

lèle à l'axe, on reconnaît que le premier fait avec la normale un angle LBn plus grand que l'angle SBn , il doit donc aussi faire un angle de réfraction plus grand; d'où il résulte qu'après avoir traversé la lentille, il rencontre l'axe en un point l plus éloigné que le foyer principal F . Tous les rayons partis du point L venant ainsi

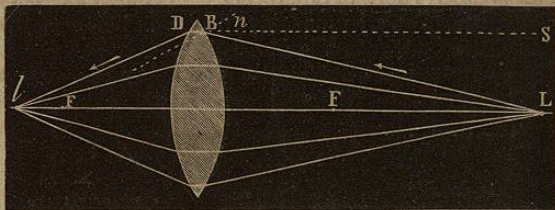


Fig. 341.

concourir sensiblement au même point l , ce dernier est le *foyer conjugué* du point L . Cette dénomination exprime ici, de même que dans les miroirs, la relation qui existe entre les deux points L et l , relation telle, que si le point lumineux est porté en l , réciproquement le foyer passe en L .

A mesure que l'objet L s'approche de la lentille, la divergence des rayons émergents augmente et le foyer conjugué l s'éloigne; lorsque l'objet L coïncide avec le foyer principal, les rayons émer-

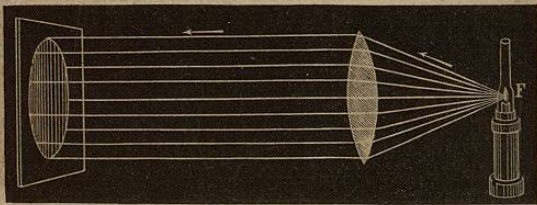


Fig. 342.

gents, de l'autre côté de la lentille, sont parallèles à l'axe, et alors il n'y a pas de foyer, ou, ce qui est la même chose, il se fait à l'infini. Dans ce cas, les rayons réfractés étant parallèles, l'intensité de la lumière ne décroît que très-lentement, et une seule lampe peut éclairer à de grandes distances. Il suffit pour cela de la placer au foyer d'une lentille biconvexe, comme le montre la figure 342.

2^o *Foyers virtuels.* — Avec les lentilles biconvexes, le foyer est virtuel lorsque l'objet lumineux L est placé entre la lentille et le foyer principal, comme le montre la figure 343. Dans ce cas, les rayons incidents LI formant avec la normale des angles plus grands

que ceux formés par les rayons FI émis du foyer principal, il en résulte qu'après l'émergence les premiers rayons s'éloignent de l'axe plus que les derniers, et forment un faisceau divergent HK , GM . Ces rayons ne peuvent donc donner lieu à aucun foyer réel, mais leurs prolongements concourent en un même point l situé

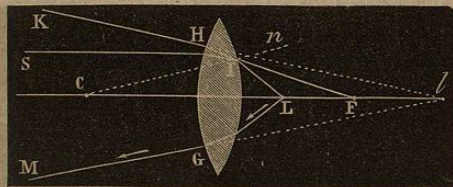


Fig. 343.

sur l'axe, et c'est ce point qui est le foyer virtuel du point L (443). Plus le point L est rapproché de la lentille, plus son foyer virtuel l est rapproché du foyer principal F ; mais si L se rapproche de F , l s'en éloigne.

479. *Centre optique, axes secondaires.* — Pour toute lentille, il existe un point nommé *centre optique*, qui est situé sur l'axe, et qui jouit de cette propriété, que tout rayon lumineux passant par ce point n'éprouve pas de déviation angulaire, c'est-à-dire que le rayon émergent est parallèle au rayon incident. Pour démontrer

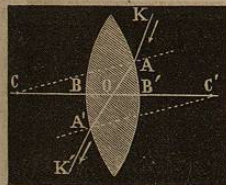


Fig. 344.

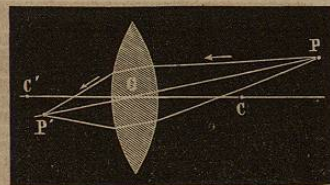


Fig. 345.

l'existence de ce point dans une lentille biconvexe, soient menés, à ses deux surfaces, deux rayons de courbure parallèles CA et CA' (fig. 344). Les deux éléments plans qui appartiennent à la surface de la lentille, en A et A' , étant parallèles entre eux, comme perpendiculaires à deux droites parallèles, il en résulte que tout rayon KA , qui se propage dans la lentille suivant AA' , traverse en réalité un milieu à faces parallèles, et par conséquent sort sans déviation, c'est-à-dire suivant une direction $A'K'$ parallèle à AK (469). Or, le point O , où ce rayon coupe l'axe, est constant; c'est-à-dire qu'il est toujours le même, quels que soient les deux éléments parallèles

A, A', que l'on considère. En effet, si les deux rayons de courbure CA et C'A' sont égaux, ce qui est le cas général, les deux triangles CAO et C'A'O le sont aussi, et l'on a $CO = C'O$; ce qui fait voir que, dans ce cas, le point O est le milieu de CC'. Si les rayons de courbure CA et C'A' sont inégaux, les triangles COA et C'OA' ne sont

plus égaux, mais ils sont semblables; et l'on a $\frac{CA}{C'A'} = \frac{CO}{C'O}$. Or, le rapport $\frac{CA}{C'A'}$ étant invariable, quels que soient les deux éléments parallèles A, A', on voit qu'il en est de même du rapport $\frac{CO}{C'O}$; ce

qui exige que la position du point O soit constante, seulement ce point n'est plus le milieu de CC'. Le point O est donc le *centre optique* de la lentille. On le détermine dans tous les cas, en tirant deux rayons de courbure parallèles CA et C'A', et en joignant leurs deux extrémités par une droite AA'.

Dans les lentilles biconcaves ou concaves-convexes, le centre optique se détermine par la même construction que ci-dessus. Dans les lentilles qui ont une face plane, ce point est à l'intersection même de l'axe par la face courbe.

Toute droite PP' (fig. 345) qui passe par le centre optique sans passer par les centres de courbure, est un *axe secondaire*. D'après la propriété du centre optique, tout axe secondaire représente un rayon lumineux rectiligne passant par ce point, car, vu la petite épaisseur des lentilles, on peut admettre que les rayons qui passent par le centre optique restent en ligne droite; c'est-à-dire qu'on peut négliger la petite déviation qu'éprouvent les rayons, tout en restant parallèles, lorsqu'ils traversent un milieu à faces parallèles (fig. 331, page 434).

Tant que les axes secondaires ne font avec l'axe principal qu'un petit angle, on peut leur appliquer tout ce qui a été dit jusqu'ici de l'axe principal; c'est-à-dire que les rayons émis d'un point P (fig. 345), situé sur un axe secondaire PP', viennent, à très-peu près, concourir en un même point P' de cet axe, où ils forment un foyer qu'on désigne encore sous le nom de *foyer conjugué*.

480. Détermination des foyers dans les lentilles biconvexes. — *Foyer principal.* — Pour déterminer expérimentalement le foyer principal d'une lentille biconvexe, il suffit de l'exposer aux rayons solaires, en ayant soin que son axe principal leur soit parallèle. Recevant alors sur un écran de verre dépoli le faisceau émergent, on détermine facilement le point où viennent concourir les rayons : c'est le foyer principal.

On peut aussi déterminer graphiquement le foyer principal d'une lentille biconvexe; mais il faut connaître son rayon de courbure et son indice de réfraction. En effet, soient AI un rayon parallèle à l'axe, et CB la normale au point d'incidence I (fig. 346). L'angle d'incidence $AIB = MCB$ pouvant se mesurer directement à l'aide du rapporteur, la formule $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{3}{2}$ (465) fait trouver l'angle CIE, et, par suite, la direction, dans la lentille, du rayon réfracté IE. Il reste à construire le rayon émergent EF. Or, dans le triangle CGC', les

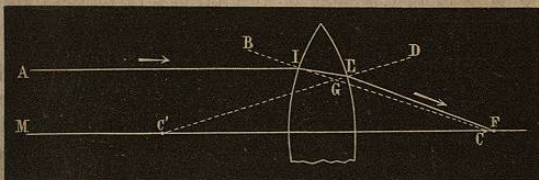


Fig. 346.

angles C et C' pouvant se mesurer directement, l'angle G est déterminé. Connaissant donc deux angles I et G du triangle IEG, on a l'angle E. Cet angle obtenu, la formule $\frac{\sin i'}{\sin r'} = \frac{2}{3}$ fait trouver l'angle DEF = r', et, par suite, la direction EF et la position du foyer principal F.

Foyer conjugué. — Un point lumineux ou éclairé étant placé

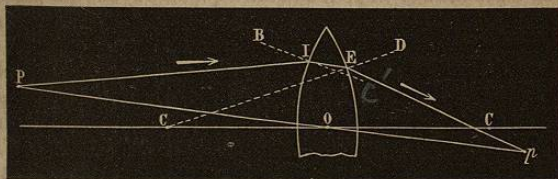


Fig. 347.

en avant d'une lentille biconvexe, au delà du foyer principal, son foyer conjugué se détermine par l'expérience, identiquement de la même manière qu'on a vu ci-dessus pour le foyer principal, c'est-à-dire en cherchant avec un écran, de l'autre côté de la lentille, le lieu où va se former l'image du point donné.

Quant à la détermination graphique du foyer conjugué, on peut l'obtenir par deux constructions, de même que pour les miroirs (451). 1° Considérant un rayon incident quelconque PI (fig. 347), on mène aux points d'incidence et d'émergence les normales C'B

et CD, puis on détermine les angles de réfraction C'IE et DEp au moyen de la formule $\frac{\sin i}{\sin r} = n$, comme on l'a fait ci-dessus pour la construction de la figure 346.

2° Ou bien, au lieu d'un rayon incident quelconque, on prend un rayon parallèle à l'axe principal, comme on l'a déjà fait pour les miroirs (fig. 306). Pour cela, P étant le point lumineux dont on cherche le foyer conjugué (fig. 348), soit mené un rayon incident PI parallèle à l'axe principal. Ayant tiré la normale CB par le point d'incidence, l'angle de réfraction C'IE ne peut encore se déterminer que par la formule $\frac{\sin i}{\sin r} = n$; mais le rayon émergent peut se trouver plus simplement. En effet, le rayon incident étant parallèle à l'axe principal, on sait que le rayon émergent doit passer par le foyer principal (478). Si donc on joint le point E au

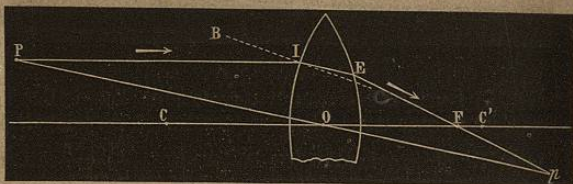
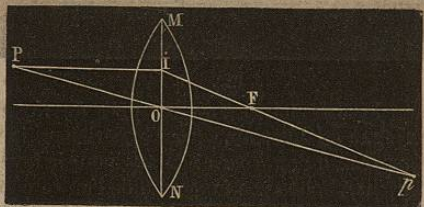


Fig. 343.

point F par une droite, celle-ci, prolongée, ira couper l'axe secondaire PO en un point p qui est le foyer conjugué cherché, puisqu'il doit se trouver à la fois sur les deux droites Pp et Ep¹.

¹ Pour éviter l'emploi de la formule $\frac{\sin i}{\sin r} = n$ dans la détermination des foyers, on emploie quelquefois la construction suivante. Supposant le foyer principal connu, et la lentille réduite



à un simple plan MN, après avoir mené du point P l'axe secondaire Pp, on tire un rayon PI parallèle à l'axe principal, qu'on prolonge en ligne droite jusqu'à la rencontre du plan MN en I. Puis, comme on sait que le rayon émergent doit passer par le foyer principal, on joint le point I au point F par une droite qui, prolongée, va couper l'axe secondaire en p , et c'est ce point qu'on prend pour foyer conjugué du point P; mais cette construction n'est pas rigoureuse et le foyer ainsi déterminé est trop éloigné.

Foyer virtuel. — Les deux mêmes constructions qui viennent d'être données pour les foyers conjugués (fig. 347 et 348), s'appliquent identiquement aux foyers virtuels, seulement il faut se rappeler qu'on n'a ceux-ci qu'autant que l'objet lumineux est placé entre la lentille et son foyer principal.

481. **Formation des images dans les lentilles biconvexes.** — Dans les lentilles, de même que dans les miroirs, l'image d'un objet est l'ensemble des foyers de chacun de ses points; d'où il résulte que les images fournies par les lentilles sont réelles ou virtuelles dans les mêmes cas que les foyers, et que leur construction se ramène à la recherche d'une suite de points, ainsi qu'on l'a déjà vu pour les miroirs (452).

1° *Image réelle.* — *Première construction.* — Soit d'abord le cas

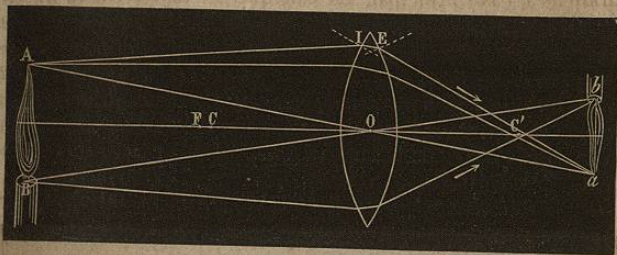


Fig. 349.

où l'objet AB, dont on cherche l'image, est placé au delà du foyer principal (fig. 349). La construction de cette image revenant à celle des foyers conjugués des différents points de l'objet, il suffit de construire les foyers des deux points extrêmes, en employant la construction donnée ci-dessus (fig. 347) pour la détermination des foyers conjugués.

Tirant donc d'abord les axes secondaires AO et BO, on mène du point A un rayon incident quelconque AI, au point d'incidence la normale CI, puis le rayon réfracté IE, qui s'approche de la normale d'une quantité donnée par l'indice de réfraction du verre; tirant de même la normale CE du point d'émergence, puis le second rayon réfracté Ea, qui ici s'écarte de la normale, puisqu'il passe dans un milieu moins réfringent (463). le point a où le rayon émergent coupe l'axe secondaire AO, est l'image du point A; car tous les rayons incidents partis de A vont, après avoir traversé la lentille, se rencontrer en a. Opérant de la même manière pour le point B, on trouve que son image se forme en b. Comme les points situés entre A et B ont évidemment leur foyer entre a et b, il se

forme en ab une image réelle et renversée de l'objet AB , d'autant plus petite et plus rapprochée du foyer principal, que l'objet AB est plus éloigné; ce qui découle de ce que l'angle AOB diminue à mesure que AB s'éloigne.

Pour voir cette image, il faut la recevoir sur un écran blanc, qui la réfléchit, ou placer l'œil dans la direction des rayons émergents.

Réciproquement, si ab était l'objet lumineux ou éclairé qui envoie des rayons, son image irait se faire en AB . Il suit de là ces deux conséquences importantes à retenir pour la théorie des instruments d'optique, qui seront décrits plus tard : 1^o Si un objet, même très-grand, est assez éloigné d'une lentille biconvexe, l'image réelle et renversée qu'on en obtient est très-petite, très-rapprochée du foyer principal, et très-peu au delà de ce point par rapport à la lentille. 2^o Réciproquement, si un objet très-petit est placé près du foyer principal, un peu en avant de ce point, l'image, qui va se former à une grande distance, est très-amplifiée, et l'est d'autant plus, que l'objet est plus voisin du foyer principal. Ces deux principes sont faciles à constater par l'expérience, en recevant sur un écran, dans l'obscurité, l'image de la flamme d'une bougie placée successivement à des distances variables au delà d'une lentille biconvexe.

Deuxième construction. — Dans la construction qui vient d'être

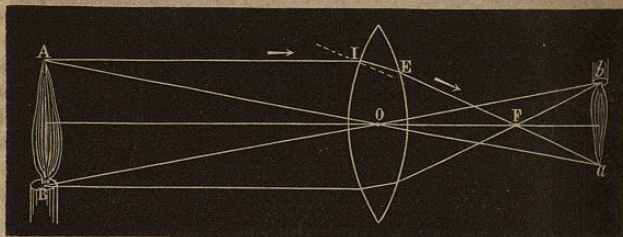


Fig. 350.

donnée, on a considéré un rayon incident quelconque, ce qui est le cas général. Or, on peut aussi considérer le cas particulier où le rayon incident est parallèle à l'axe principal, comme on l'a déjà vu pour les miroirs (fig. 311), et pour les foyers conjugués des lentilles (fig. 348).

Pour cela, ayant tiré les axes secondaires des points A et B (fig. 350), on sait (478) que le rayon AI , parallèle à l'axe principal, ira, après avoir traversé la lentille, passer par son foyer principal F , ce qui donne immédiatement la direction du rayon émergent, et, par suite, la position du point cherché a . Le point b se détermi-

nant de la même manière, on a en ab la même image réelle que ci-dessus. Toutefois cette construction ne donne point la direction du rayon réfracté IE , qui ne peut encore se déterminer qu'en menant la normale au point d'incidence I , et en faisant usage de la formule $\frac{\sin i}{\sin r} = n$; de plus, elle suppose qu'on connaît le foyer principal F .

2^o Image virtuelle. — Soit actuellement le cas où l'objet AB (fig. 351) est placé entre la lentille et son foyer principal. Si l'on tire l'axe secondaire Oa du point A , tout rayon AC , après s'être

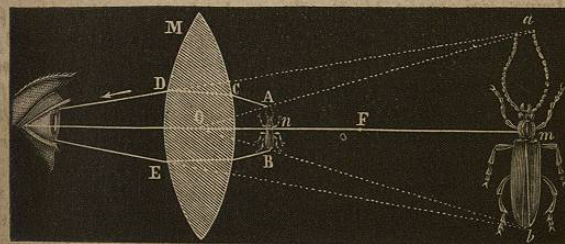


Fig. 351.

réfracté deux fois, sort divergent par rapport à cet axe, puisque le point A est placé à une distance moindre que la distance focale principale (478). Ce rayon, prolongé en sens contraire de sa direction, va donc couper l'axe Oa en un point a , qui est le foyer virtuel du point A . En menant l'axe secondaire du point B , on trouve de même que le foyer virtuel de ce point se forme en b . On a donc en ab l'image de AB . Cette image est redressée, virtuelle et plus grande que l'objet.

Les lentilles biconvexes, ainsi employées comme verres grossissants, prennent le nom de *loupes* ou de *microscopes simples*.

482. Foyers dans les lentilles biconcaves. — Avec les lentilles

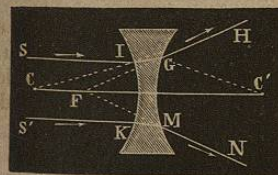


Fig. 352.

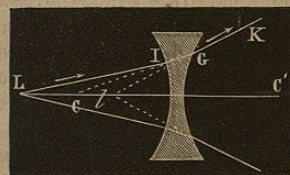


Fig. 353.

biconcaves, il ne se forme que des foyers virtuels, quelle que soit la distance de l'objet. Soit d'abord un faisceau de rayons parallèles

à l'axe (fig. 352) : un rayon quelconque SI se réfracte au point d'incidence I en s'approchant de la normale CI. Au point d'émergence G, il se réfracte de nouveau, mais en s'écartant de la normale GC', en sorte qu'il se brise deux fois dans le même sens pour s'éloigner de l'axe CC'. La même chose ayant lieu pour tout autre rayon S'KMN, il en résulte qu'après avoir traversé la lentille, les rayons forment un faisceau divergent GHMN. Il ne peut donc y avoir de foyer réel; mais les prolongements de ces rayons se rencontrent en un point F, qui est le foyer virtuel principal.

Dans le cas où les rayons partent d'un point L (fig. 353) situé sur l'axe, on trouve, par la même construction, qu'il se forme un foyer virtuel en I, lequel est entre le foyer principal et la lentille.

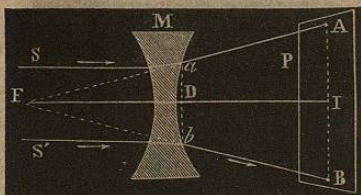


Fig. 354.

une de ses faces d'un corps opaque, de noir de fumée par exemple, en réservant, dans un même plan méridien et à égale distance de l'axe, en a et en b (fig. 354), deux petits disques non noircis, qui laissent passer la lumière; puis on reçoit sur l'autre face de la lentille, parallèlement à l'axe, un faisceau de lumière solaire, et l'on avance ou l'on recule l'écran P, qui reçoit les rayons émergents, jusqu'à ce que les images A et B des petites ouvertures a et b soient distantes l'une de l'autre du double de ab . Négligeant l'épaisseur centrale de la lentille, qui est très-faible, l'intervalle DI est alors égal à la distance focale FD, à cause de la similitude des triangles Fab et FAB .

La même construction s'appliquerait à la recherche d'un foyer virtuel quelconque, car on aurait toujours $\frac{AB}{ab} = \frac{FI}{FD}$, FD étant la distance focale cherchée.

484. Formation des images dans les lentilles biconcaves.— Les lentilles biconcaves, de même que les miroirs convexes, ne donnent que des images

virtuelles, quelle que soit la distance de l'objet.

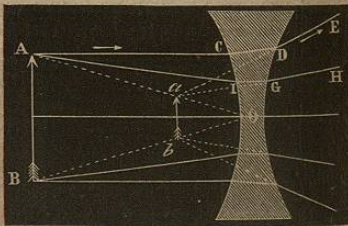


Fig. 355.

Soit, en effet, un objet AB (fig. 355) placé devant une pareille lentille. Si l'on tire d'abord l'axe secondaire du point A, tous les rayons AC, AI, émis de ce point, se réfractent deux fois dans le même sens pour s'écarter de l'axe AO; de sorte que l'œil qui reçoit les rayons émergents DE et GH, les juge partis du point où leurs prolongements vont rencontrer en a l'axe secondaire AO. De même, en menant l'axe secondaire du point B, les rayons émis de ce point forment un faisceau de rayons divergents dont les directions prolongées vont concourir en b . L'œil voit donc en ab une image virtuelle de AB, laquelle est toujours redressée et plus petite que l'objet.

*** 485. Aberration de sphéricité, caustiques.**— Dans la théorie des foyers et des images fournis par les différentes espèces de lentilles sphériques, on a admis jusqu'ici que les rayons émis d'un même point allaient, après s'être réfractés, concourir très-sensiblement en un point unique. Il en est ainsi, en effet, quand l'ouverture de la lentille, c'est-à-dire l'angle qu'on obtient en joignant ses bords au foyer, ne dépasse pas 10 à 12 degrés. Pour une ouverture plus grande, les rayons qui traversent la lentille près des bords ont leur point de concours plus près que ceux qui la traversent près de l'axe; c'est-à-dire qu'il se produit un phénomène analogue à celui qu'on a observé dans les miroirs (460), sous le nom d'aberration de sphéricité par réflexion, et qu'on désigne ici sous le nom d'aberration de sphéricité par réfraction. Les surfaces brillantes qui se forment alors dans l'espace par l'intersection des rayons réfractés se nomment *caustiques par réfraction*.

L'aberration de sphéricité nuit à la netteté des images. On obvie à ce défaut des lentilles en plaçant, au-devant, des diaphragmes percés d'une ouverture centrale, de manière à laisser passer les rayons qui se présentent vers le centre, mais à arrêter ceux qui tendent à se réfracter vers les bords. Du reste, en combinant deux lentilles de courbures convenables, on parvient à détruire l'aberration de sphéricité.

*** 486. Formules relatives aux lentilles.**— Dans toute lentille, on peut traduire en équation la relation qui existe entre la distance de l'image, celle de l'objet, les rayons de courbure et l'indice de la substance dont la lentille est formée. Soit d'abord le cas d'une lentille biconvexe. P étant un point lumineux situé sur l'axe (fig. 356), soient PI un rayon incident, IE sa direction dans l'intérieur de la lentille, EP' le rayon émergent, en sorte que P' est le foyer conjugué de P. Soient encore C'I et CE les normales aux points d'incidence et d'émergence, et posons $IPA = \alpha$, $EP'A' = \delta$, $ECA' = \gamma$, $IC'A = \delta$, $NIP = i$, $EIO = r$, $IEO = i'$, $N'EP' = r'$.

Les angles i et r' étant extérieurs, l'un au triangle PIC', l'autre au triangle CEP', on a $i = \alpha + \delta$, et $r' = \gamma + \delta$, d'où $i + r' = \alpha + \delta + \gamma + \delta$ [1]. Or, au point I, on a $\sin i = n \sin r$, et au point E, $\sin r' = n \sin i'$ (465); mais en supposant l'arc AI d'un très-petit nombre de degrés, il en est de même des angles i , r , i' et r' ; d'où l'on peut remplacer, dans la formule ci-dessus, les sinus par leurs arcs, ce qui donne $i = nr$ et $r' = ni'$; d'où $i + r' = n(r + i')$. D'ailleurs, les deux triangles IOE et COC' ayant l'angle O égal, on a $r + i' = \gamma + \delta$, d'où $i + r' = n(\gamma + \delta)$. Portant cette valeur dans l'équation [1], il vient

$$n(\gamma + \delta) = \alpha + \delta + \gamma + \delta, \text{ ou } (n-1)(\gamma + \delta) = \alpha + \delta \text{ [2].}$$

Cela posé, si l'on conçoit que les arcs α et γ soient décrits des points P et C comme centres avec un rayon égal à l'unité, et si du point P on décrit l'arc dA avec le rayon PA, on a les proportions $\frac{\alpha}{Ad} = \frac{1}{PA}$, et $\frac{\gamma}{A'B} = \frac{1}{CA}$; d'où l'on tire

