

LA COULEUR DES EAUX

PAR

Ad. Kemna

Directeur de la Water Works C^o, à Anvers.

La couleur de l'eau ne préoccupe pas en général le grand public. Les anciens ont fait des travaux parfois gigantesques pour alimenter leurs villes; les philosophes considéraient l'eau comme un des quatre éléments et plusieurs en faisaient l'élément primordial; mais ni cette importance pratique, ni ce rôle intellectuel n'ont amené une meilleure connaissance objective.

Quand il s'agit de louer une maison, dans une ville où la distribution d'eau n'existe pas ou est peu répandue, l'attention du nouveau locataire porte spécialement sur la qualité de l'eau. Mais c'est d'ordinaire Madame qui se charge de cet examen; et du moment qu'une carafe d'eau remplie à la pompe est fraîche et claire, Madame est satisfaite. L'analyse est un peu sommaire et les dures leçons de l'expérience ont souvent montré le danger qu'il peut y avoir à s'en contenter.

Il y a pourtant une catégorie de personnes que nous pourrions, semble-t-il, interroger avec fruit; ce sont les peintres. De par leur métier, ils doivent regarder avec attention et faire de la nature une véritable étude. Il va sans dire que nous écartons les vulgaires enlumineurs, ainsi que toute la bande des pointillistes, impressionnistes, etc. Dans leur bariolage amorphe, c'est tout au plus si l'on peut inférer la présence de l'eau par les petits bateaux esquissés à mi-hauteur sur la toile. Leurs œuvres sont inutilisables; mais le travail des artistes honnêtes et consciencieux doit pouvoir nous servir.

Une simple visite dans un musée ou dans un salon de peinture

révèle l'inanité de cet espoir. Toutes les couleurs du spectre, avec toutes les teintes intermédiaires et tous les mélanges possibles, plus le noir et le blanc, se trouvent sur les toiles ; et devant une pareille abondance, il y a impossibilité de faire un choix. Nous nous sommes trompés d'adresse. L'artiste n'a pas pour mission de nous fournir une étude approfondie et de nous révéler les faits essentiels, malgré la tromperie des aspects extérieurs. Au contraire, c'est précisément l'aspect extérieur qui seul l'intéresse et qu'il s'efforce de rendre. Or, l'aspect pictural de l'eau dans la nature est la résultante d'un très grand nombre de causes. A la couleur intrinsèque de l'eau, si tant est qu'elle en possède une, viennent se surajouter une foule de circonstances accessoires ; les matières en suspension, minérales ou organisées, viennent troubler sa transparence ; les rives, avec leur végétation, atténuent ou exaltent les tons par la juxtaposition des couleurs ; le ciel, avec ses nuages mobiles, se reflète à la surface et le moindre souffle de vent qui vient rider ce miroir, amène un changement presque kaléidoscopique. Le célèbre critique anglais Ruskin disait qu'il est aussi impossible de peindre de l'eau dans toute sa perfection, que de peindre l'âme, — ce qui doit être en effet le comble de la difficulté.

Il en résulte que la plupart des œuvres d'art ne sont pas facilement utilisables pour la constatation *scientifique* des faits ; le savant ne s'attache pas à cet effet d'ensemble, qui est le seul vu par l'artiste ; il s'efforce au contraire d'éliminer l'action de l'une ou de l'autre cause accessoire, par exemple dans le cas qui nous occupe, en changeant d'emplacement ou de point de vue pour éviter un jeu de réflexion, etc. — Réciproquement, il n'est pas toujours facile de faire la critique d'un tableau exclusivement d'après les principes de la science ; on court le risque d'oublier un détail infime, mais qui suffit pour tout faire changer d'aspect. Un savant anglais très connu en a fourni un bon exemple. Nul ne contestera la compétence scientifique de M. J. Norman Lockyer ; il s'est avisé un jour de faire à sa façon une revue de salon, signalant des lunes inverses (avec la concavité du croissant tournée vers le soleil), des lunes dans la constellation de la grande ourse, le soleil se couchant *derrière* une église alors que l'autel doit être placé à l'orient, un arc-en-ciel dont les couleurs étaient sens dehors dedans, et une foule d'autres choses amusantes. Dans son article, il s'est surtout occupé des couleurs du ciel ; il ne fait mention de l'eau qu'une seule fois et encore incidemment, pour un tableau représentant un lever de soleil à Guernesey ; voici ce qu'il en dit : « Couleur du ciel bonne ; eau de couleur impossible étant données les conditions du ciel. » Des nombreux artistes critiqués, et parfois d'une

façon assez mordante, celui-ci est le seul qui ait répondu. L'eau représentée, dit-il, est légèrement ondulée par une brise soufflant *vers* le spectateur; celui-ci ne voit donc pas, réfléchi par la mer, la portion du ciel voisine de l'horizon, mais bien la portion du ciel qui est presque au zénith; en effet, la partie descendante de la vague ne peut réfléchir que le zénith. M. Lockyer n'a rien répondu (1).

En présence de la complication du problème, on conçoit la réserve, même des hommes de science. Brücke et Helmholtz (2) s'étendent sur les phénomènes d'irradiation, de contraste des couleurs, étudient en détail l'effet de l'atmosphère et de la *vapeur* d'eau, mais passent sous silence l'eau elle-même.

Un géologue anglais, le professeur Ansted, a été plus entreprenant et il a traité la question dans un article intitulé *The Representation of Water* (3) et dans une conférence donnée en mai 1866 à la Royal Institution de Londres. C'est prolix et passablement diffus. « L'eau a une teinte propre, elle réfléchit et transmet une vraie couleur », mais on ne nous dit pas laquelle. Un peu plus loin, le ton n'est plus du tout aussi affirmatif : « Il est presque certain que l'eau a une couleur propre, mais il est de fait que très facilement elle prend ou semble prendre des teintes diverses... Cet effet est peut-être produit par des causes autres que la couleur intrinsèque de l'eau, car nous savons qu'en pleine mer les courants ont un effet à peu près similaire ». Ce n'est pour ainsi dire qu'incidemment que nous trouvons enfin une mention précise : « En pleine mer et par un beau temps, la couleur de l'eau est du bleu le plus foncé et le plus pur. Mais cette couleur est si sensible qu'elle se trouble et devient boueuse par un changement de temps... Les vagues, sur une côte rocheuse, sont souvent d'un vert métallique très riche de ton... »

Si l'on faisait un *referendum* parmi les artistes, il est probable que les deux couleurs mentionnées se partageraient la presque totalité des suffrages, mais il y aurait une bonne majorité pour le vert. La seule dénomination marchande de couleur empruntée à l'eau est le *vert* d'eau.

Les savants ne se sont occupés de la question que depuis le commencement du XIX^e siècle. Un résumé des vues régnantes et une théorie nouvelle ont été donnés par ARAGO en 1838 (4).

(1) *Nature*, 16 mai 1878, vol. XVIII, page 66.

(2) E. BRÜCKE, *Principes scientifiques des Beaux-Arts*; H. HELMHOLTZ, *L'Optique et la Peinture*. — Bibliothèque scientifique internationale, 1878.

(3) *The Art-Journal*, 1863, page 13.

(4) Rapport fait à l'Académie des Sciences de Paris, concernant les observations

Il y a accord entre tous les observateurs sérieux, sur la couleur bleue de l'océan ; Scoresby compare la teinte des eaux polaires au bleu d'outre-mer ; le capitaine Tuckey parle d'*azur vif* pour les mers équatoriales ; l'illustre chimiste Davy avait déjà admis que la couleur intrinsèque de l'eau était le bleu, et expliquait les eaux vertes par la présence de matières végétales. Arago a recours à une explication analogue ; les bandes vertes si étendues et si tranchées des régions polaires proviennent de la présence de myriades de méduses, dont la couleur jaunâtre, mêlée à la couleur bleue de l'eau, engendre du vert ; les matières terreuses à l'embouchure des fleuves donnent du brun. — Près des côtes, par suite de la diminution de profondeur ou, si l'on préfère, du relèvement du fond, la réflexion de la lumière sur ce fond intervient ; un sable jaune donnera du vert, par mélange optique avec le bleu ; dans la baie de Loango, les eaux sont rouges et le fond aussi. Mais il semble qu'un fond de sable blanc ne pourrait pas changer la teinte de l'eau ; or, souvent dans ces conditions, le vert est des plus caractérisés. — Pour écarter cette objection, cherchons quelle couleur frappe le sable blanc au fond de l'eau ; Arago émet la singulière idée que l'eau aurait deux teintes, une bleue par réflexion, et une autre, transmise, tout à fait différente de la première. « Quelques personnes croient que la couleur transmise est verte. Ainsi l'eau disperse dans tous les sens, après l'avoir *bleuie*, une portion de la lumière blanche qui vient l'éclairer. Cette lumière dispersée constitue la *couleur propre* des liquides. » — Sur ce fait de la couleur transmise verte de l'eau, fait avancé d'une façon dubitative et détournée, toute la théorie est basée. Les diverses teintes des eaux naturelles sont expliquées comme suit : quand la mer est assez profonde, l'œil ne reçoit que de la lumière réfléchie et la nappe paraît bleue ; mais quand le fond est assez élevé pour que la lumière qu'il renvoie intervienne d'une façon sensible, à la teinte bleue de réflexion s'ajoute la teinte verte de transmission et l'intensité de cette dernière sera proportionnelle au double de l'épaisseur de la nappe d'eau, car le rayon a dû traverser deux fois, une fois pour entrer et arriver jusqu'au fond, et une seconde fois pour sortir. Malheureusement pour la théorie, les lacs de la Suisse sont les uns bleus, les autres verts, indépendamment de la profondeur ; Arago fait appel aux matières végétales de Davy pour sortir d'embarras. — Même dans une mer bleue, la crête des vagues, sous leur frange

d'écume, est nettement verte (1); c'est que, « convenablement orientées, elles peuvent envoyer à l'œil une assez grande quantité de rayons transmis ou verts, pour que le bleu réfléchi soit entièrement masqué ». Chaque vague est un prisme à base horizontale; considérons deux successives de ces vagues, l'une prochaine, l'autre éloignée; sur la face antérieure de celle-ci, la lumière du ciel se réfléchit et le rayon, devenu horizontal, traverse la vague rapprochée pour arriver à l'œil du spectateur. — Pour éliminer l'influence des rayons du ciel bleu réfléchis et déterminer la couleur propre de l'eau, Arago propose de regarder l'eau avec une tourmaline et sous un angle de 37 degrés; les rayons réfléchis sont alors polarisés et peuvent être arrêtés par la tourmaline.

Il ne semble pas qu'Arago ait fait des expériences, ni même qu'il ait simplement regardé de l'eau distillée à travers un tube d'une certaine épaisseur. Son article, très bien écrit, comme tout ce qui sortait de sa plume, est, pour les faits, une compilation; ses répondants sont des navigateurs. La partie théorique consiste à admettre la double couleur de l'eau, à faire de ce liquide un corps dichroïque. Il faut reconnaître que si l'on s'en tient aux faits cités, cette conclusion est assez naturelle; la couleur verte de la crête des vagues d'une mer bleu indigo est une chose très curieuse; la plupart des eaux de distribution, vues à travers un tube de 2 pieds (60 centimètres) sont nettement vertes et dans les installations de filtrage d'eaux potables, on considère la couleur vert-pomme clair comme un indice de bon fonctionnement des filtres et de pureté du produit.

En 1847, la question est reprise incidemment par un géologue, M. DUROCHER (2). En parlant de la structure spongieuse et rubanée de la glace, qui présente une alternance de bandes bleues et de bandes blanches, il dit :

« J'ai reconnu que l'interposition de l'eau entre les pores et les fissures de la glace grenue contribue puissamment à y développer la belle couleur bleu d'azur que l'on y admire. D'ailleurs les eaux qui s'écoulent des champs de neige et des glaciers présentent aussi une teinte d'un bleu de ciel très prononcé; ce caractère leur est tellement

(1) Cet effet est rendu dans un tableau de Cabanel (Musée du Luxembourg, n° 45) représentant une nymphe roulée par une vague; la mer est bleu foncé, la vague vert-émeraude. — Au salon de Bruxelles de 1897, dans la section anglaise, une autre nymphe à moitié immergée paraît tout à fait verte à travers l'eau bleue.

(2) *Étude sur les glaciers du nord et du centre de l'Europe*. — Académie des Sciences de Paris, 15 mars 1847; *Comptes rendus*, tome XXIV, page 444.

propre, que souvent il m'a servi à reconnaître si les montagnes qui entourent les hautes vallées sont couvertes de tapis de neige. La couleur est souvent très sensible à une distance de 13 myriamètres de l'origine des rivières (ici est cité comme exemple un cours d'eau de Norvège). Lorsque les détritits, mélangés à l'eau qui sort des glaciers, sont gris, ils ne produisent d'autre effet que d'en pâlir la teinte bleue et la faire passer au bleu sale. Si les eaux des lacs et des rivières de la Suède et une partie de celles de la Norvège ne présentent point une teinte d'azur qui leur soit propre et indépendante des reflets du ciel, il ne faut pas toujours en attribuer la cause aux substances minérales qu'elles peuvent tenir en suspension, car j'ai souvent vu les eaux qui sortaient des glaciers présenter une couleur bleue, quoique étant troubles, tandis que, à côté, coulaient des eaux grises ou d'un gris verdâtre. Si le bleu est la couleur propre de l'eau pure, et si le remplacement de cette couleur par des teintes grises ou verdâtres tient à des impuretés, cela doit provenir, dans beaucoup de cas, de substances organiques, principalement végétales, plutôt que de matières animales. »

Les vues de M. Durocher furent aussitôt critiquées par M. CHARLES MARTINS (1). Tout d'abord il rappelle que la couleur bleue comme indice d'une origine glaciaire de l'eau, n'est pas une opinion nouvelle ; elle avait été émise trente ans auparavant par un géologue suisse, Ebel. Agassiz avait déjà constaté que la glace bleue contient plus d'eau que la glace blanche ; seulement il attribuait la couleur bleue, non pas à la présence de l'eau, mais à l'absence d'air ; les analyses gazométriques de Nicollet ont démontré un grand excès d'air dans la glace blanche et Dollfuss a trouvé pour cette glace une densité trop faible. Des lacs alimentés par les glaciers sont, les uns bleus, les autres verts ; deux lacs successifs, c'est-à-dire intercalés dans le cours de la même rivière, sont, le supérieur vert, l'inférieur bleu ; l'auteur y voit un simple effet de purification par décantation ; et il révèle que dans le seul exemple cité par M. Durocher, la rivière bleue a passé par quatre lacs !

Nous avons rencontré jusqu'ici un chimiste (Davy), un physicien (Arago) et un géologue (Durocher). Aucun d'eux n'a fait de la question une étude spéciale et approfondie ; Davy, dans un voyage en Suisse,

(1) *Note sur la couleur de la glace des glaciers, celle des eaux qui s'en écoulent et les caractères des stries laissées par eux.* (Commission nommée pour examiner le mémoire de M. Durocher). — Académie des Sciences de Paris, 29 mars 1847 ; *Comptes rendus*, tome XXIV, p. 545.

a été frappé de la teinte brillante des lacs alpestres et ses constatations ne vont pas au delà de ce que peut voir le premier touriste venu. Arago, ayant à rédiger des instructions pour une expédition scientifique, résume le peu de faits connus à son époque et, pour faciliter la besogne des explorateurs, il fait une théorie ; il dit lui-même que cette théorie « n'est tracée qu'à la hâte, dans des linéaments imparfaits et que son but principal est de diriger les études des navigateurs ». Durocher ne parle qu'incidemment de la couleur de l'eau. — Toute cette première période est donc caractérisée par l'observation accidentelle et purement superficielle des phénomènes, l'absence d'expérimentation et le caractère aléatoire des théories, qui sont tout au plus des opinions, non contrôlées par des recherches spéciales ; c'est ainsi que personne ne s'est avisé de rechercher les organismes végétaux auxquels serait due la couleur verte de certains lacs.

La période scientifique s'ouvre par le grand nom de BUNSEN. On sait que dans un voyage en Islande, l'illustre chimiste avait étudié le phénomène des geysers et en a donné une théorie ; la teinte bleu-verdâtre de ces eaux l'avait frappé et il a eu l'idée bien simple de regarder par un tube de deux mètres de long, rempli d'eau distillée ; il a vu une couleur bleu tendre : le bleu serait donc la couleur propre de l'eau. Quant aux autres teintes, les unes seraient le résultat purement physique de la réflexion sur le fond coloré ; d'autres proviendraient de matières étrangères dissoutes, sur la nature desquelles l'auteur ne s'explique pas davantage, sauf pour les geysers, où il a trouvé des traces d'hydroxyde de fer. — Nous avons donc ici pour la première, fois, une expérience et une analyse ; l'expérience confirme que la couleur de l'eau pure est le bleu, et elle fait justice en même temps de l'hypothèse inexacte d'Arago sur le dichroïsme ; l'analyse trouve une substance qui peut en effet influencer sur la couleur de l'eau en faisant virer au vert ; mais ce n'est encore qu'un fait isolé. Pour permettre de généraliser, il faudrait une série d'analyses d'eau diverses.

C'est ce que vint donner la même année H. SAINTE-CLAIRE-DEVILLE (1), par l'examen des eaux de sept des principales villes de France.

« La coloration des grandes masses d'eau, qui paraissent quelquefois, vues par réflexion, d'un bleu indigo si intense, est un fait complexe dont l'explication doit dépendre d'un phénomène physique, en même

(1) *Recherches sur la composition des eaux potables.* — Académie des Sciences de Paris, 19 avril 1847 ; *Comptes rendus*, tome XXIV, page 693.

temps que de la composition chimique. C'est ce qui me semble démontré par la présence d'une matière jaune qu'on trouve dans les résidus salins de l'évaporation de l'eau, matière identique, selon moi, aux acides créniques de M. Berzelius. Il paraît en effet que l'eau pure, du moins privée de toute matière colorante étrangère, est bleue; car l'eau du lac de Genève, par exemple, évaporée en grande quantité, ne laisse apercevoir aucune trace de matière jaune ou colorée.

Les eaux vertes donnent à la concentration peu de matière jaune, de façon que la couleur bleue primitive en est seulement modifiée et prend la teinte verte qui résulte naturellement de son mélange avec le jaune.

Enfin dans les eaux jaunes, le dépôt obtenu par l'évaporation est tellement coloré qu'il en est noirâtre. On s'explique ainsi comment cette teinte prédominante masque entièrement celle qui appartient à l'eau pure.

Mes expériences sont la confirmation d'une opinion que M. Dumas professe chaque année à la Sorbonne (1).

Je pense aussi que cette substance azotée joue un rôle important dans la fertilisation des prairies par l'eau des rivières et des sources. »

Le travail consciencieux de Deville démontrait donc un parallélisme parfait entre la couleur des eaux et celle de leur résidu solide. Nous avons en outre un renseignement sur la nature chimique de la matière colorante; Bunsen avait trouvé du fer, Deville trouve une matière organique, qu'il rapproche des acides créniques de Berzelius. Nous reviendrons plus tard sur les travaux du chimiste suédois.

Des résultats analogues ont été obtenus en 1861 par un chimiste bavaois, WITTSTEIN (2), pour des eaux vertes et des eaux brunes ou jaunes; ces dernières renferment le plus de matières organiques, qui se précipitent pendant l'évaporation sous forme de flocons bruns, dont la couleur va se fonçant; Wittstein les considère comme des acides humiques, très voisins des acides créniques. En outre, les eaux brunes seraient plus douces et renfermeraient moins de calcaire et plus d'alcali que les autres eaux; ces alcalis joueraient indirectement un rôle important pour la couleur, en maintenant les acides humiques en solution. Les diverses teintes résulteraient des proportions variables de brun influençant le bleu intrinsèque. Les sels minéraux seraient sans action.

(1) Dans le *Traité de Chimie appliquée aux arts* de DUMAS (Liège, 1848), je n'ai rien trouvé sur la couleur de l'eau.

(2) *Vierteljahrschrift für praktische Chemie*, tome X, page 342.

Ce dernier point a été contredit par un des membres de l'expédition allemande de la *Gazelle*, en 1875 (1). Aux environs du Congo, la mer passe graduellement du bleu au vert et au brun; en même temps, le degré de salure (la densité) diminue. Il semble qu'il ne puisse pas y avoir de doute sur la cause de ces deux phénomènes connexes; ils sont l'effet du grand fleuve africain, qui dilue les eaux de l'océan et change leur couleur par les matières organiques qu'il tient en dissolution (l'eau du Congo est brune). Mais M. SCHLEINITZ a cru devoir chercher une autre explication et mettre en rapport la couleur bleue avec la quantité de sel dissous. Il suffit de songer aux lacs d'eau douce bleus pour voir que de deux faits concomitants, M. SCHLEINITZ en a arbitrairement pris un pour la cause et un autre pour l'effet. Le *Challenger* a fait plusieurs observations du même genre; entre le cap York et les îles Arou, la narration signale la couleur verte et la faible densité de l'eau; mais l'écrivain fait remarquer en même temps l'absence complète de foraminifères pélagiques et le caractère côtier de la faune superficielle, de la faune profonde et des dépôts; la cause est attribuée à l'action de fleuves (2).

Enfin la question a été abordée d'une façon toute spéciale en 1870 par M. HAYES (3), qui a essayé de retirer des eaux bleues du lac de Genève la matière colorante, par l'acétate de plomb basique et le savon. Naturellement, les résultats ont été négatifs. Le travail est la contre-épreuve de celui de Bunsen.

Dans cette deuxième période, nous n'avons rencontré que des noms de chimistes. Le résultat final de leurs travaux constitue un ensemble bien coordonné et qui semble suffisamment appuyé sur des faits; aussi a-t-il été généralement accepté. Le *Dictionnaire de Chimie* de Wurtz, par exemple, dit que « l'eau est un liquide incolore lorsqu'il est vu en petite quantité, mais présentant une belle couleur bleue lorsqu'il est vu sous une grande masse; l'eau de mer présente d'autres nuances, surtout le vert; on attribue cette dernière teinte à la présence d'une petite quantité de limon jaune » (4). Un peu plus loin, nous trouvons

(1) SCHLEINITZ, *Naturforscher*, tome VIII, page 59.

(2) Challenger Reports, *Narrative of the cruise*, vol. I, part II, page 545. — Il est curieux que les travaux du *Challenger* ne mentionnent que rarement la couleur de l'eau et n'entrent dans aucune considération théorique.

(3) *Jahresbericht über die Fortschritte der Chemie*, 1870, page 1378.

(4) Article *Eau*, page 1192, col. 2. — Il semble qu'il y ait ici une confusion avec les eaux de rivière, car dans les travaux cités jusqu'ici, nous n'avons rencontré aucune analyse d'eau de mer en rapport avec la couleur pour cette cause.

que « l'eau est en grande masse, bleue ou bleu-verdâtre; la couleur verte ou vert-jaunâtre est due à des animaux microscopiques »; et comme autorités, sont cités entre parenthèses, Davy, Bory de Saint-Vincent et Arago (1). Les deux explications ne sont pas absolument concordantes et quand on considère que le volume date de 1876, que Bunsen n'est pas même cité et que les travaux de Tyndall, que nous aurons à examiner, sont entièrement passés sous silence, on ne peut pas dire que pour ce point, assez secondaire il est vrai, l'ouvrage de Wurtz soit bien au courant.

A côté de la théorie purement chimique de la couleur des eaux, nous allons maintenant voir s'établir une théorie purement physique, une application à l'eau de la théorie de TYNDALL sur le bleu du ciel et la polarisation de sa lumière, les deux grandes énigmes de la météorologie avant 1869.

Le bleu du ciel est absolument indépendant de la couleur propre des deux gaz qui constituent l'atmosphère; cette couleur serait due à la réflexion de la lumière sur des particules en suspension ou poussières. Si elles réfléchissent, non la lumière blanche intégrale, mais uniquement les rayons bleus, c'est une question de dimension. Dans les couches supérieures de l'atmosphère ne pénètrent que les particules les plus ténues, dont les dimensions sont si petites qu'elles sont de l'ordre de grandeur des longueurs d'onde des vibrations lumineuses les plus courtes (bleues) qui seules sont réfléchies. En même temps, la lumière ainsi réfléchie doit être polarisée sous un certain angle, ce qui est en effet le cas. La matière qui jouerait ce rôle de poussière miroitante serait, d'après Tyndall, de l'eau à un état de division extrême et qu'il désigne par l'expression de *nuage naissant*.

Les travaux de Tyndall furent reproduits dans tous les journaux scientifiques (2). Un physicien de Genève, M. SORET, songea aussitôt à leur application possible à l'eau; en regardant à l'intérieur du lac avec un tube fermé par une glace et muni d'un Nicol oculaire, il constata que l'eau émettait de la lumière polarisée, dans la direction perpendiculaire aux rayons solaires réfractés; il y avait donc là également des phénomènes de réflexion, puisque la lumière était polarisée. Le fait fut confirmé en 1870 par HAGENBACH pour le lac de Lucerne.

En 1871, TYNDALL lui-même prend en main la question de l'eau (3). Dans un voyage d'Oran à Spithead, il avait pris 29 échantillons d'eau

(1) Article *Eaux potables*, page 1201, col. I.

(2) *Revue des cours scientifiques*, 20 mars 1869, page 242; 2 avril 1868, page 284.

(3) *Revue scientifique*, 15 juillet 1871, page 67.

de mer, dans des régions de couleurs différentes, vertes et bleues. Il les examina à Londres dans un puissant faisceau de lumière électrique et constata que toutes donnaient ce qu'il nomme de l'éclairage latéral; en regardant de côté, c'est-à-dire dans une direction perpendiculaire à la longueur du tube d'essai, on pouvait suivre la trace des rayons lumineux. Ces eaux ne constituaient donc pas des milieux optiquement vides et devaient contenir des particules en suspension, les vertes beaucoup plus que les bleues.

« Ces études démontrent évidemment, dit-il, le rapport qui existe entre la couleur verte de l'eau de mer et la présence de matières fines en suspension; elles font voir aussi que la couleur bleu d'outremer, et surtout la couleur indigo foncé de l'eau, correspondent à une absence relative de matières en suspension.

» Si l'eau était profonde, d'une densité constante et sans matières étrangères en suspension, le rayon solaire qui la traverse s'éteindrait complètement: elle paraîtrait alors aussi noire que de l'encre. La surface pourrait bien encore nous renvoyer quelques faibles rayons réfléchis, comme l'encre peut le faire, mais la masse du liquide ne pourrait transmettre de lumière, ni par conséquent de couleur. Dans l'eau de la mer, quand elle est très claire et très profonde, ces conditions se trouvent remplies jusqu'à un certain point; ce qui explique la teinte très foncée de cette eau. La couleur indigo vient, selon moi, en partie de matières en suspension qui se trouvent toujours, même dans l'eau naturelle la plus pure, et en partie de la légère réflexion que subit la lumière à la surface des couches d'inégale densité. Une très petite quantité de lumière se trouve ainsi renvoyée à l'œil, avant d'arriver à la profondeur qu'exige l'extinction complète. »

Tyndall passe ensuite à l'explication de la teinte verte de l'eau, mais, contrairement à son habitude, nous ne trouvons pas ici sa netteté d'expression ordinaire; il relate des expériences démontrant qu'un corps blanc (une assiette) immergé à une certaine profondeur, paraît vert; même dans les régions bleues, la crête des vagues est verte à la lumière transmise; et, dit-il, les particules en suspension dont nous avons reconnu la présence dans l'eau verte ont essentiellement la même action que l'assiette et renvoient à l'œil de la lumière verte. Mais il ne dit pas explicitement pourquoi ces corps paraissent verts; toutefois il est plausible d'inférer que, d'après lui, c'est à cause de l'élimination du bleu réfléchi sur les particules solides dans les couches sus-jacentes.

Le paragraphe suivant est intitulé : *Des particules en suspension dans*

les eaux potables. Les eaux des huit compagnies alimentant Londres sont examinées avec le faisceau lumineux, ainsi que des eaux passées par divers modèles de filtres domestiques, de l'eau distillée dans un courant d'hydrogène, de l'eau obtenue directement par synthèse (combustion de l'hydrogène), et toutes s'illuminent plus ou moins, preuve de la présence de particules en suspension. Les eaux les plus pures étaient de l'eau du lac de Genève envoyée par Soret, l'eau de la distribution de Canterbury (provenant de la craie et adoucie par le procédé de Clarke) et surtout une eau provenant de la fusion de morceaux de glace choisis avec soin, et fondus dans une atmosphère filtrée pour écarter les poussières, en outre les premières eaux de fusion étant rejetées pour se débarrasser également des poussières qui auraient pu se mettre à la surface de la glace.

« L'eau obtenue par ce procédé est la plus pure à laquelle on soit arrivé jusqu'ici. Cependant, j'hésiterais encore à la déclarer absolument pure. Quand le faisceau lumineux la traverse, sa trace n'est pas invisible; elle est du bleu le plus pur et le plus délicat. Ce bleu est plus pur que celui du ciel, de sorte que les particules qui le produisent doivent être plus fines que celles qui composent le ciel. Si on le regarde perpendiculairement à la direction du faisceau, en se servant d'un prisme de Nicol, le bleu est complètement éteint. On peut soutenir, et l'on a en effet soutenu, que ce bleu est renvoyé par les molécules mêmes de l'eau, et non par des matières qui y sont en suspension. Mais si nous nous rappelons que l'on n'arrive que graduellement à ce bleu si parfait, et après avoir passé par plusieurs nuances qui le sont moins; si nous nous rappelons qu'un bleu absolument identique peut être produit par des particules matérielles en suspension dans l'eau, nous hésiterons à déclarer que nous ayons atteint ici le dernier degré de pureté. Nous devons, au contraire, conclure de cette expérience que, s'il était possible d'obtenir une eau encore plus pure, cette dernière trace de bleu si délicate disparaîtrait elle-même. »

Il y a plusieurs remarques à faire sur cet ensemble de théories. — Il faut noter, en premier lieu, que les matières en suspension ne sont pas seules appelées en cause, mais qu'une partie au moins de l'effet est attribué « à la réflexion que subit la lumière à la surface des couches d'inégale densité ». C'est une idée que nous allons retrouver dans le dernier travail que nous aurons à mentionner, une communication de M. W. Spring de 1896. — Ensuite, si pour les particules réfléchissantes de l'atmosphère, la nature de la substance se trouve déterminée par une hypothèse très plausible appuyée d'expériences (nuage nais-

sant), il n'en est pas de même des particules en suspension dans l'eau. — Enfin le bleu de Tyndall et le bleu de Bunsen ne sont pas du tout la même chose et sont même tout à fait différents. Le premier est de la couleur réfléchie, polarisée par réflexion et qui s'éteint par le Nicol ; pour le voir, il faut regarder le tube perpendiculairement au rayon lumineux ; le bleu de Bunsen est de la lumière transmise, qui ne peut pas être polarisée ni s'éteindre par le Nicol et qui se voit dans le grand axe du tube et dans la direction même du faisceau lumineux. Il en résulte que Tyndall ne nous donne en réalité aucun renseignement sur la couleur vraie intrinsèque de l'eau ; tout ce qu'il dit se rapporte à la dispersion *latérale* de la lumière et l'on ne comprendrait pas qu'il n'ait pas songé à regarder par transmission, si l'on ne savait qu'il travaillait généralement avec des ballons et, sous cette faible épaisseur, le bleu propre de l'eau est trop peu sensible.

Ainsi, nous voilà en présence de deux explications, l'une chimique, l'autre physique. Mais dans les questions scientifiques, ce n'est pas le cas de dire qu'abondance de biens ne nuit guère ; la coexistence de deux explications non superposables est une preuve certaine qu'il y a erreur dans l'une d'elles, peut-être dans toutes deux, ou tout au moins qu'il y a encore des facteurs inconnus.

Appuyée par l'autorité d'un grand nom, étayée sur des expériences qui tenaient de la magie, exposée avec tous les charmes d'un maître styliste, la théorie de Tyndall sur la coloration de l'atmosphère a été rapidement acceptée ; et son extension à la couleur de l'eau a partagé cette heureuse fortune. Les quelques observations ultérieures de chimistes semblent plutôt compliquer la question, car VICTOR MEYER, et BOAS (1882) trouvent que l'eau est verte, et les études spectroscopiques du père SECCHI, le célèbre astronome du Collège romain, avaient montré dans la lumière transmise par l'eau, l'absence du rouge et du jaune. Ces assertions étaient plus ou moins en contradiction avec les expériences de Bunsen.

La question était d'autant plus difficile à débrouiller, qu'elle se trouvait placée pour ainsi dire à cheval sur la chimie et la physique et que par conséquent, pour l'attaquer à nouveau et avec succès, il fallait une connaissance approfondie de ces deux sciences. Cette condition s'est trouvée heureusement remplie dans la personne de M. W. SPRING, bien connu par des travaux importants de chimie pure et par de belles recherches physico-chimiques sur les effets de forte pression sur les solides pulvérulents.

Il commence par faire remarquer que le caractère fondamental de

toute connaissance certaine, la permanence, ne se retrouve pas dans les résultats des divers auteurs ; et pour en avoir le cœur net, il a recommencé les expériences.

« J'ai rempli deux tubes de 5 mètres de long et 4 centimètres environ de diamètre intérieur, d'eau distillée, préparée pour les usages courants du laboratoire. La première fois, cette eau était d'un vert clair reproduisant assez bien la teinte d'une solution étendue de sulfate ferreux. Quelques jours après, les tubes furent remplis d'eau fraîchement distillée. On put observer, cette fois-ci, une teinte bleu-céleste assez pure, mais après 70 heures de séjour environ dans les tubes, cette eau était devenue aussi verte que la première sans perdre rien cependant de sa limpidité (1). »

Conclusion : l'eau distillée des laboratoires est loin d'être pure ; elle renferme des substances qui subissent des changements avec le temps, puisqu'une eau bleue devient verte.

Mais quand on ajoute une petite quantité de bichlorure de mercure (sublimé corrosif) ce verdissement ne se produit pas. Il y a même plus : de l'eau déjà verdie retourne lentement et plus ou moins au bleu. En présence de ces faits, M. Spring estime « qu'il n'est pas impossible » que les matières fussent de nature organisée et vivante. Je crois qu'on pourrait aisément aller un peu plus loin et attacher plus de poids à ces faits curieux. Il eût été intéressant de suivre les variations de la couleur par des analyses bactériologiques.

C'était le moment de rappeler des constatations de STAS en 1860 et 1865. L'eau, distillée même avec soin, évaporée après quelques jours, laisse un résidu jaunâtre se brûlant complètement au rouge ; avec de l'eau distillée fraîche, on obtient encore le résidu, mais à condition d'ajouter un peu d'acide nitrique ou chlorhydrique. Stas en conclut que l'eau distillée contient des matières organiques volatiles, qui au bout d'un certain temps, deviennent spontanément fixes et qui le deviennent instantanément sous l'influence des deux acides nommés (2). Il a alors distillé de l'eau en faisant passer la vapeur dans un tube avec de l'oxyde de cuivre chauffé et en employant un réfrigérant en platine.

En 1865, il a donné une autre méthode plus facile à appliquer ; elle

(1) *La couleur des eaux*. — Bulletin de l'Académie royale de Belgique, 3^e série, tome IV, n^o 1, 1883.

Sur l'origine des phénomènes de coloration de l'eau de la mer et de l'eau des lacs. — Ibid., tome XII, 1886, p. 814.

(2) J. S. STAS, *Œuvres complètes*, tome I, p. 320.

consiste à distiller l'eau avec un mélange de manganate et de permanganate de potasse fortement alcalin (c'est à peu près le procédé de Wanklyn) ; les traces d'ammoniaque qui peuvent rester (ou qui se forment par la destruction même des matières organiques azotées) peuvent être retenues par une deuxième distillation avec du sulfate monosodique.

« On voit comment ces faits s'adaptent aux observations que j'ai pu » faire, dit M. Spring. Si longtemps que l'eau distillée renferme ces » matières organiques dissoutes et à l'état volatil, comme le dit notre » confrère, l'eau est bleue par transmission de la lumière, mais à » mesure que ces matières s'organisent par la vie, qu'elles deviennent » fixes, l'eau paraît de plus en plus verte. »

Voilà donc un fait d'ordre biologique, qui vient confirmer les vues de Tyndall ; la couleur verte de l'eau résulterait de particules en suspension ; mais nous avons un renseignement positif sur la nature de ces particules. D'un autre côté, et contrairement à l'opinion de Tyndall, l'eau distillée pure est bleue et non pas incolore et ce bleu ne provient pas de particules, il est intrinsèque.

Cela a été démontré à suffisance de preuve par toute une série de constatations. De l'eau distillée purissime, qui ne laissait pas la moindre trace dans une capsule de platine polie comme un miroir, et dont on ne pourrait affirmer qu'elle contient encore des particules « sans faire du mysticisme scientifique », était d'un bleu intense, que M. Spring dépeint en termes enthousiastes. Cette eau ne diffusait plus de lumière latérale. Un liquide incolore sous 5 mètres, le seul, l'alcool amylique, agité dans l'air du laboratoire pour lui faire absorber des poussières de toute nature ne devient pas bleu pour cela.

La théorie de Tyndall ne sort donc pas indemne de cette critique expérimentale. La théorie chimique de Wittstein subit un sort analogue. M. Spring fait d'abord remarquer que l'obtention d'un résidu *brun* ne permet pas de dire que l'eau contient en solution une substance de cette couleur, car cette teinte foncée peut être le résultat de l'action de la chaleur. En outre, quand on se reporte aux analyses mêmes de Wittstein, on constate non sans un certain étonnement qu'elles sont loin de corroborer les conclusions qu'il en a tirées ; il n'a pas fait d'analyse d'une eau franchement bleue ; la couleur des eaux naturelles n'est en rapport direct, ni avec la quantité de matières organiques, ni avec la quantité d'alcali ; les eaux vertes ne sont pas toujours plus pures que les eaux brunes et l'auteur limite lui-même cette règle aux eaux courantes, sans qu'on voie la raison pour laquelle les eaux

des lacs feraient exception. Il ne reste donc pas grand chose des résultats de Wittstein, si ce n'est que les sels minéraux dissous n'exercent aucune action sur la couleur des eaux.

La voie de l'observation purement chimique se heurte à notre manque de connaissances sur la constitution réelle des substances dissoutes. Les résultats d'une analyse d'eau, tels qu'on les présente d'ordinaire, sont loin d'être uniquement des faits, car on sait que l'on fait un partage hypothétique des diverses bases entre les divers acides. M. Spring a travaillé dans une autre direction, celle de l'expérimentation directe.

De l'eau de chaux très pure est traitée par l'acide carbonique jusqu'à formation d'un précipité à peine visible; dans le tube de 5 mètres, cette eau est noire comme de l'encre. Voilà donc une substance transparente, le carbonate de calcium, qui arrête toute lumière.

En continuant l'action de l'acide carbonique jusqu'à redissolution complète du précipité à l'état de bicarbonate, on voit successivement du brun, du brun-clair, du jaune, du vert, puis du bleu presque pur. On a donc reproduit toutes les nuances que peuvent présenter les eaux naturelles.

Comme contre épreuve, une solution saturée de bicarbonate de calcium et d'acide carbonique dans l'eau pure, verte sous 5 mètres, soumise à l'action du vide qui dissocie le bicarbonate, passe au vert, au jaune, etc., jusqu'à devenir opaque, et une goutte d'acide chlorhydrique ramène au bleu-verdâtre.

Absolument les mêmes résultats ont été obtenus avec de l'eau de baryte, du silicate de sodium et du chlorure d'argent.

Quand, au lieu d'enlever le trouble en dissolvant le précipité par des réactifs chimiques, on se contente d'une décantation, même prolongée, on n'arrive jamais jusqu'au bleu; ces eaux, aussi claires que possible, gardent pourtant une teinte verte. C'est de ce fait que M. Spring fournit une explication très ingénieuse. Dans ces conditions, il est clair qu'on a une solution *saturée*; c'est la seule différence avec la série précédente, où par suite de l'emploi de substances chimiques pour redissoudre le précipité, on est loin de la saturation.

Des solutions assez concentrées de divers sels ont été essayées. Le chlorure de calcium est d'un beau jaune verdâtre, mais par dilution avec de l'eau pure, le vert s'accroît; le chlorure de magnésium est jaune d'or très pur, — le chlorure de sodium, vert de chrome magnifique — le bromure de potassium, d'un beau vert émeraude:

« La couleur jaune produite par une solution d'un sel, dépend moins de la quantité de sel dissous que du voisinage immédiat du sel

de son point de solidification; de petites quantités de sel peu soluble produisant le même effet que de grandes quantités d'un corps plus soluble.

... J'ai fait bouillir quelque temps de l'eau distillée, pure et bleue, dans un vase en verre. On sait que le verre est peu soluble dans l'eau. »

Après deux jours de repos, cette eau était verte et demeura telle.

C'est là certainement une belle série; chaque étape du raisonnement est appuyée par des expériences probantes et heureusement choisies, telle que l'action de l'eau sur le verre, comme exemple d'un corps peu soluble. Mais la conclusion est également remarquable et nous transporte en plein dans le domaine de la physique moléculaire.

La résistance opposée au passage de la lumière et la dégradation ou plus exactement la transformation de la couleur par des particules solides se manifeste déjà avec les solutions saturées; celles-ci font le même effet que le nuage naissant de Tyndall et M. Spring les appelle un *précipité naissant*.

On connaît le rôle important que jouent aujourd'hui les solutions dans la physico-chimie : la conductibilité électrique, la tension superficielle, la cryoscopie, la pression osmotique, etc., nous permettent de nous faire une idée des molécules; la formule fondamentale de Mariotte, avec les corrections de Budde pour la grandeur des molécules et de van der Waals pour leur attraction réciproque, régit tous ces phénomènes; le corps dissous se comporte comme un gaz. Mais cela n'est vrai que pour des solutions *diluées*. L'idée du précipité naissant est peut-être l'explication de l'allure aberrante des solutions plus concentrées. Les expériences montrant une gradation régulière des phénomènes de coloration, il ne serait pas illégitime d'en conclure provisoirement que ce passage à l'état semi-dissous est graduel aussi, et ce serait une nouvelle preuve de la continuité de l'état solide et de l'état liquide, que précisément les travaux de M. Spring sur les solides sous forte pression n'ont pas peu contribué à établir. Envisagées sous ce point de vue, les expériences sur la couleur des solutions ouvrent un vaste champ de recherches, encore inexploré.

Elles mettent également hors de conteste l'exactitude, et de l'affirmation de Bunsen sur la couleur bleue de l'eau et du principe fondamental de Tyndall sur l'influence des parties ultra microscopiques en suspension. Il nous reste à voir comment ces deux principes s'appliquent aux teintes si dissemblables des diverses eaux naturelles.

Les expériences avec l'eau chargée de bicarbonate de calcium sont sous ce rapport extrêmement intéressantes; on reproduit toutes les

nuances du brun au bleu en amenant une dissolution de plus en plus parfaite par un excès d'acide carbonique. Or, en se rapportant aux chiffres de Sainte-Claire Deville en 1848, M. Spring trouve que pour la même quantité de calcaire, les eaux bleues du Rhône, à Genève, renferment près du double (exactement 1,80) d'anhydride carbonique que les eaux vertes du Rhin. Le lac d'Achen dont les eaux sont d'un bleu foncé dans les endroits profonds, est du plus beau vert de chrome sur son bord septentrional, où la berge est calcaire.

Il est probable que tous les autres acides interviennent pour jouer le même rôle et maintenir en complète dissolution les sels. Walter et Gaertner (page 11) mentionnent quelques analyses très incomplètes, il est vrai, où les métaux alcalins ne sont pas dosés, mais dont les chiffres sont pourtant très frappants; le Rhin à Cologne est jaune verdâtre, le lac de Zurich est vert bleuâtre et le lac de Genève est bleu pur; les analyses donnent :

	Rhin.	Zurich,	Genève.
Chaux et Magnésie	08 ^r .0954	08 ^r .0666	08 ^r .0538
Acide sulfurique	0 .0196	0 .0092	0 .0381
Chlore	0 .0025		0 .0052
Bases pour 1 d'acide	4 .31	7 .24	1 .24
Acide « « de base	0 .232	0 .138	0 .806

Voici l'explication physique proposée par M. Spring : l'expérience prouve qu'une eau, trouble au point de paraître absolument noire dans le tube de cinq mètres, peut par *dilution* passer au rouge, jaune, vert et bleu; ces changements optiques sont indépendants de la nature chimique des matières en suspension; la craie, l'argile, la silice, donnent les mêmes résultats. L'état solide ou liquide est même indifférent, car une très faible émulsion d'alcool amylique agit de même. Dans tous ces cas, si, au lieu de voir à travers le tube selon son axe longitudinal, on le regarde tout à fait de côté, transversalement, on observe une lumière bleuâtre. Ainsi un milieu légèrement trouble, est rouge ou jaune par transmission et bleuâtre par réflexion latérale ou diffusion. Le vert résulte du mélange de ces deux couleurs et les diverses nuances du vert de leurs proportions relatives. On voit que les choses ne sont pas tout à fait aussi simples qu'on pourrait se l'imaginer au premier abord, et si l'on voulait suivre M. Spring dans la discussion minutieuse et détaillée qu'il donne du cas des eaux vertes, ce serait bien plus compliqué encore; mais il suffit d'indiquer les grandes lignes.

Si l'on tient compte du fait que l'eau très pure est bleue de fonda-

tion, l'azur de l'océan et de certains lacs ne semble pas avoir besoin d'autre explication. Mais en y réfléchissant de plus près, on trouve que cette conclusion est erronée. En effet, une eau optiquement vide, c'est-à-dire sans particules en suspension, ne réfléchirait pas de lumière du tout et paraîtrait noire comme de l'encre. Il faut donc que les eaux bleues renferment cependant encore quelque chose ; si ces particules sont relativement nombreuses, un rayon de lumière incident fera peu de chemin dans l'eau avant de rencontrer dans la suite de ses réflexions la particule qui le rejette au dehors. Le bleu sera donc peu saturé et comme lavé de blanc. Dans le cas contraire, le rayon parcourra un chemin plus long dans l'eau et l'effet sera le même que si l'observateur examinait une colonne d'eau plus grande, le bleu sera plus saturé, plus foncé même.

Entre les eaux vertes et les eaux bleues il y a une grande différence dans le rôle de la diffusion latérale, pour produire la couleur résultante. Dans les dernières, le bleu de diffusion s'ajoute au bleu de fondation propre à l'eau, et s'il peut en résulter une variation de nuance en rendant le bleu plus foncé, il n'y a pas de modification de teinte ; mais pour les eaux vertes, le bleu de diffusion a un rôle essentiel, car c'est lui qui fait virer au vert la couleur jaune que montrent toutes ces eaux par transmission.

La cause de toutes ces différences est donc la quantité plus ou moins grande des particules en suspension, le minimum devant se trouver dans les eaux les plus bleues. Si cela est vrai, ces eaux doivent également réfléchir moins de lumière. C'est en effet ce que M. Spring a vérifié au moyen d'un photomètre très simple mais très ingénieux : un tube de septante centimètres de long, fermé par une glace plongée dans l'eau et contenant dans son intérieur un photomètre de Bunsen (papier avec une tache transparente) ; au-dessus du papier une fenêtre à coulisse, ce qui permettait de faire varier la quantité de lumière tombant d'en haut sur le papier. M. Spring a promené ce tube, en guise d'alpenstock, un peu par toute la Suisse, le plongeant dans différents lacs, un bleu (lac de Kander), un vert (Lucerne) et un vert-jaunâtre (Brienz). Si l'on pose la lumière du lac bleu égale à l'unité, on obtient le rapport 1 : 1,04 : 1,272.

Tout cela est parfait, mais j'avouerai qu'il me restait cependant un sentiment de gêne. Il n'y aurait donc pas d'eau optiquement vide ; partout des poussières ou des précipités naissants. Ce qui m'a surtout frappé, c'est qu'en agitant de l'alcool amylique pur dans l'air du laboratoire, en « maltraitant » le liquide, comme le dit M. Spring, pas la

moindre trace de bleu n'apparaît (l'alcool amylique est le seul liquide absolument incolore sous 5 mètres).

C'est là la difficulté qui vient d'être résolue dans le dernier travail (1). Le tube de 5 mètres a été quelque peu allongé, il a été porté à 26 mètres! Pour éviter l'emploi d'une masse de liquide trop grande, le diamètre intérieur a été réduit à 15 millimètres. Seulement pour un diamètre si restreint et une longueur si grande, se présenta alors la difficulté de juxtaposer bien dans l'axe les tronçons de deux mètres de long, une erreur de 0.6 millimètres dans le placement du premier tronçon ayant pour effet d'obturer le rayon visuel; or, les verreries ne peuvent pas travailler avec ce degré de précision; chaque tube a donc été muni de vis de pression et courbé de force dans la position convenable; ce travail préliminaire a pris six semaines.

Avec cet appareil, la lumière d'un jour nuageux en passe pas; mais avec un ciel serein ou, mieux encore, avec un bec Auer, l'eau est d'un bleu foncé très pur et avec une lunette astronomique on distinguait très nettement un réticule de deux fils fins.

L'attention a surtout porté dans cette série d'expériences sur l'illumination de l'eau, c'est-à-dire la lumière que l'on peut observer latéralement et qui provient de la diffusion; cette illumination n'a été sensible que sur une profondeur de 2 mètres à partir de la source lumineuse, mais elle était parfois si intense que si elle avait été due véritablement à des corpuscules, l'eau n'eût pu présenter le degré de transparence dont elle jouissait. Il fallait donc chercher une autre cause.

Cette cause, M. Spring l'a trouvée dans le défaut d'homogénéité physique de l'eau provoquée par des inégalités de température. Ce qui, chez Tyndall, n'était qu'une supposition, est donc ici un fait d'expérience. Le tube placé dans une salle dont la température était de 4 degrés et rempli d'eau à 16 degrés était complètement opaque; au bout de quelque temps, quand l'équilibre de température était établi, transparence complète.

Ce fait établi quant à sa nature, il s'agissait de passer à l'examen quantitatif et de déterminer la plus petite différence de température capable de produire l'opacité. A cet effet le tube tout entier a été transformé en thermomètre en y soudant normalement un tube de 3 millimètres de diamètre et de 1 mètre de long dans lequel devait se

(1) *Sur le rôle des courants de convection calorifique dans le phénomène de l'illumination des eaux limpides*, par W. SPRING. — Archives des Sciences physiques et naturelles de Genève, 4^e période, tome I, mars 1896.

faire l'expansion du liquide; le calcul montre que pour 1 degré il y avait une course de 53 millimètres, ce qui fait environ un demi-millimètre, variation facilement appréciable, pour 1/100 de degré. Il a été constaté que pour 0,57° de différence de température entre l'eau et le milieu ambiant, l'opacité était complète.

Or, dans la nature, les différences de ce genre doivent être présentes. Un vent sec et chaud a le double effet de refroidir par évaporation et de concentrer la couche supérieure; celle-ci a sa densité augmentée et il se produit des courants de convection. Pour que la réflexion se produise, « la présence de corpuscules solides, dont l'existence n'a d'ailleurs jamais été démontrée dans une eau bleue, n'est pas absolument nécessaire ».

Des détails infimes et aberrants à première vue s'expliquent aisément. Un savant suisse, qui fait du lac de Genève une étude constante, M. Forel, dit que les eaux des lacs d'eau douce sont plus transparentes en hiver qu'en été; pendant cette dernière saison 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 3 à 6 mètres d'eau; en hiver, au contraire, l'eau est généralement assez transparente pour permettre une pêche fructueuse. D'après M. Forel, l'eau de l'été garderait en suspension un nombre plus grand de poussières que l'eau homogène et uniformément dense de l'hiver, ce que j'avoue ne pas saisir parfaitement, et je crois que M. Spring n'a pas été plus heureux que moi, car tout en s'abstenant de formuler aucune objection, il fait ressortir que cette explication n'est pas la seule possible. Cette uniformité de densité pendant l'hiver supprime naturellement les courants de convection et rend le liquide optiquement homogène.

Quoiqu'un travail sur les alcools ne rentre pas dans le cadre de cet article, il serait vraiment dommage de ne pas mentionner la dernière notice de M. Spring (*Sur la couleur des alcools comparée à la couleur de l'eau*, Bull. Acad. Belgique, 3^e sér., t. XXXI, 1896.) Le tube de 26 mètres a été utilisé. L'alcool méthylique s'est montré bleu verdâtre, l'alcool éthylique également, mais de nuance moins chaude, et l'alcool amylique n'est plus incolore, mais jaune verdâtre. Dans ce travail, nous trouvons des tentatives pour déterminer numériquement l'intensité du bleu, ce qui n'avait pas été fait dans les travaux antérieurs; le liquide de comparaison était une solution de chlorure cuivreux à 16, 32 %; les 26 mètres d'eau correspondent à 0^m.314 de la solution cuivrique, l'alcool méthylique à 0.012, l'alcool éthylique à

0.06 et pour l'alcool amylique le test est inapplicable à cause de la teinte jaune verdâtre du liquide.

Au point de vue spectroscopique, l'eau exerce son action surtout sur les extrémités du spectre solaire, tout en affaiblissant l'intensité du jaune. Le même caractère s'observe dans le spectre des alcools, mais l'absorption de la partie la plus réfrangible devient de plus en plus grande à mesure que le chaînon carboné domine davantage, tandis que la diminution du rouge ne fait que des progrès peu sensibles. Les choses paraissent se passer comme si le groupe oxyhydrile (OH) avait pour effet d'absorber l'extrémité rouge du spectre et les chaînons carbonés l'extrémité opposée (le violet et le bleu) en fonction du nombre des atomes de carbone. L'eau H.OH, qui est privée de carbone, laisse passer beaucoup de violet, l'alcool méthylique en laisse passer moins et l'alcool amylique donne la première lueur visible dans le spectroscope, dans le bleu : il n'y a pas de violet. Le rouge reste sensiblement le même chez les quatre corps. Ces observations rendaient intéressant l'examen d'un hydrocarbure, c'est-à-dire d'un corps privé d'oxyhydrile. On a donc rempli le tube de 26 mètres de ligroïne, ce qui correspond à un mélange d'hydrocarbures depuis C^6H^{14} à C^8H^{18} . Ce liquide était *jaune sombre* sans la moindre pointe de vert. Son spectre se composait de trois couleurs seulement : le vert, l'orange et un peu de rouge. Ce résultat corrobore par conséquent les observations faites à l'aide des alcools ; il permet même de dire que les alcools supérieurs à l'étage C^5 comprendront aussi des espèces éteignant complètement le bleu et la lumière solaire.

La résistance comparée de ces divers liquides, c'est-à-dire leur effet d'absorption sur la lumière blanche, a été étudié en déterminant le nombre de plaques de verre enfumé nécessaires pour produire l'opacité complète, tantôt rien qu'avec des plaques, tantôt en employant les plaques et le tube rempli de liquide. Avec les plaques seules il en faut 21 ; avec l'eau il en faut 6, la différence 15 est donc la résistance de 26 mètres d'eau et elles absorbent 99.97 % de la lumière incidente. Il n'y a donc que 3 pour 10,000 de lumière qui arrive à notre œil à travers 26 mètres d'eau, ce qui prouve l'exquise sensibilité de l'œil.

Pour la plupart des chimistes praticiens et des ingénieurs, il ne peut être question de répéter les expériences de M. Spring. Les appareils sont trop encombrants et surtout la préparation d'eau distillée purissime exige un temps dont malheureusement on ne dispose généralement pas. Mais j'ai constaté que cela n'est pas absolument nécessaire. J'ai rempli d'eau distillée ordinaire mais récemment préparée, une très

grande éprouvette (1 mètre de haut sur 9 1/2 centimètres de large), la couleur était bleu d'azur et si nette qu'une personne non prévenue pensait qu'il s'agissait d'une solution très étendue de sulfate de cuivre. Ce qui, d'après moi, donne cette intensité extraordinaire, c'est moins l'épaisseur de la masse liquide normalement traversée par les rayons lumineux, que les réflexions successives qui se font sur les parois de la large éprouvette et qui ont donc traversé dans leur course en zigzag une couche beaucoup plus épaisse. Ce qui le démontre, c'est que lorsqu'on écarte ces rayons latéraux en les absorbant par une couche sombre (un tablier bleu foncé de laboratoire) roulée autour de l'éprouvette de façon à ne plus avoir que les rayons directs, la couleur diminue d'intensité. Le bleu est surtout marqué quand on regarde obliquement d'en haut dans l'éprouvette. Un tube en fer galvanisé comme ceux qu'on emploie pour les canalisations d'eau a été rempli à moitié avec la même eau, puis placé horizontalement; la moitié inférieure occupée par le liquide était bleu indigo très foncé quand on regardait un peu obliquement en haut, de façon à avoir le rayon après ses réflexions successives sur la paroi inférieure et par réflexion totale sur la surface du liquide. Quand le tube était rempli entièrement, la couleur était bien moins vive dans le tube de 5 mètres que dans l'éprouvette de 1 mètre.

Tout ce qui précède s'applique, soit à l'eau de la mer, soit aux eaux douces d'une grande pureté. Dans les deux cas, au point de vue pratique, l'ingénieur ou le chimiste n'auront que rarement l'occasion de tirer profit des faits et théories que nous venons d'établir. A part quelques essais d'arrosage de la voie publique, sur les résultats desquels (surtout pour la végétation) on n'est pas encore définitivement fixé, l'eau de mer n'est pas employée; il est bien question d'amener à Londres de l'eau de mer en grande quantité pour l'arrosage et le rinçage des égouts, mais l'affaire n'est encore qu'à l'état de projet assez vague; et en tout cas, on se préoccuperait fort peu, pour de pareils emplois, de la transparence et de la couleur émeraude ou bleu d'azur de cette eau. D'un autre côté, quand une distribution d'eau potable est alimentée par des sources captées à leur émergence, on estime qu'un contrôle régulier et permanent n'est pas nécessaire, car, en général, la composition de ces eaux est assez constante et d'ailleurs, on ne peut rien y faire; on ne va donc pas s'amuser à regarder la couleur.

Il en est autrement quand, par nécessité, il a fallu prendre une eau de rivière, ouverte à des causes de pollution et qu'il faut traiter par un mode quelconque de purification. Le plus souvent, ces eaux charrient des matières en suspension et à travers un tube de 5 mètres, et même moins, la lumière ne passe pas du tout; mais pour l'eau purifiée,

l'examen de la transparence et jusqu'à un certain point, celui de la couleur, a de nouveau de l'importance.

Une catégorie nombreuse et importante d'eaux naturelles, sont les eaux brunes ou noires. Tout le monde admet qu'il y a là un phénomène de coloration dû à une substance dissoute et l'accord existe, aussi général, sur l'origine végétale de cette matière. On doit rattacher à cette catégorie les eaux jaunes, pour autant que le jaune ne soit pas dû à du limon ou à de l'oxyde de fer, ce qui du reste les rend opaques. L'assimilation des eaux jaunes *transparentes* avec les eaux brunes ou noires, également très limpides, est justifiée entre autres par le fait qu'une solution de caramel d'un brun noir épais, convenablement diluée, finit par donner une eau jaune.

On rencontre des eaux de ce genre assez fréquemment en Hollande, provenant des polders ou de régions tourbeuses. L'eau utilisée pour la distribution de la ville de Gouda, par exemple, est comme de l'eau avec du cognac, très nettement teintée, même dans un verre à boire ordinaire. Leur caractère chimique le plus frappant est leur titre très élevé d'oxydabilité ; traitées par le permanganate de potasse en solution acide, elles consomment par litre environ gr. 0.050 de KMnO_4 , correspondant à gr. 0.250 de matières organiques. La couleur est très persistante et le filtrage au sable ne l'enlève pas complètement ; l'alun a ici un effet très marqué ; mais on en exagère l'emploi pour réduire le titre d'oxydabilité au-dessous d'une certaine limite, prescrite par le cahier des charges ou l'acte de concession de l'entreprise. Le seul résultat utile est de grever le budget de la Société exploitante. Chose curieuse, dans toutes les villes où l'exploitation a lieu en régie, on ne se paye pas cette fantaisie et l'hygiène publique ne s'en trouve pas plus mal.

Les eaux noires des rivières équatoriales de l'Amérique du Sud ont donné lieu à quelques observations intéressantes, se rapportant à des affluents de l'Orénoque et de l'Amazone. Ces eaux sont claires et limpides, mais d'une teinte nettement foncée ; elles contiennent une forte proportion de matières organiques, et pourtant, elles sont, beaucoup moins que les eaux blanches ordinaires, sujettes à se corrompre ; chose curieuse, les roches sur lesquelles coulent ces eaux noires gardent leur couleur naturelle, tandis que les eaux blanches au contraire forment des dépôts colorés sur les bords. D'après Muntz et Marcano (1), voici quelle serait l'explication de toutes ces anomalies : ces eaux noires

(1) *Académie des Sciences de Paris*, 3 décembre 1888.

contiennent des acides humiques provenant de la décomposition des matières végétales; dans les districts granitiques, cette acidité n'est pas neutralisée par du calcaire et, dans ces conditions, la destruction des matières organiques par les organismes nitrificateurs ne peut pas se produire; il y a en effet absence de nitrates dans ces eaux. De là, en outre, la permanence de cette coloration. L'acidité maintient en dissolution le fer et le manganèse, et il ne se forme pas de dépôt sur les roches. Quand ces eaux noires se mélangent avec des eaux ordinaires, contenant du calcaire, la matière organique est rapidement détruite.

Nous venons d'employer le terme « acides humiques ». Au lieu des expressions vagues de matières organiques d'origine végétale, produits de la tourbe, etc., nous avons donc ici une dénomination chimique. Malheureusement, elle est au pluriel; et si nous examinons de plus près, nous constatons que la précision n'est qu'apparente, qu'elle est toute en surface et que l'on sait encore fort peu de choses sur ces matières.

Quand on traite par une solution diluée de potasse ou de soude, la terre végétale ou *humus*, on obtient une liqueur très foncée, dans laquelle un acide précipite des matières floconneuses; ce mode de préparation permet de soupçonner que le précipité est de nature acide, ce que confirme l'action sur le tournesol du produit convenablement lavé. La substance acide en question forme des sels solubles avec les bases alcalines, insolubles avec les autres, notamment avec la chaux. Le phénomène observé par Muntz et Marcagno, de l'enlèvement rapide de la couleur brune par l'intervention d'eaux calcaires et attribué par eux à une action nitrifiante rapide, rendue possible par la saturation des acides humiques, n'est pas nécessairement si compliqué et il n'y a probablement qu'une simple précipitation chimique. Berzelius (1) dit que par la réaction entre un humate ammoniacal et un sel alcalino-terreux soluble, il se produit un précipité qu'on peut séparer par filtration. M. C. Klement (2) a serré la question de plus près en opérant sur des eaux brunes naturelles avec du spath d'Irlande finement pulvérisé: il a obtenu une décoloration rapide.

Toute connaissance au sujet de la nature chimique d'un corps, doit pouvoir se traduire par une formule; et si la connaissance est suffisante, la formule sera ce qu'on nomme une formule « développée », dans laquelle la situation respective et les rapports de tous les atomes composant la molécule sont indiqués.

(1) *Lehrbuch der Chemie*, 1839, vol. 8, page 390.

(2) *Les puits artésiens de Willebroeck. — Mémoires de la Société belge de Géologie, de Paléontologie et d'Hydrologie*, 1889, tome III, page 259.

Nous sommes encore loin de compte pour les matières humiques; leur composition élémentaire n'est même pas définitivement fixée et il y a encore des doutes sur le rôle de l'azote, que les uns considèrent comme faisant partie intégrante de la molécule, d'autres comme simplement ammoniacal, et enfin qui, dans certains cas, pourrait simplement avoir été absorbé dans l'atmosphère et maintenu par adhésion, par une action analogue à celle du noir de platine. On n'est d'accord que sur un seul point : le très grand nombre de ces substances ne différant entre elles que par des caractères de minime importance; celles qui renferment l'hydrogène et l'oxygène dans les proportions de l'eau ($C^mH_{2^n}O^n$) sont désignées comme *acides humiques*; quand il y a un excès d'hydrogène, on a des *acides ulmiques* et pour un excès d'oxygène des *acides géiques*; les substances qui n'ont pas de propriétés acides et qui restent comme résidu du traitement de l'humus par la lessive de soude sont désignées comme *humine* et *ulmine* (1). Mais ce sont des catégories de substances, comme on dit les alcools, les graisses, les résines.

Deux acides méritent une mention particulière, les acides *crénique* et *apocrénique* (2). Ils ont été trouvés il y a cinquante ans par Berzelius, dans une eau minérale de la Suède, à Porla. En sursaturant la lessive de soude dans laquelle le résidu solide a digéré, par de l'acide acétique et ajoutant de l'acétate de cuivre, on précipite l'apocrénate; en neutralisant le liquide filtré par du carbonate d'ammoniaque et traitant de nouveau par de l'acétate de cuivre, on obtient le crénate. Pour Berzélius, les deux substances étaient azotées, mais pour Mulder elles sont ternaires, et très oxygénées, surtout l'acide apocrénique; elles rentreraient donc dans la catégorie des acides géiques.

Toutes ces substances sont assez souvent mentionnées dans les rapports sur les analyses d'eau; mais cela ne veut pas dire que chaque fois on les a séparées et dosées ou même simplement recherchées. C'est un travail qui sort tout à fait de la pratique courante des analyses.

Une très honorable exception est le mémoire de M. C. Klement, déjà cité. L'eau du puits artésien de l'établissement de Naeyer, à Willebroeck, donne par calcination du résidu solide, une perte de gr. 0.0244, que l'on peut considérer comme matières organiques, grâce à la composition de cette eau et aux précautions spéciales de l'analyse; mais par la méthode au permanganate de potasse de Kubel et en multipliant par le coefficient 5, (1 partie de $KMnO_4$

(1) *Humus*, terre végétale. *Ulmus*, orme, une de ces substances ayant été trouvée d'abord dans ce bois décomposé. *Géique*, du grec *gé*, terre.

(2) Du grec *crene*, source.

étant censée détruire 5 parties de matières organiques), on trouve gr. 0.169, soit *sept* fois trop. Pour passer du permanganate aux matières organiques, il aurait donc fallu, au lieu de multiplier par 5, multiplier par environ 0.7, c'est-à-dire retrancher 30 %. On comprend que M. Klement dénie toute valeur scientifique aux indications d'un procédé aussi peu constant.

La répartition du permanganate entre les diverses matières oxydables de l'eau n'est pas moins intéressante; l'eau traitée par les acides minéraux dépose après quelque temps un précipité brun d'acide apocrénique, de 0.008 à 0.009 gr. par litre et ne consomme plus alors que 0.0101 gr. de permanganate au lieu de 0.0338; c'est-à-dire que les 0.008 gr. d'acide apocrénique prennent à eux seuls 0.0237 gr. de permanganate. Il en résulte qu'une partie des premières matières organiques correspond à 0.429 de permanganate, et une d'acide apocrénique à 2.96.

Les travaux les plus importants sur l'origine de la couleur des eaux brunes nous viennent d'Amérique. Le Bureau d'hygiène de l'État du Massachusetts et la ville de Boston peuvent être cités comme exemples à tous les peuples. Pour n'importe quelle question d'eau, celui qui n'a pas lu leurs publications ne peut pas se dire au courant.

Comme résultat final, d'une longue série d'analyses de presque toutes les eaux de l'État, le chimiste du Bureau, M. T. Drown, dit que la couleur des eaux superficielles provient presque toujours de matières végétales, feuilles, herbages et tourbe. Les eaux qui ont longtemps séjourné dans les marais ou les tourbières ont une couleur jaune brun très foncé. Ces eaux donnent en général peu d'ammoniaque libre mais beaucoup d'ammoniaque albuminoïde; ce qui démontre que cet ammoniaque albuminoïde provient de la décomposition de la matière colorante, c'est d'abord le fait général, auquel il y a toutefois de nombreuses exceptions, que, toutes choses égales d'ailleurs, la quantité de cet ammoniaque albuminoïde est proportionnelle à la couleur et ensuite que environ les $\frac{4}{5}$ de cet ammoniaque sont enlevés par de l'alumine précipitée, qui entraîne la matière colorante à l'état de laque et clarifie d'une manière remarquable les eaux les plus foncées.

Des expériences très intéressantes ont été faites en traitant des feuilles d'automne avec de l'eau distillée. La première extraction donne un liquide plutôt jaune et très riche en matières albuminoïdes (0.494 mgr. par litre); les extraits subséquents, pour une même intensité de teinte, donnent beaucoup moins (0.174 mgr. pour le deuxième extrait, 0.072 après des extraits répétés); la couleur de ces trois eaux,

exprimée en cc. d'ammoniaque nesslerisée était respectivement 0.8 — 0.8 — 0.9. Il y aurait utilité à compléter ces études et notamment à comparer la couleur de ces extraits aqueux, condensés au besoin par évaporation, avec les réactions chimiques et spectroscopiques bien connues de la chlorophylle. Des faits botaniques et des résultats des analyses ci-dessus, il me semble que les faits sont à peu près comme suit : la phylloxanthine (la partie jaune de la chlorophylle) est plus stable que la phyllocyanine (la partie bleue) ; voilà pourquoi les feuilles jauniraient à l'obscurité et à l'automne, par destruction ou modification de la cyanine. L'eau dissoudrait plus facilement la phylloxanthine, qui passerait dans les premiers extraits, et moins modifiée, ayant conservé sa structure chimique albuminoïde, donnerait beaucoup d'ammoniaque albuminoïde. Les extractions subséquentes agiraient surtout sur les produits de décomposition de la phyllocyanine et sur les matières humiques en lesquelles le ligneux de la feuille se transforme. Il y aurait là, pour un chimiste qui aurait le temps et une certaine connaissance de la botanique, un travail intéressant à faire.

La couleur des eaux peut donc varier avec l'âge des feuilles mortes, c'est-à-dire avec l'avancement de la saison ; la nature différente des feuilles suivant l'essence végétale a aussi, paraît-il, une influence. De la vieille tourbe donne énormément de couleur, mais pas plus d'ammoniaque albuminoïde que des feuilles fraîches ; une eau d'extraction d'une couleur 2.0 ne donnait en effet que 0.516 mgr. d'ammoniaque.

D'autres causes encore interviennent pour produire des variations saisonnières et comme les conditions ne sont pas partout les mêmes, ces variations peuvent différer d'un bassin à l'autre, tant au point de vue de l'intensité que des époques.

Ainsi, pour une des eaux de Boston, le maximum de couleur est en juin, puis il y a diminution rapide jusqu'en septembre ; vers la fin d'octobre la couleur se fonce de nouveau et il y a un deuxième maximum en décembre, mais moins marqué que celui de juin ; le deuxième minimum, égal à celui d'octobre, se produit vers la mi-mars.

Voici l'explication que donne M. Fitz Gerald, ingénieur à Boston : au printemps, tous les marécages ont leur maximum d'eau et c'est par dilution que la couleur est diminuée ; le débit diminue graduellement, et c'est vers juin que les étangs d'amont fournissent leurs dernières eaux à la rivière, qui n'est plus alors alimentée que par ses sources, plus claires ; avec les pluies d'automne, les étangs se rattachent de nouveau au régime général du bassin et la couleur augmente. De fortes pluies estivales ont temporairement le même effet.

Ce n'est pas seulement l'intensité qui varie, mais la nature même de la teinte. En automne, les eaux sont plutôt vertes; c'est l'action des feuilles fraîchement tombées; en juin, la teinte vire au rouge-brun, sous l'influence des dernières eaux fournies par la vieille tourbe.

Dans ce premier cas, il s'agissait d'un cours d'eau; pour un lac, le lac Cochituate, les maxima de coloration sont en avril et en novembre. Par suite de la glace qui se forme et qui empêche l'action décolorante du soleil, la couleur va en augmentant jusqu'en avril. La glace disparaît alors et la couleur décroît. Le maximum de novembre serait dû aux courants de convection par suite du changement de température, courants verticaux qui mettent en mouvement, pour les porter à la surface les eaux du fond, de nature ferrugineuse.

Dans les réservoirs servant à l'alimentation des villes ou dans les lacs constitués par le barrage d'une vallée et suffisamment profonds pour qu'il n'y ait pas trop de végétation, on observe une certaine diminution de la couleur; les divers réservoirs de Boston ont été très soigneusement étudiés sous ce rapport; leurs dimensions étant très différentes, la durée de séjour de l'eau varie de l'un à l'autre de 15 jours à 8 1/2 mois. Il a été reconnu que pour moins de 3 mois, l'amélioration est si faible qu'elle est pratiquement négligeable; plus tard, elle semble proportionnelle, à la fois au temps et à l'intensité de la coloration primitive.

Les causes de cette amélioration sont l'action du soleil, qui agirait comme dans le blanchissage du linge, et l'activité vitale des algues inférieures. De cette dernière assertion, il est donné une démonstration assez originale par ce qu'on appelle l'ammoniaque albuminoïde en suspension, distingué de l'ammoniaque albuminoïde dissous ordinaire; c'est la différence entre deux déterminations, avant et après un filtrage au papier, différences provenant des particules en suspension, généralement des algues et d'autres micro-organismes. L'emmagasinement, le *storage* pour employer le mot anglais, a toujours pour effet d'augmenter cet ammoniaque en suspension, ce qui indique un développement des organismes. Il est vrai que cette raison n'est pas péremptoire, car il peut y avoir là une simple coïncidence; mais la concordance va jusque dans les détails. Ainsi, des cinq réservoirs de Boston, celui qui donne de loin la plus grande amélioration de la couleur (1.87 réduit à 0.8g) ne vient qu'en troisième ligne pour la durée du *storage* (trois, quatre mois), mais en première ligne, et pour l'intensité de coloration des eaux qu'il reçoit et pour l'accroissement d'ammoniaque albuminoïde en suspension (de 0.024 mgr. à l'entrée

contre 0.169 dans le réservoir). La décoloration est surtout active pendant les mois d'été; elle montre un maximum très marqué en juin et diminue ensuite régulièrement; les deux actions, l'influence chimique directe des rayons solaires et la pullulation des micro-organismes ont certainement leur optimum à cette époque.

Ainsi, nous trouvons comme causes agissantes de la couleur : la végétation (chute des feuilles), l'action du soleil et de l'air, l'évaporation et les pluies, la glace, les changements de température et les courants de convection qu'ils déterminent, la composition chimique du sol, l'action vitale des algues inférieures. Et il serait téméraire d'affirmer que la liste est complète, que nous connaissons les diverses combinaisons possibles de ces causes multiples et la part proportionnelle revenant à chacune d'elles. Même dans les cas les mieux étudiés, nous ne pouvons prétendre avoir pénétré la formidable complexité du plus vulgaire phénomène naturel et nos conclusions les plus solidement étayées n'ont que la valeur d'un schéma grossier.

La pullulation des organismes semble être la cause la plus active, mais pas trop n'en faut, car de l'accumulation de ces algues mortes et de leur décomposition rapide, il peut résulter un mauvais goût. On a remarqué en Amérique que ce sont les eaux les plus foncées qui y sont sujettes. Au commencement de juillet de 1896, un des fossés de l'enceinte d'Anvers a été ainsi infecté par des algues de la famille des Nostochinées, le genre *Anabaena*; l'eau était recouverte d'une épaisse couche vert-bleuâtre clair, comme de la peinture à l'huile qui aurait été versée et qui surnagerait en se desséchant à moitié et devenant une membrane plissée et poisseuse. Les occupants de quelques logements militaires à proximité se plaignaient de la mauvaise odeur.

Ces matières végétales brunes qui colorent les eaux sont très facilement décomposées par le permanganate de potasse, comme le prouve la grande quantité d'ammoniaque albuminoïde qu'elles dégagent avec le procédé d'analyse de Wanklyn. Ceci démontre en même temps toute l'exagération des vues de ce chimiste quand il considère l'ammoniaque albuminoïde et la facilité de décomposition comme caractéristiques de pollution d'origine animale. Elles titrent très haut avec le permanganate en solution acide (méthode de Kubel et Tiemann) et c'est cette proportion excessive par rapport à l'ammoniaque albuminoïde qui me semble encore leur caractère le plus distinctif. En même temps, ces eaux sont très stables vis-à-vis des agents naturels, comme on a pu le voir par le fait que trois mois de séjour ne diminuent pas la teinte et que l'ammoniaque albuminoïde ne varie guère. Je dois à l'obligeance de M. le baron van Ertborn, le géologue bien connu,

une eau remarquable, provenant du puits artésien de la station de Denderleeuw, profond de 86 mètres et plongeant dans le Landenien supérieur; l'eau est jaune brun, beaucoup plus brun que du vin de Madère et elle est vieille d'une quinzaine d'années. M. Rutot a signalé ces faits dans la séance du 9 octobre 1889 de la Société belge de Géologie (1), dans la discussion qui a suivi la lecture du travail de M. Klement, et rappelle à ce propos que souvent on trouve des ossements de grands vertébrés; il établissait dans sa pensée une relation possible de cause à effet entre ces débris animaux et la couleur de l'eau (2), tout en reconnaissant l'exactitude de faits cités par M. Klement. Chose très curieuse, certains de ces puits n'ont commencé à donner de l'eau foncée que plusieurs années après leur mise en marche.

Le filtrage au sable, tel qu'il est pratiqué pour l'alimentation d'un grand nombre de villes très importantes, a sur la couleur des eaux un effet assez variable; il y a naturellement toujours une réduction, mais sa grandeur est influencée par les causes diverses qui agissent sur l'efficacité du filtrage: vitesse, nature de l'eau, température, âge du filtre, etc. Les expériences de Lawrence (Mass.) ont donné pour deux années, une amélioration moyenne de 40 %. — Quant au mécanisme de cette action, il est probable que l'action de fermentation bactérienne de la couche supérieure y est pour quelque chose; mais c'est surtout pour ces matières colorantes que l'action d'adhésion moléculaire purement physique me semble le mieux établie: on trouve en général que du sable neuf est beaucoup plus actif que du sable ayant déjà servi. C'est bien certainement cette action qui rend si efficaces et si utiles les filtres domestiques au charbon ou au noir animal; les filtres à substances minérales poreuses, grès, porcelaine (Chamberland), terre siliceuse (kieselguhr, Berkefeldt) n'ont aucune action; mais il faut rappeler, qu'au point de vue hygiénique, ce sont ces derniers qui peuvent enlever les microbes ou tout au moins en réduire le nombre, tandis que, à cet égard, les premiers sont non seulement inopérants mais positivement mauvais.

Un des meilleurs moyens de décolorer les eaux est l'addition d'une minime quantité d'alun. L'alun est un sulfate double d'alumine et de potasse, qui se dissocie facilement en acide sulfurique libre et en alumine, laquelle forme un précipité gélatineux; ce précipité attire à

(1) *Bulletins*, vol. III, page 383.

(2) *Les eaux brunes dans les puits artésiens de Ninove*. — *Ibidem*, *Mémoires*, tome IV, 1890, page 242.

lui toute la matière colorante; la théorie de ces diverses actions est loin d'être établie. Il suffit de 50 kilogr. d'alun par 1000 mètres cubes (5 sur 100,000) pour avoir un effet des plus marqués. Le procédé est très employé avec les « mechanical filters » américains et en Hollande, comme il a été dit plus haut.

Le procédé de Clark (traitement par la chaux) serait également de nature à diminuer la couleur; mais les eaux brunes sont généralement très peu calcaires et le procédé ne leur est donc pas applicable. L'emploi de marbre pulvérisé, suggéré par M. Klement, mériterait d'être essayé en grand.

Nous allons examiner maintenant le parti pratique que l'on a tiré de ces études et voir jusqu'à quel point elles ont été utilisées dans les ouvrages techniques se rapportant à l'eau.

Il est assez étonnant de trouver plusieurs livres qui ne parlent même pas de la couleur. Tel est le cas pour l'excellent opuscule de Wanklyn *Water analysis*, — le grand traité de Fresenius, qui consacre un chapitre étendu à l'analyse des eaux douces et des eaux minérales, — l'*Agenda du chimiste français*, — la *Chemische Technologie des Wassers* de Fischer.

La grande majorité des traités en fait mention, mais d'une façon d'ordinaire sommaire. Reichardt confond couleur et transparence. On se borne le plus souvent à regarder à travers un tube de 60 centimètres environ (2 pieds); les uns recommandent la comparaison avec de l'eau distillée (Blas), — avec une eau de composition connue dans des éprouvettes à pied (E. Frankland), — dans un tube horizontal rempli à moitié et comparant avec la moitié supérieure vide (Leffmann et Beam).

Dans toutes ces méthodes, ou plutôt ces simples procédés, il y a uniquement constatation momentanée, dont le résultat ne peut être traduit en chiffres. Pour arriver à une véritable analyse quantitative, il faut une norme de couleur. On a employé des tubes donnant une gamme de couleurs depuis le bleu jusqu'au jaune (Forel), — une solution de caramel (Tiemann et Gaertner, Ohlmüller), — l'ammoniaque nesslerisée (A. R. Leeds), — une dilution d'une eau brune naturelle, titrée au préalable par la méthode précédente (M^{me} Richards), — une solution très diluée de bichromate de potasse (usine de Waelhem), — un mélange optique d'une solution bleue et d'une solution brune (Crookes, Odling et Tidy), — un mélange de chlorure de platine et de chlorure de cobalt (Allen Hazen), — une série de verres colorés (Lovibond's tintometer).

Quand on a obtenu des chiffres, il s'agit de les interpréter. Ce ne

serait pas la peine de gâter du sucre pour préparer le caramel, uniquement dans le but de remplir une colonne de plus dans un bulletin ; il faudrait que ce renseignement puisse contribuer à donner au chimiste une idée sur la valeur hygiénique de l'eau examinée.

Plusieurs écrivains l'ont compris ainsi. Dans un livre récent de M. Coreil (1) on lit ce qui suit :

« L'eau potable vue en petite quantité doit être incolore, vue sous une grande épaisseur, elle possède une légère teinte bleue.

Une eau, qui, regardée sous une faible épaisseur, est colorée, tient en dissolution ou en suspension des matières étrangères, indices de son impureté. On doit la considérer comme impropre à la consommation ou tout au moins suspecte. M. Burcker (*Traité des falsifications, etc.*) dit « qu'on doit rejeter de l'alimentation toutes les eaux qui, sous une faible épaisseur, ne sont pas absolument incolores, et qui ne sont pas d'un bleu pur, quand on les examine sous une épaisseur un peu plus considérable. »

M. P. Guichard (*L'Eau dans l'Industrie*, J. B. Baillière et fils, Paris, 1894) a exhumé un curieux mémoire inséré en 1876 dans les *Annales d'Hygiène* et dû à M. A. Gerardin :

« Les eaux sont divisées en eaux vertes et eaux bleues. Les eaux bleues sont les plus pures, elles sont transparentes, ne réfléchissent pas les images et se conservent sans altération ; si on trouble l'eau bleue par des matières en suspension, elle reste trouble, les matières en suspension sont animées du mouvement brownien ; à cause de cela, elle ne convient pas à l'industrie.

Au point de vue chimique, elle a un titre oxymétrique constant de 7 à 8 cc. d'oxygène par litre ; c'est son seul caractère chimique distinctif.

Si on la conserve stagnante dans un étang ou une pièce d'eau, elle perd sa couleur et devient verte ; en même temps ses propriétés se sont modifiées, elle n'est plus transparente, mais, au contraire, elle réfléchit les images comme un miroir, elle est souvent odorante, d'une saveur désagréable ; cependant les vaches la boivent de préférence à l'eau bleue, elle s'altère et se putréfie au bout de peu de jours ; si on la conserve dans des réservoirs, elle laisse déposer facilement les matières en suspension qui sont inertes et qui n'ont pas le mouvement brownien.

Elle est bonne pour l'emploi industriel, à cause de cette propriété de se clarifier.

(1) *L'eau potable*. — Librairie Baillière, 1896.

Elle doit sa couleur verte à des myriades d'algues microscopiques du genre (*Chroococcus*).

Elle contient de 0 à 10 ou 11 cc. d'oxygène et est chargée de matières organiques en décomposition.

Les eaux vertes et les eaux bleues ne nourrissent pas les mêmes mollusques ni les mêmes poissons; elles n'ont pas non plus la même végétation. Jamais une eau verte ne peut redevenir bleue.

La Seine est bleue jusqu'à Corbeil, puis elle verdit insensiblement à mesure qu'elle reçoit les eaux d'égout; à Paris elle est tout à fait verte, puis elle devient tout à fait corrompue après Paris; elle redevient verte à Meulan, mais ne redevient bleue qu'à Caudebec où le mélange avec l'eau de mer tue les algues colorantes. On peut donc dire que jamais la Seine ne redeviendra bleue ni potable comme l'eau de la Vanne, même quand on cessera d'y déverser les égouts, mais elle redeviendra alors une bonne eau verte, c'est-à-dire pourra servir à l'industrie, et même jusqu'à un certain point être bue, à la condition de ne pas la conserver.»

On voit que ces auteurs n'y vont pas de main morte; rien que des eaux bleues! Pourquoi pas tout de suite le tube de Spring? Pour les gens compétents, des exagérations de ce genre n'offrent pas grand inconvénient; on n'attache à ces affirmations pas plus d'importance que les auteurs n'y en attachent eux-mêmes. Mais des livres pareils peuvent faire beaucoup de mal dans les mains de personnes ignorantes prenant pour parole d'évangile tout ce qui est imprimé.

Dans tous les autres ouvrages, il n'y a au sujet de la signification de la couleur, que la phrase stéréotypée que l'eau doit être incolore. Pour les chimistes, la détermination de la couleur d'une eau est une chose tout à fait accessoire et leur attention porte ailleurs.

Or, de tous les examens, celui qui est de loin le plus fréquent dans la pratique réelle des distributions d'eau, c'est celui de la couleur. Les analyses chimiques exigent du temps, une installation appropriée, un personnel spécial; le colorimètre peut être employé par un contre-maître ou un chef-ouvrier; ses indications sont rapides et dans certains cas, en avance des résultats chimiques. D'après une communication verbale du D^r Tidy, analiste des eaux de Londres, une légère augmentation de la couleur indiquerait très généralement un changement dans la teneur des matières organiques; j'ai trouvé également qu'une teinte moins verte et un peu plus jaune va presque toujours de pair avec l'apparition de traces d'ammoniaque libre. Il y aurait donc tout avantage à établir d'une façon scientifique, par la mise en commun de l'expérience de tous, ce que peuvent signifier les diverses teintes de l'eau.

Solution de caramel. — On dissout 1 gramme de sucre pur dans 40 à 50 cc. d'eau distillée, on ajoute 1 cc. d'acide sulfurique au 1/4 (1 vol. d'acide à 3 vol. d'eau) et on fait bouillir pendant 10 minutes. Puis on rend le milieu alcalin par l'addition de soude caustique (1 cc. d'une solution de 1 partie NaOH dans 2 parties d'eau) et l'on fait bouillir encore 10 à 12 minutes. On obtient un liquide brun foncé que l'on dilue au litre (1).

Pour la détermination, on prend une épaisseur d'eau de 40 centimètres environ et une épaisseur égale d'eau distillée, à laquelle on ajoute du caramel jusqu'à égalisation des teintes (2). Il faut évidemment travailler, non seulement avec des épaisseurs égales, mais aussi avec des volumes égaux, ce qui revient à dire qu'il faut employer des éprouvettes de même calibre. Des différences de couleur provenant de 1 ou 2 cc. de la solution de caramel sont encore très appréciables.

La même méthode est donnée par Ohlmüller, *Untersuchung des Wassers*, 1894.

Ammoniaque nesslerisée. — M. Albert R. Leeds, professeur au Stevens Institute of Technology à Hoboken (New-York), a proposé de prendre comme terme de comparaison la couleur de mgr. 0,01 d'ammoniaque nesslerisée dans 50 cc. d'eau distillée, sous une épaisseur d'environ 20 centimètres. M. Leeds avait construit un appareil pour mesurer la couleur de l'ammoniaque nesslerisée dans les analyses d'eau (3); la partie essentielle était un prisme creux rempli d'une solution de caramel additionnée d'un peu de rouge d'aniline; en faisant glisser le prisme de façon à avoir des épaisseurs différentes du liquide type, on peut reproduire la teinte voulue.

Ce procédé fut appliqué par M. Leeds à la détermination de la couleur des eaux. Une eau ayant une intensité de coloration égale à 1,00 est celle qui correspond à la teinte de mgr. 0,01 d'ammoniaque. Cette manière de calculer fut rapidement adoptée en Amérique; le bureau sanitaire de l'état de Massachusetts s'y rallia, mais au lieu d'employer le prisme avec la solution de caramel, on fit la comparaison directe-

(1) TIEMANN et GAERTNER, *Untersuchung und Beurtheilung der Wässer*, 4^e édition, 1895, p. 377.

(2) *Ibidem*, p. 332. — Dans l'exemple donné, il y a une erreur de calcul : $\frac{0,014 \times 100000}{250} = 5,6$ et non 5,9.

(3) *Journal of the american chemical Society*, vol. II, p. 1, 1878. — Reproduit dans *Zeitschrift für analytische Chemie* de Fresenius, vol. XVII, p. 276 et *Chemical News*, 7 juin 1878. — Dans le journal allemand, que j'ai consulté, il n'est question que de la détermination de l'ammoniaque et nullement de l'application à la couleur de l'eau.

ment avec des solutions titrées d'ammoniaque (1). M^{me} Ellen H. Richards, du même Bureau, prend comme types des dilutions d'une eau brune naturelle, titrées une fois pour toutes comparative-ment avec de l'ammoniaque.

A première vue, il semble que l'on ait, par l'emploi de l'ammoniaque, un point de départ fixe et invariable, qui rendra comparables les analyses, non seulement d'un même chimiste, mais encore les résultats obtenus par des chimistes différents. Mais il faut beaucoup en rabattre. Le réactif de Nessler, par son extrême sensibilité même, donne lieu à des inconvénients; pour les quantités excessivement faibles d'ammoniaque avec lesquelles on travaille, la moindre différence se traduit par des variations d'effet très marquées; les diverses méthodes de préparation du réactif influent énormément, de même que la température; ensuite, les teintes de l'ammoniaque nesslerisée ne sont pas proportionnelles aux quantités; enfin, pour les termes élevés, c'est-à-dire pour les eaux très colorées, la *teinte* diffère, indépendamment de l'intensité, et les comparaisons deviennent difficiles; aussi recommande-t-on de diluer.

Malgré tous ces inconvénients, que du reste Leeds a lui-même signalés, son procédé a eu le mérite de permettre de formuler des données numériques; comme il ne fallait pas de réactifs spéciaux et que les liqueurs employées sont dans tout laboratoire d'hydrologie, il est bien certain que cette facilité a amené un nombre de déterminations de couleur beaucoup plus grand que s'il avait fallu préparer des solutions spéciales; l'emploi du prisme, en supprimant la manipulation d'une assez grande masse de verrerie et l'ennui d'avoir à préparer des tubes-types, rendait la détermination toujours immédiatement praticable.

Méthode des analystes des eaux de Londres. — En 1881, les trois chimistes chargés d'analyser quotidiennement les eaux des compagnies alimentant Londres, Crookes, Odling et Tidy ont décrit une nouvelle méthode. Le tube ordinaire de 2 pieds est placé devant une ouverture circulaire dans une planchette; celle-ci porte une deuxième ouverture au-dessus de la première et derrière il y a deux prismes triangulaires creux; l'un est rempli d'une solution bleue (5 grammes de sulfate de cuivre cristallisé par litre), l'autre d'une solution brune (mélange de chlorure ferrique et de chlorure de cobalt renfermant gr. 0,7 de fer et 0,3 de cobalt par litre). En faisant mouvoir les prismes de façon à avoir des épaisseurs variées, on pourrait reproduire très exactement toutes les teintes que présentent les eaux naturelles. Les résultats sont

(1) T. M. Drown, in *Report on Water Supply et Sewerage*, Boston, 1890, p. 531.

notés en millimètres d'épaisseur des deux couches traversées, épaisseur qui est marquée sur les prismes comme une graduation. On maintient d'ordinaire le bleu à 20 et l'on fait varier le brun. Les prismes sont gradués jusqu'à 40, mais il semble que cela soit insuffisant, car il arrive assez fréquemment que la teinte de l'eau est plus foncée; ainsi dans le bulletin du mois de février 1893, il y a 12 fois la mention *above scale*.

La méthode me paraît avoir l'avantage de fournir un renseignement non seulement sur l'intensité de la teinte, mais encore sur sa nature. Il serait plus logique, peut-être, de mettre le prisme bleu dans une situation telle qu'il donne exactement la teinte de l'eau distillée très pure, le brun donnerait alors la valeur concrète directe de la contamination. On peut se demander toutefois, si le sulfate de cuivre est bien choisi; une solution très diluée vue sous une faible épaisseur est plutôt verte que bleue et nullement comparable à la teinte azurée de l'eau distillée; le chlorure de cuivre employé par Spring vaut mieux; on obtient également de bons résultats avec le sulfate de cuivre ammoniacal. Quant à la liqueur brune, elle ne paraît pas heureusement choisie; le fer semble contre-indiqué pour tout usage colorimétrique, car on sait que ses sels changent très facilement de couleur; aussi les auteurs eux-mêmes ont-ils été amenés à l'abandonner, pour le remplacer par le bichromate de potasse.

Lovibond's tintometer. — C'est un appareil qui est beaucoup employé en Angleterre dans diverses industries; il reproduit les couleurs par la superposition de lames de verre de couleurs diverses et d'intensité inégale. On comprend immédiatement que ce procédé est purement empirique; comme garantie de comparabilité, on n'a que l'affirmation du fabricant; quelque soin qu'il puisse apporter au classement des verres, il semble difficile qu'il puisse toujours trouver exactement la même chose. En outre, il faut beaucoup de tâtonnements pour arriver à trouver une teinte donnée. L'appareil est assez répandu dans les distributions d'eau, mais fort peu dans les laboratoires.

Chlorure de platine de cobalt. — La question de la détermination de la couleur de l'eau a été étudiée à fond par un des chimistes de l'État de Massachusetts, M. Allen Hazen, bien connu de beaucoup d'ingénieurs en Europe pour l'enquête minutieuse qu'il a faite il y a quelques années sur le filtrage des eaux.

Il s'est d'abord rendu compte des variations de couleur de l'ammoniaque nesslerisée, en modifiant une à une les conditions de l'expérience: influence de la quantité d'ammoniaque, de la quantité de réactif, de la pureté de l'eau distillée, de la quantité d'alcali et d'iodure

mercurique dans le réactif, de la température, du mode de mélange. Le résultat final de toutes ces études, la conclusion qui s'impose, c'est que, comme norme de couleur, l'ammoniaque ne peut pas être employée. M. Hazen propose une solution de gr. 1.246 de chlorure double de platine et de potassium, donnant gr. 0.500 de platine et 1 gramme de chlorure de cobalt exempt de fer, dans de l'eau avec 100 cc. d'acide chlorhydrique concentré, et étendant au litre. Chaque centimètre cube de cette solution représente 0,1 degré colorimétrique; on fait des tubes types, en diluant toujours à 50 cc., pour faire la comparaison des couleurs toujours dans les mêmes conditions. Protégés contre l'évaporation et les poussières par un bon bouchage, ces types se conservent inaltérés pendant des semaines et des mois.

Le type au chlorure de platine a été essayé avec une eau naturelle assez colorée et diluée ensuite, de façon à ce qu'on pouvait d'avance calculer l'intensité de teinte; les lectures colorimétriques ont montré une concordance parfaite; la solution agit donc proportionnellement à la quantité employée, ce qui n'est pas le cas avec l'ammoniaque nesslerisée (1).

La méthode de Hazen a rapidement déplacé celle de Leeds. Celui-ci a fait une tentative pour sauver au moins quelque chose (2). Il demande « respectueusement », comme question de priorité et parce que de nombreuses analyses ont été faites ainsi, que l'unité de couleur soit maintenue à 0^mgr.01 d'ammoniaque nesslerisée. On retient bien le mètre, dit-il, quoiqu'on sache que ce n'est pas la 40 millionième partie du quart du méridien terrestre.

Pour éviter les variations de la nesslerisation, on pourrait déterminer quelle est la teneur en un sel métallique quelconque pour cette unité de couleur. Cette demande me paraît juste, mais elle est, me semble-t-il, remplie; le test de Hazen donne en effet 1.05 comparé avec 0^mgr.01 d'ammoniaque. M. Leeds demande également que l'on examine l'eau sous une colonne de 20 centimètres et il donne comme arguments, que c'est là l'épaisseur des tubes du polariscope, qu'elle est « familière dans les emplois du ménage », et qu'elle est plus pratique pour les eaux américaines en général non filtrées que le tube de 2 pieds, qui paraît noir avec ces eaux. Ce sont là des questions de détail assez secondaires.

M. Hazen recommande de prendre, pour les eaux très claires, des

(1) ALLEN HAZEN, *A new color-standard for natural waters*, American chemical Journal, vol. XIV, 1892, pages 300-310.

(2) A. R. LEEDS, *Standard prisms in water analysis*, American chemical Soc. Journal, Juin 1896, vol. XVIII, page 489.

tubes de 60 centimètres de long ; l'un est rempli d'eau distillée et l'on place derrière des flacons plats avec la solution de platine et de cobalt ; il faut naturellement, pour arriver au résultat numérique, tenir compte de l'épaisseur relative de la solution colorée et de celle de l'eau. Inversement pour des eaux très chargées, il y a parfois avantage à opérer avec une longueur moindre que 20 centimètres.

J'ai essayé le test de Allen Hazen et l'ai trouvé très pratique ; comme l'indique du reste l'auteur, les légères différences de teinte (à distinguer de l'intensité) peuvent s'atténuer en faisant varier la quantité de cobalt. Malheureusement, pour une grande épaisseur (1 mètre) d'une eau ordinaire, la liqueur type est inutilisable, la teinte étant tout à fait différente ; une eau, qui se montre légèrement jaune sous 20 centimètres, devient vert ou vert bleuâtre sous une couche assez épaisse.

Pour une détermination réellement scientifique de la couleur de l'eau, il faudrait analyser par le prisme la lumière transmise et noter en outre l'intensité de chacune des principales couleurs du spectre obtenu. Outre le chimiste et le bactériologiste, il faudrait un physicien spécialiste en spectroscopie. Je crois qu'il y aurait quelque exagération à demander cette augmentation du personnel technique ; les résultats que pourrait fournir cet examen seraient d'utilité trop mince pour justifier tant de travail et tant de frais.

Les moyens que nous avons à notre disposition, pour n'être qu'empiriques, n'en peuvent pas moins nous servir. On devrait les utiliser davantage et surtout unifier les méthodes par l'adoption du procédé de Allen Hazen.
