SUR LA COULEUR DE L'EAU;PAR M. J.-L. SORET ⁽¹⁾.

L'opinion des physiciens sur les causes de la couleur de l'eau n'est pas encore unanimement fixée, malgré le grand nombre de travaux qui ont été publiés sur ce sujet. Je crois cependant que la question est maintenant bien élucidée et que, sauf dans certains détails, le problème peut être considéré comme résolu; tout au moins la plupart des savants qui s'en sont occupés dans ces der-

(¹) Le présent article reproduit en partie une publication précédente sur le même sujet, mais rédigée à un point de vue différent. (Voyez *Archives des Sciences physiques et naturelles*, t. XI, p. 276; 1884.)

nières années se sont-ils arrêtés à peu près à la même explication, dont l'exposé succinct aura, pensons-nous, quelque intérêt pour les lecteurs du *Journal de Physique*.

L'eau, sensiblement incolore lorsqu'elle est prise sous un petit volume, présente une coloration bien marquée lorsqu'elle est en grande masse. Si elle se trouve au maximum de pureté qu'elle puisse atteindre dans la nature, la teinte est franchement bleue; c'est là le cas que nous considérons comme normal, celui qu'il faut expliquer en première ligne, quitte à examiner plus tard quelles sont les causes qui font souvent passer cette couleur du bleu au vert ou à d'autres nuances.

On peut admettre que la cause la plus ordinaire et la plus générale de la couleur propre des corps réside dans l'absorption qu'ils exercent sur la lumière qui les éclaire : ils sont de la couleur des rayons qu'ils laissent passer, ou, en d'autres termes, de la couleur complémentaire des rayons absorbés (¹). L'absorption constitue en effet l'un des facteurs principaux de la coloration de l'eau, qui

(¹) En ce qui concerne les milieux transparents et homogènes, tout le monde est d'accord sur ce point : une solution de sulfate de cuivre est bleue, parce qu'elle absorbe les rayons rouges, orangés, jaunes, en laissant passer les rayons verts, bleus, violets; un rubis est rouge, parce que les rayons les moins réfringibles du spectre sont transmis, tous les autres étant interceptés. Quant aux corps non homogènes, cette interprétation de la couleur propre est peut-être moins généralement adoptée, mais elle n'en est pas moins exacte; par exemple, une étoffe ou un papier teint a la même couleur par transmission et par réflexion : les fibres blanches formant le corps du tissu sont recouvertes comme d'un vernis par la matière colorante au travers de laquelle passent les rayons qui arrivent à l'œil soit par transmission plus ou moins directe, soit après réflexion intérieure sur les fibres du tissu.

Si j'insiste sur ce sujet, c'est qu'il faut reconnaître que la plupart des Traités élémentaires de Physique, tout en abandonnant l'ancienne théorie newtonienne de la couleur propre des corps, ne l'ont pas suffisamment remplacée : quelques-uns parlent à peine de ce phénomène, malgré son importance; d'autres se bornent à dire que les corps diffusent inégalement les différents rayons, ce qui est l'expression d'un fait, mais non une explication. Cependant, il y a des exceptions, parmi lesquelles je citerai le *Cours de Physique* de Verdet (t. II, p. 268), la *Physique médicale* de Wundt (traduction de Monoyer, 2^e édition, p. 398), ainsi que les Ouvrages spéciaux de Dove (*Darstellung der Farbentheorie*), de Rood (*Théorie scientifique des couleurs*). J'ai moi-même donné quelques développements à cette interprétation en faisant entrer en ligne de compte les phénomènes de polarisation accompagnant la diffusion de la lumière [*Sur la polarisation par diffusion de la lumière* (*Archives des Sciences physiques et naturelles*, t. L, p. 252; 1874)].

sous une épaisseur un peu considérable, intercepte les rayons les moins réfrangibles du spectre.

Mais, en outre, un second facteur d'une grande importance réside dans l'action des particules hétérogènes, très ténues, que l'eau même la plus pure tient toujours en suspension. Ces corpuscules jouent un double rôle : en premier lieu, ils diffusent et renvoient la lumière qui les atteint ; en second lieu, ils exercent une influence sur la coloration, car on sait qu'un milieu légèrement trouble ou opalescent laisse passer plus facilement les radiations les moins réfrangibles, tandis qu'il réfléchit plus fortement les rayons de courtes longueurs d'onde.

C'est à ces deux causes réunies qu'avec M. Tyndall ⁽¹⁾, M. Ricco ⁽²⁾, M. J. Leconte ⁽³⁾ et d'autres, j'attribue la coloration bleue de l'eau.

Nous allons examiner de plus près le rôle de ces facteurs en divisant le sujet en deux parties : 1^o l'exposé des propriétés physiques de l'eau, telles qu'on peut les étudier dans des expériences de laboratoire ; 2^o l'application aux apparences que l'on observe dans la nature.

I. *Coloration de l'eau par transmission.* — Prenons d'abord un long tube fermé à ses deux bouts par deux lames de verre, et remplissons-le d'eau que nous supposons chimiquement pure et absolument privée de particules en suspension. Faisons passer un faisceau de lumière blanche au travers de ce tube : nous pourrions étudier la coloration propre de l'eau en examinant la teinte de la lumière transmise. L'expérience a été réalisée par M. Bunsen ⁽⁴⁾, qui s'est servi d'un tube de verre noirci, de 2^m de longueur environ ; il a reconnu, soit en regardant un objet blanc au travers de la colonne liquide, soit en faisant tomber la lumière transmise sur

(1) *Sur la couleur du lac de Genève et de la mer Méditerranée* (*Nature*, 20 octobre 1870. *Archives des Sc. phys. et nat.*, t. XXXIX, p. 346 ; 1870). *On the colour of water* (*Proceedings of the Royal Institution*, t. VI, p. 189 ; 1871).

(2) *Studi spettrali sul colore delle acque* (*Memorie degli Spettrosc. italiani*, t. V, 1876 ; t. VIII, 1879). *Alcuni fenomeni, etc.* (*Rivista scientifico-industriale di Firenze*, 1882).

(3) *Physical studies on lake Tahoe* (*Overland Monthly*, novembre et décembre 1883, janvier 1884).

(4) *Ann. der Chem. und Pharm.*, t. LXII, p. 44.

un objet blanc, que l'eau est colorée en bleu par transmission. Cette expérience a été souvent répétée et variée, entre autres par M. Tyndall ⁽¹⁾, M. Beetz ⁽²⁾, M. Boas ⁽³⁾, M. V. Meyer ⁽⁴⁾, M. Ricco ⁽⁵⁾, qui ont tous obtenu une teinte bleue tirant plus ou moins sur le vert. Récemment M. Spring ⁽⁶⁾ l'a reprise avec des tubes d'une longueur de 5^m, recouverts d'une gaine noire, de manière à intercepter tout éclairage latéral, et en prenant de grandes précautions pour arriver à avoir de l'eau parfaitement pure et limpide; la quantité de particules en suspension devait être en tout cas trop petite pour exercer une influence appréciable. Dans ces conditions, la lumière transmise était d'un beau bleu.

D'après l'ensemble de ces travaux et de mes propres observations, je crois pouvoir admettre que plus l'eau est exempte de corpuscules hétérogènes, plus sa couleur par transmission se rapproche du bleu franc ⁽⁷⁾. Mais les eaux naturelles, même les plus pures, telles que celles du lac de Genève, donnent encore une teinte tirant sur le vert.

Spectre d'absorption de l'eau. — Pour arriver à une notion plus exacte de cette coloration par transmission, il convient de recourir au spectroscope. Plusieurs physiciens ont étudié le spectre d'absorption de l'eau et ont reconnu que, dans la partie visible, l'absorption va en diminuant avec la réfrangibilité, de sorte que, sous une épaisseur suffisante, les rayons rouges et orangés sont éteints ou très affaiblis.

Cette diminution de l'absorption avec la réfrangibilité n'est cependant pas continue. On remarque au moins une bande obscure dans l'orangé, un peu moins réfrangible que D, et dont le centre correspond à la longueur d'onde 600; c'est ce qui résulte des obser-

⁽¹⁾ *Glaciers of the Alps*, p. 254.

⁽²⁾ *Pogg. Ann.*, t. CXV, p. 137; *Archives*, t. XIV, p. 78; 1861.

⁽³⁾ *Beiblätter*, t. V, p. 797; 1881.

⁽⁴⁾ *Archives*, t. VIII, p. 257; 1882.

⁽⁵⁾ *Loc. cit.*

⁽⁶⁾ *Bulletin de l'Acad. Royale de Belgique*, t. V, n° 1; 1883.

⁽⁷⁾ Le mode d'éclairage influe notablement sur cette teinte; avec un écran blanc éclairé par la lumière diffuse du jour, la couleur est plus bleue qu'avec les rayons solaires directs.

vations de M. Schönn ⁽¹⁾, de MM. W.-J. Russel et Lapraik ⁽²⁾, et de celles que M. Sarasin et moi nous avons partiellement publiées ⁽³⁾. Cette bande commence à être nettement visible quand l'épaisseur d'eau atteint 2^m.

La brusque variation d'intensité lumineuse, coïncidant sensiblement avec la raie C, peut faire présumer l'existence en ce point d'un autre maximum d'absorption moins prononcé ⁽⁴⁾.

Dans les observations que nous avons faites, M. Sarasin et moi, nous avons trouvé que la limite du spectre, du côté le moins réfrangible, se rapproche lentement de l'orangé à mesure que l'on opère sur des épaisseurs de plus en plus grandes; il se manifeste, en outre, une pénombre prononcée qui s'étend jusqu'à la raie C. Avec un tube de 4^m, rempli soit d'eau du lac de Genève, soit d'eau de la Méditerranée, en employant la lumière solaire avec une fente large et en interposant un verre de cobalt qui facilite la visibilité du rouge extrême, nous avons trouvé que la limite du spectre était très voisine de α . Avec une épaisseur de 8^m (eau du lac), dans les mêmes conditions, la limite extrême, se rapproche beaucoup de B sans l'atteindre tout à fait. La pénombre jusqu'à C est très forte; au delà, on observe une reprise d'intensité suivie d'un espace beaucoup plus obscur, sans être cependant tout à fait noir, et qui correspond à la bande $\lambda = 600$, dont nous avons parlé. Au delà, l'intensité lumineuse va en augmentant.

Du côté le plus réfrangible du spectre, l'absorption est faible; mais, comme nous le verrons plus bas, elle dépend beaucoup de la limpidité. Avec un tube de 4^m rempli d'eau de lac et fermé par

⁽¹⁾ *Poggendorff's Annalen*, Ergänzungsband, VIII, p. 670.

⁽²⁾ *Nature*, 19 août 1880.

⁽³⁾ *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* du 10 mars 1884. M. Ricco (*loc. cit.*) a aussi aperçu cette bande avec l'eau de mer, mais sans en affirmer la réalité.

⁽⁴⁾ M. H.-W. Vogel, en examinant au spectroscopie la lumière de la grotte de Capri, a vu une bande d'absorption dans le vert entre E et α (*Praktische Spectralanalyse*, p. 253). M. Tacchini, en opérant sur la lumière émanant de la mer, a aussi observé cette bande, ainsi qu'un renforcement de la raie F (*voyez* le premier Mémoire de M. Ricco, *loc. cit.*). Dans les diverses eaux que nous avons examinées (y compris l'eau de la Méditerranée sous une épaisseur de 4^m), nous n'avons pas distingué ces deux maxima d'absorption. La discontinuité du spectre de l'eau se manifeste très nettement dans l'infra-rouge, comme l'ont montré les recherches de M. H. Becquerel (*Annales de Chimie et de Physique*, t. XXX, p. 38; 1883).

des lames de quartz, on distingue sans difficulté tout le violet et l'ultra-violet jusqu'au delà de Q. L'eau de mer, sous la même épaisseur, transmet les radiations au moins jusqu'à N [l'expérience n'a pu être faite complètement (1)].

Ajoutons que jusqu'ici on n'a qu'un petit nombre de déterminations des coefficients d'absorption de l'eau pour les diverses couleurs. M. Boas (2), en prenant comme unité l'épaisseur de 0^m,01, a obtenu les chiffres suivants :

Pour le rouge (verre rouge).....	0,9966
Pour le jaune (flamme de soude).....	0,99745
Pour le bleu (solution de sulfate de cuivre)....	0,9986

Il est à peine nécessaire de remarquer que la couleur de l'eau par transmission ne peut pas conserver exactement le même ton, quelle que soit la longueur de la colonne traversée par la lumière; en effet, quand l'épaisseur varie en progression arithmétique, l'absorption varie en progression géométrique, la raison de la progression étant différente suivant la réfrangibilité des rayons. Pour les faibles épaisseurs, non seulement la couleur sera moins saturée, mais encore elle s'écartera du bleu en se rapprochant du vert.

Influence des substances en dissolution dans l'eau. — Il est évident que, si l'eau n'est pas chimiquement pure, les substances en solution peuvent influencer sur la teinte de la lumière transmise. En particulier, de nombreuses substances organiques ont une couleur jaune ou brune, c'est-à-dire qu'elles absorbent les rayons bleus ou violets; si elles se trouvent dans une eau en proportion sensible, elles doivent éloigner du bleu la teinte de la lumière transmise pour la ramener au vert, et même au jaune ou au brun.

Les sels en dissolution dans l'eau de mer sont sensiblement incolores et ne paraissent pas influencer sur la teinte que l'on obtient.

(1) Je rappelle que, dans d'anciennes expériences [*Sur l'absorption des rayons ultra-violets* (Archives, t. LXI, p. 337; 1878)], j'ai trouvé qu'au travers d'une colonne d'eau, soigneusement distillée, de 1^m,16 de longueur, on peut distinguer la raie 28 du cadmium ($\lambda = 206,1$). Mais, pour les rayons plus réfrangibles encore, l'eau devient plus absorbante.

(2) *Loc. cit.*

Influence des particules solides en suspension. — Il est très difficile d'obtenir ce que M. Tyndall a appelé un milieu *optiquement vide*, c'est-à-dire un milieu absolument limpide et exempt de particules hétérogènes. On y arrive pour les gaz et quelques corps cristallisés présentant naturellement cet état. Pour les liquides, on ne parvient pas à l'élimination absolue des corpuscules hétérogènes ; cependant avec l'eau, tout au moins, on atteint à une pureté assez rapprochée du vide optique pour que l'on n'ait pas à craindre une influence sensible sur la lumière transmise. Les meilleurs moyens d'arriver à ce résultat sont, en premier lieu, la distillation avec destruction des matières organiques par le permanganate de potasse, surtout si la distillation s'effectue, sans ébullition, par évaporation superficielle dans des alambics en platine ⁽¹⁾ ; en second lieu, la fusion de glace très pure : ce procédé, qui a été indiqué par M. Tyndall, est peut-être difficilement applicable à la préparation de quantités un peu considérables d'eau.

Si, au lieu d'un liquide ainsi purifié, on prend de l'eau dans laquelle on met en suspension des particules nombreuses et relativement *grossières*, par exemple du sable, l'action exercée sur la lumière transmise se réduit à l'interception uniforme des rayons, quelle que soit leur réfrangibilité. Avec une épaisseur suffisante, on arrive à l'opacité, en ce sens que l'on ne peut plus *voir* au travers du liquide ; il pourra y avoir encore de la lumière diffuse provenant de réflexions et de réfractions multiples, surtout si la matière en suspension n'est pas opaque par elle-même. L'épaisseur de la couche produisant cette interception des rayons directs, à la façon d'un écran, dépend naturellement du nombre et de la grosseur des particules.

Lorsque les particules en suspension sont de très petites dimensions, ce premier effet se complique d'un second : le milieu exerce une absorption d'autant plus forte que les rayons sont plus réfrangibles. En faisant passer de la lumière blanche au travers d'une épaisseur trop faible pour qu'il y ait interception complète, on observe que tous les rayons sont affaiblis, mais non pas égale-

(1) Dans mon Mémoire sur l'*Illumination des corps transparents*, j'ai indiqué les résultats obtenus par différents modes de distillation ou de filtration (*Archives*, t. XXXVII, p. 146; 1870).

ment, en sorte que la lumière transmise est colorée en jaune, orangé ou même rouge, suivant que cette action devient de plus en plus prépondérante. C'est ce qu'il est facile de démontrer en prenant de l'eau sous une faible épaisseur, 0^m,04 ou 0^m,05, par exemple, de manière que sa couleur propre soit insensible, puis en y produisant un précipité très ténu. Ainsi quelques gouttes d'une dissolution étendue d'acétate de plomb ou d'azotate d'argent, etc., détermineront un trouble léger accompagné d'une teinte jaune, orangée ou rouge pour la lumière transmise. Au travers d'une auge remplie de ce milieu, on peut voir nettement des objets, on peut projeter une image et observer ainsi la coloration. L'analyse faite au spectroscope montre que les rayons bleus, violets et ultra-violets sont éteints⁽¹⁾.

M. Brücke a cherché à expliquer ce phénomène dont il a fait une étude approfondie⁽²⁾. La théorie qu'il a proposée n'est peut-être pas entièrement satisfaisante.

Quoi qu'il en soit, le fait expérimental demeure incontestable, et son influence sur la couleur de la lumière transmise au travers de l'eau est facile à prévoir. Dans un tube un peu long, l'eau pure absorbe par elle-même une plus forte proportion des rayons peu réfringibles; si l'on ajoute des particules ténues, tous les rayons sont affaiblis, mais non pas également : l'action est plus énergique sur les plus réfringibles. Ainsi, pour deux causes différentes, ce sont les deux extrémités du spectre qui se trouvent le plus fortement interceptées, et les rayons moyens prédominent dans la lumière transmise; la couleur bleue de l'eau pure virera ainsi au vert, au jaune, au brun, suivant que le rôle des particules sera de plus en plus prépondérant. C'est bien là le résultat des expériences de nombreux physiciens, et ce que démontrent en particulier les observations de M. Tyndall, de M. Ricco et de M. Spring sur l'influence de légers précipités.

Diffusion de la lumière. — A côté de cet effet sur la teinte

(¹) Cet effet paraît commun à tous les précipités blancs amorphes, pourvu qu'ils soient suffisamment ténus. Avec des particules métalliques ou cristallines, l'action est quelquefois complexe. Si le précipité n'est pas blanc, sa couleur propre peut aussi exercer une influence.

(²) *Poggendorff's Annalen*, t. LXXXVIII, p. 363; 1853.

des rayons transmis, il se produit une action sur les rayons réfléchis. On connaît les caractères de coloration bleue et de polarisation de la lumière diffusée par les particules ténues qu'un liquide tient en suspension ⁽¹⁾. Ces caractères sont faciles à constater lorsqu'on fait tomber un faisceau de lumière solaire sur de l'eau contenue dans un ballon ou un flacon de verre. La trace du faisceau est bien visible et la lumière qu'elle diffuse contient toutes les couleurs du spectre avec une prédominance des rayons les plus réfrangibles, en sorte que la teinte est d'un blanc bleuâtre, et d'autant plus franchement bleue que les particules diffusantes sont plus petites.

Si l'on regarde cette trace au travers d'un analyseur dans une direction perpendiculaire au faisceau, on reconnaît que la lumière est polarisée.

Dans ces conditions, l'épaisseur d'eau traversée par les rayons incidents ou diffusés est trop faible pour que l'absorption de l'eau puisse exercer une influence sensible sur la couleur de cette trace.

Mais il est facile d'observer aussi ces phénomènes en employant des épaisseurs d'eau plus considérables. On peut, par exemple, interposer sur le passage des rayons solaires incidents un tube plein d'eau, long de 1^m à 2^m; alors l'influence de la coloration se fait sentir sur la couleur de la trace dont la teinte bleu verdâtre est prononcée. On peut encore regarder cette trace au travers d'un tube pareil au premier; la couleur s'accroît encore davantage. On a ainsi la superposition des deux effets de coloration par absorption et par diffusion.

Une autre expérience assez instructive est la suivante. Prenons un long tube de verre, fermé à ses deux extrémités par des glaces, remplissons-le avec de l'eau, et exposons-le à une vive lumière latérale, en le plaçant, par exemple, au soleil. Disposons un écran complètement noir à l'une de ses extrémités en regardant par l'autre. Si l'eau était parfaitement limpide, soit optiquement vide, l'écran vu au travers du tube paraîtrait toujours noir; mais cette

(¹) Ces questions ont particulièrement été étudiées par M. Tyndall, M. Lallemand, M. Hagenbach et moi-même. Voir *Archives*, t. XXXIV, p. 156, t. XXXV, p. 54 (1869); t. XXXVII, p. 129, 176; t. XXXIX, p. 341, 352 (1870); t. XLVIII, p. 231 (1873); t. L, p. 243 (1874).

pureté absolue ne peut être atteinte; même avec de l'eau distillée avec le plus grand soin, on observe, au lieu du noir, une teinte bleu très foncé, du bleu noir si l'on veut. Ceci s'explique parce que la teinte bleuâtre de la lumière diffusée est renforcée par l'absorption que l'eau exerce sur les rayons les moins réfrangibles.

Si l'on répète l'expérience après avoir déterminé dans cette eau un très léger précipité, par exemple en y ajoutant une trace d'acétate de plomb, on observe une coloration bleue lavée de beaucoup de blanc. Or ici la lumière incidente est blanche, car elle ne traverse pas une épaisseur sensible pour arriver jusqu'aux particules qui la diffusent; d'autre part, si l'on regardait un écran blanc au travers du long tube rempli de cette eau un peu louche, on observerait une couleur verte ou jaune, comme nous l'avons dit plus haut. Le fait qu'on obtient une teinte blanc bleuâtre montre que, dans les conditions où nous nous sommes placé, la coloration par diffusion l'emporte sur la coloration par transmission, et ne peut par conséquent être considérée comme négligeable dans l'explication des faits.

II. Arrivons maintenant à l'interprétation des phénomènes de couleur des eaux, tels que la nature nous les présente.

Il est d'abord évident que la réflexion de la lumière à la surface d'une nappe liquide joue un rôle important dans les apparences que l'on observe. Cette action varie énormément suivant les circonstances; elle est en général d'autant plus grande que la surface de l'eau est plus calme et que la direction du regard se rapproche davantage de l'horizontale. Mais nous laisserons à peu près complètement de côté ces effets, qui sont d'ordinaire faciles à expliquer et à comprendre.

C'est de la couleur de la lumière sortant de l'eau même que nous avons à nous occuper.

Admettons d'abord les conditions suivantes : l'observateur se trouve en bateau sur un lac formé d'une eau très pure, tel que le lac de Genève, dans un endroit où la profondeur est considérable; il regarde l'eau dans une direction voisine de la verticale; nous supposons que le lac est calme et le temps couvert. Dans ces conditions la couleur de l'eau est d'un beau bleu indigo. Cherchons-en l'origine.

Ici la réflexion superficielle n'a qu'une très faible influence, dont on peut d'ailleurs se mettre à l'abri en observant avec une lunette d'eau, c'est-à-dire au travers d'un tube fermé par une glace à son extrémité inférieure, qui plonge sous l'eau.

Comme M. Tyndall l'a fait remarquer, si l'eau était absolument homogène et optiquement vide, au lieu du bleu, on verrait du noir dans les conditions où nous nous sommes placé. En effet, l'eau absorbe avec plus ou moins d'énergie tous les rayons lumineux, et si la profondeur est suffisante il est certain que le fond n'est pas éclairé : c'est ce qu'ont démontré les expériences de plusieurs savants, et particulièrement celles de M. F. Forel qui a reconnu qu'à une profondeur de 100^m, dans le lac de Genève, la lumière n'exerce plus d'action photographique ⁽¹⁾. Ainsi, avec une profondeur de 100^m ou plus, nous pouvons être certains que cette lumière bleue observée ne provient pas du fond.

Elle émane donc de la masse même de l'eau.

Cette illumination n'est pas due à la fluorescence; l'expérience montre que l'eau ne présente pas cette propriété. On est donc conduit à l'attribuer à la diffusion sur les particules que l'eau tient toujours en suspension, diffusion qui, même avec une eau aussi limpide que celle du lac de Genève ou de la Méditerranée, est parfaitement suffisante pour rendre compte des faits ⁽²⁾.

La couleur bleue s'explique facilement. D'abord, comme nous l'avons vu, les rayons les plus réfrangibles sont diffusés en plus forte proportion que les autres. En outre, les rayons rouges et orangés sont absorbés par l'eau dans le double trajet qu'ils font pour arriver aux particules diffusantes, et pour revenir jusqu'à l'œil de l'observateur : à l'effet de coloration produit par la diffusion s'ajoute donc l'effet de la coloration propre de l'eau.

Le ciel étant couvert, comme nous l'avons déjà admis, c'est la lumière diffuse des nuages qui pénètre dans l'eau suivant toutes les directions, et qui atteint les particules à diverses profondeurs; ceux de ces rayons qui ont une direction rapprochée de la verti-

⁽¹⁾ *Archives*, t. LIX, p. 137; 1877.

⁽²⁾ Dans un précédent travail j'ai déjà indiqué les raisons me faisant croire que l'on peut négliger l'action de la réflexion sur des couches liquides d'inégale densité (*Archives*, t. XXXIX, p. 364; 1870).

calc, et qui sont diffusés dans les couches liquides superficielles, parcourent dans l'eau un trajet assez court avant d'arriver à l'œil; par suite, une portion de lumière blanche est diffusée; en d'autres termes, le bleu n'est pas complètement saturé: c'est bien ce que montre l'observation faite au spectroscope ⁽¹⁾.

Il est à remarquer que par un ciel couvert la lumière de l'eau n'est pas polarisée; en effet, la lumière incidente, suivant une infinité de directions diverses, sera polarisée par diffusion dans une infinité de plans différents; en d'autres termes, elle sera naturelle.

Si le temps est découvert et si le Soleil est haut sur l'horizon, on observe que l'eau, frappée directement par les rayons solaires, est d'un bleu moins saturé que par un temps couvert; son apparence est un peu laiteuse, rappelant celle d'un liquide fluorescent, et l'on a le sentiment que la lumière provient d'une profondeur moins grande. Cette différence d'apparence se remarque aisément lorsque l'observateur se trouve, par exemple, sur un bateau à vapeur, et qu'il compare la couleur de l'eau dans les parties exposées au soleil et celles qui sont à l'ombre du bateau.

Ce fait est facile à expliquer. Par un temps clair, la majeure partie de la lumière qui pénètre dans les couches intérieures de l'eau émane directement du soleil, que nous avons supposé élevé sur l'horizon, de sorte que le trajet qu'elle parcourt à l'intérieur de la masse liquide est relativement beaucoup plus court que dans les cas où les rayons incidents arrivent de toutes les directions. Par suite, la proportion des rayons peu réfrangibles qui sont absorbés est notablement moindre, et la couleur bleue est mélangée d'une plus forte quantité de lumière blanche.

Lorsque le soleil brille et que la surface de l'eau est calme, les phénomènes de polarisation de la lumière sont très manifestes dans les directions à peu près à angle droit avec les rayons solaires ⁽²⁾, et l'identité des résultats avec ce que les expériences de laboratoire ont fait connaître est une forte preuve en faveur de la théorie que nous venons d'exposer.

Lorsque la surface de l'eau est agitée, les phénomènes de pola-

⁽¹⁾ *Archives*, t. XXXIX, p. 363; 1870.

⁽²⁾ Pour le mode d'observation, voir *Archives*, t. XXXIX, p. 352; 1870.

risation disparaissent parce que les rayons solaires cessent d'être parallèles à l'intérieur de l'eau, étant réfractés dans des directions très diverses.

Jusqu'ici nous ne nous sommes occupé que du cas où l'on observe une masse d'eau pure de grande profondeur. Examinons rapidement quelle est l'influence du fond lorsque la profondeur est assez faible pour qu'on puisse le voir.

Si le fond est noir ou seulement d'une couleur très foncée, le bleu prédomine encore dans la teinte de l'eau, lors même que la profondeur n'est que de quelques mètres.

Si le fond est blanc, la profondeur faible et la surface assez calme pour que l'on distingue les détails du fond, la couleur paraît vert bleu dans une direction voisine de la verticale. C'est ce qu'Arago et beaucoup d'autres après lui ont observé en regardant un objet blanc déposé sur le fond du Rhône à sa sortie du lac de Genève. La teinte est approximativement ce que l'on obtiendrait par transmission au travers d'une épaisseur d'eau double de la profondeur; l'action de la coloration par diffusion est ici peu sensible.

Mais, si la surface est agitée, les rayons émergents ne proviennent plus directement du fond par le plus court chemin; ils ont donc traversé une épaisseur d'eau plus grande et la couleur redevient franchement bleue. Cet effet s'observe très bien, par exemple sur le pont de la machine hydraulique de Genève; en amont, la surface de l'eau est encore calme, la teinte est vert bleu; en aval, l'eau est très agitée et même bouillonnante, et la teinte paraît bleue.

Si le fond est coloré, jaune par exemple, il fera virer la teinte du bleu au vert et même au jaune, suivant que la profondeur sera de plus en plus faible.

Je pense que les considérations qui précèdent rendent bien compte dans ses grands traits ⁽¹⁾ de la coloration variée d'une masse d'eau pure et limpide comme celle du lac de Genève. Mais pourquoi

⁽¹⁾ Je dis *dans ses grands traits*, car beaucoup de points méritent d'être étudiés de plus près; il y a lieu d'espérer que la Commission récemment nommée pour cette étude par la Société de Physique et d'Histoire naturelle de Genève, arrivera à en élucider une partie.

d'autres masses d'eau, et particulièrement d'autres lacs de la Suisse, présentent-ils une apparence différente et une couleur verte?

Je crois que quatre causes peuvent, séparément ou simultanément, produire ce résultat.

1° Des substances jaunâtres, d'origine minérale ou organique, peuvent être en *dissolution* dans l'eau, absorber par conséquent les rayons les plus réfrangibles, tandis que l'eau elle-même intercepte les rayons rouges; il n'émergera donc du liquide que la couleur complémentaire de ces rayons absorbés, la teinte variant du vert au jaune et même au brun, suivant les circonstances. Cette cause agit évidemment dans certains étangs ou flaques d'eau souillée de matières organiques abondantes. Mais son action est-elle suffisante pour expliquer la teinte verte de grands lacs comme celui de Constance ou de Lucerne? Plusieurs savants sont de cette opinion, et l'on peut citer à l'appui le fait signalé par H. Sainte-Claire Deville, que par évaporation les eaux bleues laissent un résidu blanc, et les vertes un résidu jaune (1). M. Spring élève contre cette manière de voir des objections très sérieuses, que l'on trouvera dans son intéressant Mémoire.

2° Comme nous l'avons dit, dans une eau extrêmement limpide, comme celle du lac de Genève ou celle de la Méditerranée, les particules en suspension sont si rares qu'elles n'influent pas sensiblement sur les couleurs de la lumière transmise; mais si, tout en restant très ténues, elles deviennent plus nombreuses, elles doivent agir en interceptant les rayons les plus réfrangibles, et par suite la couleur virera au vert. M. Tyndall et M. Ricco ont insisté sur cette action et c'est aussi à cette cause que M. Spring attribue la teinte de certains lacs, tels que celui de Constance (2).

3° Nous avons dit que la coloration bleuâtre de la lumière

(1) Voir aussi les travaux de WITTSTEIN, *Comptes rendus de l'Académie de Munich*, p. 603 (1860); de BEETZ, *Archives*, t. XIV, p. 78 (1862).

(2) Il considère l'eau du lac de Constance comme à peu près saturée de carbonate de calcium dissous à la faveur d'une petite quantité d'anhydride carbonique que contient l'eau; il admet que, dans cet état voisin de la saturation, il se forme déjà un *précipité naissant*. Dans le lac de Genève qui, d'après les analyses de H. Sainte-Claire Deville, contient moins de calcaire que celui de Constance, et la même proportion d'anhydride carbonique, le précipité ne se formerait pas parce qu'on est loin de la saturation.

diffusée par des particules rares et très ténues influe, en la renforçant, sur la teinte bleue d'une eau très limpide. Mais cet effet cesse de se produire si les particules sont trop nombreuses ou relativement grossières. En outre, dans ce cas, la diffusion produite dans les couches rapprochées de la surface l'emporte sur celle des couches plus profondes; la lumière a parcouru sous l'eau un trajet plus court, par suite les rayons peu réfrangibles sont moins absorbés.

4^e En dernier lieu, si les particules en suspension sont elles-mêmes colorées et abondantes, leur couleur peut influer sur celle de l'eau. Plusieurs rivières sont colorées en gris foncé lorsqu'elles sont chargées de poussière d'ardoise, en jaune ou même en rouge ou en lilas, si elles charrient des sables présentant ces nuances. Entre ces cas de trouble complet et la transparence parfaite, il y a des intermédiaires, et il peut se faire que des corpuscules colorés communiquent à l'eau une teinte verte ⁽¹⁾.

Il ne sera pas inutile d'insister, en terminant, sur ce qu'il y a de délicat et quelquefois de contradictoire dans les effets produits par les particules en suspension. Il faut se rappeler que, si elles sont ténues, elles éteignent les rayons bleus par transmission, tandis qu'elles tendent à renforcer ces mêmes rayons par diffusion; ces deux effets opposés peuvent l'emporter l'un sur l'autre suivant les circonstances.

Il me semble certain que de l'eau limpide et pure, ou ne tenant que des substances incolores en dissolution, paraîtra toujours bleue, sous une grande profondeur, et d'un bleu d'autant plus saturé et foncé qu'elle se rapproche plus du *vide optique*. Les particules sont trop rares pour exercer une absorption appréciable sur les rayons très réfrangibles, et permettent aux rayons incidents de faire en moyenne un grand trajet dans l'eau. Les effets de coloration par diffusion et par transmission s'ajoutent l'un à l'autre.

Si les particules en suspension deviennent plus nombreuses, la profondeur restant toujours grande, le bleu sera en tout cas

(1) C'est ainsi que MM. Forel et J. Brun ont signalé dans quelques points des lacs de Genève et de Neuchâtel, et à certaines époques, la présence d'abondantes algues microscopiques vertes qui donnent à l'eau une couleur pareille. Ehrenberg, Dupont, Darwin ont observé des algues rouges dans les eaux de certaines mers.

moins saturé, et peut-être vira-t-il au vert, si l'extinction des rayons bleus par transmission l'emporte sur leur renforcement par diffusion; cela dépend de la dimension des particules, de leur nombre, de leur nature, des conditions d'éclairement.

Mais, si la profondeur est faible, l'effet peut être renversé et l'abondance de particules faire virer au bleu une coloration verte. C'est ainsi que M. le professeur Colladon a observé que, pendant un dragage de l'un des côtés du port de Genève, opération qui faisait nager dans l'eau un peu d'argile délayée, le bras du Rhône par lequel s'écoulait cette eau légèrement troublée, était plus bleu que l'autre bras formé d'eau tout à fait limpide. Ceci s'explique facilement. Dans le Rhône, quand l'eau est claire à sa sortie du lac, la coloration est vert bleu, comme nous l'avons rappelé plus haut, ce qui tient en grande partie à la couleur plus ou moins jaune ou verdâtre du fond; si l'eau devient légèrement louche, ce n'est plus le fond qui renvoie la lumière, c'est l'argile en suspension. Or cette argile est blanche et elle possède à un assez haut degré la faculté de diffuser la lumière bleue, comme on le reconnaît en faisant tomber un faisceau de lumière solaire sur de l'eau dans ces conditions. La coloration jaunâtre du fond est donc masquée, la coloration par diffusion prédomine, et la teinte est d'un bleu lavé de blanc.