

Note complémentaire sur l'origine des nuances vertes des eaux de la nature.

(Bulletins de l'Académie royale de Belgique [Classe des sciences], n° 3, pp. 262-272, 1908.)

J'ai montré, il y a quelques années (*), que la dissolution des sels de calcium dans l'eau, en particulier celle du *sulfate* ou du *carbonate acide*, ne change en rien la couleur bleue, propre du liquide. L'origine des nuances vertes des eaux de la nature ne doit donc pas être cherchée dans la présence des composés calciques, comme le fait d'Aufsess, dans son travail sur la coloration des lacs (**). D'après mes expériences, les sels calciques blancs ne font virer au vert la couleur bleue de l'eau que s'ils forment une solution qui n'est pas optiquement vide. Alors il y a diffraction de la lumière sur les fines particules suspendues dans le liquide et il se produit des tons jaunes ou bruns, plus ou moins foncés, suivant l'épaisseur du trouble, qui, par leur combinaison avec le bleu, engendrent diverses nuances de vert pour l'œil de l'observateur. Ce phénomène est évidemment indépendant de la couleur propre des sels dissous, ainsi que de leur espèce chimique.

J'ai fait voir, en outre, que la présence des sels calciques dans l'eau, loin de modifier le bleu de l'eau, le protège, au contraire, contre les altérations provoquées par les substances colorées naturelles qui se rencontrent le plus fréquemment. Elle détermine, en effet,

(*) *Bulletins de l'Académie royale de Belgique* (Classe des sciences), pp. 300, 309, 1905.

(**) *Archives des sciences physiques et naturelles*, t. XVII, p. 198, 1904.

l'élimination continue des *combinaisons ferriques* et des *matières humiques* à la présence desquelles sont dues nécessairement les couleurs foncées, jaunes ou brunes, des eaux naturelles.

En résumé, à mon avis, les nuances qui diffèrent du bleu auraient une double cause. D'une part, elles seraient la conséquence de la présence de matières colorées par elles-mêmes, et, d'autre part, elles seraient dues à la présence, dans l'eau, d'un trouble d'une finesse telle que la diffraction lumineuse puisse se produire. On sait que celle-ci n'a lieu que si les dimensions des particules du trouble sont de l'ordre de grandeur des ondes lumineuses. Il est bien entendu que la puissance relative de ces deux causes sera en rapport avec les circonstances locales : si elles manquent toutes deux, ou si au moins elles se trouvent fortement atténuées, la couleur bleue de l'eau apparaîtra avec plus ou moins de pureté.

Bien que cette théorie, si simple, se trouve basée sur des observations et des expériences nombreuses, elle n'a pas eu la bonne fortune de rallier tous les savants. Ainsi, par exemple, le Dr F.-E. Bourcart, dans son beau travail sur les lacs alpins suisses (*), reconnaît comme seule cause des *nuances vertes* la présence dans l'eau de substances colorées, jaunes ou brunes, principalement des *matières humiques*. Il attribue à une « erreur d'expérience » la conclusion que j'ai tirée de mes recherches au regard du rôle joué par le trouble de l'eau. Il objecte que le trouble des liquides que j'ai manipulés n'a pas rendu l'eau verte à la suite d'un phénomène de diffraction, mais simplement parce qu'il était formé de *matières organiques* qu'il assimile, gratuitement, je dois le dire, à des *matières humiques* quant à leur couleur. Son objection se base sur ce que j'aurais observé que le résidu blanc de l'évaporation de l'eau renfermait des matières organiques, puisque, pendant la calcination à laquelle je l'ai soumis, il a perdu, pendant un instant, de sa blancheur. « C'est, sans doute, à ces dernières (aux matières organiques), dit M. Bourcart, qu'il faut attribuer la teinte verte des liqueurs mentionnées, d'autant plus que l'auteur reconnaît lui-même l'extrême puissance colorante des matières humiques. »

Mon intention première avait été de montrer la méprise de

(*) Genève, chez Georg et Cie, 1906.

M. Bourcart dès le moment où j'ai pris connaissance de son travail et d'empêcher, de la sorte, qu'une erreur ne s'accréditât. Mais j'ai cru cependant préférable d'examiner plus complètement la question et de contrôler, par des expériences nouvelles, la valeur de la proposition qui a suggéré, en somme, l'objection prérappelée.

On s'en souvient, lorsque Soret et Hagenbach eurent fait voir que la lumière des lacs est polarisée, on a attribué tous les phénomènes de coloration des eaux à la diffraction. La raison du bleu de l'eau était ramenée à celle qui était admise alors pour le bleu du ciel. Les recherches que j'ai faites m'ont montré alors que l'on avait été trop loin et que la couleur bleue de l'eau n'avait pas la diffraction pour origine; celle-ci pouvait, tout au plus, donner des teintes jaunes ou brunes à la lumière transmise, teintes qui devaient coopérer avec celles des matières brunes naturelles, à l'altération du bleu, voire à sa suppression.

Plus récemment, M. d'Aufsess a étudié spectro-photométriquement la couleur des lacs, et il est arrivé à conclure « qu'on ne peut assimiler en aucun cas la couleur de l'eau à la couleur d'un milieu trouble (*) ». La *diffraction* est donc complètement remerciée et nous nous trouvons à l'opposé de l'explication première. J'ai tenu à m'assurer si, cette fois encore, on n'a pas trop versé dans l'absolu et si la vérité ne se trouve pas entre les opinions extrêmes. La réalisation des expériences projetées à ce propos a tardé plus que je ne l'eusse voulu, pour des raisons étrangères à notre sujet, et force me fut de remettre jusqu'en ce moment les observations que je désire présenter à M. Bourcart, en même temps que la relation des faits qui établissent que vraiment on ne peut dénier toute influence à la diffraction dans le phénomène de la coloration des eaux.

M. Bourcart s'est mépris quand il a pensé que les matières organiques, dont j'ai signalé la présence lors de la calcination des sels calciques retirés de l'eau à la suite de l'évaporation, se trouvaient dans le liquide au moment de l'observation de la couleur des solutions. J'avais formé les sels de calcium, au sein d'eau optiquement vide, à l'aide de chaux résultant de la calcination, dans le moment même, de spath d'Islande. Il ne pouvait donc être question alors de matières

(*) *Loc. cit.*, p. 196.

organiques; mais celles-ci se sont introduites dans l'eau, après la constatation de la couleur, pendant les manipulations qui ont précédé et accompagné l'évaporation entreprise pour mettre à nu et pour reconnaître la nature du trouble de l'eau. On sait depuis longtemps qu'il n'est pas possible de transvaser de l'eau dans un air renfermant des matières organiques sans que celles-ci ne se trouvent en partie entraînées. Tyndall nous a déjà instruits à ce sujet. Les vestiges de matières organiques, dont j'avais constaté la présence après l'évaporation, qui a duré près d'une journée entière, sont un accident postérieur au moment de l'observation et, par conséquent, sans influence sur celle-ci. Au surplus, il a été établi par mes expériences que le trouble ultramicroscopique de l'eau ne pouvait être formé que de silice.

Il y a plus. L'objection de M. Bourcart postule que la présence des matières organiques dans l'eau entraînerait toujours l'apparition d'une couleur brunâtre. Ceci est inexact. Une solution de sucre blanc, même concentrée, est d'un bleu plus accusé que l'eau pure (*); il en est de même pour la plupart des corps organiques blancs. Seules, des substances de la nature des matières humiques sont en état d'altérer la couleur bleue de l'eau lorsqu'elles-mêmes se trouvent présentes en quantités infiniment petites. Il est bien évident qu'il ne s'agit de rien de semblable dans les matières organiques qu'un liquide peut enlever à l'air atmosphérique.

Je crois donc ne pas devoir m'arrêter plus longtemps devant l'objection de M. Bourcart, et je passe à l'examen de la conclusion de M. d'Aufsess, rappelée ci-dessus.

Cette conclusion est tirée, en somme, de ce qu'il n'a pas été possible de constater un rapport simple entre le degré de trouble d'une eau et sa couleur : telle eau est bleue, bien que moins limpide qu'une autre qui est verte; en outre, les observations spectro-photométriques montrent que la courbe exprimant l'absorption de la lumière par les liquides troubles, pour chaque région du spectre, n'est superposable à celle d'aucune eau naturelle.

(*) Voir mes Recherches sur la couleur de quelques corps organiques. (*Bull. de l'Acad. roy. de Belgique*, 3^e série, t. XXXI, p. 43, 1896, et t. XXXIII, p. 165, 1897.)

Avant d'accepter la conclusion de M. d'Aufsess, il importe donc de s'assurer si les phénomènes de coloration engendrés par la diffraction sont en rapport simple avec l'état de trouble qu'on peut produire dans une eau. Si ce n'était pas le cas, on devrait nécessairement envisager la *transparence* d'une eau comme un facteur indépendant, dans une certaine mesure, de la couleur, c'est-à-dire ne pas s'attendre à rencontrer toujours la couleur bleue dans les eaux les plus limpides et les nuances vertes dans les eaux troubles.

A cet effet, j'ai repris l'examen de la couleur de l'eau chargée d'un trouble ultramicroscopique et j'ai cherché les conditions dans lesquelles la lumière transmise donne le mieux les nuances verdâtres avec le bleu de l'eau.

Comme dans mes observations antérieures, j'ai opéré à l'aide de tubes de 6 mètres de long, placés parallèlement, afin de faciliter les comparaisons.

L'un des tubes était rempli, à demeure, d'eau pure optiquement vide; sa couleur était bleue et devait servir de *témoin*.

Pour m'assurer si les tons jaunes ou bruns, dus à la diffraction, sont en relation avec la transparence de l'eau, j'ai rempli un autre tube d'eau additionnée de quelques milligrammes de *silice ultrafine*. Celle-ci avait été obtenue par la calcination de l'acide silicique précipité. Elle a été débarrassée de ses particules les plus grosses par *lévigation*. Je n'ai recueilli que les particules auxquelles il fallait près d'une demi-journée pour tomber, dans l'eau, d'une hauteur de 2 centimètres.

Le trouble du liquide n'était pas visible dans les conditions ordinaires; il a été néanmoins suffisant pour empêcher complètement le passage de la lumière par le tube de 6 mètres; celui-ci paraissait donc contenir un liquide noir. Avec le temps, la silice suspendue dans l'eau se déposa peu à peu et la lumière put traverser le tube, mais les premières lueurs visibles n'ont été ni brunes, ni jaunes, ni même glauques; elles ont été, dès l'abord, de la couleur bleue de l'eau, avec cette seule différence que l'intensité de la lumière était fortement diminuée.

Cette expérience montre que les tons brunâtres dus à la diffraction ne se produisent pas à l'aide de chaque trouble, alors même que celui-ci est de grande finesse; elle montre aussi que la couleur bleue peut s'observer dans une eau troublée au point de compromettre la transparence.

En vue de m'assurer si l'espèce de trouble joue un rôle dans ce phénomène, j'ai répété cette expérience en remplaçant la silice par le trouble produit en mêlant une solution alcoolique de mastic avec de l'eau. Le titre de ce trouble était d'environ 3 centigrammes de mastic par litre d'eau. A ce degré, l'eau a paru *opaque* dans le tube de 6 mètres.

Le repos, même prolongé, n'amenant aucun changement, j'ai dilué le liquide de plus en plus, à l'aide d'eau pure, et j'ai examiné successivement chaque dilution.

Les premières lueurs qui ont pu passer par le tube ont paru d'un brun extrêmement sombre; puis elles ont passé par des tons de plus en plus clairs, mais dans aucun cas, pas même à l'origine, il n'a apparu une nuance verte exempte de bleu. On a pu constater du *bleu verdâtre* ou du *vert bleuté*, mais jamais la nuance verte, pure, bien connue, de certains lacs.

J'ai varié les conditions de ces observations en ne mêlant plus le trouble de mastic avec l'eau pure, mais en superposant au tube contenant l'eau pure des couches de trouble de mastic d'épaisseurs de plus en plus faibles, correspondant aux titres précédents.

Les résultats ont été les mêmes.

Il semble résulter de ces dernières observations que le trouble de mastic n'est pas tout à fait dans les conditions optiques du trouble de silice. Si, comme celui-ci, le trouble de mastic assombrit surtout l'eau, il permet cependant à la diffraction de se faire et d'engendrer des tons en état de donner du *vert* avec le bleu de l'eau.

Il est possible qu'un trouble de mastic renferme des particules de deux ordres de grandeur, tandis que la silice que j'ai employée n'en renfermait que d'un ordre, ensuite de la lévigation à laquelle elle avait été soumise.

Pour vérifier l'influence de la grandeur des particules sur la diffraction, j'ai préparé des solutions *colloïdales* d'alumine et de silice, parfaitement privées de toutes particules visibles dans les conditions ordinaires, c'est-à-dire paraissant tout à fait transparentes.

Ces solutions représentaient, certainement, des milieux troubles, dont les particules étaient d'une ténuité extrême, mais cependant réelle, car on sait que ces solutions colloïdales sont loin d'être optiquement vides. Si on les éclaire au moyen d'un rayon de lumière intense, elles s'illuminent sur le passage de ce rayon en laissant voir une traînée estompée. L'homogénéité de celle-ci est une grande pré-

somption en faveur de la *similitude* ou peut-être de l'*égalité* des particules en suspension. On peut donc s'attendre à des résultats plus simples.

La solution colloïdale d'alumine a été préparée en dissolvant de l'hydrate absolument exempt de composés ferriques dans du chlorure d'aluminium (*) et en soumettant ensuite la solution à la dialyse, comme Graham l'a fait connaître, jusqu'à disparition presque complète de la réaction du chlore. L'acide silicique a été préparé de même, en soumettant à la dialyse une solution de silicate de sodium additionnée d'acide chlorhydrique. Cette préparation a duré près de deux mois.

Les solutions ont été finalement filtrées. Elles étaient absolument limpides à l'observation immédiate. La solution d'alumine titrait 1^{er}37 par litre et la solution d'acide silicique 0^{er}72.

Vidées dans les tubes de 6 mètres, ces solutions ont fait voir, l'une et l'autre, une couleur brun foncé, un peu rougeâtre. Le spectre de cette lumière était réduit à une lueur dans la région rouge : il y avait donc assombrissement général avec absorption complète des ondes courtes.

J'ai alors dilué de plus en plus les deux liquides à l'aide d'eau optiquement vide. A mesure des progrès de la dilution ont apparu, cette fois, avec netteté, les nuances *jaunâtres*, *jaune-vert*, *vertes*, *vert bleuâtre* et, finalement, les nuances *bleues* quand la dilution fut suffisamment forte.

Les spectres correspondant à ces diverses nuances étaient de plus en plus lumineux et de plus en plus étendus vers la région des ondes courtes. Pour ces deux liquides, la transparence s'est donc montrée en relation simple avec les teintes vertes et bleues.

Conclusions.

Les observations précédentes font voir que les nuances vertes peuvent se produire, dans l'eau, à la suite de la diffraction de la lumière sur les particules en suspension dans le liquide, et cela en

(*) Pour me procurer le chlorure d'aluminium exempt de fer et ensuite l'hydrate d'aluminium, j'ai traité une solution concentrée de chlorure, déjà pure, par un courant d'acide chlorhydrique gazeux. Le chlorure d'aluminium se précipite, tandis que le chlorure de fer est soluble dans l'acide chlorhydrique.

dehors de la présence de toute matière colorante, minérale ou organique.

Il est aussi exagéré d'attribuer l'origine des nuances vertes des eaux, exclusivement, à la présence de *matières humiques* ou de *composés ferriques* que de la chercher dans la seule présence de *sels calciques*.

Il est établi, en outre, qu'il n'y a pas nécessairement de rapport simple entre la coloration due à la diffraction et le plus ou moins de transparence de l'eau.

Suivant la nature physique du trouble, l'opacité d'un liquide s'efface graduellement sans que les couleurs dues à la diffraction apparaissent, ou bien la transparence parcourt, pour se rétablir, l'échelle des tons à grande longueur d'ondes.

Entre ces cas extrêmes qui ont été réalisés dans les expériences précédentes, on conçoit tous les intermédiaires possibles. Il n'est donc pas juste d'invoquer le défaut relatif de transparence de certaines eaux bleues naturelles contre la théorie physique des nuances vertes; il serait plus exact de dire que l'on observe, dans les eaux naturelles, précisément ce que les expériences de laboratoire nous ont montré et qu'il y a donc parallélisme complet entre l'enseignement des unes et des autres.