

535 Images virtuelles produites par les lentilles divergentes. — L'expérience montre encore que, quelle que soit la distance d'un objet lumineux à une lentille divergente, il ne se produit jamais qu'une image virtuelle, droite et plus petite que l'objet.

C'est ce qu'on peut s'expliquer par une construction géométrique, semblable à celle que nous avons employée pour les lentilles convergentes.

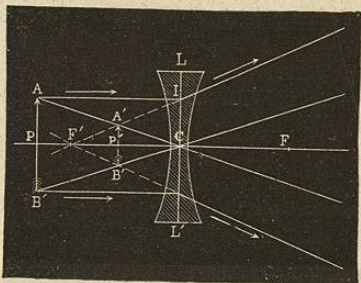


Fig. 569. — Image virtuelle, produite par une lentille divergente.

En effet, si l'on considère un objet AB (fig. 569) placé devant une lentille divergente, pour avoir l'image du point A, on mènera d'abord l'axe secondaire AC; puis le rayon AI, parallèle à l'axe principal: le prolongement géométrique du rayon émergent devra passer par le foyer principal F'; dès lors, le point de rencontre des deux droites IF' et AC déterminera le point A', qui sera l'image du point A. — On construira de même l'image B' du point B. — La figure montre que l'image A'B' est toujours virtuelle, droite, et plus petite que l'objet AB.

536. Formules relatives aux lentilles divergentes. — Pour ces lentilles, un raisonnement semblable à celui que nous avons fait pour les lentilles convergentes (529) donne, entre p et p' , la relation

$$(1) \quad \frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f}$$

les quantités p et p' étant comptées toutes les deux positivement du même côté de la lentille, et f étant la distance de la lentille au foyer principal virtuel F' (*). — On a, en outre, comme pour les lentilles convergentes,

$$(2) \quad \frac{i}{o} = \sqrt{\frac{p'^2}{p^2}}$$

Ces équations suffisent pour résoudre toutes les questions relatives à la position et à la grandeur de l'image.

(*) En raisonnant comme nous l'avons fait pour les lentilles convergentes (535), on verrait que la longueur focale f est encore déterminée par la relation

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right),$$

R et R' désignant les deux rayons de courbure d'une lentille biconcave. — Dans le cas d'un ménisque divergent (fig. 536, B''), on doit affecter du signe — le rayon de courbure de la face convexe.

CHAPITRE IV

DISPERSION

I. — DÉCOMPOSITION ET RECOMPOSITION DE LA LUMIÈRE.

537. Décomposition de la lumière blanche. — **Spectre solaire.** — Lorsqu'on fait tomber un faisceau de rayons solaires sur un prisme, il éprouve, outre la déviation que nous avons étudiée (515) un épanouissement et une coloration. — En effet, si l'on reçoit le faisceau émergent sur un écran MN (fig. 570), on observe que la région éclairée est allongée dans le sens perpendiculaire à l'arête du prisme, et présente des teintes variables d'une extrémité à l'autre (*). Ces teintes se fondent les unes dans les autres, en sorte qu'il est difficile de distinguer où finit l'une d'elles et où commence l'autre: on peut cependant les rapporter à sept couleurs principales, qui sont:

Violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge.

C'est le violet qui est le plus dévié vers la base du prisme; c'est le rouge qui l'est le moins. — Cet épanouissement qu'éprouve le faisceau lumineux a reçu le nom de dispersion. — L'image colorée est ce qu'on nomme le spectre solaire.

Pour expliquer la formation du spectre solaire, Newton a admis que

la lumière blanche, telle qu'elle nous arrive du Soleil, est formée de diverses couleurs, inégalement réfringibles par un même milieu transparent, comme le verre.

— Cette hypothèse suffit pour expliquer le phénomène: car, si les diverses couleurs sont réunies dans le faisceau incident RI (fig. 570), et si elles sont inégalement réfringibles, elles ne

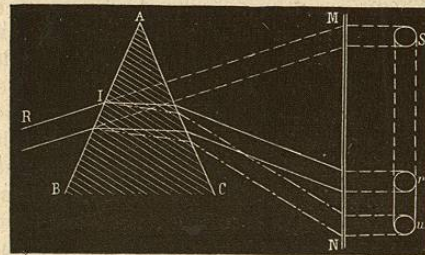


Fig. 570. — Production du spectre.

(*) Dans la figure 570, on a représenté l'écran rabattu, à droite, autour de la ligne

peuvent plus rester réunies en traversant le prisme; il se produit, à la sortie du prisme, autant de faisceaux de directions différentes qu'il y a de couleurs. — Ces faisceaux, rencontrant l'écran en des points différents, ne peuvent plus produire de la lumière blanche.

Pour justifier cette explication, Newton s'est proposé de démontrer par l'expérience : 1° que les diverses couleurs du spectre sont *simples* et *inégalement réfrangibles*; 2° qu'on peut effectuer artificiellement une *recomposition de la lumière blanche*, en superposant ces diverses couleurs.

538. Les diverses couleurs du spectre sont simples et inégalement réfrangibles. — En pratiquant une petite ouverture m dans l'écran MN , qui reçoit le spectre ru formé par un prisme A (fig. 571),

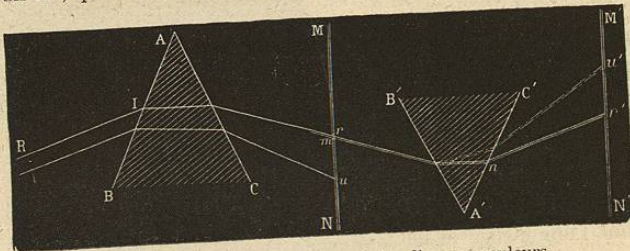


Fig. 571. — Inégale réfrangibilité des diverses couleurs.

on peut isoler un faisceau appartenant à une certaine nuance de rouge, par exemple. Si l'on reçoit ce faisceau rouge r sur un second prisme A' , on constate d'abord qu'on n'obtient en r' , sur un second écran $M'N'$, aucune autre couleur que la couleur rouge primitive. — En général, les expériences de ce genre montrent que chaque nuance du spectre est *simple*, c'est-à-dire qu'elle n'est plus décomposable en couleurs différentes.

En outre, si l'on fait tourner le prisme A de manière à faire passer par l'ouverture m des rayons violets, par exemple, on constate qu'ils éprouvent en traversant le prisme A' une déviation plus grande que les rayons rouges; en sorte que l'image vient se former en u' sur le second écran. — Cette expérience prouve donc bien que les diverses couleurs présentent, à travers une même substance, *des réfrangibilités qui vont en croissant depuis le rouge jusqu'au violet*.

L'expérience suivante, connue sous le nom d'expérience des prismes croisés, conduit à la même conclusion. — Soient deux prismes égaux, placés près l'un de l'autre, l'un P (fig. 572) ayant ses arêtes verticales, l'autre P' ayant ses arêtes horizontales. Introduisons dans une chambre

MN ; en S , est l'image blanche que produisait le faisceau de rayons solaires, avant qu'on eût placé le prisme; en ru , la succession des images colorées produites par le prisme, depuis le rouge r , jusqu'au violet u .

obscure un faisceau horizontal de lumière blanche, qui donne, sans interposition d'aucun prisme, une image blanche S (fig. 573) sur un

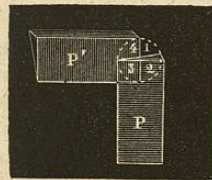


Fig. 572.

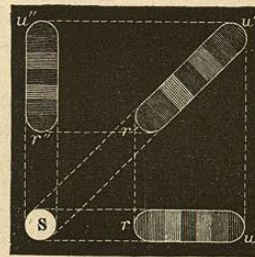


Fig. 573.

Expérience des prismes croisés.

écran. — Si l'on place sur le trajet du faisceau le prisme vertical P , cette image se transforme en un spectre horizontal ru ; si maintenant, derrière le prisme P , on dispose le prisme horizontal P' , on voit apparaître en $r'u'$ un spectre incliné à 45 degrés par rapport à ru . — Ce résultat s'explique immédiatement, si l'on admet que les diverses couleurs sont inégalement réfrangibles : le faisceau violet tombant sur P' doit éprouver une déviation verticale plus grande que celle du faisceau rouge, en sorte que le spectre doit être incliné; de plus, les angles réfringents des deux prismes étant égaux, les déviations Sr et rr' doivent être égales entre elles : l'inclinaison du spectre doit donc être de 45 degrés (*).

539. Recomposition de la lumière blanche. — Pour montrer que la coloration du spectre n'est pas due à une altération que le prisme aurait fait subir à la lumière, Newton a vérifié, par diverses expériences, qu'en superposant de nouveau les rayons séparés par le prisme, on reconstitue de la lumière blanche.

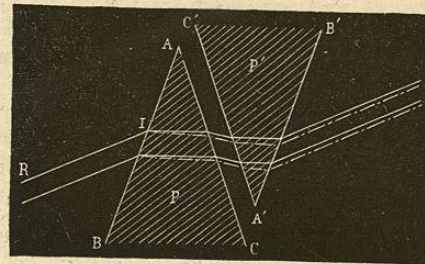


Fig. 574. — Recomposition de la lumière par un second prisme.

1° *Recomposition par un second prisme.* — Soit RI (fig. 574) un faisceau de lumière blanche, traversant un premier prisme P : au lieu de recevoir le faisceau réfracté sur un écran, où il formerait un spectre, fai-

(*) On peut disposer l'expérience de manière à obtenir à la fois quatre images sur l'écran : il suffit de placer les prismes, comme le représente la figure 572, de telle

sons-le tomber sur un second prisme identique P' , dont les faces soient parallèles à celles de P , mais dirigées en sens contraire. En recevant les rayons sur un écran, à leur sortie du prisme P' , on obtient une image *blanche*. — On voit en effet que, à la sortie du second prisme, le faisceau de lumière rouge (représenté en traits pleins) est redevenu parallèle au faisceau de lumière violette (représenté en traits discontinus) : ces faisceaux se confondent alors dans la plus grande partie de leur largeur, et il en est de même des faisceaux formés par les couleurs intermédiaires ; c'est la superposition de tous ces faisceaux, de diverses couleurs, qui produit l'image blanche. — Cette image présente seulement quelques irisations sur son bord supérieur et sur son bord inférieur, où les faisceaux extrêmes débordent un peu les faisceaux voisins.

2° *Recomposition par une lentille convergente, ou par un miroir concave.* — Recevons les rayons réfractés par le prisme BAC (fig. 575) sur une

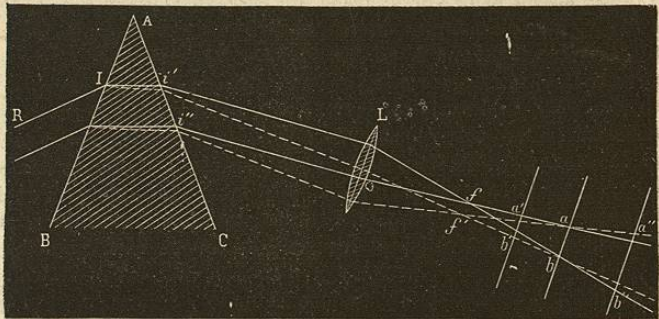


Fig. 575. — Recomposition de la lumière par une lentille convergente.

entille convergente L . Le faisceau rouge émergent (représenté en lignes pleines) ira, après avoir été réfracté par la lentille, converger en un point f de l'axe secondaire parallèle à sa direction primitive (527) : de même, le faisceau violet émergent (représenté en lignes discontinues) ira converger, après avoir traversé la lentille, en un point f' de l'axe secondaire parallèle à sa direction primitive ; au delà de ces points, les rayons de l'une et de l'autre couleur formeront deux faisceaux divergents, qui se traverseront en ab . Or, la partie commune aux deux faisceaux appartient évidemment aussi aux faisceaux formés par les rayons de réfrangibilités intermédiaires : si donc la superposition de tous les rayons du spectre reproduit la lumière blanche, on devra obtenir

sorte que leurs arêtes réfringentes soient tangentes au faisceau incident ; ce faisceau est alors partagé en quatre parties 1, 2, 3, 4, dont la première donne l'image directe S (fig. 573) ; la seconde donne le spectre horizontal ru ; la troisième, le spectre incliné $r'u'$; la quatrième, un spectre vertical $r''u''$, produit par le seul prisme P' .

nir une image *blanche*, sur un écran placé en ab . C'est ce que l'expérience vérifie (*). — La construction montre que, si l'on place l'écran en avant de ab , en $a'b'$ par exemple, on doit avoir une image blanche, bordée de rouge en haut et de violet en bas ; au contraire, au delà de ab , en $a''b''$ par exemple, on doit avoir une image blanche, bordée de violet en haut et de rouge en bas ; c'est ce que l'expérience vérifie.

En employant un miroir concave au lieu d'une lentille convergente, on opère la recombinaison des couleurs d'une manière semblable.

540. *Expérience du disque de Newton.* — Pour montrer que la sensation simultanée de toutes les couleurs du spectre produit sur notre œil l'impression de la lumière blanche, on peut encore faire usage du *disque de Newton*.

Pour comprendre le principe sur lequel est fondée cette expérience, prenons un disque de carton noir C (fig. 576) sur lequel on aura collé

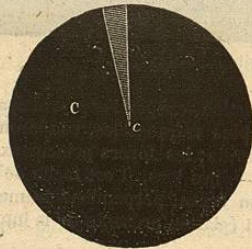


Fig. 576.

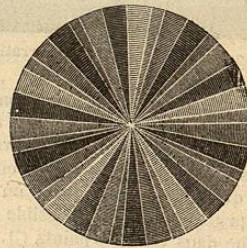


Fig. 577.

Disque de Newton.

une bande de papier rouge c , en forme de secteur circulaire. Faisons tourner rapidement le disque autour d'un axe qui passe par son centre. Pendant la rotation, *toute la surface* du disque nous paraîtra colorée en rouge. — Cela tient à ce que la sensation produite sur notre œil par la bande rouge, dans chacune de ses positions, dure un certain temps, en sorte que, pendant la rotation, nous la voyons *à la fois* dans ses positions successives.

Or, le *disque de Newton* (fig. 577) est un disque semblable, sur lequel on a collé des secteurs de papier présentant successivement toutes les couleurs du spectre. Si on le fait tourner rapidement, sa surface doit présenter *toutes ces colorations* à la fois, *en chacun de ses points*. — On constate, en effet, que la surface du disque paraît *blanche*.

541. *Aberrations de réfrangibilité des lentilles. — Achromatisme.* — Un rayon de lumière blanche, en traversant une lentille, se trouve dans

(*) Pour que les points f et f' , où vont converger les rayons violets et les rayons rouges, soient à la même distance de la lentille L , il est indispensable de faire usage d'une lentille achromatique (541, fig. 579).

les mêmes conditions que s'il traversait un prisme dont les faces seraient tangentes à la lentille aux points d'incidence et d'émergence. Ce rayon est donc à la fois dévié et décomposé. — Considérons, par exemple, un faisceau de lumière blanche tombant sur une lentille convergente LL' de faible ouverture (fig. 578), parallèlement à l'axe principal XX' . Les rayons rouges, qui

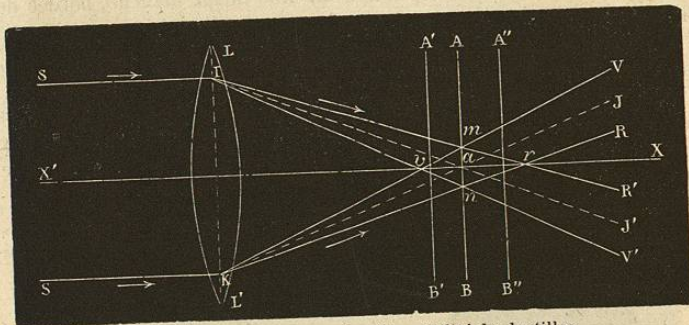


Fig. 578. — Aberrations de réfrangibilité des lentilles.

sont les moins réfrangibles, iront, après réfraction, couper l'axe principal en un point r ; les rayons violets, qui sont les plus réfrangibles, couperont ce même axe en un point v , plus voisin de la lentille; les foyers principaux des autres couleurs seront situés entre r et v . — Dès lors, il est facile de voir que, quel que soit le point où l'on place un écran, perpendiculairement à l'axe principal, il est impossible que la région éclairée présente de la lumière blanche dans tous ses points (*).

Ces considérations sont applicables aux faisceaux émanés de points situés à des distances finies de la lentille : de là résulte que, même avec une lentille de très petite ouverture, il est impossible d'obtenir des images ne présentant pas des irisations, au moins sur leurs bords. — Ces effets ont reçu le nom d'*aberrations de réfrangibilité*.

Pour diminuer ces aberrations, qui nuisent à la netteté des images, on réunit ensemble deux ou plusieurs lentilles, formées de verre différents, et constituant ce qu'on appelle des systèmes *achromatiques*. — Si l'on assemble deux lentilles, l'une convergente et l'autre divergente (fig. 579), la première en crown et la seconde en flint, et si l'on donne à ces lentilles des courbures

(*) Supposons que l'écran occupe la position AB (fig. 578), qui passe par l'intersection mn de la première nappe lK du cône des rayons rouges avec la seconde nappe Vv du cône des rayons violets. Tous les points éclairés recevront à la fois des rayons rouges et des rayons violets. Mais il y aura une couleur, le jaune, par exemple, dont le foyer sera en a : les génératrices extrêmes du cône des rayons jaunes seront Ka et la' : aucun des points de la surface mn , autre que a , ne recevra de jaune. Si maintenant on remarque que les foyers des couleurs intermédiaires entre le rouge et le jaune correspondent aux points situés entre r et a ; que les foyers des couleurs intermédiaires entre le jaune et le violet correspondent aux points situés entre a et v , on voit que la surface mn ira en s'irisant successivement, du centre vers les bords. — Il est facile de voir que, pour toute position $A'B'$ située en deçà de AB , les bords de l'image contiendront toujours uniquement de la lumière rouge. Pour toute position $A''B''$ située au delà de AB , les bords de l'image contiendront uniquement de la lumière violette.

convenablement calculées, la théorie montre que l'on peut obtenir un système qui fonctionne comme une lentille *convergente*, mais dans lequel deux couleurs émanées d'un même point, le rouge et le violet par exemple, forment toujours leurs foyers exactement en un même point. — Cependant, avec deux lentilles, les images présentent encore de légères irisations, parce que les couleurs intermédiaires entre le rouge et le violet ont encore des foyers un peu différents. Avec trois lentilles, on peut achromatiser rigoureusement trois couleurs, le rouge, le jaune et le violet, par exemple; les autres couleurs ont alors leurs foyers sensiblement aux mêmes points, et l'on fait disparaître à peu près complètement toute irisation (*).



Fig. 579.

Lentille achromatique.

542. **Couleurs complémentaires.** — Couleurs des corps éclairés par la lumière blanche. — On dit que deux couleurs sont *complémentaires*, lorsque ces couleurs superposées produisent du blanc.

Si l'on fait tomber un spectre solaire sur un écran percé d'ouvertures qui laissent passer seulement certaines couleurs, et si, à l'aide d'une lentille, on fait converger ces couleurs en un point, on obtient une teinte complémentaire de celle qu'on obtiendrait en superposant les autres couleurs. — Par exemple, en arrêtant le rouge et en superposant les autres couleurs, on obtient une sorte de vert bleuâtre, qui est une couleur composée, *complémentaire du rouge*.

Les couleurs que nous présentent les divers corps, quand ils sont éclairés par la lumière blanche, résultent de la manière inégale dont ils agissent sur les diverses couleurs qui constituent cette lumière. — Ainsi, quand une étoffe, éclairée par la lumière du jour, nous apparaît avec la couleur *rouge*, c'est que les rayons rouges sont les seuls qu'elle diffuse dans toutes les directions : elle absorbe les autres couleurs, dont le mélange formerait la teinte complémentaire du rouge.

Les corps *blancs*, comme le papier, sont des corps qui diffusent en égale proportion les rayons de toutes les couleurs. — Les corps *noirs* sont ceux qui absorbent toutes les couleurs, sans en diffuser aucune. Quand un corps est absolument noir, on ne peut le distinguer que par contraste avec les corps voisins.

Des remarques semblables sont applicables aux *corps transparents*. — Un *verre rouge* est un verre qui, recevant de la lumière blanche, ne laisse passer que les rayons rouges, et absorbe les autres couleurs. — Le *verre à vitres ordinaire* laisse passer également toutes les couleurs, en sorte que la lumière transmise présente la même composition qu'avant son passage au travers du verre.

D'après cela, il est facile d'expliquer, par exemple, l'aspect que nous

(*) Newton avait regardé comme insoluble le problème de l'achromatisme, c'est-à-dire la construction d'un système réfringent, capable de dévier les faisceaux lumineux sans les décomposer. C'est à l'opticien anglais Dollond qu'on doit la solution de cette question : la découverte de l'achromatisme date de 1738.

présente un paysage, quand nous le regardons au travers d'un *verre rouge*. Les corps blancs qui s'y trouvent nous paraissent rouges, parce que, des diverses couleurs qu'ils émettent, le verre rouge ne laisse passer que la couleur rouge. Pour la même raison, les corps rouges nous apparaissent, dans ce cas, avec leur couleur réelle. Mais les corps bleus, verts ou jaunes, nous paraissent noirs, parce que le verre rouge ne laisse passer aucune de ces couleurs.

543. Propriétés calorifiques et propriétés chimiques du spectre.

— **Rayons infra-rouges et rayons ultra-violet.** — Lorsqu'on décompose les rayons solaires au moyen d'un prisme de sel gemme, on constate, ainsi que nous l'indiquerons dans l'étude de la chaleur rayonnante, que ce spectre possède des propriétés calorifiques, croissantes du violet au rouge. Si l'on continue à explorer l'espace situé au delà du rouge, on constate que ce spectre calorifique se prolonge encore dans une étendue à peu près égale à celle du spectre lumineux. — Ces rayons *calorifiques obscurs*, dont la réfrangibilité est moindre que celle des rayons qui sont à la fois calorifiques et lumineux, ont reçu le nom de rayons *infra-rouges*.

Si maintenant on reçoit le spectre solaire sur quelques-unes de ces substances dans lesquelles la lumière peut effectuer des décompositions chimiques, et qui sont en usage dans la photographie, on constate que les actions chimiques sont très inégales dans les diverses régions du spectre. A l'inverse des propriétés calorifiques, les propriétés chimiques se manifestent surtout dans les régions qui correspondent aux rayons voisins du violet; en outre, ce spectre chimique dépasse, du côté du violet, les limites du spectre lumineux. — Le soleil nous envoie donc, outre les rayons qui sont à la fois chimiques et lumineux, des rayons *chimiques obscurs*, d'une réfrangibilité plus grande que les premiers : on leur donne le nom de rayons *ultra-violet* (*).

544. Propriétés phosphorogéniques. — C'est particulièrement aux rayons doués de propriétés chimiques que paraît appartenir la propriété de déterminer la *phosphorescence*.

Certaines substances, placées dans la partie la plus déviée du spectre visible, ou même dans les rayons ultra-violet, répandent une lueur phosphorescente, dont la teinte dépend de la nature même de ces substances. — Quelques-unes conservent quelque temps la propriété de luire ainsi, lorsqu'on les transporte dans l'obscurité : tels sont le spath-fluor, le sulfate de baryte calciné avec du soufre ou des matières organiques, les écailles d'huître calcinées, etc. : ce sont ces corps qu'on appelle spécialement *phosphorescents*. — D'autres substances cessent d'être lumineuses dès qu'on intercepte les rayons

(*) Pour étudier les propriétés chimiques des diverses radiations, il convient d'employer un prisme et une lentille formés de *crystal de roche* : le verre arrêterait une grande partie des rayons plus réfrangibles que les rayons violets extrêmes.

qu'elles recevaient : telles sont la solution de sulfate de quinine, l'infusion d'écorce de marronnier d'Inde, le verre coloré par l'oxyde d'uranium, etc.; on les désigne sous le nom de substances *fluorescentes*.

Pour constater la propriété que possèdent les radiations ultra-violettes, de développer la phosphorescence ou la fluorescence, on fait, dans les cours, l'expérience suivante. Avec un pinceau imprégné d'une solution de sulfate de quinine dans l'acide tartrique, on trace une longue bande sur un carton blanc, et l'on fait tomber le spectre solaire sur ce carton, de manière qu'il couvre une partie de sa longueur; on aperçoit alors, non seulement la portion du carton qui était visible avant l'addition du sulfate de quinine, mais encore une certaine longueur de la bande au delà du violet. Le sulfate de quinine n'étant que fluorescent, le phénomène disparaît dès qu'on intercepte la lumière incidente.

545. Les diverses couleurs se distinguent entre elles, comme les sons de diverses hauteurs, par la rapidité du mouvement vibratoire, ou par la longueur d'onde. — Des expériences délicates, dans le détail desquelles il nous serait impossible d'entrer, ont permis, non seulement de vérifier les diverses conséquences qui se déduisent de l'hypothèse des ondulations, mais encore de mesurer les *longueurs d'ondes lumineuses* dans l'air, pour chacune des couleurs simples qui constituent la lumière blanche : ces longueurs d'onde vont en décroissant du rouge au violet, c'est-à-dire qu'elles ont une valeur d'autant plus petite qu'elles se rapportent à une couleur plus réfrangible. — Or, on a vu (416) que, dans un mouvement vibratoire en général, si l'on désigne par v la vitesse de propagation du mouvement, par λ la longueur d'onde, et par n le nombre de vibrations par seconde, on a

$$v = n\lambda.$$

On connaît la vitesse de propagation de la lumière dans l'air, égale à environ 300 000 kilomètres par seconde (592); cette formule permet donc de calculer le nombre de vibrations n pour une couleur déterminée, étant donnée la longueur d'onde λ .

Pour le jaune, par exemple, la valeur de la longueur d'onde λ est d'environ 6 dix-millièmes de millimètre : on a donc

$$n = \frac{300\,000\,000^m}{0^m,000\,000\,6} = \frac{500}{0,6} \times 10^{12} = 500 \times 10^{12};$$

c'est-à-dire que la lumière jaune correspond à environ 500 *trillions* de vibrations par seconde. — Pour les autres couleurs, on trouve que le nombre de vibrations par seconde varie entre 400 trillions et environ 700 trillions, en allant du rouge au violet.

On voit que les vibrations lumineuses sont beaucoup plus rapides que les vibrations sonores, puisque les vibrations des sons les plus aigus, perceptibles à l'oreille, ne dépassent guère une vingtaine de mille par seconde (425). — Mais le caractère qui distingue entre elles les lumières de diverses couleurs est le même que celui qui distingue les sons de diverses hauteurs : c'est la rapidité plus ou moins grande du mouvement vibratoire.