© Biodiversity Heritage Library, http://www.biodiversitylibrary.org/; www.zobodat.at

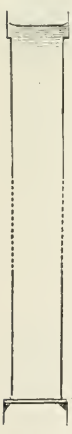
Recherches sur la transparence des eaux du Léman

par

F.-A. Forel.

Dans le IIe volume du Léman, p. 427 [1]), j'ai donné quelques chiffres résumant mes dernières études sur la transparence des eaux, telles que je les ai exposées le 9 janvier 1895 devant la Société vaudoise des Sciences naturelles. Il sera peut-être utile d'en publier une description plus détaillée; la méthode que j'ai employée pourra, je l'espère, intéresser des collègues qui voudraient suivre à des études analogues ou voisines.

Et d'abord la méthode. Elle consiste à verser l'eau qu'il s'agit d'étudier dans un *tube vertical*, fermé en bas par une glace et à en déterminer la transparence. Mon appareil est un tube cylindrique de 1 m de longueur, en feuilles de zinc, de 3,5 cm de diamètre, terminé à ses deux extrémités par des cupules plus larges, de 5,5 cm de diamètre. La cupule inférieure est fermée par une glace de verre blanc cimentée sur son pourtour; la cupule supérieure est ouverte [2]). Je suspends le tube verticalement à un trépied qui le maintient soulevé à 10 cm au-dessus du plancher de la chambre, de telle sorte que je puisse glisser sur le sol un écran blanc, ou une feuille de papier portant des caractères d'imprimerie, et les voir éclairés par une lumière oblique.



[1]) *F.-A. Forel.* Le Léman, monographie limnologique t. II, p. 427. Lausanne 1895.

[2]) Si j'ai évasé en cupules les extrémités de mon tube, c'est afin que le champ visuel ne soit pas rétréci sur les bords, ni par le ciment qui entoure la glace de l'extrémité inférieure, ni par le ménisque capillaire de l'eau à sa surface libre.

© Biodiversity Heritage Library, http://www.biodiversitylibrary.org/; www.zobodat.at

Je verse dans le tube un litre de l'eau dont je veux étudier la transparence. Deux cas peuvent se présenter:

a. Ou bien l'eau est relativement limpide; je distingue plus ou moins nettement les objets éclairés à travers l'épaisseur d'un mètre d'eau que mon rayon visuel parcourt dans l'appareil. J'apprécie alors le degré de la limpidité; je constate qu'elle me permet de voir à peine une lueur diffuse dans les cas de transparence faible; ou bien dans les cas où la transparence est plus parfaite de reconnaître des caractères d'imprimerie, de lire telles grosses lettres, de ne pas lire telles lettres plus fines.

b. Ou bien l'eau est assez louche pour être opaque et ne pas laisser passer trace de lumière sous l'épaisseur d'un mètre. Dans ces conditions, pour arriver à en apprécier le degré d'opacité, je dilue l'eau trouble dans des quantités progressives d'une eau parfaitement limpide, (de l'eau passée par un filtre de porcelaine, filtre Chamberland) et je cherche le degré de dilution qui me permet de voir les premières lueurs de lumière diffuse, ou de lire nettement tels caractères d'imprimerie que je choisis comme objet visé. La quantité plus ou moins grande d'eau limpide ainsi ajoutée me donne une notion de la turbidité de l'eau sale; j'obtiens de cette manière les éléments d'une comparaison suffisante entre deux eaux inégalement opaques.

Il est évident que les valeurs données par ce procédé ne sont pas des chiffres absolus; ils varieraient d'un observateur à l'autre suivant la puissance de leurs yeux; l'appréciation de la lisibilité d'un caractère pourrait aussi différer. Mais le même observateur, prenant l'habitude d'estimer de la même manière l'instant où il déclare lisible tel caractère, peut obtenir, cela est certain, des valeurs parfaitement comparables entre elles.

© Biodiversity Heritage Library, http://www.biodiversitylibrary.org/; www.zobodat.at

En possession de cette méthode, qui pourra, je le crois, servir à diverses recherches dans plus d'un sens, je me suis posé le problème suivant: *Quelle est la quantité des poussières qui rendent opaque l'eau du lac*, tellement que la limite de visibilité[1]), dans le Léman, est en moyenne, en été de 7,3 m, en hiver de 12,5 m, au maximum de 21,0 m.

Je suis parti d'un fait général que j'ai démontré déjà en 1873. La cause principale de l'opacité des eaux d'un lac d'eau douce, tel que le Léman, réside, non dans une absorption par l'eau elle-même, mais dans la formation d'un écran par les poussières en suspension dans l'eau. Ces poussières constituent un brouillard qui, par superposition optique, finit par masquer entièrement l'objet visé et le faire disparaître à la vue[2]). Appelons assombrissement ou extinction par *occultation*, cette catégorie de phénomènes qui amènent la diminution de la transparence par formation d'un écran de corpuscules opaques optiquement superposés.

Cela étant j'ai fait les expériences suivantes pour apprécier le poids des poussières qui font écran dans l'eau du lac.

1° J'ai commencé par déterminer comment se comporte dans mon tube une eau qui dans le lac me donne la limite de visibilité sous un mètre de profondeur.

Pour cela j'ai choisi un jour (le 11 juin 1894) où l'eau du lac devant Morges était relativement sale. La rivière la Morge était en état de crue par suite de pluies torrentielles: ses eaux, très chargées d'alluvion, étaient

[1]) J'appelle *limite de visibilité*, la profondeur à laquelle disparaît à l'œil un disque blanc de 20 cm de diamètre, descendu verticalement dans le lac. Cf. *F.-A. Forel*, le Léman II, 409 sq. Lausanne 1895.

[2]) Ibid. p. 413.

© Biodiversity Heritage Library, http://www.biodiversitylibrary.org/; www.zobodat.at

battues, à leur entrée dans le lac, par les vagues d'un vent sudois; les eaux littorales du lac en étaient salies, et un courant de surface amenait des eaux troubles le long de la côte, jusque sous le débarcadère des bateaux à vapeur. L'opacité des eaux était différente d'une place à l'autre sous ce pont; elles étaient plus troubles près de la rive qu'en avant. Aussi en passant d'une travée à l'autre de l'estacade, et en jetant dans l'eau mon disque blanc attaché à une corde graduée, j'ai bientôt trouvé le point où l'eau avait exactement sa limite de visibilité par un mètre de profondeur. J'y ai puisé un seau d'eau et l'ai apporté dans mon laboratoire.

J'ai versé l'échantillon dans mon tube vertical et j'ai reconnu que cette eau me donnait la lisibilité nette des caractères du grand titre du journal l'*Estafette* de Lausanne (capitales normandes de 20 mm de hauteur, et de 7 mm de largeur des pleins).

J'ai répété l'expérience à deux reprises dans des circonstances analogues et je suis arrivé à des résultats identiques.

2° Ce premier point posé, j'avais à déterminer le poids des matières en suspension qui m'amèneraient expérimentalement à ce même résultat : lisibilité dans mon tube vertical d'un mètre de long, des gros caractères du titre de l'*Estafette*. Pour cela j'ai institué l'expérience suivante :

Je prends une argile fine ; j'en pèse une quantité suffisante ; je la délaie dans l'eau pure, et je cherche le degré de dilution qui me donne la même lisibilité dans le tube vertical.

Voici le détail de l'une de ces expériences (4 juin 1894).

Je prends de l'argile humide provenant d'un dragage profond dans le Léman, et je la délaie jusqu'à en faire une crême bien homogène. Je pèse 1,34 g de

© Biodiversity Heritage Library, http://www.biodiversitylibrary.org/; www.zobodat.at

cette crême et je la laisse sécher à l'air jusqu'à poids constant; ces 1,34 g me donnent un poids de limon sec de 0,67 g; il y avait juste 50 % d'eau.

Je prends ensuite 1,10 g de ma crême (représentant d'après le témoin 55 cg de limon sec) et je la dilue dans de l'eau passée au filtre Chamberland. Je pousse la dilution jusqu'à ce que j'obtienne la lisibilité du gros titre de l'*Estafette;* j'y arrive quand les 55 cg de limon sont dilués dans 74 litres d'eau limpide.

Si je divise 55 par 74 j'obtiens 0,7. L'eau, qui m'a donné une transparence égale à celle de l'eau du lac quand celle-ci a une limite de visibilité de 1 m de profondeur, contient donc par litre 7 milligrammes de matières en suspension.

J'ai répété cette expérience plusieurs fois avec des argiles diverses. Tantôt avec des argiles sèches, délayées dans l'eau, puis décantées; tantôt avec des argiles sèches, porphyrisées, tamisées, délayées et décantées; tantôt, comme dans l'expérience que je viens de raconter, avec de l'argile humide simplement délayée[1]). C'est ce dernier procédé qui m'a donné les meilleurs résultats.

Avec les diverses substances que j'ai utilisées, je suis arrivé à des valeurs du même ordre; en voici les chiffres. La quantité de matières en suspension dans un litre d'eau qui donne un degré de lisibilité égal à celui des eaux troubles du lac dont la limite de visibilité est à 1 m de profondeur, a été:

I.	Argile du lac, sèche, délayée et décantée	9 mg
II.	id. id.	7 „
III.	Même argile, porphyrisée, tamisée, délayée	12 „

[1]) Il va sans dire que les détails du manuel opératoire varient d'une argile à l'autre; la prise du témoin qui détermine la teneur de l'eau en limon doit se faire différemment. Il est inutile d'exposer les particularités de ces manœuvres très simples.

© Biodiversity Heritage Library, http://www.biodiversitylibrary.org/; www.zobodat.at

IV. Même argile, porphyrisée tamisée, délayée 15 mg
V. Argile du lac, humide, délayée . . . 7 „
VI. Argile miocène de Chigny sur Morges, humide, délayée . . . . . 12 „
VII. Argile des tuileries de Mormont, humide, délayée . . . . . 17 „
VIII. Argile bleue de la seconde terrasse lacustre du Léman, Morges . . . . . 16 „

Prenons un chiffre moyen 10 mg par litre. Nous estimons donc à 10 mg par litre (10 mg/l) la teneur en poussières suspendues d'une eau qui dans le lac aurait une limite de visibilité par 1 m de profondeur.

3° Mais une eau dont la limite de visibilité est à un mètre de profondeur est de l'eau sale, de l'eau trouble, de l'eau opaque. Les eaux limpides du Léman ont une limite de visibilité bien plus étendue; nous avons dit qu'elle atteint jusqu'à 21 m de profondeur.

Pouvons nous, du chiffre obtenu pour la limite de visibilité courte des eaux sales, arriver à la valeur des eaux à longue limite de visibilité? de la teneur des eaux opaques arriver à la teneur des eaux limpides? Pas directement; mais tout au moins nous trouverons les extrêmes que ne dépassent pas ces dernières valeurs.

J'admettrai d'abord que si une teneur en poussières suspendues de 10 mg/l arrête la limite de visibilité à 1 m, des eaux qui permettent de voir par 5 m, par 10 m, par 20 m de profondeur contiennent évidemment moins, beaucoup moins de poussières. 10 mg de poussières suspendues dans 1 litre d'eau est donc un maximum qui est loin d'être atteint dans les eaux claires et très claires du Léman.

Je crois ensuite que nous pouvons faire le raisonnement suivant. L'obstacle qui arrête la vision est un obstacle mécanique; il est formé par la superposition opti-

© Biodiversity Heritage Library, http://www.biodiversitylibrary.org/; www.zobodat.at

que d'écrans minuscules, les poussières en suspension dans l'eau qui, lorsqu'elles sont assez nombreuses, interceptent par occultation tous les rayons visuels directs. Que ces écrans soient disposés sur un même plan ou qu'ils soient dispersés dans une masse liquide de grande épaisseur (dans les limites où nous nous mouvons ici), l'obstacle à la vue doit être de même efficacité ; la même quantité de poussières doit être nécessaire pour arrêter la vision. Je me crois donc autorisé à admettre qu'en ne nous occupant que du phénomène de l'extinction de la lumière par occultation,

si 10 mg/l donnent une limite de visibilité par . 1 m
„ 5 „ donneraient une limite de visibilité par 2 „
„ 2 „ „ „ „ „ „ „ 5 „
„ 1 „ „ „ „ „ „ „ 10 „
„ 0,5 „ „ „ „ „ „ „ 20 „

Le maximum de transparence que j'ai constaté dans le Léman, m'a donné une limite de visibilité par 21 m de profondeur, le 21 février 1891, au large d'Ouchy. D'après ce que nous venons de dire, cette eau aurait renfermé moins d'un demi milligramme de poussières minérales en suspension.

Si au lieu de poussières minérales on faisait intervenir des poussières organiques dont la densité est beaucoup plus faible, un poids moins grand encore de matières animales ou végétales devrait être suffisant pour obtenir le même effet. Il est vrai que les poussières organiques n'ont pas en général la ténuité extrême des poussières minérales d'une alluvion argileuse ; celles-ci étant lourdes, ce ne sont que les particules les plus fines qui restent en suspension. Les poussières organiques sont le plus souvent sous forme de flocons relativement gros ; ceux-ci ayant la même densité que l'eau peuvent y flotter indéfiniment. Or pour une même substance la

© Biodiversity Heritage Library, http://www.biodiversitylibrary.org/; www.zobodat.at

grosseur des particules est un facteur important du poids de matière qui amène l'opacité du milieu; plus les poussières sont grosses, plus est grande la quantité nécessaire pour qu'elles forment un écran opaque arrêtant la lumière.

Comme d'une autre part bon nombre des poussières, qui dans l'eau d'un lac interviennent pour fixer la limite de visibilité, sont de nature organique, et que nous ne pouvons en indiquer le volume, les chiffres donnés ci-dessus, qui se rapportent à des poussières minérales, ne peuvent pas, sans autre correction, être étendus aux faits naturels qui se jouent dans le lac. Mais je crois pouvoir admettre que si les valeurs numériques ne sont pas absolument certaines, l'ordre de grandeur qu'elles indiquent est parfaitement admissible et valable?

Par un autre procédé j'ai cherché quelle est l'épaisseur de limon qui peut arrêter la vision, rendre l'eau opaque, empêcher de distinguer un corps éclairé.

Dans une auge plate de 26 mm de largeur interne, j'ai placé 0,73 g de limon sec, délayé dans l'eau, et j'ai étendu la dilution jusqu'à ce que je fusse à la limite de la vision distincte. J'ai dû employer pour cela 1500 g d'eau passée au filtre Chamberland. Si j'attribue à ce limon sa densité de 2,6, cela me donne une couche de limon sec d'une épaisseur de 0,004 mm. Une couche de 4 millièmes de millimètres d'alluvion lacustre du Léman suffit donc, je ne dirai pas pour arrêter la lumière diffuse, mais pour empêcher de distinguer un objet éclairé. C'est là aussi une valeur extrêmement faible[1]).

Quoiqu'il en soit, en nous tenant aux chiffres donnés pour l'alluvion minérale en suspension dans l'eau qui peut causer l'opacité relative de l'eau du Léman, nous

[1]) M. le professeur Ch. Dufour a montré, il y a quelques années qu'une couche de charbon d'un millième de millimètre d'épaisseur, déposée sur une lame de verre suffit à arrêter entièrement la lumière. (*Archives* I, 226 sq. Genève 1896.)

© Biodiversity Heritage Library, http://www.biodiversitylibrary.org/; www.zobodat.at

arrivons à des quantités extraordinairement faibles, quelques milligrammes, moins d'un milligramme par litre. C'est remarquablement peu; nous en jugeons par comparaison avec la quantité des sels qui sont dissous dans l'eau de ce même lac; l'eau du Léman contient 175 mg de substances solubles par litre, par conséquent 350 fois plus que de matières en suspension. Ainsi donc, au point de vue physique l'eau du Léman est, dans les beaux jours d'hiver surtout, de l'eau presque absolument pure[1]).

On m'a fait deux objections: 1° Vous ne tenez pas compte des autres facteurs d'absorption, entr'autres de l'absorption de la lumière par l'eau elle-même. L'eau est un liquide possédant un certain pouvoir d'absorption. A cela je répondrai: C'est vrai. Mais, si une partie de la lumière est absorbée par le liquide, en tant que liquide légèrement absorbant, j'aurai besoin d'une quantité encore moins grande de poussières opaques pour expliquer la disparition par occultation des objets descendus dans le lac aux profondeurs observées. De ce fait encore mes chiffres sont des maximums.

2° D'autre part M. le professeur Henri Dufour m'a fait remarquer que je n'ai pas le droit de passer par une simple division de la teneur en alluvion suspendue dans une couche de un mètre à celle d'une couche d'épaisseur plus forte. Quelle que soit la nature de l'obstacle qui affaiblit ou arrête la pénétration des rayons lumineux, que ce soit une occultation par des écrans minuscules ou une absorption par un milieu translucide, la quantité

[1]) Et cependant J.-L. Soret dans ses recherches sur la transparence de l'eau du Léman, n'est arrivé à la limpidité absolue qu'après avoir fait reposer par décantation très longtemps prolongée toutes les poussières qui flottent encore dans le liquide. Archives XXXVII, 146, Genève 1870.

© Biodiversity Heritage Library, http://www.biodiversitylibrary.org/; www.zobodat.at

de lumière éteinte s'exprime par une fonction exponentielle: la fraction de lumière transmise est $I = I_0 A^x$ (loi de Bouguer[1]).

Si cela est, et je m'incline devant la parfaite compétence de l'ami qui a insisté sur cette objection, les chiffres donnés ci-dessus doivent être non des maximums mais des minimums; la quantité de matières en suspension dans les eaux du Léman doit être un peu plus forte que les milligrammes ou fractions de milligramme que j'ai indiqués page 234.

J'ai voulu en avoir le cœur net, et je me suis adressé à l'expérience. J'ai rempli mon tube vertical jusqu'à moitié hauteur, d'une eau opalinisée par de l'alluvion minérale impalpable des grands fonds du lac; j'en ai constaté la transparence par des essais de lisibilité; puis j'ai achevé de remplir le tube avec de l'eau passée au filtre Chamberland, et j'ai mélangé le tout. D'après l'objection de M. Dufour je m'attendais à trouver une diminution de l'opacité, ou si l'on veut une augmentation de la transparence dans cette eau ainsi diluée. C'est le contraire que j'ai obtenu. Je crois avoir constaté par de nombreuses répétitions de l'expérience que les caractères d'imprimerie vus à travers cette eau étaient moins distincts lorsque en surajoutant de l'eau claire j'avais, avec la même dose de poussières occultantes, augmenté l'épaisseur de la couche translucide; il est vrai que comme la lisibilité à travers des couches d'épaisseur différentes est assez difficile à comparer, d'autant plus que l'observation des deux lisibilités n'est pas simultanée mais consécutive, il pouvait y avoir un peu de doute sur la valeur de l'expérience.

[1]) A est le coefficient du transmission pour l'unité d'épaisseur traversée, un décimètre p. ex., ou un mètre. x est l'épaisseur en décimètres ou en mètres.

© Biodiversity Heritage Library, http://www.biodiversitylibrary.org/; www.zobodat.at

Mais j'ai obtenu une observation parfaitement certaine en me plaçant à la limite de l'opacité absolue. Je remplis à moitié le tube vertical d'une eau troublée par de l'alluvion lacustre et amenée jusqu'à la dernière limite de l'extinction de la lumière; je vois encore un peu de lumière diffuse, des traces à peine dicernables, mais cependant certaines. Après cela j'ajoute de l'eau limpide qui achève de remplir le tube, j'agite le tout pour avoir un mélange bien homogène et alors, quand j'essaye de regarder au travers de l'eau, toute trace de lumière diffuse a disparue; l'opacité absolue est atteinte.

J'ai répété l'expérience dans des conditions plus exagérées encore, en partant d'une quantité d'eau limoneuse très faible, en remplissant seulement le dixième du tube vertical, et j'ai à plusieurs reprises obtenu le même résultat. J'ai répété l'expérience avec du lait, même résultat.

Voici l'expérience la plus démonstrative que j'ai établie:

Par un tuyau de caoutchouc descendant jusqu'au fond du tube vertical je verse environ un décilitre d'eau trouble qui amène presque l'opacité absolue; il passe cependant encore un peu de lumière diffuse à travers cette couche d'un décimètre d'épaisseur. J'achève de remplir le tube vertical en y versant 9 décilitres d'eau passée au filtre Chamberland. Résultat immédiat: Opacité absolue. Je dilue progressivement cette masse opaque jusqu'à ce que je commence à voir passer les premières traces de lumière diffuse à travers une couche d'un mètre d'épaisseur; je n'y arrive qu'après avoir ajouté 6 litres d'eau claire à mon litre d'eau opaque.

De cela je dois conclure:

Ou bien si, comme le dit M. Dufour, la fonction exponentielle est applicable à l'extinction de la lumière par occultation, dans mon expérience le coefficient d'oc-

© Biodiversity Heritage Library, http://www.biodiversitylibrary.org/; www.zobodat.at

cultation par les écrans minuscules des poussières minérales ou organiques est plus faible que le coefficient d'absorption par l'eau limpide passée au filtre Chamberland. Ce serait bien difficile à admettre étant donné la splendide transparence de cette eau.

Ou bien l'extinction de la lumière par occultation, au moyen des écrans minuscules des poussières en suspension, est soumise à une autre loi que l'extinction de la lumière par absorption d'un milieu fluide physiquement homogène. Est-elle simplement proportionelle à la quantité des poussières en suspension, quelle que soit l'épaisseur du milieu limpide dans lequel ces poussières sont suspendues? Cela me paraît probable, mais je n'ai pas encore su instituer une expérience qui le démontre.

Quoiqu'il en soit, la conclusion générale que je tire de ces recherches est que les matières en suspension dans les eaux limpides du Léman sont en quantité extrêmement faibles. Ces eaux sont presque pures au point de vue physique.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Verhandlungen der Naturforschenden Gesellschaft zu Basel

Jahr/Year: 1903

Band/Volume: 16_1903

Autor(en)/Author(s): Forel F.-A.

Artikel/Article: Recherches sur la transparence des eaux du Léman 229-240