

DISSERTATION

SUR

QUELQUES PROPRIÉTÉS

DES

IMPRESSIONS PRODUITES PAR LA LUMIÈRE

SUR L'ORGANE DE LA VUE,

PRÉSENTÉE ET SOUTENUE,

SOUS LE RECTORAT DE M^r J. KINKER,

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE LIÈGE,

LE 9 ^{juin} 1829, A 4 HEURES,

POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR EN SCIENCES MATHÉMATIQUES ET PHYSIQUES.

PAR

JOSEPH PLATEAU, DE BRUXELLES.

LIÈGE,

H. DESSAIN, IMPRIMEUR-LIBRAIRE, PLACE DU PALAIS.

MDCCCXXIX.



LE 309490

Le *Specimen* sera soumis à la censure de la Faculté, afin de s'assurer qu'il ne s'y trouve rien de contraire à la tranquillité publique et aux bonnes mœurs; chacun étant, du reste, libre de présenter au public les résultats de ses opinions, sans que pour cela, ils puissent être considérés comme ceux de la Faculté ou de l'Université.

Art. 56 du Règlement.

A Monsieur A. QUETELET,

*Directeur de l'Observatoire de Bruxelles, Professeur au Musée
des sciences et des lettres, &c.*

A Monsieur R. VAN REES,

*Professeur à la Faculté des sciences mathématiques et physiques
de l'Université de Liège*

Hommage de respect et de reconnaissance,

J. Plateau.

SUR QUELQUES PROPRIÉTÉS

DES

IMPRESSIONS PRODUITES PAR LA LUMIÈRE

SUR L'ORGANE DE LA VUE.

Tout le monde sait que si l'on agite rapidement et dans l'obscurité un charbon enflammé, on voit une courbe lumineuse et continue, comme si le charbon laissait dans l'air la trace de son passage. Ce fait prouve que les sensations produites en nous par la lumière ont une certaine durée, qu'elles subsistent encore quelque temps après la disparition des objets qui les ont fait naître (Newton, opt. liv. 1, part. 2, prop. 5.) On peut d'ailleurs se convaincre directement de cette vérité en regardant un morceau de papier blanc exposé au soleil, et fermant subitement les yeux ; on voit alors l'image blanche du papier subsister encore pendant un temps très-sensible.

Il est naturel de croire que ces impressions ont une durée et une énergie différente suivant l'intensité et l'espèce de la lumière qui les a produites. Le but que je me suis proposé est d'examiner, sous le rapport de leur durée, de leur énergie et de l'action qu'elles exercent les unes sur les autres, les impressions produites par les différentes couleurs.

Si l'on suppose que notre charbon décrive un cercle, il suffira évidemment, pour que le cercle entier paraisse lumineux, que le charbon repasse en chaque point de sa course précisément à l'instant où l'impression produite par son passage précédent va s'évanouir. Il n'est pas moins évident que si l'on parvenait à donner exactement cette vitesse au charbon,

la durée d'une révolution entière serait égale à celle d'une impression. Il semble que l'on peut conclure de là que pour mesurer la durée de l'impression produite sur l'organe de la vue par la présence d'un petit objet quelconque, il suffira d'imprimer à cet objet un mouvement circulaire, en augmentant progressivement la vitesse, jusqu'à ce que la trace apparente de l'objet forme un cercle complet, et de mesurer alors la durée d'une révolution : cette durée sera celle de l'impression. La détermination de la durée d'une révolution ne présente d'ailleurs aucune difficulté : il suffit pour cela de connaître le nombre de révolutions décrites dans un temps donné.

C'est par ce moyen que le chevalier d'Arcy (Mém. de l'Acad. des sc. 1765) a cherché à déterminer la durée de l'impression produite par un charbon enflammé : il la trouve égale à 8 tierces, ou 0'', 133. Ce physicien s'était proposé de tenter les mêmes expériences sur des corps non lumineux par eux-mêmes, mais éclairés par une forte lumière et diversement colorés ; il ne paraît pas qu'il ait exécuté ce projet. Young (a course of lectures on natur. philos. tom. 1, pag. 455) affirme, mais sans citer aucune expérience, que la durée de l'impression de la lumière sur la rétine est en général de 0'',01 à 0'',50 ou plus, et dit que cette durée paraît être d'autant plus considérable que la lumière qui a produit la sensation est plus intense. Il n'est pas à ma connaissance que d'autres physiciens se soient occupés du même sujet.

En me servant du même moyen que d'Arcy, j'ai essayé la détermination de la durée pour le cas d'objets colorés diversement et éclairés par la simple lumière du jour ; mais dès les premiers pas j'ai rencontré des obstacles que je vais faire connaître.

1° Les impressions, comme on doit naturellement le supposer, ne passent pas subitement de leur maximum d'intensité à une nullité absolue ; elles décroissent graduellement, de sorte qu'il est impossible de saisir avec précision l'instant où elles s'évanouissent. Ce fait que toutes les analogies nous portent à admettre, est pleinement confirmé par l'expérience : que l'on donne à un morceau de papier blanc un mouvement circulaire trop peu rapide cependant pour produire l'apparence d'un cercle complet ; l'objet

paraîtra s'allonger, de manière à occuper un plus grand espace sur la courbe qu'il décrit, et l'extrémité postérieure de cette image allongée, au lieu d'être nettement terminée, comme cela arriverait si la sensation s'évanouissait brusquement, paraît au contraire se confondre graduellement avec le fond sur lequel elle se dessine (1). Il suit de là que nous devons renoncer à l'espoir d'obtenir des résultats précis : nous ne pourrions que déterminer à peu près le temps pendant lequel chaque impression conserve une intensité bien sensible.

2° De cette première difficulté en naît une seconde : l'objet qui se meut circulairement retrouve, en chaque point de sa course, l'impression précédente considérablement affaiblie, de sorte que chaque point du cercle présente une succession continuelle de teintes vives et faibles : de là un tremblement, une espèce de vibration qui fatigue l'œil et qui rend bien difficile la détermination précise de la vitesse à donner à l'objet.

3° De même qu'il faut un certain temps pour qu'une impression une fois formée disparaisse complètement, de même aussi un certain temps est nécessaire à sa production complète; chacun sait qu'un objet qui passe devant l'œil avec une très-grande rapidité ne s'aperçoit point ou ne s'aperçoit que faiblement. Il suit de là que l'objet qui se meut circulairement pourra fort bien ne produire qu'une impression imparfaite, de sorte que la durée de cette impression donnée par celle d'une révolution serait moindre que la durée d'une impression complète.

J'ai tâché d'atténuer autant que possible l'influence de ces trois difficultés capitales et je vais rendre compte des moyens que j'ai employés à cet effet, ainsi que de ma manière d'opérer.

L'instrument dont je me suis servi consistait, comme celui de d'Arcy, en un système de roues verticales mu par un poids, de telle manière que la dernière roue pouvait acquérir une vitesse considérable, celle du poids étant très-petite. L'axe de cette roue portait une aiguille terminée par une

(1) Pour faire cette expérience convenablement, il faut se servir d'un instrument analogue à celui que nous décrirons bientôt, et donner au morceau de papier la figure indiquée page 9.

pince destinée à retenir les objets colorés. En augmentant ou diminuant le poids, on pouvait faire passer l'aiguille par tous les degrés de vitesse nécessaires, et son mouvement, qui dans les premiers instants était accéléré, devenait uniforme après quelques minutes, parce que les frottements et autres résistances augmentant avec la vitesse finissaient par détruire l'accélération due à la pesanteur. L'instrument était d'ailleurs muni d'un volant pour en régulariser la marche et tout l'appareil était placé à la hauteur de l'œil à quelque distance en face d'une fenêtre. L'extrémité de l'aiguille décrivant une circonférence de cercle et pouvant acquérir tous les degrés désirables de vitesse, l'objet coloré se trouvait dans les conditions requises, et pour connaître la durée d'une révolution, il suffisait de faire mouvoir l'instrument pendant un temps déterminé, de compter le nombre de tours décrits par l'une des premières roues, dont la vitesse était peu considérable, et d'en déduire ensuite, d'après la connaissance du nombre des dents des roues et des pignons, le nombre de révolutions de la dernière; divisant alors le temps par ce nombre, le résultat était la durée d'une révolution.

Pour obvier autant que possible à la première des difficultés ci-dessus énumérées, j'ai placé derrière l'aiguille un carton recouvert de velours noir, comme présentant la teinte la plus foncée possible, et par conséquent comme propre à faire ressortir mieux que toute autre chose les dernières nuances des impressions.

Quant à la seconde difficulté, le seul moyen qui se soit présenté à moi pour en diminuer l'influence, a été de répéter chaque expérience un assez grand nombre de fois, et de prendre ensuite la moyenne entre les divers résultats. En opérant ainsi j'avais encore pour but de corriger les irrégularités provenant de l'instrument.

On peut éviter complètement la troisième difficulté en donnant à l'objet coloré une largeur considérable: en lui faisant occuper, par exemple, un quart de la circonférence qu'il décrit; mais alors il faut bien observer que la durée d'une impression n'est plus égale à celle d'une révolution, comme lorsqu'il s'agissait de petits objets dont on pouvait négliger la largeur sans commettre une erreur sensible: il faut évidemment ici déduire de la

durée d'une révolution le temps qui s'écoule entre le passage d'une des extrémités de l'objet et celui de l'extrémité opposée : ainsi lorsque l'objet occupe un quart de la circonférence, la durée d'une impression est égale aux trois quarts de celle d'une révolution. Cette manière d'opérer a, selon moi, deux avantages : d'abord l'objet étant plus large met plus de temps à passer devant l'œil, de sorte que l'impression produite est complète; en second lieu, la durée d'une révolution surpassant celle d'une impression, la vitesse de l'objet est moindre, la succession des nuances vives et faibles est moins rapide et l'œil moins ébloui peut distinguer avec plus de certitude l'instant où il faut cesser d'ajouter de nouveaux degrés de vitesse.

Dans mes expériences, je me suis servi de bandes de papier colorées (Fig. 1), terminées par deux arcs de cercle ayant leur centre sur l'axe de l'aiguille, et par deux rayons faisant entr'eux un angle droit. Les expériences ont été faites sur les couleurs blanche, jaune, rouge et bleue (1); en voici les résultats avec les moyennes correspondantes : ils expriment la durée d'une impression en secondes sexagésimales :

| BLANC. | JAUNE. | ROUGE. | BLEU. |
|------------------|---------|---------|---------|
| 0'', 34 | 0'', 36 | 0'', 33 | 0'', 31 |
| 0'', 33 | 0'', 36 | 0'', 37 | 0'', 30 |
| 0'', 35 | 0'', 36 | 0'', 37 | 0'', 34 |
| 0'', 35 | 0'', 35 | 0'', 33 | 0'', 30 |
| 0'', 38 | 0'', 36 | 0'', 35 | 0'', 34 |
| 0'', 37 | 0'', 34 | 0'', 32 | 0'', 36 |
| <hr/> | <hr/> | <hr/> | <hr/> |
| Moyennes 0'', 35 | 0'', 35 | 0'', 34 | 0'', 32 |

Une première chose que l'on ne peut manquer d'observer, à l'inspection de ces résultats, c'est la grande différence qui existe entre eux et celui de d'Arcy, que nous avons donné plus haut. En effet, un charbon

(1) Les papiers étaient colorés avec de la gomme gutte, du carmin et du bleu de Prusse. C'est de ces mêmes couleurs que j'ai fait usage dans toutes les expériences suivantes.

enflammé vu dans l'obscurité paraît devoir produire sur la rétine une action plus énergique qu'un papier blanc exposé à la lumière diffuse ; comment admettre d'après cela que l'impression due au premier ne dure que 0'', 13, tandis que l'impression due au second durerait 0'', 35 ? Je suis porté à croire que d'Arcy n'a pas eu égard au décroissement graduel de l'impression, et qu'il a augmenté la vitesse jusqu'à ce qu'il obtint un anneau lumineux d'un éclat uniforme : en effet, il ne fait aucune mention de ce décroissement, et il dit quelque part que l'anneau parut dans toute son *égalité*. Peut-être aussi le charbon n'ayant que peu de largeur ne produisait-il qu'une impression imparfaite dont la durée devait être moindre que si la sensation eût été complète ; peut-être enfin la disposition des yeux est-elle différente dans l'obscurité. Quoiqu'il en soit les résultats que nous venons d'obtenir ne doivent être considérés que comme approximatifs ; ils sont environnés, comme on l'a vu plus haut, de trop de causes d'erreur et sont déduits d'expériences trop peu nombreuses pour qu'on puisse les regarder comme parfaitement exacts. Tels qu'ils sont ils montrent que, parmi les couleurs principales, le blanc et le jaune produisent les impressions les plus durables ; que le rouge vient ensuite, et en dernier lieu, le bleu. Toutefois les différences sont si légères qu'on ose à peine s'y fier, surtout si l'on considère les grands écarts qui existent entre les résultats isolés qui ont donné les moyennes. Heureusement nous verrons bientôt de nouveaux résultats ajouter à la probabilité des premiers, au moins quant à l'ordre dans lequel les couleurs sont rangées.

Voici maintenant d'autres expériences, susceptibles de beaucoup plus de précision et qui, sans nous conduire à la valeur de la durée des impressions, nous fournissent des données sur leur énergie relative et sur la loi suivant laquelle décroissent les impressions une fois formées.

Que l'on divise un cercle de papier (fig. 2), en un certain nombre de secteurs égaux, par exemple vingt-quatre ; que l'on trace ensuite deux circonférences concentriques, de manière à intercepter sur chaque secteur un trapèze curviligne tel que *abcd* ; que douze de ces trapèzes soient peints d'une même couleur, et que les douze autres soient noircis, de manière que chaque surface colorée se trouve entre deux surfaces noires ; il

vaut mieux encore découper ces dernières à jour et faire en sorte que derrière le cercle se trouve un carton recouvert de velours noir. Si l'on adapte ce cercle à l'instrument de manière que son centre soit sur l'axe de la dernière roue, tout l'espace compris entre les deux circonférences concentriques tournera sur lui-même et les surfaces colorées et obscures se succéderont l'une à l'autre avec rapidité. Si la vitesse est peu considérable, l'œil placé devant l'instrument n'apercevra qu'un tremblement, une succession rapide de teintes brillantes et obscures; mais si l'on augmente graduellement la vitesse, cette confusion diminuera et il arrivera un point où la teinte perçue sera uniforme. Alors tout l'espace divisé en portions noires et colorées ne présentera plus qu'une surface parfaitement unie et dont la couleur sera celle qu'on obtiendrait en mélangeant d'un peu de noir la teinte des portions colorées. De plus, si les portions noires ont été découpées à jour, notre surface sera transparente, et des objets placés derrière, entre le cercle et le velours noir, s'apercevront comme à travers une gaze colorée.

Avant d'aller plus loin, cherchons à rendre raison de ces faits. L'explication qui se présente naturellement est la suivante : lorsque la vitesse a atteint un certain degré, le temps qui s'écoule entre les passages de deux portions colorées successives est trop petit pour que l'impression produite par la première ait décré d'une quantité sensible lorsque la seconde arrive; de sorte que les impressions se succédant sans interruption et sans décroissement, l'œil ne peut percevoir qu'une teinte uniforme. Mais pourquoi cette teinte uniforme tire-t-elle sur le noir, si les impressions ne sont pas sensiblement affaiblies ? C'est que chaque portion colorée passe devant l'œil avec trop de rapidité pour y laisser une impression complète; l'impression imparfaite qu'elle produit subsiste sans altération sensible jusqu'à l'arrivée de la portion suivante; pendant le passage de cette dernière, l'impression précédente s'évanouit et une seconde se forme, et ainsi de suite. Quant à la transparence de la teinte uniforme, elle s'explique aussi aisément : si les portions noires sont découpées à jour, un objet placé derrière le cercle est alternativement vu et caché par la succession des ouvertures et des surfaces colorées qui passent devant lui : il doit donc produire sur la rétine une suite d'impressions

qui, lorsque la vitesse sera considérable, n'en formeront plus qu'une continue mais imparfaite, et combinée avec celles des surfaces colorées.

Tout ce qui précède étant bien conçu, soumettons maintenant les différentes couleurs à cette expérience, et cherchons pour chacune d'elles la vitesse précisément nécessaire à la production d'une teinte uniforme (1). Ces vitesses sont très-différentes, comme le prouve le tableau ci-joint des résultats que j'ai obtenus en me servant de cercles contenant chacun douze trapèzes colorés et douze noirs. Ils expriment la durée d'une révolution :

| BLANC. | JAUNE. | ROUGE. | BLEU. |
|--------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 0'', 191 | 0'', 201 | 0'', 248 | 0'', 323 |
| 0'', 194 | 0'', 201 | 0'', 230 | 0'', 295 |
| 0'', 198 | 0'', 202 | 0'', 227 | 0'', 264 |
| 0'', 182 | 0'', 192 | 0'', 224 | 0'', 297 |
| <u>Moyennes</u> 0'', 191 | <u>0'', 199</u> | <u>0'', 232</u> | <u>0'', 295</u> |

Ces résultats sont, comme on le voit, inverses de ceux de la page 9; voyons le parti qu'on peut en tirer. Chaque cercle contenant vingt-quatre trapèzes tant noirs que colorés, il est évident que si l'on veut avoir le temps qui s'écoule entre les passages de deux trapèzes colorés successifs, ou en d'autres termes, le temps pendant lequel une impression s'est maintenue sans perte sensible, il suffira de diviser par 24 la durée d'une révolution. Or l'inspection des moyennes ci-dessus montre que cette opération donnerait des nombres qui iraient en croissant depuis le blanc jusqu'au bleu; il s'ensuit que l'impression bleue subsiste plus long-tems que la rouge sans décroissement sensible; celle-ci plus long-tems que la jaune et cette dernière plus long-tems que la blanche. Mais subsister plus long-tems sans décroissement sensible est évidemment ici la même chose que décroître moins rapidement; ainsi nous arrivons à ce résultat singulier et

(1) J'entends par là la vitesse qu'on obtient en augmentant graduellement le poids qui fait mouvoir l'instrument, jusqu'à ce que la teinte soit devenue uniforme et en s'arrêtant précisément à ce point.

en opposition apparente avec celui de la page 9, que les impressions décroissent avec une inégale rapidité, et que sous ce rapport les couleurs doivent être rangées dans l'ordre suivant :

Bleu , Rouge , Jaune , Blanc ,

le décroissement de l'impression bleue étant le plus lent , et celui de la blanche le plus rapide.

Mais de ce que l'impression bleue , par exemple , s'efface avec plus de lenteur que la rouge , faut-il en conclure que sa durée totale est plus longue , et qu'ainsi les résultats de la page 9 sont inexacts ? Je ne le crois pas : la disparition graduelle d'une impression est le passage d'un état accidentel de l'organe à son état normal : or lorsque les corps inorganiques nous présentent de semblables passages , par exemple lors du refroidissement des corps , lors de la déperdition de l'électricité dans l'air , etc. , la marche du phénomène est en général d'autant plus lente que les corps sont moins écartés de l'état normal , tandis que sa durée totale est d'autant moins considérable ; ainsi de deux corps chauffés inégalement et abandonnés ensemble au refroidissement , le moins chaud se refroidira par degrés moins rapides , mais mettra cependant moins de temps que l'autre à revenir à la température extérieure. Il me semble qu'on peut attribuer par analogie les mêmes propriétés au décroissement des impressions : alors tous les résultats s'expliquent et s'accordent. En effet admettons , et nous en verrons plus loin plus d'une preuve , que les couleurs doivent être rangées dans l'ordre de la page 9 quant à l'énergie des impressions qu'elles font naître , depuis le blanc qui produirait l'impression la plus intense , jusqu'au bleu qui produirait la plus faible. Il résulte de l'analogie ci-dessus que l'impression blanche sera la plus durable , mais qu'elle décroîtra avec le plus de rapidité ; que l'impression jaune durera moins et décroîtra aussi moins rapidement ; que dans cet ordre l'impression rouge suivra la jaune et qu'enfin l'impression bleue sera la moins durable et offrira le décroissement le moins rapide. Or , c'est précisément là ce que nous apprennent les résultats des pages 9 et 12 (1).

(1) A la vérité , d'après les résultats de la page 9 l'impression du jaune durerait autant que celle du blanc ; mais comme nous prouverons bientôt d'une autre manière

Mais nous pouvons aller plus loin : ce que nous venons de dire relativement aux impressions des différentes couleurs peut s'étendre aux divers états d'une impression qui s'efface : dans le premier moment le décroissement sera très-rapide parce que l'impression est encore énergique ; mais ensuite , à mesure qu'elle perdra de sa force , le décroissement se ralentira. C'est aussi ce qui arrive dans le refroidissement , etc. et ce que mettront , j'espère , hors de doute les expériences suivantes :

Divisons deux cercles A et B (Fig. 3) en secteurs alternativement blancs et noirs ; que les secteurs blancs aient une largeur égale dans les deux cercles , mais y soient en nombre différent , de sorte que les intervalles qui les séparent diffèrent en étendue d'un cercle à l'autre. Faisons tourner successivement ces deux cercles avec la vitesse précise que chacun d'eux exige pour produire une teinte uniforme , et rappelons-nous qu'alors la durée du passage d'un intervalle est le temps pendant lequel l'impression se maintient sans perte sensible. Comme les intervalles sont plus grands dans le cercle A que dans le cercle B , la vitesse du premier devra nécessairement l'emporter sur celle de l'autre , afin que la rapidité du passage des intervalles compense leur étendue ; c'est ce que l'expérience confirme. Mais si le cercle A se meut plus vite que le cercle B , les secteurs blancs du premier produiront dans l'œil une impression moins parfaite , et par conséquent plus faible , que ceux du second ; c'est ce que l'expérience confirme encore en nous montrant que la teinte uniforme du cercle A est plus sombre que celle du cercle B. On voit que par ce moyen simple nous nous sommes procuré deux impressions de même nature , c'est-à-dire dues à la même couleur , mais inégales en intensité , et dont nous pouvons comparer les vitesses de décroissement. Si nous trouvons ces vitesses inégales et telles que la plus petite corresponde à l'impression la plus faible , il faudra nécessairement en conclure qu'une même impression décroît plus ou moins rapidement selon qu'elle est plus ou moins énergique , et que

que le blanc produit une impression plus intense que le jaune , il est extrêmement probable que des expériences plus nombreuses nous auraient donné une légère différence entre leurs durées.

par conséquent lorsqu'une impression s'efface, la marche du décroissement se ralentit à mesure que l'impression approche de sa fin, ce qu'il fallait démontrer.

Or pour comparer les vitesses de décroissement, il n'y a qu'à chercher, pour chacun de nos cercles, le temps pendant lequel l'impression a subsisté sans perte sensible, c'est-à-dire la durée du passage d'un intervalle. (Le calcul n'offre aucune difficulté, puisque l'on connaît la largeur des intervalles et la durée d'une révolution entière.) J'ai déterminé ce temps dans quelques cas et j'ai constamment trouvé qu'au cercle qui produisait l'impression la plus faible correspondait un temps plus long, c'est-à-dire une vitesse de décroissement moindre. Ainsi lorsque les intervalles du cercle A sont, comme dans la figure, quadruples de ceux du cercle B, le temps pendant lequel l'impression relative au premier se maintient sans perte sensible étant 1, le temps pendant lequel se maintient l'autre impression n'est que 0,76. Donc etc.

Voici une autre expérience dont le résultat est plus frappant encore : divisons deux cercles A et B (fig. 4) en secteurs blancs et noirs ; que ces secteurs soient en même nombre dans les deux cercles, mais donnons aux secteurs blancs du premier peu de largeur relativement aux intervalles qui les séparent, et faisons le contraire dans le second, de telle manière que les secteurs blancs du premier soient égaux aux intervalles noirs du second, et vice-versâ. Faisons les tourner successivement avec la vitesse précisément nécessaire à la production d'une teinte uniforme, et mesurons pour chacun d'eux la durée d'une révolution ; nous trouverons toujours ces deux durées égales entr'elles, quelle que soit la différence entre les largeurs des secteurs de l'un et de l'autre cercle.

Ce fait, me semble-t-il, fournit une preuve bien convaincante de la vérité de la loi trouvée pour le décroissement des impressions. En effet il résulte d'abord de l'égalité de vitesse des deux cercles, que les secteurs blancs de A, qui sont beaucoup moins larges que ceux de B, produiront une sensation beaucoup moins énergique, et c'est ce que prouve la teinte uniforme qui est beaucoup plus sombre pour ce cercle que pour l'autre : ainsi nous avons encore ici deux impressions de même nature, mais

d'intensité différente, et dont nous pouvons comparer les décroissements. Or de l'égalité de vitesse des cercles il résulte encore que les intervalles de A, qui sont très-larges relativement à ceux de B, mettront beaucoup plus de temps que ces derniers à passer devant l'œil; d'où la conséquence nécessaire que le temps pendant lequel l'impression relative au cercle A se maintient sans perte notable est beaucoup plus long que celui pendant lequel se maintient l'impression relative au cercle B, ou en d'autres termes, qu'une impression faible décroît plus lentement qu'une impression énergique; d'où enfin notre loi de décroissement.

En multipliant les expériences de ce genre, il est probable qu'on parviendrait à appliquer le calcul à la détermination précise de la loi suivant laquelle s'effacent les impressions, et peut-être arriverait-on ainsi à une nouvelle méthode bien plus rigoureuse que la première, de mesurer leur durée totale.

Probablement aussi cette loi s'étend aux impressions des autres sens, que tout nous porte à regarder comme douées également d'une durée appréciable: ainsi l'on admet qu'un son est une répétition de chocs successifs trop rapprochés pour que l'oreille puisse distinguer les intervalles qui les séparent; ce qui veut dire en d'autres termes que chacun de ces chocs produit sur l'organe une impression qui subsiste sans altération sensible jusqu'à la production du choc suivant; d'où il résulte évidemment que les impressions de l'ouïe survivent comme celles de la vue à la cause qui les a produites. Et si l'on considère que toute la différence des tons aigus et graves provient de la rapidité plus ou moins grande avec laquelle se succèdent les impressions partielles dont l'ensemble constitue le son, l'on en conclura que ces impressions doivent jouir, quant à leur durée, de propriétés particulières dont l'étude pourrait conduire à des résultats curieux. Mais revenons à notre sujet.

Pour compléter ce travail sur les propriétés des impressions de la vue considérées sous le rapport de leur durée, il faudrait encore déterminer le temps qu'exige une impression pour sa production entière; il faudrait aussi établir, par des expériences plus positives, que la durée totale d'une impression est d'autant plus grande que l'impression est plus énergique;

il faudrait enfin mesurer cette durée dans un plus grand nombre de cas : par exemple, en exposant les couleurs à la lumière du soleil, en opérant sur des corps lumineux par eux-mêmes, comme des charbons allumés, des flammes de diverses espèces, etc. Je n'ai pu jusqu'à présent me livrer à ces recherches.

Il me reste maintenant à parler des cas dans lesquels s'observent le plus fréquemment les effets de la durée des impressions produites par la lumière, et à indiquer quelques applications assez curieuses que l'on peut faire de cette propriété ; mais auparavant je ne crois pas inutile de rappeler en résumé quels sont les résultats auxquels conduisent les expériences dont j'ai donné le détail ; ces résultats sont les suivants :

1° *Une impression quelconque exige un temps appréciable pour se former complètement, de même que pour disparaître complètement.*

2° *Les impressions ne disparaissent pas brusquement, mais diminuent graduellement d'intensité.*

3° *Lorsqu'une impression s'efface, la marche de son décroissement est d'autant moins rapide que l'impression est plus près de sa fin.*

4° *Les différentes couleurs éclairées par la simple lumière du jour produisent des impressions qui diffèrent très-peu quant à leur durée totale. Sous ce rapport les couleurs paraissent devoir être rangées dans l'ordre suivant, en commençant par celle qui produit l'impression la plus durable : Blanc, Jaune, Rouge, Bleu.*

5° *Cette durée totale, comptée depuis l'instant où l'impression a acquis toute sa force jusqu'à celui où elle n'est plus qu'à peine sensible, est à peu près de 0'', 34, terme moyen.*

6° *Enfin il résulte accidentellement de mes expériences que les couleurs ci-dessus doivent être aussi rangées, relativement à l'intensité de leurs impressions, dans l'ordre : Blanc, Jaune, Rouge, Bleu en commençant par celle qui produit l'impression la plus énergique.*

Quoique la durée d'une impression soit très-petite, elle ne laisse pas que de donner lieu à une foule d'illusions auxquelles on fait généralement peu d'attention à cause de la fréquence même de leur production : ainsi les feux d'artifice doivent à cette durée une partie de leur effet ; les

météores ignés laissent ordinairement après eux une longue traînée lumineuse qui probablement est due à la même cause ; une corde qui vibre nous présente la forme d'un fuseau applati ; les roues des voitures qui se meuvent avec une grande rapidité semblent avoir perdu leurs rayons , et les objets placés de l'autre côté se voient comme à travers une gaze légère ; une tache sur la surface d'une toupie se change en un cercle lorsque celle-ci est en mouvement ; la chute de la pluie ou de la grêle présente l'aspect d'une série de droites parallèles et non de corps arrondis qui tombent , etc. , etc. Toutes les fois enfin que nous regardons des objets qui se meuvent rapidement , la durée des impressions modifie les apparences.

C'est de la durée des impressions que dépend l'effet d'un amusement imaginé par le docteur Paris et que l'on trouve décrit sous le nom de *Thaumatrope* dans le manuel de physique amusante de Mr. Julia-Fontenelle. Il consiste à dessiner deux objets différents des deux côtés d'un cercle de carton , de telle manière que si l'on fait tourner rapidement ce cercle autour d'un diamètre comme axe , le mélange des impressions laissées par les deux dessins en produise un troisième. Ainsi en dessinant un oiseau d'un côté et une cage de l'autre , l'oiseau sera vu dans la cage , etc.

Mr. Roget , dans un mémoire inséré dans les transactions philosophiques (année 1825 page 131), donne l'explication d'une illusion d'optique très-curieuse et qui doit aussi sa naissance à la durée des impressions. Voici ce dont il s'agit : lorsqu'on aperçoit à travers une série d'ouvertures verticales , par exemple celles d'une palissade , une roue de voiture roulant sur le sol avec une grande rapidité , on ne distingue plus les rayons en mouvement , mais on voit à leur place des courbes immobiles sur la surface de la roue. La forme de ces courbes est représentée fig. 5. Les conditions sont les plus favorables lorsque la roue est fortement éclairée , tandis que les barres de la palissade sont obscures.

Voici maintenant comment Mr. Roget explique ce phénomène : observons d'abord qu'on peut transporter le mouvement de translation horizontal à la palissade et supposer que la roue tourne autour d'un centre fixe : les résultats seront évidemment les mêmes ; cela posé , considérons , pour plus de simplicité , un seul rayon et une seule ouverture verticale : ces deux

lignes droites dont l'une tourne autour d'un centre fixe et dont l'autre s'avance parallèlement à elle-même se couperont en apparence suivant une série de points dont l'ensemble formera une courbe déterminée : or si le rayon est fortement éclairé et que l'ouverture soit percée dans une surface obscure, chacun de nos points d'intersection produira sur la rétine une image brillante, et la suite de ces images devra présenter l'aspect d'une courbe continue, parce que l'impression de la première subsistera encore lors de la production de la dernière, par la même raison qu'un charbon allumé semble laisser une trace lumineuse. La forme de la courbe dépendra des positions initiales du rayon et de l'ouverture, c'est pourquoi lorsqu'il y a plusieurs rayons et plusieurs ouvertures, il y a aussi plusieurs courbes formées en même temps, et l'on voit qu'en supposant les deux mouvements uniformes, toutes les fois que les rayons et les ouvertures reviennent aux mêmes positions relatives, les mêmes apparences doivent se reproduire : de là l'immobilité des courbes en question. Il est aisé de construire ces courbes géométriquement, et d'en chercher l'équation : c'est aussi ce que fait l'auteur que nous venons de citer.

Passons maintenant à une autre illusion du même genre, mais dont les effets sont beaucoup plus généraux et dont l'explication est différente. J'avais observé que si l'on faisait tourner rapidement une roue garnie de dents perpendiculaires à son plan, et que l'on plaçât l'œil à quelque distance dans le prolongement de ce plan, de manière que les dents d'une moitié de la roue fussent cachées par celles de l'autre moitié, on apercevait l'image d'une série de dents parfaitement immobiles ; que de même deux roues tournant l'une derrière l'autre autour du même axe, avec des vitesses considérables et en sens contraire, produisaient dans l'œil l'apparence d'une roue dont les rayons étaient immobiles ; que de plus lorsque les roues se mouvaient autour de deux axes différents, l'image fixe se composait de courbes. J'avais fait peu d'attention à ces effets singuliers ; mais après avoir lu le mémoire de Mr. Roget, frappé de l'analogie du phénomène qu'il décrit avec ceux que j'avais observés, je résolus d'examiner ces derniers plus attentivement, et j'arrivai au résultat suivant :

Si l'on suppose deux courbes brillantes situées dans des plans parallèles ;

que chacune d'elles tourne avec une vitesse considérable mais uniforme autour d'un axe perpendiculaire à son plan ; enfin que la vitesse de l'une soit un multiple exact de celle de l'autre , l'œil placé devant le système distinguera , au milieu de l'espace de gaze produite par le mouvement des deux lignes , l'image immobile d'une troisième courbe plus sombre que le fond sur lequel elle se dessine.

Ce spectre curviligne est le lieu des points d'intersection apparents des courbes en mouvement.

Les courbes mobiles peuvent , par exemple , être découpées dans du papier blanc épais , et tout le système être placé devant un carton noirci.

Ce phénomène nous permet donc d'offrir à l'œil , d'une façon toute nouvelle , les courbes les plus variées ; en voici l'explication : soient AB et $A'B'$ (fig. 6) deux positions successives de la première ligne , CD et $C'D'$ deux positions successives de la seconde , de sorte que les deux courbes partant ensemble des deux premières positions , arrivent ensemble aux deux secondes ; soit enfin mnr la ligne des points d'intersection apparents des deux courbes dans ce trajet.

Les deux courbes brillantes s'étant croisées sur tout le cours de la ligne mnr , chacun des points de cette ligne n'a pu envoyer à l'œil que l'impression provenant de la courbe la plus rapprochée du spectateur , tandis que tous les autres points du quadrilatère curviligne $mpnq$, ne recevant que successivement chacune des lignes mobiles , envoient à l'œil deux impressions successives : la ligne mnr doit donc paraître moins brillante que le reste du quadrilatère , et il doit en être de même pour toute la suite des points d'intersection ; maintenant puisque la vitesse de l'une des courbes est un multiple de celle de l'autre , après une révolution de la courbe qui a la moindre vitesse , elles seront revenues toutes deux à leurs positions initiales et le même phénomène se répétera : il doit donc en résulter une image fixe qui subsiste tant que dure le mouvement des deux courbes. On conçoit d'ailleurs que la vitesse doit être assez considérable pour que l'œil ne puisse distinguer les lignes en mouvement.

Il résulte de l'explication précédente que le phénomène se produirait encore si la courbe de devant , au lieu d'être brillante , était noire : car

alors, pour tous les points de la ligne d'intersection, cette courbe noire intercepterait la lumière venant de la courbe brillante, tandis que tous les autres points enverraient à l'œil l'impression produite par cette dernière : ceci est parfaitement d'accord avec l'expérience ; les courbes fixes sont même plus distinctes par ce moyen que par le premier.

La courbe de devant peut encore être une fente percée dans une surface noire, la courbe de derrière étant brillante ; dans ce cas l'image fixe paraît plus claire que le fond sur lequel elle est tracée, et le phénomène doit s'expliquer comme celui que décrit Mr. Roget.

Lorsque la vitesse de l'une des courbes n'est pas un multiple de celle de l'autre, les deux lignes ne se retrouvent plus dans les mêmes positions après une révolution de la plus lente, de sorte qu'il se produit une nouvelle courbe à chacune de ces révolutions, et que l'œil, au lieu d'apercevoir l'image d'une ligne fixe, ne peut voir qu'une succession rapide de lignes différentes ; cependant si la plus grande vitesse ne diffère que très-peu d'un multiple de la plus petite, la différence entre deux images consécutives sera très-peu considérable, de sorte que l'œil ne pourra les distinguer l'une de l'autre et que le spectre produit paraîtra changer peu à peu de forme pour passer par tous les cas différents qui peuvent résulter de la différence des positions initiales. Ce n'est pas une des particularités les moins curieuses du phénomène que de nous faire pour ainsi dire assister à ces passages entre des courbes qui n'offrent souvent aucune ressemblance, passages que l'on peut ralentir à son gré, si l'instrument dont on se sert permet de faire varier par différences très-petites le rapport des vitesses (1).

Lorsqu'on connaît les deux courbes mobiles, le rapport des vitesses, le sens de chacune d'elles, la distance apparente des centres de mouvement et les positions initiales, la courbe fixe est complètement déterminée, et il est aisé d'en chercher l'équation ; je ne donnerai pas ici la marche à suivre

(1) C'est ce qu'on obtient aisément, en imprimant le mouvement aux deux courbes au moyen de poulies, parce qu'alors, en faisant varier la tension des cordons, leur diamètre varie aussi d'une petite quantité, et le rapport des vitesses peut ainsi être augmenté ou diminué aussi peu que l'on veut.

pour y parvenir, ce serait m'écarter de mon sujet ; j'indiquerai seulement comme exemples, quelques courbes connues que l'on produit par le mouvement de deux droites qui passent par leurs centres de rotation :

1° Les vitesses étant dans le même sens et dans le rapport de 1 à 2, la courbe fixe est une focale qui a son sommet au centre du mouvement le plus rapide, et son point multiple à l'autre centre de rotation. Cette focale devient un cercle traversé par une ligne droite, lorsque, dans leurs positions initiales, les deux droites mobiles se sont superposées.

2° Les vitesses étant égales et dans le même sens, la courbe fixe est un cercle passant par les deux centres de rotation.

3° Les vitesses étant égales et en sens contraires, l'image fixe est une hyperbole passant aussi par les deux centres de mouvement.

On peut se donner l'image fixe et l'une des courbes mobiles ; dans ce cas une construction géométrique très-simple fera connaître l'autre ; or rien n'empêche de prendre pour image fixe une figure quelconque : une tête, un homme, un mot, etc. : alors la construction dont nous venons de parler produira une figure difforme qui, venant à tourner en même temps que la ligne mobile que l'on s'était donnée, fera naître une image parfaitement régulière.

Voilà donc une espèce toute nouvelle d'anamorphoses ; pour qu'elles réussissent complètement, il faut que la figure difforme soit noire et tourne devant une ligne blanche ; ou qu'elle soit blanche et tourne derrière une fente percée dans une surface noire ; dans le premier cas l'image régulière est noire sur un fond blanchâtre ; dans le second elle est blanchâtre sur un fond noir.

Ici se termine la partie de mon travail relative à la durée des impressions. Il me reste à examiner ces dernières sous le double point de vue de leur énergie et de l'action qu'elles exercent les unes sur les autres.

Pour comparer les sensations des différentes couleurs sous le rapport de leur énergie, voici comme je raisonnai : si je divise un cercle en secteurs de deux couleurs différentes, par exemple bleus et rouges, et que je lui imprime un mouvement de rotation suffisamment rapide pour qu'il en résulte l'apparence d'une teinte uniforme, cette teinte participera des deux couleurs employées et tendra d'autant plus vers l'une d'entr'elles que l'impression de celle-ci sera plus énergique et que les secteurs peints de cette couleur seront plus larges relativement aux autres : si donc je fais varier le rapport de largeur des secteurs jusqu'à ce que j'obtienne une teinte uniforme qui ne tienne pas plus de l'une des deux couleurs que de l'autre, il est évident qu'alors les secteurs les moins larges correspondront à la couleur qui produit la sensation la plus énergique. Ainsi, par exemple, que les deux couleurs employées soient le bleu et le rouge; donnons aux secteurs peints de chacune d'elles des largeurs telles que la teinte résultante soit le violet le plus pur possible; si, pour parvenir à ce résultat, nous avons été obligés de donner aux secteurs bleus plus de largeur qu'aux rouges, la raison en est évidemment que le bleu, pour agir sur l'œil autant que le rouge dans la sensation violette résultante, doit compenser sa moindre énergie par le temps plus grand qu'il met à passer devant l'œil.

Il semble d'abord que pour obtenir les rapports de largeur entre les secteurs de deux couleurs données, il suffit de se servir de la méthode imaginée par Newton pour déterminer la teinte provenant du mélange des couleurs du prisme dans des proportions données (Opt. liv. 1, part. 2, prop. 6.) Mais outre que Newton dit lui-même qu'il ne la regarde pas comme mathématiquement exacte, il est aisé de se convaincre qu'en l'appliquant à deux couleurs seulement elle conduit à des résultats qui s'éloignent beaucoup de la vérité. J'ai donc eu recours à l'expérience; mais avant d'exposer les résultats, je ferai les deux observations suivantes :

1^o Ces résultats ne doivent pas être considérés comme donnant les rapports d'énergie entre les impressions; tout ce qu'ils peuvent nous apprendre, c'est que telle couleur produit une impression plus énergique que telle autre.

2^o Le degré d'intensité des couleurs a, dans ce cas, une très-grande influence; de sorte que si quelqu'un répète ces expériences, il n'obtiendra

les mêmes rapports de largeur qu'en employant des couleurs exactement aussi foncées que les miennes. Je me suis du reste servi de couleurs très-intenses, comme dans mes expériences sur la durée des sensations, afin que la différence fut mieux marquée entre les effets des différentes couleurs.

Voici maintenant mes résultats :

1° Un cercle divisé en secteurs bleus et jaunes m'a donné une teinte uniforme qui ne tendait ni vers l'une ni vers l'autre des deux couleurs, lorsque la largeur des secteurs bleus était à peu près quadruple de celle des jaunes.

2° J'ai obtenu un violet magnifique en employant le bleu et le rouge dans un rapport peu différent du précédent, c'est-à-dire le bleu étant à peu près quadruple du rouge.

3° Enfin le rouge et le jaune dans le rapport approché de cinq à trois m'ont donné un orangé qui paraissait exactement intermédiaire.

Ces résultats établissent, comme on le voit, d'une manière bien probable, d'abord que l'impression bleue est moins énergique que la jaune et la rouge; ensuite que la rouge l'est moins que la jaune; et comme il est d'ailleurs évident que le blanc produit une impression plus intense que toutes les autres couleurs, il s'ensuit que l'ordre dans lequel doivent être rangées les couleurs principales quant à l'énergie de leurs impressions, est le suivant :

Blanc, Jaune, Rouge, Bleu;

ordre qui coïncide avec celui que nous avons déjà déduit d'autres considérations (pag. 17, 6^e résultat.)

La place qu'occupe ici le rouge ne s'accorde pas avec l'opinion généralement reçue qu'il est la couleur la plus fatigante pour les yeux; mais il me suffira, je pense, de faire observer qu'on ne doit pas nécessairement regarder la fatigue de l'organe comme ne dépendant que du degré d'intensité de la sensation: les sons les plus forts ne sont pas toujours ceux qui fatiguent le plus l'oreille.

Cet ordre dans lequel les couleurs viennent de se ranger est positivement indiqué par Newton (Opt. liv. 1, part. 1, prop. 7); il ne cite aucune expérience, mais il jugeait sans doute de l'intensité d'action des couleurs d'après l'aspect du spectre solaire. On voit, et de nouvelles preuves vont se présenter encore, que son opinion est parfaitement confirmée par l'expérience.

il faudrait enfin mesurer cette durée dans un plus grand nombre de cas : par exemple, en exposant les couleurs à la lumière du soleil, en opérant sur des corps lumineux par eux-mêmes, comme des charbons allumés, des flammes de diverses espèces, etc. Je n'ai pu jusqu'à présent me livrer à ces recherches.

Il me reste maintenant à parler des cas dans lesquels s'observent le plus fréquemment les effets de la durée des impressions produites par la lumière, et à indiquer quelques applications assez curieuses que l'on peut faire de cette propriété ; mais auparavant je ne crois pas inutile de rappeler en résumé quels sont les résultats auxquels conduisent les expériences dont j'ai donné le détail ; ces résultats sont les suivants :

1° *Une impression quelconque exige un temps appréciable pour se former complètement, de même que pour disparaître complètement.*

2° *Les impressions ne disparaissent pas brusquement, mais diminuent graduellement d'intensité.*

3° *Lorsqu'une impression s'efface, la marche de son décroissement est d'autant moins rapide que l'impression est plus près de sa fin.*

4° *Les différentes couleurs éclairées par la simple lumière du jour produisent des impressions qui diffèrent très-peu quant à leur durée totale. Sous ce rapport les couleurs paraissent devoir être rangées dans l'ordre suivant, en commençant par celle qui produit l'impression la plus durable :*

Blanc, Jaune, Rouge, Bleu.

5° *Cette durée totale, comptée depuis l'instant où l'impression a acquis toute sa force jusqu'à celui où elle n'est plus qu'à peine sensible, est à peu près de 0', 34, terme moyen.*

6° *Enfin il résulte accidentellement de mes expériences que les couleurs ci-dessus doivent être aussi rangées, relativement à l'intensité de leurs impressions, dans l'ordre : Blanc, Jaune, Rouge, Bleu en commençant par celle qui produit l'impression la plus énergique.*

Quoique la durée d'une impression soit très-petite, elle ne laisse pas que de donner lieu à une foule d'illusions auxquelles on fait généralement peu d'attention à cause de la fréquence même de leur production : ainsi les feux d'artifice doivent à cette durée une partie de leur effet ; les

que chacune d'elles tourne avec une vitesse considérable mais uniforme autour d'un axe perpendiculaire à son plan ; enfin que la vitesse de l'une soit un multiple exact de celle de l'autre , l'œil placé devant le système distinguera , au milieu de l'espèce de gaze produite par le mouvement des deux lignes , l'image immobile d'une troisième courbe plus sombre que le fond sur lequel elle se dessine.

Ce spectre curviligne est le lieu des points d'intersection apparents des courbes en mouvement.

Les courbes mobiles peuvent , par exemple , être découpées dans du papier blanc épais , et tout le système être placé devant un carton noirci.

Ce phénomène nous permet donc d'offrir à l'œil , d'une façon toute nouvelle , les courbes les plus variées ; en voici l'explication : soient AB et $A'B'$ (fig. 6) deux positions successives de la première ligne , CD et $C'D'$ deux positions successives de la seconde , de sorte que les deux courbes partant ensemble des deux premières positions , arrivent ensemble aux deux secondes ; soit enfin mn la ligne des points d'intersection apparents des deux courbes dans ce trajet.

Les deux courbes brillantes s'étant croisées sur tout le cours de la ligne mn , chacun des points de cette ligne n'a pu envoyer à l'œil que l'impression provenant de la courbe la plus rapprochée du spectateur , tandis que tous les autres points du quadrilatère curviligne $mpnq$, ne recevant que successivement chacune des lignes mobiles , envoient à l'œil deux impressions successives : la ligne mn doit donc paraître moins brillante que le reste du quadrilatère , et il doit en être de même pour toute la suite des points d'intersection ; maintenant puisque la vitesse de l'une des courbes est un multiple de celle de l'autre , après une révolution de la courbe qui a la moindre vitesse , elles seront revenues toutes deux à leurs positions initiales et le même phénomène se répétera : il doit donc en résulter une image fixe qui subsiste tant que dure le mouvement des deux courbes. On conçoit d'ailleurs que la vitesse doit être assez considérable pour que l'œil ne puisse distinguer les lignes en mouvement.

Il résulte de l'explication précédente que le phénomène se produirait encore si la courbe de devant , au lieu d'être brillante , était noire : car

alors , pour tous les points de la ligne d'intersection , cette courbe noire intercepterait la lumière venant de la courbe brillante , tandis que tous les autres points enverraient à l'œil l'impression produite par cette dernière : ceci est parfaitement d'accord avec l'expérience ; les courbes fixes sont même plus distinctes par ce moyen que par le premier.

La courbe de devant peut encore être une fente percée dans une surface noire , la courbe de derrière étant brillante ; dans ce cas l'image fixe paraît plus claire que le fond sur lequel elle est tracée , et le phénomène doit s'expliquer comme celui que décrit Mr. Roget.

Lorsque la vitesse de l'une des courbes n'est pas un multiple de celle de l'autre , les deux lignes ne se retrouvent plus dans les mêmes positions après une révolution de la plus lente , de sorte qu'il se produit une nouvelle courbe à chacune de ces révolutions , et que l'œil , au lieu d'apercevoir l'image d'une ligne fixe , ne peut voir qu'une succession rapide de lignes différentes ; cependant si la plus grande vitesse ne diffère que très-peu d'un multiple de la plus petite , la différence entre deux images consécutives sera très-peu considérable , de sorte que l'œil ne pourra les distinguer l'une de l'autre et que le spectre produit paraîtra changer peu à peu de forme pour passer par tous les cas différents qui peuvent résulter de la différence des positions initiales. Ce n'est pas une des particularités les moins curieuses du phénomène que de nous faire pour ainsi dire assister à ces passages entre des courbes qui n'offrent souvent aucune ressemblance, passages que l'on peut ralentir à son gré , si l'instrument dont on se sert permet de faire varier par différences très-petites le rapport des vitesses (1).

Lorsqu'on connaît les deux courbes mobiles , le rapport des vitesses , le sens de chacune d'elles , la distance apparente des centres de mouvement et les positions initiales , la courbe fixe est complètement déterminée , et il est aisé d'en chercher l'équation ; je ne donnerai pas ici la marche à suivre

(1) C'est ce qu'on obtient aisément , en imprimant le mouvement aux deux courbes au moyen de poulies , parce qu'alors , en faisant varier la tension des cordons , leur diamètre varie aussi d'une petite quantité , et le rapport des vitesses peut ainsi être augmenté ou diminué aussi peu que l'on veut.

pour y parvenir, ce serait m'écarter de mon sujet ; j'indiquerai seulement comme exemples, quelques courbes connues que l'on produit par le mouvement de deux droites qui passent par leurs centres de rotation :

1° Les vitesses étant dans le même sens et dans le rapport de 1 à 2, la courbe fixe est une focale qui a son sommet au centre du mouvement le plus rapide, et son point multiple à l'autre centre de rotation. Cette focale devient un cercle traversé par une ligne droite, lorsque, dans leurs positions initiales, les deux droites mobiles se sont superposées.

2° Les vitesses étant égales et dans le même sens, la courbe fixe est un cercle passant par les deux centres de rotation.

3° Les vitesses étant égales et en sens contraires, l'image fixe est une hyperbole passant aussi par les deux centres de mouvement.

On peut se donner l'image fixe et l'une des courbes mobiles ; dans ce cas une construction géométrique très-simple fera connaître l'autre ; or rien n'empêche de prendre pour image fixe une figure quelconque : une tête, un homme, un mot, etc. : alors la construction dont nous venons de parler produira une figure difforme qui, venant à tourner en même temps que la ligne mobile que l'on s'était donnée, fera naître une image parfaitement régulière.

Voilà donc une espèce toute nouvelle d'anamorphoses ; pour qu'elles réussissent complètement, il faut que la figure difforme soit noire et tourne devant une ligne blanche, ou qu'elle soit blanche et tourne derrière une fente percée dans une surface noire ; dans le premier cas l'image régulière est noire sur un fond blanchâtre ; dans le second elle est blanchâtre sur un fond noir.

Ici se termine la partie de mon travail relative à la durée des impressions. Il me reste à examiner ces dernières sous le double point de vue de leur énergie et de l'action qu'elles exercent les unes sur les autres.

Pour comparer les sensations des différentes couleurs sous le rapport de leur énergie, voici comme je raisonnai : si je divise un cercle en secteurs de deux couleurs différentes, par exemple bleus et rouges, et que je lui imprime un mouvement de rotation suffisamment rapide pour qu'il en résulte l'apparence d'une teinte uniforme, cette teinte participera des deux couleurs employées et tendra d'autant plus vers l'une d'entr'elles que l'impression de celle-ci sera plus énergique et que les secteurs peints de cette couleur seront plus larges relativement aux autres : si donc je fais varier le rapport de largeur des secteurs jusqu'à ce que j'obtienne une teinte uniforme qui ne tienne pas plus de l'une des deux couleurs que de l'autre, il est évident qu'alors les secteurs les moins larges correspondront à la couleur qui produit la sensation la plus énergique. Ainsi, par exemple, que les deux couleurs employées soient le bleu et le rouge; donnons aux secteurs peints de chacune d'elles des largeurs telles que la teinte résultante soit le violet le plus pur possible; si, pour parvenir à ce résultat, nous avons été obligés de donner aux secteurs bleus plus de largeur qu'aux rouges, la raison en est évidemment que le bleu, pour agir sur l'œil autant que le rouge dans la sensation violette résultante, doit compenser sa moindre énergie par le temps plus grand qu'il met à passer devant l'œil.

Il semble d'abord que pour obtenir les rapports de largeur entre les secteurs de deux couleurs données, il suffit de se servir de la méthode imaginée par Newton pour déterminer la teinte provenant du mélange des couleurs du prisme dans des proportions données (Opt. liv. 1, part. 2, prop. 6.) Mais outre que Newton dit lui-même qu'il ne la regarde pas comme mathématiquement exacte, il est aisé de se convaincre qu'en l'appliquant à deux couleurs seulement elle conduit à des résultats qui s'éloignent beaucoup de la vérité. J'ai donc eu recours à l'expérience; mais avant d'exposer les résultats, je ferai les deux observations suivantes :

1° Ces résultats ne doivent pas être considérés comme donnant les rapports d'énergie entre les impressions; tout ce qu'ils peuvent nous apprendre, c'est que telle couleur produit une impression plus énergique que telle autre.

2° Le degré d'intensité des couleurs a, dans ce cas, une très-grande influence; de sorte que si quelqu'un répète ces expériences, il n'obtiendra

les mêmes rapports de largeur qu'en employant des couleurs exactement aussi foncées que les miennes. Je me suis du reste servi de couleurs très-intenses, comme dans mes expériences sur la durée des sensations, afin que la différence fut mieux marquée entre les effets des différentes couleurs.

Voici maintenant mes résultats :

1° Un cercle divisé en secteurs bleus et jaunes m'a donné une teinte uniforme qui ne tendait ni vers l'une ni vers l'autre des deux couleurs, lorsque la largeur des secteurs bleus était à peu près quadruple de celle des jaunes.

2° J'ai obtenu un violet magnifique en employant le bleu et le rouge dans un rapport peu différent du précédent, c'est-à-dire le bleu étant à peu près quadruple du rouge.

3° Enfin le rouge et le jaune dans le rapport approché de cinq à trois m'ont donné un orangé qui paraissait exactement intermédiaire.

Ces résultats établissent, comme on le voit, d'une manière bien probable, d'abord que l'impression bleue est moins énergique que la jaune et la rouge; ensuite que la rouge l'est moins que la jaune; et comme il est d'ailleurs évident que le blanc produit une impression plus intense que toutes les autres couleurs, il s'ensuit que l'ordre dans lequel doivent être rangées les couleurs principales quant à l'énergie de leurs impressions, est le suivant :

Blanc , Jaune , Rouge , Bleu ;

ordre qui coïncide avec celui que nous avons déjà déduit d'autres considérations (pag. 17 , 6^e résultat.)

La place qu'occupe ici le rouge ne s'accorde pas avec l'opinion généralement reçue qu'il est la couleur la plus fatigante pour les yeux ; mais il me suffira, je pense, de faire observer qu'on ne doit pas nécessairement regarder la fatigue de l'organe comme ne dépendant que du degré d'intensité de la sensation : les sons les plus forts ne sont pas toujours ceux qui fatiguent le plus l'oreille.

Cet ordre dans lequel les couleurs viennent de se ranger est positivement indiqué par Newton (Opt. liv. 1 , part. 1 , prop. 7) ; il ne cite aucune expérience, mais il jugeait sans doute de l'intensité d'action des couleurs d'après l'aspect du spectre solaire. On voit, et de nouvelles preuves vont se présenter encore, que son opinion est parfaitement confirmée par l'expérience.

Buffon, dans son mémoire sur les couleurs accidentelles (Mém. de l'acad. des sc. 1743), dit que l'image bleuâtre produite dans ses yeux par le jaune lui semblait s'effacer plus difficilement que l'image verte produite par le rouge; *ce qui, ajoute-t-il, semble prouver ce qu'a soupçonné Newton, que le jaune est de toutes les couleurs celle qui fatigue le plus nos yeux.* Il observe ensuite que la couleur accidentelle provenant du bleu ne subsistait pas à beaucoup près aussi long-temps que les deux précédentes.

Enfin j'ai fait d'autres expériences qui, indépendamment de ce qu'elles confirment les résultats précédents, ne me semblent pas dépourvues d'un intérêt propre, et pourraient peut-être recevoir d'autres applications: j'ai cherché sous quel angle visuel chacune des quatre couleurs blanc, jaune, rouge, bleu cesse d'être visible pour mon œil. A cet effet, j'ai pris de petits cercles de papier d'un centimètre de diamètre et peints chacun de l'une des couleurs ci-dessus. J'attachais l'un de ces cercles sur une surface noire placée verticalement dans une plaine et je m'en éloignais lentement jusqu'à ce que l'objet coloré ne me parut plus que comme un petit nuage à peine perceptible et qui s'évanouissait complètement pour quelques pas de plus; je marquais l'endroit où je m'étais arrêté, et mesurant ensuite la distance de ce point à celui où se trouvait l'objet, le calcul me donnait l'angle compris entre les deux rayons visuels qui, partant de mon œil, aboutissaient aux deux extrémités d'un diamètre du petit cercle.

Je n'ai pas besoin de faire observer que si telle couleur est visible sous un angle visuel plus petit que telle autre, ou, ce qui est la même chose, si un objet peint de la première est visible à une plus grande distance qu'un objet égal peint de la seconde, on peut l'attribuer à ce que la rétine est affectée d'une manière plus énergique par la première que par la seconde. Remarquons en passant que ces expériences offrent l'avantage de nous permettre de comparer le blanc aux autres couleurs. Elles ont été faites successivement à l'ombre et au soleil; en voici les résultats dans les deux cas:

| | A L'OMBRE. | AU SOLEIL. |
|-------------|------------|------------|
| Blanc . . . | 18'' . . . | 12'' |
| Jaune . . . | 19'' . . . | 13'' |
| Rouge . . . | 31'' . . . | 23'' |
| Bleu . . . | 42'' . . . | 26'' |

On voit que les couleurs suivent encore ici l'ordre déjà trouvé : le blanc se voit sous l'angle visuel le plus petit, c'est-à-dire qu'il agit le plus puissamment sur la rétine ; puis vient le jaune, puis le rouge et enfin le bleu. On voit aussi, comme on devait s'y attendre, que les angles visuels sont plus petits au soleil qu'à l'ombre : les premiers sont à peu près les deux tiers des seconds.

Les résultats que je viens d'exposer, joints à toutes les autres preuves rapportées précédemment, établissent d'une manière qui me paraît incontestable l'ordre des quatre couleurs principales quant à l'intensité de leur action sur la rétine ; je regrette seulement de n'avoir pu jusqu'à présent soumettre aux mêmes épreuves les autres couleurs du spectre solaire.

Passons maintenant à l'action mutuelle des impressions. On sait que Newton est parvenu à produire du blanc en faisant se succéder avec une grande rapidité sur la rétine les impressions des différentes couleurs fournies par un prisme ; (Opt. liv. 1, part. 2, prop. 5) on sait encore que l'on produit un blanc très-imparfait, c'est-à-dire un gris plus ou moins foncé, en partageant un cercle en secteurs peints des sept couleurs du spectre solaire dans certaines proportions, et en lui donnant un mouvement de rotation assez rapide pour qu'il en résulte une teinte uniforme.

A ces faits connus j'ajouterai ici une série d'observations que j'ai faites à l'occasion de mes expériences sur l'énergie relative des impressions, et qui ne me semblent pas entièrement dénuées d'intérêt : on verra que l'action réciproque des impressions produit quelquefois des effets assez singuliers et tout différents de ceux qu'on paraissait devoir en attendre.

Si l'on fait tourner un cercle divisé en secteurs de deux couleurs différentes avec une vitesse trop petite pour produire une teinte uniforme, on apercevra bientôt, au milieu de la confusion résultant de la succession des impressions, des couleurs très-vives différentes de celles qui existent sur

le cercle et de leur mélange : ainsi , quand les couleurs en mouvement seront le jaune et le bleu , on distinguera des nuances très-prononcées de blanc brillant et d'orangé ; si les couleurs sont le jaune et le rouge , les nuances étrangères seront d'un très-beau vert. Pour que ces expériences réussissent complètement , il faut plusieurs conditions : la vitesse n'est pas indifférente ; on obtiendra celle qui convient le mieux en la rendant d'abord très-petite et en l'augmentant graduellement ; l'œil de l'observateur doit être fixé sur le centre du cercle ; enfin les deux couleurs doivent être plus ou moins foncées , suivant la teinte étrangère que l'on veut produire : ainsi pour que le bleu et le jaune donnent un beau blanc , le bleu doit être très-intense , et de plus il doit occuper beaucoup d'espace relativement au jaune : les secteurs bleus doivent être cinq à six fois plus larges que les jaunes. Pour que les mêmes couleurs produisent un bel orangé , il faut que le jaune soit intense et le bleu assez pâle. Le jaune et le rouge ne donnent une belle teinte verte que lorsqu'ils sont tous deux intenses , etc. Ce qu'il y a de plus singulier dans ces phénomènes , c'est la production du blanc : car ce blanc ne ressemble aucunement à la couleur sombre que l'on obtient par le mouvement rapide d'un cercle portant les sept couleurs primitives ; il est au contraire très-vif.

Pour faire naître les phénomènes précédents , nous n'avons donné à nos cercles que peu de vitesse ; faisons-les maintenant tourner assez rapidement pour qu'ils offrent une teinte uniforme. Alors se présente un autre fait : c'est que la combinaison des impressions de deux couleurs différentes , opérée par ce moyen , est loin de produire toujours la même teinte que le mélange matériel des deux couleurs employées. Faites un mélange en proportion convenable de gomme gutte et de bleu de Prusse et peignez-en un papier blanc , vous aurez un beau vert ; mais partagez un cercle en secteurs dont les uns soient peints de cette même gomme gutte et les autres de ce même bleu de Prusse , en ayant soin de donner beaucoup d'intensité aux deux couleurs et de faire en sorte que les secteurs aient un rapport de largeur tel que ni le jaune ni le bleu ne domine dans la teinte résultante ; lorsque ce cercle tournera avec rapidité , la teinte uniforme produite sera parfaitement grise , sans la moindre apparence verdâtre. Ce n'est qu'en

employant un bleu pâle qu'on parvient à donner à ce gris une légère nuance de vert, et c'est sans doute d'un tel bleu que s'est servi d'Arcy, qui a cherché quel serait le résultat du mouvement de rotation d'un cercle qui porterait du jaune et du bleu : car il dit avoir obtenu du vert. La combinaison des impressions jaunes et rouges, ou des impressions rouges et bleues ne présente pas d'effets analogues, c'est-à-dire qu'elle donne sensiblement la même teinte que le mélange matériel des deux couleurs : ainsi dans le premier cas on obtient de l'orangé, et dans le second du violet ; ce dernier est même plus éclatant que celui que présente un papier peint du mélange des mêmes rouge et bleu.

En cherchant à découvrir quelle pouvait être l'influence du degré de foncé des couleurs sur l'énergie de leurs impressions, j'ai été conduit à observer un troisième fait : c'est qu'il existe pour la plupart des couleurs une certaine teinte placée entre les teintes foncées et les teintes très-pâles, laquelle exerce, dans le mélange des impressions, le maximum d'influence. Ainsi supposons que l'on ait divisé un cercle en secteurs rouges et bleus, comme l'indique la fig. 7 : c'est-à-dire en donnant aux secteurs rouges une teinte uniforme et en graduant au contraire les teintes bleues, à partir d'une teinte très-pâle vers le centre, jusqu'à une teinte très-foncée vers la circonférence (1). Lorsque ce cercle tournera avec une suffisante rapidité, l'œil ne percevra plus que des bandes violettes concentriques ; mais en partant du centre, on verra l'influence du bleu devenir de plus en plus grande jusqu'à une certaine bande après laquelle elle ira en décroissant jusqu'à la circonférence : de sorte que si cette bande intermédiaire est d'un violet pur, toutes les autres, en allant soit vers le centre soit vers la circonférence, présenteront un violet tirant de plus en plus sur le rouge : la teinte bleue correspondant à cette bande intermédiaire produit donc une impression qui, en se combinant avec une impression rouge, a plus d'influence que les teintes plus pâles ou plus intenses ; ce qu'il y a de singu-

(1) Les lignes qui traversent les secteurs bleus dans la figure citée, séparent les diverses nuances de bleu indiquées par les lettres *a*, *b*, *c*, *d*, *f*, *g*, la teinte *a* étant très-pâle, et la teinte *g* très-foncée.

lier, c'est que ce bleu lui-même est pâle : c'est celui du ciel dans ses parties les plus colorées.

Le rouge nous offre un phénomène tout à fait semblable, et sa teinte *maximum* est proportionnellement aussi pâle que celle du bleu. Le jaune paraît faire exception : il agit d'autant plus sur les autres impressions qu'il est plus intense.

Je n'ai soumis à ces expériences que le jaune, le rouge et le bleu ; mais il est probable que les autres couleurs, qui toutes peuvent être formées par le mélange de ces dernières, nous donneraient des résultats analogues : ainsi je pense que le vert aurait une teinte *maximum*, parce qu'on peut le composer avec du jaune et du bleu et que le bleu possède une semblable teinte.

Lorsqu'une couleur a atteint sa teinte *maximum* à l'égard d'une autre, cette teinte conserve son maximum d'influence, quelque soit le degré de foncé de la seconde couleur ; c'est du moins ce que m'a montré le petit nombre d'expériences que j'ai tentées à ce sujet : ainsi la teinte bleue qui jouit du maximum à l'égard d'un certain rouge le conservera à l'égard de toutes les autres teintes rouges plus foncées ou plus pâles que ce dernier. Ce fait peut aisément se constater en peignant, pour chaque couple de couleurs, plusieurs cercles semblables à celui de la fig. 7, mais tels que les secteurs qui reçoivent une teinte uniforme, comme les rouges dans la figure citée, diffèrent d'un cercle à l'autre par l'intensité de leur couleur, tandis que les secteurs gradués demeurent exactement les mêmes dans les différents cercles ; on verra en les mettant en mouvement que la bande qui correspond au maximum occupera la même place sur chacun d'eux.

Enfin il resterait à examiner si la teinte maximum d'une couleur à l'égard d'une autre est la même quelle que soit cette autre : par exemple, si la teinte rouge qui possède le maximum relativement au bleu, le possède aussi relativement au jaune, au vert, etc. Je puis affirmer que le bleu jouit de cette propriété à l'égard du rouge et du jaune.

En terminant ici l'exposé de mes observations sur l'intensité et l'action réciproque des impressions, je crois avantageux de rappeler en résumé,

comme à la suite des expériences relatives à leur durée, à quels résultats ces observations conduisent.

1° *Des preuves nouvelles confirment le 6^e résultat rappelé page 17, savoir que, sous le rapport de l'énergie de leurs impressions, les couleurs doivent être rangées dans l'ordre suivant, en commençant par celle qui a le plus d'action :*

Blanc, Jaune, Rouge, Bleu.

2° *Les angles visuels sous lesquels mon œil cesse d'apercevoir ces différentes couleurs, sont les suivants :*

| | A L'OMBRE. | AU SOLEIL. |
|---------------|------------|------------|
| <i>Blanc.</i> | . . . 18'' | . . . 12'' |
| <i>Jaune.</i> | . . . 19'' | . . . 13'' |
| <i>Rouge.</i> | . . . 31'' | . . . 23'' |
| <i>Bleu.</i> | . . . 42'' | . . . 26'' |

les angles observés au soleil étant à peu près les deux tiers des angles correspondants observés à l'ombre.

3° *Lorsque les impressions de deux couleurs différentes se succèdent alternativement sur la rétine avec une vitesse insuffisante pour qu'il en résulte une impression unique, il se manifeste généralement de vives nuances étrangères aux deux couleurs employées et à leur mélange; on peut même par ce moyen produire un beau blanc, et cela en ne se servant que de jaune et de bleu.*

4° *Lorsque deux impressions se succèdent alternativement avec assez de rapidité pour qu'elles paraissent n'en former qu'une seule, cette dernière n'offre pas toujours la même couleur que le mélange matériel des deux couleurs employées: ainsi en combinant de cette manière, et dans certaines proportions, l'impression du jaune avec celle du bleu foncé, on produit une couleur parfaitement grise, sans la moindre nuance de vert.*

5° *Les impressions de certaines couleurs, (peut-être n'y a-t-il d'exception que pour le jaune) n'agissent pas, dans leur combinaison avec d'autres impressions, en raison de l'intensité de ces couleurs; leur maximum d'influence réside dans une certaine teinte pâle, en deçà et au-delà de laquelle cette influence diminue: ainsi la teinte bleue qui possède ce maximum à l'égard du rouge et du jaune est celle du ciel dans ses parties les plus colorées.*

Il y a d'autres phénomènes qui se rattachent plus ou moins directement aux propriétés des impressions produites par la lumière, et qui ont été l'objet des observations d'un grand nombre de physiciens : tel est, par exemple celui des couleurs accidentelles, tel est peut-être encore celui des ombres colorées. Je terminerai ce mémoire en indiquant ci-après, autant que mes recherches à cet égard me le permettent, les noms de ces physiciens ainsi que les sujets qu'ils ont traités et les ouvrages qui renferment leurs dissertations.

BUFFON. Sur les couleurs accidentelles et les ombres colorées. Mém. de l'acad. des sciences 1743.

FRANKLIN. Couleur accidentelles. Journal de Physique, vol. 2. 1773.

MONGEZ. Couleurs accidentelles. Journal de Phys., vol. 6. 1775.

DE GODART. Couleurs accidentelles, ombres colorées. Journal de Phys., vol. 7, 1776; vol. 8, 1776, pages 1, 269 et 341.

OEPINUS. Couleurs accidentelles, ombres colorées. Nouv. Mém. de l'acad. des sciences de Pétersbourg. Tome 10.

SCHERFFER. Couleurs accidentelles, ombres colorées, effet des lunettes dont les deux verres sont colorés différemment. Journal de Phys., vol. 26. 1785.

R. W. DARWIN. Couleurs accidentelles. Philos. trans. vol. 76, ann. 1786; ou à la fin du second volume de la Zoonomie d'Erasmus Darwin.

Dissertation sur les couleurs accidentelles sans nom d'auteur. Journ. de phys., vol. 30. 1787.

RUMFORD. Couleurs accidentelles. Cet auteur est cité par Haüy; je n'ai pu savoir où se trouvait sa dissertation.

PRIEUR de la Côte d'or. Couleurs accidentelles. Cité par Haüy.

HAÜY. Couleurs accidentelles. Traité élém. de Phys. Tome 2, page 267.

LÉONARD DE VINCI. Ombres colorées. Traité de la peinture, chap. 156, 157, 158 et 1328. ann. 1716,

BEGUELIN. Ombres colorées. Mém. de l'acad. de Berlin, 1767.

BOUGUER. Ombres colorées. Traité d'opt., liv. 3, sect. 5.

MONGEZ. Ombres colorées. Journ. de Phys., vol. 12. 1778.

RUMFORD. Ombres colorées. Philos. trans. 1794.

DE GROTHUSS. Ombres colorées. Voyez Schweigger, Beytrag zur chemie und physik. Tome 3, page 148.

HASSENFRATZ. Ombres colorées. Journ. de l'Ecole polyt. Tome 4, 11^e cahier. An X.

DE SCHRANK. Ombres colorées. Mém. de l'acad. de Munich. 1812.

ZSCHOKKE. Ombres colorées. Bibl. univ. Tome 32, sciences et arts. 1826.

B. PREVOST. Son opinion sur la blancheur. Ombres colorées. Bibl. univ., 1828.

Voyez encore sur les ombres colorées le tome 1 de la Bibl. Britann., pag. 339 et 372.

Sur l'effet que présente un petit espace éclairé par la lumière blanche, lorsque tous les objets environnants reçoivent une lumière colorée. Bibl. univ. Tome 29. Sciences et arts. Note de la page 326. Ann. 1825.

CHEVREUL. Influence mutuelle de deux couleurs juxtaposées. Mém. lu à l'acad. le 7 avril 1828.

DU TOUR. Sur ce qui arrive lorsque chacun des deux yeux reçoit en même temps l'impression d'une couleur différente. Mém. des savants étrangers. Tome 3. 1760.

MAGENDIE. Sur le même sujet. Physiologie. Tome 1, page 73.

MONCE. Effet des lunettes colorées; considérations sur le jugement que nous portons sur les couleurs; effet que présente un petit espace éclairé par la lumière blanche et entouré d'objets qui reçoivent une lumière colorée. Ann. de chimie. Tome 3. 1789.

BEGUELIN. Illusion qui change le noir en rouge. Mém. de l'acad. de Berlin. 1771.

AMICI. Limite à laquelle l'œil juge la coïncidence de deux lignes différentes. Bibl. univ. vol. 24. Sciences et arts. 1823.

FIN.

POSITIONS.

1.

L'intérieur du globe terrestre est dans un état de fusion ignée.

2.

La couleur qui agit avec le plus d'intensité sur la rétine n'est pas le rouge : c'est d'abord le blanc, ensuite le jaune.

3.

Les sulfures solubles mis en contact avec l'eau ne la décomposent point.

4.

Le calcul des infiniment petits s'appuie sur des principes rigoureux et doit être préféré, dans l'application, à toutes les autres méthodes.

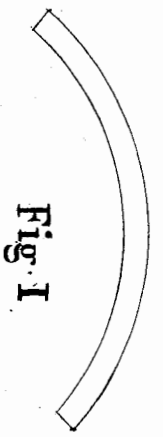


Fig. 1

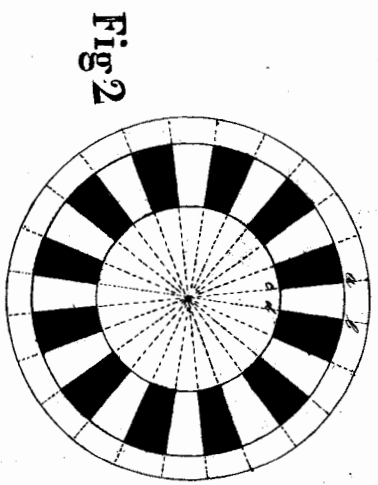


Fig. 2

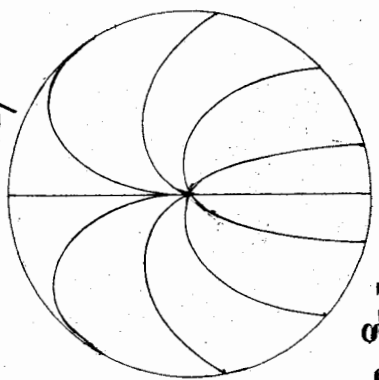
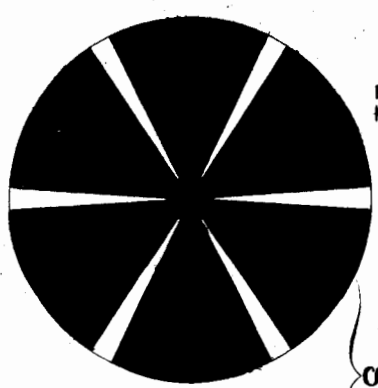
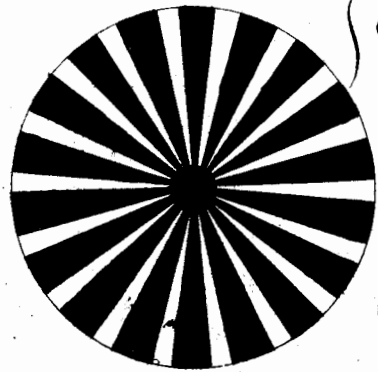


Fig. 3

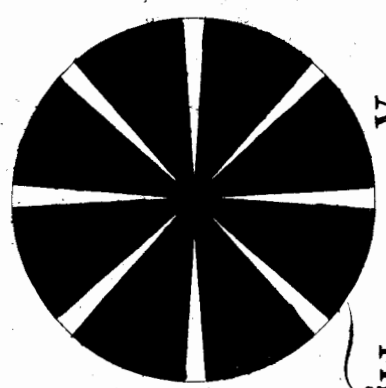


A

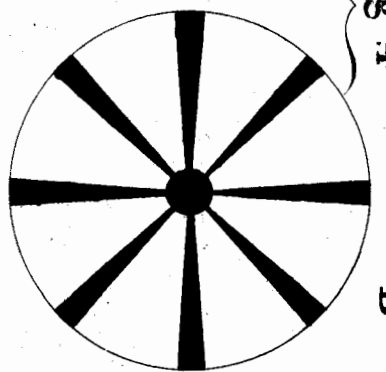


B

Fig. 4



A



B

Fig. 5

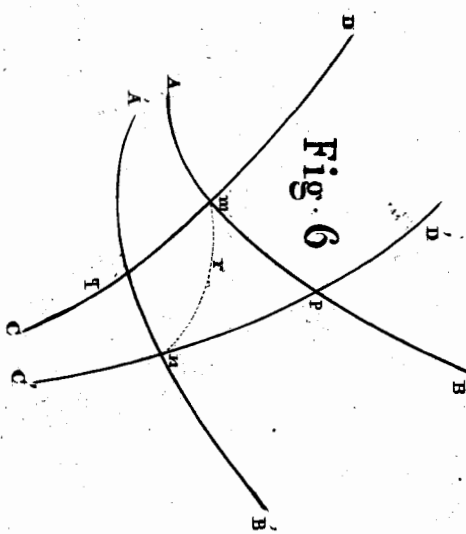


Fig. 6

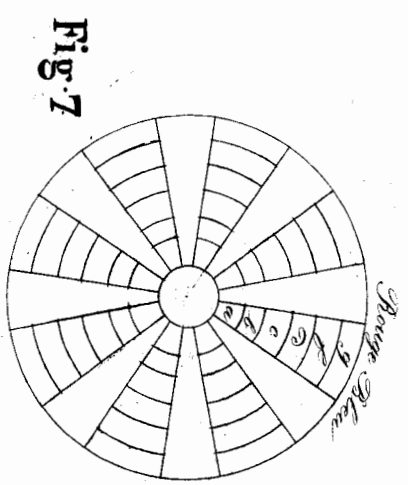


Fig. 7