

## Sur l'origine des phénomènes de coloration de l'eau de la mer et de l'eau des lacs.

*(Bulletins de l'Académie royale de Belgique, 3<sup>e</sup> sér., t. XII, n<sup>o</sup> 12, pp. 814-857, 1886.)*

La variété de couleur des eaux des mers, des lacs et des fleuves excite à un haut degré notre étonnement et notre admiration.

Ainsi, le bleu de l'Océan et de la Méditerranée contraste avec le vert émeraude des lacs de Constance, de Lucerne et de Zurich ; le lac de Genève surprend ses visiteurs par la beauté de ses eaux d'azur, et le lac d'Achen, dans le Tyrol, ne le cède pas à la Méditerranée pour la couleur de ses parties profondes, tandis que sur ses bords, il présente des teintes d'un vert de chrome d'une beauté incomparable. Il n'est pas rare d'y voir se mélanger des bandes orangées et même rouges.

Nous avons tous admiré le spectacle splendide offert par les lacs quand, du pont d'un bateau à vapeur, nous avons pu contempler, par une journée sereine, la féerie jouée par les rayons solaires allant se perdre dans la transparence de leur eau.

Notre regard se plaît à sonder ces profondeurs nouvelles pour lui. La variété des couleurs qu'il y découvre, quand l'agitation vient troubler le miroir de la surface du lac, est d'une beauté indescriptible. Les aubes des roues du bateau, en engloutissant, dans leur mouvement, l'air de l'atmosphère, déterminent la formation de légions de lentilles ; celles-ci s'emparent de la lumière colorée de l'eau, la concentrent en d'autres points et en étalent toute la magnificence. Des millions de perles, du blanc le plus éblouissant, parais-

sent comme semées sur la route du bateau et embellissent encore ce spectacle extraordinaire.

Mais, si ce tableau frappe les habitants du beau pays des Alpes, il est naturel qu'il transporte ceux dont la sensibilité n'a pas trouvé à s'émousser par une sorte d'accoutumance à ces merveilles : l'impression qu'ils reçoivent n'en est que plus profonde.

La comparaison des eaux de nos fleuves avec les eaux des lacs est simplement impossible. Jamais, même après de longues périodes de calme, ou bien lorsque, en hiver, un temps de gelée prolongé a empêché l'entraînement à la rivière du limon des affluents, l'eau de notre Meuse n'est vraiment limpide. La couleur verte qu'elle prend alors n'a rien de la transparence ni de la lumière des eaux des lacs.

Pour nous, le spectacle de ces dernières est aussi nouveau que la vue d'une simple pierre peut l'être pour l'homme né sur les bords de l'Amazone. Là-bas, sur des espaces de centaines de kilomètres carrés, le sol est formé d'alluvions recouvertes d'une végétation plus ou moins abondante ; mais jamais on n'y trouve le moindre caillou. Aussi, suivant le minéralogiste Schubert, grands sont l'étonnement et la joie des habitants de ces régions lorsque leurs pas les portent dans des contrées où ils peuvent contempler, pour la première fois, des rocs ou même seulement des pierres.

Celui qui a l'honneur de porter aujourd'hui la parole dans cette enceinte a ressenti une impression analogue ; voilà son excuse d'avoir touché à une question (\*) dont l'étude exige cependant, pour être bien faite, des conditions spéciales d'observation, et d'avoir empiété, ainsi, sur un domaine dont des physiciens étrangers pouvaient invoquer la propriété, si vraiment le sol scientifique est aussi au premier occupant.

L'origine des phénomènes de coloration de l'eau n'est pas aussi simple qu'un premier examen l'a fait croire d'abord. A mesure que l'on a approfondi la question, on a découvert des facteurs dont l'influence ne pouvait être mise en doute, mais dont l'importance relative dans les phénomènes susdits n'a pas été fixée également pour tout le monde. Aujourd'hui même l'accord ne règne pas complète-

(\*) La couleur des eaux. *Bulletin de l'Académie*, 3<sup>e</sup> sér., t. V, 1883.

ment parmi les physiciens sur l'explication de la couleur des eaux. Cependant on possède assez de documents certains pour tracer, dans ses traits fondamentaux, le tableau de cette explication et pour ne laisser à l'avenir que le soin de retoucher quelques détails.

C'est ce tableau que je voudrais montrer d'abord dans son ensemble ; puis parcourir, si vous le permettez, la voie suivie pour arriver à la composition de chacune de ses parties. De cette façon nous pourrions nous rendre un compte clair de l'état actuel de nos connaissances sur ce sujet. Toutefois, pour abuser aussi peu que possible de votre attention, je ne tiendrai aucun compte des hypothèses qui ont couvert longtemps notre ignorance, ni même des tentatives d'explication d'apparence plus réelle, mais qui sont cependant restées vaines. Nous aurons assez l'occasion de voir que, tout en restant sur le terrain de l'expérience, on est exposé bien souvent à s'égarer. Une conclusion ne peut être acceptée comme vraie que si toutes les conséquences auxquelles elle conduit à son tour se trouvent également vérifiées. En d'autres termes, une conclusion déduite d'un nombre restreint de faits a presque toutes les chances d'être erronée ; nous approchons de la vérité seulement dans la mesure du complément de nos connaissances.

Mais quittons ces considérations pour arriver à notre but : l'exposé sommaire de la raison du phénomène de coloration de l'eau.

L'observation nous apprend que l'eau pure, incolore quand elle est vue sous une faible épaisseur, est franchement bleue lorsqu'elle est en grande masse. C'est ce que j'ai démontré il y a déjà quelques années (\*). La couleur bleue est d'autant plus foncée que l'épaisseur de la couche d'eau est plus grande ; elle est d'autant plus pure que l'eau est plus *limpide*.

On pourrait penser que cette propriété de l'eau suffit pour nous donner au moins la raison de la couleur *bleue* de l'Océan, de la Méditerranée et de certains lacs. Il n'en est rien cependant : la physique nous l'apprend.

Les couleurs sont toutes dans la lumière blanche : le passage de celle-ci à travers un prisme démontre le fait. Il se produit un spectre lumineux, où sont étalées toutes les couleurs, depuis l'extrême rouge

(\*) La couleur des eaux. *Bulletin de l'Académie*, 3<sup>e</sup> sér., t. V, 1883.

jusqu'à l'extrême violet. Or, l'action de l'eau sur la lumière simple qui correspond à chacune des couleurs, ou même à chacune des nuances du spectre, est extrêmement différente. Sur les rayons rouges, elle est très énergique; l'eau les absorbe complètement, même sous une épaisseur relativement faible, mais les autres couleurs se trouvent affaiblies en même temps. C'est ce que l'on constate en regardant un spectre solaire par une colonne d'eau dont on peut augmenter l'épaisseur.

A mesure que la lumière doit pénétrer plus profondément dans l'eau, l'orangé, le jaune, le vert s'éteignent successivement et enfin le bleu quand la profondeur de l'eau est suffisante. Ainsi un rayon solaire s'éteindrait complètement dans l'eau pure absolument limpide, si elle était assez profonde : l'eau paraîtrait alors aussi noire que de l'encre.

Mais l'épaisseur de l'eau suffisante pour éteindre un rayon solaire se trouve-t-elle réalisée dans la nature? Pas n'est besoin de faire ressortir toute l'importance de cette question pour la solution de notre problème.

Or, MM. Fol et Sarasin (\*) ont fait, il y a quelques années, des expériences nouvelles, complétant celles que M. Forel et d'autres savants avaient exécutées avant eux, desquelles il résulte que la lumière du jour ne pénètre pas à plus de 200 mètres environ de profondeur dans les eaux du lac de Genève, même par un temps calme et un soleil brillant du mois d'août. Ils sont arrivés à ce résultat en laissant descendre dans le lac, à des profondeurs variables, au moyen d'un appareil spécial, des plaques photographiques au gélatino-bromure rapide, de notre compatriote Van Monckhoven. Au développement on s'assura que les plaques qui avaient séjourné à 300 ou même à 257 mètres n'avaient reçu aucune impression lumineuse quelconque, tandis qu'à 170 mètres, « la force de l'éclairage était à peu près comparable à celle que nous percevons par une nuit claire sans lune ».

Des profondeurs de plus de 200 mètres sont la règle, non seulement pour l'Océan ou les mers, mais encore pour la plupart des lacs. Par conséquent, ces eaux profondes, véritables gouffres où la lumière

(\*) *Comptes rendus*, 1884.

va s'abîmer sans retour, devraient nous paraître absolument noirs. Leur surface nous ferait bien parvenir quelques rayons réfléchis, comme l'encre peut le faire, mais la masse du liquide, ne renvoyant aucune lumière, ne saurait paraître colorée. Sur les bords, à la vérité, ou sur les hauts-fonds, la coloration bleue pourrait se manifester parce que la lumière du jour se trouverait, pour se réfléchir vers l'œil de l'observateur, dans des conditions plus ou moins favorables.

Cependant, le spectacle dont nous sommes témoins est bien différent. Ce sont, au contraire, les régions les plus profondes qui sont du bleu le plus pur, tandis que, dans les autres, le bleu est remplacé par du vert plus ou moins foncé et même souvent par du vert jaunâtre ou du brun. Quelle peut donc être la raison de ce phénomène?

D'après de brillantes expériences (sur lesquelles nous aurons à revenir) dues au célèbre physicien Tyndall, aucune des eaux de la nature, quelle que soit d'ailleurs sa limpidité apparente, ne serait absolument exempte de matières solides en suspension. On peut s'assurer du fait en plaçant sur le passage d'un rayon lumineux intense, émanant soit du soleil, soit d'une lampe électrique, une masse suffisante de liquide paraissant d'ailleurs complètement claire à la lumière diffuse. Si on a soin de défendre l'œil contre toute lumière étrangère, on poursuivra aisément les rayons lumineux à travers cette eau : ceux-ci se réfléchissent sur les particules solides et forment une trace saisissable, bien que ces particules soient si petites qu'un examen microscopique n'en saurait révéler la présence. L'eau apparaît comme illuminée. Il en est de celle-ci comme de l'air d'une chambre qui paraît aussi ne contenir aucune chose visible, aucune substance capable de disperser la lumière au moindre degré sensible quand elle est éclairée par la lumière du jour, mais dans lequel la lumière solaire révèle sa trace en éclairant la poussière flottante. « Le soleil, dit Daniel Culwerwell, découvre les atomes que la lumière artificielle ne peut rendre visibles, et les montre à nu, s'agitant dans ses rayons (\*). »

Que la trace visible du rayon solaire est bien due à la présence de la poussière de l'air, c'est ce que Tyndall montre avec éclat. En pla-

(\*) JOHN TYNDALL, *Fragments scientifiques*. Traduction de M. H. Gravez, Paris, 1877.

cant une lampe à alcool allumée dans un rayon cylindrique qui éclairait fortement la poussière du laboratoire, on brûlait les poussières et il s'élevait du dessus de la flamme comme des masses obscures.

« Ces masses, dit Tyndall, étaient plus noires que la plus noire des fumées qui soient jamais sorties de la cheminée d'un steamer. Cette ressemblance avec de la fumée était assez parfaite pour amener l'observateur le plus exercé à conclure que la flamme de l'alcool pure en apparence ne demandait qu'un rayon suffisamment intense pour montrer des nuages de carbone mis en liberté.

» Mais ces tourbillons noirs sont-ils de la fumée? Cette question fut ainsi résolue : Un tisonnier rougi fut placé sous le rayon ; il s'en éleva également des masses noires. La fumée était donc hors de cause.

» Qu'était-ce donc que cette noirceur? C'était simplement celle de l'espace stellaire, c'est-à-dire la noirceur résultant de l'absence, sur le trajet du rayon, de toute matière capable de disperser sa lumière. En plaçant la flamme sous le rayon, la matière flottante se trouvait détruite *in situ*, et l'air, privé de cette matière, s'élevait dans le rayon, repoussait les particules éclairées et substituait à leur lumière l'obscurité due à sa parfaite transparence.»

En résumé, un corps transparent homogène ne tenant aucune parcelle d'un corps de densité différente en suspension laisse passer la lumière sans illumination aucune. Tyndall dit alors qu'il est *optiquement vide*.

L'eau absolument limpide est aussi *optiquement vide*; mais renferme-t-elle des particules solides de dimensions assez petites pour échapper même au microscope le plus puissant, elle s'illumine aussitôt par le passage d'un rayon de lumière.

L'éclairage de l'eau par un rayon lumineux puissant donne donc un moyen aussi simple que certain pour s'assurer de sa limpidité.

Tyndall a montré, par cette méthode, qu'aucune eau naturelle n'est optiquement vide : l'eau de la Méditerranée, celle du lac de Genève, même après un repos prolongé, s'illuminaient par le passage d'un faisceau de lumière. L'eau la plus pure qu'il ait vue provenait de la fusion de morceaux de glace choisis. La cristallisation de l'eau pendant la congélation avait probablement écarté les matières étrangères; la trace du rayon lumineux était fortement affaiblie sans avoir cependant été invisible.

Ceci posé, nous dirons que l'on voit la couleur bleue naturelle des eaux de certaines mers et de certains lacs parce que la lumière du jour ne pénètre pas assez profondément pour être totalement absorbée. Elle rencontre des myriades de particules de corps étrangers qui la réfléchissent dans tous les sens, comme le ferait une légion de miroirs microscopiques. Pour l'observateur, l'effet est le même que s'il examinait l'eau, par transparence, sous une épaisseur très grande.

Il résulte nécessairement de là que, dans une eau très profonde et très limpide, c'est-à-dire renfermant relativement moins de particules étrangères, un faisceau cylindrique de lumière pénétrera plus loin que dans une eau moins claire, avant que tous ses rayons ne soient rejetés au dehors.

Cette eau plus claire sera donc d'un bleu plus foncé. C'est bien là ce que l'on constate, et nous verrons que les eaux du bleu le plus foncé émettent le moins de lumière.

On s'explique avec une égale facilité les variations de la qualité du bleu de ces eaux et de son intensité selon l'état du ciel et aussi selon l'état plus ou moins agité de la surface du lac ou de la mer.

Telle est, en résumé, l'explication que l'on peut donner aujourd'hui des phénomènes de coloration bleue de certaines eaux (\*).

Cette explication, simple, se suffit à elle-même et ne s'appuie que sur des faits positifs; elle a donc une très grande probabilité d'exactitude.

Nous arrivons maintenant à la seconde partie de notre tableau, celle qui nous explique les teintes vertes et jaunes des eaux.

Il n'est pas nécessaire, pensons-nous, de faire remarquer que, si des eaux vertes comme celles des lacs de Zurich ou de Lucerne, renfermaient des substances étrangères jaunes ou brunes, des

---

(\*) On fait concourir cependant avec elle une autre explication d'après laquelle la couleur bleue de *fondation* de l'eau n'entre plus nécessairement en ligne de compte. Cette couleur serait plutôt le résultat de la diffusion de la lumière blanche par réflexion sur les particules très petites tenues en suspension dans l'eau. Nous pensons que ce phénomène de diffusion ne produit pas une augmentation du bleu, mais plutôt un virage plus ou moins complet au vert; nous dirons plus loin pourquoi, et comme, selon nous, il est inséparable de l'explication de la couleur verte des eaux, nous pensons préférable de nous en occuper seulement plus loin.

composé de fer par exemple, l'explication deviendrait si élémentaires qu'il serait superflu de s'y arrêter.

De même, dans les hauts-fonds ou sur les bords, si la lumière du jour se réfléchit sur un sol jaune ou brun, elle composera aussi, pour notre œil, du vert avec le bleu de l'eau. C'est là ce que pensaient H. Sainte-Claire Deville, Bunsen et Wittstein.

Malheureusement ces cas simples ne se réalisent pas toujours dans la nature. Il est des eaux vertes qui ne laissent pas plus de résidus colorés à l'évaporation que certaines eaux bleues.

On doit donc chercher ailleurs. C'est encore l'expérience qui nous renseignera; elle nous montrera que des teintes jaunes ou rouges plus ou moins foncées pourront se produire dans des liquides incolores ne renfermant absolument rien de coloré, et cela par une dispersion particulière de la lumière blanche.

Il suffit, ainsi que je l'ai montré (\*), pour la produire, que le liquide renferme en suspension des particules ou des globules de corps plus ou moins denses que lui-même, dans un état de ténuité et de rareté suffisant, en un mot qu'il soit trouble, mais d'un trouble particulier, d'un degré différent de celui qui détermine la réflexion simple de la lumière.

Nous essayerons de le faire connaître plus loin.

Alors la lumière blanche qui traverse ce milieu se trouve décomposée, les rayons les plus réfrangibles, ceux qui correspondent au violet et au bleu, sont, en partie, étouffés et, en partie, réfléchis par ces particules; ils sont rejetés latéralement, tandis que les autres rayons, les rouges et les jaunes, continuent leur route presque sans changement, c'est-à-dire en subissant une extinction incomparablement plus faible que leurs voisins.

Un tel milieu paraîtra donc rouge-jaune par transmission et bleuâtre par réflexion. Pour que ces tons jaunes et bleus se produisent, il ne suffit pas que le liquide tienne seulement des matières en suspension sous un état quelconque, mais elles doivent être fines au point de ne plus être retenues par les filtres généralement employés dans les laboratoires. En un mot, elles doivent se trouver dans un état voisin peut-être de l'état de solution, dans lequel elles

(\*) La couleur des eaux. *Bulletin de l'Académie*, 3<sup>e</sup> sér., t. V, 1883.

présentent comme un phénomène de fluorescence, bien qu'il ne soit pas certain que l'on ait affaire ici à une véritable fluorescence. Nous dirons d'un tel milieu qu'il contient un corps à l'état *pseudo-colloïdal* et qu'il présente une *pseudo-fluorescence*. L'argile et le calcaire peuvent prendre cet état avec facilité quand ils se trouvent broyés au sein de l'eau. Ce sont aussi les matières que l'on rencontre le plus généralement dans les eaux naturelles.

Il est très aisé maintenant de se rendre compte des nuances diverses des eaux, depuis le vert jusqu'au jaune brunâtre. En effet, si de l'eau contient de la matière à l'état pseudo-colloïdal en quantité plus ou moins abondante, la lumière qui la traversera sera d'un jaune-brun plus ou moins foncé; il pourra même arriver que l'eau ne laissera plus passer de lumière, même par une couche peu épaisse, et qu'elle paraisse opaque, c'est-à-dire noire. Cette lumière jaune se combinera nécessairement, pour notre œil, avec la lumière bleue de l'eau; il se produira des teintes bleu verdâtre, vert bleuâtre, vertes, vert jaunâtre, selon la proportion relative du jaune. Et même, si le jaune l'emporte de beaucoup sur le bleu, celui-ci sera étouffé complètement: l'eau présentera alors une couleur jaune-brun ou une couleur plus foncée encore.

Voilà, en résumé, comment on peut expliquer aujourd'hui les phénomènes de coloration dont les eaux naturelles sont le siège. L'explication est simple, mais elle n'est pas complète. Nous en avons tracé le tableau à grands traits: nous devons passer maintenant à la démonstration des propositions énoncées et tout à la fois toucher à certaines questions de détail dont la solution est indispensable pour compléter nos connaissances sur ce sujet complexe.

Nous avons dit que l'eau pure avait une couleur propre, le *bleu*: la démonstration de ce fait est de date récente. Peut-être même la variété des teintes de l'eau des mers, des lacs et des rivières a-t-elle fait penser, involontairement, que l'eau devait vraiment être incolore par elle-même pour pouvoir s'adapter si facilement aux nuances les plus délicates et les plus diverses.

Le premier examen scientifique de la couleur de l'eau a été fait par Bunsen (\*); cet illustre physicien a vu, le premier, que l'eau

(\*) *Annalen der Chemie*, t. LXII, p. 44.

pure n'était pas incolore, comme on l'avait cru, mais qu'elle présentait une teinte bleu clair quand on l'observait sous une épaisseur suffisante. Il regardait à cet effet le fond d'une capsule de porcelaine au travers d'un tube de deux mètres, noirci à l'intérieur pour intercepter la lumière latérale et rempli d'eau pure. Il expliquait ensuite les teintes verdâtres de certains lacs et celles surtout des bassins des geysers d'Islande, soit par la présence de traces d'hydroxyde de fer que ces eaux contenaient en plus ou moins grande quantité, soit par la réflexion des fonds plus ou moins jaunes ou bruns de leurs bassins.

L'observation de Bunsen a été répétée par divers physiciens; mais elle n'a pas toujours conduit à des résultats concordants. Ainsi, tandis que pour Tyndall et Beetz (\*) l'eau se montrait avec une teinte bleue sous une épaisseur suffisante, Boas (\*\*) et V. Meyer (\*\*\*) observaient une teinte verte ou à peu près.

On le voit, la difficulté qui s'était présentée dans l'observation de la nature se répétait dans les expériences de laboratoire. D'un côté comme de l'autre, l'eau ne se présentait pas identique à elle-même. Le caractère fondamental de toute connaissance certaine, savoir la permanence, manquait encore.

Il y a plus. Les expériences de Tyndall sur la couleur du ciel sont venues, à cette époque, ajouter un élément nouveau à la discussion (iv), élément qui menaçait même de remettre complètement en doute la question de la couleur propre de l'eau.

Il est nécessaire de quitter un instant notre sujet pour toucher aux expériences de Tyndall et voir comment elles ont permis à cet illustre physicien de répondre « aux deux grandes énigmes de la météorologie : la couleur du ciel et la polarisation de sa lumière ».

A quoi est due la couleur du ciel? L'air a-t-il, en propre, une couleur bleue, visible seulement sur une grande épaisseur, ou bien celle-ci est-elle due à la présence de matières colorées, comme on l'a prétendu?

Il est curieux de remarquer, avec Beetz, que le célèbre peintre

(\*) *Annales de Poggendorff*, t. CXV, p. 137.

(\*\*) *Beiblätter*, t. V, p. 797.

(\*\*\*) *Archives des sciences physiques et naturelles*, t. VIII, p. 257.

(iv) *Idem*, t. XXXIV, p. 168, 1869.

Léonard de Vinci avait déjà conclu, des phénomènes de coloration observés dans certains paysages, à la *non-transparence absolue de l'air*. Pour lui, l'atmosphère était un milieu trouble qui, comme tous les milieux semblables, paraissait bleu quand on le considérait sur un fond sombre. Le bleu du ciel n'avait pas d'autre origine d'après lui. D'autre part, pour Newton le bleu du ciel était dû à la réflexion. Cette couleur devait avoir une origine analogue à celle de ses « anneaux colorés », encore connus aujourd'hui sous le nom d'anneaux de Newton.

Ainsi l'observation délicate et pénétrante d'un des plus grands peintres était d'accord avec les conclusions du plus grand des physiciens.

Cette opinion reçut dans notre siècle une confirmation éclatante lorsque Brewster, Herschel et d'autres physiciens montrèrent que la lumière du firmament était polarisée, c'est-à-dire qu'elle jouissait de la propriété que donne à la lumière la réflexion sur un corps transparent. Mais sur quoi la lumière du firmament se réfléchit-elle? Voilà la question qu'il était réservé à Tyndall de résoudre.

Il constata, au cours d'un travail sur une série de réactions chimiques produites par la lumière (\*), qu'en éclairant fortement des substances telles que le sulfure de carbone, le nitrate d'amyle, l'iodure d'amyle, etc., contenues à l'état de vapeur, dans un tube, elles se trouvaient décomposées et que l'un des produits de décomposition était assez peu volatil pour qu'il se précipite dès sa formation. En un mot, la lumière provoquait la formation d'un nuage; en graduant, à l'origine, la quantité de vapeur, on pouvait obtenir des nuages plus ou moins épais. Les particules dont ces nuages se composaient pouvaient être assez volumineuses pour être visibles à l'œil nu, ou assez petites pour échapper probablement aux plus forts grossissements du microscope. Eh bien, dans tous les cas où les vapeurs employées, quelle qu'eût été leur nature, étaient suffisamment atténuées, l'action commençait par la formation d'un nuage bleu dont la couleur pouvait rivaliser avec le bleu le plus foncé et le plus pur du ciel d'Italie. Il apparaissait dans le tube « comme un morceau du firmament ». En regardant transversalement cette coloration

(\*) *Archives des sciences physiques et naturelles*, t. XXXIII, p. 318, 1868.

bleue avec un prisme de Nicol on s'assurait que pour une position convenable du prisme le bleu s'éteignait, tandis qu'en tournant le prisme de 90° il apparaissait de nouveau. En interposant des plaques minces de gypse ou de quartz entre le nicol et le nuage bleu, on voyait apparaître les couleurs de la lumière polarisée. Tyndall en conclut que la lumière blanche jouit de la propriété de se diviser en traversant un milieu renfermant des particules hétérogènes. Les rayons les plus réfringibles, les rayons bleus du spectre, sont réfléchis dans une direction perpendiculaire à celle de la lumière incidente, et polarisée dans un plan perpendiculaire à la même direction; les rayons les moins réfringibles continuent au contraire leur route.

En résumé, il était possible de reproduire, dans le laboratoire, les phénomènes optiques observés dans le ciel. L'identité de ces propriétés a porté Tyndall à conclure que vraiment le bleu du ciel est dû à une réflexion de la lumière sur des particules excessivement petites, formées sans doute par la vapeur d'eau. On peut se demander cependant si cette conclusion n'est pas trop absolue et si les phénomènes optiques du firmament ne sont pas dus encore à d'autres causes, entre autres à la présence de l'ozone dont la couleur bleue a été bien démontrée, ou de la vapeur d'eau qui pourrait être bleue aussi, ainsi que notre savant confrère M. Montigny l'a fait observer à l'occasion de ses nombreuses et belles études sur la scintillation des étoiles. Nous ajouterons d'ailleurs que Tyndall lui-même ne paraît pas exclure cette possibilité, puisqu'il dit, en faisant remarquer dans un autre ouvrage (\*) que la vapeur d'eau et l'eau liquide absorbent la même classe de rayons : « ce serait donc à la vapeur d'eau que l'atmosphère doit d'être un milieu de couleur bleue ».

Quoi qu'il en soit de ce doute, les recherches de Tyndall suggérèrent à M. Soret l'idée que la teinte bleue de l'eau pourrait être produite aussi, au moins partiellement (\*\*), par réflexion.

(\*) *La chaleur, mode de mouvement*, p. 365. Traduction de M. l'abbé Moigno.

(\*\*) M. Soret a cru que je lui avais attribué des opinions trop « absolues » dans ma note publiée en 1883 sur *La couleur des eaux*; il prévient même que c'est pour rectifier mes dires qu'il a écrit l'article paru dans les *Archives des sciences physiques et naturelles* en mars 1884 (t. XI, p. 276). Je saisis cette occasion pour faire remarquer, à mon tour, que mon éminent collègue s'est mépris et sur mes intentions et sur mes paroles. En effet, voici l'objet de la plainte : j'aurais attribué à M. Soret

Il suffisait, pour s'en assurer, de vérifier si la lumière de l'eau bleue était polarisée. En regardant à l'intérieur du lac de Genève à l'aide d'un tube fermé par une glace et muni d'un nicol oculaire, M. Soret constata, en effet, que l'eau émet de la lumière polarisée dans la direction perpendiculaire aux rayons solaires réfractés. Ainsi il y a une analogie réelle entre la lumière du ciel et celle de l'eau.

Plus tard, M. Hagenbach répéta ces observations sur le lac de Lucerne et sur le lac de Zurich, si nous ne nous trompons : il reconnut aussi la polarisation de la lumière de ces eaux. Cette dernière observation nous paraît particulièrement intéressante, car elle donne à penser, les eaux des lacs de Lucerne et de Zurich étant vertes et non bleues. Nous y reviendrons plus loin.

On le voit, la question s'est compliquée à la suite des expériences de Tyndall, de Soret et de Hagenbach. En démontrant que la couleur de l'eau pouvait tenir à une raison physique, la réflexion, ces savants ont fait planer un doute sur l'exactitude de la conclusion de Bunsen, savoir que l'eau était une substance bleue par elle-même. Ce doute était d'ailleurs d'autant plus fondé que Tyndall lui-même, en complétant ses recherches, a démontré qu'aucune des eaux natu-

---

l'opinion que le bleu de l'eau était dû *exclusivement* à l'influence de la diffusion. Or je ne trouve pas une phrase, dans mon article, attribuant à M. Soret la pensée que la couleur bleue de l'eau vient *absolument* de la diffusion : au contraire, en parlant des expériences de MM. Soret, Hagenbach et Hayes, j'ai dit textuellement :

« Ces dernières expériences *paraissent* établir d'une manière certaine que l'eau serait par elle-même incolore, contrairement à l'opinion de Bunsen; cependant, je le dirai dès maintenant, rien n'est moins établi. » M. Soret le dit lui-même. « Par un temps couvert, je n'ai pas obtenu de trace de polarisation. »

Dans mon article, les guillemets avaient embrassé, par erreur, une proposition de plus; celle-ci : « et cependant alors le lac est encore bleu ». Je ne crois cependant pas que le sens des paroles de M. Soret se trouve altéré par cette faute typographique qui m'a échappé; au contraire, cette proposition, si elle avait été écrite par M. Soret, eût montré davantage encore que cet illustre physicien n'a jamais voulu assimiler absolument les phénomènes de coloration du ciel et des eaux.

Pour ma part j'ai cru — et je crois encore — qu'il était utile pour la science de vérifier si l'eau pure était colorée *de fondation* et jusqu'à quel point la diffusion de la lumière produite par les particules en suspension devait entrer en ligne de compte pour expliquer les phénomènes observés.

A mon tour je suis heureux de saisir l'occasion d'une lecture que l'Académie m'a fait l'honneur de me demander, pour dissiper un malentendu auquel j'étais loin de m'attendre.

relles dont il a pu faire l'examen n'était optiquement vide. On devait se demander, dès lors, si leur couleur n'était pas le résultat de la réflexion, comme c'est le cas pour le bleu du firmament, et si l'eau dont Bunsen s'était servi était bien optiquement vide. Cette question était d'autant plus légitime qu'à l'époque où Bunsen a fait son observation on ne savait pas encore combien il est difficile d'obtenir de l'eau exempte absolument de matières hétérogènes. Constatons cependant que ni Tyndall ni Soret n'ont repoussé, à la suite de leurs expériences, l'idée d'une couleur bleue propre à l'eau, mais cette réserve, bien naturelle de la part de savants aussi éminents, ne pouvait être considérée comme une solution de la question.

En résumé, on devait se demander si l'eau était, par elle-même, colorée ou non, et dans l'affirmative, si sa couleur était le bleu ou le vert.

C'est pour répondre à ces questions que nous avons entrepris nos expériences de 1885. Voici, en résumé, comment on a opéré.

On a monté, pour cet examen, deux tubes en verre de 5 mètres de long et de 4 centimètres de diamètre intérieur; ils étaient fermés par des plans en verre et munis à chaque bout d'un ajutage, également en verre, destiné à l'introduction de l'eau. Les tubes passaient par une gaine noire interceptant complètement l'éclairage latéral; ils étaient placés perpendiculairement à une vitre dépolie d'une des fenêtres du laboratoire et recevaient, par conséquent, de la lumière diffuse dans la direction de leur axe. L'emploi simultané de deux tubes s'imposait par les examens comparatifs que l'on voulait entreprendre sur divers liquides.

Les tubes furent remplis d'abord d'eau distillée préparée pour les usages courants du laboratoire. La première fois, cette eau était d'un vert clair reproduisant assez bien la teinte d'une solution de sulfate ferreux. Quelques jours après, les tubes reçurent de l'eau fraîchement distillée, comme la première, dans l'alambic du laboratoire. On put observer, cette fois, une teinte bleu céleste assez pure, mais après soixante-dix heures de séjour environ dans les tubes, cette eau était devenue aussi verte que la première, sans avoir perdu rien cependant, en apparence, de sa limpidité.

Cette expérience préliminaire montrait bien que l'eau distillée des laboratoires est loin d'être pure : elle renferme des substances qui subissent des changements avec le temps, puisqu'une eau bleue

devient verte petit à petit. Quelles sont ces substances étrangères? Il paraît qu'elles sont de nature organisée et vivante. Voici une observation qui tend à le prouver.

L'un des deux tubes a été rempli d'eau distillée ordinaire qui donnait encore une couleur bleue et l'autre tube a reçu de la même eau additionnée d'un dix-millième de bichlorure de mercure. L'addition de cette faible quantité d'un sel n'a changé en rien la couleur de l'eau; il n'y avait aucune différence à saisir dans le bleu des deux tubes. Or, après six jours, l'eau du premier tube était devenue verte, tout en restant limpide, tandis que l'eau additionnée de bichlorure de mercure conserva sa teinte bleue d'une manière immuable.

Une contre-épreuve fut instituée ensuite. L'eau verdie du premier tube fut additionnée à son tour de bichlorure de mercure, et on put constater au bout de trois jours déjà un retour lent du vert au bleu. Au bout de neuf jours environ, le virement parut arrêté, l'eau était d'un vert bleuâtre évident; mais elle ne retourna jamais cependant au bleu pur.

Si l'on fait attention que le bichlorure de mercure est une des substances les plus meurtrières connues, surtout pour les petits organismes, on sera certainement porté à croire que la vie se rencontre jusque dans l'eau distillée de nos laboratoires et, conséquence nécessaire aussi, que cette eau renferme, en outre, les aliments nécessaires au développement de ses habitants.

Quelle peut être l'origine de ces êtres organisés? On admettra avec peine que des germes vivants aient résisté à l'acte de la distillation de l'eau sans trouver la mort. Ils n'ont pas passé de la cucurbitte dans le serpentin, mais il y a tout lieu de supposer qu'ils auront été engloutis par l'eau au moment où celle-ci coulait à travers l'air dans le récipient destiné à la recevoir. Si l'on se rappelle que l'air le plus transparent pour notre œil est un lieu où s'agitent des poussières et des germes de mille espèces, il paraîtra évident qu'une goutte de liquide ne saurait traverser un pareil milieu sans se salir.

Notre célèbre confrère M. Stas a constaté déjà, du reste, le fait signalé ici, au cours de ses travaux classiques sur les rapports réciproques des poids atomiques. Il vit que l'eau de pluie ou de source, distillée deux fois, fournit un liquide qui, évaporé immédiatement après dans un vase de platine, se volatilise sans laisser de résidu. Cette même eau distillée, conservée pendant quelques jours, éva-



porée ensuite, laisse un résidu jaune brunâtre très sensible. Ce résidu jaune se brûle complètement au rouge dans l'air. L'eau distillée, dit encore M. Stas, contient donc des matières organiques volatiles qui, au bout d'un certain temps, deviennent spontanément fixes.

On voit comment ceci s'adapte aux observations que nous avons pu faire. Aussi longtemps que l'eau distillée renferme ces matières organiques dissoutes et à l'état volatil, comme le dit notre confrère, l'eau est bleue par transparence, mais à mesure que ces matières s'organisent par la vie, elles deviennent fixes et l'eau paraît de plus en plus verte.

Ces expériences prouvent que l'eau distillée des laboratoires est impropre aux recherches qui nous occupent, car elle n'est pas comparable à elle-même à des époques différentes; elles montrent aussi pourquoi les observations anciennes ont conduit à des résultats non concordants.

Il fallait donc reprendre ces observations en faisant usage d'eau aussi pure que possible. A cet effet, on a appliqué, en s'entourant des plus grandes précautions, le procédé que M. Stas a fait connaître.

L'eau de source a d'abord été maintenue en ébullition avec du permanganate de potassium alcalin pendant quatre heures, dans un vase en verre, puis elle a été distillée deux fois dans un appareil complètement en platine et reçue dans un vase en argent fermé, à l'abri de l'air. Pour laver l'appareil, on a distillé d'abord 5 litres qui furent rejetés, puis le premier cinquième de la quantité d'eau distillée ensuite a servi à laver, chaque fois, toute la surface du récipient.

Cette eau pure, versée dans les tubes, a fait voir une couleur bleue dont on se représenterait difficilement la pureté. Les tubes furent abandonnés à eux-mêmes pendant deux semaines et l'on n'a pu constater aucune altération dans la pureté de la coloration. Cette fixité de la couleur peut être considérée comme un indice de la grande pureté de l'eau.

D'ailleurs on a appliqué à cette eau la méthode d'investigation de Tyndall : le cône lumineux provenant d'une lampe au magnésium était à peine visible. Il était même difficile d'affirmer si sa trace était marquée ou non. Mais s'il pouvait encore rester un doute sur la question de savoir si cette eau était réellement *vide* au point de vue optique, il n'en pouvait rester aucun sur l'origine de la couleur.

En effet, si celle-ci avait eu pour cause la diffusion de la lumière, le cône lumineux aurait dû non seulement être visible, mais encore présenter une couleur franchement bleue quand on l'observait *transversalement* : il aurait dû rappeler le cône que l'on obtient en éclairant un nuage naissant; mais la comparaison n'était pas possible. D'autre part, si le phénomène de réflexion qui engendre le bleu du ciel s'était produit ici avec une intensité saisissable pendant que les tubes se trouvaient éclairés par la lumière diffuse du laboratoire, ceux-ci eussent dû être parcourus dans le sens de leur axe par de la lumière rouge jaunâtre, puisque dans ce cas le bleu aurait été rejeté dans une direction perpendiculaire à cet axe. Alors l'observateur, en regardant les tubes suivant leur axe, aurait dû percevoir cette couleur rouge-jaune dans le cas où l'eau aurait été incolore par sa nature, sinon, dans le cas où l'eau est bleue de fondation, ces rayons rouge-jaune devaient être absorbés par le milieu liquide et être éteints pour l'œil de l'observateur. C'est bien là ce qui s'est produit, et l'on peut conclure que l'eau était vraiment bleue par elle-même et de plus que le phénomène de diffusion, si tant est qu'il se soit produit, n'a eu aucun effet appréciable.

Il importe, du reste, de se rendre un compte aussi exact que possible de l'intensité des couleurs que peut produire le phénomène de diffusion dans un liquide, afin de ne pas se tromper sur l'importance du rôle qu'il joue dans la coloration des eaux naturelles. A notre avis, cette importance a été exagérée. Voici une expérience qui justifie notre opinion.

Nous avons trouvé, après maintes recherches restées vaines, un liquide absolument *incolore* de nature, même sous une épaisseur de 5 mètres. C'est l'alcool amylique. Voilà le milieu qui va nous servir pour notre vérification.

En effet, si ce milieu incolore est optiquement vide, autant que possible du moins, la lumière blanche devra le traverser sans altération apparente, le liquide doit paraître incolore; d'autre part, si ce milieu n'est pas optiquement vide, la lumière blanche devra éprouver la diffusion, et dans le cas où celle-ci aurait une intensité réelle, le liquide devra paraître rouge-jaune dans la direction du rayon incident et bleuâtre dans une direction perpendiculaire à la première.

Eh bien, nous avons distillé et agité dans l'air du laboratoire

5 litres de cet alcool pendant plusieurs semaines en vue de lui faire englober autant de poussières microscopiques que possible. Examiné par la méthode de Tyndall, ce milieu s'illuminait : preuve certaine qu'il tenait des corps hétérogènes en suspension malgré son apparence de limpidité parfaite pour l'œil; mais, examiné sur une épaisseur de 5 mètres à travers les tubes en verre, il n'a fait voir aucune trace ni de rouge, ni de jaune. La lumière en sortait aussi blanche qu'elle y entra. En diminuant ou en augmentant l'intensité de l'éclairage, on n'a pas davantage pu faire apparaître de coloration. On doit conclure de là que les phénomènes de coloration dus à la diffusion de la lumière ne sont pas d'une grande intensité. *Provoqués seulement par une lumière puissante*, leur influence disparaît auprès des phénomènes de coloration dus à l'absorption quand l'éclairage est moins intense. Ainsi, par hypothèse, si un lac, au lieu d'eau, contenait de l'alcool amylique, toutes autres conditions restant les mêmes, cette masse de liquide nous apparaîtrait incolore ou à peu près : la lumière incidente éprouvant un affaiblissement partiel par sa réflexion sur les particules du liquide ou sur le fond serait renvoyée atténuée mais non colorée.

Il nous paraît donc établi que l'eau pure est bleue par elle-même : cette couleur ne provient pas de la diffusion de la lumière incidente sur des particules hétérogènes, mais elle est, comme le bleu du saphir, due à l'absorption des rayons les moins réfrangibles du spectre.

D'ailleurs, on n'a jamais vérifié immédiatement si la réflexion subie par la lumière au sein de l'eau donne vraiment du bleu.

On a conclu à ce résultat indirectement et par analogie, parce que la lumière émergeant de l'eau était polarisée. Cela ne suffit pas, à notre avis, à démontrer que la lumière réfléchie est bleue; elle peut être bleue, mais elle ne l'est pas nécessairement. Elle le serait si l'expérience montrait que les rayons autres que le bleu sont ou bien incapables de se réfléchir dans les mêmes conditions que le bleu, ou tout au moins qu'ils ne sont pas polarisés. Or, M. Soret (\*), en faisant passer par de l'eau douce douée d'un grand pouvoir d'illumination, un faisceau de lumière solaire décomposé par un prisme, a

obtenu une trace lumineuse présentant toutes les nuances juxtaposées du spectre. De plus, en opérant sur le lac de Genève, au moyen d'un appareil spécial comprenant un spectroscopie à vision directe d'Hofmann et un nicol, il a observé que tous les rayons, quelle que soit leur réfrangibilité, sont partiellement polarisés. Or, tous ces rayons étant polarisés dans le même plan, il s'ensuit que la lumière blanche renvoyée par les eaux du lac est également polarisée, et que le phénomène de polarisation de l'eau ne permet pas de conclure avec certitude à une diffusion de la lumière ayant pour effet de produire, dans une direction déterminée, une illumination bleue.

Nous montrerons plus loin que, si même une diffusion de cette sorte avait lieu, son effet devrait nécessairement se compenser au sein du liquide. L'observateur ne serait donc pas en état de le constater. Ainsi, à notre avis, la propriété de l'eau d'être bleue de fondation doit intervenir seule, dans l'état actuel de nos connaissances, pour expliquer les phénomènes de coloration des mers et des lacs bleus. Il est facile de s'en convaincre, car on n'a, en somme, qu'à répondre aux questions suivantes :

1° Pourquoi les régions profondes des mers et des lacs sont-elles bleues?

2° Pourquoi les régions moins profondes sont-elles vertes au lieu d'être bleues?

3° Pourquoi toutes les eaux ne sont-elles pas également bleues et certaines d'entre elles sont-elles lavées de blanc?

4° Pourquoi leur nuance bleue change-t-elle avec l'énergie de l'éclairage, de manière à se montrer d'un bleu plus saturé quand la lumière incidente n'est pas trop vive?

5° Pourquoi cette nuance est-elle influencée par l'état d'agitation ou de calme de la surface de l'eau, ou bien, ce qui revient à peu près au même, pourquoi change-t-elle avec la position de l'observateur?

Pour comprendre la portée de la première question, nous devons nous rappeler que si l'eau était optiquement vide, c'est-à-dire si elle ne renfermait aucune particule hétérogène, les régions profondes des mers et des lacs nous paraîtraient aussi noires que de l'encre, quelle que soit d'ailleurs leur couleur propre. Or, Tyndall et surtout Soret ont examiné les eaux naturelles sous le rapport de leur limpidité absolue; ils ont reconnu qu'aucune n'était optiquement vide. La lumière incidente blanche pénètre dans l'eau et se trouve réfléchie

(\*) *Archives des sciences physiques et naturelles*, t. XXXIX, pp. 362 et 364.

sur les particules que l'eau tient toujours en suspension. Pendant son trajet, les moins réfringibles des rayons qui la composent sont absorbés par l'eau bleue, et la lumière sort bleue, c'est-à-dire avec la couleur complémentaire des rayons perdus. Si les corps réfléchissants sont transparents, la lumière sortant des lacs devra être polarisée chaque fois que la direction de son incidence est simple. (Voir Soret, *Archives, loc. cit.*)

Nous avons mesuré, au moyen d'un photomètre spécial, l'intensité de la lumière émergeant de l'eau bleue. Nous ferons connaître plus loin les résultats, qui nous paraissent instructifs et probants.

Mais complétons notre examen. Les particules suspendues dans l'eau seront plus ou moins nombreuses, c'est-à-dire plus ou moins serrées, d'une mer à une autre, d'un lac à un autre, ou même seulement d'une région à une autre. Que résultera-t-il de là? On le verra sans peine.

Si les particules sont relativement nombreuses, un rayon de lumière incidente fera peu de chemin dans l'eau avant de rencontrer, dans la suite de ses réflexions, la particule qui le rejettera au dehors. Le bleu sera donc peu saturé : il sera comme lavé de blanc. Dans le cas contraire, le rayon parcourra une route plus longue dans l'eau et l'effet produit sera le même que si l'observateur examinait une colonne d'eau plus grande. Le bleu sera plus saturé, plus foncé même.

Remarquons encore que, grâce à ces réflexions multipliées, l'illumination apparente de l'eau ne doit pas nécessairement venir d'une très grande profondeur. Il se produit un phénomène analogue à celui que tous les touristes ont observé lorsqu'ils ont traversé, sur les montagnes, des champs de neige récemment tombée, c'est-à-dire formés de neige en petits cristaux primitifs et non encore condensés en grains de névé plus gros. Alors on voit chaque trou produit en enfonçant le manche du piolet dans cette neige, illuminé par la plus belle lumière bleue. Ce bleu ne vient évidemment pas des profondeurs de la glace ou de la neige, mais il est produit parce qu'un rayon de lumière blanche, avant de pénétrer dans l'œil du touriste, a subi un million de réflexions à la surface des petits cristaux de neige, et qu'à chacune de ces réflexions sur un corps bleu il a perdu une partie de ses rayons rougeâtres, de manière à devenir de plus en plus bleu.

C'est ainsi, pensons-nous, que l'on peut comprendre pourquoi les

eaux de certains torrents des montagnes sont d'un beau bleu dont la saturation ne paraît pas en rapport avec la profondeur. Le Tessin nous montre, dans son trajet d'Airolo à Bellinzona, toute une suite d'exemples de ce fait.

Ainsi s'explique aussi pourquoi un objet clair, une rame, par exemple, plongé à peu de profondeur dans l'eau d'un lac bleu, paraît bleu, bien que l'épaisseur d'eau qui le couvre soit par elle-même insuffisante pour révéler le bleu. C'est que la lumière renvoyée par l'objet n'a pas seulement traversé la petite épaisseur depuis la surface de l'eau à l'objet, mais elle vient aussi, par réflexion, des régions latérales, et c'est de là qu'elle amène le bleu.

Si ces distances latérales ne sont pas suffisantes, comme cela est souvent le cas pour l'eau de certaines parties des bords d'un lac ou de la mer, le phénomène se compliquera. La lumière émanant de ces points sera nécessairement moins saturée de bleu, même si le fond de l'eau est blanc. Or, nous avons dit plus haut que l'eau absorbait avec grande facilité les rayons les moins réfringibles, les rayons rouges, puis les autres, de plus en plus difficilement, jusqu'aux rayons bleus; donc, dans une couche d'eau de faible épaisseur, les rayons les moins réfringibles ne seront pas encore éteints suffisamment et la lumière paraîtra verte. C'est très probablement pour cela que les vagues de la mer bleue sont vertes : on les regarde, en effet, par transparence sous une épaisseur relativement faible. Il y a encore d'autres causes qui agissent pour faire virer au vert la couleur bleue de l'eau, nous les rencontrerons plus loin; mais nous avons tenu à ne pas omettre celle-ci, parce qu'elle a été formulée d'abord par Beetz (\*), si nous ne nous trompons, et acceptée comme exacte par Tyndall (\*\*) et par Soret (\*\*).

Mais ce n'est pas tout, l'explication des phénomènes de coloration de l'eau ne peut être donnée exclusivement par la physique. Elle réclame aussi le concours d'un autre ordre de connaissances : celui de la *perception des sensations*. Nous devons en tenir compte pour

(\*) *Annales de Poggendorff*, t. CXV, p. 137.

(\*\*) *Revue scientifique* (2), t. I, p. 66.

(\*\*\*) *Archives des sciences physiques et naturelles* (3), t. XI, p. 276.

expliquer les changements de nuances du bleu de l'eau avec l'intensité de la lumière incidente.

Les expériences et les observations qui ont été faites sur la sensibilité, surtout les essais de mesure des sensations, ont montré qu'une sensation est en relation étroite avec l'état d'impression préalable dans lequel se trouve l'organe qui nous la fait percevoir (\*).

Les mesures opérées ont permis de donner une forme précise à cette proposition qui est connue sous le nom de loi de Weber : « La sensation est proportionnelle au logarithme de l'excitation. » Ou bien encore : « Tout accroissement constant de la sensation correspond à un accroissement d'excitation constamment proportionnel à celle-ci. »

Ainsi l'expérience a appris que l'on ne perçoit la différence de deux poids que si l'un dépasse l'autre d'une certaine quantité : un dix-septième environ. Ceci veut dire que l'on s'apercevra de la différence d'un gramme si l'on compare des poids de 17 et de 18 grammes, d'un kilogramme si l'on compare des poids de 17 et 18 kilogrammes. Mais on ne s'apercevra pas d'une différence d'un gramme ajouté à un poids d'un kilogramme.

On n'entend voler une mouche que dans le silence ; l'odeur de la violette n'est plus perceptible quand on est saisi par celle de l'ammoniacque, et la lumière d'une bougie perd son éclat, pour nous, le jour, pour devenir même nulle en plein soleil.

De même, si la loi de Weber est exacte, la sensation d'une couleur doit s'éteindre quand l'œil est fortement excité par la perception d'autres couleurs ou même fortement ébranlé par la lumière blanche.

Nous avons tenu à vérifier le fait par l'expérience.

Pour cela, nous avons concentré sur la fente du collimateur d'un spectroscopie, destiné d'ordinaire à l'analyse spectrale, la lumière du soleil à l'aide d'une lentille convexe de 20 centimètres de diamètre. Nous produisons de cette manière un spectre d'une intensité lumineuse excessive. Eh bien, en plaçant l'œil à la lunette du spectroscopie, on ne voyait qu'une bande extrêmement lumineuse, *presque*

---

(\*) Notre confrère M. Delbœuf a fait de cette question une étude approfondie. On lira avec intérêt, et avec plaisir, ses travaux publiés par l'Académie dans les tomes XXIII et XXIV des *Mémoires* in-8°.

*blanche*, dans laquelle il était d'autant plus difficile de distinguer des couleurs que l'intensité lumineuse était elle-même plus grande. Bien mieux, on ne saisissait même plus, pour ainsi dire, de différence dans l'intensité lumineuse relative des différentes régions de cette bande. Nous ajouterons encore que les parties décrites comme *obscur*es dans le spectre s'étaient illuminées aussi : *elles étaient visibles*, mais de la même teinte que leurs voisines. En un mot, on voyait une bande lumineuse presque indéfinie dans les deux sens.

Ainsi, dans le spectre lui-même, la perception des couleurs, quelles qu'elles soient, s'efface ou se trouble quand l'œil est excité par une trop forte lumière. En faisant usage d'un spectroscopie à quatre prismes, l'effet a été fortement atténué — ce qui devait être — parce que la lumière perdait son intensité en s'étalant sur une surface plus grande.

Ce point acquis, il devient évident que si nous contemplons l'eau d'un lac bleu par une journée claire, quand le soleil darde ses rayons et que notre œil se trouve trop fortement excité, la sensation de bleu sera moins vive : le lac nous paraîtra plus blanc. A cette cause d'affaiblissement du bleu vient s'ajouter, bien entendu, celle qui résulte du plus ou moins de limpidité de l'eau. Nous devons donc dire que la sensation bleue maxima qu'une eau pourra produire en nous est étroitement liée au degré d'éclairage et à l'état d'excitation préalable de notre œil.

Les effets observés selon les heures de la journée où se font les observations, selon l'état plus ou moins couvert du ciel, sont, en résumé, la résultante d'une action physique et d'une action psychique.

Mais l'état de calme ou d'agitation de la surface de l'eau modifie aussi la perception de la couleur bleue, surtout par un temps serein. C'est que, pour une position donnée de l'observateur, les rides ou les vagues de la surface de l'eau ont chacune leur point brillant ; cette illumination, provoquée par la réflexion de la lumière à la surface de l'eau, vient rencontrer celle qui émane du sein de l'eau elle-même. Selon que la première l'emporte sur la seconde ou qu'elle lui est inférieure, le bleu de l'eau sera plus ou moins lavé de blanc. Enfin, si l'œil de l'observateur reçoit aussi la lumière qui a traversé les rides ou les vagues transparentes, les tons verts viendront alors se marier, pour lui, aux nuances bleues du fond.

Ainsi s'expliquent d'une manière simple les phénomènes variés de coloration des eaux bleues.

Nous pouvons passer immédiatement à la seconde partie de notre sujet : l'origine de la couleur verte de certaines eaux.

H. Sainte-Claire Deville (\*) et Wittstein (\*\*) avaient cru trouver cette origine dans la composition chimique des eaux vertes. Celles-ci renfermaient, en proportions plus ou moins grandes, des corps jaunes ou bruns, soit des composés du fer, soit des substances chimiques qui retiennent les rayons bleus de la lumière blanche, tandis que l'eau elle-même retient les rayons jaunes ou rouges. De cette manière, l'eau laisserait passer en majeure partie les radiations du milieu du spectre : en un mot, elle serait verte.

Cette explication n'a rien que de très rationnel, et, dans bien des cas, elle est fondée; mais on la trouve souvent inopérante. C'est là ce que nous avons montré dans notre premier travail sur la matière. Nous n'y reviendrons pas ici et nous nous bornerons à dire, pour motiver notre avis, que d'après Wittstein lui-même, les eaux du lac de Starnberg, quoique vertes, ne laissent cependant à l'évaporation aucun résidu coloré en jaune ou en brun.

L'explication proposée n'a donc pas un caractère de généralité suffisant.

Comme nous l'avons déjà dit, pour nous, la véritable raison de la couleur verte doit être cherchée dans les propriétés optiques des milieux troubles de nature spéciale. Nous allons procéder rapidement à leur étude.

L'expérience prouve qu'un liquide tenant en suspension des particules solides, suffisamment nombreuses, d'une ténuité telle que le filtre ne les retient plus, se comporte comme un milieu opaque : la lumière ne peut pas traverser une colonne assez grande de ce milieu; celui-ci paraît donc noir. C'est le résultat que l'on obtient avec l'eau claire de la Meuse, par exemple, quand on l'examine au moyen d'un tube de 5 mètres de long.

Mais si l'on dilue ce milieu trouble au moyen d'eau pure, aussi

(\*) *Annales de chimie et de physique* (3), t. XXIII, p. 32.

(\*\*) *Vierteljahresschrift für pr. Pharmacie*, t. X, p. 342.

limpide que possible, en ayant soin de conserver à la colonne liquide sa longueur (\*), on observe qu'à partir d'un certain moment la lumière parvient à passer par le tube; mais on n'a pas affaire à la lumière blanche atténuée de la source, elle est fortement colorée en rouge, en orangé ou en jaune, selon la nature et la grosseur des particules qui troublent l'eau et aussi selon l'épaisseur du milieu.

Si l'on dilue davantage le milieu trouble, on observe que la lumière transmise acquiert des tons de plus en plus verts; elle est même d'un vert franc pour un degré de dilution donné. Si l'on continue encore à diluer le milieu, on voit la couleur verte virer de plus en plus vers le bleu, la couleur propre de l'eau, et finalement l'atteindre si la dilution est extrême.

Nous nous sommes assuré (\*\*) que ces changements optiques ne variaient pas en qualité avec la nature chimique des matières constituantes du trouble : la craie, l'argile, la silice donnent les mêmes résultats. L'état solide ou liquide est même indifférent. Ainsi les gouttelettes microscopiques d'alcool amylique qui restent en suspension dans l'eau, en lui donnant le ton louche bien connu, permettent de reproduire ces phénomènes avec une égale facilité. Il est bien entendu, toutefois, que ces matières « troublantes » devront être incolores.

On le voit, on peut reproduire, dans le laboratoire, au moyen de quelques litres d'eau et d'un rien de matières hétérogènes, toutes les nuances observées dans les eaux naturelles.

On pourrait déjà conclure de là que les eaux vertes, jaune verdâtre, etc., sont simplement des milieux plus troubles que les eaux bleues.

Il importe cependant d'examiner la question d'une manière plus complète; nous pourrions alors donner en connaissance de cause, ainsi que nous l'annoncions plus haut, les motifs pour lesquels nous pensons, contrairement à M. Soret, que l'influence de la « diffusion » de la lumière n'a pas une grande importance pour la production de

(\*) Dans le cas où l'on n'aurait pas pour but d'étudier l'influence de la couleur propre de l'eau, on pourrait se borner à diminuer la longueur du tube; ce qui peut être plus commode.

(\*\*) *Bulletin de l'Académie royale de Belgique*, 3<sup>e</sup> série, t. V, 1883.

la couleur *bleue* des eaux, mais qu'elle en a une capitale pour la formation des autres teintes (\*).

Si au lieu d'examiner un liquide trouble à travers un tube noirci extérieurement, c'est-à-dire dans la direction de la lumière transmise, on le place dans les conditions permettant de le regarder dans une direction perpendiculaire à la première, on constate alors qu'il émet une lumière bleuâtre. Celle-ci se voit d'autant mieux que l'on prend plus de soin de protéger l'œil contre la lumière transmise; en outre, tandis qu'elle est faible dans un milieu trouble dû la craie, elle est beaucoup plus accusée quand le trouble est dû à un léger précipité d'alumine.

Ce fait peut avoir une conséquence importante. En effet, au sein d'une eau naturelle, chaque élément de volume du liquide trouble ne sera pas seulement alors une source de lumière rouge-jaune, mais encore une source de lumière bleue. Le phénomène de coloration du lac est donc plus compliqué que nous ne l'avons supposé. Pour s'en convaincre, il suffit de faire attention que la lumière rouge-jaune peut être absorbée par l'eau bleue du lac, qu'elle peut être éteinte en un mot, tandis que la lumière bleue traversant librement le liquide

---

(\*) Les phénomènes de coloration dus aux milieux troubles ont été observés par toute personne qui a eu l'occasion de faire des précipités chimiques; M. E. Brücke en a donné une étude dans les *Annales de Poggendorff*, t. LXXXVIII, p. 303. Mais je pense avoir été le premier à démontrer leur rôle dans la production des teintes brunes, jaunes et vertes des eaux. (Voir mon travail sur *La couleur des eaux* de 1883, *loc. cit.*) Aussi, mon étonnement a été grand en lisant, dans le *Journal de Genève* du 5 août 1885, une chronique scientifique de M. Emile Yung où figure ce passage: « Quoique d'ingénieuses expériences, faites il y a deux ans par un savant belge, M. Spring, aient montré que l'eau pure est bleue lorsqu'on l'observe sur une épaisseur de 5 à 10 mètres, il est incontestable que les particules que l'eau peut tenir en suspension contribuent à produire les variations de teintes vertes, grises ou jaunâtres, que nous offrent les lacs et les mers. »

C'est-à-dire que j'aurais dénié l'influence des particules en suspension pour produire la couleur verte, alors que je pense avoir cependant été le premier à la reconnaître.

Je ne me doutais pas que la rédaction de mon travail avait été obscure au point qu'on a pu lire le contraire, non pas des pensées, mais des faits qui y sont exposés. C'est d'autant plus regrettable que l'opinion du chroniqueur du *Journal de Genève* s'est répandue. Je suis donc doublement heureux de l'occasion qui m'est offerte d'exprimer à nouveau mes idées et de combattre des erreurs qui tendaient à s'enraciner.

viendrait renforcer pour notre œil la couleur bleue naturelle de l'eau. De cette façon, l'eau quoique trouble pourrait ne pas paraître verte; cette dernière couleur ne serait sensible que dans le cas particulier où le bleu de l'eau n'éteindrait pas complètement le rouge-brun. Alors, en effet, le résidu de rouge-brun pénétrant dans l'œil en même temps que le bleu de l'eau provoquerait la sensation du vert.

Mais voici ce que l'on observe dans le laboratoire, au moyen d'un milieu trouble.

Les rayons bleus et rouge-jaune produits par la diffusion de la lumière blanche sont, à la vérité, complémentaires sous le rapport de leur qualité, mais non sous le rapport de leur quantité. Il y a plus de rouge-jaune que de bleu. Les rayons rouge-jaune et les rayons bleus n'ont pas, chacun, une direction déterminée, les empêchant d'arriver ensemble dans l'œil. Une comparaison nous permettra de rendre plus clairement notre pensée: si l'on faisait passer un faisceau de lumière blanche par une infinité de petits prismes, on ne pourrait observer de dispersion de la lumière qu'à la condition que ces prismes élémentaires fussent orientés de manière que la figure résultant de leur orientation répondit encore à la définition du prisme.

Or, l'expérience permet de constater qu'un milieu trouble, vu dans de la lumière diffuse, n'est jamais incolore, dans la profondeur, mais teinté de rouge ou de jaune plus ou moins foncé, selon la nature et la ténuité des grains suspendus dans le liquide.

A la vérité, si le trouble est grossier ou s'il est trop fort, mais dû à une matière incolore par elle-même, le milieu paraîtra blanc par réflexion; mais ce cas sort autant de la question que celui de l'opacité que nous avons rencontré à l'occasion de l'illumination d'un liquide trouble par la lumière transmise.

La surface du milieu présente encore comme une fluorescence bleuâtre, mais un examen un peu attentif montre à l'évidence que ce bleu, qui ne vient vraiment que de la couche superficielle du liquide, n'est en aucune relation de puissance avec le jaune appartenant à la masse.

Tyndall avait du reste déjà observé cette extinction du bleu sitôt que la lumière incidente n'a plus une direction définie, puisqu'il nous dit que le bleu de ces nuages naissants ne peut être observé que si l'on supprime tout éclairage latéral.

Il en résulte donc que les milieux troubles, dus à des matières suffisamment fines pour ne pas se déposer par le repos, ne produisent pas seulement une diffusion simple de la lumière blanche, mais qu'ils absorbent et éteignent une partie des rayons bleus. En un mot, on doit les considérer comme une source de lumière jaune.

Appliquons ce fait important à notre étude de la couleur des eaux.

Nous présumerons toutefois à cette étude par l'examen d'un cas simple, idéal.

Nous supposerons un milieu trouble, d'une étendue horizontale indéfinie et d'une profondeur également indéfinie, formé par un liquide incolore de nature, et nous nous demanderons de quelle couleur ce milieu serait illuminé par la lumière du jour (\*).

La lumière blanche incidente sera en partie réfléchie et en partie décomposée en bleu et en rouge-jaune. Nous pouvons donc décomposer, par la pensée, le milieu donné en trois couches : une couche de fond, blanche, une couche rouge-jaune et une couche bleue optiquement moins épaisse que la précédente. Eh bien, les rayons bleus composant la lumière de la couche blanche seront absorbés par la couche rouge-jaune; les rayons rouge-jaune traverseront la couche rouge-jaune, mais ils seront en partie absorbés par la couche bleue. En somme, la lumière sortant du milieu moyen sera verte, mêlée de plus ou moins de rouge-jaune, mais elle ne montrera pas de bleu. Tout au plus restera-t-il incertain si les couches superficielles ne présenteront pas un reflet léger de bleu, surtout quand les rayons de lumière incidente seront bien parallèles entre eux. Toutefois, ce cas tendra à se produire d'autant moins que l'excès du jaune sur le bleu sera plus grand.

Il résulte nécessairement de là, pensons-nous, que le bleu d'une nappe d'eau de la nature ne pourrait être dû à la diffusion que si celle-ci n'engendrait pas en même temps du rouge-jaune.

L'expérience montrant le contraire, il nous est impossible de partager l'opinion de M. Soret sur la matière et d'attribuer une grande importance à l'influence de la diffusion de la lumière par les particules en suspension dans le jeu de la coloration bleue de l'eau.

Nous voici maintenant préparés à aborder le cas réel, celui où le

(\*) Ce serait le cas d'un lac formé d'alcool amylique trouble.

liquide constituant le milieu trouble n'est plus incolore, mais bleu de fondation.

Le trouble dû aux matières en suspension pouvant être plus ou moins accentué, nous aurons plusieurs cas à examiner.

Si le trouble est fort, la lumière incidente ne pénétrera pas profondément dans l'eau; ceci nous dit déjà qu'elle n'en pourrait sortir très bleue, même en dehors de toute raison d'altération de cette couleur. En outre, la diffusion sera intense (nous continuons à faire abstraction du cas grossier où les particules en suspension sont volumineuses au point de réfléchir la lumière sans diffusion), il y aura relativement beaucoup de bleu et de rouge-jaune formé; or, le bleu étant compensé par une partie de rouge-jaune, le résidu de cette dernière couleur devra être pris seulement en considération. Celui-ci ne sera que faiblement absorbé par le milieu; cela étant, l'œil de l'observateur ne percevra d'autre couleur que ce jaune foncé, sans presque de mélange de vert et encore moins de bleu, la sensation de cette couleur étant rendue impossible par l'excitation trop forte du jaune foncé.

Ainsi, les eaux d'une limpidité insuffisante paraîtront sans couleur propre, elles n'émettront que du jaune plus ou moins foncé, auquel viendra se marier évidemment la couleur des particules en suspension si celles-ci ont une couleur propre. C'est bien là ce que chacun de nous a pu observer.

Si, en deuxième lieu, le trouble de l'eau est moins fort, la lumière fera un plus grand chemin dans l'eau; la compensation du bleu de diffusion et d'une partie du rouge-jaune aura nécessairement lieu comme tantôt, mais le résidu jaune arrivera à l'œil plus atténué. L'eau sera verte.

Ainsi, les eaux vertes sont aussi nécessairement des eaux troubles, mais d'un trouble incomparablement plus faible. Il est évident que la teinte plus ou moins jaune verdâtre de ces eaux dépendra de leur degré de trouble. C'est bien ce que l'on observe : le lac de Brienz, beaucoup moins limpide que le lac de Zurich ou de Lucerne, présente des tons d'un vert plus jaunâtre, bien que cependant les particules entraînées par l'Aar qui alimente le lac ne soient pas plus colorées par elles-mêmes que celles déversées par la Reuss dans le lac de Lucerne.

Enfin, si la limpidité de l'eau est plus grande encore, l'excès des

tons jaunes se réduit davantage et la couleur fondamentale de l'eau se montrera de plus en plus pure.

Nous avons voulu vérifier ces conclusions, autant que possible par une observation directe, et nous voudrions faire part encore des résultats obtenus avant d'abandonner cette tribune. Ils viennent complètement à l'appui de ce qui précède.

Si les considérations précédentes sont exactes, il faut nécessairement que les eaux des lacs soient lumineuses, c'est-à-dire qu'elles renvoient, en la distribuant dans tous les sens, la lumière incidente; en outre, toutes choses restant égales d'ailleurs, une eau verte devra être plus lumineuse qu'une eau bleue. Car dans une eau verte la lumière parcourt un chemin moins long avant d'être rejetée au dehors.

On pourra s'assurer facilement de la chose par une mesure photométrique de la lumière émise par des lacs différemment colorés.

Nous avons fait usage, à cet effet, du photomètre de Bunsen, auquel nous avons donné une disposition particulière nécessitée par les conditions spéciales où nous devons opérer.

L'appareil se composait d'un tube en métal noir à l'intérieur, de 25 millimètres de diamètre et de 70 centimètres de long. L'une des extrémités du tube était fermée par un plan de verre pour permettre de plonger l'appareil dans l'eau et se mettre ainsi à l'abri de la lumière réfléchie par la surface de l'eau; l'autre extrémité était fermée par une calotte concave de métal percée d'un petit trou et servant d'oculaire. A 12 centimètres de cet oculaire, le tube était divisé en deux parties par le diaphragme de papier portant une tache de paraffine translucide, qui constitue le photomètre proprement dit de Bunsen.

En plongeant ce tube tel qu'il vient d'être décrit dans l'eau d'un lac, on peut déjà s'assurer que l'eau se comporte comme si elle était lumineuse, puisque la partie translucide du papier se détache en blanc sur le fond non translucide, mais on n'est pas encore en état de mesurer sa lumière, c'est-à-dire de faire une comparaison avec une autre source.

Le seul point de comparaison à choisir est nécessairement la lumière du jour elle-même, car on obtient alors un rapport entre l'intensité de la lumière éclairant le lac et la lumière émanant de l'eau. Les rapports obtenus pour différents lacs sont évidemment comparables

entre eux à leur tour et fournissent les renseignements cherchés.

A cet effet, une fenêtre était pratiquée au-dessus du papier taché, et une coulisse, munie d'un repère passant devant une échelle graduée, permettait de l'ouvrir plus ou moins. Quand cette fenêtre était tout ouverte, la tache translucide du papier paraissait obscure sur fond blanc; puis en la fermant avec précaution on pouvait graduer l'ouverture de manière à faire cesser le contraste, c'est-à-dire à éclairer le papier également sur ses deux faces. On obtenait le rapport cherché des intensités lumineuses en comparant la grandeur des deux surfaces lumineuses par lesquelles la lumière ouvrait sur la surface du papier.

L'expérience ayant montré que les mesures étaient incertaines quand on faisait arriver la lumière du ciel directement dans l'appareil, on a toujours opéré en dirigeant la fenêtre non pas vers le ciel, mais sur un fond blanc (une feuille de papier placée toujours à la même distance sur la banquette du bateau servant aux observations).

Ceci posé, nous avons choisi comme type d'un lac bleu le petit lac bien connu de la vallée de la Kander, à mi-chemin entre Frutigen et Kandersteg, puis, comme type d'un lac vert, le lac de Lucerne, et enfin, comme lac vert jaunâtre, le lac de Brienz.

Voici les résultats obtenus :

Sur le lac bleu, le papier du photomètre était également éclairé sur ses deux faces quand les surfaces éclairantes avaient respectivement 415 millimètres carrés et 41 millimètres carrés. Or,  $41 : 415 = 0.099$ ; donc, la lumière émise par le lac était environ le dixième de la lumière incidente.

Ces nombres, comme les suivants, sont une moyenne de plusieurs observations.

Sur le lac de Lucerne, l'égalité était obtenue avec des surfaces

$$415 \text{ et } 45 \text{ d'où : } 45 : 415 = 0,108$$

et sur le lac de Brienz par

$$415 \text{ et } 52,5 \text{ d'où : } 52,5 : 415 = 0,126.$$

Il ressort de là que le lac le plus lumineux est le lac le plus jaune



et le lac le moins lumineux, le lac le plus bleu. Si l'on pose la lumière du lac bleu égale à l'unité, on obtient le rapport

1 : 1,694 : 1,272.

Nous n'attachons pas grande importance à la valeur absolue de ces nombres, que des mesures plus exactes viendront certainement modifier ; mais nous pensons qu'ils démontrent d'une manière suffisante l'inégalité de l'illumination des eaux des lacs ainsi que l'extinction plus grande de la lumière dans les eaux bleues, conformément à ce que nous avons établi plus haut (\*). Ils montrent aussi pourquoi les eaux de la nature paraissent encore douées d'une certaine fluorescence ; ils nous expliquent enfin les jeux de lumière que l'on observe dans les ombres d'un bateau, surtout si celui-ci est de couleur foncée. C'est qu'alors l'éclairage d'aplomb étant atténué, l'illumination des eaux est presque directement perceptible.

En résumé, s'il était possible d'éloigner de notre œil la lumière du jour pendant que celle-ci inonde la nature de ses rayons, les lacs et les mers nous apparaîtraient comme de véritables foyers de lumière, et l'on peut dire qu'ils contribuent à embellir la nature mieux que les glaces ne rehaussent le faste des salons d'un palais.

---

(\*) L'état serein ou couvert du ciel nous a paru apporter peu de changements à ces rapports ; mais quand le photomètre n'était plus plongé et que la lumière réfléchiée directement par l'eau venait dans l'appareil, il fallait ouvrir la fenêtre de plus du double pour rétablir l'égalité de lumière, même en plaçant l'appareil dans la direction des rayons incidents. Dans la direction des rayons réfléchis, toute mesure était impossible.

Voici encore quelques résultats obtenus à l'aide de ce photomètre ; nous ne les donnons qu'à titre de curiosité, car ils s'écartent de notre sujet. Un nuage blanc est environ vingt-cinq fois plus lumineux que l'eau du lac de Brienz ; un nuage noir a présenté sensiblement la même intensité lumineuse que l'eau elle-même et le bleu du ciel ne nous envoie pas beaucoup plus de lumière qu'un nuage noir, dans une direction perpendiculaire au soleil. La lumière réfléchiée par une forêt de sapins est à peu près la moitié de celle renvoyée par l'eau.

---