

## Sur le rôle des courants de convection calorifique dans le phénomène de l'illumination des eaux limpides.

(*Bulletins de l'Académie royale de Belgique*, 3<sup>e</sup> sér., t. XXXI, pp. 95-110, et *Archives des sciences physiques et naturelles*, 4<sup>e</sup> période, t. I, mars 1896.)

La question de la couleur des eaux limpides des lacs et des mers a déjà occupé souvent les physiciens. Elle paraît résolue dans ses parties fondamentales, mais elle présente encore plus d'un côté douteux, pour ne pas dire obscur. Par exemple, on n'est pas encore d'accord sur les causes de l'illumination des eaux. Je me propose de faire connaître, dans cette note, des expériences nouvelles qui, je le pense du moins, pourront contribuer à la solution du problème.

L'origine et le but de ces expériences seront plus aisément compris si, à la suite d'une courte esquisse historique, on se rappelle l'état actuel de la question. On trouvera les détails complémentaires dans les travaux que j'ai publiés en 1885 et 1886 sur la matière (\*).

Il y a près de cinquante années, Bunsen a montré que l'eau pure est bleue si on la regarde sous une épaisseur suffisante. Cette observation a fait comprendre pourquoi certaines eaux naturelles paraissent colorées. Toutefois, quand Tyndall eut démontré que le bleu du ciel pouvait ne pas être la couleur du gaz de notre atmosphère, mais le résultat de certaines réflexions subies par la lumière du soleil sur des particules transparentes très ténues, l'origine du bleu de l'eau des

---

(\*) *Bulletin de l'Académie royale de Belgique* (3), t. V, pp. 55-84, et t. XII, pp. 814-857.

lacs et des mers a été de nouveau mise à l'étude. Soret et Hagenbach ont constaté alors, les premiers, que la lumière bleue émise par certains lacs était polarisée comme la lumière du firmament. On a donc cru à une similitude d'origine, au moins pour une forte partie, entre le bleu de l'eau et celui du ciel. D'autres travaux, parmi lesquels il suffit, pour le moment, de citer ceux d'Arago et de A. Hayes, donnèrent à penser aussi que l'eau n'était pas une matière possédant une couleur propre, mais qu'elle paraissait colorée par suite de phénomènes physiques dont elle pouvait être le siège, ou bien par suite de son mélange avec des matières étrangères.

Je me suis assuré alors par des expériences nombreuses que cette dernière opinion était erronée, c'est-à-dire que l'observation de Bunsen était d'une exactitude incontestable : l'eau est bien une substance bleue par elle-même.

Il se posait alors une question complémentaire importante pour la physique du globe, celle de savoir à quelle cause on devait attribuer la diversité des teintes des eaux des lacs et des mers.

On a cru trouver la solution de cette question dans la présence de matières organiques déversées dans les lacs par les ruisseaux ou les rivières qui ont coulé sur des terrains riches en substances humiques.

Ces matières, dont la couleur propre serait le jaune ou le brun, feraient virer la lumière bleue transmise par l'eau, au vert plus ou moins mêlé de jaune. Cette explication bien simple, qui est due surtout à Wittstein, est néanmoins insuffisante et souvent même en défaut; on trouvera les motifs de cette opinion aux pages 62 à 63 de mon article de 1883.

J'ai montré alors que la couleur verte pouvait avoir une origine indépendante de la couleur des matières organiques dissoutes. Il suffit que les eaux qui ne sont pas bleues renferment une proportion plus ou moins grande de particules solides, incolores par elles-mêmes, de dimensions si petites qu'elles ne se déposent presque plus par le repos et constituant, par conséquent, un milieu trouble particulier. Ce milieu trouble est caractérisé, au point de vue optique, par la propriété d'offrir moins de résistance au passage des rayons peu réfrangibles, c'est-à-dire des rayons rouges et jaunes, tandis qu'il réfléchit les rayons à ondes courtes qui produisent, sur notre œil, la sensation du bleu ou du violet. Si l'on regarde, par

conséquent, un source de lumière blanche au travers d'un tel milieu, on recevra l'impression du jaune plus ou moins orangé, tandis que si la lumière est perçue après réflexion sur ce milieu, elle paraîtra bleuâtre.

Il est donc évident que si une eau contient de ces particules en suspension, elle paraîtra d'autant plus verte et même d'autant plus jaunâtre que la proportion des particules sera plus grande : la lumière arrivant à l'observateur par *transmission*, sera composée du bleu propre de l'eau et du jaune orangé résultant du trouble. On conçoit qu'une multitude de teintes sont possibles depuis le *bleu* jusqu'au *brun* plus ou moins sombre, en passant, naturellement, par les diverses nuances du *vert*. Le bleu dû à la réflexion de la lumière sur les particules en suspension s'ajoutera nécessairement au bleu de l'eau, mais comme son intensité est loin de compenser le jauné orangé de la lumière transmise, son influence ne dominera pas.

J'ai montré par des mesures photométriques, exécutées en 1886 sur divers lacs de la Suisse, qu'en effet les lacs de couleur verte réfléchissent une proportion plus grande de la lumière incidente que les lacs à eau bleue, la lumière du jour se trouvant renvoyée plus complètement par ces particules. Le lac de Brienz (vert, peu limpide) renvoie 12.6 % de la lumière incidente, tandis que le Blausee de la vallée de la Kander, qui est d'un bleu très pur, n'en renvoie que 9.9 % (\*).

Mais c'est ici que se présente la difficulté annoncée dans les premières lignes de cette note.

Une masse d'eau ne pourra être d'un bleu pur que si elle ne renferme aucun trouble. Or, si l'eau est vide physiquement, elle ne doit réfléchir aucune lumière : un lac ou une mer assez profonds pour absorber tous les rayons lumineux devront paraître noirs et non bleus. Cette conclusion est contraire à l'observation : la Méditerranée, par exemple, est d'un bleu plus pur et plus intense dans les parties profondes; il en est de même du lac de Genève.

On est donc obligé d'admettre que même les eaux les plus limpides en apparence ne sont pas optiquement vides. Sur ce point, tout le monde est d'accord; mais il en est autrement sur la question

(\*) *Bulletin de l'Académie royale de Belgique* (3), t. XII, p. 856, 1886.

de savoir quelle peut être la cause du trouble insaisissable des eaux limpides.

Pour Tyndall et surtout pour Soret (\*), ce trouble serait encore dû à la présence de particules matérielles invisibles que l'eau tiendrait toujours en suspension et qui serait la cause de l'*illumination* des eaux bleues dans la nature.

Je n'insisterai pas sur ce que cette supposition peut avoir de gratuit, je dirai même d'arbitraire. Elle ne pourra être regardée comme la véritable cause de l'*illumination* de l'eau que le jour où la réalité du trouble matériel de l'eau aura été prouvée par un autre fait que l'*illumination elle-même*, sinon elle partagerait le caractère d'une pétition de principe. Aussi bien a-t-elle déjà été mise fortement en doute, en 1869, par Lallemand (\*\*), qui a montré que l'*illumination* des liquides éclairés par de la lumière polarisée a lieu presque exclusivement dans le plan de la polarisation et non dans un autre, fait qui paraît difficile à concilier avec la réflexion sur des particules matérielles douées de moins de transparence que l'eau elle-même. En outre, Lallemand a constaté l'*illumination* de corps solides parfaitement homogènes, tels que le *crow*n ou le *flint* employés par les opticiens.

Il y a une remarque plus importante à faire. Si l'eau bleue tenait en suspension assez de particules pour être illuminée, tout en restant bleue, autant ou à peu près, qu'une eau verte, elle serait un milieu trouble qui n'absorberait pas toujours les ondes les plus courtes, ce qui est contraire à l'observation. Brücke (\*\*\*) a déjà constaté que cette absorption est au contraire d'autant mieux caractérisée que le trouble est plus fin, et je me suis assuré, de mon côté, de l'exactitude du fait.

En présence de ces contradictions, j'ai cru qu'il pouvait être intéressant de contrôler, par l'expérience, la supposition de Tyndall et de Soret, et de compléter à cet égard mes recherches sur la couleur de l'eau. Ce sont les résultats de cette étude qui se trouvent décrits dans les pages suivantes.

Je me suis proposé de m'assurer d'abord s'il est possible de con-

(\*) *Archives des sciences physiques et naturelles*, 1884, t. XI, pp. 276-296.

(\*\*) *Comptes rendus*, t. LXIX, pp. 489, 282, 917 et surtout 4294.

(\*\*\*) *Annales de Poggendorff*, t. LXXXVIII, p. 363, 1853.

stater la présence de particules matérielles dans de l'eau purifiée avec les plus grands soins et maintenue à l'abri du contact de l'air.

A cet effet, j'ai essayé de vérifier si la limpidité de l'eau diminue avec l'épaisseur en même temps que sa transparence faiblit par suite de l'absorption de la lumière.

On sait, pour ce qui concerne l'air, que les poussières fines à la présence desquelles on a attribué l'*illumination* de l'atmosphère, ne produisent pas d'effet visible dans une masse d'air relativement faible. Pour les constater alors, il faut l'aide d'un éclairage puissant. La diffraction les signale, dans ce cas, à l'œil de l'observateur et les montre s'agitant dans tous les sens. Mais si l'on considère l'air sous une épaisseur suffisante, on saisit la présence de ces corpuscules parce que l'air perd de sa transparence. Les détails d'une montagne lointaine, par exemple, sont de plus en plus confus ou effacés, à mesure que l'atmosphère est moins pure. Les objets paraissent alors plus éloignés. Quand la pluie a entraîné et précipité sur le sol ces corpuscules invisibles, l'air est plus limpide ; les objets à l'horizon paraissent comme rapprochés (\*).

La perte de transparence due aux corpuscules en suspension doit, selon toute apparence, être bien autrement sensible dans l'eau parce que l'*illumination* de l'eau est, à égalité de volume, considérablement plus grande que celle de l'air. C'est cette conjecture qui m'a guidé. Le trouble de l'eau peut sans doute apparaître sous une épaisseur suffisante, alors qu'une couche de quelques mètres semble encore limpide.

J'ai donc monté, pour les observations, sur un échafaudage spécial, deux tubes de *vingt-six mètres* de long qui pouvaient, au besoin, être placés bout à bout de manière à réaliser une couche de liquide de *cinquante-deux mètres* d'épaisseur. Les tubes étaient formés de tronçons en verre dur, chacun de 2 mètres de long, reliés par des ajutages en caoutchouc bien nettoyé. Pour éviter l'emploi d'une masse de liquide

(\*) On remarque aussi qu'une grande transparence de l'air se manifeste assez souvent avant la pluie. J.-L. Soret (*Arch. des sciences phys. et nat.*, t. XI, pp. 94 et 180, 1884) a fait voir qu'elle provient de ce que « l'air qui entoure le lieu d'observation a été précédemment traversé et lavé par de la pluie tombée dans une autre localité ».

trop grande, le diamètre intérieur des tubes n'était que de 15 millimètres.

La mise en place d'un tel appareil, de façon à réaliser une ligne droite parfaite, est un travail d'une grande difficulté. On le comprendra sans peine si l'on fait attention que pas un tube en verre fourni par les verreries n'est droit et qu'il suffit d'une erreur de six dixièmes de millimètre dans le placement du premier tronçon de 2 mètres pour qu'un rayon visuel ne traverse plus l'ensemble.

Pour atteindre le but, il a été nécessaire d'installer, en avant de l'appareil, une lunette astronomique et de dresser sur place chaque tronçon de tube, en lui faisant subir des flexions à l'aide de vis de pression prenant leur appui sur l'échafaudage, jusqu'à ce que son axe coïncide avec l'axe optique de la lunette. Ce travail a duré près de six semaines.

Pour faciliter le rinçage du tube et en général la manœuvre du liquide, l'appareil a été monté *en pente* de 2 centimètres par mètre.

Les extrémités de ce long tube ont été fermées par des plans de verre fixés à la gomme laque dans des douilles métalliques; celles-ci étaient munies, chacune, d'un ajutage en verre permettant l'introduction du liquide. Une gaine de papier noir épais couvrait tout le tube et interceptait complètement l'éclairage latéral.

Comme source de lumière, on pouvait se servir soit de la lumière du jour, soit d'un bec Auer à incandescence. Celui-ci se trouvait dans un manchon opaque, portant une tubulure horizontale fermée par une lentille à long foyer, ayant pour objet de rendre les rayons lumineux parallèles à l'axe du tube.

Pour juger de la transparence de l'eau, j'avais fixé sur la douille de fermeture tournée vers la source lumineuse un réticule fait de deux fils fins. En regardant, à l'œil nu, par l'autre extrémité (le tube étant vide), l'orifice éclairé apparaissait comme un cercle de 2 millimètres seulement de diamètre, par effet de perspective. Le réticule n'était pas visible; mais en visant avec la lunette astronomique, on le voyait avec une grande netteté.

Le remplissage de l'appareil devait être fait sans production de bulles d'air qui eussent obscurci le champ d'observation; l'eau n'a donc pas été versée dans le tube, mais foulée par la partie basse du tube incliné, de manière à chasser lentement l'air devant elle.

L'eau dont j'ai fait usage a été distillée dans un appareil entière-

ment en platine et en observant exactement le procédé qui se trouve décrit dans mon travail sur la couleur de l'eau (\*). Il est donc superflu d'entrer de nouveau dans des détails sur ce sujet.

Ces dispositions étant connues, je passe au résultat des observations.

Sous une épaisseur de 26 mètres, l'eau s'est montrée d'un bleu foncé très pur. L'absorption est telle que la lumière, peu intense, il est vrai, des jours nuageux du mois de décembre, ne traversait pas le tube; tout au plus pouvait-on saisir une légère lueur quand la vue s'était reposée au préalable par un séjour dans l'obscurité. Quand le ciel était serein, ou mieux encore quand on se servait de l'éclairage par incandescence, l'observation était plus facile. *On distinguait alors, à l'aide de la lunette, le réticule (voir plus haut) avec autant de netteté que si le tube n'avait pas contenu de l'eau, mais, bien entendu, avec beaucoup moins de clarté.*

Cette observation démontre déjà que l'eau distillée ne renferme pas assez de poussières pour altérer sa transparence sur une épaisseur de 26 mètres. Je suis porté même à dire qu'elle ne doit pas renfermer de poussières.

Je me suis assuré ensuite si cette eau, si pure, était *illuminée*, c'est-à-dire si elle émettait de la lumière latéralement. A cet effet, j'ai pratiqué, dans la gaine de papier noir entourant le tube, des ouvertures permettant de regarder latéralement. La nuit étant close et le bec Auer allumé, on constate que l'eau est en effet illuminée, *mais seulement jusqu'à environ 2 mètres de profondeur*, depuis la source lumineuse; la limite ne peut être précisée. Tout le restant de la colonne liquide, soit donc de 24 à 25 mètres, était absolument obscur.

Ce fait donne à penser que l'illumination n'a pas pour cause exclusive les poussières suspendues dans l'eau. L'intensité de cette illumination était telle que si elle avait été due véritablement à des corpuscules, l'eau n'eût pu présenter le degré de transparence dont elle jouissait. En outre, on ne peut pas supposer que les poussières se seraient concentrées vers la source lumineuse pour produire une

(\*) *Loc. cit.*, t. V, p. 71.

illumination superficielle ne gagnant pour ainsi dire pas la profondeur du liquide. Si, à la vérité, Tyndall a montré qu'un éclairage puissant découvre des particules échappant à notre œil dans les conditions ordinaires, on est néanmoins frappé du défaut de rapport du phénomène avec l'épaisseur de la couche traversée : l'illumination est superficielle, elle ne gagne que bien peu la profondeur du liquide. Une autre pensée vient à l'esprit. Les rayons calorifiques de la source lumineuse ont précisément la propriété de ne pas pénétrer bien avant dans l'eau ; on peut donc se demander si l'origine de l'illumination ne doit pas être cherchée dans le *défaut d'homogénéité physique de l'eau provoqué par des inégalités de température*.

Pour vérifier ce point, j'ai introduit, dans le tube vidé et abandonné dans cet état assez longtemps pour que sa température se trouvât en équilibre avec celle du milieu, de l'eau qui avait séjourné dans une salle chauffée. Le tube était à 4° et l'eau à 16°. Le remplissage ayant eu lieu dans les conditions dites plus haut, j'ai constaté l'*opacité complète de l'eau* : la lumière solaire réfléchie par un mur blanc éprouvait une résistance telle à traverser les 26 mètres d'eau, qu'elle n'était sensible que pour un œil reposé dans l'obscurité. Mais au bout de quelque temps, la clarté se fit de nouveau, et, après quelques heures, elle reprit sa grandeur primitive.

Comme expérience de contrôle, j'ai vidé le tube le lendemain et j'ai refoulé aussitôt l'eau qui avait alors la même température que le tube et que l'air ambiant : *il n'a pas été possible de constater un défaut de transparence*. Cette expérience a été répétée souvent, et toujours avec le même résultat.

Ces points mettent, je crois, en évidence l'influence exercée par une faible différence de température de l'eau sur la transparence d'une colonne *suffisamment longue*. La lumière incidente ne traverse pas en ligne droite ce milieu hétérogène ; elle subit des réflexions et des réfractions en passant d'un point à un autre de densité différente et n'arrive à l'œil de l'observateur qu'après avoir vaincu mille obstacles.

Ce fait étant constaté, j'ai tenu à mesurer ce que l'on pourrait nommer sa *sensibilité*, c'est-à-dire la plus petite différence de température qui doit régner entre l'eau et le milieu ambiant pour que l'opacité se produise. La connaissance de ce *minimum* nous permettra d'apprécier si, dans la nature, les conditions nécessaires pour

que les courants de convection remplissent un rôle efficace, se trouvent réalisées ou non.

J'ai donc transformé en *thermomètre* le tube de 26 mètres. A cet effet, j'y ai soudé normalement un tube en verre de 1 mètre de long et de 5 millimètres de diamètre intérieur, qui devait servir de vase d'expansion à l'eau remplissant le long tube et permettre, de la sorte, de constater les changements de la température. Il est facile de s'assurer, en tenant compte des dimensions de l'appareil, qu'on avait affaire alors à un thermomètre d'une sensibilité extraordinaire. Le volume du long tube était 4782 centimètres cubes à 4° (limite inférieure des expériences) et  $\delta = 0,000262$  est le coefficient de dilatation cubique du verre, le volume à 20° (limite supérieure des expériences) sera 4784 centimètres cubes. D'autre part, le volume de l'eau passant de 1 à 1.001751 depuis 4° jusque 20°, on aura

$$4782 \times 1.001751 = 4790 \text{ c. c. à } 20^\circ.$$

La dilatation apparente sera donc

$$4790 - 4784 = 6 \text{ c. c.,}$$

qui occupent, dans le tube étroit, une hauteur donnée par

$$h = \frac{6}{\pi(0.15)^2} = 849 \text{ millimètres,}$$

où chaque degré de température fournit une course de  $849 : 16 = 53$  millimètres dans le tube étroit. On voit que l'on est en état d'estimer des variations de volume correspondant à des changements de température *moyenne* de un centième de degré.

Ce point étant acquis, on constate l'opacité complète quand on introduit de l'eau à 20° dans le tube placé dans un milieu où régnait une température de 4°. L'opacité dure aussi longtemps que le liquide descend, *par sa contraction* dans le tube étroit ; elle ne cesse que quand il est arrivé à 30 millimètres environ de son point de stationnement définitif. En ce moment, une lueur traverse le tube long, mais la transparence complète ne se rétablit que si l'homogénéité de température est atteinte. Il résulte de cette expérience que la plus

petite différence de température moyenne en état de produire l'opacité du liquide n'est que

$$30 : 53 = 0^{\circ}57 \text{ environ.}$$

On conviendra que des différences de cet ordre sont parfaitement possibles dans les eaux naturelles exposées à l'action du soleil ainsi qu'à celle du vent.

Une épaisseur d'eau plus faible ne devra présenter, suivant ce qui précède, une résistance sensible à la lumière que si ses divers points sont à des températures plus différentes. Pour faire cette expérience de contrôle, j'ai monté un appareil entièrement en métal, pouvant être chauffé en des points déterminés, par une rampe à gaz. Il était formé essentiellement d'un tube en zinc de 6 mètres seulement de long et de 5 centimètres de diamètre. Ses extrémités étaient fermées par une plaque de métal percée d'une ouverture circulaire de 4 centimètre, couverte d'un plan de verre. A 1 mètre de l'une des extrémités, le tube était interrompu par un bassin également en zinc, muni d'une large fenêtre latérale, en verre, pour permettre d'observer éventuellement l'illumination latérale de l'eau.

L'intérieur de tout l'appareil a été noirci à l'aide de la solution cuivrique servant à écrire en noir sur le zinc, puis rincé à fond et séché. En regardant suivant l'axe du tube, on ne saisissait aucune réflexion de la lumière sur les parois; le cercle d'entrée de la lumière apparaissait en blanc avec la plus grande netteté. Le tube étant rempli d'eau pure, ce cercle apparaissait en bleu clair.

Ces dispositions étant prises, les foyers furent allumés. Presque aussitôt le cercle d'entrée de la lumière perdit ses contours nets, il parut s'élargir. Quelques instants après, on ne le distingua plus, bien que la lumière traversât encore le tube et illuminât l'eau dans une plus large section. L'apparence rappelait complètement ce que l'on observe quand un brouillard, ou un nuage, passe devant le soleil : le disque solaire n'est plus visible alors, mais la lumière parvient encore à nous. Une colonne d'eau inégalement chauffée fonctionne donc à l'instar d'un léger brouillard quand son épaisseur est faible, mais à l'instar d'un épais nuage noir quand l'épaisseur est suffisamment grande. Après quelque temps, quand les différences de température furent encore plus accentuées, l'eau fonça de plus en plus et finit par ne plus laisser passer de lumière.

Il n'est cependant pas certain que cette opacité soit due exclusivement au défaut d'homogénéité produit par les différences de température, car elle a lieu lorsque les parties chauffées de l'eau sont à une température telle que les gaz dissous commencent à se dégager en bulles. Quoi qu'il en soit de ce dernier point, l'expérience ne laisse pas en doute le premier : *l'eau parcourue par des courants de convection calorifique a les propriétés d'un milieu trouble.*

Si l'on regarde l'eau latéralement tandis qu'on la chauffe, on ne saisit pas toujours son illumination. Cela tient peut-être à ce que les courants de convection ne se produisent pas invariablement aux lieux voulus pour permettre une observation nette. Je n'insisterai donc pas sur ce point.

J'ai examiné aussi la lumière passant par ce tube, au moyen d'un analyseur de Nicol, à l'effet de m'assurer si elle s'était polarisée par son jeu sur les courants de convection. Le résultat a été nul. J'aurais dû m'y attendre, car, si la direction des courants de convection est quelconque, c'est-à-dire si elle manque d'orientation définie, la polarisation doit avoir lieu dans tous les plans et par suite la lumière ne pourra être distinguée de la lumière non polarisée.

Ces expériences, malgré leur simplicité, ne laissent pas d'être incommodes; j'ai donc tenu à leur donner une forme permettant leur contrôle par les moyens dont on dispose dans tous les laboratoires.

Le trouble produit par les courants de convection peut être constaté, à la rigueur, à l'aide d'un tube en verre de 2 mètres de long, placé verticalement et fermé en bas par un plan de verre fixé au moyen d'une douille de métal. On l'enveloppe de papier noir et l'on place, sous le bout fermé, une plaque de porcelaine blanche en vue de réfléchir la lumière du jour dans l'axe du tube. Un réticule dont le point de croisement coïncide avec cet axe, est collé sur la porcelaine.

Si l'on remplit le tube d'eau pure, on voit le réticule très nettement, surtout si l'on a soin de supprimer le ménisque de la surface libre de l'eau en appliquant sur l'eau qui déborde un plan de verre. La couleur de l'eau est d'un bleu tendre. Cette constatation étant faite, on vide le tube et, après l'avoir remis dans la position verticale, on le remplit à moitié d'eau chaude; on achève le remplissage en y versant de l'eau froide. Il se produit alors un mouvement de convec-

tion entre les deux colonnes de liquide, par suite de leur différence de densité, et le champ du tube est troublé au point qu'on ne distingue plus de réticule. On n'arrive jamais à l'obscurité, mais on saisit facilement une diminution de transparence du liquide; celle-ci ne cesse qu'avec le rétablissement de l'homogénéité physique de l'eau.

Au lieu d'eau chaude et d'eau froide, on peut faire usage d'eau pure à laquelle on superpose une solution quelconque, plus dense, d'un sel incolore, par exemple de sel marin ou de chlorure de calcium. Les *stries* dues à la convection des deux liquides sont même plus apparentes que dans le premier cas et leur effet plus marqué. Il n'est pas à conseiller de superposer de l'eau et de l'alcool, parce que le mélange des deux liquides est accompagné de la formation de bulles de gaz qui empêchent complètement le passage de la lumière.

#### Conclusions.

Les expériences que je viens de faire connaître prouvent que les courants de convection d'un liquide exercent sur la marche d'un rayon lumineux un effet d'autant plus facile à saisir que la masse du liquide est plus grande. La lumière se réfléchit et se réfracte sur les couches de densité inégale, et se diffuse irrégulièrement, comme si le liquide renfermait des corpuscules. En un mot, un tel milieu n'a pas le caractère d'un milieu optiquement vide.

Les conséquences de ce fait pour l'illumination des eaux limpides naturelles paraissent évidentes. Un lac d'eau pure pourra nous paraître lumineux, de couleur bleue, sitôt que son eau sera le siège de courants de convection. La présence de corpuscules solides, dont l'existence n'a d'ailleurs jamais été démontrée dans une eau bleue, n'est pas absolument nécessaire. Ces corpuscules sont exclusifs de la limpidité; ils ont pour effet de faire virer la couleur de l'eau au vert, parce qu'ils absorbent plus facilement les ondes les plus réfrangibles. Si les courants de convection sont plus rares, le lac devra nous paraître de plus en plus sombre, bien que rien ne soit changé dans la composition chimique de ses eaux.

Si l'on tient compte de la grande efficacité des courants de convection dans l'altération de la transparence de l'eau, même pour des

différences bien faibles de la température, on reconnaîtra que les zones liquides placées à l'ombre d'un nuage ou d'une montagne devront nous apparaître différemment illuminées. Si le vent souffle de façon à contrarier l'échauffement produit par le soleil, le phénomène de l'illumination se modifiera également. Un vent sec, venant du nord ou de l'intérieur des terres, refroidit les eaux en hâtant leur évaporation; il pourra donc produire, après quelque temps d'exercice, un effet semblable à celui d'un abaissement général de la température: il rendra l'eau plus transparente.

Ces conclusions sont conformes à l'observation. « Les eaux des lacs d'eau douce sont plus transparentes en hiver qu'en été », nous dit M. le Prof<sup>r</sup> Forel (\*); c'est qu'en été, la différence de température de la surface et de la profondeur est plus grande. Par suite de l'agitation due à de nombreuses causes, les couches d'eau de densité différente ne peuvent rester *stratifiées*, l'une au-dessus de l'autre, d'une manière régulière; elles se mêlent et les courants de convection se produisent dans des directions indéfinissables, diffusant la lumière dans tous les sens. M. Forel a observé que « pendant les mois d'été, il est absolument impossible de voir le fond et par suite de recueillir les objets antiques que l'œil doit aller chercher dans les ruines des cités lacustres, sous 5 à 6 mètres d'eau; en hiver, au contraire, l'eau est généralement assez transparente pour permettre une pêche fructueuse ».

Le savant et judicieux observateur suisse a attribué la cause de cette différence de transparence à la circonstance que « l'eau de l'été garderait en suspension un beaucoup plus grand nombre de poussières que l'eau homogène et uniformément dense de l'hiver, » chacune des couches retenant en suspension les poussières ayant la même densité qu'elle. Je ne formulerai aucune objection à l'explication proposée par M. Forel, bien que l'on puisse se demander si les eaux plus denses de l'hiver ne sont pas plus aptes à retenir les poussières en suspension, mais on reconnaîtra, je pense, à la suite des expériences qui ont fait l'objet de ce travail, que cette explication n'est pas la seule possible. Les phénomènes observés dans l'étude des lacs, comme presque tous les phénomènes naturels, ne sont pas

(\*) Archives des sciences physiques et naturelles, 1877, t. LIX, p. 137.

aussi simples qu'on peut être porté à le croire : ils sont la résultante de plusieurs facteurs qui doivent, chacun, être étudiés à part, si l'on veut être en état de comprendre leur ensemble. Il n'entre donc, en aucune façon, dans mes intentions de présenter les faits que j'ai observés comme exclusifs de ceux qui sont généralement admis; je désire les signaler seulement comme un complément à nos connaissances sur la question de l'*illumination* et de la *couleur de l'eau*.

Un mot encore.

Dans son mémoire sur la *Polarisation de la lumière de l'eau* (\*), Soret rappelle que Hagenbach ne regarde pas le phénomène de la polarisation de la lumière de l'eau comme produit par la présence de particules en suspension dans le liquide, mais il pense qu'il pourrait être rapporté à une autre cause, à savoir la réflexion par l'eau elle-même. Toutefois, le savant physicien de Genève a combattu cette opinion, aussi bien par des considérations théoriques que par une expérience de vérification restée d'ailleurs sans résultat décisif.

Il a essayé d'altérer l'homogénéité de l'eau, soit en la chauffant, soit en y faisant dissoudre un sel par la superficie, mais il n'a pas pu voir « l'illumination se modifier sensiblement, tout au moins pas plus que par une simple agitation qui met en mouvement les particules les plus grossières, ou introduit de petites bulles d'air dans le liquide ».

Soret ne donne pas les détails de cette expérience, mais il y a tout lieu de supposer que l'insuccès tient à ce que le défaut d'homogénéité n'a pas été produit sur une épaisseur de liquide suffisante. S'il avait opéré sur une colonne d'eau en rapport avec la profondeur à laquelle pénètrent, *pour notre œil*, les rayons solaires dans l'eau limpide, profondeur qui est d'environ 17 mètres dans le lac Léman suivant M. Forel, il eût été certainement dans des conditions plus favorables et il n'eût pas manqué de constater les faits que mes expériences mettent, je crois, hors de doute.

---

(\*) *Archives des sciences physiques et naturelles*, 1870, t. XXXIX, p. 365.