

Le bleu du ciel.

(Actes de la Société helvétique des Sciences naturelles. 85^e session. [Genève, 1902].)

L'illumination et la coloration de la voûte céleste sont les deux principaux phénomènes de l'optique météorologique.

Si le premier est aujourd'hui définitivement expliqué, il n'en est pas de même du second, malgré les nombreuses tentatives qui ont été faites.

Nous ne passerons pas en revue toutes les explications qui ont été proposées, car nous sortirions du cadre dans lequel nous devons nous renfermer; nous nous bornerons à dire qu'elles peuvent être ramenées à deux types bien distincts : Le premier, qu'on peut qualifier de *physique*, se recommande de l'autorité de physiciens illustres, aussi est-il favorablement reçu partout, ou peu s'en faut. Le second, que nous nommerons *chimique*, est d'origine modeste; il a été timidement formulé par des hommes de laboratoire et il n'a pas reçu fort bon accueil. C'est sur lui, cependant, que je désire surtout appeler l'attention, car la science a tout à gagner à l'exercice de la critique et de la discussion.

Voyons d'abord en quoi consistent ces types d'explications et notamment en quoi ils sont opposés l'un à l'autre.

Dans le premier, on part de la pensée que l'air est, en somme, sans couleur propre, et l'on cherche l'origine du bleu du ciel dans les phénomènes optiques dont les milieux troubles sont le siège; dans le second, au contraire, on regarde l'air comme ayant une couleur propre et l'on n'attribue au trouble de l'atmosphère d'autre rôle que celui de l'illumination du jour.

Pour nous prononcer entre ces deux théories, nous devons nécessairement examiner *leurs lettres de créance*, c'est-à-dire nous renseigner exactement sur leurs procédés et sur la valeur de leurs points d'appui.

L'origine du *type physique* se trouve surtout dans les expériences que Tyndall a faites sur l'*illumination des vapeurs*. Cet illustre physicien avait constaté qu'en éclairant fortement une vapeur en voie de condensation, elle se colorait en bleu d'azur, et il pensa tout de suite à appliquer cette observation à l'explication du bleu du ciel. Il fut encouragé dans son projet par un phénomène particulier. La lumière renvoyée par la vapeur *était polarisée*, tout comme la lumière du ciel. Dans l'un et dans l'autre cas, le plan de polarisation passait par la source lumineuse et la polarisation était plus forte dans la direction perpendiculaire à la lumière incidente. Cet accord surprenant paraît avoir vraiment formé la conviction de Tyndall. Pour lui l'atmosphère était le siège de condensations continuelles, donnant lieu, suivant son expression, à des *nuages naissants* qui, éclairés par le soleil, produisaient à la fois et le bleu du ciel et son illumination.

Cette théorie n'était cependant pas sans présenter certaines difficultés. On ne conçoit pas bien l'atmosphère comme étant perpétuellement un lieu de condensation et d'évaporation d'eau si régulières que la fixité du bleu de la voûte céleste ne s'en trouve nulle part atteinte. On peut le dire, si cette théorie a été généralement acceptée, c'est qu'elle a eu la bonne fortune de trouver un appui dans une analyse mathématique que J.-W. Strutt (aujourd'hui lord Rayleigh) a faite de la réflexion de la lumière sur des particules extrêmement petites. Le calcul donne, en effet, une explication de la couleur des milieux troubles, car il établit que les petites particules réfléchissent en plus grande quantité les rayons lumineux de courte longueur d'onde (les rayons violets ou bleus) et qu'elles laissent passer plus librement les autres, de sorte qu'un milieu trouble paraîtra rougeâtre par transparence et bleuâtre par réflexion. En outre, ce calcul montre que la lumière renvoyée par un milieu trouble doit être *polarisée* dans un plan passant par la source lumineuse et avoir un maximum de polarisation dans une direction perpendiculaire au rayon incident. C'était bien là ce que Tyndall avait vu. La théorie et l'observation étant d'accord, on a cru la question définitivement résolue.

Mais de l'accord du calcul et de l'observation sur quelques points, il ne résulte pas nécessairement que la Nature soit telle que les mathématiques l'ont supposée. L'histoire des sciences a plus d'une fois montré le danger des formules trop simples et elle a sanctionné

souvent cet ancien adage : *dubium initium sapientiæ*. Quelque solidement établie que soit en apparence une théorie, il est toujours utile pour la science d'en scruter encore les bases et de la soumettre à des épreuves nouvelles.

Nous nous permettrons donc d'examiner, d'abord, si vraiment la polarisation de la lumière du ciel est une preuve suffisante de l'origine optique du bleu.

On remarquera que, rigoureusement, le phénomène de la polarisation prouve seulement la *réflexion* de la lumière et rien autre chose. C'est dépasser le fait que de voir, en lui, une indication au sujet de l'origine d'une couleur quelconque. L'atmosphère pourrait être *blanche* que les phénomènes de la polarisation n'en seraient pas exclus. Le rapport de la polarisation à la couleur du ciel doit être donné par l'expérience. J'ai cru pouvoir obtenir quelques renseignements à son sujet en opérant d'après le programme suivant (*) :

Pour que la polarisation de la lumière du ciel soit une preuve suffisante de l'origine optique du bleu, il faudrait qu'elle affectât les rayons bleus du ciel seuls et non les autres, car si la polarisation est commune à tous les rayons, elle ne nous prouvera plus rien quant à l'origine particulière de l'un d'eux. Éteignons donc les rayons bleus du ciel à l'aide d'un écran de couleur complémentaire et voyons si nous supprimons la polarisation, de cette façon, au moins dans une mesure assez large. On sait d'ailleurs, d'après Crova (**), que la lumière blanche de l'air est plus faible que la lumière bleue.

La substance dont la couleur est complémentaire du bleu du ciel est une solution de *sulfocyanure ferrique*. On doit la préparer, bien entendu, à un degré d'intensité en rapport avec celui du bleu du ciel.

En regardant le ciel serein à travers une couche de ce liquide rouge-orange, on constate la disparition *du bleu* ; la lumière arrivant à l'œil est incolore, mais fortement affaiblie. Si l'on place alors un *polariscope* devant l'œil, on voit nettement que la lumière, bien que privée de bleu, *est encore polarisée*, et, autant qu'on en peut juger, dans la même proportion. La polarisation de la lumière du jour n'est donc pas une preuve suffisante de l'origine optique de la couleur du ciel. L'argument produit jusqu'à présent en faveur de la théorie

(*) *Archives des Sciences physiques et naturelles*, t. VII, p. 225, 1899.

(**) *Comptes rendus*, t. CIX, p. 493.

physique du bleu du ciel n'a pas le caractère péremptoire indispensable pour entraîner une conviction par lui seul. Il convient donc de ne pas opposer trop de délai à l'opinion des chimistes qui ont dit que le ciel est bleu simplement parce que l'air est bleu. Néanmoins, un mémoire récent, dû à M. le professeur Pernter, le savant météorologiste de Vienne, combat sérieusement cette opinion.

M. Pernter a répété les expériences auxquelles il vient d'être fait allusion et il les a étendues aux milieux troubles artificiels, tels qu'on les obtient en mêlant des solutions de résine à de l'eau. Ayant vu que, là aussi, la lumière renvoyée reste polarisée après qu'on a éteint la lueur bleue par un écran de couleur complémentaire, il conclut que la lumière de l'atmosphère se comporte, dans tous ses détails, comme celle d'un milieu trouble et que nos observations, loin d'infirmer la théorie optique du bleu du ciel, lui donnent un appui de plus. M. Pernter dépasse les faits quand il conclut de la sorte. Notre thèse était qu'on ne peut invoquer la polarisation du ciel comme argument en faveur de l'origine optique du bleu. En montrant que les rayons de toutes les couleurs sont polarisés par un milieu trouble quelconque, M. Pernter donne le coup de grâce à l'argument unique que l'on croyait avoir, et son travail se borne à prouver une fois de plus que l'atmosphère fonctionne comme un milieu trouble, chose qui n'était contestée par personne.

Si l'on s'en tient donc à l'expérience, on n'a vraiment qu'une raison d'analogie pour admettre que le ciel est bleu parce que l'air est trouble, raison tirée du fait que les milieux troubles montrent, le plus souvent, un reflet bleuâtre.

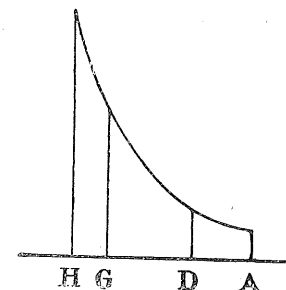
Il importe cependant de faire ses réserves, car le *bleu* d'un trouble artificiel n'a pas, comme celui du ciel, la prédominance dans la lumière totale diffusée. On ne sera donc en droit de reporter à notre atmosphère les observations faites sur les troubles artificiels que quand on se sera assuré de l'identité d'origine des couleurs de part et d'autre.

Voyons à présent si la théorie de lord Rayleigh sur la génération des couleurs dans les milieux troubles rend bien compte des faits observés.

La formule à laquelle on arrive, dans cette théorie :

$$I = Ce^{-\kappa\lambda^{-4\alpha}}$$

nous apprend que l'intensité d'un rayon réfléchi par des particules très petites est en raison inverse de la quatrième puissance de la longueur d'onde du rayon donné. Il est facile de calculer, alors, pour un cas donné, dans quelle proportion s'éteint un rayon donné par son passage à travers un milieu trouble : on arrive à ce résultat que la lumière correspondant à la raie rouge A s'affaiblit environ 16 fois plus que celle de la raie violette H₂ et que la lumière des raies G et D s'affaiblit, respectivement, 5 fois et 1,4 fois autant. On peut relever ces résultats graphiquement en portant les longueurs d'ondes en abscisses et les intensités en ordonnées. La courbe des intensités (voir figure) tombe rapidement de H en D, tandis que de D en A la chute est moins forte. D'après ce diagramme, un milieu trouble devrait donc réfléchir surtout les rayons violets, même si l'on tient compte de la sensibilité différente de l'œil aux diverses couleurs. Le ciel devrait donc nous paraître plutôt violet que bleu. Mais revenons aux troubles artificiels et procédons à une observation dans les conditions que voici :



Supposons un large tube en verre, long d'environ 2 mètres ; fermons-le par des plans de verre après l'avoir rempli d'eau troublée par l'addition d'un peu de solution de résine mastic dans l'alcool et faisons passer par l'axe du tube un faisceau de lumière parallèle d'une forte intensité. Le tube s'illumine dans toute sa longueur si le trouble n'est pas trop épais, et l'on remarque que la lumière émise latéralement est colorée. Près de la lanterne, c'est-à-dire à l'entrée de la lumière, on constate une *faible couleur bleue*, lavée de blanc, mais pas, ou presque pas de violet. Plus loin, le bleu s'atténue de plus en plus, et il apparaît une coloration *jaune* faible sans que des tons verts se marquent. Enfin, la coloration devient de plus en plus intense en passant à l'*orange* et au *rouge pur*. En somme, les rayons lumineux paraissent pénétrer d'autant plus loin dans le trouble que leur longueur d'onde est plus grande, mais tous finissent par être réfléchis latéralement.

Un milieu trouble ne répond donc pas absolument aux conditions supposées pour le calcul de lord Rayleigh. Il ne réfléchit pas les

rayons à ondes courtes dans la proportion annoncée, mais il les absorbe plutôt.

On objectera que les particules formant un trouble artificiel ne sont pas de dimensions égales et que celles qui réfléchiraient surtout le bleu font probablement défaut. Soit; mais une objection semblable peut aussi être faite au trouble aérien. Le calcul de Rayleigh montre qu'une particule donnée, qui peut réfléchir des rayons bleus, par exemple, réfléchira mieux encore des rayons violets; alors, encore une fois, pourquoi le ciel nous paraît-il bleu?

Quoi qu'il en soit des remarques précédentes, nous sommes en droit de demander à la théorie qui regarde le bleu du ciel comme la couleur d'un milieu trouble, de nous renseigner sur la nature de ce trouble.

Eh bien, si l'on s'en tient à l'observation directe, on reconnaît que les poussières de toute nature qui troublent visiblement l'atmosphère ne vont pas bien haut. Elles forment comme un *sédiment* dans les couches inférieures de l'air et elles s'élèvent, tout au plus, à 1,000 ou 2,000 mètres. Si l'on veut donc que l'atmosphère fonctionne comme un milieu *poussièreux* jusque dans les régions les plus élevées, on devra déclarer que ces poussières échappent à l'observation, et l'on tournera dans un cercle vicieux. D'ailleurs, le séjour permanent, dans les régions élevées de l'air, de particules solides ou liquides, par exemple de particules de glace ou de gouttelettes minuscules d'eau, est simplement inadmissible. Non seulement l'action continue de la pesanteur les ramènerait d'autant plus vite vers les régions basses que l'air des parties supérieures est moins dense, moins épais, mais *l'état électrique* de l'atmosphère rend leur stationnement impossible.

Il a été reconnu par R. Nahrwold (*) et par d'autres physiciens depuis, que des particules quelconques, surtout les plus fines, ne restent pas suspendues dans un gaz dont tous les points n'ont pas le même potentiel électrique. Il se fait alors une floculation rapide et le gaz est débarrassé de ses poussières en quelques instants. On peut regarder comme certain que les couches supérieures, surtout, de l'atmosphère ne sont pas partout au même potentiel; elles sont donc armées pour se défendre contre l'invasion des particules étrangères.

On se trouve fatalement conduit, de la sorte, à chercher dans les *molécules elles-mêmes de l'air* l'obstacle contre lequel se heurtent les rayons de la lumière solaire. Cette hypothèse paraît ne pas déplaire à la plupart des météorologistes; elle est cependant contredite par plusieurs observations.

Je suis d'autant plus heureux de les rappeler ici, qu'elles évoquent le souvenir d'un des nombreux savants dont la Suisse et la ville de Genève en particulier s'honorent au plus juste titre : j'ai cité Soret, à qui la science de la lumière doit tant de beaux travaux.

Pour respecter l'ordre chronologique des faits, il y a lieu de dire, d'abord, que Tyndall a déjà constaté, quand il fit ses intéressantes expériences sur l'illumination des gaz, qu'un faisceau de lumière ne donne une trace visible que si l'air qu'il traverse renferme des poussières, même quand celles-ci échappent à l'observation directe. Ayant tenu un tisonnier rougi au feu, ou la flamme d'une lampe à alcool, sous le faisceau éclairé, il vit s'éteindre toute trace lumineuse et l'air lui parut comme traversé par de la fumée noire. C'était, dit Tyndall, « l'obscurité des espaces planétaires ». Ainsi donc, dans l'esprit de Tyndall lui-même, un gaz est *optiquement vide* (l'expression est de lui) aussi longtemps qu'il n'est pas chargé de matières étrangères. Ce n'est qu'en faisant naître, dans un espace raréfié, un trouble nuageux très fin que Tyndall put constater *l'illumination bleue* qui lui suggéra l'idée d'assimiler le bleu du ciel à un phénomène de coloration d'un milieu trouble. On remarquera, toutefois, que les conditions particulières réalisées en dernier lieu par Tyndall n'ont rien de commun avec celles de notre atmosphère. L'illumination bleue n'a duré que quelques instants dans le tube de Tyndall, sans doute parce que le trouble nuageux se condensait rapidement. Dans l'air, au contraire, le bleu est d'une fixité remarquable qui s'accorde mal avec la mobilité des vapeurs en voie de condensation.

A la même époque, M. Lallemand, de Lyon, avait étudié le passage de la lumière à travers certains corps transparents, liquides ou solides, et constaté leur illumination sitôt qu'ils étaient traversés par une lumière suffisamment intense. Il crut à une propriété spéciale des milieux transparents : celle de devenir *fluorescents* dans une lumière intense. C'est alors que Soret fit voir que l'interprétation de Lallemand n'était pas exacte. Un corps solide ou liquide ne renvoie la lumière latéralement que s'il renferme des particules étrangères,

(*) *Wiedemann's Annalen*, t. V, p. 460, 1878.

ou s'il manque d'homogénéité d'une manière quelconque. La trace estompée que laisse voir l'eau, par exemple, quand un faisceau lumineux la traverse, n'est pas d'intensité constante. Celle-ci diminue à mesure que l'eau est purifiée avec plus de soin. Soret conclut judicieusement de cette observation que la trace lumineuse n'est qu'accidentelle et qu'elle disparaîtrait totalement s'il était possible de préparer de l'eau absolument pure. En un mot, Soret n'a pas cru à la réflexion de la lumière par les molécules des corps transparents.

Le fait étant admis pour les corps solides et les corps liquides, on doit se demander s'il se reproduit dans les gaz très raréfiés qui, à certains égards, ne se comportent pas toujours comme des liquides *superdilats*. Nous avons essayé de résoudre le problème (*). Au lieu d'opérer, comme Tyndall l'avait fait, avec de l'air, dont les molécules d'azote, d'oxygène, etc., appartiennent probablement aux plus petites, nous avons eu recours aux molécules plus grosses des sels et de diverses substances, afin de faciliter les observations et les rendre plus certaines. Comme il eût été impossible d'observer aux températures auxquelles ces corps se volatilisent, nous avons tourné la difficulté en faisant usage de *dissolutions*. La chimie physique a fait voir, en effet, que l'acte de dissolution d'un corps dans un solvant doit être assimilé à sa volatilisation dans cet espace spécial. Une solution de sulfate de potassium, par exemple, doit être regardée comme un milieu dans lequel ce sel serait à l'état de gaz, à la température ordinaire. En exposant la solution à un faisceau lumineux parallèle, on devrait voir la trace des rayons lumineux, si les molécules du sel avaient la faculté de réfléchir la lumière, puisque, d'après Soret, les molécules du solvant à l'état pur n'ont pas ce pouvoir. Il était indispensable, évidemment, de pousser d'abord la purification optique de l'eau aussi loin que possible et de s'assurer s'il était pratiquement possible de réaliser un milieu optiquement vide. Le résultat a été atteint de deux manières : par voie chimique et par voie physique. Dans le premier cas, on provoque la formation dans l'eau d'un précipité gélatineux qui agglutine toutes les particules solides et les entraîne avec lui. La clarification se fait par le repos durant quelques mois ou même par

(*) Voir *Sur la réalisation d'un liquide optiquement vide* et *Sur la diffusion de la lumière pour les solutions* : BULL. DE L'ACAD. DE BELGIQUE (Classe des sciences), p. 174 et p. 300, 1899.

filtration à travers ce précipité, à l'abri de l'air. Dans le second cas, on enfonce, dans l'eau distillée, deux électrodes de platine entre lesquelles on maintient une différence de potentiel d'une vingtaine de volts au moins. Dans ces conditions, les particules qui étaient en suspension dans l'eau se concentrent généralement autour de l'*anode* et, après un certain temps, il ne s'en trouve plus autour de la *cathode*. Si l'on éclaire alors l'eau, on ne constate d'autre illumination que celle provenant de bulles d'air circulant dans le liquide. L'eau est donc bien un milieu optiquement vide; la lumière ne se réfléchit pas sur ses molécules. Ceci posé, passons au cas où l'eau renferme des sels dissous.

Le résultat général des observations a été le suivant : les sels dérivant d'acides et de bases séparément solubles dans l'eau fournissent un liquide optiquement vide, ou peu s'en faut, tandis que les sels dont la base n'est pas soluble dans l'eau, tels les sels d'aluminium, ou de chrome, donnent des solutions qui, quoi qu'on fasse, s'illuminent sous l'action de la lumière. La raison de ce fait est simple : les sels sont hydrolysés, en solution, et la base se trouve à l'état de pseudo-solution (solution colloïdale) quand elle n'est pas véritablement soluble; ces solutions colloïdales ont, on le sait, peu de transparence. On constate encore que les solutions *non électrolytes*, les solutions de sucre ou d'urée, n'ont jamais la transparence des solutions salines (*). Quoi qu'il en soit, on doit regarder comme possible la réalisation des milieux optiquement vides à l'aide de certaines solutions. La réflexion de la lumière sur les molécules ne peut être érigée *en principe*. Soret a bien vu quand il l'a regardée comme accidentelle, ou comme relevant de circonstances spéciales. Au reste, on conçoit difficilement que la lumière se réfléchisse sur les molécules si l'on tient compte de leur extrême petitesse : les molécules de l'air seraient, d'après un calcul de Thomson, environ *dix mille fois plus petites* que l'onde lumineuse moyenne. Admettre une réflexion dans ces conditions serait regarder, en quelque sorte, la direction des vagues de la mer comme soumise aux corps flottant à sa surface. Quelle peut donc

(*) Les dérivés liquides du carbone, les alcools, le chloroforme, etc., montrent tous le phénomène de l'illumination, quel que soit le soin mis à la purification. On remarquera que ce sont des non-électrolytes.

être alors la cause de l'illumination perpétuelle de l'air jusque dans les régions les plus élevées ?

La réponse à la question est due également à un savant suisse, à M. Hagenbach, de Bâle. Cet éminent physicien a fait remarquer que l'atmosphère ne peut être un milieu homogène, car la température manque essentiellement de stabilité et d'uniformité. Un rayon lumineux qui traverse l'air doit donc subir un grand nombre de réflexions et de réfractions, sur les couches d'air de densité différente, avant d'arriver à notre œil. En un mot, l'air se comporterait comme un milieu trouble sans qu'il en soit un au point de vue de sa composition.

On a objecté à la théorie de M. Hagenbach que ces réflexions de la lumière sur des couches d'air de densités en somme peu différentes ne sauraient produire la clarté du jour. C'est là une affirmation gratuite et erronée. Voici qui le prouve : Si l'on remplit d'eau absolument pure un long tube (26 mètres), fermé par des plans de verre, on constate aisément que la lumière ne traverse le tube que si la température est parfaitement la même en tous les points. Dans le cas contraire, l'eau paraît aussi noire que de l'encre ; même si la source lumineuse est très forte. L'effet d'une différence de température est, à cet égard, d'une puissance remarquable. Nous avons reconnu que si l'eau du tube est seulement de 0°6 au-dessus de celle de l'enceinte, l'eau paraît opaque. Il est évident que, dans ces conditions, la lumière incidente doit être renvoyée latéralement si elle n'est pas absorbée *in situ*. S'il suffit d'une si petite différence de température pour supprimer la transparence d'une colonne d'eau de 26 mètres, il est admissible que l'atmosphère nous présente, d'une manière permanente, un phénomène semblable. D'abord les différences de température varient dans une large mesure depuis le sol jusqu'aux confins de l'atmosphère ; ensuite, les différences de densité sont plus grandes dans l'air que dans l'eau, à variation égale de température. Ces deux causes s'ajoutant, on ne peut nier qu'il se passe dans l'air, en grand, ce que l'on constate en petit dans le laboratoire ; c'est-à-dire que l'atmosphère, même absolument dépourvue de particules en suspension, est le siège d'une diffusion latérale, intense, de la lumière solaire.

On a dit aussi de la théorie de M. Hagenbach que la réflexion de la lumière, même répétée sur les couches d'air de densité différente,

ne saurait expliquer le bleu du ciel. Ceci n'est un point faible que si l'on veut absolument une origine optique au bleu du ciel, mais s'arrange, au contraire, très bien avec la conception d'une couleur propre de l'air. Enfin, on a reproché à cette théorie de ne pas rendre compte d'une manière commode des particularités de la polarisation de la lumière du ciel, principalement du fait que le maximum de la polarisation a toujours lieu dans une direction perpendiculaire à celle des rayons du soleil arrivant à l'observateur. Ici encore, nous croyons que l'on s'est mépris. On a supposé que les couches de densité différente sont distribuées plus ou moins régulièrement dans l'atmosphère et même que les directions horizontales dominant, parce que, disait-on, le vent doit être la cause principale de l'inhomogénéité de l'air. C'est encore une affirmation non fondée. Les choses doivent se passer dans l'air comme elles se passent dans l'eau du tube que nous avons rappelé à l'instant. Le fait que l'eau ne laisse pas passer la lumière au travers d'une certaine épaisseur aussi longtemps qu'il n'y a pas d'équilibre de température avec le milieu ambiant démontre que les filets de densité différente ne sont pas rangés en couches superposées, mais disposés d'une manière quelconque. L'atmosphère est, bien plus que l'eau contenue dans un tube, parcourue par des courants de convection et le théâtre de mille mouvements d'origine mécanique et physique. Dans ces conditions, une orientation, même rudimentaire, paraît absolument improbable. Nous devons donc regarder plutôt les filets gazeux comme s'entre croisant partout, dans toutes les directions, sur les 70 kilomètres d'épaisseur de notre atmosphère. En résumé, l'effet produit au point de vue optique sera analogue à celui que lord Rayleigh a supposé dans son calcul quand il a regardé l'air comme un milieu troublé *par des points de réflexion*.

La théorie de M. Hagenbach se dressant ainsi contre la théorie du trouble particulière, on a essayé de lui trouver un vice rédhibitoire et l'on a dit qu'elle conduisait à une extinction de la lumière du ciel et non à son illumination ; car, étant donné qu'un rayon polarisé totalement ne se réfléchit pas sur un plan perpendiculaire à celui qui a produit la polarisation, il faut, a-t-on dit, que si les filets d'inégale densité de l'air ont une direction quelconque, un rayon polarisé donné trouve toujours sur son chemin un plan sur lequel il s'éteindra. L'objection serait fondée si les filets d'air étaient opaques, mais

comme ils sont en réalité transparents, le rayon qui ne peut se réfléchir sur un filet donné, par suite de la position de celui-ci, passera outre en se réfractant, et il ne sera pas perdu. Se réfléchissant sur tous les filets parallèles à sa polarisation et passant par tous ceux qui lui sont perpendiculaires, il ne compromettra jamais l'illumination totale de l'air.

Rien de sérieux ne s'oppose donc à la théorie de M. Hagenbach; elle se base, d'ailleurs, comme on l'a vu, sur une réalité que l'expérience vérifie, tandis que rien ne vient à l'appui de la croyance aux poussières matérielles de l'air se répandant jusque dans les hautes régions.

Au reste, la dernière objection qui a été faite à la théorie de M. Hagenbach s'applique aussi à la théorie du *trouble matériel*. Lord Rayleigh l'a fait voir lui-même, environ un an après que nous nous sommes permis d'appeler l'attention sur la réalité de la couleur bleue de l'air. Il a estimé la diminution de transparence que l'air doit éprouver du chef de la présence de particules très petites, et il est arrivé à cette conclusion que le bleu du ciel ne peut être dû en tout, ni même en partie principale, à des particules suspendues dans l'air (*). Après cette *consultation* du célèbre auteur de la théorie optique des milieux troubles, on pourrait regarder la cause comme entendue et n'attribuer à la présence problématique de particules matérielles dans l'air qu'un rôle secondaire dans la génération du bleu et même dans le phénomène de l'illumination du ciel.

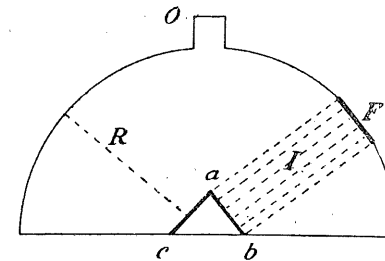
Mais il peut toujours être utile de scruter encore, comme nous l'avons déjà dit, la question, et particulièrement de faire parler l'expérience.

Voyons donc comment nous apparaît un milieu trouble, sous le rapport de sa coloration, quand on se place vis-à-vis de lui dans la même position que l'observateur vis-à-vis du ciel. Ce dernier est, en réalité, plongé dans le milieu trouble lui-même et, partant, dans des conditions bien différentes de celles dans lesquelles on se trouve quand on constate, dans le laboratoire, la couleur bleuâtre d'un milieu trouble artificiel. Là, on est en dehors du trouble et en bonne position pour recevoir la lumière qu'il renvoie. Au contraire, la

(*) *Nature*, t. LX, 1899; *Fortschritte der Physik.*, 1899 (2), p. 80.

umière réfléchiée par la voûte céleste traverse encore une certaine couche d'air avant d'arriver à notre œil. Il arrive donc de toutes parts de la *lumière de transmission* en un point de la terre. Quelle sera la résultante de cette réflexion et de cette transmission? Voilà le point sur lequel l'expérience peut nous renseigner plus sûrement que l'analyse mathématique.

Pour se placer vraiment dans les conditions de la nature il faudrait disposer d'un vase de forme hémisphérique, de grandes dimensions, rempli d'un liquide trouble, renversé sur un plan de verre et éclairé par un faisceau lumineux. En plaçant l'œil au centre de cette demi-sphère, l'observateur pourrait examiner toutes les directions et en noter les particularités. La réalisation et la manipulation de ce vase seraient, à la vérité, inconfortables, sinon impossibles, mais on peut simplifier les choses parce qu'il suffit, en somme, de faire les observations dans les deux directions capitales : celle de la lumière incidente et celle qui lui est perpendiculaire. On rencontre alors les points où ont lieu, dans le ciel, le maximum d'éclairage (la direction du soleil) et le maximum de polarisation ou de coloration bleue. Nous avons donc construit seulement la partie de la demi-sphère comprise entre deux parallèles embrassant le centre et distants de quelques centimètres, de manière à réaliser la forme figurée dans le croquis ci-dessous. Le vase était en zinc, noirci à l'intérieur. Sur sa



périphérie se trouvait une fenêtre en verre *F* par laquelle passait, en un large faisceau parallèle, la lumière incidente. En regard de cette fenêtre, et parallèlement à celle-ci, il s'en trouvait une autre *a b* qui permettait d'observer la lumière dans la direction du rayon incident. Enfin, pour faire les observations dans une direction perpendiculaire, on disposait d'une troisième fenêtre *a c* qui laissait passer la lumière diffusée par le liquide trouble dont le vase était rempli.

L'appareil était placé sur un trépied de manière à recevoir la lumière du ciel. Un drap noir enveloppait le trépied et formait, de cette façon, une chambre obscure dans laquelle se plaçait l'observateur.

Les premières observations eurent lieu avec de l'eau pure troublée à l'aide d'une solution de résine mastic dans l'alcool, au point de donner, par réflexion directe, une teinte bleuâtre bien évidente. Dans ces conditions, on voit la lumière incidente *jaune-orange*; elle ne paraît pas polarisée; la lumière réfléchie par le liquide, reçue par la fenêtre *a c*, n'est pas bleue, comme on aurait pu le croire, mais d'un jaune grisâtre ayant peut-être une pointe de vert. Elle est fortement polarisée.

Il est par conséquent prouvé, par l'expérience, que la lumière renvoyée par les couches profondes d'un milieu trouble, qui paraît cependant bleu à sa surface dans les conditions ordinaires, se dépouille de ses rayons bleus quand elle traverse le trouble. Si l'air se comportait donc véritablement comme un milieu trouble, il ne révélerait pas de coloration bleue à un observateur qui regarderait dans une direction perpendiculaire à celle du soleil, mais il laisserait percevoir une teinte grise mêlée d'un peu de jaune. En un mot, la *théorie physique* du bleu du ciel n'est pas d'accord avec les résultats de l'observation.

Il en est tout autrement de la *théorie chimique*. Pour nous en assurer, nous n'avons qu'à colorer l'eau en y dissolvant plus ou moins de *bleu de méthyle*, couleur qui se rapproche beaucoup du bleu du ciel, quand elle est convenablement diluée. On troublera ensuite le liquide, comme précédemment, à l'aide d'une solution de mastic. Il est bien entendu qu'il devra exister un certain rapport entre le degré du trouble et l'intensité de la coloration pour qu'on se trouve dans de bonnes conditions d'observation : on atteint facilement ces rapports après quelques essais.

Ces dispositions étant prises, l'effet observé dans l'appareil est bien différent. Dans la direction de la lumière incidente, on voit du *vert sombre* (combinaison du jaune produit par le trouble et le bleu dû à la matière colorante) si l'intensité de la couleur bleue du liquide est assez forte et du *bleu* dans la direction de la lumière réfléchie. A mesure qu'on fait usage de liquides de moins en moins colorés en bleu, la lumière incidente perd de plus en plus de son ton

verdâtre pour gagner le jaune clair et se rapprocher ainsi de la couleur ordinaire de la lune et du soleil, tandis que la lumière réfléchie par le liquide reste bleu avec peu de changement dans sa nuance.

Il résulte de ces observations qu'un milieu trouble ne peut paraître bleu à un observateur qui s'y trouve plongé que s'il a une couleur bleue propre. Alors il y aura, comme nous le voyons dans l'air, une direction où l'intensité du bleu sera plus forte; elle sera perpendiculaire à la lumière incidente et elle sera aussi le lieu où la polarisation de la lumière aura son maximum. Il est entendu toutefois que la coïncidence de ces deux maxima ne prouve en aucune façon que les deux phénomènes procèdent de la même cause.

On a néanmoins objecté à la *théorie chimique* que le bleu d'absorption de l'air était si faible qu'il ne pouvait pas avoir d'importance. Cette affirmation est au moins gratuite, car jamais on n'a observé de l'air pur, privé de tout trouble, sur une épaisseur suffisante pour conclure avec certitude. On a cru à la faiblesse de la couleur propre de l'air parce que des objets éloignés, des montagnes, par exemple, ne se colorent pas aussi fortement en bleu qu'on s'y attendait. Mais on a oublié que les couches inférieures de l'air colorent en même temps la lumière en jaune, ou en rouge, du chef des poussières qu'elles renferment toujours et que ce fait suffit pour effacer, en tout ou en partie, la couleur bleue propre de l'air. Ce n'est qu'après ou avant les pluies, lorsque l'air est débarrassé autant que possible de ses poussières, que les montagnes éloignées paraissent bien bleues; elles affectent même parfois une teinte extraordinaire.

Mais si l'on ne peut soumettre à l'examen une couche d'air de plusieurs kilomètres d'épaisseur, il est cependant possible de se renseigner d'une autre façon.

On sait que la plupart des liquides transparents volatils donnent des vapeurs ayant souvent le même pouvoir absorbant que le liquide; en d'autres termes, que la couleur du corps à l'état de gaz est la même à peu de chose près qu'à l'état liquide. Tyndall a constaté la chose pour l'eau et sa vapeur. Tout le monde sait, en outre, que le chlore liquide a la même couleur qu'une couche équivalente de chlore gazeux. Il en est de même pour le brome. Si, pour le peroxyde d'azote et l'anhydride nitreux le même fait ne s'observe pas, c'est que l'on a affaire, ici, à un changement d'espèce chimique pendant la volatilisation.

Ceci posé, il est admissible que l'air ait la même couleur à l'état liquide et à l'état de gaz quand, bien entendu, le liquide est limpide et non troublé par des corps solides (anhydride carbonique, glace, etc.). Or on sait aujourd'hui que l'oxygène et les composés oxygénés contenus généralement dans l'air, hormis l'anhydride carbonique, sont des corps bleus, tandis que l'azote serait incolore ou faiblement orangé. On peut donc faire abstraction de l'azote. Nous irons même plus loin : nous ferons abstraction de tout ce que l'air renferme en dehors de l'oxygène, et nous allons voir à quel résultat vont nous conduire les observations faites déjà par Olszewski sur la couleur de l'oxygène liquide (*).

L'air pesant, dans les conditions normales, 1,033 grammes par centimètre carré et renfermant, en poids, 23.2 % d'oxygène, il y aura $\frac{1,033 \times 23.2}{100} = 239,6$ grammes d'oxygène par centimètre carré.

Si cette substance était à l'état liquide, on calculerait sa hauteur en divisant les 239^{mm}6 par sa densité. Celle-ci est si voisine de l'unité qu'il est permis de prendre pour diviseur 1 dans ce calcul approximatif; alors l'épaisseur de la couche d'oxygène liquide qui entourerait la terre serait 239^{mm}6, soit en nombre rond : 2^m40. Or Olszewski a reconnu que l'oxygène a une couleur bleue décidée (« eine entschieden hellblaue Farbe ») sous une épaisseur de 30 millimètres, et toute personne qui a manipulé l'air liquide connaît sa couleur bleue. D'après ces données, il est plutôt surprenant que le ciel ne soit pas d'un bleu plus foncé. C'est que, sans doute, l'illumination de l'atmosphère ne commence pas, d'une manière efficace, à ses confins et que les tons rougeâtres dus au trouble de l'air agissent pour éteindre une partie du bleu.

Il est à peine nécessaire de rappeler que l'ozone qui se trouve toujours en petite quantité, il est vrai, dans les régions élevées de l'atmosphère est si bleu qu'une couche de quelques millimètres de ce corps à l'état liquide est presque opaque et, en outre, que la vapeur d'eau ainsi que le peroxyde d'hydrogène sont également des corps bleus.

On est donc en droit de demander comment il serait vraiment

possible que notre atmosphère ne fût pas déjà suffisamment bleue du chef des quatre corps bleus qu'elle renferme.

Enfin, examinons la valeur d'une dernière objection formulée contre la théorie chimique du bleu de l'air :

On a dit que si l'air était bleu par lui-même, le maximum du bleu ne devrait pas se marquer dans une direction perpendiculaire à celle des rayons du soleil, mais dans celle-ci même; le soleil, la lune et les étoiles devraient être d'autant plus bleus qu'ils seraient plus rapprochés de l'horizon de l'observateur (*).

C'est une profonde erreur. On se demande même si son auteur n'a pas oublié qu'à l'horizon, plus que partout ailleurs, l'air est chargé des poussières qui engendrent les tons rougeâtres près d'être complémentaires du bleu et qui déterminent son altération sinon sa suppression. Mais alors même que le soleil nous enverrait ses rayons à travers les couches les plus pures de l'air, le bleu serait encore atténué parce que ces rayons ne sont pas blancs; ils se sont colorés en chemin en abandonnant au milieu qu'ils ont traversé une partie de leur contingent le plus réfrangible. Nous ne dirons rien de l'effet que produit aussi sur la sensation de couleur un éclairage intense et qui revient pour ainsi dire à émousser notre sensibilité. C'est là un phénomène compliqué, d'un ordre étranger à la physique. Nous nous bornerons à faire remarquer que c'est la partie du ciel la moins éclairée directement par le soleil qui nous paraîtra nécessairement la plus bleue.

D'une manière plus générale nous reconnaissons que la conséquence optique du trouble de l'air sur la nuance du bleu du ciel variera avec les lieux et surtout avec l'altitude. Un observateur n'éprouvera pas la même sensation de bleu quel que soit l'endroit où il se trouve. A la surface du sol, l'observateur recevra les rayons dont la couleur sera altérée par les poussières qui ne font jamais défaut dans les basses régions. Le bleu sera atténué, plus ou moins compensé par les tons rougeâtres créés par le trouble. Plus haut, au-dessus de cette couche de poussière, par exemple sur une montagne élevée, le bleu devra apparaître dans toute sa pureté. Plus haut encore, il deviendra de plus en plus sombre, non seulement par le

(*) Anzeiger, Nr. XII der K. Academie der Wissenschaften in Wien. Math. naturw. Classe, 4. Mai, 1899.

(*) Chem. Zeitung., Repertorium, p. 66, 1891.

fait de la diminution d'épaisseur de la matière bleue, mais surtout parce que l'air sera moins illuminé, la diffusion de la lumière ayant lieu d'autant moins complètement que la couche d'air traversée est moins épaisse. On constatera là une diminution de couleur et une diminution de lumière; ce sera le prélude à l'obscurité des espaces planétaires.

Nous croyons avoir rencontré les arguments principaux qui ont été produits jusqu'à présent à l'appui des deux théories de la coloration du ciel. Il résulte, pensons-nous, de leur examen critique que le bleu du ciel ne saurait être regardé comme la conséquence exclusive ni même prédominante du trouble de l'air; il est plutôt la couleur propre de l'air, comme le bleu de l'eau est la couleur propre de ce liquide. Si l'air était incolore par lui-même, aucun des phénomènes de polarisation du ciel ne serait supprimé, car la polarisation est indépendante de la couleur de la lumière et elle n'est que la suite de sa diffusion dans le milieu trouble. L'illumination du ciel ne serait pas non plus diminuée; mais le jour nous paraîtrait plus blanc, surtout dans les parties élevées, tandis qu'à l'horizon et peut-être aussi dans la direction de la lumière incidente, il manifesterait des teintes plus ou moins orangées par suite du trouble particulière des régions basses de l'air. Si nous restituons, à présent, à ce milieu fictif sa couleur bleue, propre, nous aurons l'image fidèle de ce que nous montre le ciel. Partout où régnaient les tons orangés, le bleu sera lavé de blanc, ou supprimé, ou bien l'orangé et le rouge domineront : le résultat sera réglé suivant l'intensité relative des couleurs. Mais là où le blanc seul était, le bleu s'étalera dans toute sa pureté.

On le voit, il y aurait entre les phénomènes de coloration de l'air et ceux des eaux plus d'un point commun. Les eaux aussi sont illuminées et leur lumière est polarisée; mais si l'eau était incolore par elle-même, les mers et les lacs nous paraîtraient blancs ou colorés en jaune-orange plus ou moins brun. L'association du bleu de l'eau avec ces teintes produit les effets que nous constatons, et si les tons brunâtres dominent dans l'eau, par suite de la nature des matières qui les troublent, toutes les teintes, depuis le vert bleuâtre jusqu'au brun verdâtre, en passant par le vert pur, pourront se réaliser.
