

Sur les causes de la variété des teintes des eaux naturelles et sur la clarification des liquides par l'électricité.

(Compte rendu du Ve Congrès International d'Hydrologie médicale,
de Climatologie et de Géologie [Liège — 1898].)

L'eau limpide paraît absolument incolore sous faible épaisseur; c'est ce que nous observons dans les manipulations de tous les jours.

Mais si, au lieu de considérer le petit volume d'eau nécessaire à nos besoins domestiques, nous regardons les masses imposantes de la nature, les mers, les lacs, les fleuves, nous constatons un effet tout autre. Non seulement l'eau nous paraît alors *colorée*, mais sa couleur est variée et les nuances qu'elle présente sont, parfois, d'une délicatesse surprenante. La Méditerranée est du plus bel indigo; l'océan est généralement bleu céleste; le lac Léman est célèbre par la beauté et la transparence de ses eaux d'azur; le lac de Constance ainsi que le Rhin qui s'en écoule, le lac de Zurich et le lac de Lucerne ont des eaux plus vertes que bleues, bien que leur limpidité ne le cède pas à celles du lac Léman. Enfin, il y a même des eaux profondes, limpides, qui sont incolores. On les observe, chez nous, dans certaines rivières que l'industrie n'a pas salies; telles, par exemple, l'Ourthe et l'Amblève. Cette absence de couleur n'est pas l'effet d'un défaut de profondeur, car l'Amblève et l'Ourthe ne sont pas inférieures, en bien des places, sous ce rapport, à certaines rivières des Alpes, qui, comme le *Tessin*, par exemple, roulent des eaux d'un bleu admirable. Il s'agit là d'une particularité qui demande son explication aussi bien que chacune des nuances diverses auxquelles il vient d'être fait allusion.

Nous allons essayer de montrer comment le problème qui vient d'être posé a été résolu.

On a reconnu, dès le principe, que si les eaux limpides de la nature nous révèlent leurs couleurs, c'est qu'elles sont *lumineuses* aussi longtemps que dure l'éclairage du jour. Elles renvoient de la lumière de leur profondeur, non dans une direction déterminée comme le ferait un miroir, mais dans toutes les directions à la fois. En un mot, *elles diffusent* la lumière du jour qu'elles reçoivent, de façon à faire croire qu'elles sont douées d'une sorte de *phosphorescence*. On voit très bien le fait quand on regarde le côté de la coque d'un bateau qui se trouve dans l'ombre. Ce côté se montre manifestement éclairé par dessous, par des rayons verts ou bleus émanant du liquide. L'observation est beaucoup plus nette encore si l'on regarde dans l'eau à travers un tuyau noirci intérieurement, pour supprimer tout éclairage latéral. L'effet est alors surprenant : c'est vraiment comme si l'on plongeait le tuyau dans un milieu lumineux.

Cette *illumination* ne peut se comprendre que si l'on admet que l'eau n'est pas absolument transparente. En effet, si elle ne présentait aucun obstacle au passage d'un rayon lumineux incident, la réflexion de la lumière, ou sa diffusion, n'aurait pas lieu, le rayon lumineux continuant nécessairement alors son chemin jusqu'au fond du liquide. Un tel milieu, au lieu d'être lumineux, serait, pour l'observateur, aussi noir que de l'encre, dans le cas où le fond, bien entendu, ne renverrait pas de lumière. Tyndall a nommé ce milieu idéal *un milieu optiquement vide*.

Si l'on se tient à l'observation des faits, on doit reconnaître que les eaux de la nature, même les plus pures, ne sont donc pas des milieux *optiquement vides*; ce sont des milieux *troubles*, mais dont le trouble est si fin que ses particules échappent à une constatation directe.

On ne s'est pas contenté, cependant, de regarder ce trouble comme causant seulement l'illumination des eaux : on lui a attribué également un rôle capital, voire exclusif, dans l'origine des couleurs. On oubliait que Davy et, après lui, Bunsen, avaient pourtant fait voir déjà que l'eau pure, en masse, n'est pas incolore, mais d'un beau bleu. On ne tint guère compte des observations de ces physiciens, parce qu'on était, pour ainsi dire, obsédé par l'idée de faire remonter les phénomènes naturels de coloration au jeu de la lumière dans les milieux troubles et d'exclure, en quelque sorte, la coloration propre de certains milieux.

Tyndall avait observé, en effet, que quand on éclaire fortement, par un faisceau linéaire, une vapeur en voie de condensation, celle-ci paraît colorée en bleu pur. Ayant examiné cette lumière bleue à l'aide d'un analyseur (prisme de Nicol), il vit qu'elle était polarisée dans un plan passant par la source lumineuse. Cette expérience démontrait qu'on avait affaire à de la lumière renvoyée par un milieu transparent, savoir par les particules de la vapeur. Tyndall pensa tout de suite à utiliser cette observation pour expliquer le *bleu du ciel*, qui était encore une énigme de son temps. D'après lui, la lumière solaire se réfléchirait sur les particules fines de la vapeur d'eau que l'atmosphère contient toujours et prendrait, à la suite de cette réflexion, la couleur bleue que nous savons. De fait, la lumière du ciel est aussi polarisée.

Nous ne nous arrêterons pas, toutefois, à cette idée de Tyndall, malgré l'intérêt qu'elle évoque, car nous devrions nous écarter trop de notre sujet; mais il n'est pas inutile de rappeler, à ce propos, que les mathématiques sont venues étayer la conception de Tyndall. W.-J. Strutt (depuis, lord Rayleigh) a prouvé que plus les particules réfléchissantes sont petites, plus la lumière qu'elles renvoient est riche en ondes courtes, c'est-à-dire en ondes qui produisent, sur notre œil, la sensation du violet ou du bleu.

Revenons donc à notre sujet et rappelons que le travail de Tyndall sur le bleu du ciel donna à Soret et à Hagenbach, en Suisse, l'idée de s'assurer si la lumière émanant des eaux des lacs ne serait pas, comme la lumière du ciel, *polarisée*. L'observation confirma la prévision et l'on conclut que l'origine de la couleur des eaux devait être la même que celle de notre atmosphère, c'est-à-dire qu'elle devait être due à la réflexion de la lumière incidente sur le trouble très fin que l'eau tient toujours en suspension. On parut oublier tout à fait la couleur propre de l'eau et l'on regarda la variété des teintes comme purement accidentelle. Les tons verts devaient provenir de la présence d'une petite quantité de matières humiques, ou de composés ferriques qui, mariant leur couleur jaunâtre avec le bleu produit par la réflexion de la lumière, engendreraient des teintes d'un vert plus ou moins pur. Remarquons que l'on ne proposa aucune explication de l'absence de couleur de certaines eaux; on parut ignorer celles-ci, sans doute parce qu'elles ne répondaient pas à la nécessité de rattacher à une cause unique des effets de couleur d'apparence si variée.

Cette théorie était reçue depuis quelque dix ans, lorsque j'eus l'occasion de m'assurer que certaines eaux vertes des Alpes ne renfermaient pas de composés humiques ou ferriques en quantité assez grande pour justifier les tons verts qu'elles offraient à l'observateur.

L'explication qu'on avait donnée de la couleur verte ne suffisant pas à tous les cas, il était à présumer que sa base laissait à désirer.

J'ai donc tenu à m'assurer si un trouble fin, suspendu dans l'eau pure, avait les propriétés optiques que Tyndall a décrites à l'occasion des fines condensations qu'il produisait dans un espace presque vide d'air. Les troubles ont été produits de diverses manières : soit par le mélange de quelques gouttes d'une solution de résine mastic dans l'alcool avec un volume plus ou moins grand d'eau; soit par la précipitation de la silice par l'action de l'acide chlorhydrique sur une solution étendue d'un silicate alcalin, soit autrement encore. Eh bien, ainsi que vous pouvez le constater, ici même, au moyen des échantillons que j'ai l'honneur de placer sous vos yeux, aucun de ces troubles ne se comporte comme les nuages de Tyndall. Au lieu d'être d'un *bleu d'azur pur* par réflexion, ils sont, en réalité, d'un blanc laiteux et ils ne montrent une teinte bleuâtre que sous une certaine incidence; encore alors, le bleu n'est-il que tout à fait superficiel. Ces milieux troubles ne réalisent donc, en aucune façon, les suppositions du calcul de lord Rayleigh, en ce qui concerne la réflexion des ondes courtes de la lumière. Au lieu de les réfléchir, ils les absorbent pour la plus grande part, ou, s'ils ne les absorbent pas dans le sens optique du mot, ils les éteignent pour l'observateur sitôt que l'épaisseur du liquide devient sensible. Ces troubles laissent, au contraire, passer très bien les rayons à grandes longueurs d'ondes et ils paraissent jaunes, orange ou rouges, par transparence, selon l'épaisseur de la couche liquide considérée.

Ce désaccord entre la théorie mathématique et l'observation n'a, au surplus, rien qui doive nous surprendre. Les mathématiques, ici comme dans les autres cas, ne peuvent s'établir que sur *une base simple*, et les mathématiciens ont accoutumé de déblayer leur terrain, au début des opérations, de toutes les difficultés qu'il peut présenter, en faisant, *quantum satis*, abstraction de tout ce qui ne peut trouver place dans une conception simple. Le calcul de lord Rayleigh admet *a priori*, par exemple, que les particules du trouble sont égales entre elles, ou si peu différentes, en tout cas, que leurs dimensions restent

de l'ordre de grandeur des ondes lumineuses. Or, il est bien certain que les particules troublant les eaux de la nature, bien plus encore que celles des troubles que nous avons sous les yeux, n'ont pas toutes les mêmes dimensions. Il doit y en avoir inévitablement de plus petites et de plus grosses. Selon toute probabilité, ces dernières devront même être les plus nombreuses. Alors une grande partie de la lumière blanche qui pénètre dans l'eau sera réfléchie, dans la profondeur, sans altération sensible et l'effet se rapprochera de celui qu'on obtient quand on regarde le milieu trouble par transparence. Un tel milieu est jaune, orange ou rouge selon les conditions, ainsi que nous pouvons le constater; c'est-à-dire qu'il offrira un obstacle aux rayons bleus; il sera même opaque pour cette couleur dans certaines conditions d'intensité.

Si nous avons bien présent à l'esprit cet état optique d'un trouble tel qu'il se réalise naturellement, nous n'éprouverons plus aucune difficulté pour comprendre les phénomènes de coloration des eaux.

A cet effet, nous remarquerons, d'abord, que l'eau pure a une *couleur bleue, propre*. C'est ce que vous constaterez en regardant, suivant son axe, ce tube de 6 mètres de long, dont les bouts sont fermés par des plans de verre et qui est rempli complètement d'eau distillée avec tout le soin voulu, dans un alambic en platine. En réalité, il suffit déjà d'une couche d'eau d'un mètre d'épaisseur pour voir le *ton bleu*, mais celui-ci est alors extrêmement faible, et pour peu que la lumière traversant le tube soit chargée de rayons orangés, comme cela arrive inévitablement dans une salle où il y a des objets de cette couleur, le bleu de l'eau ne se montrera plus. Une couche de 6 mètres ne présente pas cet inconvénient, et, comme je l'ai constaté, sous une couche de 26 mètres, le bleu est aussi intense que celui d'un cristal de sulfate de cuivre.

Eh bien, si l'on supprime, par la pensée, cette couleur bleue propre à l'eau, les masses liquides de la nature, c'est-à-dire les masses contenant toujours un trouble fin, devront paraître jaunâtres par transparence, sans qu'il soit nécessaire, pour cela, qu'elles renferment des matières jaunes. Le simple jeu de la lumière blanche dans un milieu trouble dont les particules sont elles-mêmes incolores produit ce résultat, ainsi que nous venons de le voir. On objectera peut-être qu'un tel liquide devra paraître bleu, tout au moins par réflexion; mais on n'oubliera pas que, dans la réalité, la lumière

réfléchi à la surface du trouble, la seule qui puisse être bleue d'après la théorie elle-même, s'efface devant le flot de lumière jaunâtre qui sort, par suite de la diffusion, de la profondeur de la masse fluide. J'ai plongé verticalement, à diverses reprises, dans les eaux du lac de Lucerne, du lac de Brienz et du lac de Thun, un tube fermé à un bout par une lame de verre et noirci intérieurement, et constaté la luminosité frappante des eaux de ces lacs, même à une profondeur de près de 1^m50. Mes observations ne se sont pas étendues à une plus grande profondeur, parce que j'étais limité, dans mes moyens, par le tube que j'avais emporté en voyage. Il n'y a pas de doute que la lumière diffusée vers l'extérieur par les eaux de la nature a son origine à une profondeur en rapport avec la transparence elle-même des eaux. Celle-ci est très grande, comme l'on fait voir plusieurs observateurs, principalement Forel, Sarasin, Angelini.

Si nous restituons, à présent, à l'eau sa couleur propre, le bleu, il est évident que le jaune, causé par le trouble, s'associera au bleu et produira, sur notre œil, la sensation du vert. C'est ce qu'on voit distinctement à l'aide de ce deuxième tube de 6 mètres dont le contenu ne diffère du précédent que par l'addition d'une minime quantité d'un trouble de silice.

Allons plus loin. Si l'intensité du trouble de l'eau est telle que la couleur de la lumière transmise soit orangée, rouge, c'est-à-dire complémentaire du bleu, on aura l'extinction de toute couleur. C'est ce qui a été réalisé dans ce troisième tube. On voit donc que selon les propriétés optiques du trouble, l'eau pourra paraître, par transparence, privée de toute trace de bleu ou de vert : elle sera incolore, plus ou moins sombre.

Je me hâte d'ajouter que si les particules qui constituent le trouble, au lieu d'être blanches ou incolores par elles-mêmes, sont colorées en rougeâtre, comme c'est le cas de l'oxyde ferrique qui se rencontre si fréquemment dans les eaux, la *décoloration* pourra être produite plus rapidement encore, c'est-à-dire sans que le trouble doive être si fort. Pour le prouver, éclairons ce tube à eau bleue (le 1^{er} tube) à l'aide de lumière réfléchi sur ce carton où l'on a déposé un peu de poudre d'oxyde ferrique, rouge, et nous verrons s'éteindre tout phénomène de coloration. Il est clair que si la réflexion de la lumière avait lieu sur les particules d'oxyde ferrique préalablement mêlées à l'eau, l'effet serait le même.

En somme, dans notre manière de voir, le rôle du trouble de l'eau serait surtout de diffuser la lumière incidente : d'illuminer l'eau. Comme effet secondaire, le trouble amènerait les tons jaunâtres qui, avec le bleu propre de l'eau, engendreraient les diverses nuances de vert et, éventuellement, contribueraient à supprimer toute coloration, surtout lorsque la matière du trouble est elle-même colorée en rouge jaunâtre.

Quoi qu'il en soit, nous devons dire que la tendance d'attribuer au trouble l'origine du bleu de l'eau, ainsi que Tyndall l'avait déjà suggéré, n'a pas disparu. Récemment encore, il a paru un article dû à M. le professeur Abegg (*), dans lequel un rôle prépondérant est attribué au trouble, dans la genèse du bleu. Cette couleur serait, pour l'auteur, due en grande partie à la réflexion de la lumière du jour sur le trouble de l'eau. Alors, pour expliquer les tons verts de certaines eaux, M. Abegg fait intervenir la grosseur des particules de la matière du trouble. Voici comment il s'exprime à cet égard : « Si l'eau renferme des particules plus grosses que celles qui engendrent exclusivement *le bleu*, la réflexion de la lumière aura lieu après un trajet plus court dans l'eau et l'absorption du rouge, et surtout du jaune, sera moins complète; la lumière blanche sera donc seulement colorée en vert (blanc-rouge = vert) et, à cause des dimensions des particules réfléchissantes, l'extrémité bleue du spectre ne sera plus réfléchi d'une manière prédominante. »

J'ai tenu à reproduire textuellement la conclusion de M. Abegg, parce que, émanant d'un physicien distingué, elle doit être examinée d'autant plus attentivement qu'elle ne s'accorde pas avec notre manière de voir. Je me permettrai de faire remarquer, à son propos, qu'elle suppose que la lumière blanche passant à travers l'eau pure (eau que M. Abegg admet d'ailleurs aussi comme ayant une couleur bleue, propre) n'en sort *bleue* pour notre œil que si elle a fait un parcours suffisamment long; dans le cas contraire, elle serait seulement *verdie*, puisque l'absorption de ses éléments rouges et jaunes ne serait pas assez complète. Eh bien, l'expérience peut nous renseigner sur la valeur de cette manière de voir. Si elle était exacte, il faudrait que de l'eau pure, examinée par transparence, révélât des

(*) *Naturwissenschaftliche Rundschau*, t. XIII, pp. 169 et suiv.; 1898.

tons de plus en plus *verts* à mesure qu'on la regarde sous une épaisseur plus faible. Or, nous venons de voir que, même sous *un mètre* d'épaisseur, l'eau pure est déjà bleue, sans la moindre pointe de *vert*; donc, il paraît nécessaire de chercher, ainsi que nous l'avons fait, l'origine des tons verts dans une *superposition* du bleu de l'eau et du jaune dû au passage de la lumière à travers le trouble, ou, plus simplement encore, à la couleur elle-même de ce trouble, d'autant plus qu'alors on ne rencontre aucune difficulté à concevoir, éventuellement, l'existence de masses d'eaux naturelles d'apparence incolore.

Je désire appeler encore l'attention du Congrès sur un moyen spécial de provoquer la clarification des liquides, parce que ce moyen paraît être d'une efficacité complète. L'avenir dira s'il est susceptible d'un emploi en grand.

On sait que si les particules qui troublent une eau ont des dimensions extrêmement petites, au point même qu'un examen microscopique ne suffise plus à les révéler, elles restent opiniâtrément en suspension. On a affaire, alors, à une solution dite « *colloïdale* » qui ne se clarifie pas par le repos et qui passe, sans changement visible, à travers les filtres les plus fins.

Le trouble cède, toutefois, quand on fait dissoudre, dans l'eau, de petites quantités de sels quelconques, quand on maintient la température élevée pendant longtemps, ou quand on soumet le liquide à la congélation.

Ce qui se passe, en réalité, dans ces cas, à l'intérieur du liquide, pour déterminer la floculation du trouble, est encore un mystère. Cependant, on peut remarquer que l'acte de la dissolution d'un sel dans l'eau, ou bien celui de la production de courants de convection calorifique, inséparables de la chauffe ou du refroidissement du liquide, sont des causes de production d'électricité. Celle-ci, à son tour, peut causer une floculation; car, ainsi que je l'ai fait voir dans un travail qui remonte déjà à plus de vingt-cinq années (*), *tout changement dans l'énergie de l'action attractive est accompagné d'un changement de l'état électrique des corps et réciproquement*. Cette remarque m'a suggéré l'expérience que je vais avoir l'honneur

(*) *Bull. de l'Acad. roy. de Belgique*, 2^e sér., t. II, 1884.

de répéter à présent et qui a pour objet de vérifier si, en provoquant un changement dans l'état électrique d'un milieu trouble, on produit, oui ou non, la floculation de la matière en suspension.

Voici, à cet effet, quelques liquides troubles, ou solutions colloïdales, de nature différente : d'abord, un trouble dû à de la silice, puis d'autres dus à du kaolin, de l'hydrate de fer, du cadmium, du zinc et même de l'eau noire des tourbières, dont la matière en suspension est formée, en majeure partie, d'acides humiques. Versons ces liquides troubles dans de petites auges dont les extrémités portent des électrodes (lames de platine) reliées à des batteries d'accumulateurs, de façon que, dans chaque auge, il y ait entre les électrodes une différence de potentiel d'environ 16 volts. Dans ces conditions, il n'y a pas *électrolyse* de l'eau, parce qu'on n'a pas affaire à une *électrolyte* proprement dite, l'eau ne tenant pas de sels en solution et les acides humiques étant, de leur côté, également à l'état colloïdal. On n'observe donc pas de dégagement de gaz aux électrodes, mais on constate qu'il se produit, autour d'elles, surtout autour de l'électrode positive (l'anode), une clarification lente mais continue du trouble. L'effet est absolu, car le liquide n'est pas seulement limpide pour une observation directe, il l'est encore quand on l'éclaire à l'aide d'un faisceau de lumière électrique concentré au moyen d'une lentille. On sait qu'un tel faisceau rend visibles les moindres particules, même celles qui échappent à l'examen microscopique. Il se produit, en un mot, un liquide optiquement vide, par conséquent un liquide débarrassé aussi de tous les microorganismes qu'il pouvait renfermer dans le principe.

Ces faits réclament, naturellement, une étude complémentaire, avant qu'on puisse dire d'eux qu'ils sont utilisables ou non. Quoi qu'il en soit, il m'a paru que, dans leur état actuel, il pouvait vous être agréable de les constater, ne fût-ce qu'à titre documentaire (*).

(*) M. le professeur G. QUINCKE, de Heidelberg, vient de signaler, à propos d'une étude sur les milieux troubles (*Ueber die Klärung der trüben Lösungen-Verh. der Heidelberger Gesellschaft*, t. VII, 1901), qu'il a déjà constaté, il y a plus de quarante ans (*Ann. de Pogg.*, t. CXIII, 1861), que l'électricité opère, dans certaines conditions, le transport des particules solides suspendues dans un liquide non conducteur. Je crois devoir faire remarquer, à ce propos, qu'il n'est pas question de *floculation électrique* dans le travail de Quincke. Il y est montré, à la suite d'observations faites

déjà par Jürgensen et publiées dans les *Arch. für Anatomie* 1860, p. 673, que l'électricité fait circuler des grains de corps solides (amidon, soufre, carmin, papier, soie, coton, etc., etc.), suspendus dans l'eau, dans un tube étroit (presque capillaire), de manière que l'eau se meut, le long des parois du tube, dans le sens du courant positif et les particules d'amidon, par exemple, dans la direction du courant négatif. L'eau entraînée retourne au point de départ en suivant l'axe du tube.

On le voit, il ne s'agit là, en aucune façon, de *clarification d'un liquide* au sens dans lequel mes essais ont été faits. Mais si M. Quincke n'est pas fondé dans son observation, il en est autrement de deux autres savants, S.-E. Linder et H. Picton, (*Solution und pseudosolution*, CHEM. Soc., t. LXI, 1892, et LXVII, 1895), qui n'ont pas réclamé, très probablement parce qu'ils n'ont pas plus eu mon travail sous les yeux que je n'ai eu le leur au moment où j'ai entrepris mes recherches. Je suis donc heureux de l'occasion qui m'est offerte à présent de reconnaître que j'ai touché, à mon insu, un terrain qui avait déjà été exploré par les deux chimistes anglais dont je viens de citer les noms. J'ajouterai que si j'ai abandonné, depuis, cette étude de la floculation électrique, c'est afin de respecter *le droit des premiers occupants*. (Note écrite en novembre 1901.)
