trois parties, douées de propriétés distinctes : 1° des rayons lumineux qui, agissant sur la rétine, constituent le spectre proprement dit, et donnent successivement les sept couleurs simples; 2° en deçà du rouge, des rayons impropres à exciter la vision, mais possédant une puissance calorifique beaucoup plus grande que les autres parties du spectre : ce sont les *rayons calorifiques*, constituant le *spectre calorifique;* 3° au delà du violet, des rayons encore impropres à la vision, comme les rayons en deçà du rouge, d'un pouvoir calorifique très faible, mais doués d'une grande énergie chimique : ce sont les *rayons chimiques;* ils constituent le *spectre chimique.* Il y a donc dans la lumière blanche trois espèces de radiations, *lumineuses*, *calorifiques* et *chimiques*, que l'on peut, plus ou moins, séparer à l'aide des prismes.

480. **Spectre lumineux : Pouvoir lumineux des divers faisceaux du spectre. — Expérience de Draper.** — D'après les expériences de Fraünhofer et d'Herschel, c'est dans le *jaune* qu'a lieu le maximum d'intensité de la lumière, et c'est dans le *violet* qu'a lieu le minimum.

La composition de la partie visible du spectre varie avec la température de la source de lumière : c'est ce que montre l'expérience suivante de M. Draper. Lorsqu'on fait passer dans un fil de platine un courant électrique dont on accroît successivement l'intensité, le fil s'échauffe de plus en plus et vers 500° commence à devenir lumineux. Or, si l'on décompose, à l'aide d'un prisme, la lumière émise par ce fil, on n'obtient d'abord que des rayons rouges; mais, l'intensité du courant continuant à croître, le fil s'échauffe davantage, et à la suite du rouge on voit apparaître l'orangé. Au fur et à mesure que la température du fil s'élève, après l'orangé se montre le jaune, puis le vert, le bleu, l'indigo et enfin le violet, lorsque le platine est chauffé *à blanc.*

481. **Spectre calorifique.** — Lorsqu'on reçoit un faisceau de lumière solaire sur un prisme d'une substance parfaitement *diathermane* (c'est-à-dire *transparente pour la chaleur*), telle que le sel gemme, les rayons calorifiques obscurs s'épanouissent, comme les rayons lumineux, perpendiculairement aux arêtes du prisme, et forment ainsi un *spectre calorifique.*

Cette expérience prouve que la chaleur, comme la lumière, est composée de plusieurs espèces de rayons inégalement réfrangibles. Comme ces rayons calorifiques ne sont pas visibles, on les met en évidence à l'aide d'un thermoscope très sensible. Pour cela, par une petite ouverture pratiquée dans le volet d'une chambre obscure, on reçoit un faisceau de lumière solaire sur un prisme de sel gemme. Puis, de l'autre côté du prisme, on place successivement, dans les différentes régions du spectre, une pile de Melloni assez étroite pour ne recevoir que des rayons de même réfrangibilité[1].

Résultats généraux. — Leslie constata le premier avec son thermomètre différentiel que, dans le spectre solaire, la chaleur croît du violet vers le rouge. W. Herschel remarqua qu'elle s'étend au delà du rouge et il en fixa le maximum dans la bande obscure qui termine le rouge. Bérard fixa ce maximum dans le rouge même. Cette divergence de résultats fut expliquée par Seebeck : il observa que la position du maximum dépendait de la substance réfringente. Avec un prisme d'eau il trouva le maximum dans le jaune, avec un prisme d'alcool dans le jaune orangé, et avec un prisme de crown dans le rouge moyen. Melloni confirma les expériences de Seebeck au moyen de son thermomultiplicateur; il trouva que *le maximum de chaleur s'éloigne d'autant plus du jaune vers le rouge que la substance du prisme est plus diathermane.* Avec un prisme de sel gemme, le maximum se forme *en deçà* du rouge, et c'est là sa véritable place, puisque le faisceau calorifique a subi dans le sel gemme le minimum d'absorption.

1. Nous définissons plus loin, dans le livre VIII, tous les termes employés dans ce paragraphe, et nous décrivons les instruments auxquels il est fait ici allusion.

Figuration du spectre calorifique. — Sur la droite AV (fig. 549) on porte une longueur proportionnelle à l'étendue totale de la radiation calorifique

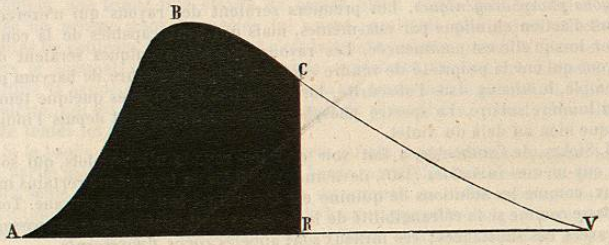

Fig. 549.

dans le spectre, et sur cette droite on élève des perpendiculaires proportionnelles aux intensités calorifiques en chaque point : en joignant les extrémités de ces perpendiculaires, Herschel a obtenu une courbe qui représente la distribution de la chaleur dans le spectre solaire provenant d'un prisme de verre.

M. Muller, de Fribourg, ayant refait ces mesures à l'aide d'un prisme de sel gemme et avec des instruments plus précis, a obtenu la courbe ABCV : la partie VCR correspond à la radiation calorifique dans le spectre visible, du violet jusqu'au rouge, et la partie noire RCBA à la même radiation dans la région infra-rouge. On voit que le maximum de chaleur a lieu en B, bien en deçà du rouge, et que l'étendue totale du spectre calorifique est presque égale à celle du spectre lumineux.

Tyndall, qui a fait les mêmes recherches sur le spectre de la lumière électrique, a trouvé qu'avec cette source de lumière la courbe thermique s'élève au delà du rouge plus brusquement que dans le spectre solaire, et se prolonge beaucoup plus. D'après ce savant, l'infériorité de la radiation calorifique du spectre solaire, par rapport au spectre électrique, serait due à l'absorption de la chaleur solaire par la vapeur d'eau de l'atmosphère.

482. **Spectre chimique : Pouvoir chimique dans ses diverses régions. — Expérience de Stokes.** — Dans un grand nombre de cas, la lumière solaire se comporte comme un agent chimique. Par exemple, sous l'action de la lumière, le protochlorure de mercure et le chlorure d'argent noircissent, le phosphore diaphane devient opaque, les principes colorants d'origine végétale se détruisent. La lumière suffit même pour déterminer des combinaisons, comme cela arrive avec un mélange de chlore et d'hydrogène; c'est elle, enfin, qui contribue principalement à la production de la matière verte dans les plantes.

Toutefois les diverses couleurs ne possèdent pas toutes, au même degré, cette activité chimique. Scheele observa le premier, en 1770, que le chlorure d'argent exposé à la lumière prend une teinte violacée, et il reconnut que les rayons violets du spectre produisaient seuls cet effet. Wollaston observa ensuite que cette action s'étendait hors du spectre visible, avec la même intensité que dans le violet : il en conclut qu'outre les rayons qui agissent sur la rétine, il existe des rayons *invisibles* plus réfrangibles. Les rayons qui possèdent la propriété de déterminer des réactions chimiques ont reçu le nom de *rayons chimiques* [1]. L'ensemble des rayons chimiques obscurs qu'on trouve dans le spectre solaire au delà du violet, constitue le *spectre chimique* proprement dit ou *spectre ultra-violet*.

M. Ed. Becquerel a distingué, en outre, dans le spectre deux espèces de rayons chimiques, qu'il appelle les uns *rayons continuateurs* et les autres *rayons phosphorogéniques*. Les premiers seraient des rayons qui n'exercent point d'action chimique par eux-mêmes, mais qui sont capables de la continuer lorsqu'elle est commencée. Les rayons phosphorogéniques seraient des rayons qui ont la propriété de rendre certains corps, le sulfure de baryum par exemple, lumineux dans l'obscurité, lorsqu'ils ont été exposés quelque temps à la lumière solaire. Le spectre phosphorogénique s'étendrait depuis l'indigo jusque bien au delà du violet.

M. Stokes, de Cambridge, a fait voir que les rayons ultra-violets, qui sont par eux-mêmes *invisibles* (480), deviennent *visibles* en traversant certains milieux, comme les solutions de quinine et d'esculine, les verres d'urane. Tout se passe comme si la réfrangibilité de la lumière était abaissée par son passage à travers ces substances ; ces milieux sont appelés *corps fluorescents*.

Tyndall a observé un phénomène inverse pour les rayons obscurs du spectre infra-rouge : reçus dans le vide sur une lame d'étain ou de charbon, et dans l'air ou dans le vide sur une feuille de platine platiné (c'est-à-dire recouvert de platine pulvérulent), leur réfrangibilité est exaltée et ils deviennent visibles.

483. **Aberration de réfrangibilité.** — Les lentilles, réfractant la lumière comme des prismes, doivent aussi la décomposer. Il en résulte que les images qu'elles donnent sont irisées sur leur contour. Ce défaut, sensible surtout dans les lentilles convergentes, se désigne sous le nom d'*aberration de réfrangibilité*. Lorsqu'une lentille convergente, par exemple, reçoit un faisceau de lumière blanche, parallèle à son axe principal, les rayons rouges, qui sont les moins réfrangibles, vont former leur foyer en un point *r*, placé sur l'axe de la lentille (fig. 550), tandis que les rayons violets, se réfractant davantage, vont concourir en un point *v*, plus

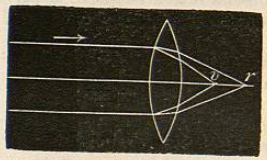

Fig 550.

1. M. Draper repousse l'hypothèse d'un spectre chimique qui serait exclusivement dû aux rayons les plus réfrangibles. Il admet que tous les rayons du spectre solaire peuvent être également actifs, suivant la nature de la substance impressionnée, et que les rayons actifs sur une substance sont ceux pour lesquels elle a le plus grand pouvoir absorbant. M. Draper appuie cette nouvelle théorie sur de nombreuses expériences (*Journal de physique*, juin 1874).

rapproché. Entre ces deux limites se forment les foyers orangé, jaune, vert, bleu et indigo. L'aberration de réfrangibilité est d'autant plus sensible que les lentilles sont plus convergentes et que les rayons incidents sont plus éloignés de l'axe.

484. **Effet d'aberration de réfrangibilité : Irisation des objets vus au travers d'un prisme.** — Lorsqu'un corps est vu au travers d'un prisme, les portions de son contour qui sont parallèles aux arêtes du prisme paraissent colorées des teintes du spectre : on dit que l'image est *irisée*.

Ce phénomène est un effet d'aberration de réfrangibilité; il s'explique par l'inégale réfrangibilité des rayons réfléchis par le corps. Si l'on regarde, par exemple, une bande *très étroite* de papier blanc collée sur un carton noir avec un prisme dont les arêtes lui soient parallèles, elle paraît colorée de toutes les couleurs du spectre, et c'est la teinte violette qui est la plus relevée vers le sommet du prisme. Dans cette expérience, la lumière blanche que diffuse la bande de papier est décomposée en traversant le prisme, et la teinte violette, qui est la plus réfrangible, étant la plus déviée, paraît plus élevée que toutes les autres.

Si la bande de papier, au lieu d'être très étroite, a une certaine largeur, toute sa partie moyenne reste blanche; ses bords, parallèles aux arêtes du prisme, sont seuls colorés, les plus rapprochés du sommet en violet mélangé de bleu et d'indigo, et les plus rapprochés de la base en rouge mélangé d'orangé et de jaune. Pour expliquer ce phénomène, il faut concevoir la bande de papier partagée en bandes parallèles très étroites. Chacune de celles-ci donnera, comme dans le premier cas, un spectre complet. Or, le deuxième spectre étant un peu plus bas que le premier, le troisième plus bas que le deuxième, et ainsi de suite, il se produit dans la partie médiane une superposition successive de toutes les couleurs simples, d'où résulte la *sensation du blanc;* mais sur les bords, où la superposition n'est pas complète, le violet d'un côté et le rouge de l'autre restent isolés et produisent l'*irisation*.

485. **Achromatisme.** — En combinant des prismes dont les angles réfringents sont différents et qui sont faits de substances inégalement dispersives, on est parvenu à réfracter la lumière blanche sans la décomposer. Le même résultat s'obtient avec des lentilles de substances différentes, dont les courbures sont convenablement combinées. Les contours des objets vus à travers ces systèmes de prismes ou de lentilles, ainsi formés, ne paraissent plus irisés : on dit que ces systèmes réfringents sont *achromatiques*, et l'on nomme *achromatisme* la suppression de l'aberration par réfrangibilité.

En observant le phénomène de la dispersion avec des prismes d'eau, d'essence de térébenthine, de crown-glass, Newton avait été conduit à admettre que *la dispersion était proportionnelle à la réfraction*. Il en avait conclu qu'*il ne pouvait y avoir réfraction sans dispersion*, et par conséquent que *l'achromatisme était impossible*. Près d'un demi-siècle s'écoula avant qu'on reconnût l'erreur de Newton. Ce n'est qu'en 1733 que le physicien anglais Hall construisit des lunettes achromatiques; mais il ne publia pas sa dé-

couverte. C'est Dollond, opticien de Londres, qui, en 1757, montra qu'en juxtaposant deux lentilles, l'une biconvexe, en crown-glass, et l'autre concave-convexe, en flint (fig. 551), on obtenait une lentille sensiblement achromatique.

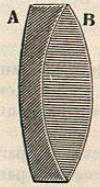

Fig. 551.

486. **Théorie de l'achromatisme (Rayons centraux).** — I. *Cas des prismes.* — 1° *Lemme préliminaire.* — *La déviation produite sur un rayon simple par deux ou plusieurs prismes successifs est la somme algébrique des déviations partielles.* — On voit, en effet, dans la figure 552 que les déviations partielles s'ajoutent quand les prismes sont orientés dans le même sens (I), et qu'elles se retranchent quand les prismes sont orientés en sens contraires (II). Dans le premier cas, en effet, la déviation totale D est l'angle extérieur d'un triangle KAA_1, qui a pour angles à la base les déviations partielles d et d_1. Dans le deuxième cas, l'angle D est lui-même un des angles à la base, tandis que l'angle extérieur est devenu l'une des déviations partielles, et l'on a $D = d - d_1$.

2° *Formule de la dispersion.* — Considérons maintenant un système de

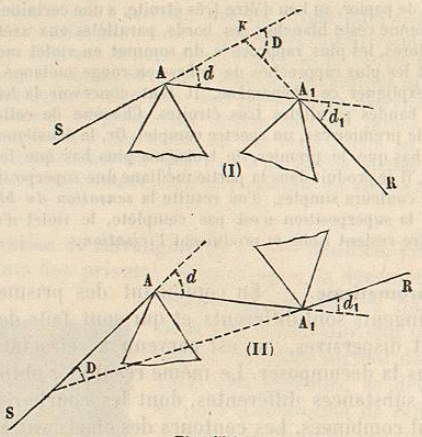

Fig. 552.

deux prismes accolés en sens contraire, d'angles réfringents A et A', et inégalement réfringents. Si m et m' sont les deux indices correspondants à un même rayon du spectre, la déviation totale de ce rayon sera, d'après la formule des petits prismes,

$$D = A(m-1) - A'(m'-1).$$

Pour un autre rayon, défini par ses indices $m + \Delta m$ et $m + \Delta m'$, on aura

$$D + \Delta D = A(m + \Delta m - 1) - A'(m' + \Delta m' - 1).$$

La variation totale de déviation, ΔD, c'est-à-dire la *dispersion*, sera donc

$$\Delta D = A\Delta m - A'\Delta m'.$$

3° *Équation* et *Condition d'achromatisme.* — Si donc on choisit les indices et les angles réfringents des prismes de manière qu'on ait

$$A\Delta m = A'\Delta m', \quad \text{on aura} \quad \Delta D = 0,$$

c'est-à-dire que *la dispersion sera nulle* et le prisme composé sera *achromatique pour ces deux couleurs.* L'équation

$$[1] \qquad A\Delta m - A'\Delta m' = 0 \quad \text{ou bien} \quad \frac{A}{A'} = \frac{\Delta m'}{\Delta m}$$

est appelée *équation d'achromatisme.* Elle exprime la condition d'achromatisme des prismes : *les angles réfringents des deux prismes accolés en sens inverses doivent être inversement proportionnels aux dispersions des deux rayons.*

Le rapport $\frac{A}{A'}$ se détermine *expérimentalement* pour deux substances inégalement réfringentes, à l'aide d'appareils spéciaux appelés *diasporamètres.*

II. *Cas des lentilles.* — Du cas des prismes de petite ouverture on passe aisément à celui des lentilles. Une lentille convergente accolée à une lentille divergente forme un système équivalent à celui de deux prismes d'angles opposés. En appelant y les diamètres, supposés égaux, des deux lentilles, R et R_1 les rayons de courbure de l'une et R', R'_1 ceux de l'autre, on sait que les angles réfringents A et A' des deux prismes équivalents sont déterminés par les formules connues

$$A = y\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_1}\right) \quad \text{et} \quad A' = y\left(\frac{1}{R'} + \frac{1}{R'_1}\right).$$

Équation et *Condition d'achromatisme.* — On peut, d'autre part, exprimer les courbures des deux lentilles à l'aide des formules connues

$$\frac{1}{f} = (m-1)\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_1}\right) \quad \text{et} \quad \frac{1}{f'} = (m'-1)\left(\frac{1}{R'} + \frac{1}{R'_1}\right).$$

En substituant ces valeurs dans l'équation [1] ci-dessus, elle devient

$$\frac{\dfrac{1}{f}}{\dfrac{m-1}{\dfrac{1}{f'}}{m'-1}} = \frac{\Delta m'}{\Delta m}, \quad \text{d'où} \quad \frac{\dfrac{\Delta m'}{m'-1}}{\dfrac{\Delta m}{m-1}} = \frac{\dfrac{1}{f}}{\dfrac{1}{f'}}.$$

Telle est l'*équation d'achromatisme* des lentilles.

Les quotients $\frac{\Delta m}{m-1}$ et $\frac{\Delta m'}{m'-1}$ étant appelés *pouvoirs dispersifs* des lentilles (pour les deux rayons qu'il s'agit d'achromatiser), on peut dire que deux lentilles forment un système achromatique pour deux couleurs du spectre, quand *leurs pouvoirs convergents sont inversement proportionnels à leurs pouvoirs dispersifs.*

Remarque. — On voit d'ailleurs que, contrairement à ce que pensait Newton, on peut détruire la dispersion sans annuler la réfraction, puisque l'équation d'achromatisme exprime que $\Delta D = 0$, mais non que $D = 0$.

Lentilles achromatiques. — Les lentilles achromatiques se forment de deux lentilles de substances inégalement dispersives. L'une A, de flint, est concave-convexe divergente (fig. 551); l'autre B, de crown-glass, est biconvexe, et l'une de ses faces coïncide exactement avec la face concave de la première. Avec les lentilles, comme avec les prismes, il faudrait sept verres pour obtenir un

achromatisme parfait; mais deux suffisent en général dans tous les instruments d'optique: on leur donne la courbure nécessaire pour achromatiser les rayons *rouge* et *jaune*.

487. **Absorption de la lumière par les milieux transparents.** — On ne connaît pas de substance d'une transparence parfaite. Le verre, l'eau, l'air même, éteignent graduellement la lumière qui les traverse, et, sous une épaisseur suffisante, ces milieux peuvent l'affaiblir assez pour qu'elle n'agisse plus sur la rétine. On observe, en effet, qu'un grand nombre d'étoiles qui ne sont pas visibles, même par le ciel le plus pur, quand on est dans les plaines, deviennent visibles sur les hautes montagnes.

Cette perte graduelle qu'éprouve la lumière en traversant les milieux diaphanes se nomme *absorption*. Si tous les rayons simples étaient également transmissibles à travers les milieux diaphanes, ceux-ci seraient incolores. Or il n'en est jamais ainsi : les corps diaphanes laissent passer certains rayons lumineux plus facilement que d'autres. Le milieu prend alors la couleur des rayons pour lesquels il est le plus diaphane. C'est pour cette raison que, sous une grande épaisseur, l'air paraît *bleu;* de même, une lame épaisse de verre est *verte;* le verre coloré *en rouge* par le protoxyde de cuivre ne laisse passer que les rayons *rouges*, et absorbe tous les autres, même sous une petite épaisseur.

Pour plusieurs milieux transparents, la coloration varie avec l'épaisseur. Par exemple, le perchlorure de chrome, qui est vert sous une faible épaisseur, devient rouge foncé sous une épaisseur plus grande. On nomme *polychroïques* les substances dont la teinte varie ainsi avec l'épaisseur.

C'est aussi par un effet d'absorption que les rayons du soleil sont moins intenses quand cet astre est à l'horizon que lorsqu'il est au zénith, car ils traversent alors une épaisseur d'atmosphère plus considérable.

CHAPITRE VIII

CHROMATIQUE (SUITE)

—

RAIES DU SPECTRE ET ANALYSE SPECTRALE.

488. **Raies du spectre.** — 1° *Définition et production.* — Quand on produit un spectre solaire très pur (règle de Newton), on s'aperçoit que ce spectre n'est pas continu; il est sillonné, perpendiculairement à sa longueur, de *raies obscures*, plus ou moins nombreuses, plus ou moins larges, suivant le degré de netteté de l'image. C'est ce qu'on appelle les *raies du spectre solaire*.

Pour bien observer les raies, on reçoit un faisceau de lumière solaire dans une chambre obscure, par une fente très étroite, et à la distance de 3 à 4 mètres on regarde cette fente à travers un prisme de flint exempt de stries, en tenant les arêtes parallèles aux bords de la fente : on voit alors un grand nombre de raies

obscures, très déliées, parallèles aux arêtes du prisme et très inégalement espacées. On voit encore mieux ces raies en les observant à l'aide d'une lunette.

Les diverses couleurs du spectre solaire ne sont donc point continues; les rayons paraissent manquer pour plusieurs degrés de réfrangibilité.

2° *Description et historique.* — Il est étonnant que Newton n'ait pas aperçu ces raies; il est probable que la substance de ses prismes n'était pas assez pure. C'est Wollaston qui les signala le premier, en 1802 ; mais c'est Fraünhofer qui le premier, en 1815, les étudia avec soin et en donna une description détaillée, avec un dessin précis. Il désignait par les lettres A, *a*, B, C, D, E, *b*, F, G, H, les plus apparentes de ces raies, qu'on appelle ordinairement *raies de Fraünhofer*. La raie A (fig. 1 des planches I et II) est à la limite du rouge; B, au milieu du rouge; C, à la limite du rouge et de l'orangé; D, dans le jaune; E, dans le vert : F, dans le bleu; G, dans l'indigo et H dans le violet. Il y a encore d'autres raies remarquables, telles que *a* dans le rouge et *b* dans le vert. Avec la lumière solaire, ces raies ont des positions fixes dans les différentes régions du spectre, ce qui donne le moyen de mesurer avec précision les indices de réfraction des couleurs correspondantes.

Fraünhofer avait fait de nombreuses observations sur ces raies. Il avait reconnu que les spectres de la lumière des planètes offrent les mêmes raies, que ceux des étoiles en présentent quelquefois d'autres : ce qui prouve que les planètes ne reflètent que la lumière du soleil, tandis que les étoiles ont une lumière propre, plus ou moins différente de celle-ci. Il a publié un dessin de $0^m,394$ de longueur, contenant 354 raies.

De nombreuses recherches ont été faites depuis Fraünhofer sur le même sujet, et l'on a publié des dessins plus complets des raies du spectre solaire. On peut citer :

Le dessin	de S. Brewster,	de $1^m,727$	de long,	contenant	2000 raies
—	Kirchow,	— $1^m,25$	—	—	3000 raies (et plus).
—	Angström,	— $2^m,90$	—	—	1000 —
—	Thollon	— 15^m	—	—	4000 —

489. **Spectroscopes.** — I. *Définition.* — Tout appareil qui sert à étudier le spectre est un spectroscope. Le dispositif qui a servi à Fraünhofer a été le premier modèle et le type de ces instruments. Il était formé : 1° d'une fente pratiquée dans un volet de chambre obscure, par où arrivaient les rayons solaires; 2° d'un prisme, qui décomposait la lumière solaire : 3° d'une lunette pour