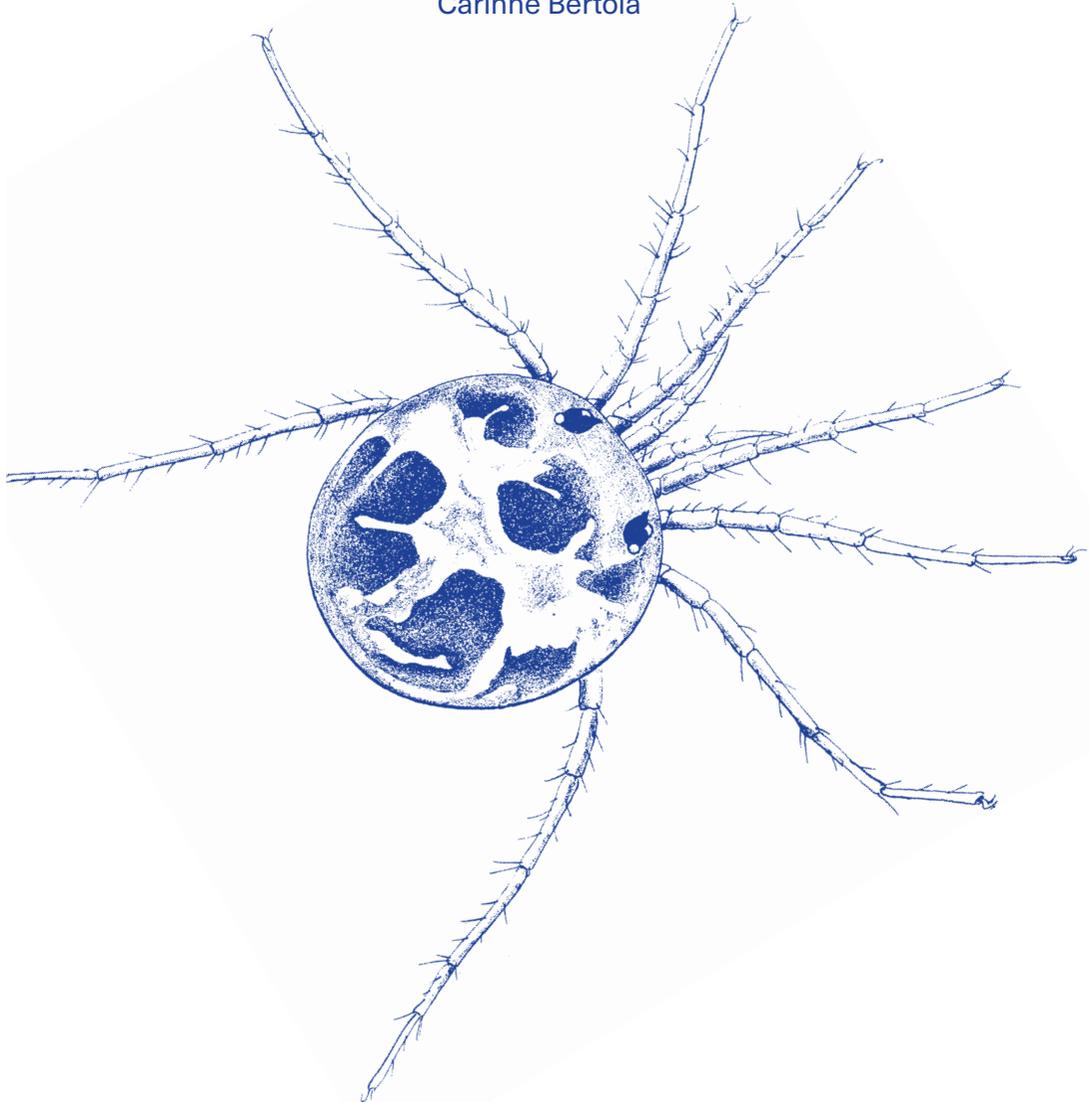


I

# De Forel à *elemo*: origines de la limnologie et voyage à la découverte des mystères du Léman

Warwick F. Vincent  
Carinne Bertola



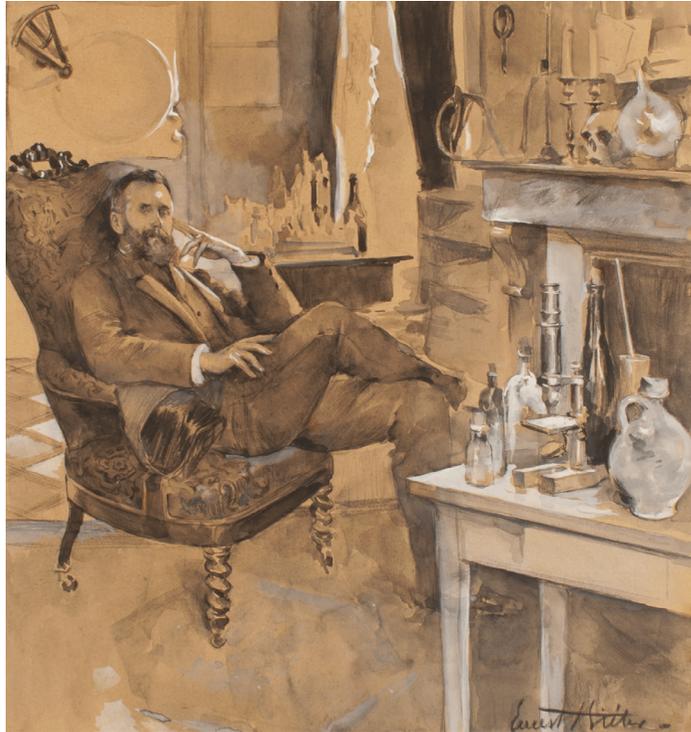
### Limnologie

Etude des écosystèmes d'eau douce. Définie par F. A. Forel en 1892 comme l'« océanographie des lacs », la limnologie aujourd'hui inclut les rivières et les fleuves ainsi que les lacs et les étangs.

A l'âge de 27 ans, François Alfonse Forel <sup>Fig. 1</sup> se retrouvait de nouveau chez lui, sur les rives du Léman, et face à une décision qui allait avoir des implications historiques sur la naissance et le développement de la science des lacs, la *limnologie*. Il avait passé les onze années précédentes loin de Morges et de sa famille, afin d'étudier à Genève, Montpellier, Paris et enfin à l'Université de Würzburg, en Allemagne, où il avait obtenu un doctorat en médecine et en obstétrique en 1865. Il s'apprêtait à devenir professeur à l'Académie de Lausanne, où son enseignement principalement destiné aux étudiants en médecine, devait porter sur la biologie. Pourtant, ses intérêts scientifiques étaient beaucoup plus vastes. La question se posait donc de déterminer quel serait l'objet de ses recherches ?

Dans son autobiographie, un manuscrit datant de 1909-1910, découvert dans le grenier de la maison familiale de Chigny <sup>Fig. 2</sup> et publié pour la première fois en 2012 <sup>[1]</sup>, Forel explique son dilemme : « Je me suis bientôt posé la question : ou bien chercher à me créer un laboratoire d'anatomie, d'histologie et de physiologie, les disciplines que j'avais à enseigner à la faculté des Sciences, et essayer de m'y faire une

**Fig. 1** Portrait en aquarelle de F. A. Forel (par Ernest Biéler) chez lui, dans son laboratoire et bureau. (Reproduit avec la permission de la famille Forel)



**Fig. 2** Maison Forel de Chigny. Les deux maisons de Morges (la Longeraie dans laquelle Forel est né en 1841 et l'Abbaye, habitée par sa famille dès 1845) n'existent plus. Seule subsiste encore la demeure familiale du domaine viticole de Chigny (sur Morges) que Forel administra également. Député au Grand Conseil du canton de Vaud, Forel fit en 1871 une interpellation qui permit aux cantons romands de prendre rapidement les mesures adéquates pour lutter contre l'invasion du phylloxera. L'action de Forel retarda l'entrée du phylloxera d'une vingtaine d'années et épargna à la viticulture suisse romande un désastre économique. (Photographie François Forel, 2012)



position dans le monde de savants, mieux préparés et mieux installés, mieux entravés que moi. Ou bien prendre pour mon laboratoire et mon aquarium ce lac qui m'offrait ses mystères et m'incitait à les étudier.» Il arrêta finalement son choix sur cette seconde option et identifia immédiatement certaines questions importantes concernant l'histoire naturelle du lac Léman qui occuperaient son imagination et sa recherche pendant les décennies suivantes: « Mon choix fut bientôt fait et dès les premières recherches, une conscience assez nette de ma carrière s'empara de moi. »

Dès les premières années après son retour à Morges, et jusqu'à sa disparition en 1912, Forel passa la majeure partie de sa vie sur le lac, prélevant des échantillons d'eau et de sédiments, analysant la colonne d'eau, mesurant ses profondeurs et effectuant des observations de sa surface. Il inventa ou perfectionna également toute une série d'instruments de mesure afin d'étayer ses recherches. Tous les aspects du Léman le fascinaient, y compris les relations entre le lac et les habitants de ses rives, qu'ils soient contemporains ou des générations passées. Forel était le descendant d'une famille établie dans le canton de Vaud, et en particulier à Morges depuis le XVI<sup>e</sup> siècle. Son père, juriste et archéologue amateur, avait attiré son attention alors qu'il était encore adolescent sur les preuves abondantes attestant d'une occupation humaine des rivages du Léman depuis plusieurs milliers d'années.

Le lac avait fourni de tout temps des services vitaux aux humains avec ses ressources en eau, en nourriture ou voie de communication.

Avide de percer toujours plus de secrets enfouis dans les profondeurs des eaux bleues du Léman, Forel aurait sans aucun doute saisi avec grand enthousiasme l'opportunité d'embarquer à bord des submersibles *MIR* pour prendre part au projet *elemo* <sup>Introduction</sup>. Il avait un intérêt particulier pour le canyon du Rhône, pour les sédiments du fond du lac et pour les courants qui les transportent, ainsi que pour les plantes, les animaux et les communautés microbiennes remarquables qui peuplent les sédiments lacustres. Avec une certaine préoccupation, il avait aussi déjà remarqué la pollution du lac engendrée par le développement accéléré des populations riveraines.

Ce chapitre explore, du point de vue de Forel, quelques-uns des thèmes auxquels le projet *elemo* s'est intéressé. Il aborde la question des motivations et ambitions de Forel en réunissant autant de disciplines afin de forger la science des lacs. Ce fut cette perspective innovatrice et multidisciplinaire qui lui a ainsi permis de créer d'une nouvelle science « intégrative » qu'il nomma limnologie et qui jeta les bases de l'étude moderne des lacs <sup>[2]</sup>, approche dans laquelle s'inscrit le projet *elemo*.

## Mouvements d'eau et transparence du lac

Les eaux d'un lac sont constamment en mouvement ; de celui des molécules, aléatoire, associé à la diffusion et au mélange turbulent, aux énormes tourbillons appelés « gyres » qui peuvent s'étendre sur toute la longueur et la largeur d'une étendue d'eau <sup>Chap. 3</sup>. Forel s'intéressait beaucoup au mouvement de l'eau dans le Léman à toutes les échelles, et notamment à la variété des influences des vents sur la genèse de ces mouvements. Il nota, par exemple, qu'il peut y avoir un écoulement de retour d'eau profonde dans la direction opposée au vent et aux courants de surface : « J'en ai prouvé l'existence par l'entraînement des filets des pêcheurs arrachés de leurs marques par la tempête qu'il faut aller chercher parfois à des kilomètres sur le vent. » <sup>[1]</sup> Des plus anciens récits des bateliers ou pêcheurs du Léman aux équipes prenant part aujourd'hui à la course de yachting du Bol d'Or Mirabaud, la complexité des vents du Léman a toujours été relevée et discutée. Forel débute son traité en trois volumes avec un glossaire des termes qui inclut plusieurs des noms locaux utilisés pour désigner des vents provenant de différentes directions : « Bise, vent nord-est ; Bornan, vent du sud, venant de la vallée de la Drance ; ... Joran, vent du nord-ouest ; ... Rebat, brise du lac, brise diurne... » <sup>[3]</sup>

Forel était aussi particulièrement fasciné par les ondulations du lac connues localement sous le nom de seiches : « Les seiches ont été une de mes études favorites et m'ont occupé pendant bien des années. J'ai eu la grande joie d'amener à la solution d'un problème qui intriguait les physiciens depuis plusieurs siècles. »<sup>[1]</sup> Ces études débutèrent par l'observation des mouvements périodiques de l'eau qui entraient et qui sortaient du port de Morges, et il supposa, à juste titre, qu'ils étaient dus au balancement des eaux pouvant produire des ondulations sur toute la longueur ou la largeur du lac. Il développa plusieurs instruments pour mesurer ces changements de niveau du lac, incluant un engin portatif qu'il apportait avec lui au lac de Constance et ailleurs Fig. 3. Grâce à ses mesures rigoureuses, il fut capable de développer une théorie quantitative et une formulation mathématique du phénomène. Son instrumentation faisait l'objet de l'admiration de plusieurs scientifiques. Par exemple, le professeur John Le Conte de l'Université de Californie à Berkeley (Californie), écrit à Forel en 1884 et mentionne qu'il aimerait installer un de ces « instruments automatiques » du côté ouest du lac Tahoe, un lac de la taille du Léman situé sur la frontière entre la Californie et le Nevada.

Forel était toujours à l'affût de nouvelles technologies qu'il pourrait appliquer à ses études limnologiques du Léman. Une des inventions les plus importantes de l'époque pour la recherche océanographique fut le thermomètre à renversement Fig. 4, qui permettait de mesurer la température de l'eau avec une grande précision à toutes les profondeurs. Forel accueillit cette invention avec grand enthousiasme : « Aussi saluai-je avec joie dans l'hiver de 1879 l'invention de l'excellent thermomètre à renversement Negretti et Zambra qui, protégé contre la pression, et cependant d'équilibre rapide, descendu dans la couche à explorer, indique la température exacte à 1/10<sup>e</sup> de degré centigrade près. Je m'en procurai immédiatement un et dès le 14 mai 1879, je fis des séries de sondages superposés qui me donnèrent la courbe des isothermes dans les profondeurs du lac. »<sup>[1]</sup>

Les mesures de température très précises effectuées par Forel révélèrent plusieurs caractéristiques du lac, notamment la toute première preuve que la *thermocline* peut se déplacer de haut en bas. Ce mouvement fut décrit plus tard au Loch Ness en Ecosse comme une seiche thermique<sup>[4]</sup>. La grande importance hydrodynamique de cette vague sous la surface, la seiche interne, est désormais reconnue pour tous les lacs, incluant le Léman <sup>Chap. 3.</sup>

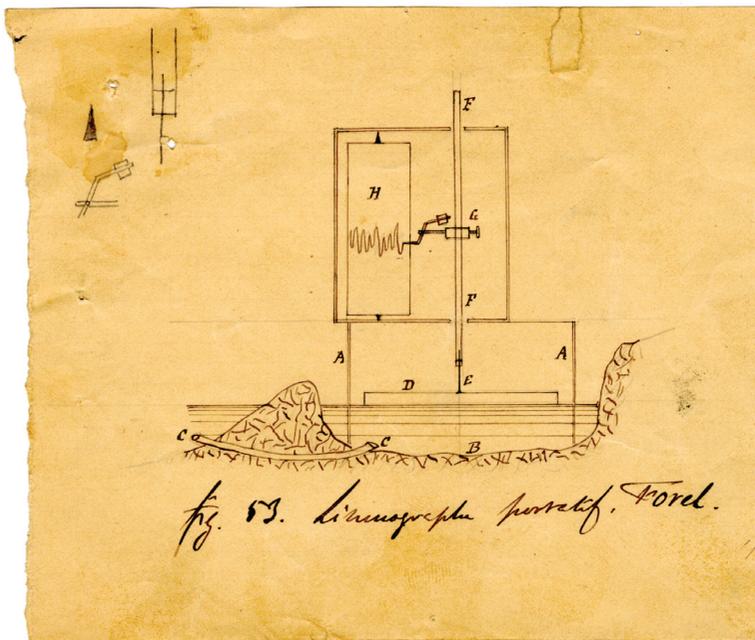
#### **Thermocline**

Le gradient de température dans la zone de transition thermique rapide entre les eaux superficielles et profondes d'un lac.

**Fig. 3** [a] Limnographe portatif, modèle Forel, dans sa caisse de transport. Il existait à son époque plusieurs appareils fixes et de grande taille, dit Limnimètres enregistreurs, autour du lac (Genève, Thonon, Morges). Ce petit appareil avait été imaginé par Forel pour l'accompagner dans ses déplacements. Construit par J. Cauderay en 1878 à Lausanne, il mesurait 52 cm de hauteur, et son dispositif enregistreur simplement remonté à l'aide d'une clé. [b] Un flotteur en zinc complétait le dispositif (D). Installé en quelques dizaines de minutes, il permit à Forel d'étayer son hypothèse que les seiches n'apparaissaient pas en mouvements isolés ou déréglés, mais en séries continues de période constante et de hauteur régulièrement décroissante. (Musée du Léman, fonds FAF, photographie Aurelio Moccia, 2012)



a



b

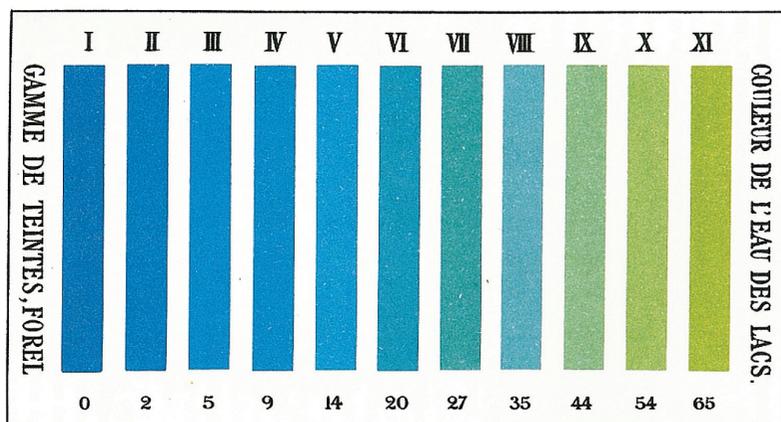
**Fig. 4** Thermomètre à renversement de Forel. L'invention du thermomètre à renversement par Negretti et Zambra révolutionna les connaissances en matière de variation saisonnière de la température des lacs. La chance sourit à Forel avec la survenue d'un hiver très rigoureux en 1879 à 1880 qui lui permit de démontrer grâce à ce thermomètre le déplacement vertical de la thermocline. Ce phénomène, également observé par la suite au Loch Ness, permit d'établir l'existence de seiches thermiques ou seiches interne. (Musée du Léman, fonds FAF, photographie Aurelio Moccia, 2012)



**Fig. 5** Disque de Secchi. Ce dispositif simple, inventé par un Jésuite italien en 1865, fut également utilisé par Forel. Il put ainsi démontrer que les lacs bleus étaient plus limpides que les verts et que la transparence des lacs variait au fil des saisons, principalement à cause du développement du plancton. (Musée du Léman, fonds FAF, photographie Aurelio Moccia, 2012)



## Numéros de la Gamme Forel.



Tant pour cent de solution jaune dans la bleue.

**Fig. 6** Gammes de teinte. Forel imagine ce dispositif afin de comparer les couleurs des lacs et d'en tirer des considérations scientifiques. Largement popularisée de son vivant, cette invention a été utilisée également en océanographie, ce qui valut à son auteur la reconnaissance du Musée océanographique de Monaco. Un principe similaire est encore utilisé de nos jours pour analyser les données obtenues par satellite et télédétection. (Musée du Léman, fonds FAF, photographie Aurelio Moccia, 2012)

Forel était également fasciné par la transparence et la couleur des eaux du Léman : « Quel peintre a sur sa palette des tons aussi riches et une gamme de couleurs aussi brillamment fondues et harmonisées ! » [5] La mesure de la lumière subaquatique et de ses changements spectraux en fonction de la profondeur est aujourd'hui un aspect important de la limnologie physique, et Forel a appliqué toute une variété de méthodes pour la mesurer. Il utilisait un instrument inventé depuis peu en océanographie, le disque Secchi Fig. 5, pour mesurer la transparence du lac et ses changements saisonniers. Il incubait aussi des plaques photographiques à différentes profondeurs de la colonne d'eau du Léman pour des périodes de 24 heures, d'un crépuscule à l'autre, afin de quantifier les changements de la radiation solaire selon la profondeur. Dans ce domaine de recherche, Forel est particulièrement reconnu pour son élaboration d'une échelle de la couleur de l'eau Fig. 6 qui pouvait être utilisée afin de comparer différentes eaux lacustres et marines. Cette échelle est toujours utilisée de nos jours et permet des comparaisons historiques avec des mesures actuelles de couleur obtenues par satellite et télédétection [6].

## Géomorphologie

Dans le premier des trois volumes de sa *Monographie* sur la limnologie du Léman, Forel accorde beaucoup d'importance à la géomorphologie, aux origines géologiques et aux caractéristiques sédimentaires du lac. Sa compilation de données bathymétriques (mesures de profondeur Lac Léman), incluant plusieurs milliers de sondages effectués par André Delebecque,

limnologue français de renom basé à Thonon-les-Bains, lui a permis de produire une carte bathymétrique détaillée qui a été largement utilisée tout au long du XX<sup>e</sup> siècle Fig. 7. Il identifia les processus d'érosion et d'accrétion donnant naissance à la ligne de rivage observée du lac. Certaines de ses idées n'ont pourtant pas résisté à l'épreuve du temps ; il refusait ainsi d'accepter le rôle majeur joué par les processus glaciaires qui sont de nos jours reconnus pour avoir creusé le bassin du lac Léman. Il attribua également à tort l'origine du lac à l'érosion fluviale. Dans d'autres domaines toutefois ses conclusions se sont avérées remarquablement perspicaces.

Les interactions entre le Haut-Rhône et le Léman étaient d'un grand intérêt pour Forel. Elles ont aussi été au cœur des recherches du projet *elemo*. Dans le premier volume de sa *Monographie*, Forel décrit avec sa combinaison typique de sagacité scientifique et d'émerveillement pour la nature, le plongeon qu'effectue cet affluent dans le lac Fig. 8 : «...les eaux du fleuve d'été, entraînées par l'impétuosité du courant, s'avancent dans le domaine du lac à quelque cent mètres de distance, puis, sur l'influence de la pesanteur, par le fait de leur densité plus lourde, plongent tout à coup sous les eaux bleues du lac. Cette cascade sous-lacustre est d'un grand effet ; elle mérite d'être étudiée et admirée.» [3]

Forel avait vu juste en supposant que les eaux denses du Rhône voyagent pendant plusieurs kilomètres le long du fond du lac Léman et qu'elles sont responsables de l'existence d'un canyon (ou ravin), particularisme remarquable de sa carte bathymétrique. Il avait cependant noté que ces canyons se

**Fig. 7** La carte bathymétrique du lac Léman de Forel, incluse en dépliant dans le premier volume de sa *Monographie* [3].



**Fig. 8** La disparition des eaux froides et turbides de la Rhône à l'endroit où elles plongent sous la surface du lac Léman. Forel avait correctement supposé que leur trajet se poursuit le long du fond du lac sous la forme d'un écoulement de densité donnant lieu à un canyon subaquatique.



retrouvaient aussi dans d'autres lacs recevant des apports glaciaires et conclut : « le ravin sous-lacustre des fleuves glaciaires est dû à la prolongation du courant fluvial dans le domaine du lac. »<sup>[3]</sup> Pour la formation de la morphologie de ce ravin, Forel favorisait un mécanisme basé sur l'accumulation sédimentaire de chaque côté de l'écoulement. Mais il est aujourd'hui bien connu que l'érosion joue aussi un rôle important. Des études récentes du canyon du Rhône ont démontré qu'au cours d'une période de quatre ans, cet écoulement d'eau profonde est responsable d'une érosion remarquable de huit mètres de profondeur <sup>Chap. 4.</sup>

## La vie dans les profondeurs

### Nématodes

Les vers ronds, un embranchement très diversifié de vers non segmentés.

Au cours de la première année suivant son retour à Morges, Forel concentra ses études lacustres sur deux sujets qui occupèrent une grande partie de sa vie scientifique au cours des décennies suivantes : les seiches de surface du lac, et les caractéristiques des sédiments de fond, incluant les animaux qui y vivent <sup>Fig. 9 et 10.</sup> Il fut surpris d'observer un *nématode* dans un des premiers échantillons qu'il ramena du fond du lac près de Morges en 1869. Ce soir-là, il construisit une drague et le jour suivant, remonta des échantillons de fond provenant de profondeurs encore plus grandes : « Je constatais l'existence d'animaux nombreux et divers... jusque dans les plus grands fonds du Léman. »<sup>[1]</sup>

Au cours des années suivantes, Forel travailla avec plusieurs collaborateurs en Suisse et dans d'autres pays afin de décrire et d'identifier ces animaux vivant dans le fond du

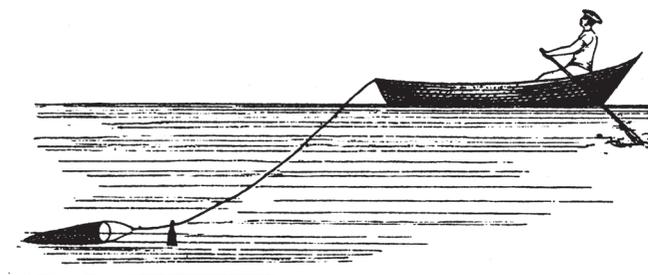
**Fig. 9** [a et b] Dragues, [c] méthode de draguage. Alors que l'on pensait que les fonds maritimes ou lacustres étaient totalement inhabités passé la limite de la pénétration de la lumière, Forel découvre fortuitement, en 1869, l'existence d'une faune abyssale dans le Léman. Il développe divers types de dragues afin d'établir l'inventaire de cette faune profonde, une recherche qui va l'occuper durant sa vie entière, et donner une reconnaissance internationale aux contributions amenées par la Limnologie. (Musée du Léman, fonds FAF, photographie Aurelio Moccia, 2012)



a



b



c

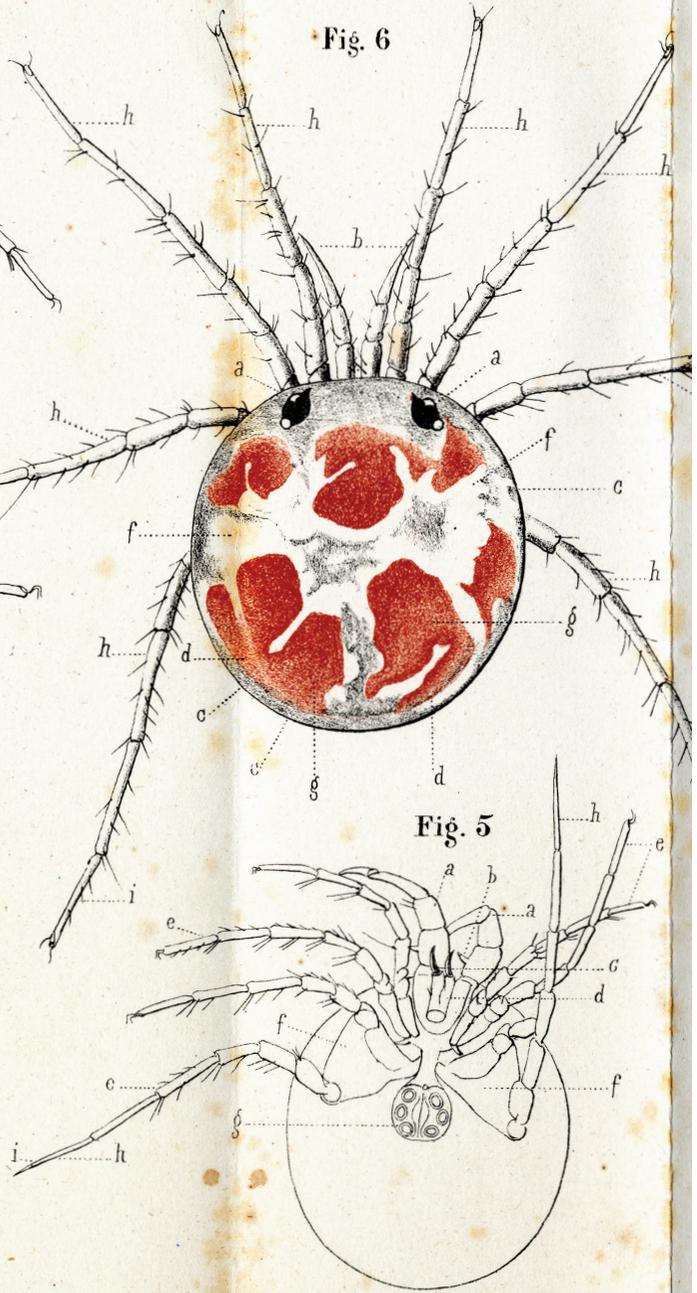
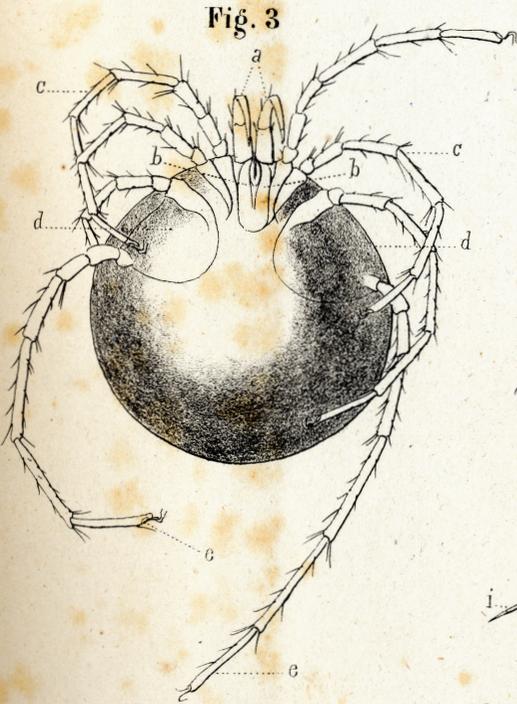
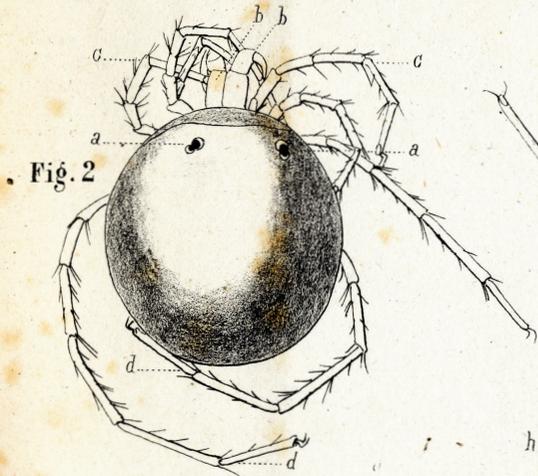
**Fig. 10** → Un des minuscules animaux provenant des sédiments du fond du lac Léman. L'importance écologique de cette communauté benthique a capté l'imagination de Forel qui la décrit dans ces mots : « Ils vivent comme les chiffonniers de nos grandes villes, comme les chiens de Constantinople, des débris de la table des autres ; ils recueillent tout ce qui descend dans le fond du lac... ».

Léman. Ces efforts aboutirent à 50 rapports publiés, incluant un volume réunissant une collection intitulée *La faune profonde des lacs suisses*<sup>[7]</sup>, qui présentait également des informations sur les caractéristiques physiques et chimiques du Léman et d'autres lacs. Ceci l'amena à la conclusion que, non seulement il y avait une diversité remarquable d'espèces dans ces sédiments de fond, mais qu'ils jouaient aussi un rôle fonctionnel important dans l'écosystème lacustre : « Le rôle de la faune profonde est des plus simples. Les petits animaux qui la composent utilisent les résidus et les débris tombés des couches supérieures dans les couches inférieures, dans la zone profonde du lac. Ces petits êtres obscurs et modestes sont des travailleurs à leur manière : ils mangent, ils secrètent, ils se reproduisent. Ils vivent comme les chiffonniers de nos grandes villes, comme les chiens de Constantinople, des débris de la table des autres ; ils recueillent tout ce qui descend dans le fond du lac... »<sup>[8]</sup>

Forel avait débuté son échantillonnage des fonds à Morges car il s'intéressait aux cannelures dans les sédiments. Les morphologies variées du fond du lac Léman ont aussi été un sujet important dans le cadre du projet *elemo*<sup>Chap. 5</sup>. Dans le volume 2 de sa *Monographie*<sup>[9]</sup>, il consacre 24 pages à la question « Comment se forment les rides de fond ? » Il conclut correctement que ces dunes de sable miniatures et irrégulières sont associées à l'action des vagues dans le lac. Mais il serait sans doute surpris d'apprendre que la forme de ces cannelures est peut-être aussi en partie déterminée par certains micro-organismes présents dans les sédiments, connus aujourd'hui pour sécréter des matériaux adhésifs qui affectent la liaison entre les grains de sable<sup>[10]</sup>.

L'étude de la microbiologie et des processus microbiens dans les sédiments du lac Léman était un des principaux objectifs du projet *elemo*. Ce sujet était d'un grand intérêt pour Forel, qui avait observé que les sédiments contiennent une concentration de bactéries beaucoup plus élevée que l'eau qui les submerge, et qu'ils sont souvent recouverts d'une couche microbienne distinctive qu'il appelait le « *feutre organique* ». Il fit parvenir des échantillons de ce matériel à des spécialistes des algues qui identifièrent la présence de cyanobactéries filamenteuses, d'algues vertes mucilagineuses et de nombreuses autres espèces<sup>Chap. 6</sup>. Dans une de ses expériences, il incuba des sédiments provenant du lac dans un aquarium et observa la croissance du feutre organique, confirmant ainsi son origine biologique. Il décrivit aussi au sujet de ce feutre organique « une couche distincte, d'aspect velouté, aux contours

**Feutre organique**  
Une couche algale sur les sédiments du Léman.





**Fig. 11** Forel herborisant à bord d'un bateau limnologique de son époque. Les diverses plantes aquatiques colonisant la beine lacustre ont fait également l'objet d'investigations très poussées par Forel. Déjà à son époque, il s'est particulièrement intéressé au développement de nouvelles espèces invasives, telle que l'Elodée du Canada. Il nomma d'ailleurs son bateau, *Elodea*, car il s'agissait d'un « canot en forme », un bateau de type nouveau apparu lui aussi sur le Léman vers les années 1880. (Musée du Léman, fonds FAF, reproduction Aurelio Moccia, 2012)

superficiels mous et arrondis, parfois soulevée et détachée du limon par une bulle de gaz qui vient de la profondeur de la masse terreuse, parfois percée par un trou circulaire, là où une bulle de gaz s'est dégagée.» [8] et Chap. 5 Ceci constitue peut-être le premier indice de la production de méthane dans les sédiments du Léman; un aspect examiné en détail au cours du projet *elemo* Chap. 7.

Forel effectua aussi plusieurs observations sur les plantes aquatiques du Léman, telles que les mousses d'eau profonde présentes sur les substrats rocheux et il décrivit avec admiration leur croissance prolifique dans les parties côtières du lac Fig. 11 : « Les fonds limoneux ou vaseux de la beine sont couverts d'une belle végétation de plantes lacustres qui y forment de véritables forêts aquatiques, aussi pittoresques, aussi mystérieuses, aussi attrayantes que les plus belles forêts de nos montagnes. » [8]

## L'écosystème lacustre

Forel formula les principes fondateurs de la limnologie à la fin d'un siècle au cours duquel de nombreux concepts avaient émergé en biologie, captant l'imaginaire des scientifiques aussi bien que du public. On retrouve parmi ceux-ci la théorie de l'évolution, publiée par Charles Darwin en 1859, et la notion d'écologie, un mot forgé en 1866 par Ernst Haeckel qui, comme Forel, était historien de la nature et médecin.

Forel lisait abondamment et il était au fait de la littérature américaine dans le domaine de l'écologie et des sciences environnementales. Par exemple, il épousa l'idée émise par Forbes (1887) du lac en tant que microcosme dans le sens où la matière organique est recyclée à l'intérieur de l'écosystème lacustre: «Quel est, dans ce microcosme qu'est le lac, le rôle spécial, ou si l'on veut, la fonction, ou l'utilité, ou la place dans le plan de la nature, des organismes associés dans les diverses "communautés" biologiques que nous y avons reconnues?»<sup>[7]</sup> Sa description du réseau alimentaire aquatique et du cycle du carbone fut saluée plusieurs décennies plus tard par le fameux écologiste américain Raymond Lindeman qui qualifia le travail de Forel de fondamental à la définition du concept de la «dynamique trophique».

Forel était bien conscient toutefois, que les lacs ne sont pas des systèmes fermés, mais sont plutôt sujets aux apports et aux exports, via l'eau et l'atmosphère. Un tel point de vue est d'une importance capitale de nos jours afin de comprendre le destin des contaminants qui entrent dans le lac Léman<sup>Chap. 8</sup>. Dans l'introduction d'une monographie en allemand, Forel écrit en 1891: «Plutôt, un lac communique avec le reste du monde, que ce soit par des échanges incessants de gaz qu'il entretient avec l'atmosphère ambiante, par ses exutoires qui emportent les substances dissoutes et non dissoutes, et par ses tributaires qui lui font parvenir de nouvelles matières.»

## Perspectives microbiennes

Aujourd'hui nous savons que les micro-organismes jouent un rôle vital dans le fonctionnement des écosystèmes aquatiques<sup>Chap. 6</sup>, et Forel nous a fourni la première preuve de leur importance pour le lac Léman. Il avait en effet observé que même les eaux propres naturelles contiennent des microbes, mais mettait aussi en garde son lecteur de ne pas s'en alarmer: «En second lieu, et c'est là un point très important, tout microbe n'est pas nécessairement malsain, bien au contraire; l'immense majorité de ces petits êtres sont parfaitement innocents.»<sup>[9]</sup> Il en vint à la conclusion que les bactéries étaient omniprésentes dans le lac: «Aucune analyse sérieuse, à ma connaissance, n'a constaté de l'eau lacustre absolument

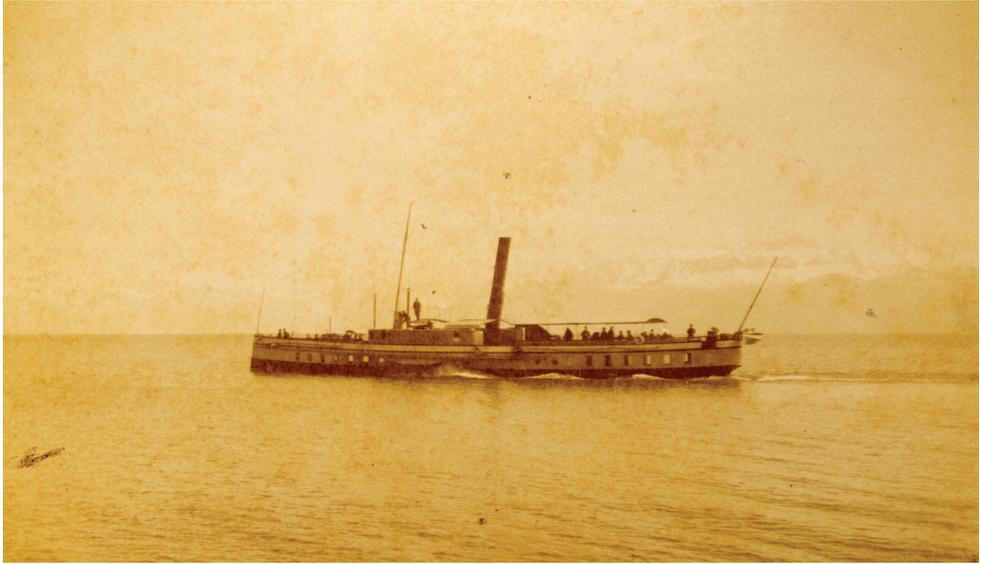
libre de microbes.»<sup>[8]</sup> Il souligna que la taille des populations bactériennes était particulièrement élevée dans les eaux usées et dans les secteurs du lac situés à proximité des déversoirs d'égouts, tandis que les concentrations les plus basses se trouvaient dans la zone pélagique du large.

Forel sépara les bactéries en groupes fonctionnels et souligna leur rôle essentiel dans le cycle du carbone des écosystèmes lacustres à travers la dégradation (« putréfaction ») des matières organiques. Il serait surpris d'apprendre qu'avec nos méthodes modernes, nous savons à présent que ces minuscules organismes constituent une large proportion de la biomasse totale, de la biodiversité et de l'activité biologique des lacs, et que des microbes encore plus petits, les virus, sont encore plus abondants dans les eaux lacustres et jouent un rôle tout aussi vital dans le système de la vie aquatique.

## La présence humaine

Dès son enfance, Forel fut sensibilisé à l'importance du Léman pour les populations habitant son bassin. En développant la limnologie, Forel a clairement indiqué que les activités humaines passées et présentes faisaient partie intégrante de la structure et du fonctionnement des lacs. Dans le troisième volume de sa *Monographie*, il dresse la liste des espèces aquatiques et semi-aquatiques de l'écosystème lacustre et place les êtres humains au premier rang : « vertébrés, mammifères, primates. L'Homme, *Homo sapiens* L., n'est pas une espèce essentiellement aquatique ; il ne le devient que par ses occupations professionnelles. Les métiers de pêcheur, de batelier, de lavandière, les exercices du bain, etc., amènent bon nombre d'hommes à une vie semi-lacustre, et en feraient presque une espèce erratique dans la faune du lac.»<sup>[8]</sup>

Forel ajoute que les êtres humains ont aussi des impacts négatifs sur les eaux du lac : « D'une autre part l'industrie de l'Homme le conduit à intervenir dans l'économie du lac ; il bâtit des ports et des quais, il endigue les affluents, il barre l'émissaire, il déverse dans le lac les produits de ses usines, les égouts de ses villes, les cendriers de ses bateaux à vapeur, etc. Toutes ces actions modifient les conditions physiques du lac et interviennent directement ou indirectement dans les faits biologiques de ses habitants. Il exerce plus que tout autre animal une action puissante sur la nature et les êtres qui l'entourent... Nous l'inscrivons dans la classe des espèces adventices de la faune du Léman.»<sup>[8]</sup> Un tel point de vue est particulièrement pertinent à notre époque, où les effets anthropiques sur le changement environnemental se font sentir à l'échelle planétaire Fig. 12.



**Fig. 12** Forel comprit rapidement que les activités des sociétés humaines avaient des incidences sur les écosystèmes aquatiques. Il s'intéressa notamment aux conséquences de la construction des ports, de la navigation et l'immersion de déchets divers dans les lacs, comme les scories de bateaux à vapeur sillonnant le Léman dès 1823. Rare tirage d'après plaque de verre signée FAF (François Alphonse Forel), vers 1879. (Musée du Léman, fonds FAF, reproduction Aurelio Moccia, 2012)

Forel attire l'attention sur les relations intimes qu'un lac entretient avec son bassin versant. La limnologie moderne ne fait pas qu'épouser ce point de vue mais le porte plus loin encore, en considérant les lacs comme des sentinelles et des intégrateurs de changements environnementaux<sup>[11]</sup>. Dans le deuxième volume de sa *Monographie*, Forel se penche sur la question de la sécurité du lac Léman comme source d'eau potable. En tant que médecin, il était profondément conscient des maladies dont l'eau est le vecteur et de la possibilité de transfert de microbes infectieux de la terre vers les eaux de ruissellement et par conséquent dans celles du lac : « Un lac est un réservoir, où aboutissent les eaux de drainage d'un vaste bassin d'alimentation ; les égouts d'un grand nombre de villes et de villages, les eaux d'arrosage des prés et des champs, les résidus de la vie d'une énorme population humaine et animale y arrivent directement ou indirectement ; c'est le rendez-vous de toutes les eaux du pays, eaux souvent sales, parfois infectées. A première vue, le danger de la propagation des maladies infectieuses paraît considérable si l'on prend l'eau d'un lac pour l'alimentation. »<sup>[9]</sup>

Toutefois, Forel insiste sur trois facteurs inhérents au lac et qui atténuent ou éliminent le risque d'une telle contamination : tout d'abord l'énorme facteur de dilution induit par les 89 milliards de mètres cubes d'eau du lac Léman, puis les basses températures et les concentrations diluées de matières

### Eutrophisation

Enrichissement des eaux en matières nutritives qui entraîne l'accroissement de la production d'algues et la dégradation de la qualité d'eau.

organiques dans le lac qui ne sont pas favorables à la croissance de pathogènes et, enfin, la consommation des microbes par de minuscules animaux du réseau alimentaire très rapidement après leur entrée dans le lac. Il voyait ainsi le lac comme une source pratiquement inépuisable d'eau de très bonne qualité: «En résumé, un lac comme le Léman fournit une eau d'alimentation de qualité excellente, égale ou supérieure à beaucoup de points de vue aux eaux de source. L'eau d'un lac est très recommandable au point de vue hygiénique.»<sup>[9]</sup> Forel aurait été désolé par la détérioration de la qualité des eaux du Léman au cours du XX<sup>e</sup> siècle, due pour une grande part à son *eutrophisation* et à l'arrivée de nouveaux contaminants bactériens et chimiques dans le lac provenant d'autres activités humaines dans son bassin versant <sup>Chap. 6 et 8.</sup>

### La limnologie : branche de la géographie

L'océanographie, qui est parvenue à maturité au cours du XIX<sup>e</sup> siècle, eut une grande influence sur le développement des idées et des approches de Forel, au point où il définit la limnologie comme l'«océanographie des lacs» <sup>Fig. 13 [3].</sup> Tout au long de ce siècle, des expéditions sillonnèrent les océans du globe et chacune rapporta des mesures détaillées de variations de salinité, de température et des courants marins, ainsi que des comptes rendus de la diversité remarquable de la vie marine. Parmi elles, l'expédition la plus importante, celle qui bâtit les fondations de l'océanographie moderne, fut l'expédition *Challenger*, organisée par la Royal Society of

**Fig. 13** La salle consacrée à l'invention de la science des lacs, dénommée Limnologie par Forel, inaugurée en 2014 au Musée du Léman présente les instruments scientifiques de Forel et quelques-unes de ses découvertes fondamentales. Sa monumentale monographie en trois tomes, *Le Léman*, obtient lors de la parution en 1892 du tome premier une reconnaissance internationale. Elle lui doit aujourd'hui d'être justement considéré comme le fondateur de cette nouvelle science dont il a aussi forgé le nom. (Photographie François Bertin, Grandvaux, 2012)



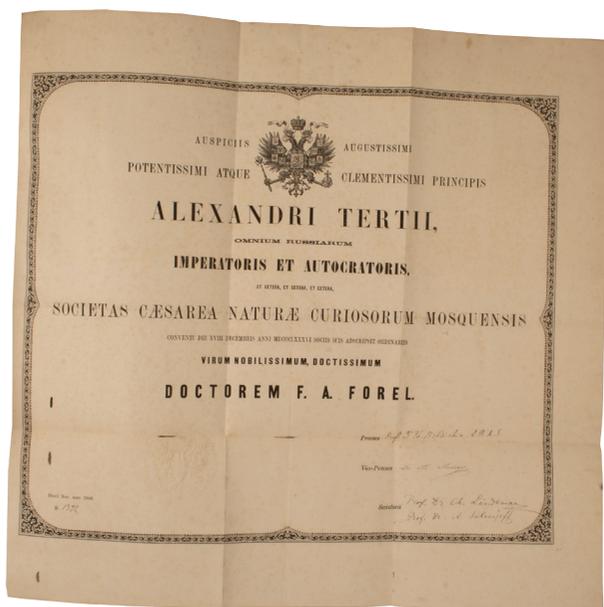
London. Elle se déroula entre 1872 et 1876 à bord du vaisseau *HMS Challenger* qui parcouru plus de 125 000 kilomètres afin d’inventorier les propriétés physiques, chimiques et biologiques des océans, avec un intérêt particulier pour les grandes profondeurs. Les données recueillies au cours de ce périple ont été compilées dans 50 volumes publiés entre 1877 et 1895. Mis à part le foisonnement d’informations hydrographiques, ces volumes contiennent la description de 4700 nouvelles espèces marines. Forel était bien au courant de ce travail et, en 1886, il lança une proposition internationale pour un « Programme d’études limnologiques » des lacs subalpins de l’Europe. Cette idée faisait suite à une conférence qui avait eu lieu en Allemagne et qui avait pour but d’organiser un inventaire systématique (mais irréaliste, selon l’opinion de Forel) du lac de Constance, calqué sur l’expédition Challenger.

La science qui semble avoir eu la plus grande influence sur Forel est la géographie, et en particulier son approche intégrative qui tente d’établir les liens entre l’information disparate provenant de plusieurs disciplines afin de générer des synthèses générales. Etant donné l’ampleur de la diversité de ses sujets de recherche sur le lac Léman, cette approche lui plaisait particulièrement et il en a fait le concept central dans sa définition de la limnologie : « J’ai voulu faire une généralisation résumant dans une vue d’ensemble les faits détaillés, appuyant chaque étude spéciale sur les données fournies par les autres études. »<sup>[3]</sup>

La géographie possède une longue histoire qui s’étend de la Grèce antique jusqu’à nos jours. Comme plusieurs autres champs académiques, elle a traversé une période de progrès accéléré au cours du XIX<sup>e</sup> siècle. Forel était sans aucun doute au courant des travaux originaux du géographe allemand Alexander von Humboldt, qui publia en 1845 le premier volume *Kosmos*, une œuvre magistrale acclamée tant par le monde académique que par le grand public. Dans cet ouvrage, qui comptera finalement cinq volumes, Humboldt tente d’unifier les connaissances provenant de plusieurs domaines, en commençant par l’astronomie et la géographie physique, puis en incluant les plantes, les animaux, les humains, l’esthétique et la perception humaine de la nature.

Suivant les traces de Humboldt, Forel s’intéressait aussi à tous ces aspects de la connaissance, incluant l’esthétique de la nature, mais son but était surtout d’atteindre la « synthèse géographique » de Humboldt : « La Géographie, en effet, a une noble ambition et un magnifique programme : entraînée par sa définition, elle aspire à embrasser dans une vaste

**Fig. 14** La réputation de Forel dépassa largement les frontières suisses de son vivant. Membre de la Société Impériale des Sciences Naturelles de Moscou, il fut honoré à ce titre à deux reprises, la dernière en 1889 par Alexandre III, empereur de Russie. (Collection privée, photographie Aurelio Moccia, 2012)



généralisation l'ensemble des sciences qui traitent de la terre et ses habitants... »<sup>[8]</sup> Au Congrès géographique international de 1895 à Londres, en Angleterre, Forel fut invité à prononcer un discours expliquant cette définition inclusive de la science des écosystèmes lacustres. Sa présentation s'intitulait : « La Limnologie : Branche de la Géographie » Fig. 14.

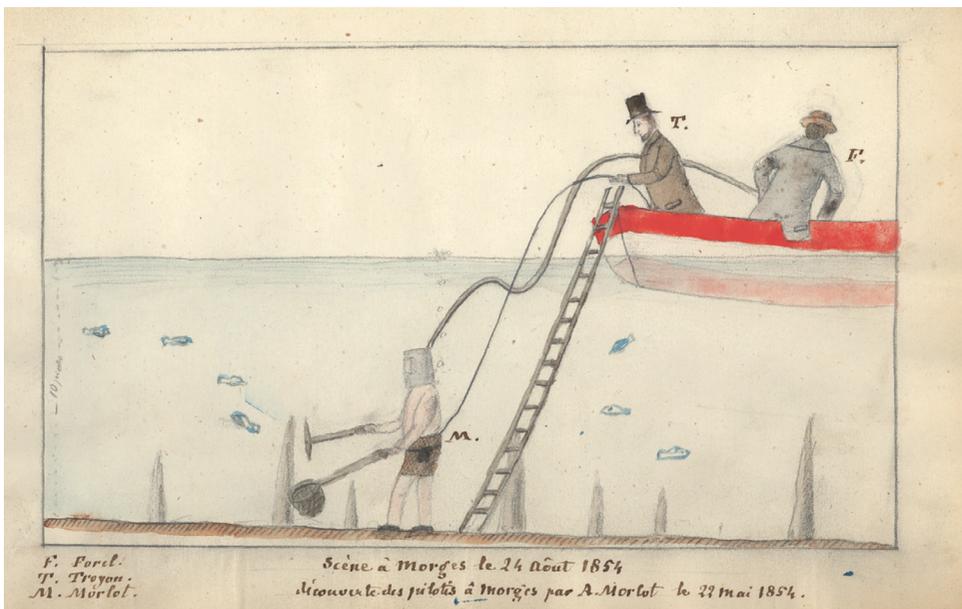
## Nouvelles lumières

A la différence du point de vue qui place l'Homme au-dessus de la Nature, Forel a décrit comment les humains sont une composante intrinsèque des écosystèmes lacustres. Il a attiré l'attention sur la valeur des services écosystémiques qui nous sont rendus par la pêche, l'eau potable, les transports mais aussi au niveau esthétique, et sur notre capacité à les perturber en dégradant sévèrement l'environnement aquatique. Il nous a laissé une myriade de contributions spécifiques, allant de la morphométrie et de la physique des lacs aux réseaux alimentaires en passant par les microbes et le cycle du carbone de l'eau douce. Ses perspectives sur les lacs en tant que systèmes « anthropo-bio-physico-chimiques » sont hautement pertinentes pour notre compréhension des effets des changements climatiques et autres bouleversements à l'échelle planétaire sur les lacs. Sa vision a ouvert la voie vers une limnologie intégrative du changement planétaire, qui est essentielle afin de relever les nombreux défis qui se dressent devant nous.

**Fig. 15** Plongée de Morlot, Troyon et Forel, en 1854. Le père de Forel participa à cette première plongée scientifique dans le Léman destinée à recueillir des objets archéologiques par faible profondeur. Elle fut considérée comme un échec, car elle ne permit de recueillir aucun objet et ne fut donc pas répétée. Elle fit cependant une très forte impression sur le jeune Forel âgé alors de 13 ans. Elle contribua à la naissance de sa vocation pour l'étude des lacs et l'incita à découvrir, par tous les moyens possibles, leurs trésors bien qu'aucun moyen d'y pénétrer n'existait à son époque. Forel eût apprécié grandement les possibilités d'études offertes par le projet *elimo*. (Musée historique de Berne, Berne)

Après plus de 1800 pages consacrées à une analyse exhaustive de tous les aspects connus du Léman, de la géologie, la physique et la biologie en passant par les villages néolithiques qui parsemaient son rivage, Forel demande: reste-t-il quelque chose à étudier dans ce lac? Et sa réponse à cette question est un oui massif: «Est-ce à dire qu'il ne reste plus rien à étudier dans notre lac et que j'ai épuisé tous les problèmes d'histoire naturelle que le Léman puisse offrir? Qu'on ne m'attribue pas une telle sottise!... Je pourrais croire avoir tout ramassé, j'ai du moins recueilli tous les brins de chaume qui ont frappé mon œil. Mais parce que je suis au bout de mon œuvre, le champ doit-il être considéré comme fermé? N'y a-t-il plus rien à récolter? Loin de là. D'autres viendront après moi qui y trouveront de nombreuses et d'épaisses javelles.»<sup>[8]</sup>

Dans ces dernières pages de sa *Monographie*, Forel décrit comment, à la manière dont lui-même et ses contemporains se dressèrent sur les épaules des grands scientifiques du passé, d'autres viendraient avec de nouvelles méthodes et approches, et «avec l'éclairage de nouvelles lumières» ils et elles corrigeraient et ajouteraient à ses «antiques recherches». Si Forel était vivant aujourd'hui, il serait parmi les premiers à célébrer l'expédition *elimo*, et à accueillir les découvertes décrites dans les chapitres de ce volume avec une immense curiosité et un profond intérêt <sup>Fig. 15.</sup>



- [1] Forel F.D.C. (éd.) (2012). *Forel et Le Léman: Aux sources de la limnologie*, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, pp. 77-78.
- [2] Vincent W.F., Bertola C. (2012). François Alfonse Forel and the Oceanography of lakes, *Archives des Sciences*, 65, pp. 51-64.
- [3] Forel F.A. (1892). *Le Léman – Monographie Limnologique*, Editions Rouge Lausanne, Tome I, 543 pp.
- [4] Wedderburn E.M., Williams A.M. (1911). The Temperature Seiche Pt. II, Hydrodynamical Theory of Temperature Oscillations, *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 47, pp. 628-654.
- [5] Forel F.A. (1877). Notice sur l'histoire naturelle du lac Léman, in E. Rambert, Lebert, Ch. Dufour, F.A. Forel, S. Chavannes (éds), *Montreux*, H. Furrer, Neuchâtel, pp. 217-243.
- [6] Wernand M.R., van der Woerd H.J. (2010). Spectral Analysis of the Forel-Ule Ocean Colour Comparator Scale, *Journal of the European Optical Society*, 5, pp. 100-145.
- [7] Forel F.A. (1884). La faune profonde des lacs Suisses, *Mémoire de la Société Helvétique des Sciences Naturelles*, 234 pp.
- [8] Forel F.A. (1904). *Le Léman – Monographie Limnologique*, Editions Rouge Lausanne, Tome III, 715 pp.
- [9] Forel F.A. (1895). *Le Léman – Monographie Limnologique*, Editions Rouge Lausanne, Tome II, 651 pp.
- [10] Mariotti G., Pruss S.B., Perron J.T., Bosak T. (2014). Microbial Shaping of Sedimentary Wrinkle Structures, *Nature Geoscience*, 7, pp. 736-740.
- [11] Williamson C.E., Saros J.E., Vincent W.F., Smol J.P. (2009). Lakes and Reservoirs as Sentinels, Integrators, and Regulators of Climate Change, *Limnology and Oceanography*, 54, pp. 2273-2282.