

l'image devra être sur la droite de direction parallèle passant par  $n'_2$ ; une condition analogue se produira pour R et l'on aura deux images  $v$  et  $r$ . Mais si la lentille a été convenablement choisie comme puissance et comme position, on peut obtenir des conditions telles que l'image la plus éloignée  $r$  soit plus petite que l'image la plus rapprochée  $v$ ; soit O le point d'intersection de la ligne  $vr$  avec l'axe  $XX'$ , il est clair que si l'observateur place l'œil en ce point il verra les deux images se projeter l'une sur l'autre, les couleurs se superposeront dans toute l'étendue de l'image qui ne présentera plus d'irisation sur les bords, il y aura achromatisme.

Remarquons qu'une semblable superposition se produira pour les deux images, rouge et violette, d'un même point quelconque et que par suite l'image gagnera en netteté dans toute son étendue.

Il faut reconnaître que l'achromatisme que nous avons ainsi obtenu pour deux couleurs n'existe pas absolument pour les autres couleurs; pour qu'il en fût ainsi, il faudrait que les extrémités des images comprises entre V et R, extrémités qui sont sur la droite VR, donnassent par l'action de la lentille  $L_2$  de nouvelles images dont les extrémités fussent également sur la droite  $vr$ ; or cette condition ne peut être remplie et ces images ne pourront se projeter exactement sur  $v$  et  $r$ ; mais, en tout cas, le défaut sera diminué, les irisations seront moindres, on se rapprochera de l'achromatisme parfait.

On conçoit qu'on pourrait achromatiser le système pour deux couleurs quelconques; dans la pratique, on n'achromatise pas les couleurs extrêmes, rouge et violet, mais plus généralement le bleu et l'orangé.

533. — On peut obtenir l'achromatisme en employant deux lentilles accolées, l'une convergente ABDC (fig. 263), l'autre divergente AGCE; d'après ce que nous avons fait remarquer, la première seule produit l'image violette avant l'image rouge; la seconde, seule, donne l'image rouge avant l'image violette (530); on comprend que par leur réunion, les deux effets se compensent et que, pour des puissances convenablement calculées, la compensation puisse être absolue.

Mais si les deux lentilles étaient constituées de la même matière, la compensation totale ne pourrait exister que si les deux lentilles avaient la même puissance, parce que, alors, les deux aberrations seraient exactement égales et contraires; seulement, dans ce cas, le système aurait une puissance nulle (432), il ne produirait plus aucun effet.

Il n'en est pas ainsi si l'on prend deux lentilles constituées par des substances différentes, parce que la réfringence de ces substances n'étant

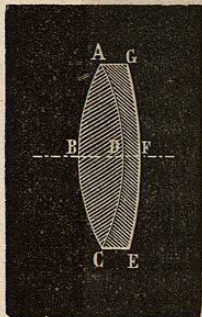


Fig. 263.

pas la même, les dispersions sont différentes. Pour obtenir des aberrations de réfrangibilité égales et contraires qui se compensent, il faut que les lentilles aient des puissances inégales, de telle sorte que, en les accolant, le système a une puissance déterminée, égale à la différence des puissances des deux lentilles. C'est ce système, composé en général d'une lentille convergente en crown-glass et d'une lentille divergente en flint-glass, qui constitue ce qu'on appelle une *lentille achromatique*.

D'après le raisonnement que nous avons fait, il faut nécessairement que les deux lentilles soient de nature différente, l'une convergente, l'autre divergente; mais ce résultat est applicable seulement au cas que nous avons examiné, lentilles accolées et supposées très minces: les résultats pourraient être très différents si ces conditions n'étaient pas réalisées.

Ajoutons que, comme précédemment, on ne parvient ainsi qu'à achromatiser deux couleurs. Mais on démontre, et l'expérience vérifie, que l'on peut arriver à obtenir l'achromatisme de trois, quatre... couleurs à la condition d'employer trois, quatre... lentilles convenablement choisies.

534. — Il importe de remarquer que les résultats que nous avons indiqués spécialement pour les radiations moyennes ou lumineuses sont également applicables à celles qui sont plus ou moins réfrangibles que celles-ci; que, par exemple, le foyer des radiations calorifiques qui apparaissent les premières, qui sont, par suite, les moins réfrangibles (471), est plus éloigné de la lentille que le foyer des rayons rouges; et que, d'autre part, les foyers des rayons chimiques sont plus rapprochés de la lentille que celui des rayons violets.

Ce fait n'a pas d'importance, jusqu'à présent, pour les radiations calorifiques; il peut être utile d'en tenir compte pour les radiations chimiques au point de vue de la photographie, comme nous le dirons.

Ajoutons d'ailleurs que l'achromatisme peut s'obtenir pour les radiations invisibles comme pour les radiations moyennes: le raisonnement que nous avons fait suppose seulement qu'il existe une différence de réfrangibilité et n'exige pas que les radiations soient susceptibles de donner naissance à la sensation lumineuse. Seulement, dans ce cas, l'achromatisme des rayons chimiques ne se manifeste pas par un effet visible directement.

535. **Achromatisme des prismes.** — Bien que moins importante au point de vue des applications, la question de l'achromatisme se pose pour les prismes comme pour les lentilles: nous nous bornerons à indiquer les résultats auxquels on est conduit sans traiter la question d'une manière complète.

Achromatiser un prisme pour deux rayons déterminés, c'est annuler pour ces rayons l'effet de la dispersion, c'est-à-dire donner à ces rayons la même direction à l'émergence, malgré la différence de réfrangibilité; il

faut d'ailleurs que la direction des rayons émergents fasse un certain angle avec celle des rayons incidents; il faut, en un mot, qu'il subsiste une déviation (406), ce qui est le but que l'on se propose par l'emploi des prismes. Pour atteindre ce résultat, il faut employer deux prismes de substance différente (pour lesquels, par conséquent, la loi de dispersion ne soit pas la même) et placés en sens inverse, l'arête de l'un étant dirigée du côté de la base de l'autre; si les angles de ces prismes ont été convenablement choisis, l'achromatisme sera obtenu et il subsistera une déviation qui, cependant, sera moindre que si l'on avait employé un seul prisme.

Si l'on veut achromatiser plus de deux couleurs, on peut y arriver, à la condition d'employer un nombre de prismes égal à celui des couleurs à achromatiser.

Il se présente, en quelques cas, une question dont la solution est analogue à celle que nous venons d'indiquer : il s'agit d'obtenir la dispersion d'un faisceau, sans déviation, c'est-à-dire qu'on veut un faisceau émergent dont la direction moyenne soit la même que celle du faisceau incident. On y arrive également en plaçant à la suite les uns des autres deux ou plusieurs prismes de substances différentes et ayant les sommets dirigés dans un sens et dans l'autre; la solution est donc la même que précédemment, d'une manière générale, seulement les valeurs des angles des prismes ne doivent pas être les mêmes dans les deux cas.

Il peut sembler extraordinaire que deux problèmes aussi différents reçoivent une solution analogue; mais il faut remarquer que, dans le passage d'un faisceau à travers deux prismes, il y a une relation entre la déviation, la dispersion et les éléments des prismes; on peut donc concevoir que, en faisant varier ces derniers, on puisse donner à la déviation ou à la dispersion telle valeur fixée à l'avance et notamment qu'on puisse rendre nulle l'une ou l'autre de ces quantités.

536. **Spectroscopes. Analyse spectrale.** — Les *spectroscopes* sont des appareils destinés à étudier les spectres; nous n'avons pas à les examiner à ce point de vue général, mais seulement pour indiquer comment cette étude peut conduire à des applications pratiques.

Il existe des formes diverses de spectroscopes suivant les usages auxquels on les destine; nous décrivons seulement les deux dispositions que l'on rencontre le plus souvent.

Un spectroscopie comporte toujours : un collimateur, un appareil de dispersion, une lunette, un micromètre.

Le collimateur *ab* (fig. 264) est une pièce qui a pour effet d'obtenir un faisceau parallèle : il comprend une fente étroite dont on peut, en général, faire varier la largeur entre certaines limites; cette fente reçoit des radiations d'un corps lumineux, d'une flamme, située à quelque distance; elle est placée au foyer principal d'une lentille convergente, les rayons qui

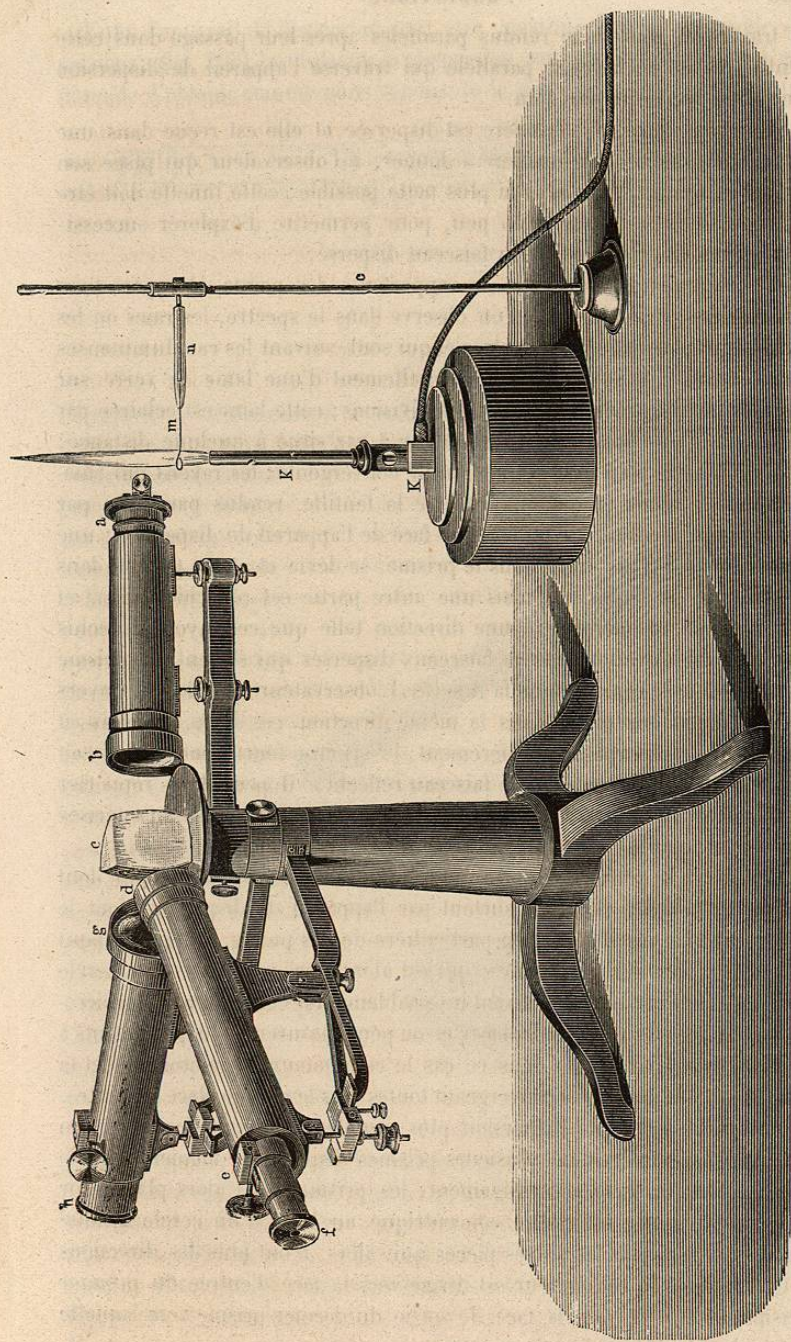


Fig. 264.

la traversent sont donc rendus parallèles après leur passage dans cette lentille; c'est ce faisceau parallèle qui traverse l'appareil de dispersion que nous décrirons plus loin.

Après cet appareil la lumière est dispersée et elle est reçue dans une lunette *d e* disposée de manière à donner, à l'observateur qui place son œil à l'extrémité *f*, la vision la plus nette possible; cette lunette doit être susceptible de se déplacer un peu, pour permettre d'explorer successivement les diverses parties du faisceau dispersé.

Le micromètre *g h* permet de rapporter à des points de repère fixes les diverses particularités qu'on observe dans le spectre, les raies ou les bandes qui peuvent s'y rencontrer et qui sont, suivant les cas, lumineuses ou obscures : il se compose essentiellement d'une lame de verre sur laquelle ont été tracées de très fines divisions; cette lame est éclairée par la flamme d'une bougie ou d'un brûleur à gaz situé à quelque distance; elle est dans le plan focal d'une lentille convergente; les rayons qui émanent des divisions et qui ont traversé la lentille, rendus parallèles par conséquent, arrivent sur la dernière face de l'appareil de dispersion; une partie de ces rayons entre dans le prisme, se dévie et va se perdre dans la monture de l'appareil, mais une autre partie est réfléchi (354), et l'on a donné au micromètre une direction telle que ces rayons réfléchis ont la même direction que les faisceaux dispersés qui sortent du prisme et arrivent avec ceux-ci dans la lunette. L'observateur regardant à travers celle-ci reçoit ensemble, dans la même direction, ces deux faisceaux et voit alors, se superposant entièrement, le spectre fourni par le faisceau dispersé, le micromètre par le faisceau réfléchi : il peut donc rapporter chaque raie du spectre à une division du micromètre qui est caractérisée par son numéro.

Ces pièces se retrouvent, en somme, dans tous les spectroscopes dont les divers modèles diffèrent surtout par l'appareil de dispersion dont le choix entraîne une disposition particulière de ces pièces. L'appareil peut être réduit à un simple prisme *c* qui est alors placé au centre d'un cercle horizontal autour duquel se fixent invariablement le collimateur et le micromètre; la lunette peut se déplacer et on peut mesurer ses déplacements à l'aide d'une graduation; dans ce cas le collimateur, le micromètre et la lunette ont des directions convergeant toutes vers le prisme placé au centre.

Lorsqu'on veut une dispersion plus grande, l'appareil de dispersion est constitué par deux ou plusieurs prismes disposés de manière que le faisceau les traverse successivement; les prismes sont alors placés sur une circonférence intérieure concentrique au bord d'un cercle gradué sur lequel reposent les autres pièces qui, alors, n'ont plus des directions convergentes : le collimateur est dirigé vers la face d'entrée du premier prisme, la lunette vers la face de sortie du dernier prisme vers laquelle est également dirigé le micromètre.

Enfin l'appareil de dispersion peut être constitué par un ensemble de prismes (fig. 265) produisant la dispersion sans déviation, ce qu'il est possible d'obtenir comme nous venons de le dire; dans ce cas la lunette,

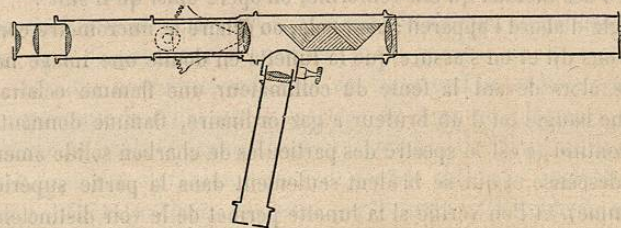


Fig. 265.

l'appareil de dispersion et le collimateur sont sur le prolongement l'un de l'autre (fig. 265 et 266) : seul, le micromètre est placé latéralement.

Cet appareil est désigné, sous cette forme, par le nom de *spectroscopie à vision directe*.

537. — L'analyse spectrale est un moyen de reconnaître l'existence de certains corps, existant même en quantités très minimes, à l'aide de l'étude des spectres produits dans des conditions déterminées. Cette opération s'exécute à l'aide des spectroscopes.

Il existe deux méthodes d'analyse spectrale entièrement différentes, celle qui résulte de l'étude des spectres d'émission (475), celle qui résulte de l'étude des spectres d'absorption (498); nous les étudierons successivement.

L'analyse spectrale par l'étude des spectres d'émission repose sur le fait que les gaz amenés à l'incandescence donnent un spectre discontinu, formé de raies fines, brillantes, peu nombreuses relativement, et que, de plus, ces raies par leur nombre et leur position sont caractéristiques des corps simples qui existent dans le gaz incandescent considéré. C'est principalement à la recherche des métaux qu'elle s'applique;



Fig. 266.

c'est seulement à ce point de vue que nous l'étudierons, à cause des applications auxquelles elle peut donner lieu.

Pour faire l'analyse d'une substance déterminée au point de vue de l'existence des métaux qu'elle renferme, on opère ainsi qu'il suit :

On règle d'abord l'appareil ; pour cela, on éclaire le micromètre comme nous l'avons dit et on s'assure que la lunette en donne une image nette. On place alors devant la fente du collimateur une flamme éclairante, celle d'une bougie ou d'un brûleur à gaz ordinaire, flamme donnant un spectre continu (c'est le spectre des particules de charbon solide amenées à l'incandescence et qui se brûlent seulement dans la partie supérieure de la flamme), et l'on vérifie si la lunette permet de le voir distinctement et si les déplacements de la lunette rendent possible l'étude de ce spectre dans toute son étendue. Si ces conditions sont réalisées, l'appareil est prêt pour les recherches. On supprime alors la flamme éclairante placée devant le collimateur et on la remplace par une flamme chaude, mais très peu éclairante (parce qu'elle ne contient pas de particules solides), la flamme d'une lampe à alcool ou celle d'un brûleur Bunsen K (fig. 264). En regardant alors à la lunette, on ne voit plus qu'une lueur faible, très peu perceptible sur laquelle se détache l'image du micromètre qui semble vivement éclairée.

La substance à étudier est alors introduite dans la flamme à l'aide d'un fil de platine *m* terminé par une petite boucle à l'extrémité ; cette boucle a été plongée dans le liquide si le corps est en dissolution ; si le corps est à l'état pulvérulent, le fil préalablement mouillé d'eau distillée est appliqué sur la poudre. Dans l'un et l'autre cas, ce fil emporte une petite quantité de la substance ; on l'introduit dans la flamme, au-dessous du niveau du collimateur : le corps est décomposé, dissocié et le métal volatilisé s'élève dans la flamme dont la haute température le porte à l'incandescence. Aussitôt, dans le champ de la lunette, apparaissent, pour l'observateur, des raies fines, brillantes, colorées. L'observateur note la position de ces raies, en les rapportant aux divisions du micromètre qui n'a pas cessé d'être visible. C'est le nombre et la position de ces raies qui permettent de reconnaître la nature du métal ou des métaux qui se sont volatilisés dans la flamme ; voici comment :

Par des expériences entièrement analogues, faites à l'aide de substances chimiquement connues, on a déterminé la position des raies des divers métaux, en les rapportant aux divisions du micromètre ; on a pu alors dresser un tableau dans lequel, en face du nom de métal, se trouve l'indication du spectre qu'il produit, c'est-à-dire du nombre, de la couleur et de la position des raies, chaque métal ayant, comme nous l'avons dit (475), un spectre caractéristique. Inversement, lorsqu'on connaît la disposition d'un spectre, ce tableau permet de trouver la nature du métal correspondant. Généralement, il n'est pas nécessaire de s'occuper de

toutes les raies fournies par la vapeur d'un métal, mais seulement des plus vives, des plus brillantes.

La comparaison des résultats obtenus avec ce tableau permet donc de reconnaître quel métal s'est trouvé dans la flamme et, par conséquent, existait dans la substance à analyser. Il est possible que l'ensemble des raies obtenues ne corresponde pas au spectre d'un métal déterminé, mais représente la réunion des spectres de deux ou plusieurs métaux, que le même tableau permettra de reconnaître de la même façon ; ces métaux existaient alors simultanément dans la substance analysée.

538. — Cette méthode, inventée par Bunsen et Kirchhoff, est d'une extrême sensibilité et permet de reconnaître des traces minimales des métaux. L'expérience suivante met cette sensibilité en évidence :

Dans un laboratoire dont la capacité était de 60 mètres cubes, on fit détoner à une extrémité un mélange de 3 milligrammes de chlorate de sodium avec du sucre de lait ; à l'autre extrémité se trouvait un spectroscopie disposé pour l'observation. Au bout de quelques minutes on observa le spectre caractéristique du sodium qui persista pendant plusieurs minutes. Un calcul approximatif montra qu'il n'arrivait à cette flamme que 1 trois-billionième de gramme par seconde ; c'est cette quantité extrêmement petite qui était cependant décelée par le spectroscopie.

Cette sensibilité fait que, presque toujours, dans les observations au spectroscopie, lors même qu'on n'introduit aucune substance dans la flamme, on voit le spectre du sodium : les poussières qui sont en suspension dans l'atmosphère contiennent des composés de ce métal, et malgré la très faible proportion qui en existe, elle est suffisante pour produire un effet appréciable au spectroscopie.

Cette même méthode a permis de découvrir des métaux, existant en très petites quantités dans divers corps, et dont l'analyse chimique n'avait pas fait soupçonner l'existence. Sans entrer dans l'étude de cette question qui est du domaine de la chimie, nous dirons cependant que, lorsque dans une analyse spectrale, on voit apparaître une ou plusieurs raies qui ne correspondent au spectre d'aucun des métaux connus, on est conduit à admettre que ces raies sont produites par un métal nouveau ; c'est par des observations de ce genre que Bunsen et Kirchhoff d'abord, puis M. Crookes, M. Lecoq de Boisbaudran, etc., ont découvert le rubidium, le césium, le thallium, l'indium, le gallium, etc. Ajoutons que certains de ces métaux ont pu, ultérieurement, être obtenus à l'état isolé par des réactions chimiques convenables, ce qui est venu justifier l'hypothèse sur laquelle repose cette méthode et ce qui doit faire admettre l'existence des corps ainsi reconnus, alors même qu'il n'a pas encore été possible de les isoler.

539. — Il existe, comme nous l'avons dit, un autre mode d'analyse spectrale qui repose sur l'étude des spectres d'absorption et qui peut être

utilisé avec avantage pour la recherche de diverses substances en dissolution, comme la chlorophylle, matière colorante verte des végétaux, et surtout l'hémoglobine, matière colorante du sang; nous nous occuperons spécialement de ce dernier cas, mais les conditions générales seraient analogues pour la recherche de la chlorophylle.

L'hémoglobine en dissolution dans l'eau jouit de la propriété d'absorber

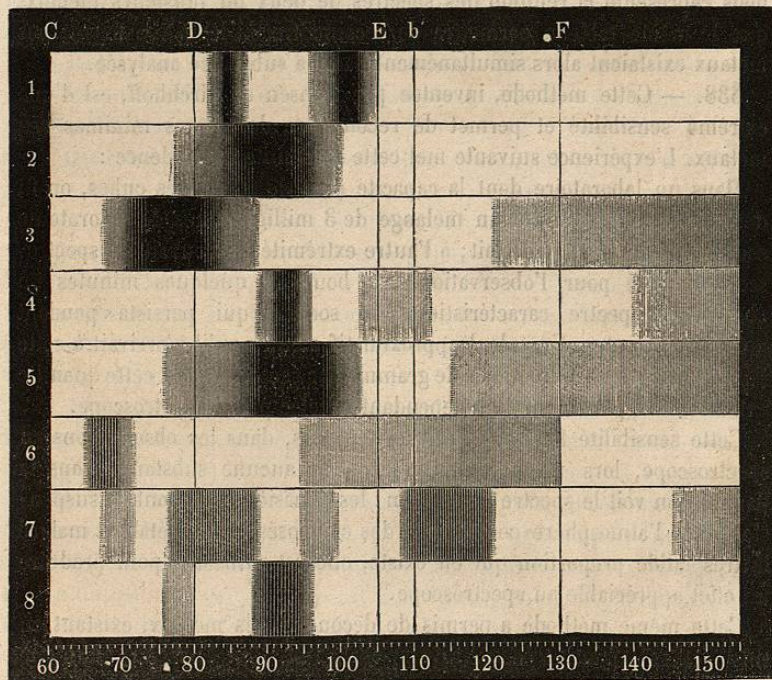


Fig. 267.

certaines radiations, même lorsqu'elle est en petite quantité; par suite, si l'on fait arriver un faisceau de lumière blanche complète sur une cuve contenant une semblable dissolution, et qu'on étudie le faisceau émergent à l'aide d'un spectroscope, on observera dans le spectre des bandes noires correspondant aux radiations qui ont été absorbées. Ces bandes sont larges et faciles à distinguer: elles diffèrent d'ailleurs suivant les conditions de l'expérience. S'il s'agit de l'oxyhémoglobine telle qu'elle existe dans le sang artériel<sup>1</sup>, il se produit deux bandes noires situées entre les raies D et E (fig. 267, 1), dans le jaune et le vert: dans le cas

1. On sait qu'on passe aisément d'une des formes de l'hémoglobine à l'autre: en versant quelques gouttes de sulfure d'ammonium (sulfhydrate d'ammoniaque) dans l'oxyhémoglobine, on la fait passer à l'état d'hémoglobine réduite; en agitant cette dernière au contact de l'air, elle absorbe de l'oxygène et passe à l'état d'oxyhémoglobine.

de l'hémoglobine réduite, il n'y a qu'une bande noire (fig. 267, 2) comprise entre les deux précédentes<sup>1</sup>.

En se basant sur ces remarques, il est facile de comprendre l'emploi

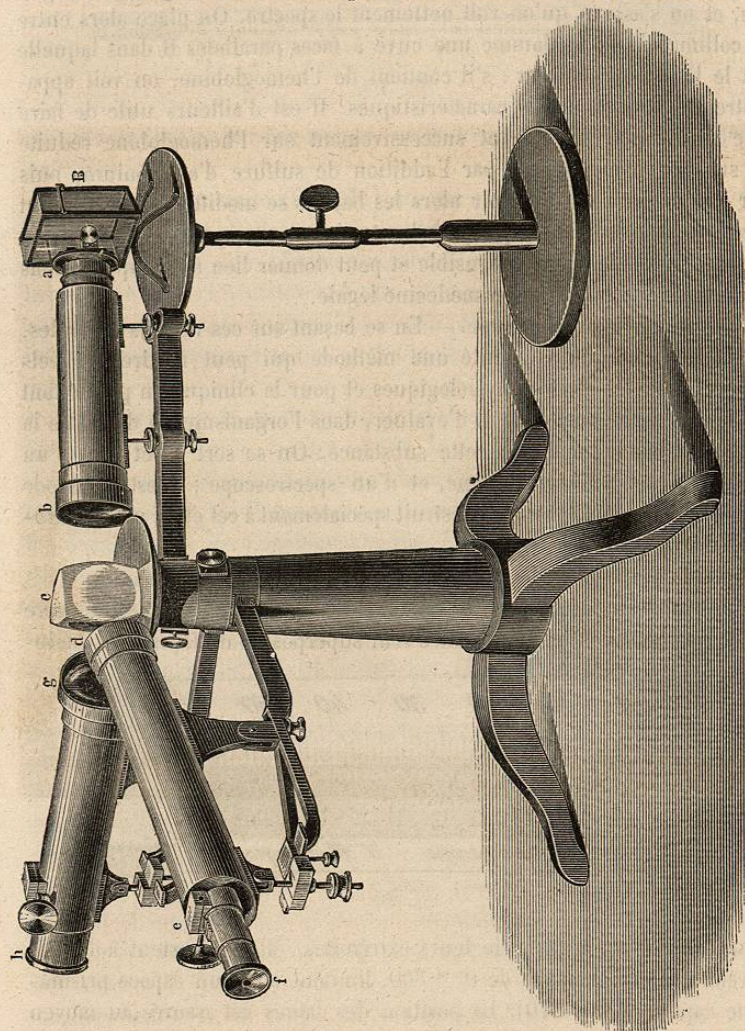


Fig. 268.

1. Les autres matières colorantes du sang donnent également des spectres d'absorption caractéristiques; nous en donnons l'indication comme suit dans la figure 267:

3. Hématine dissoute dans une solution très étendue de soude caustique. — 4. Hémochrome en solution alcaline. — 5. Hématine alcaline traitée par du cyanure de potassium. — 6. Hématine dissoute dans l'alcool additionné d'un peu d'acide sulfurique. — 7. Hématoporphyrine exempte de fer, en solution alcaline. — 8. Hématoporphyrine exempte de fer, dissoute dans l'alcool additionné d'un peu d'acide sulfurique.

du spectroscope : celui-ci ayant été réglé pour le micromètre  $gh$  (fig. 268) et pour la lunette  $de$ , comme nous l'avons dit, on place en face du collimateur  $ab$  une flamme éclairante, celle d'un brûleur à gaz, par exemple, et on s'assure qu'on voit nettement le spectre. On place alors entre le collimateur et la flamme une cuve à faces parallèles  $B$  dans laquelle est le liquide à analyser : s'il contient de l'hémoglobine, on voit apparaître les bandes noires caractéristiques. Il est d'ailleurs utile de faire une vérification en opérant successivement sur l'hémoglobine réduite et sur l'oxyhémoglobine, par l'addition de sulfure d'ammonium, puis par l'agitation : on doit voir alors les bandes se modifier conformément à ce que nous avons indiqué plus haut.

Cette méthode est très sensible et peut donner lieu à des applications importantes, notamment en médecine légale.

540. **Hématospectroscope.** — En se basant sur ces notions générales, M. le Dr Hénocque a inventé une méthode qui peut rendre de réels services pour les études physiologiques et pour la clinique en permettant de doser l'oxyhémoglobine et d'évaluer, dans l'organisme, la durée de la réduction fonctionnelle de cette substance. On se sert à cet effet d'un appareil spécial, l'hématoscope, et d'un spectroscope : il est commode d'employer un spectroscope construit spécialement à cet effet, un *hématospectroscope*.

Voici la description de l'hématoscope donnée par M. Hénocque :

« L'hématoscope est essentiellement constitué par deux lames de verre de largeur inégale (fig. 269) : elles sont superposées de façon que, main-

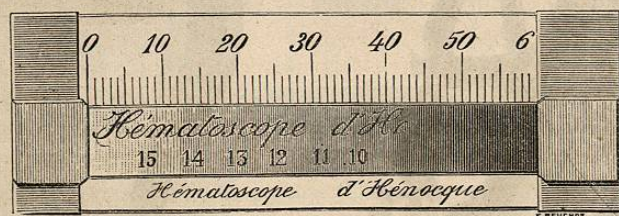


Fig. 269.

tenues en contact à l'une de leurs extrémités, elles s'écartent à l'autre extrémité d'une distance de  $0^{\text{mm}},300$ , limitant ainsi un espace prismatique capillaire (fig. 270). La position des lames est assurée au moyen de deux agrafes en laiton nickelé  $ag$ ,  $ad$ , supportées par la lame de verre inférieure  $li$ , et formant deux coulisses dans lesquelles la lame supérieure  $ls$  est introduite à frottement doux.

« Une échelle graduée en millimètres est gravée sur la plaque inférieure ; elle s'étend de 0 à  $60^{\text{mm}}$ . Il résulte de cette disposition que si l'on fait pénétrer du sang entre ces deux lames, celui-ci forme une couche dont l'épaisseur varie, de gauche à droite, de 0 à  $0^{\text{mm}},300$  ou  $300^{\mu}$ . »

D'après ces dispositions, on peut aisément calculer l'épaisseur de la couche en chaque point : il suffit, pour avoir cette épaisseur évaluée



Fig. 270.

en  $\mu$ , de multiplier par 3 le numéro de la division placée en face du point considéré.

L'hématospectroscope (fig. 271) est un spectroscope à vision directe porté sur un pied et placé verticalement ; au-dessous se trouve une platine horizontale sur laquelle on place l'hématoscope qui est éclairé par transparence, par un miroir placé à la partie inférieure de l'appareil et qui peut s'incliner à volonté.

Le principe de la méthode est le suivant : lorsqu'on examine le spectre d'une lumière ayant traversé une couche de sang d'une épaisseur convenable, M. Hénocque a reconnu que les deux bandes de l'oxyhémoglobine étaient également obscures. Pour le sang contenant 14 p. 100 d'oxyhémoglobine et éclairé à la lumière solaire, ce phénomène se produit pour une épaisseur de  $70^{\mu}$ , soit à la division 14 de l'hématoscope. L'épaisseur est différente pour d'autres proportions de l'oxyhémoglobine ; par exemple lorsque ces proportions sont de 15 — 10 — 8 — 4 p. 100 elle doit être respectivement de 65 — 95 — 120 — 245 micra ( $^{\mu}$ ) et se produit par suite aux divisions 13 — 19 — 24 — 49 de l'hématoscope.

On comprend que, déplaçant l'hématoscope sous le spectroscope, on l'arrête à l'instant où les deux bandes noires sont égales ; on note la division correspondante et il suffit de se reporter à un tableau de concordance qui a été dressé à l'avance pour connaître la proportion d'oxyhémoglobine.

L'évaluation de la durée de la réduction de l'oxyhémoglobine dans l'organisme s'effectue de la façon suivante : on fait une ligature autour de la phalange du pouce et on regarde l'ongle à l'aide de l'hématospectroscope. On voit à travers cet ongle quelquefois les deux bandes caractéristiques de l'oxyhémoglobine, mais la première est toujours distincte. Ces bandes disparaissent peu à peu : le sang abandonne progressivement son oxygène aux tissus qu'il baigne et se réduit puisqu'il n'est pas renouvelé. La disparition de la première bande est manifestée par l'appa-

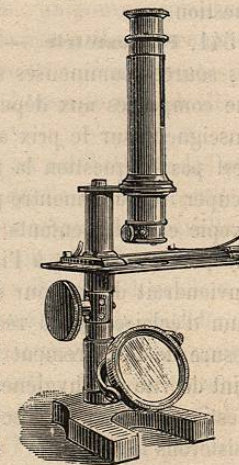


Fig. 271.