

Les couleurs du lac du Bourget : un régal pour le peintre, une alerte pour le biologiste



Soleil couchant sur le lac dans le secteur de Mémard. Au fond, la dent du Chat

Des eaux polychromes

Les eaux des lacs peuvent arborer toutes les couleurs ou presque. N'est-ce pas étrange quand on sait que l'eau est transparente et incolore ? En fait, l'eau est transparente en petites quantités mais elle bleuit dès lors que son épaisseur augmente. Les variations de couleur observées sont dues aux molécules ou particules présentes dans l'eau.

La couleur bleue est donc d'abord due à la différence d'absorption, par les molécules d'eau pure, des diverses longueurs d'ondes de la lumière visible (le bleu disparaissant en dernier comparativement aux autres couleurs). Les différentes particules (biologiques ou minérales) vont alors entraîner des phénomènes de réflexion/réfraction de la lumière et donc la modifier, changeant in fine la couleur et le degré de transparence.

Le reflet est donc particulièrement important pour expliquer la couleur des eaux lacustres. Le phytoplancton est le principal responsable de la transparence des eaux des grands lacs péri-alpins et c'est notamment à ce titre qu'il constitue un excellent indicateur de la qualité des eaux.

Le plus grand lac naturel profond de l'Hexagone impressionne par ses mensurations : 18 kilomètres de long, 4 400 hectares, 147 m de profondeur maximale, plus de 3 000 milliards de litres d'eau. Ce géant savoyard âgé de plusieurs milliers d'années (19 000 ans environ depuis le retrait des glaciers du Quaternaire) a une histoire géologique et humaine fascinante qui a déjà été relatée par le passé dans cette revue et ailleurs (Jacquet et *al.* 2008, Balvay et *al.* 2012). Aujourd'hui, nous avons décidé de nous intéresser plus à une partie de la biologie de ce fleuron des Alpes, chanté par les poètes et écrivains célèbres, peint depuis toujours, fréquenté par les pêcheurs, ou encore utilisé par les amateurs d'activités nautiques en tous genres.

Les couleurs du lac

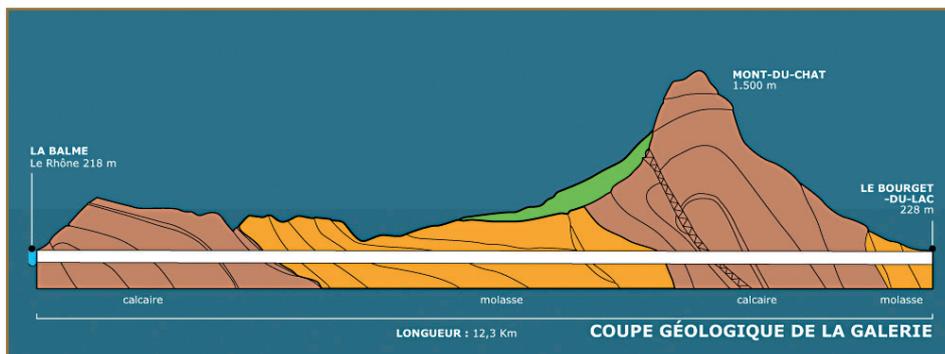
« *Les couleurs du lac du Bourget* », tel est le titre choisi et certes un peu énigmatique du présent article. Pourquoi ? Parce que le lac change effectivement de couleur au gré des saisons et donc de la lumière environnante (voir encadré) ; mais comme tout milieu aquatique, nous direz-vous ! Vous allez comprendre que l'histoire peut aussi être un peu différente si on se place du point de vue du chimiste ou surtout du biologiste et qu'elle permet en plus de retracer une évolution récente, celle d'un sauvetage réussi mais encore inachevé, la vigilance restant de mise.

Une eau limpide ?

Rien n'est plus agréable que des eaux transparentes, où l'on distingue sans mal le fond, et qui appellent le promeneur, le baigneur ou encore le pêcheur à la contemplation, à la baignade ou à espérer obtenir



Détail des conduites reliant les stations d'épuration d'Aix-les-Bains et Chambéry à l'entrée de la galerie au Bourget-du-Lac, d'où part le tunnel gravitaire sous le Mont du Chat



La galerie de l'Epine est longue de 12,3 km pour une dénivellation de 10 m. Le débit rejeté dans le Rhône est en moyenne de 800 litres par seconde

une belle prise. Si tel est globalement aujourd'hui ce qui est constaté et vécu au lac du Bourget, il aura fallu près de quatre décennies pour obtenir ce résultat envié et enrayer ce mal appelé "eutrophisation".

Celle-ci a été provoquée au cours du siècle dernier par :

- le développement de l'urbanisation et de l'industrie environnante ;
- la modification de certaines pratiques agricoles et de l'utilisation des sols ; avec l'emploi croissant des fertilisants mais surtout des aliments pour bétail ;
- la rareté des systèmes d'épuration de l'époque et du tout à l'égoût.

L'augmentation des apports nutritifs par les affluents entre les années 1930 et 1980, les égoûts non traités et le ruissellement ont entraîné, fort logiquement, une dégradation de la qualité des eaux mais également, et de manière moins perceptible, celle des sédiments. Le lac a donc connu une période noire pendant la seconde moitié du 20^e siècle.

Parmi les maux engendrés par l'excès de phosphore (nutriment clef) arrivant au lac (et majoritairement dû aux usages et rejets domestiques), on peut citer le développement accru du phytoplancton (en particulier d'espèces nuisibles dont on va reparler plus bas), la désoxygénation des eaux profondes, une baisse des stocks de poissons nobles, etc. Un film de l'INA¹ sur la santé des lacs alpins, intitulé explicitement « la pollution des lacs » et datant de 1974 en dit long sur l'état du lac et les mentalités à cette époque.

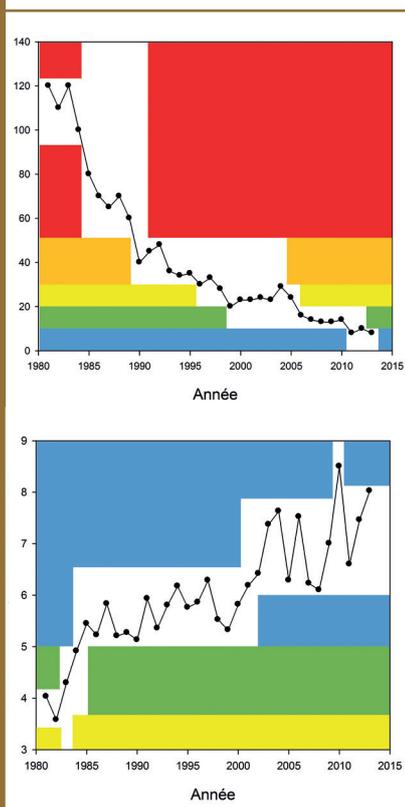
Sauvetage en eaux troubles

Sauver le lac de cette dégradation nécessita une véritable prise de conscience et des actions énergiques. Deux hommes en particulier agirent dans ce sens avec pédagogie et fermeté : André Blin (1912-1980, alors maire de Tresserve et président du

syndicat intercommunal du lac du Bourget devenu CALB²) et Jean Blanc (alors maire de la Ravoire et président du SIAURC³, devenu Chambéry Métropole). Grâce à eux, de grands travaux furent initiés au début des années 1970, le plus impressionnant d'entre eux étant la construction d'une galerie percée dans la Montagne du Chat (ci-dessus). Celle-ci permet de rejeter dans le Rhône, une douzaine de kilomètres plus loin, toutes les eaux du bassin versant traitées par les stations d'épuration du Bourget-du-Lac, d'Aix-les-Bains et de Chambéry (suivant le constat sans appel de l'époque que la seule construction de stations d'épuration ne suffirait pas pour enrayer le problème et encore moins le stopper).

Mise en service en 1980, la galerie de l'Epine, comme on l'appelle également, a parfaitement joué son rôle et, avec la construction de nouvelles stations d'épuration sur le bassin versant du lac (qui fait environ 560 km²) ou la modernisation de certaines, les apports en phosphore au lac ont été considérablement réduits (voir graphique ci-contre).

Entre 1970 et aujourd'hui, le lac a donc logiquement et progressivement changé de statut, passant de conditions dites eutrophes (riches en phosphore) à oligo-mésotrophes (correspondant à des conditions plus faibles à modérées). Les graphiques ci-contre résument, à l'aide de deux descripteurs simples, l'efficacité des mesures prises : la baisse immédiate et continue des phosphates dans l'ensemble de la colonne d'eau et l'augmentation régulière et marquée de la transparence des eaux, conséquence de la diminution de la biomasse phytoplanctonique des eaux de surface. Les codes couleur symbolisent le passage du lac d'un état mauvais (rouge) à très bon (bleu), les étapes intermédiaires étant : médiocre (orange), moyen (jaune) et bon (vert).



Evolution des concentrations hivernales moyennes en phosphates (en µg/L, en haut) et de la transparence moyenne annuelle au milieu du lac (en m, en bas). Données INRA- CISALB

¹ Institut national de l'audiovisuel. Le film est visible à cette adresse : <http://www.ina.fr/video/CAF93027324>

² Communauté d'agglomération du lac du Bourget

³ Syndicat intercommunal d'assainissement et d'urbanisme de la région de chambéry

Des résultats visibles...

Engagé dans un processus de restauration depuis le tout début des années 1980, l'écosystème est en passe aujourd'hui d'atteindre ce que l'on appelle le très bon état écologique, état demandé par l'Union Européenne pour l'ensemble des plans d'eau du vieux continent à l'horizon 2015 ou 2021. Cet état est par définition celui qui est le plus proche de l'état de référence de l'écosystème, c'est-à-dire proche du potentiel écologique optimal du milieu. Il correspondrait à ce que serait en condition climacique (c'est-à-dire d'équilibre idéal s'il existe) le milieu et sa qualité en l'absence d'impacts anthropiques négatifs. La directive cadre européenne (DCE) portant sur l'eau et les milieux aquatiques considère que cet état est atteint lorsque les écarts de qualité liés à l'activité humaine sont considérés comme très faibles ou nuls par rapport aux conditions de référence. Si, en 2013, les voyants étaient tous au vert (ou plutôt au bleu si on suit le code couleur précédemment cité !) pour le lac du Bourget, 2014 a rappelé que la vigilance doit rester de mise pour cet écosystème qui peut encore être un peu capricieux.

...Mais ne pas s'endormir

A la fin de l'été 2014, certains baigneurs ont en effet observé des nappes d'eaux de couleur jaune sur certaines rives du lac. Ce phénomène naturel a été rapidement identifié et il a pu être déterminé qu'il était dû à la prolifération d'une espèce phytoplanctonique, une cyanobactérie appelée *Microcystis aeruginosa*. Ce micro-organisme a en effet la capacité de former des colonies pouvant générer des fleurs d'eau (c'est-à-dire des efflorescences ou blooms qui vont colorer les eaux de surface) si les conditions environnementales sont favorables à sa prolifération.

On le rencontre généralement dans des eaux riches à très riches en ressources nutritives (notamment en phosphore) si bien que la manifestation de l'été 2014 pouvait paraître surprenante en regard de l'évolution précédemment décrite (voir graphiques). En fait, *M. aeruginosa* a une capacité très particulière, qui est de survivre dans un état de dormance dans les sédiments. Ceci lui permet donc de pouvoir attendre des conditions qui seront favorables à son développement, voire à des proliférations exubérantes, ce qui à l'évidence a été en partie le cas au cours de la fin d'été 2014.

Outre la quantité de lumière qui est importante comme pour tout organisme photosynthétique, mais qui n'est pas vraiment limitante l'été, l'apparition en masse de cette microalgue pourrait surtout être mise en relation avec la météo capricieuse des mois de juillet et août. Les eaux du lac ont été fortement brassées, ce qui a évidemment favorisé la remise en suspension des cellules dormantes. Elles ont alors pu se développer activement en raison d'une part, des apports importants dans les couches superficielles du lac en sels nutritifs associés aux fortes précipitations et, d'autre part, par la température clémente des eaux à cette période de l'année, un facteur très important pour la croissance de cette espèce (Misson & Latour 2012).

Vous avez dit cyanobactérie ?

Parmi toutes les espèces planctoniques, cette cyanobactérie est donc celle qui a su tirer profit au mieux de ces conditions particulières, au point de devenir progressivement dominante en cette fin d'été 2014. Visibles en proche surface pendant plusieurs semaines sous forme de particules (des pastilles verdâtres de quelques mm à cm de diamètre) atténuant la transparence de l'eau, elles se sont accumulées par la suite dans les zones calmes et abritées, notamment au niveau des plages et des ports. La couleur jaune caractéristique qui a alors été observée, faisant penser à du pollen, était en fait liée à la dégradation des pigments photosynthétiques, conséquence de la mort de l'espèce.

Les proliférations de cyanobactéries posent de nombreux problèmes écologiques et sanitaires. L'un des plus critiques est lié à la capacité de certaines d'entre elles, dont *M. aeruginosa*, à synthétiser des toxines qui diffusent dans l'eau et peuvent, à fortes doses, potentiellement engendrer des troubles gastriques ou neurologiques en cas d'ingestion. Certains élus n'ont du reste pas attendu le résultat des études scientifiques et ont pris la décision de fermer certaines plages publiques dans le sud du lac dès l'apparition du phénomène.

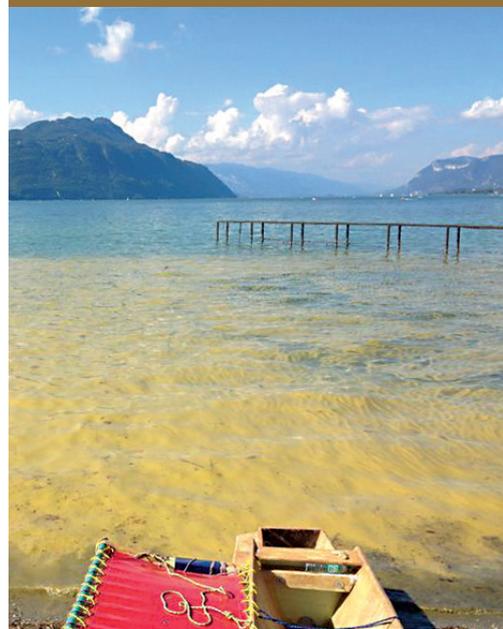
Il est vrai que le lac du Bourget a régulièrement connu des proliférations de cyanobactéries par le passé, et que les populations riveraines sont particulièrement sensibilisées. La littérature rapporte ainsi qu'au milieu du siècle dernier, cette espèce était déjà présente et pouvait occasionnellement colorer le lac en vert. Plus près de nous, ce phénomène avait été enregistré en

Un lac sous surveillance

Le suivi environnemental du lac du Bourget est confié à l'INRA de Thonon-Bains depuis 2004 qui travaille de concert avec la CALB et le CISALB. Le suivi consiste en une vingtaine de campagnes de terrain au point central du lac, appelé "point B", au droit de la plus grande profondeur.

Un ensemble de paramètres physiques, chimiques et biologiques est mesuré et alimente une base de données qui entre dans le cadre de l'observatoire des grands lacs alpins (OLA). Ces données, qui permettent de statuer sur l'état et l'évolution du lac d'année en année, font l'objet d'un rapport annuel, validé par un comité scientifique qui oriente si besoin les analyses futures.

Les rapports sont consultables à l'adresse suivante : <http://www6.dijon.inra.fr/thonon/L-observatoire-OLA/Les-rapports-de-suivi-des-lacs/Le-lac-du-Bourget>



Prolifération de *Microcystis aeruginosa* au cours de l'été 2014, observée ici avec l'accumulation de l'espèce en fin de vie sur les bords de plage

Cette coloration est parfaitement normale : il ne s'agit nullement d'une prolifération bactérienne ou de microalgues. La Leysse, principal affluent du lac, charrie des sédiments dont les plus fins sont en suspension dans l'eau



La prolifération de *Planktothrix rubescens* observée entre 1996 et 2009, donna au lac une couleur allant du rouge au bordeaux (coloration automnale des eaux de surface en 2002)

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Jean-Claude Druart, Frédéric Rimet et Pascal Perney de l'INRA de Thonon pour leur relecture critique de cet article et leur part active dans le suivi environnemental du lac du Bourget. Philippe Cecchi (IRD) et Jean-Marcel Dorioz (INRA) sont également remerciés pour leur avis critique sur cet article et Lise Paulus-Levet (Chambéry Métropole) pour l'historique cité ci-dessus. S. Jacquet tient à remercier le CISALB pour son soutien et sa confiance toujours renouvelés et finalement son père pour l'ultime relecture du texte final.

2009 au niveau de certains ports, mais la manifestation de cet été a semblé-t-il beaucoup plus marqué les esprits des estivants, des habitués du lac et, bien sûr, des élus locaux.

Vigilance

La vigilance reste donc de mise, si l'on considère que la probabilité que le type d'été que nous avons connu pour l'année 2014 (marqué par de fortes précipitations induisant du ruissellement, des apports accrus par les rivières, et d'intenses brassages des eaux du lac sur ses bords en réponse au vent et au froid) pourrait être plus fréquente dans les années à venir. L'augmentation, tant en fréquence qu'en intensité, d'événements qualifiés d'extrêmes est en effet l'une des modifications climatiques prévues dans les décennies à venir et dans cette partie de l'Europe (Beniston 2012).

Le lac va beaucoup mieux qu'il y a vingt ou trente ans, mais l'on perçoit bien que tout n'est pas encore parfait. Les sédiments regorgent toujours de phosphore potentiellement remobilisable (c'est-à-dire pouvant se retrouver dans la colonne d'eau) et, peut-être, aussi d'espèces jusqu'à présent anodines mais potentiellement nuisibles, comme *Microcystis*, qui constituent de vraies bombes à retardement dès lors qu'une conjonction de facteurs va permettre leur développement massif et ce, insistons bien là-dessus, en dépit d'une restauration exemplaire.

Un lac qui en voit de toutes les couleurs

Le lac n'en est d'ailleurs plus à un paradoxe près, quand on repense à la prolifération d'une autre cyanobactérie

toxique pendant la période entre 1996 et 2009, qui a pu colorer le lac en rouge comme dans d'autres écosystèmes où ce phénomène bien connu est rapporté sous le vocable de "sang des bourguignons" (voir ci-contre).

L'histoire de cette autre cyanobactérie est particulièrement intéressante car elle se développe le plus souvent dans des conditions nutritives dites intermédiaires (c'est-à-dire dans une certaine gamme de concentrations en phosphore, ni trop basse, ni trop élevée) et dès lors que l'écosystème qui l'héberge présente un certain nombre de prérequis (comme celui de se stratifier fortement en été par exemple, conséquence de forts gradients verticaux de la température des eaux).

Il faut peut-être considérer que ces phénomènes correspondent à un "passage obligé", et que ces proliférations de cyanobactéries sont un "mal nécessaire" ou a minima "attendu", constitutifs du processus de restauration de l'écosystème.

La biologie à elle seule n'explique pas forcément la couleur des eaux du lac du Bourget (voir encadré p. 9). Ne l'avez-vous jamais vu d'un bleu magnifique ou au contraire d'un noir effrayant, au gré de son ensoleillement ou, au contraire, de la noirceur des cieux le surplombant ? Peut-être plus marron à la sortie de la Leysse au sud (le principal tributaire du lac) en période de forte crue, la rivière charriant alors d'énormes quantités de matières en suspension.

Quant aux eaux turquoise (voir photo suivante) observées à la fin du printemps 2014, une couleur toute tropicale, elle était vraisemblablement liée à la présence de certaines espèces phytoplanctoniques ainsi qu'à la calcite produite naturellement dans ce lac.

Les lacs péri-alpins sont en effet des lacs calciques. Pendant les périodes froides, le carbonate de calcium présent naturellement dans leurs eaux reste dissous dans l'eau. Mais, quand la température de l'eau augmente, la solubilité du calcium diminue et se précipite alors dans l'eau formant de petits nuages de très petites particules solides : la calcite. Les fortes températures actuelles accélèrent l'activité photosynthétique et, ainsi, la production planctonique, notamment d'algues de toute petite taille appelées picoplancton dans les lacs à tendance oligotrophe, comme c'est presque le cas du Bourget aujourd'hui. Les cristaux de calcite recouvrent alors les cellules picoplanctoniques, ce qui modifie le spectre d'absorption de la lumière dans l'eau, et induit cette extraordinaire coloration (voir photo ci-contre), témoignage supplémentaire de l'amélioration de la qualité des eaux du lac du Bourget, soit dit en passant !

Des efforts récompensés

Depuis 2012, le lac du Bourget a un statut trophique pouvant être qualifié d'oligo-mésotrophe et son état peut être considéré comme bon à très bon (Jacquet et al. 2014). Un changement important s'est opéré depuis la fin de l'année 2009 avec la disparition de la cyanobactérie *P. rubescens*, majoritairement grâce aux baisses importantes et continues de phosphore enregistrées ces dernières années et qui se poursuivent.

La forte diminution de la biomasse phytoplanctonique et l'augmentation significative de la proportion des petites formes phytoplanctoniques (le picoplancton, majoritairement représenté par des picocyanobactéries roses à rouges) au cours des années récentes soulignent une nouvelle étape dans la progression de l'amélioration de la qualité des eaux.



Le retour remarqué du lavaret (*Coregonus lavaretus*) depuis 2009 tend également à confirmer que l'amélioration de la qualité des eaux se poursuit et se répercute donc jusqu'au sommet de la chaîne alimentaire du lac.

Le lac du Bourget est en passe de devenir oligotrophe, cela ne fait plus aucun doute, et cet article tient à rendre hommage à celles et ceux qui ont œuvré en ce sens. Néanmoins, cela n'exclut pas qu'il puisse rester le lieu de développement périodique de certaines espèces planctoniques indésirables comme cela fut le cas lors de l'été 2014 avec *M. aeruginosa*, en réponse à une conjonction de facteurs (notamment de nature climatique) et au fait que ses sédiments sont encore loin d'avoir la qualité des eaux sus-jacentes (car hébergeant toujours de fortes quantités de phosphore et servant aussi potentiellement de refuge à des espèces susceptibles de proliférer occasionnellement).

Il convient de rester vigilant : le suivi environnemental du lac (voir encadré) reste un enjeu crucial pour continuer à protéger l'un des plus beaux lacs naturels français, la couleur bleue étant celle qui devrait contenter le plus grand nombre, n'en déplaise aux peintres et aux poètes !

■ **Stéphan JACQUET**,
Institut National

de la Recherche Agronomique
Avec la collaboration de :

Gérard PAOLINI

Communauté d'Agglomération
du Lac du Bourget

et **Sébastien CACHERA**

Comité Intersyndical pour

l'Assainissement du lac du Bourget

Bibliographie

Balvag G., Druart J.-C. et Jacquet S., 2012. Le lac du Bourget : Ses eaux et sa biologie. Editions Quae, 140 p.

Beniston M., 2012. *Changements climatiques et impacts : du global au local*. 2^{ème} édition. Presses Polytechniques et Univ. Romandes (PPUR), Lausanne, 247 p.

Jacquet S., 2008. *A la recherche des anciennes cités lacustres du lac du Bourget : une plongée dans notre histoire !* In Nature et Patrimoine en Pays de Savoie, publ. de l'Asso. Rubins Nature, n°24, pp. 17-23.

Jacquet S., Barbet D., Cachera S., Colon M., Espinat L., Girel C., Guillard J., Hamelet V., Hustache J.-C., Kerrien F., Lacroix D., Laine L., Laplace-Treyture C., Leberre B., Meunier A., Paolini G., Perga M., Perney P., Rimet F., Savoye L., 2014. *Suivi environnemental des eaux du lac du Bourget pour l'année 2013*. Rapport INRA-CISALB-CALB, 201 p.

Jacquet S., Briand J.-F., Leboulanger C., Avois-Jacquet C., Paolini G., Oberhaus L., Tassin B., Vinçon-Leite B., Druart J.-C., Anneville O. and Humbert J.-F., 2005. *The proliferation of the toxic cyanobacterium Planktothrix rubescens following restoration of the largest natural French lake (Lac du Bourget)*. Harmful Algae 4, pp. 651-672.

Jacquet S., Kerimoglu O., Rimet F., Paolini G. and Anneville O., 2014. *Cyanobacterial bloom termination : the story of the disappearance of Planktothrix rubescens from Lake Bourget after restoration*. Freshwater Biology (sous presse).

Misson B. et Latour D., 2012. *Influence of light, sediment mixing, temperature and duration of the benthic life phase on the benthic recruitment of Microcystis*. Journal of Plankton Research 34, pp. 113-119.



Le lac du Bourget aujourd'hui, ce sont surtout des eaux claires pouvant dépasser 15 m de profondeur au centre du lac en hiver et jusqu'à 13 m en fin de printemps

Cet article aurait sûrement plu au père de la limnologie, le célèbre F.-A. FOREL (voir NPPS n°43), lui qui écrivait en 1886 :

« Quel peintre a sur sa palette des tons aussi riches et une gamme de couleurs aussi brillamment fondues et harmonisées ! ».