de lunette, la couche d'argent est tellement transparente, qu'on observe très bien le soleil au travers; cette observation se fait alors sans danger pour

la vue, car la plus grande partie de la chaleur et de la lumière solaire est réfléchie par la couche d'argent.

Milieu transparent, milieu homogène. — On emploie souvent, dans l'étude de la lumière, les expressions de milieu transparent, milieu translucide, milieu homogène. On appelle en général *milieu* l'espace, plein ou vide, dans lequel se produit un phénomène. L'air, l'eau, le verre sont des milieux où peut se propager la lumière, et qu'on nomme, pour cette raison, *milieux transparents*. Un milieu est dit *homogène*, lorsque sa composition chimique et sa densité sont les mêmes en tous ses points.

396. **Optique géométrique. — Optique physique.** — On désigne sous le nom d'*optique* la partie de la physique qui comprend l'étude des phénomènes lumineux.

On établit ordinairement dans l'optique deux grandes divisions : l'*optique géométrique* ou *optique élémentaire* et l'*optique physique* ou *haute optique*, qui se distinguent l'une de l'autre non seulement par leur objet, mais aussi par leur méthode.

L'*optique géométrique* ne comprend que les phénomènes lumineux les plus simples, les plus communs, les plus faciles à observer et à reproduire, tels que la réflexion de la lumière sur les miroirs. On les étudie sans faire aucune hypothèse sur leur cause, on en détermine les lois par l'expérience, et on déduit les conséquences de ces lois par le raisonnement géométrique. Dans l'*optique physique* on procède tout autrement. On pose d'abord une hypothèse sur la nature de la lumière, — c'est l'hypothèse des ondulations ; — on la développe par l'analyse mathématique et on en déduit, *à priori*, non seulement les faits anciennement connus et les lois expérimentales de l'optique géométrique, mais des faits complètement nouveaux et absolument imprévus, tels que celui-ci : *de la lumière ajoutée à de la lumière produit de l'obscurité.* L'expérimentation n'intervient qu'à la suite du calcul, pour en vérifier toutes les conséquences, par des expériences très délicates et au moyen d'instruments d'une grande précision.

On subdivise l'optique géométrique en plusieurs chapitres :

1° La *propagation de la lumière*, qu'on étudie au point de vue de la *direction*, de la *vitesse* et de l'*intensité*. On appelle quelquefois ce chapitre : *Optique proprement dite.*

2° La *réflexion de la lumière*, qui comprend les lois de la réflexion simple, leurs conséquences et leur application aux miroirs. On appelle quelquefois ce chapitre *Catoptrique* (de κατόπτρον, miroir).

3° La *réfraction de la lumière*, avec ses applications aux prismes et aux lentilles. De là le nom de *Dioptrique* (de διοπτρικὸς; διὰ, à travers, et ὄπτομαι, voir) qu'on donne quelquefois à ce chapitre.

4° La *décomposition de la lumière*, et l'application des lois expérimentales de ce phénomène à la théorie des couleurs et à l'*analyse spectrale*. C'est la *Chromatique* (de χρῶμα, *couleur*).

5° L'application de toutes ces lois à la théorie géométrique de la *vision* et à celle des *instruments d'optique*.

6° L'étude des propriétés chimiques de la lumière ou *photochimie* et leur application à la *photographie*.

Dans l'Optique physique, on distingue également plusieurs chapitres, comprenant chacun l'étude des phénomènes nouveaux dont nous définirons plus loin quelques-uns. Ce sont :

1° La double réfraction ;
2° L'interférence de la lumière ;
3° La diffraction de la lumière ;
4° La polarisation de la lumière par réflexion et par réfraction ;
5° La polarisation rotatoire ;
6° La polarisation chromatique ;
7° La théorie mécanique de la réflexion et de la réfraction.

DIRECTION DE LA PROPAGATION.

397. **Loi de la propagation rectiligne.** — *Dans tout milieu homogène, la lumière se propage en ligne droite.*

Cette loi est vérifiée par les deux faits suivants :

1° Si l'on interpose un corps opaque sur la ligne droite qui joint l'œil à un point lumineux, la lumière est interceptée.

(On appelle *point lumineux* une source lumineuse réduite à des dimensions géométriques aussi petites que possible).

2° La lumière qui pénètre dans une chambre noire par une petite ouverture trace dans l'air un trait lumineux rectiligne. Ce trait est visible, parce qu'il éclaire les poussières légères en suspension dans l'atmosphère (fig. 436).

Corollaires. — 1° *Définitions.* — Toute direction rectiligne suivant laquelle se propage la lumière s'appelle *rayon lumineux ;* un ensemble de rayons prend le nom de *faisceau*, et un faisceau très délié celui de *pinceau*.

Quand les rayons lumineux viennent en divergeant d'une source lumineuse voisine ou vont en convergeant vers un lieu peu éloigné, le faisceau ou le pinceau est dit *divergent* ou *convergent*. Dans le cas où la source lumineuse est à une très grande distance, comme le sont par exemple les astres, l'angle de divergence des rayons extrêmes du faisceau ou du pinceau est insensible ; les rayons sont sensiblement parallèles entre eux, et le faisceau ou le pinceau est dit *parallèle*. Il en est de même lorsque le point de convergence des rayons est très éloigné : le faisceau *convergent* devient un *faisceau parallèle*.

2° *Théories.* — De cette loi on déduit deux conséquences géométriques importantes :

1° La théorie des *ombres portées par les corps opaques;*

2° La théorie des *images fournies par les petites ouvertures.*

398. **Théorie géométrique des ombres.** — 1° *Définitions.* — On appelle *ombre d'un corps* opaque, ou mieux *ombre portée* par un corps opaque, le lieu de l'espace où ce corps empêche la lumière de pénétrer. Le problème géométrique des ombres consiste à

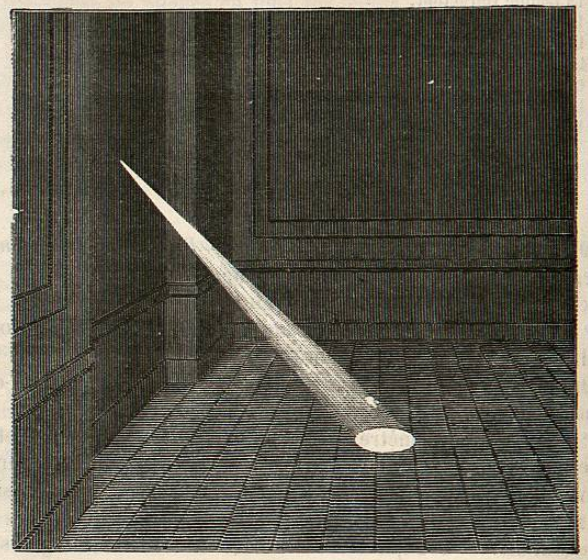

Fig. 436.

déterminer géométriquement l'étendue et la forme de l'ombre portée par un corps opaque quelconque placé devant une source de lumière quelconque. Il y a deux cas à considérer, celui d'une source réduite à un point lumineux et celui d'un objet lumineux.

2° *Cas d'un point lumineux.* — Soient S (fig. 437) le point lumineux et M le corps qui *porte ombre* et que nous supposerons sphérique.

Si l'on conçoit qu'une droite indéfinie SG *se meuve autour de la sphère* M, *en lui restant tangente et en passant constamment par le*

point S, *cette droite engendre une surface conique de révolution, tangente à la sphère et séparant dans l'espace la portion qui est dans l'ombre de celle qui est éclairée.*

En effet, tout point tel que O intérieur à ce cône ne peut être éclairé, puisque la ligne droite SO rencontre le corps opaque.

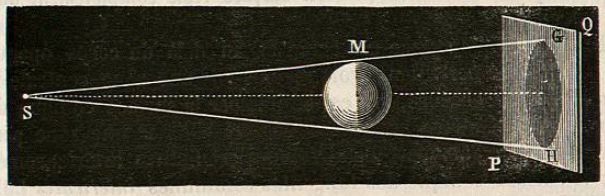

Fig. 437.

Si l'on place au delà du corps opaque un écran PQ, le passage de l'ombre à la lumière sur cet écran a lieu brusquement, sans aucune *dégradation.*

Remarque. — La circonférence *de contact* du cône tangent avec le corps opaque partage, en outre, la surface de celui-ci en deux hémisphères, l'un obscur et l'autre éclairé.

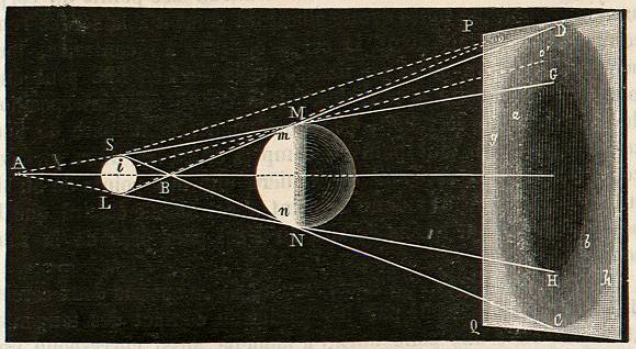

Fig. 438.

3° *Cas d'un objet lumineux.* — *Pénombre.* — Supposons que la source lumineuse et le corps opaque soient deux sphères SL et MN (fig. 438).

Si l'on conçoit qu'une droite indéfinie AG *se meuve tangentiellement à ces sphères, en coupant constamment la ligne des centres au point* A, *elle engendre une surface conique qui a pour sommet ce*

point, et qui limite, derrière la sphère MN, *un espace* MGHN *complètement privé de lumière.*

Si, de même, une seconde droite LD, *coupant la ligne des centres en* B, *tourne tangentiellement aux deux sphères de manière à engendrer une nouvelle surface conique* DBC, *qui a son sommet en* B, *toute la partie extérieure à cette surface reste complètement dans la lumière.*

En effet, si l'on place un écran PQ au delà du corps opaque, on y distingue nettement trois régions : 1° une zone centrale HG complètement obscure, qui est limitée par la surface conique des tangentes communes *extérieures* AMG et ANH; 2° une zone périphérique, complètement éclairée, qui est limitée intérieurement par la surface conique des tangentes communes *intérieures* LBMD et SBNC; 3° enfin une zone intermédiaire, qui est limitée intérieurement par le cône des tangentes extérieures MB et NN, et extérieurement par le cône des tangentes intérieures MD et NC. Cette zone n'est ni complètement éclairée ni complètement obscure, mais l'ombre y va en *se dégradant*, c'est-à-dire en s'atténuant, depuis la zone centrale jusqu'à la zone périphérique : c'est ce qu'on appelle la *pénombre*; son éclairement croît depuis C jusqu'à D.

On voit en effet qu'un point quelconque *a* de la zone centrale G*a*H*b* ne peut recevoir de lumière d'aucun des points du corps lumineux, puisque toute droite allant du point *a* à la source rencontrerait nécessairement le corps opaque. Au contraire, tout point *o* de l'écran situé en dehors de la surface DBC peut être joint par une droite à tous les points de SL sans interposition du corps opaque et recoit, par conséquent, la lumière de tous ces points. Enfin tout point *o'* compris entre les deux surfaces coniques ne peut recevoir de lumière que des points de SL situés au-dessus de *o'i*; donc le point *o'* est moins éclairé que le point *o* et d'autant moins éclairé qu'il est plus près de la zone centrale.

Remarques. — 1° Si l'on trace sur la sphère opaque deux cercles M*n* et *mn*, qui passent par les points de contact des tangentes AG et BD, on a une zone *mn*MN à laquelle aussi correspond une pénombre.

2° *Reflet.* — Lorsqu'un corps opaque intercepte la lumière par l'une de ses faces, la face opposée n'est jamais complètement obscure; elle est toujours plus ou moins éclairée par la lumière que réfléchissent les corps voisins. C'est l'effet de cette réverbération qu'on nomme *reflet*. Or, la lumière réfléchie par un corps coloré participant de la couleur propre de ce corps, les reflets prennent eux-mêmes la teinte des objets environnants.

399. Applications. — La théorie géométrique des ombres s'applique à un grand nombre de cas usuels. La pénombre peut se voir nettement autour de l'ombre portée par les arbres, les maisons, les édifices, exposés au soleil. Toutes les fois que la lumière d'une source artificielle, ayant une certaine étendue, telle qu'une flamme de bougie, ou de lampe, ou de bec de gaz, est interceptée par un corps opaque, on observe que l'ombre portée sur les murs n'est jamais nettement limitée dans ses contours : elle est plus ou moins estompée par la pénombre. La pénombre devient, au contraire, insensible, et l'ombre de plus en plus tranchée, quand la source lumineuse se réduit à un point lumineux : c'est le cas de l'éclairage par l'arc voltaïque.

Éclipses. — L'explication du grand phénomène astronomique des éclipses est une conséquence directe de la théorie des ombres.

Éclipses de Soleil. — Quand le disque opaque de la Lune s'interpose, dans des conditions particulières, entre le Soleil et la Terre, l'ombre portée par la Lune constitue pour les lieux terrestres qu'elle rencontre une *éclipse de Soleil* plus ou moins complète.

Soient S le Soleil, T la Terre et L la Lune, supposée placée dans une position favorable à l'éclipse (fig. 439). Si l'on suppose les trois corps représentés

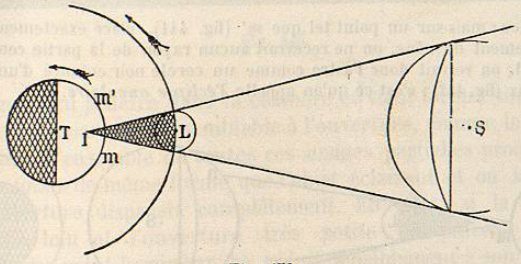

Fig. 439.

exactement avec leurs grandeurs et à leurs distances *relatives*, il suffira de répéter la construction graphique de la figure 438 pour déterminer les dimensions du cône d'ombre et du cône de pénombre de la Lune. La longueur LI du cône d'ombre varie entre 57 et 59 rayons terrestres, suivant les positions relatives de la Terre et de son satellite; la distance des deux planètes varie entre 55 et 62 rayons terrestres : on voit donc que le cône d'ombre peut atteindre la surface de la Terre, dans certaines conditions favorables. Pour tous les habitants du lieu *m* occupé par la pointe du cône d'ombre il y a *éclipse totale de Soleil.* D'ailleurs, cette pointe étant relativement peu étendue, l'éclipse qui est visible pour les habitants du lieu *m* ne l'est pas pour leurs voisins. Au bout d'un temps qui ne dépassera jamais 3ᵐ 13ˢ, le cône aura abandonné le lieu *m* pour occuper le lieu *m'*, lequel n'est pas nécessairement sur le même parallèle. Il balayera ainsi la surface de la Terre, en vertu des mouvements propres des deux planètes, suivant une ligne que les astronomes peuvent dé-

terminer à l'avance. Pour tous les points de cette ligne il y aura successivement *éclipse totale* (fig. 440); pour les points voisins, qui seront dans le cône de pénombre, il y aura *éclipse partielle*, de *un, deux, trois doigts*, comme on dit, suivant qu'il y aura immersion de $\frac{1}{12}$, $\frac{2}{12}$, $\frac{3}{12}$ du diamètre du Soleil.

Si le cône d'ombre n'atteignait pas la Terre, il n'y aurait d'éclipse totale pour

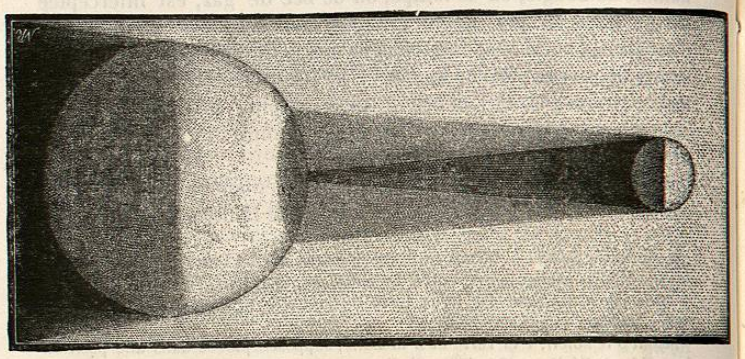

Fig. 440.

aucun lieu; mais sur un point tel que *m'* (fig. 441), placé exactement sur le prolongement du cône, on ne recevrait aucun rayon de la partie centrale *np* du Soleil; on verrait donc l'astre comme un cercle noir entouré d'un anneau lumineux (fig. 442) : c'est ce qu'on appelle l'*éclipse annulaire*.

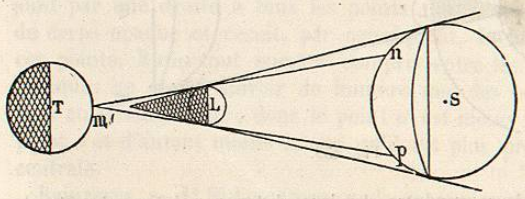

Fig. 441.

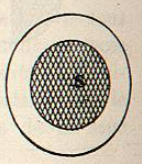

Fig. 442.

Éclipses de Lune. — Les éclipses totales ou partielles de Lune sont produites de la même manière, par l'immersion partielle ou complète de la Lune dans le cône d'ombre portée par la Terre. Elles constitueraient, pour des observateurs qui habiteraient la Lune, des éclipses totales ou partielles de Soleil.

Passages, occultations. — Les passages de *Vénus* ou de *Mercure* sur le Soleil sont des phénomènes de la même espèce que les éclipses; ils sont produits par la projection sur le Soleil des cônes d'ombre de ces petites planètes. Quant aux éclipses des satellites de certaines planètes, telles que *Jupiter*, elles sont identiques à nos éclipses de Lune : on les appelle ordinairement *occultations* (fig. 443).

400. **Images données par les petites ouvertures.** — Lorsque la lumière extérieure pénètre dans une *chambre noire, par une petite ouverture* pratiquée dans un volet, si l'on reçoit les rayons sur un écran, ils y peignent l'image des objets extérieurs. *Ces images plus ou moins nettes, mais colorées comme les objets eux-mêmes*, présentent les caractères suivants : 1° *elles sont renversées;* 2° *leur forme est indépendante de celle de l'ouverture.*

Ce phénomène curieux s'explique aisément par la propagation rectiligne de la lumière. Soit une ouverture triangulaire O (fig. 443), pratiquée dans le volet d'une chambre obscure, et soit un écran *ab* sur lequel on reçoit l'image d'une flamme AB placée à l'extérieur. De chaque point de la flamme part un pinceau lumineux

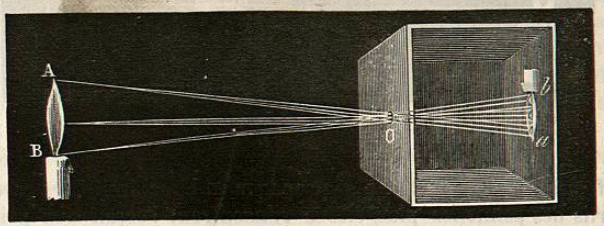

Fig. 443.

divergent qui pénètre dans la chambre et vient former sur l'écran une image triangulaire semblable à l'ouverture, comme le montre le dessin. L'ensemble de toutes ces images partielles produit une image totale de même forme que l'objet éclairant et où la forme de l'ouverture disparaît complètement. En effet, si la lumière est très loin et l'ouverture très petite, le pinceau envoyé par chaque point lumineux se réduit sensiblement à son axe. Or, si l'on conçoit qu'une droite indéfinie se meuve dans l'ouverture du volet, supposée très petite, avec la condition que cette droite reste toujours tangente à l'objet lumineux AB, elle décrit, dans son mouvement, deux surfaces coniques ayant pour sommet commun l'ouverture même de la chambre noire, et pour base l'une le corps lumineux, l'autre la partie éclairée de l'écran, c'est-à-dire l'image. Si l'écran est perpendiculaire à la droite qui joint le centre de l'ouverture au centre du corps lumineux, l'image est semblable à ce corps; si l'écran est oblique, l'image est allongée dans le sens de l'obliquité.

On observe ces deux cas dans l'ombre portée par le feuillage des arbres : les faisceaux lumineux qui passent à travers les

feuilles donnent des images du soleil qui sont rondes ou elliptiques, suivant que la surface sur laquelle elles se projettent est perpendiculaire ou oblique aux rayons solaires, et cela quelle que soit, entre les feuilles, la forme des interstices à travers lesquels passe la lumière.

Le renversement des images résulte de ce que les rayons qui proviennent des objets extérieurs et pénètrent dans la chambre noire, se croisent en passant dans l'ouverture, comme le montre

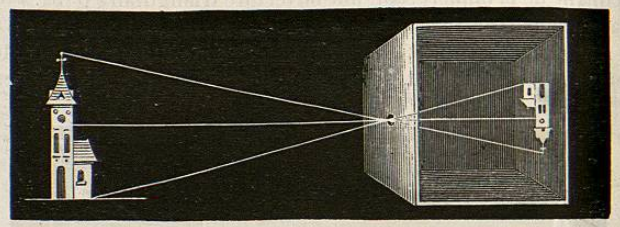

Fig. 444.

la figure 444. Continuant à se propager en ligne droite, les rayons partis des points les plus élevés rencontrent l'écran aux points les plus bas, et, réciproquement, ceux qui viennent des points inférieurs rencontrent l'écran aux points les plus hauts. De là le renversement de l'image. A l'article *Chambre obscure*, on verra comment on augmente l'éclat de la netteté des images au moyen de verres convergents, et par quel procédé on les redresse.

VITESSE DE PROPAGATION.

401. **Vitesse de la lumière. — Historique et résultats.** — La lumière se propage avec une vitesse telle, qu'on ne peut, à la surface de la terre, et dans les circonstances ordinaires, constater aucun intervalle appréciable entre l'instant où un phénomène lumineux se produit et celui où l'œil le perçoit à une distance quelconque : aussi, jusqu'au seizième siècle, a-t-on considéré comme fait évident que la propagation de la lumière est *instantanée*, autrement dit que sa vitesse est infinie. Bacon le premier émit cette idée que la lumière doit mettre un temps appréciable pour se propager d'un point à un autre, et Galilée *le premier* essaya de mesurer ce temps; son procédé était d'ailleurs si rudimentaire et la distance franchie par la lumière était si faible (2000 mètres environ), que ses expériences ne donnèrent aucun résultat.

Méthode de Rœmer. — Ce fut Rœmer (astronome danois, attaché à l'Observatoire de Paris) qui donna les premiers nombres plausibles et suffisamment précis pour la vitesse de la lumière. Il les déduisit de l'observation attentive et de l'interprétation judicieuse d'un phénomène astronomique que nous exposerons plus loin. Le résultat direct de ses calculs, c'est que la lumière met 11 minutes pour franchir le diamètre de l'écliptique (orbite terrestre). En divisant la longueur D de ce diamètre par la durée de transmission t, il obtenait la vitesse cherchée, $V = \frac{D}{t}$. La précision de cette mesure dépend donc de l'exactitude avec laquelle les nombres D et t ont été déterminés. Or, d'une part, la distance du Soleil à la Terre, qui est une fonction de la *parallaxe solaire*, n'était connue du temps de Rœmer que fort imparfaitement. D'autre part, l'évaluation de t était entachée d'une grosse erreur, parce qu'elle était déduite d'un nombre d'observations insuffisant. Pour ces deux motifs, le nombre trouvé par Rœmer 48 000 lieues (de 25 au degré) n'était pas suffisamment exact, et n'a pas été conservé.

Calculs de Delambre. — Delambre reprit les calculs de Rœmer, en se servant de 5000 observations qui embrassaient une période de 140 années. Il trouva pour t la valeur (beaucoup plus exacte) de $8^{m}13^{s}$, ou mieux $493^{sec},243$. Quant à la distance D, les observations relatives aux passages de Vénus de 1761 et de 1769 avaient permis de la calculer avec une approximation bien supérieure à celle des évaluations antérieures. Avec les valeurs admises pour ces deux coefficients, Delambre trouva pour V, 310 000 kilomètres.

En adoptant pour la parallaxe le nombre actuel $8'',86$ qui paraît plus exact, la valeur de la vitesse se réduit à 299 000 kilomètres par seconde.

Méthode de Bradley : Phénomène de l'aberration. — En 1727, l'astronome anglais Bradley découvrit un phénomène très curieux, qu'il appela l'*aberration* et dont il déduisit une nouvelle méthode pour déterminer la vitesse de la lumière.

Il remarqua que les étoiles ne paraissent pas avoir une position fixe sur la sphère céleste; elles paraissent décrire périodiquement, dans l'espace d'une année, des courbes fermées plus ou moins compliquées. La forme de chaque courbe dépend de la distance de l'étoile au pôle de l'écliptique.

Ce phénomène d'*aberration* n'est pas particulier aux étoiles; il est commun à tous les astres, et il a une cause générale que Bradley sut indiquer. Si la Terre était immobile, la lumière nous arriverait en droite ligne de l'étoile ou de l'astre qui l'émet; mais, comme l'observateur participe au mouvement qui emporte la Terre sur son orbite (à raison de $29^{km},45$ par seconde environ), la lumière de l'astre, et par suite la position de l'astre sur la sphère céleste, lui paraissent subir une déviation, qui dépend à la fois de la vitesse terrestre v et de la vitesse de la lumière V. Le maximum de cette déviation, qu'on appelle *angle d'aberration* ou *constante d'aberration*, est précisément égal au rap-