

## Sur l'origine de la couleur bleue du ciel.

(Bulletin de l'Académie royale de Belgique, 3<sup>e</sup> sér., t. XXXVI, n<sup>o</sup> 12, pp. 504-518, 1898.)

### *État de la question.*

La cause de la coloration du ciel a, depuis longtemps déjà, préoccupé les physiciens, sans que cependant le problème se trouve résolu, aujourd'hui, de manière à satisfaire tous les esprits.

Il n'entre pas dans le cadre de cette note de retracer tous les travaux exécutés sur ce sujet depuis l'époque où Newton fit voir, le premier, que des corps peuvent paraître colorés dans certaines conditions, sans toutefois posséder une couleur qui leur soit propre. Une histoire suffisamment développée de la question a été faite par J.-M. Pernter, il y a quelques années (\*). Je puis me borner à mentionner seulement les recherches principales, indispensables pour comprendre l'observation nouvelle que je désire faire connaître par ces lignes et la valeur qu'elle peut avoir pour la solution du problème.

On a attribué, depuis longtemps, la lumière de l'atmosphère à une *réflexion* ou à une *diffusion* des rayons du soleil dans l'air. En effet, si l'atmosphère était absolument transparente, elle serait obscure; le disque lumineux du soleil nous apparaîtrait sur le fond noir des espaces stellaires et les phénomènes de l'aurore et du crépuscule ne

---

(\*) *Schriften des Vereins zur Verbreitung naturw. Kenntnisse*, Wien, t. XXX, pp. 197-219, 1890. A paru, en résumé, dans les *Fortschritte der Physik*, t. XLVI (3), p. 441, 1896.

se produiraient pas. La preuve physique directe de la réflexion atmosphérique a été fournie par Brewster. Ce physicien constata que la lumière du firmament n'est pas de la lumière ordinaire, mais bien de la lumière partiellement polarisée. Le maximum de la polarisation a lieu quand, tournant le dos au soleil, on regarde le ciel dans une direction *perpendiculaire* aux rayons qui nous atteignent. Il résulte immédiatement de là que l'angle de polarisation atmosphérique est de 45 degrés, car l'angle de 90 degrés correspondant au maximum de polarisation, comprend l'angle d'incidence des rayons directs et l'angle des rayons réfléchis, qui sont nécessairement égaux. L'observation de Brewster a été confirmée par Arago, Babinet, Herschel et par d'autres savants; on peut donc regarder comme certain que le ciel nous envoie de la lumière *réfléchie*.

Ce point étant acquis, Clausius s'est posé la question de savoir *sur quoi* la lumière du soleil se réfléchit. Comme il était difficile d'admettre une réflexion de la lumière dans l'air sur l'air, il a cherché, par l'analyse mathématique des phénomènes de réflexion, les conditions physiques que devaient remplir les particules servant de *miroirs* pour que les propriétés optiques de notre atmosphère fussent satisfaites. Son travail, qui a paru en 1849 (\*), conduit, en résumé, aux résultats que voici. La réflexion ne peut avoir lieu sur des particules qui seraient répandues dans l'air comme une fine poussière (\*\*), sinon la transparence de l'air se trouverait diminuée plus fortement que nous ne le constatons; elle ne peut pas non plus se faire sur des couches d'air de densités différentes, enveloppant concentriquement la terre, car la lumière du soleil, loin d'atteindre notre œil, serait renvoyée vers les espaces planétaires. Si l'on admet plutôt la présence, dans l'air, de *particules d'eau*, on rencontre une difficulté. Un milieu constitué de cette façon ne transmettrait pas la lumière *en ligne droite*. Les réfractions subies par un rayon passant successivement par des gouttelettes frappées, en général, sous un angle quelconque, aurait pour effet une *diffusion* qui nous effacerait le contour du disque solaire, comme si nous le regardions au travers

(\*) *Annales de Poggendorff*, t. LXXVI, pp. 161-188.

(\*\*) Cette explication a reparu néanmoins en 1872; voir l'article de COLLAS Sur la cause de la couleur bleue du ciel, dans *Les Mondes* (2), t. XXIX, p. 647; il y est dit que l'air renfermerait des poussières de silice (!).

d'un verre dépoli. Il ne reste donc qu'une hypothèse, celle de corps transparents creux, ou de vésicules d'eau. Si on l'accepte, on s'assure facilement que non seulement la réflexion de la lumière s'explique, mais encore que la lumière réfractée, c'est-à-dire celle qui passe par la vésicule transparente, doit continuer son chemin dans une direction sensiblement la même. En effet, la lamelle sphérique d'eau qui constitue la vésicule peut être assimilée, aux deux points où elle est percée par le rayon lumineux, à deux lamelles *planes parallèles*, extrêmement petites, et l'on sait que la réfraction à la sortie d'un milieu compris entre des plans parallèles compense la réfraction à l'entrée. De cette façon, la direction de la lumière qui traverse une vésicule sera conservée dans son ensemble. Cette hypothèse est, en outre, avantageuse à la réflexion, car elle met sur le chemin du rayon lumineux quatre changements de milieu par vésicule, le rayon incident se réfléchissant sur la surface externe et sur la surface interne de la vésicule à l'entrée et à la sortie. L'intensité de la partie réfléchie de la lumière devra donc l'emporter de beaucoup sur celle de la partie réfractée.

Clausius regarde donc comme très probable, sinon comme démontré, que la vapeur d'eau passe, dans l'air, par la forme vésiculaire avant de se condenser en gouttes proprement dites. La cause de l'illumination du firmament serait dans la forme de ce premier degré de la condensation.

Passant ensuite à la question de l'origine du bleu du ciel ainsi qu'aux phénomènes de coloration de l'aurore et du crépuscule, Clausius admet, dans un autre mémoire (\*), que le bleu n'est pas propre à l'atmosphère, mais qu'il apparaît, dans les vésicules d'eau, à la suite de l'interférence des rayons de grande longueur d'ondes. Le firmament ne serait pas bleu par suite de l'*absorption* des rayons complémentaires, comme l'est une fleur bleue, par exemple, mais sa coloration aurait la même cause que l'irisation des bulles de savon dont les parois sont devenues suffisamment minces. Toutefois, il y aurait à noter que le bleu du ciel serait exclusivement *de premier ordre*, c'est-à-dire de même origine que celui qui, dans l'expérience bien connue des *anneaux de Newton*, entoure la *tache centrale obscure*.

(\*) *Annales de Poggendorff*, t. LXXVI, pp. 188-195.

Les tons rouge orangé de l'aurore ou du crépuscule, d'autre part, sont aussi expliqués bien simplement. En effet, la lumière traversant les vésicules doit être nécessairement complémentaire du *bleu*; mais nous ne pourrions la percevoir que si les rayons du soleil ont passé par un nombre considérable de vésicules, car, d'après ce qui a été rappelé plus haut, la partie de la lumière réfractée est bien plus faible que la partie réfléchie (\*). Cette condition se trouve réalisée lorsque le soleil est à l'horizon; alors le nombre de vésicules traversées est bien plus grand.

La théorie de Clausius paraît bien expliquer les faits observés. Elle a trouvé, en outre, un appui dans les expériences de G. Govi sur la *polarisation de la lumière par diffusion* (\*\*), ainsi que dans celles de Tyndall sur l'*illumination des nuages* naissants (\*\*\*). Le célèbre physicien anglais a notamment fait voir que si l'on éclaire fortement un mélange d'air, de vapeur de nitrite de butyle ou d'amyle et d'acide chlorhydrique, sous une pression très réduite, il se produit « un azur splendide qui devient d'abord de plus en plus prononcé, arrive à son maximum de pureté et d'intensité, et passe ensuite, les particules devenant plus grosses, au bleu blanchâtre ». Cette lumière bleue ayant été reconnue *polarisée*, Tyndall a regardé son expérience comme reproduisant, au moyen de substances spéciales, le phénomène de la coloration bleue du ciel; il résulterait de là que ce bleu serait engendré par la réflexion et non par une absorption propre à l'atmosphère.

Quoi qu'il en soit, l'explication proposée par Clausius a soulevé des objections de la part de J. W. Strutt (iv), au moins en ce qui concerne l'existence réelle de *vésicules* de vapeur dans l'air. Le savant anglais a établi, de son côté, par l'analyse mathématique, que des gouttelettes *pleines* pouvaient aussi réfléchir beaucoup mieux les rayons bleus. Il suffit pour cela que leur diamètre soit extrêmement

---

(\*) Si l'on prend pour *unité* la lumière totale, la partie réfléchie serait 0.922 et la partie réfractée 0.078, dans les limites extrêmes, d'après les calculs de Clausius (*loc. cit.*, p. 194).

(\*\*) *Comptes rendus*, t. LI, p. 360, 1860.

(\*\*\*) *La chaleur mode de mouvement* (traduction de l'abbé Moigno). Paris, 1874, pp. 517 et suivantes.

(iv) *Phil. Mag.* (4), t. XLI, p. 274, 1871.

petit et de l'ordre de grandeur des longueurs d'ondes. Ce désaccord entre Clausius et Strutt n'a cependant pas d'importance pour le sujet qui nous occupe.

Ce résumé de la théorie de l'illumination du firmament porte à croire, malgré tout ce qu'il a forcément d'incomplet, que la « grande énigme » du bleu du ciel, comme l'appelait Herschel, a trouvé son explication. Néanmoins, la solution proposée laisse encore place au doute.

Il résulte des expériences mêmes de Tyndall que la lumière réfléchie par un *nuage naissant* n'est bleue que *pendant peu d'instant*s; elle passe bientôt au bleu pâle, puis au blanc. Cette *fugacité* contraste avec la *fixité* et avec l'uniformité du bleu d'un ciel serein. Si l'on admet même, avec Clausius (\*), qu'il se forme continuellement de nouvelles vapeurs, on ne comprend pas sans autre explication pourquoi les vésicules devenues trop épaisses pour former du bleu de premier ordre s'évaporeront à nouveau pour en reproduire de plus fines, avec une régularité et une précision telles que l'œil ne peut saisir aucune variation dans la nuance du ciel.

D'autre part, la théorie de Clausius veut que le bleu du ciel soit un *bleu de premier ordre*; or celui-ci est *plus gris* que celui du ciel: on s'en assure facilement par l'examen des anneaux de Newton. Cette théorie postule encore que la couleur des rayons de l'aurore et du crépuscule soit exactement complémentaire du bleu du ciel; or, d'après E. Brücke (\*\*), il n'en serait pas ainsi. Ce physicien émet donc explicitement un doute sur l'origine du bleu du ciel et il regarde les couleurs crépusculaires comme indépendantes, au point de vue de leur production, du bleu du firmament.

Enfin, je rappellerai un fait bien connu de toutes les personnes qui ont fait de grandes ascensions. A mesure que l'on s'élève, le bleu du ciel perd de plus en plus son ton *blanchâtre*; au-dessus de 4,000 mètres environ, le firmament paraît *bleu sombre*. En même temps, le *degré de polarisation* de la lumière va diminuant (Tyndall). Il me paraît que la vraie conclusion à tirer du parallélisme de ces deux phénomènes, c'est que la cause de la polarisation réside dans

---

(\*) *Loc. cit.*, p. 192.

(\*\*) *Poggendorff Annalen*, t. LXXXVIII, p. 363.

ce qui *blanchit* le ciel et non dans ce qui le *bleuit*. Ce qui empêche de se prononcer catégoriquement, c'est l'indétermination du problème : dans la vallée, on observe un bleu moins sombre, mais on a devant soi une épaisseur d'air plus grande et l'on pourrait, avec Tyndall, attribuer la plus forte polarisation à une réflexion plus multipliée des rayons lumineux.

Quoi qu'il en soit de la valeur de ces doutes, il ne sera pas sans utilité de mentionner une observation que je crois nouvelle.

#### *Observations nouvelles.*

Pour résoudre l'indétermination à laquelle il vient d'être fait allusion, on peut opérer, me paraît-il, de la manière suivante.

Si l'on regarde la polarisation comme la preuve de l'origine *par réflexion* du bleu du ciel, il faut nécessairement admettre qu'en interceptant les rayons bleus à l'aide d'une substance de couleur exactement complémentaire, on éteindrait, par le fait même, la partie polarisée de la lumière du firmament. Si, au contraire, l'atmosphère devait sa couleur à une *absorption*, la suppression de la lumière bleue n'arrêterait pas la polarisation ; celle-ci serait alors due plutôt à la réflexion du contingent *blanc* de la lumière du ciel. En réalité, le phénomène à étudier est plus compliqué que les lignes précédentes le supposent. La polarisation peut être due en partie à la formation du bleu et en partie aux réflexions nous amenant de la lumière blanche. Dans ce cas, l'interposition de la couche de couleur complémentaire ne supprimera que partiellement la polarisation.

Voyons ce que nous apprend l'observation.

Le choix de la matière dont la couleur est complémentaire du bleu du ciel est une conséquence des recherches que j'ai eu l'honneur de communiquer dernièrement à l'Académie sur la *Cause de l'absence de coloration de certaines eaux limpides naturelles* (\*). On se souvient que l'*hématite*, en parcelles assez fines pour être transparentes, est de couleur complémentaire *au bleu de l'eau*. Si l'on regarde le ciel à travers ces lamelles suspendues dans un peu d'eau, on constate aussi la disparition du bleu. Toutefois le maniement des lamelles d'héma-

tite est très incommode. J'ai renoncé à leur emploi pour me servir des solutions ferriques *limpides* dont la couleur paraît la même. Celle qui a le mieux répondu aux conditions désirées a été une solution de sulfocyanure ferrique. Comme l'*hématite*, elle *éteint aussi le bleu de l'eau pure*. Pour la préparer, on ajoute une goutte d'une solution de chlorure ferrique, à 5 % environ, à quelques centimètres cubes d'une solution de sulfocyanure de potassium à 10 %, puis on étend d'eau jusqu'à ce que l'intensité de la teinte rouge-orange soit en rapport avec celle du bleu de l'eau que l'on observe dans un tube de longueur suffisante. En interposant entre l'œil et le tube une auge à faces parallèles contenant le composé ferrique, la sensation du bleu disparaît.

Si l'on regarde, de même, le ciel serein au travers de cette auge, on remarque aussi la disparition du bleu pour une concentration convenable du composé ferrique. Celle-ci est à chercher par tâtonnements, d'après l'état du ciel. Quand on la possède, on voit dans le ciel comme une tache *blanche*, d'intensité lumineuse un peu affaiblie, ce qui doit être.

Ce résultat étant acquis, on place entre l'œil et l'auge un polariscope (je me suis servi de celui de Savart, muni d'une lame de quartz ou de gypse), et l'on constate nettement que *la lumière, bien que privée de bleu, est encore polarisée dans la même proportion que celle du ciel non regardé à travers l'auge*. En comparant le degré de polarisation avec celui du ciel nu, il ne m'a pas été possible de trouver une différence. J'ai répété souvent cette observation pendant les nombreux jours sereins des mois de septembre et d'octobre derniers, à diverses heures, et je suis arrivé invariablement au même résultat.

#### *Conclusions.*

On peut conclure, je crois, de ces observations que le fait de la polarisation de la lumière du ciel ne prouve pas nécessairement l'absence de couleur propre de notre atmosphère. La suppression du bleu paraît sans influence appréciable sur le degré de polarisation du firmament. On est plutôt conduit à admettre que la polarisation est due à la réflexion de la lumière sur des particules (vésicules ou gouttelettes de vapeur) assez épaisses pour ne pas être le siège de

(\*) *Bulletin de l'Académie royale de Belgique*, 3<sup>e</sup> série, t. XXXVI, p. 266, 1898.

*phénomènes d'interférence.* Le *bleu* du ciel ne serait pas, comme on l'a pensé généralement, la cause de l'illumination de l'atmosphère, mais nous le percevrions comme une conséquence de celle-ci. La lumière du soleil, en pénétrant dans notre atmosphère, y subirait une diffusion partielle à la suite de réflexions causées, très probablement, par les vésicules ou les gouttelettes de vapeur d'eau. Si le milieu était absolument incolore, le ciel nous apparaîtrait *blanc*, mais moins éclairant dans la direction perpendiculaire aux rayons solaires. Or, le fait que nous voyons le ciel *bleu* nous oblige donc à admettre que l'atmosphère n'est pas absolument incolore, mais bleue.

Nous devons examiner à présent si cette conclusion se concilie avec l'*optique météorologique*.

D'abord, on remarquera que la réflexion de la lumière, dans l'air, sans phénomène de coloration, n'exclut en aucune façon la polarisation. Arago a vu, déjà en 1834, qu'il suffit que la lumière passe par une couche d'air de 50 mètres, troublée par des vésicules de vapeurs, pour se polariser notablement (\*). Hagenbach a fait la même remarque en 1872 (\*\*). Enfin, Lallemand avait déjà émis l'opinion que le *bleu* du ciel n'est pas polarisé, mais que la lumière polarisée est *blanche* (\*\*\*). Les considérations théoriques sur lesquelles ce physicien se base, sont même appuyées sur une expérience; néanmoins, comme celle-ci peut être discutée, je n'insisterai pas.

L'atmosphère aurait-elle effectivement une couleur propre : le bleu? Non seulement rien ne s'oppose à ce qu'on admette la chose, mais je dirai que cette conclusion découle de nos connaissances actuelles. En effet, parmi les substances dont le mélange forme l'air, il en est *quatre* qui ont la couleur *bleue*. D'abord la vapeur d'eau. Tyndall dit à ce sujet (iv) que « la vapeur d'eau et l'eau liquide absorbent la même classe de rayons; c'est une manière d'établir que la couleur de l'eau pure est aussi la couleur de sa vapeur ». Il ajoute que probablement l'atmosphère doit à la vapeur d'eau d'être un milieu de couleur bleue, car on a remarqué que le bleu du firmament et des montagnes lointaines de l'horizon se fonçait en

(\*) *Loc. cit.*, p. 427.

(\*\*) Das Licht des Landschaftsduftes. (*Der Naturforscher*, t. V, pp. 23-24, 1872.)

(\*\*\*) *Comptes rendus*, t. LXXV, p. 707, 1872.

(iv) *La chaleur mode de mouvement*, p. 365.

proportion de la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air. On se rappelle, en outre, que notre regretté confrère Ch. Montigny (\*) a vu, dans ses nombreuses observations sur la scintillation des étoiles, la couleur bleue apparaître plus fréquente et plus intense chaque fois que l'air était plus humide.

Enfin le fait que le bleu de l'eau et le bleu de l'air se trouvent éteints par la même substance (voir plus haut) ne parle certainement pas contre une origine commune.

D'autre part, l'oxygène lui-même n'est pas incolore. K. Olszewsky (\*\*) dit que l'oxygène liquide exempt d'ozone est nettement *bleu* sous une épaisseur de 50 millimètres. Sa coloration est donc environ cinquante fois plus prononcée que celle de l'eau pure, puisque celle-ci ne commence à se manifester que sous 4,500 millimètres d'épaisseur. Ce physicien s'est demandé aussi si le bleu du ciel ne serait pas dû à la présence de l'oxygène.

Dans les régions plus élevées de l'atmosphère, là où les émanations organiques du sol deviennent plus rares, l'air renferme souvent, sinon toujours, de l'ozone et du peroxyde d'hydrogène. Ces substances sont aussi *bleues*. D'après Olszewsky (\*\*\*), l'ozone liquide est si bleu qu'une couche de 2 millimètres est presque opaque, et, d'après Hautefeuille et Chapis (iv), l'*oxygène ozonisé* autant que possible à la température ordinaire est *bleu* sous 1 mètre d'épaisseur. J'ai montré moi même (v) que le peroxyde d'hydrogène pur a une couleur bleue environ deux fois aussi foncée que celle de l'eau. Il n'est donc plus possible de regarder l'air comme absolument incolore. D'ailleurs, W.-N. Hartley rappelle, dans son travail *Sur les limites du spectre solaire, sur le bleu du ciel et la fluorescence de l'ozone* (vi), que Liveing et Dewar ont constaté que l'oxygène de l'air a effectivement un fort pouvoir absorbant pour les rayons à grandes longueurs d'ondes. Il attribue lui-même le bleu du ciel à la *fluorescence* des gaz de l'atmo-

(\*) *Bulletin de l'Académie royale de Belgique*, 3<sup>e</sup> série, t. VII, p. 304, 1884.

(\*\*) *Chemiker Zeitung* (Repertorium), p. 66, 1891.

(\*\*\*) *Monatshefte für Chemie*, t. VIII, p. 69.

(iv) *Comptes rendus*, t. XCI, p. 522.

(v) *Bulletin de l'Académie royale de Belgique*, 3<sup>e</sup> série, t. XXIX, pp. 363-384, 1895.

(vi) *Fortschritte der Physik*, t. XLV, 3. Abth., p. 239, 1889.

sphère, principalement à l'oxygène et à l'ozone. Il regarde l'ozone comme se trouvant en quantité suffisante dans l'air pour donner à l'atmosphère une couleur bleue d'absorption.

Il reste à examiner si les phénomènes lumineux de l'aurore et du crépuscule ne sont pas un obstacle à notre manière de voir.

On s'en souvient, d'après la théorie de Clausius, le bleu du ciel et les lueurs rouges du matin et du soir auraient une origine commune, le bleu étant le résultat de la *réflexion* et le rouge orangé celui de la *réfraction* des rayons solaires dans les vésicules de vapeur d'eau.

En déplaçant à présent l'*origine du bleu*, on doit se demander s'il n'y a pas lieu de fournir une explication nouvelle des lueurs crépusculaires. La réponse à cette question se trouve dans les résultats obtenus par M. le Prof<sup>r</sup> Carl Barus, dans ses recherches sur *Les couleurs des condensations nuageuses* (\*). L'auteur a constaté que ces couleurs permettent de distinguer sûrement la vapeur d'eau d'un amas de gouttelettes infiniment petites et qu'elles donnent en même temps une mesure pour les dimensions de ces dernières.

Il observait un jet de vapeur se détendant dans un tube de 0<sup>m</sup>60 de long, fermé par des plans de verre, tandis que la lumière passait par le tube dans la direction de l'axe. Le résultat général de ces observations peut se résumer en disant qu'une *condensation nuageuse* produit les phénomènes de coloration des milieux troubles. Suivant le diamètre des gouttelettes, la première lueur visible vire du *rouge* au *vert*.

Ce sont, en somme, des couleurs d'interférence, d'ordre supérieur, qui se produisent quand les dimensions des gouttelettes ont grandi au point de rendre impossible la formation du bleu de premier ordre. Si les rayons du soleil traversent donc, le matin ou le soir, des couches d'air chargées de gouttelettes dont les dimensions sont comprises entre 0<sup>mm</sup>00004 et 0<sup>mm</sup>0004, ils se coloreront de nuances diverses, *étrangères au bleu proprement dit du firmament*. Ces nuances ne seront pas nécessairement complémentaires du bleu du ciel, comme devaient l'être celles de la théorie de Clausius. La remarque

---

(\*) The colors of cloudy condensation. (*American meteorological Journal*, March, 1893.)

de E. Brücke à ce sujet (voir plus haut) n'est donc plus une objection. On sait, en outre, que l'apparition de lueurs *vertes*, à l'aurore ou au crépuscule, n'est pas un phénomène bien rare. M. de Maubeuge en a signalé récemment une extraordinaire qui a accompagné le lever du soleil derrière le massif du Sinaï, « en lançant à la première seconde de son apparition un rayon lumineux vert émeraude absolument pur et net (\*) ».

L'explication des couleurs crépusculaires peut donc être détachée de celle du bleu du ciel.

Pour terminer, je toucherai encore un point particulier qui semble étranger au sujet actuel, mais qui s'y rattache cependant au fond.

Lorsque Tyndall eut appelé de nouveau l'attention sur l'origine probable du bleu du ciel, on a cru que le bleu de l'eau pouvait être dû également à des phénomènes d'interférence. Cette opinion a été renouvelée récemment par M. R. Abegg (\*\*) et regardée comme certaine et irréfutable (*sicher richtig und unwiderleglich*), de sorte que, pour cet auteur, le bleu de l'eau serait à la fois bleu de *réflexion* et bleu d'*absorption*. Je crois que M. R. Abegg fait erreur : la réflexion de la lumière dans l'eau donne une illumination plus ou moins jaune orangé ou blanche, et non bleue. Pour trancher la question, il suffira d'éteindre la lumière bleue des eaux naturelles par sa couleur complémentaire et de s'assurer si, oui ou non, la *polarisation* disparaît en même temps et dans la même mesure. Je me propose de vérifier le fait sitôt que les devoirs de ma charge m'en laisseront le loisir.

---

(\*) *Comptes rendus*, t. CXXVII, p. 453, 1898.

(\*\*) *Naturw. Rundschau*, t. XIII, n° 14, 1898.