

Zeitschrift: Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Herausgeber: Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Band: 15 (1877-1878)
Heft: 78

Artikel: Contributions à l'étude de la limnimétrie du Lac Léman. Part 2
Autor: Forel, F.-A.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-287507>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 12.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

CONTRIBUTIONS

A L'ÉTUDE DE LA

LIMNIMÉTRIE DU LAC LÉMAN

par le Dr F.-A. FOREL

professeur à l'Académie de Lausanne.

II^{me} SÉRIE ¹

§ VI. — Des dénivellations du lac.

Au paragraphe III de ces études, j'ai appelé *dénivellation* toute altération de l'horizontalité de la nappe du lac. Quand, par une raison ou par une autre, le niveau n'est plus horizontal, quand l'eau est plus élevée dans une station que dans une autre, il y a dénivellation.

Ces dénivellations sont les unes constantes, les autres temporaires.

Les *dénivellations constantes* sont celles qui existent toujours, sans interruption, ou bien celles qui ont lieu si souvent, si fréquemment qu'elles caractérisent l'état normal et se retrouvent dans les moyennes d'observations.

Nous aurons à distinguer les *dénivellations constantes à causes statiques* et les *dénivellations constantes à causes dynamiques*.

Les *dénivellations temporaires* durent peu, et changeant fréquemment de sens et de direction, elles sont sans influence

¹ Voir pour la 1^{re} série, Bull. XIV, 589 à 652.

sur l'horizontalité normale du lac ; leur effet, très fort peut-être dans une observation isolée, disparaît si l'on s'adresse pour les moyennes de hauteur à un nombre suffisant d'observations.

Nous aurons à distinguer les *dénivellations temporaires à causes astronomiques* et les *dénivellations temporaires à causes atmosphériques*.

§ VII. — Des dénivellations constantes.

Les dénivellations du lac qui existent assez normalement pour être dites constantes peuvent avoir deux causes d'ordres très différents.

Les unes proviennent d'actions attractives, agissant constamment étant données la forme et la densité des côtes, agissant différemment sur les différentes rives étant données les irrégularités du relief. Nous les appellerons *dénivellations constantes à causes statiques*, ou pour abrégé *dénivellations statiques*.

Les autres proviennent d'actions mécaniques, vents, courants, marées, agissant sur le niveau de l'eau plus ou moins constamment et dans la même direction. Nous les appellerons *dénivellations constantes à causes dynamiques*, ou pour abrégé *dénivellations dynamiques*.

§ VIII. — Des dénivellations constantes à causes statiques.

Si la terre était immobile et isolée dans l'espace, si encore elle était absolument homogène et égale, sa forme ¹ serait une

¹ La forme idéale de la terre serait figurée par la surface de la masse liquide de l'océan si celui-ci recouvrait tout le globe. Comme l'océan est interrompu par les continents, il faut supposer que ceux-ci seraient parcourus par un réseau de canaux en libre communication avec l'océan ; la surface de cette nappe liquide représente la figure idéale de la terre.

sphère absolue, le centre de gravité étant au centre de figure de la sphère.

Mais la terre est soumise à l'attraction des astres, de là les marées de l'océan. Laissons, pour le moment, de côté cet ordre de dénivellation sur lesquelles nous aurons à revenir dans un autre paragraphe.

Mais la terre est en rotation sur l'axe de ses pôles et la force centrifuge transforme la sphère de la terre en un sphéroïde de révolution.

La forme de ce sphéroïde est déterminée par l'action de deux forces opposées, la force centrifuge et l'attraction de la masse de la terre; la surface idéale de la terre est en chaque point normale à la résultante de ces deux forces.

Or si la force centrifuge va régulièrement en progressant du pôle à l'équateur, l'attraction de la masse de la terre n'est pas partout égale et régulière; la résultante des forces attractives qui agissent sur les différents points de la surface est loin de passer toujours au centre de figure de la terre. C'est ce fait que l'on exprime en disant que le fil à plomb est dévié en certaines localités.

L'attraction variant en raison directe des masses et inverse du carré des distances, il en résulte que les masses les plus rapprochées d'un point de la surface auront la plus grande influence sur ce point. Or ces masses peuvent varier considérablement et cela de la manière suivante :

a) La surface de la terre étant supposée égale et aplanie, il peut y avoir variation dans la densité des couches de la terre; depuis la densité des filons métalliques jusqu'à celles des lignites et des tourbes, il y a des différences énormes. A la limite de deux formations différentes, il est évident que le fil à plomb sera dévié dans le sens de la couche la plus dense.

b) Le cas le plus fréquent où se rencontre normalement cette différence dans la densité des masses est celui de la côte d'une mer ou d'un lac; d'un côté est la terre ferme avec ses roches denses et pesantes, densité moyenne 2,6; de l'autre, l'eau douce ou salée, densité 1,0 et 1,026. Il est évident que

dans ce cas la déviation du fil à plomb sera d'autant plus considérable que le talus sous-marin ou sous-lacustre sera plus incliné, et que la profondeur de l'eau sera plus importante.

c) Les inégalités de relief de la terre ferme sont une cause plus puissante encore de déviation du fil à plomb, la différence de densité entre la roche et l'air atmosphérique étant encore plus grande qu'avec l'eau. Une montagne qui s'élève au milieu d'une plaine attire le fil à plomb tout autour de sa base; une vallée qui sillonne un plateau agit en sens inverse sur les flancs de son ravin.

Il résulte de tout cela que l'océan est loin d'avoir le même niveau sur toute sa surface; qu'il se relève sur les côtes des continents et des îles; qu'il se relève d'autant plus que la côte est plus élevée et plus montagneuse, que le fond de la mer descend suivant un talus plus incliné, que la mer enfin est plus profonde.

Quelle est l'importance de cette dénivellation; vaut-il la peine d'en tenir compte?

Le Dr J. Hann, de Vienne, dans un travail récent ¹, a évalué l'importance de ces inégalités de la figure de la terre, et en s'appuyant soit sur le calcul direct, soit sur les variations de la pesanteur mesurées à l'aide du pendule, soit sur la déviation du fil à plomb, a trouvé des chiffres qui varient de 600 à 1100 mètres pour la différence entre le niveau de l'océan en pleine mer ou près des îles pélagiques comme Ste-Hélène ou les Açores, et le niveau de l'océan sur les côtes des grands continents équatoriaux. Cette valeur énorme étonnera ceux qui n'ont pas encore réfléchi à cette action, mais elle n'est probablement pas exagérée.

Ces mêmes circonstances agissent sur les bords de nos lacs, et cela avec d'autant plus d'intensité que l'eau douce étant moins dense que l'eau salée, la différence entre la masse des

¹ Dr J. Hann. Ueber gewisse beträchtliche Unregelmässigkeiten des Meeresniveau. Mittheil. der k. k. geographischen Gesellschaft in Wien. XVIII, p. 554. 31 déc. 1875.

terres et celle de l'eau est plus considérable. Nous devons donc admettre que la nappe de nos lacs forme des surfaces qui sont loin d'être planes.

1° Faisant partie du sphéroïde de révolution de la terre, la surface d'un lac est une portion de surface sphéroïdale.

2° Sur les bords, l'eau se relève par suite de l'attraction de la rive.

3° Ce relèvement des bords n'a pas partout la même intensité; il a son maximum là où la rive est le plus abrupte, le talus du lac le plus incliné, le lac le plus profond. Sur notre lac Léman, c'est sur la côte de la Savoie, de St-Gingolph à Evian, que cette déviation est à son maximum, puis vient la côte suisse d'Ouchy à Villeneuve, puis le reste des côtes du Grand-lac, puis enfin le Petit-lac.

Il y a déviation d'horizontalité dans la nappe du lac; certaines régions sont plus relevées que d'autres, il y a donc *dénivellation*. Les forces attractives qui déterminent cette dénivellation sont d'action constante et statique; nous avons donc sur notre lac à reconnaître des *dénivellations constantes à causes statiques*.

Quelle peut être la valeur et l'importance de relèvement de l'eau sur les rives du Léman? Cela n'a pas été calculé; et cependant cela mériterait de l'être, car les données du problème sont très nettes et très simplement posées. C'est à provoquer ce calcul qu'est destiné ce paragraphe.

Voici, par exemple, les données du problème sur quelques points principaux du lac :

Au Dézaley, entre Cully et St-Saphorin, au milieu de Lavaux, le lac descend par un talus régulièrement incliné jusqu'à 270 mètres de profondeur à 1300 mètres de la côte; la terre ferme s'élève en pente régulière jusqu'à 285 mètres au-dessus du lac à 440 mètres de la rive.

A Rivaz, un peu à l'est de la station précédente, le lac descend à 255 mètres de profondeur à une distance de 625 mè-

tres de la rive; la côte présente une hauteur de 240 mètres au-dessus du lac à 950 mètres de distance du bord.

A partir des points indiqués dans ces deux exemples, le fond du lac est parfaitement horizontal, et la terre ferme s'élève en un plateau relativement peu accidenté.

Au Leucon, près de Meillerie en Savoie, le lac descend à une profondeur de 255 mètres à une distance de 450 mètres de la rive, et la côte s'élève assez régulièrement jusqu'au sommet de la Dent d'Oche, élevé de 2060 mètres au-dessus de la surface du Léman et distant de 6 kilomètres du bord du lac.

Mais s'il y a des différences dans le niveau de l'eau, des dénivellations constantes, ces différences devraient, semble-t-il, être indiquées par les observations limnimétriques. Le nivellement fédéral exécuté de 1865 à 1874 sur les rives du lac donne avec une très grande précision¹ la hauteur de repères situés dans toutes les villes principales de la côte suisse; grâce à ces repères on a pu déterminer l'équation des limnimètres que nous avons donnée au § 1^{er}. Les limnimètres étant ainsi rapportés au même plan, les lectures faites à ces instruments doivent indiquer des différences de niveau entre les diverses stations, si ces différences existent réellement.

Mais si nous ne trouvons pas de différence dans les lectures des divers limnimètres, en devons-nous conclure que les dénivellations statiques n'existent pas? En aucune façon.

En effet, les mêmes influences qui agissent en différentes places pour dévier plus ou moins le fil à plomb agissent aussi sur le niveau des géomètres pendant les opérations du nivellement; de station en station, le niveau du géomètre reste horizontal, c'est-à-dire perpendiculaire à la résultante des forces d'attraction, c'est-à-dire perpendiculaire au fil à plomb; si celui-ci est dévié, le niveau est dévié aussi et subit une déni-

¹ De Genève à Morges l'erreur possible est dans les limites de ± 2 millimètres. *A. Hirsch et E. Plantamour. Nivellement de précision de la Suisse, I, p. 44. Genève, 1867.*

vellation. Le nivellement apparent reste exact alors même que des dénivellations plus ou moins importantes ont lieu. C'est en plus petites proportions le fait que le nivellement général de la mer reste exact de l'équateur au pôle alors même que le rayon de la terre aux différentes latitudes est fort inégal, alors même que la terre au lieu d'être une sphère est un sphéroïde de révolution; c'est aussi le même fait qui empêche le nivellement géométrique le plus exact de reconnaître la rotondité de la terre.

En résumé, j'admettrai l'existence de différences de niveau dues aux causes constantes et persistantes de la déviation de la verticale par suite de l'attitude inégale des couches inégalement denses de la surface de la terre, j'admettrai sur notre lac l'existence de *dénivellations constantes à causes statiques*. Le niveau de l'eau est plus distant du centre de la terre sur les bords qu'au milieu du lac; ces dénivellations varient d'importance aux différents points de la côte; ces dénivellations échappent à l'étude des procédés hypsométriques ordinaires¹.

§ IX. — Dénivellations constantes à causes dynamiques.

J'ai désigné sous ce nom au § VII des dénivellations causées par des actions mécaniques, intervenant constamment ou assez fréquemment pour que leur effet devienne normal et évident dans la comparaison des moyennes.

Leur origine n'étant pas due à l'attraction de la masse de la terre, cet effet de dénivellation ne se produit pas dans les opérations géodésiques du nivellement du pays; les dénivellations

¹ Cf. Rapport de M. *Hirsch* sur la question des altitudes suisses. Bull. Soc. Sc. nat. de Neuchâtel, VI, p. 643 sq. — *E. Plantamour*. Hauteur du lac de Genève au-dessus de la Méditerranée et au-dessus de l'Océan. Archives des Sc. ph. et nat., N. P., XIX, p. 5 sq. Genève, 1864. — *J. Michel*. Lettre à M. Plantamour à l'occasion de la détermination de la hauteur du lac de Genève. *Ibid.*, p. 328. — *E. Plantamour*. Observations sur cette lettre. *Ibid.* p. 334.

des masses d'eau dont nous parlons seront donc constatables par la comparaison d'observations faites à différents limnimètres convenablement répétés entre eux.

Il y a des différences dans le niveau moyen des différentes mers, et sur la même mer, dans le niveau moyen des différents ports.

C'est ainsi que sur la Méditerranée on a constaté les hauteurs moyennes suivantes rapportées au niveau moyen du port de Marseille ¹ :

	m.
Marseille	0,000
Cette	+ 0,013
Toulon	— 0,281
Nice	— 0,056

C'est ainsi que sur l'océan Atlantique on a les hauteurs moyennes suivantes ² rapportées au niveau de Marseille :

	m.
Marseille	0,000
Bayonne	+ 0,856
Arcachon	+ 0,600
Rochefort	+ 0,993
Port Launay	+ 1,205
Brest	+ 1,022
Le Havre	+ 0,211 etc.

En moyenne, dix-huit ports de l'océan + 0^m80.

Cette valeur de 80 centimètres est la quantité dont on estime l'océan Atlantique plus élevé que la Méditerranée mesurée dans le port de Marseille.

¹ *J. Michel*. Lettre adressée à M. E. Plantamour à l'occasion de la détermination de la hauteur du lac de Genève au-dessus du niveau de la mer. Arch. des Sc. ph. et nat. N. P., t. XIX. p. 334 sq. 1864.

² *Bourdaloue*, cité par *J. Michel*. Bull. Sc. vaud. Sc. nat., VIII, p. 148. Lausanne 1863.

M. Michel dans sa lettre à M. Plantamour expose les raisons probables de ces différences de niveau. Il les attribue :

1° A l'effet des courants qui accumulent l'eau à l'entrée de certains ports ou bien l'emmènent loin des côtes.

2° Aux allures de la marée. Les différents temps de la marée, marée montante, marée descendante, mer étale ¹, sont assez variables d'un port à l'autre suivant la configuration générale des côtes; tantôt c'est l'ascension de l'eau qui se fait le plus rapidement, tantôt c'est la descente, tantôt la courbe de la marée a des sommets aigus, tantôt des sommets mousses. Ces différences influent, on le comprend facilement, sur le niveau moyen de la mer et peuvent le modifier sensiblement.

A ces deux causes générales signalées par M. Michel, j'en ajouterai deux autres, à savoir :

3° La répétition fréquente des dénivellations accidentelles que je décrirai dans un paragraphe suivant; il est évident que si le vent peut être cause de dénivellations temporaires, si un vent déterminé souffle fréquemment, normalement sur une côte, ce vent peut être cause de dénivellations répétées qui, agissant sur la moyenne de hauteur des eaux, tendront à la modifier.

4° Dans les lacs à émissaires, le courant qui transporte l'eau de l'embouchure des affluents à la sortie de l'effluent est une cause très active de dénivellation constante; nous en avons vu l'effet dans le § II où nous avons étudié la pente du lac.

Ces quatre causes ² de dénivellation peuvent-elles agir sur le niveau de nos lacs? C'est ce que je vais rapidement discuter :

¹ On appelle mer étale le moment pendant lequel la mer, arrivée à son point culminant, ne monte ni ne descend.

² Dans la mer il y aurait une cinquième cause de dénivellation à ajouter, à savoir les différences de densité de l'eau. Ces différences de densité peuvent être causées par l'évaporation de l'eau dans certains cas, et par l'apport d'eau douce par les affluents dans d'autres cas.

1° Les courants existent sur notre lac, où ils sont désignés sous le nom de *ladières*; ils peuvent même y être assez forts et assez bien limités pour que, de la rive, on puisse distinguer le bord du courant grâce aux remous et aux tourbillons qui le signalent. Leur vitesse n'atteint pas, il est vrai, celle des grands courants de l'Océan, mais elle peut cependant, dans certains cas, leur être comparée. C'est ce que montreront les chiffres suivants :

Localité.		Vitesse par minute.	Auteurs.
		m	
Lac Léman.	Morges, 21 mai 1869	12	F.-A. Forel.
Id.	id. 26 juin 1876	16	id.
Id.	Vevey	18	R. Blanchet ¹ .
Gulfstream.	Détroit de Floride	120	E. Reclus ² .
Id.	Cap Hatteras	80	id.
Id.	Traversée de l'Atlantique	25	id.
Id.	Atlantique du Nord	4	id.

D'après cela nos plus forts courants du lac Léman n'atteindraient pas la vitesse moyenne du Gulfstream dans sa traversée de l'Atlantique du cap Hatteras aux côtes d'Irlande, mais dépasseraient de beaucoup la vitesse de ce courant dans la partie du Nord de l'Atlantique de l'Irlande au cap Farewell.

Mais si l'intensité des courants du lac peut être encore assez forte, la constance et la régularité leur font absolument défaut; le plus souvent ils sont nuls; lorsqu'ils existent ils se dirigent tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre. Je ne connais aucune région du lac où il existe un courant normal et constant dans sa direction ³. Il n'y a donc pas de possibilité d'attribuer aux courants du Léman aucun effet de dénivellation constante du lac ⁴.

¹ R. Blanchet. Bull. Soc. vaud. Sc. nat., III, 151.

² E. Reclus. La terre, II, 75 sq. Paris 1872.

³ Je ne fais pas entrer ici en ligne de compte le courant de la sortie du lac à Genève.

⁴ On peut même se demander si les courants peuvent réellement être cause de dénivellations. Ils sont causés eux-mêmes, le plus souvent, par

2° La marée n'existe probablement pas sur notre lac, comme nous le verrons dans un paragraphe suivant ; les variations de ses allures ne sauraient donc avoir une action de dénivellation.

3° Les dénivellations temporaires dues à l'action des vents existent sans contestation, ainsi que nous allons l'étudier au § XIII. S'il y avait prédominance d'un vent particulier du lac et une certaine constance dans sa direction et son action, on pourrait concevoir comment des dénivellations temporaires se répétant souvent dans le même sens, pourraient agir sur la moyenne et causer des dénivellations du niveau normal du lac.

Mais les vents qui règnent sur le lac ne présentent en rien ce caractère de constance ; c'est ce qu'une revue rapide de leurs caractères montrera facilement.

Les *brises locales*, qui seules sont un peu constantes, ne doivent absolument pas entrer en ligne de compte ; qu'elles soufflent du lac sur la terre (Rebat) ou de la terre sur le lac (Morget), elles vont en s'irradiant du centre du lac vers les bords ou en sens contraire ; elle ne peuvent donc pas avoir d'effet de dénivellation d'une côte à l'autre.

Les *vents d'orage* descendent tumultueusement des montagnes avoisinantes (Joran, Bornan, Molan, certaines Vaudaires) et frappant, avec l'impétuosité que l'on sait, la surface du lac, déterminent des dénivellations temporaires très fortes, dont j'ai de beaux exemples sur les tracés de mon enregistreur de Morges, et que j'étudierai lorsque, un jour, je rechercherai la cause des seiches. Mais les vents d'orage n'ont aucune constance et aucune régularité ; leur effet ne peut donc pas se traduire sur les moyennes.

des dénivellations, et ils ne peuvent pas être à la fois cause et effet. Cependant on peut concevoir un port ouvert en entonnoir et présentant son embouchure à un courant dont un bras, par sa force acquise, maintiendrait l'eau dans l'intérieur du port à un niveau plus élevé que dans le reste de la nappe liquide. Une action de cette nature demanderait pour être sensible l'intervention de courants bien plus puissants que ne le sont ceux de notre lac,

En fait de *vents généraux*, nous avons les deux grands alisés du Nord et du Midi et la Vaudaire.

Les vents du N.-E. et du S.-O. enfilent la direction générale du lac, d'Ouchy et Morges au fond du golfe de Coudré et à Genève; ils sont causes de dénivellations temporaires puissantes; ils sont assez fréquents et se maintiennent assez longtemps dans la même direction. Il y a là les éléments de la transformation d'une action temporaire en une action permanente, cela est vrai; mais ces deux vents sont directement opposés l'un à l'autre, ils se neutralisent, et dans des moyennes de hauteur tendent à s'annuler mutuellement.

Si je recherche dans les études si consciencieuses de M. Plantamour¹, la fréquence relative aux différentes saisons des vents du Midi et des vents du Nord pour un nombre suffisant d'années, je trouve les chiffres moyens de la période 1847 à 1861, soit 15 ans.

	Vent du Nord.	Vent du Midi.
Hiver	13,7 jours	10,8 jours
Printemps . .	13,7	17,3
Été	7,6	14,6
Automne . . .	9,8	11,1
Année entière .	44,8	53,8

D'après ces chiffres il y a prédominance de la bise en hiver, et du vent du Midi au printemps, en été, en automne et dans l'année entière. Comme nous le verrons, l'effet du vent est de relever l'eau dans la région du lac vers laquelle il souffle et de l'abaisser dans celle d'où il vient; il y aurait donc tendance en hiver à une dénivellation qui relèverait l'eau à la sortie du lac à Genève, dans le reste de l'année à une dénivellation qui l'abaisserait à Genève. En combinant cet effet avec la pente du lac, il y aurait, par l'action du vent, tendance à la diminution de la pente du lac en hiver, tendance à son aggravation pendant le reste de l'année.

Quant à la Vaudaire, ou Föhn, qui descend des Alpes par la

¹ E. Plantamour. Du climat de Genève, p. 163. Genève.

vallée du Rhône et vient frapper sur le Haut-lac, elle a, si j'en juge par l'étude des seiches, un effet de dénivellation temporaire très actif, et elle doit amener des abaissements du niveau de l'eau à Villeneuve et des crues locales à Morges et dans le Petit-lac. Mais ce vent qui souffle en bouffées relativement courtes et subites, qui ne dure jamais longtemps avec une intensité soutenue, ne peut avoir une action persistante et se traduire par des dénivellations constantes.

En résumé, la direction des vents est trop variable sur notre lac pour qu'ils puissent avoir une action de dénivellation un peu constante; si cette action existe, elle est très faible et se confond avec la pente du lac en l'exagérant et en la neutralisant en partie.

Si des dénivellations temporaires autres que des seiches peuvent être causées par des variations de la pression barométrique, leur effet doit être tellement inconstant qu'il est impossible qu'il se traduise dans un sens positif et déterminé sur les moyennes.

4° La pente du lac existe comme nous l'avons vu, mais elle n'est assez forte pour être constatable par des observations limnimétriques qu'à la sortie du lac à Genève. Je ne reviendrai pas ici sur ce sujet que j'ai déjà suffisamment développé.

En résumé le raisonnement ne nous montre, en fait de dénivellations dynamiques possibles sur le lac Léman, que celle de la pente du lac; aucune des autres causes de dénivellation ne peut agir d'une manière constante.

Si donc ces raisonnements sont exacts, nous devons trouver le lac de niveau sur ses différentes côtes, et des limnimètres bien repérés doivent nous donner la même hauteur absolue dans toute la partie du lac où la pente n'est pas encore sensible. Si donc nous trouvons des différences d'un limnimètre à l'autre, nous devons en conclure à des erreurs dans l'équation des limnimètres.

Or je trouve des différences de ce genre et quelques-unes assez graves; j'en renvoie l'étude à un paragraphe ultérieur, dans une autre série.

§ X. — Des dénivellations temporaires.

Après avoir traité dans les paragraphes précédents des dénivellations constantes qui font que le niveau moyen du lac est plus élevé ou moins élevé sur telle rive que sur telle autre, j'en viens aux *dénivellations temporaires* par lesquelles le niveau moyen, altéré déjà par les causes constantes, est accidentellement et pendant un temps limité dévié de son horizontalité relative.

D'après leur origine je les diviserai en deux groupes :

1° *Dénivellations temporaires à causes astronomiques.* Marées.

2° *Dénivellations temporaires à causes atmosphériques.*

§ XI. — Dénivellations temporaires à causes astronomiques. Marées.

L'attraction des astres détermine sur l'océan les dénivellations temporaires semi-diurnes connues sous le nom de marées.

Existe-t-il des marées sur notre lac? La question peut se poser. En effet, si dans leur essence fondamentale et théorique les marées n'ont lieu que dans une masse d'eau illimitée recouvrant sans interruption la surface d'un astre, cependant on en a constaté dans des bassins d'eau qui, sans relations avec l'océan, occupent une fraction relativement bien peu considérable de la surface du globe.

Ainsi la Méditerranée a incontestablement des marées et leur amplitude peut même être assez forte; elles atteignent aux grandes marées de sygygie à Livourne 30 centimètres, à Venise 60 à 90 centimètres, au fond du golfe de la Grande Syrte jusqu'à 2 mètres¹.

« Le lac Michigan, » dit Reclus, « est la plus petite nappe

¹ E. Reclus. La Terre. Paris 1862, II, p. 147.

lacustre où l'on ait constaté avec précision le retour régulier du flux et du reflux ; l'amplitude de la marée y est, d'après le lieutenant Graham, de 75 millimètres. » Or le lac Michigan quoique mesurant environ 600 kilomètres de longueur du Nord au Sud, n'en a guère que 150 dans son diamètre transversal de l'Est à l'Ouest, devant Milwaukee. Il est vrai que si l'on prend son point le plus occidental au Sud et son point le plus oriental au Nord, on arrive à une différence de longitude de près de 3 degrés. Pour le lac Léman dont la plus grande longueur de l'Est à l'Ouest est de 73,2 kilomètres (en ligne courbe), la différence de longitude des deux extrémités n'est que de 47 minutes ; en effet, le point le plus oriental à Chillon est à $24^{\circ}36'$ et le point le plus occidental à Genève est à $23^{\circ}49'$ longitude orientale du méridien de l'Ile de Fer. La latitude de notre lac et celle du grand lac américain étant à peu près les mêmes, nous pouvons facilement établir une comparaison entre ces deux dimensions et voir que le lac Michigan a une longueur de longitude quatre fois plus forte que le lac Léman. Or si les marées du Michigan atteignent 75 millimètres, pourquoi n'en aurions-nous pas sur notre lac, plus faibles il est vrai, mais encore observables ?

Or j'ai dans les tracés de mon limnimètre enregistreur de Morges des documents qui me permettent d'apprécier de moment en moment avec une exactitude minutieuse la hauteur du lac ; je puis en faire des lectures comparatives avec une précision de au moins un millimètre. S'il y a une marée sémi-diurne sur le lac, pourquoi ne pourrais-je pas la reconnaître ?

J'ai essayé de faire cette étude de trois manières différentes.

1^o J'ai choisi une trentaine de jours à des époques quelconques de l'année, en cherchant les jours où le lac était le plus calme au point de vue des variations de hauteur, des seiches et des vibrations, où je pouvais par conséquent mesurer avec le plus de certitude la hauteur exacte du lac ; j'ai ensuite compté comme commencement de la journée l'heure du passage de la lune au méridien, et d'heure en heure de cette journée lu-

naire, j'ai mesuré la hauteur du lac. J'ai ensuite réuni les observations de ces trente jours et j'ai additionné ensemble les chiffres représentant la hauteur du lac de la première heure lunaire, de la seconde heure, etc., des divers jours d'observation. J'ai ainsi obtenu une série de hauteurs correspondant aux différentes heures lunaires. Dans la courbe représentant cette série il m'a été impossible de reconnaître deux périodes de maximums et deux périodes de minimums séparées les unes des autres par des espaces de 6 et 12 heures.

Il est vrai qu'en opérant ainsi je n'ai pas tenu compte de l'influence du soleil qui, suivant sa position par rapport à la lune, fait tantôt avancer, tantôt reculer l'heure de la haute mer par rapport à l'heure du passage de la lune au méridien; en choisissant des jours quelconques j'espérais que les erreurs de cette nature étant probablement tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre, s'annuleraient réciproquement.

2° J'ai essayé de m'affranchir de cette cause d'erreur de la manière suivante. J'ai choisi parmi les jours où la régularité des tracés était suffisante, les jours de syzygie; dans ces jours-là la différence de position du soleil et de la lune est trop peu importante pour faire varier considérablement l'heure de la haute mer par rapport à la première heure lunaire. J'ai répété sur 25 jours d'époque de syzygie, des mois d'avril à septembre 1876, les mesures que je viens de décrire, et voici les chiffres moyens que j'en ai tirés, rapportés à un niveau quelconque pour les différentes heures de la journée lunaire :

Heure	mm.	Heure	mm.
1	13.0	13	13.2
2	12.9	14	13.0
3	12.8	15	13.2
4	13.2	16	13.0
5	13.0	17	13.1
6	13.0	18	13.4
7	12.7	19	13.6
8	13.0	20	13.9
9	13.0	21	14.0
10	13.0	22	13.8
11	13.2	23	13.8
12	13.2	24	13.6

Il y a là des différences d'une heure à l'autre, mais je ne puis y reconnaître les maximums et minimums d'une marée.

3° J'ai répété cette tentative sous une troisième forme. J'ai profité d'une série de sept jours, du 10 au 16 décembre 1876, admirable par le repos complet du lac, série de jours pendant laquelle la hauteur du lac n'a varié que de 11 millimètres au maximum et est revenue au bout de la période à un millimètre près à ce qu'elle était au commencement; j'ai calculé pour chaque jour le moment de la marée haute, étant donnée la position relative des astres, et j'ai mesuré comme ci-dessus la hauteur du lac aux différentes heures de la journée de marée. Par ce procédé, pas plus que par les deux autres, je ne suis arrivé à trouver la courbe à deux maximums et à deux minimums d'une marée.

Je conclus donc qu'il n'y a pas moyen de reconnaître par les observations limnimétriques de Morges l'existence d'une marée sur le lac Léman; s'il y en a une elle est masquée par les dénivellations irrégulières bien plus importantes que nous allons étudier dans le paragraphe suivant; s'il y en a une, elle n'atteint pas à Morges un millimètre d'amplitude.

Il est vrai que la station de Morges est mal placée au point de vue de ces études; située au milieu de la longueur du lac, toutes les actions qui font osciller l'eau dans le sens de l'Est à l'Ouest y sont à leur minimum d'amplitude. Il est possible que des mesures exactes faites à Chillon et à Genève donnent, au point de vue des marées du lac, des résultats plus positifs que ceux que j'ai obtenus.

§ XII. — Dénivellations temporaires à causes atmosphériques.

Le niveau de l'eau d'un lac peut être troublé par une cause accidentelle et temporaire, autre que l'attraction des astres, et cela de deux manières :

1° Ou bien la dénivellation sera d'une certaine durée, une heure, un jour, elle sera soutenue, continue; l'eau sera plus élevée à une des extrémités du lac qu'à l'autre, puis l'action cessant, l'horizontalité primitive se rétablira lentement, progressivement. Je désignerai ce phénomène sous l'appellation de *dénivellations continues*.

2° Ou bien la dénivellation sera un mouvement d'oscillation fixe, un mouvement de balancement de l'eau, laquelle s'élèvera alternativement à chaque extrémité du lac pour redescendre ensuite. Ce seront des *dénivellations rythmiques*, connues sur notre lac sous la dénomination de *seiches*.

§ XIII. — Dénivellations temporaires continues.

Le 12 juillet 1876, je fis à mon limnimètre enregistreur les lectures suivantes :

			m.
8 heures du matin	.	.	2.599
9	»	.	2.604
10	»	.	2.615
11	»	.	2.619

En trois heures de temps le lac s'était élevé, à Morges, d'une hauteur de 20 millimètres. Cette crue était-elle générale, était-elle locale; était-ce, en employant les termes que j'ai définis, une variation de hauteur ou bien une dénivellation?

Etant donnée la surface du lac de 577.8 kilomètres carrés, une crue de 20 millimètres répartis sur l'ensemble du lac représenterait un excès de l'entrée sur la sortie de 11 $\frac{1}{2}$ millions de mètres cubes; cette crue ayant duré trois heures, cela signifierait un excès de l'entrée sur la sortie de 1070 mètres par seconde. D'après les chiffres de MM. Pestalozzi et Legler ¹,

¹ K. Pestalozzi et G.-H. Legler. Rapport au Conseil d'Etat du canton de Vaud sur les conditions de l'écoulement du Rhône à Genève. Lausanne 1876, pl. 3.

étant donnée la hauteur du lac à Genève, le débit du Rhône ce jour-là devait être d'environ 590 mètres par seconde. Il y aurait donc eu, dans la supposition d'une variation de hauteur du lac de 20 millimètres en trois heures, un débit des affluents du lac de 1660 mètres par seconde. Or le débit moyen du Rhône en été étant, d'après M. Lauterburg ¹, de 740 mètres par seconde, il y aurait eu ce jour-là un excédant de 920 mètres par seconde; le Rhône des hautes eaux aurait été plus que doublé. Y avait-il eu débâcle en Valais expliquant cette crue subite? Sur ma demande, M. le Dr Suchard, de Lavey, résuma comme suit l'état du Rhône: « Il y avait eu deux fortes crues le 9 et le 10 juillet; mais depuis lors on remarquait une baisse constante du fleuve. » Quant aux affluents du lac autres que le Rhône, leur débit n'avait rien d'exceptionnel.

La crue du lac ne pouvant s'expliquer par un débit extraordinaire des affluents, pouvait-on en rendre compte par un arrêt de l'émissaire de Genève? Mais un excès de 1070 mètres de l'entrée sur la sortie n'aurait pu être causé même par l'occlusion complète du Rhône, ce fleuve ne pouvant, vu la hauteur des eaux, débiter plus de 590 mètres par seconde.

Il n'y avait donc pas moyen de supposer une crue générale du lac, une variation de hauteur; la hausse du lac était locale, c'était une dénivellation.

Deux jours après, le 14 juillet, nous avons eu à Morges la dénivellation en sens inverse: de 1 h. 20' à 3 h. 15' soir, soit en 115 minutes le lac a passé de la cote 2^m605 à la cote 2^m593; il y a donc eu une baisse de 12 millimètres. Si cette baisse avait été une baisse générale du lac, elle aurait représenté un excès de la sortie sur l'entrée de près de 7 millions de mètres cubes et reportée sur 115 minutes, cela correspondrait à un excès du débit de l'émissaire de 1000 mètres cubes par seconde. Or le débit du Rhône n'était, ce jour-là, que de 580 mètres par seconde. Etant donnée la hauteur du lac, ce débit ne peut être

¹ *Lauterburg* (loc. cit., 1^{re} sér., p. 8), p. 65.

modifié ni en plus ni en moins ¹; même à supposer l'arrêt subit et complet de tous les affluents du lac, nous ne saurions donc admettre la possibilité d'un excès de 1000 mètres par seconde dans le débit de l'émissaire. Nous ne pouvons donc admettre que la baisse du 14 juillet fût une baisse générale du lac; c'était donc une baisse locale, une dénivellation.

Nous avons dans ces deux exemples affaire à des dénivellations; elles sont temporaires, car elles apparaissent à un moment donné et disparaissent quand l'action déterminante a cessé; elles ne sont pas rythmiques et n'ont aucun rapport avec les seiches.

Nous retrouvons ces dénivellations dans le tableau IX à la fin de ce mémoire qui donne les observations limnimétriques journalières de l'année 1876.

Dans ce tableau, à côté de la hauteur du lac mesurée à Vevey (du 1^{er} janvier au 27 mars, et du 9 au 16 novembre), et à Morges (pendant le reste de l'année), j'ai donné la valeur d' calculée comme je l'ai dit au § IV, p. 40.

$$d' = d - D$$

d étant la différence entre la hauteur du lac mesurée aux limnimètres du Grand-lac et la hauteur du limnimètre du Jardin anglais de Genève; d exprime donc la pente réelle du lac au moment de l'observation;

D étant la pente normale du lac telle que je l'ai calculée au tableau I, p. 25;

d' exprime donc l'excès en plus ou en moins de la pente réelle au-dessus ou au-dessous de la pente normale.

$d' = + 13^{\text{mm}}$ ou $d' = - 18^{\text{mm}}$ signifient que la pente réelle est de 13 millimètres plus forte ou de 18 millimètres moins forte que ne devait l'être la pente normale étant donnée la hauteur du lac.

¹ L'état de barrage de Genève étant supposé constant et non modifié, ce qui était le cas dans l'exemple en question.

Les valeurs d' du tableau IX nous présentent deux sortes de variations :

1^o Nous les voyons pendant des périodes assez longues avoir généralement le même signe, être, par exemple :

Positives depuis la fin de mars au 10 juillet environ,

Négatives depuis le 10 juillet au 10 septembre,

Positives depuis le 10 septembre au 21 octobre,

Négatives du 22 octobre à la fin de l'année.

J'aurai plus tard à expliquer ce fait.

2^o Au milieu de ces périodes générales où d' est normalement positif ou normalement négatif, nous voyons des exceptions, des interruptions à la série. Quelques-unes sont dues à des seiches, le 24 juillet, le 19 décembre, par exemple, mais la plupart doivent être rapportées à des dénivellations continues. C'est ce que nous allons étudier.

Suivons la valeur d' dans ses modifications successives. Commençons avec avril 1876 ¹ :

Du	1 ^{er}	au	3	avril	d'	a une valeur moyenne de	+	5 ^{mm}
	4	»	5	»	»	»	—	4
	6	»	10	»	»	»	+	8
	11	»	14	»	»	»	+	34
	15	»	16	»	»	»	—	22
	17	»	20	»	»	»	+	20

et ainsi de suite.

Autrement dit, il y a eu entre Genève et Morges un excès de pente de 5, 8, 34 et 20 millimètres, un déficit dans la pente de 4 à 22 millimètres, dans les différents groupes de jours de cette période.

Des variations de ce genre peuvent se poursuivre dans tout

¹ Je prendrai mes exemples dans la période où j'ai les tracés de l'enregistreur de Morges, depuis le 28 mars 1876 ; ils me donnent pour l'une des deux stations au moins des observations très précises. Cette comparaison n'aura une rigueur absolue que lorsque nous pourrons utiliser les tracés de l'enregistreur de Sécheron que M. Ph. Plantamour fait construire actuellement.

le tableau et en général nous leur trouverons une durée de 2, 3 ou 4 jours.

Parmi les plus grandes variations dans cette année 1876, je puis citer celles du 15 au 16 avril, du 7 au 9 mai, du 3 au 5 juillet, du 10 au 24 août, du 15 au 18 septembre, du 29 au 30 septembre, etc.

Quelle est la valeur de ces variations ?

Au milieu d'avril, la valeur moyenne de d' était de $+27^{\text{mm}}$.

En effet, du 11 au 14 avril $d' = + 34$

du 17 au 20 » $d' = + 20$

Moyenne. . . . $+ 27$

Or du 15 au 16 nous avons eu. . $d' = - 22$

Différence entre les moyennes 49 millimèt.

Si au lieu des moyennes nous nous adressons aux extrêmes, nous avons le 12 avril $d' = + 56$

15 » $d' = - 41$

Différence . . . 67 millimèt.

C'est l'exemple où j'ai la plus forte dénivellation bien authentique de l'année. Je pourrais citer encore les 21 et 23 août où la différence a été de 100^{mm} , si je ne mettais fort en doute les lectures du limnimètre de Genève de cette période, entachée par des seiches énormes.

Je crois rester dans les limites de l'observation en admettant pour l'amplitude de ces dénivellations entre Morges et Genève la valeur extrême de 10 centimètres.

Je retrouve ces mêmes dénivellations si je compare les séries d'observations de Vevey et de Genève, ainsi que j'ai dû le faire pour étudier la pente du lac d'après les années 1871-75, ainsi que je le constate p. ex. dans mon tableau de l'année 1876, du 10 au 13 mars. Les dénivellations sont encore plus fortes et plus apparentes. En tenant compte autant que je le puis des exagérations causées soit par les seiches, soit par les erreurs d'observation, j'estime pouvoir évaluer à 12 ou 15 centimètres l'amplitude des dénivellations qui sont ainsi constatables d'une extrémité du lac à l'autre.

Quelle est la cause de ces dénivellations de la surface de notre lac ?

La cause normale et ordinaire doit être cherchée dans les vents. Lorsque la bise souffle du Nord-Est, l'eau est refoulée dans la partie sud-occidentale du lac et le niveau s'élève à Genève, tandis qu'il s'abaisse à Morges et à Vevey ; lorsque le vent de pluie souffle du Sud-Ouest, il abaisse l'eau dans le Petit-lac et la fait monter à Morges et à Vevey.

C'est ce qui résulte de l'étude simultanée de la hauteur de l'eau aux extrémités du lac ; la valeur d' qui exprime l'état réel de la surface du lac traduit ces dénivellations en devenant positive lorsque la pente est exagérée, lorsque l'eau est refoulée dans le Grand-lac et s'abaisse à Genève, lorsque le vent du Sud souffle ; elle devient négative lorsque la pente du lac est diminuée sous l'influence du vent du Nord, lorsque l'eau est refoulée du Grand-lac vers Genève et le Petit-lac.

J'en donnerai un exemple en indiquant l'état des vents pendant le mois de décembre 1876 ; je lis cet état des vents sur le lac en combinant mes notes de Morges avec les observations de Genève. Lorsque le vent est nul ou que règnent des brises locales, je l'indique par la désignation *variable* ; l'intensité des vents du Nord et du Sud est marquée par les facteurs 1, 2 et 3.

Décembre.	Vent.	d'	Décembre.	Vent.	d'
1	variable	— 16 ^{mm}	17	variable	— 25 ^{mm}
2	id.	— 48	18	vent du Nord 1	— 47
3	id.	— 56	19	vent du Sud 2	+ 30
4	vent du Sud 3	+ 42	20	variable	— 29
5	variable	— 37	21	vent du Nord 1	— 37
6	vent du Sud 3	+ 70	22	variable	— 22
7	variable	— 11	23	id.	— 14
8	id.	+ 31	24	id.	— 23
9	id.	+ 2	25	id.	— 12
10	vent du Nord 1	— 39	26	id.	— 7
11	id. 1	— 25	27	id.	— 51
12	id. 1	— 39	28	id.	— 22
13	variable	— 20	29	id.	— 62
14	id.	— 6	30	id.	— 18
15	id.	— 12	31	vent du Sud 1	+ 55
16	id.	— 19			

Dans ce mois de décembre 1876, nous voyons que, en général, dans les jours calmes et à vents variables, la valeur d' est négative; les jours où le vent du Nord règne, les 10, 11, 12, 18, 21, d' reste négatif avec des valeurs très fortes; au contraire, quand le vent du Sud règne, les 4, 6, 19, 31, la valeur d' devient positive. Autrement dit, la pente du lac a été diminuée par les vents du Nord et augmentée par les vents du Sud.

J'ai vérifié cette loi de la manière suivante : j'ai cherché dans les observations météorologiques de Genève de l'année 1876 tous les jours où les vents du Nord et Nord-Est d'une part, du Sud et Sud-Ouest d'une autre part, sont marqués avec les coefficients 2, 3 ou 4, indiquant des vents d'intensité forte ou très forte; dans ces cas-là, et je m'en suis assuré en en faisant la vérification sur mes notes, c'est toujours un vent général régnant sur tout le lac, de Morges à Genève pour le moins. J'ai cherché ensuite quelle était la valeur de d' pour ces deux séries; voici le résultat de ce travail :

Pour le vent du Nord (N.-N.-O. et N.-E.) il y a eu 39 jours à noter dans l'année.

Sur ces 39 jours 31 ont eu une valeur d' négative.

» 8 » positive.

La moyenne générale des 39 jours de bise est $d' = -17^{\text{mm}}$.

Pour le vent du Sud (S.-S.-O. et S.-E.) il y a eu 58 jours à noter.

Sur ces 58 jours 41 ont d' positif.

» 17 » négatif.

La moyenne générale des 58 jours de vent du Sud donne $d' = +16^{\text{mm}}$.

Cette comparaison prouve d'une manière très précise l'influence des vents et montre que la pente du lac est diminuée par les vents du Nord et augmentée par les vents du Sud.

La même conclusion pourrait se tirer de la comparaison des séries d'observations de Vevey et de Genève. Je n'en donne pas d'exemples pour ne pas surcharger ce paragraphe.

En résumé, je puis admettre comme un fait général, très normal et très constant, que les dénivellations temporaires continues sur le lac Léman ont lieu sous l'influence des vents; l'eau s'abaisse dans la région d'où vient le vent et s'élève dans la région vers laquelle il souffle.

Cette loi est-elle absolue, est-elle sans exception? Plus j'avance dans cette étude, plus j'arrive à en être convaincu. Cependant il me reste encore certaines objections que je dois discuter.

1° Tout d'abord de très bons auteurs, qui ont étudié, comme nous allons le voir, les mêmes phénomènes dans la Baltique et dans la Méditerranée, attribuent des dénivellations analogues à celles du Léman à des inégalités dans la pression atmosphérique. Si le baromètre est plus élevé d'un côté de la mer que de l'autre, il est évident que la pression atmosphérique étant inégale, le niveau de la mer doit s'incliner; si le même fait peut se produire sur le lac il doit en résulter nécessairement une dénivellation. Or en étudiant les seiches du lac nous sommes obligés de reconnaître l'effet de dénivellation causé par les variations de la pression atmosphérique; et s'il peut y avoir des variations de pression assez fortes pour causer des dénivellations rythmiques appréciables, pourquoi ne pourraient-elles pas dans d'autres circonstances être l'origine de dénivellations continues?

2° Ainsi que je l'ai dit en analysant les 97 jours de fortes bisés et de fort vent du Sud de l'année 1876, j'en ai trouvé 8 par le vent du Nord et 17 par le vent du Sud dans lesquels le signe de d' n'était pas celui qu'indiquait la direction du vent: 25 exceptions sur 97, cela représente plus du quart. Il est vrai qu'en discutant attentivement ces exceptions, on trouve qu'elles appartiennent presque toutes à des périodes dans lesquelles la valeur d' était normalement positive ou normalement négative; or si dans une période où d' est en moyenne égal à $+ 20^{\text{mm}}$, une dénivellation a lieu d'après laquelle la pente du lac est de 18^{mm} au-dessus de la normale,

cela ramène la valeur de d' à $+ 2^{\text{mm}}$, sans arriver à la faire négative. J'ai reconnu que la plupart des anomalies de l'année 1876 pouvaient s'expliquer ainsi.

Dans quelques cas aussi une seiche a faussé l'observation ou bien une erreur de lecture pourrait expliquer l'écart ; il y a lieu d'espérer que quand le limnimètre enregistreur de Sécheron marchera parallèlement au mien, ces petits écarts d'observation seront absolument abolis et qu'une comparaison exacte et rigoureuse nous permettra de tirer des lois certaines.

3° Mais dans quelques cas, je dois l'avouer, l'explication des dénivellations continues par l'effet du vent seul est bien difficile à donner ; je connais quelques-uns de ces exemples embarrassants dans les séries d'observations que j'ai étudiées ; je veux seulement en indiquer un ici. C'est le fait que j'ai décrit au commencement de ce paragraphe, le cas du 12 juillet 1876. Ce jour-là, comme je l'ai dit, je voyais le lac monter à Morges avec une rapidité tout à fait extraordinaire ; or à ce moment il régnait sur le lac une bise violente, et d'après les faits analogues, au lieu d'une hausse locale j'aurais dû avoir une baisse, et la hausse aurait dû se produire à Genève. En l'absence d'observations suffisamment détaillées, je ne sais ce qui se passait à Genève ce jour-là, mais il est difficile qu'il y ait eu une hausse dépassant de beaucoup celle que j'observais à Morges. J'ai bien essayé de me rendre compte des faits en supposant que le vent du Nord plongeant sur le Haut-lac par dessus les monts de Lavaux, refoulait l'eau d'une manière extraordinaire dans la partie orientale du lac et que Morges était dans la région où cette eau était contrainte à s'accumuler et à s'élever. Mais toutes les interprétations que j'ai tentées sont trop forcées et j'en suis réduit à renoncer à expliquer le phénomène.

Ainsi donc il est certains cas dans lesquels l'action du vent semble ne pas suffire à expliquer les dénivellations continues ; mais hâtons-nous d'ajouter que le nombre de ces cas anormaux diminue à mesure que l'observation gagne en précision.

Ces phénomènes ont été observés dans d'autres bassins d'eau. Quelle interprétation leur a-t-il été donnée? Voici les faits et théories qui sont à ma connaissance.

Dans la mer Baltique, ces dénivellations ont été étudiées déjà en 1747 par Gissler, à Hernösand, sur le golfe de Bothnie, côte orientale de la Suède; Gissler chercha les relations de ces mouvements de la mer avec les oscillations du baromètre et constata que l'eau monte quand le baromètre baisse. En 1806, Schultén, qui reprit la question, se rangea à l'opinion de Gissler. De 1815 à 1834, Bannasch observa la hauteur de la mer au phare de Pillau près de Königsberg, en Prusse; il ne vit dans les dénivellations de la mer que l'effet des vents qui élèvent le niveau de la mer dans la direction vers laquelle ils soufflent, quand le vent souffle du Nord la mer est élevée sur la côte méridionale de la Baltique et *vice-versa*. En 1841, Hällström combina les deux théories et admit l'action possible de ces deux causes, pression atmosphérique et direction du vent ¹.

L'amplitude de ces dénivellations de la mer Baltique ² peut être considérable et atteindre jusqu'à 1^m et 1^m20 ³.

De même dans la Méditerranée l'on voit des dénivellations qu'il est impossible de rapporter aux mouvements des astres.

Voici, par exemple, la hauteur de la mer à Alger du 10 au 20 janvier 1839, d'après les observations d'Aimé ⁴.

¹ *G. G. Hällström. Bemerkungen über das zeitweise Steigen und Fallen der Ostsee und des Mittelmeeres. Poggendorff's Ann. LVI, 626. Leipzig 1842.*

² Les dénivellations de la mer Baltique ont souvent été comparées aux seiches; c'est par erreur. Sans mettre aucunement en doute l'existence possible de seiches, vagues uninodales d'oscillation fixe dans le bassin de la Baltique, tout ce qui a, jusqu'à présent, été décrit par les auteurs présente le caractère de continuité des oscillations que j'étudie actuellement et n'a rien du rythme régulier et périodique qui fait l'essence des seiches.

³ *A. v. Etzel. Die Ostsee, p. 192. Leipsig 1874.*

⁴ *Aimé. Mémoire sur les variations du niveau de la mer dans le port d'Alger. Ann. de Chimie et de Physique, LXXIII, p. 416 sq. Paris 1840.*

	m.		m.
10 janvier	1.02	16 janvier	0.97
11 »	1.00	17 »	1.05
12 »	0.91	18 »	1.10
13 »	0.85	19 »	0.97
14 »	0.94	20 »	0.92
15 »	0.97		etc.

Le maximum d'amplitude de ces dénivellations a été, pendant une période de 5 mois d'observation, de 45 centimètres entre la plus haute et la plus basse mer; ces variations de niveau sont durables et se continuent pendant plusieurs jours. Aimé, qui a étudié ces mouvements dans le port d'Alger, a trouvé des relations très évidentes entre la hauteur de la mer et le baromètre; très généralement et à très peu d'exceptions près, quand le baromètre monte, le niveau de la mer baisse et *vice-versa*.

Sur la Méditerranée, à Cette, aux cabanes de Palavas près Montpellier, les pêcheurs que j'ai interrogés connaissent ces dénivellations et les attribuent aux vents.

Cette opinion est généralement admise sur les rives françaises de la Méditerranée où l'on voit par les vents du Sud la mer s'élever jusqu'à 1^m20 au-dessus de son niveau normal ¹.

Des faits semblables ont été constatés dans le lac supérieur de l'Amérique du Nord. « M. Mackenzie nous dit qu'avant un ouragan du Nord la rivière Kaministiquia (rive nord du lac Supérieur) s'abaisse parfois de 45 centimètres en 24 heures. On suppose que cela est dû à un soulèvement de l'eau sur la rive sud du lac où ces ouragans commencent habituellement à sévir par le fait du vent qui cause une dépression correspondante de ce côté. Ce fait, qui doit être attribué à une différence de pression sur les deux rives du lac, nous a été depuis confirmé par d'autres personnes » ².

On le voit, l'action du vent est très généralement admise comme cause de dénivellation; mais aussi l'effet des pressions

¹ *Lenthérie*. Les villes mortes du golfe du Lyon, p. 150, 162, 181, 247. Paris 1876.

² *L. Agassiz*. Lake superior, p. 83. Boston 1850.

atmosphériques différentes aux diverses régions d'une même mer est soutenu par des auteurs d'un grand mérite, et la discussion que fait Hällström de cette ancienne opinion de Schultén en démontre, me semble-t-il, la justesse. Mais de ce qu'il peut y avoir des différences de pression entre les deux extrémités de la mer Baltique longue de 12 degrés ou d'un côté à l'autre de la Méditerranée, large de 8 à 10 degrés, de ce qu'on peut admettre que ces différences de pression peuvent persister pendant des heures et pendant des journées, de ce que des différences de pression atmosphérique peuvent être probablement la cause de dénivellations continues dans ces énormes bassins d'eau, il ne s'ensuit pas nécessairement qu'il en soit de même dans notre lac.

Notre lac Léman n'a que 73 kilomètres de longueur, moins d'un degré; dans ces dimensions j'estime qu'il peut bien y avoir des différences de pression atmosphérique d'une extrémité à l'autre, l'histoire des seiches est là pour le prouver, mais que ces différences sont très temporaires, ne durent pas et s'égalisent très vite; en 50 minutes un vent d'orage, marchant à la vitesse de 25 mètres par seconde, pourrait au besoin, rétablir l'équilibre troublé. Les dénivellations continues que nous avons observées durant généralement des journées et plusieurs journées, elles ne sont probablement pas causées par une action aussi rapide et aussi éphémère.

Pourrons-nous un jour, avec des moyens d'observations plus perfectionnés, reconnaître les dénivellations dues aux variations de la pression barométrique, je suis très loin d'en désespérer.

En résumé, je reconnais sur le lac des dénivellations temporaires continues durant plusieurs heures et même plusieurs jours; elles sont causées normalement par l'action du vent qui, par son action mécanique, chasse l'eau de la partie du lac d'où il vient pour la relever dans celle vers laquelle il souffle.

§ XIV. — Dénivellations temporaires rythmiques. Seiches.

Sous l'influence d'une variation subite de la pression barométrique ¹ en un point déterminé du bassin du lac, ou sous l'impulsion d'une secousse de tremblement de terre ², l'eau du lac peut subir une dénivellation temporaire rapide qui devient l'origine d'un mouvement rythmique d'oscillation fixe uninodale ou de balancement. Après avoir été, sous cette impulsion violente et subite, dénivelée, déprimée à l'une des extrémité du lac et soulevée à l'autre, l'eau tend à reprendre son niveau horizontal; mais au lieu de s'arrêter à l'horizontalité sous l'entraînement du mouvement acquis, elle dépasse

¹ Je ne veux pas discuter ici l'effet de ces variations barométriques, c'est dans un travail spécial qui paraîtra bientôt sous le titre de *Causes des seiches* que j'étudierai les conditions du développement de ces oscillations de l'eau. Je dirai seulement ici que j'ai reconnu avec la plus grande sûreté l'origine des seiches coïncidant avec des orages, tandis que les variations lentes et graduées du baromètre ne sont généralement pas accompagnées de fortes seiches.

² J'indique les tremblements de terre comme étant cause possible des seiches; il est évident en effet qu'une secousse du vase peut déterminer des oscillations de balancement de l'eau contenue dans ce vase; il est évident que si les tremblements de terre peuvent causer les ras de marée de l'Océan, ils peuvent aussi ébranler l'eau de nos lacs. Cependant cette secousse n'agit sur l'eau des lacs que dans certaines conditions à déterminer; en effet, divers tremblements de terre qui ont été ressentis en Suisse pendant l'année 1876, n'ont rien dessiné de remarquable à l'enregistreur de Morges. Ces tremblements de terre sont ceux du 2 avril 1876 à 6 h. — m. à Neuchâtel.

30 » » 2 h. 10 s. id.

1^{er} mai » 4 h. 45 m. id.

2 » » 8 h. 30 m. id.

7 » » 5 h. 46 m. à Morges, Orbe, le pied du Jura.

29 nov. » 7 h. 20 s. à Morges, Orbe, Yverdon.

2 mai 1877 8 h. 50 s. à Ebnet, Dürnten, Zurich, St-Gall, Thurgovie.

Le 2 avril l'enregistreur ne fonctionnait pas au moment de la secousse; mais il était en jeu régulier pendant les six autres tremblements de terre, et je n'ai pas pu reconnaître sur les tracés la plus petite dénivellation.

ce niveau, et pour revenir à l'état d'équilibre est obligée de décrire une série d'oscillations de plus en plus faibles. Ces oscillations rythmiques sont ce que nous appelons *seiches*. La série d'oscillations qui se succèdent avant que la nappe ait repris l'état de repos peut être considérable ; c'est ainsi qu'une série de seiches qui avaient commencé le 22 août 1876, à une heure du matin, se sont continuées sans interruption et sans nouvelle impulsion 41 heures durant ; le 20 février 1877 une série d'oscillations a commencé qui a duré d'une manière appréciable à mon enregistreur pendant 83 heures de suite.

J'ai à plusieurs reprises indiqué les seiches comme étant la cause possible d'erreurs graves dans les observations limnimétriques ; quelques détails sur l'amplitude des seiches confirmeront ce dire.

D'après les tracés de l'enregistreur de Morges, les seiches sont ordinairement peu fortes dans cette station, et n'atteignent pas un centimètre d'amplitude dans la très grande généralité des cas ; mais elles peuvent aussi s'élever beaucoup plus et arriver à plusieurs centimètres. Pendant la période de 18 mois d'observation dont je dispose, elles ont dépassé dans un cas (22 août 1876) 12 centimètres d'amplitude entre la seiche haute et la seiche basse. Une lecture limnimétrique faite à ce moment-là aurait pu être entachée d'une erreur de 6 centimètres.

A Genève les seiches sont beaucoup plus considérables : sans parler ici des seiches tout à fait extraordinaires de 1 à 2 mètres ¹, sans parler des seiches qui, chaque année, atteignent un pied d'amplitude, je dirai que d'après les tracés de l'enregistreur de M. Ph. Plantamour, à Sécheron, le lac est très rarement calme ; presque normalement à Genève on peut voir des seiches de 2 à 3 centimètres d'amplitude ; celles de 10 centimètres ne sont pas rares, et dans la première quinzaine d'observation, dont je dois communication à l'obligeance de

¹ Cf. 1^{re} étude sur les seiches, p. 12.

M. Plantamour, il y avait déjà des seiches de 17 centimètres d'amplitude.

On voit d'après cela qu'il y a bien dans les seiches une action importante qui peut intervenir dans les observations limnimétriques comme cause d'erreur d'une manière très grave et nullement négligeable.

Les seiches sont des vagues d'oscillation fixée, vagues stationnaires uninodales qui font balancer l'eau suivant les deux diamètres principaux du bassin; les seiches longitudinales et les seiches transversales peuvent coexister en même temps et interférer les unes sur les autres.

Le rythme des seiches est déterminé par les dimensions du bassin et s'exprime par la formule suivante :

$$t = \frac{l}{\sqrt{gh}}$$

t étant la durée d'une demi-oscillation de seiche.

l étant la longueur du diamètre du lac suivant lequel oscille la seiche.

h étant la profondeur moyenne du lac.

Je renvoie pour cette question des seiches aux divers mémoires que j'ai publiés récemment sur ce sujet ¹.

§ XV. — Des maximums et des minimums de hauteur du lac.

Dans le tableau II, p. 38, j'ai donné les hauteurs moyennes mensuelles et annuelles du lac pendant les 25 dernières an-

¹ Première étude sur les seiches du lac Léman. Lausanne 1873. — Deuxième étude, 1875. Librairie Rouge et Dubois. Bull. Soc. vaud. Sc. nat., XII, 213; XIII, 510. — Les seiches, vagues d'oscillation fixe des lacs. Actes de la Soc. Helvét. Andermatt 1875. — Le limnimètre enregistreur de Morges. Arch. des Sc. ph. et nat. Genève, août 1876. N. P. LVI, 305. — La formule des seiches. Arch. décembre 1876. LVII, 278. — Essai monographique sur les seiches du lac Léman. Arch. mai 1877. LIX, 50.

Voyez encore : Archives des Sc. ph. et nat. de Genève, janvier 1874, XLIX, 24, août 1875, LIII, 281. — Annales de chimie et de physique de Paris. 5^e série, t. IX. 1876. — Comptes-rendus de l'Académie des Sciences de Paris, LXXX, 107; LXXXIII, 712.

nées, 1851-1875, d'après les observations de Vevey. Après avoir critiqué la valeur de ces observations en opposition à celles du limnimètre de Genève, je suis arrivé à estimer qu'elles indiquent mieux que ces dernières la véritable hauteur du lac, la correction de la pente du lac ne devant pas leur être appliquée.

C'est la même raison qui fait que je vais donner dans le tableau ci-dessous les chiffres des maximums et minimums de cette même série d'années d'après les mêmes observations de Vevey; comme terme de comparaison j'emprunterai à mon tableau II la hauteur moyenne de l'année.

Tableau IV.

Maximums, moyennes et minimums
des années 1851 à 1875.

Années.	Maximum.	Moyenne.	Minimum.	Années.	Maximum.	Moyenne.	Minimum.
	m.	m.	m.		m.	m.	m.
1851	2.394	1.275	0.774	1864	2.295	1.486	0.957
1852	2.461	1.371	0.751	1865	2.340	1.590	1.044
1853	2.424	1.332	0.684	1866	2.505	1.689	1.146
1854	2.124	1.152	0.684	1867	2.652	1.779	1.275
1855	2.265	1.420	0.744	1868	2.484	1.563	0.909
1856	2.142	1.357	0.822	1869	2.334	1.520	1.104
1857	1.866	1.121	0.789	1870	2.382	1.498	0.900
1858	1.668	1.071	0.621	1871	2.580	1.643	1.176
1859	2.277	1.382	0.888	1872	2.607	1.629	0.963
1860	2.214	1.559	0.900	1873	2.640	1.616	1.137
1861	2.529	1.498	1.020	1874	2.517	1.428	0.798
1862	2.124	1.332	0.939	1875	2.493	1.682	0.954
1863	2.244	1.538	0.924				

De ce tableau je tire les chiffres suivants :

1° La moyenne des maximums de cette série de 25 années
est de ^{m.} 2.342

La moyenne des moyennes 1.468

La moyenne des minimums 0.916

2° Si je divise en périodes de cinq ans les 25 années de cette série, j'en tire les moyennes du tableau V. Pour faciliter la comparaison de ces chiffres, j'indique dans une seconde colonne la différence en plus ou en moins avec la moyenne générale des maximums des moyennes et des minimums que je viens de donner.

Tableau V.

Moyennes générales des maximums, moyennes et minimums.

Moyennes quinquennales.				Différence avec la moyenne de 25 ans.		
	Maximums. m.	Moyennes. m.	Minimums. m.	Maximums. mm.	Moyennes. mm.	Minimums. mm.
1851-55	2.336	1.345	0.727	— 6	— 123	— 189
1856-60	2.036	1.298	0.804	— 306	— 170	— 112
1861-65	2.306	1.487	0.977	— 36	+ 19	+ 61
1866-70	2.471	1.610	1.067	+ 129	+ 142	+ 151
1871-75	2.567	1.600	1.005	+ 225	+ 132	+ 89

Ces chiffres montrent incontestablement un relèvement graduel très marqué dans la hauteur des eaux du lac, aussi bien dans les maximums, dans les moyennes et dans les minimums

M. E. Plantamour, dans sa Notice sur la hauteur des eaux du lac, a figuré graphiquement ces trois séries de chiffres pour les années 1838 à 1873 ; je ne répète pas ce tableau qui serait pour le Grand-lac presque parallèle à celui du port de Genève.

§ XVI. — Du régime limnimétrique du lac Léman.

En étudiant la courbe limnimétrique de l'année 1876 telle qu'elle est figurée à la planche II, j'ai été frappé de l'existence très évidente de trois maximums bien caractérisés, l'un au printemps, mars, l'autre en été, juillet et août, le troisième en automne, décembre; j'ai cru reconnaître là les maximums normaux de deux lacs de nature très différente.

Notre lac, en effet, par sa position et par la nature de ses affluents, est un lac mixte; il est à la fois un lac alpin et un lac de plaine.

Son principal affluent, le Rhône, est essentiellement un fleuve alpin, alimenté par une surface énorme de glaciers et de neiges éternelles (plus de mille kilomètres carrés); il subit en été, sous l'influence des chaleurs de juin et de juillet, une crue considérable et prolongée qui dépasse de beaucoup en intensité et en durée toutes les crues accidentelles dues aux orages et aux pluies. Sous l'action du Rhône alpin le lac Léman a donc un état relativement stationnaire pendant sept mois de l'année, de novembre à mai, tandis que de juin en octobre il présente une crue importante, soutenue, dont le maximum a lieu normalement au commencement d'août, le 3 août d'après M. Plantamour.

Mais le Rhône n'est pas seulement alimenté par les glaciers et les neiges éternelles; il reçoit aussi toutes les eaux des montagnes basses et de la grande vallée du Valais, de plus le Rhône n'est pas le seul affluent du lac et toutes les rivières qui se jettent directement dans le Léman ont leur bassin d'alimentation en plaine ou en pays de montagnes basses. Or le régime des rivières de plaine est tout différent de celui d'un fleuve alpin. Pendant les gels de l'hiver le débit est à son minimum, pendant les sécheresses de l'été il est presque aussi faible; les crues normales sont dues à la fonte des neiges de l'hiver sous l'effet des premières chaleurs

du printemps ; les crues accidentelles sont dues aux pluies diluviennes qui, comme on le sait, ont lieu spécialement en automne d'abord, puis au printemps. Il en résulte que les lacs de plaine présentent normalement deux maximums ¹, l'un au printemps, l'autre en automne, et deux minimums, l'un en été, l'autre en hiver. Notre lac étant en partie alimenté par des rivières de plaine et de montagnes basses doit présenter aussi ces caractères des lacs de plaine et être sujet à leurs variations.

■ Le lac Léman doit donc avoir normalement le régime mixte suivant :

1° Un *minimum d'hiver* commun aux deux régimes alors que le gel a tari toutes les sources et eaux superficielles.

2° Un *maximum du printemps*, premier maximum du lac de plaine, dû soit à la fonte des neiges basses, soit aux pluies diluviennes du printemps.

3° Un *minimum de la fin du printemps*. Cette décrue du lac de plaine correspondant au moment où commence la fonte des neiges alpines, ne saurait être fort accentuée.

4° Un *maximum de l'été*, caractère essentiel du lac alpin.

5° Un *minimum de la fin de l'été*. Ce minimum est peu marqué ; la décrue du fleuve alpin, qui est très évidente, correspond au moment où les temps pluvieux de l'automne viennent enfler les rivières de plaine.

6° Un *maximum d'automne* dû aux pluies diluviennes de la fin de l'année, quand elles ont lieu.

C'est le maximum de l'été et le minimum de l'hiver qui, de beaucoup, sont les plus considérables et le mieux marqués.

Mon attention a été attirée sur ces faits en étudiant la planche II qui figure la courbe limnimétrique de l'année 1876 ; tous ces maximums et minimums y sont évidemment dessinés. J'ai cherché ensuite si dans les années précédentes je retrouvais le même caractère ; quoiqu'il ne soit pas toujours aussi frap-

¹ Ou deux séries de maximums, chaque période de mauvais temps amenant une crue, chaque période de beau temps une décrue.

pant qu'en 1876, je l'ai trouvé cependant assez généralement constant pour que j'aie essayé d'en donner une représentation graphique.

Dans la planche III, j'ai figuré le tracé limnimétrique des années 1871 à 1876; le trait rouge représente le lac de plaine avec ses deux maximums et son minimum d'hiver; le trait noir figure le grand maximum d'été du lac alpin; les lignes pointillées contiennent les tracés hypothétiques des deux lacs et représentent le minimum d'été du lac de plaine et le minimum d'hiver du lac alpin.

C'est dans l'hiver de 1875 à 1876 que ce régime mixte est le plus évident.

Ces figures sont assez parlantes pour n'avoir pas besoin d'autre explication.

§ XVII. — Limnimétrie de l'année 1876.

Je donne dans le tableau IX ¹, à la fin de ce mémoire, et dans la planche II, les hauteurs journalières et la courbe du niveau du lac pendant les 366 jours de l'année 1876. De l'étude de ces chiffres je tire les remarques et les observations suivantes :

A. Etude générale de la courbe. Si dans la planche II j'étudie la courbe limnimétrique de l'année en la comparant à la ligne des moyennes NN, je la vois commencer en janvier en étant relativement assez élevée, mais descendant très rapidement pour atteindre le minimum d'hiver le 15 février par 0^m945. Une crue énorme et soutenue amène au 15 mars un maximum du printemps très évident et très bien caractérisé; à ce moment les eaux sont de 75 centimètres trop élevées; c'est de toute l'année le moment le plus divergent et le plus anormal. Depuis ce maximum, décrue modérée jusqu'à la fin

¹ Dans le tableau IX les cotes sont tirées des observations de Vevey du 1^{er} janvier au 27 mars et du 9 ou 16 novembre. Pour tout le reste de l'année elles sont tirées des tracés de mon enregistreur de Morges.

de mai où la courbe revient presque à la normale. Au 18 mai commence la grande crue estivale qui se termine vers le 10 juillet; du 10 juillet au 26 août le lac reste stationnaire à une hauteur tout à fait extraordinaire de 45 centimètres environ au-dessus de la moyenne; le maximum est atteint le 26 juillet à 9 heures du matin par 2^m661. A partir de la fin d'août le lac s'abaisse rapidement pour atteindre et même dépasser en dessous la courbe normale au commencement de novembre. Le bel automne de 1876 recule jusqu'au milieu de novembre la crue due aux pluies de la fin de l'année; un maximum d'automne est atteint vers le 10 décembre, et le lac reste stationnaire jusqu'à la fin de 1876 à environ 30 centimètres au-dessus de la normale.

Si je résume les époques et les dates des divers maximums et minimums de l'année, je trouve les chiffres suivants :

	Date.	Cote m.
1. Minimum d'hiver . . .	15 janvier	0.945
2. Maximum du printemps	19 mars	1.803
3. Minimum du printemps	18 mai	1.535
4. Maximum d'été . . .	26 juillet	2.661
5. Minimum d'automne. .	11 novembre	1.287
6. Maximum d'automne .	11 décembre	1.535

D'après les circonstances météorologiques, je crois pouvoir fixer pour cette année le commencement de la grande crue estivale au 19 mai et sa fin au 25 août.

En somme, l'état du lac a, pendant toute l'année, été très élevé, ce que nous montreront encore mieux les moyennes.

Le lac a été au-dessous de la moyenne des 25 dernières années pendant 35 jours, à savoir : en février 21 jours
en novemb. 14 »
pendant 331 jours il a été au-dessus de la hauteur normale.

B. *Moyennes mensuelles.* Dans le tableau VI ci-dessous, je donne les moyennes mensuelles de l'année 1876, puis la moyenne normale calculée d'après les années 1851 à 1875;

dans la troisième colonne la différence en plus ou en moins entre les chiffres des deux premières colonnes.

Tableau VI.

	1876	Moyenne de 25 ans.	Différence.
	m.	m.	mm.
Janvier	1.218	1.076	+ 142
Février	1.046	1.062	— 16
Mars	1.647	1.047	+ 600
Avril	1.645	1.154	+ 491
Mai	1.619	1.328	+ 291
Juin	2.075	1.700	+ 375
Juillet	2.583	2.064	+ 519
Août	2.582	2.205	+ 377
Septembre	2.134	1.943	+ 191
Octobre	1.681	1.525	+ 156
Novembre	1.339	1.297	+ 42
Décembre	1.495	1.213	+ 282

D'après ces chiffres, le niveau du lac a été au-dessus de la normale dans tous les mois à l'exception du mois de février où la moyenne a été de 16 millimètres trop faible. C'est au mois de mars et d'avril d'abord, puis de juin, juillet et août que cet écart est le plus fort.

C. *Moyenne annuelle.* La moyenne annuelle calculée en prenant la moyenne des 12 moyennes mensuelles donne le chiffre de 1^m672.

Cette moyenne annuelle est supérieure de 204 millimètres à la cote 1^m468, moyenne des 25 années qui nous servent de norme. Si nous faisons la comparaison avec les 38 années dont nous pouvons disposer en utilisant les observations de Genève ¹, nous avons une différence en plus de 215 millimètres; la moyenne générale du lac étant de 1^m457.

¹ Voyez § IV, 1^{re} sér., p. 62.

Si je me reporte au tableau IV, page 33, qui donne dans sa deuxième colonne les moyennes annuelles des 25 dernières années, je ne trouve que trois années qui aient été supérieures dans leurs moyennes à 1876, à savoir :

1866	avec une moyenne de	1 ^m 689
1867	»	1 ^m 779
1875	»	1 ^m 682

Les 22 autres années lui sont inférieures.

D. *Maximum et minimum absolu.*

Le minimum de l'année a été atteint le 16 février par 0^m945

Le maximum » 26 juillet 2^m661

Différence entre les extrêmes 1^m716

ce qui représente un excès de l'entrée sur la sortie de 991 millions de mètres cubes d'eau.

D'après les calculs de M. E. Plantamour, le minimum normal a lieu le 22 février, le maximum le 3 août; il y a donc eu cette année avance de 6 jours pour le minimum et de 8 jours pour le maximum.

D'après les chiffres étudiés au § XV, la moyenne des maximums est de 2^m342; le maximum de 1876 ayant atteint 2^m661 est à 319 millimètres au-dessus de la normale.

Dans les 25 années dont le maximum est indiqué au tableau IV, page 33, cette cote de 2^m661 n'a été dépassée qu'une fois, le 6 juillet 1867, par 2^m664.

Pour autant qu'on peut s'en rapporter aux chiffres des précédentes périodes, le maximum de 1876 aurait été dépassé :

	en 1792	avec la cote	m.
			2.95
le 16 juillet	1817	»	2.93
le 26 août	1816	»	2.90
le 17 juillet	1846	»	2.795
le 6 »	1867	»	2.664

Les années qui se rapprochent le plus de 1876 sont :

1873	avec la cote	m. 2.640
1872	»	2.607
1871	»	2.580
1861	»	2.529
1874	»	2.517
1866	»	2.505 etc.

Au point de vue du maximum absolu, l'année a donc été exceptionnellement haute.

Le minimum de 0^m945 est de 29 millimètres plus élevé que la moyenne 0^m916 des minimums des 25 années dernières.

Dans ces 25 années le minimum a été 9 fois plus élevé et 16 fois plus bas qu'en 1876.

E. *Les hautes eaux de 1876.* Ce qui, pour les riverains du lac, a été le plus fâcheux dans la hauteur exceptionnelle des eaux de 1876, cela a été leur durée; le lac a été stationnaire pendant très longtemps à un niveau fort élevé.

Une comparaison avec les années 1867 et 1873 pendant lesquelles le maximum de hauteur a été presque aussi élevé qu'en 1876, montre combien dans cette dernière année la durée des hautes eaux a été prolongée. Le tableau suivant indique pour ces trois années le nombre de jours pendant lesquels le lac a dépassé la cote indiquée à la première colonne.

Tableau VII. — *Durée des hautes eaux.*

Hauteur du lac. m.	1867.	1873.	1876.
2.66	1 jour	—	1 jour
2.65	2 jours	—	1 —
2.64	4 —	1 jour	5 jours
2.63	5 —	2 jours	12 —
2.62	5 —	7 —	15 —

Hauteur du lac. m.	1867.	1873.	1876.
2.61	7 jours	9 jours	21 jours
2.60	8 —	10 —	30 —
2.55	29 —	19 —	48 —
2.50	36 —	25 —	53 —

F. *Répartition proportionnelle des hauteurs d'eau.* Pour donner une idée de la distribution des hauteurs d'eau et de la durée proportionnelle de chaque cote, je donnerai dans le tableau suivant le nombre de jours où le niveau s'est maintenu à la cote indiquée et dans le décimètre au-dessus.

Cote m.	Jours	Cote m.	Jours
2.6	30	1.7	27
2.5	23	1.6	57
2.4	15	1.5	44
2.3	5	1.4	15
2.2	9	1.3	43
2.1	13	1.2	13
2.0	8	1.1	15
1.9	11	1.0	15
1.8	12	0.9	11

Si je résume les chiffres ci-dessus en séries de cinquante en cinquante centimètres, j'aurai une expression plus évidente des faits; mais pour pouvoir trouver leur signification réelle, faisons auparavant ce travail pour quelques années antérieures.

m.	m.	1871	1872	1873	1874	1875	Moyenne de 5 ans.
De 2.5	à 3.0	7	20	24	6	—	11 jours
De 2.0	à 2.5	86	69	58	66	105	77 —
De 1.5	à 2.0	103	130	86	58	110	97 —
De 1.0	à 1.5	165	123	197	143	124	150 —
De 0.5	à 1.0	4	24	—	92	26	29 —

Ces moyennes étant données, je puis leur comparer les chiffres de 1876 et voir dans quel sens ils sont exagérés.

m.	m.	1876	Moyenne	Différence
De 2.5	à 3.0	53 jours	11 jours	+ 42 jours
» 2.0	à 2.5	50 —	77 —	— 27 —
» 1.5	à 2.0	151 —	97 —	+ 54 —
» 1.0	à 1.5	101 —	150 —	— 49 —
» 0.5	à 1.0	11 —	29 —	— 18 —

Ce qui traduit en mots signifie que en 1876 le lac a été pendant trop longtemps dans les très hautes eaux et les eaux moyennes, trop peu longtemps dans les eaux très basses, basses et hautes.

G. *Crues journalières du lac.* La hauteur de la crue du lac en 24 heures ou en une heure peut avoir un assez grand intérêt, comme élément de calcul du débit des affluents.

La plus forte crue observée en 1876 a été de 69 millimètres en 24 heures, du 8 au 9 juin.

Dans le tableau ci-dessous j'ai indiqué, mois par mois, la valeur de la plus forte crue diurne observée pendant l'année 1876; l'on y verra des différences importantes entre les différentes saisons.

Tableau VIII. — Crues du lac en 1876.

					mm.
Janvier	du	9	au	10	8
Février	du	27	au	28	54
Mars	du	12	au	13	66
Avril	du	28	au	29	28
Mai	du	22	au	23	(?) 28
Juin	du	8	au	9	69
Juillet	du	9	au	10	39
Août	du	24	au	25	24
Septembre	du	28	au	29	19
Octobre	du	30 sept.	au	1 ^{er} oct.	20
Novembre	du	19	au	20	31
Décembre	du	7	au	8	(?) 37

Pour les crues du 22 mai et du 7 décembre j'ai fait une correction aux observations limnimétriques directes faites à Morges; en effet, la comparaison avec les observations de Genève me montre pour ces jours des dénivellations évidentes dont il faut tenir compte.

Les observations de janvier à mars ont été faites avec le limnimètre de Vevey; elles sont beaucoup moins sûres que celles des neuf derniers mois basées sur les tracés de l'enregistreur de Morges.

H. *Variation de la pente du lac en 1876.* Il est enfin un dernier point que j'étudierai dans la limnimétrie de l'année 1876, c'est l'état de la pente du lac; les valeurs d' telles qu'elles sont données jour par jour dans le tableau IX nous serviront à ce travail. Elles expriment en effet les variations de la pente du lac en montrant de combien la correction D appliquée dans la comparaison entre les observations du Grand-lac et celles du limnimètre du Jardin anglais de Genève est trop forte ou trop faible; les chiffres de la colonne d' expriment en millimètres l'excès de pente quand le chiffre est positif, le défaut de pente quand il est négatif.

Ces variations de d' peuvent être dues à quatre causes, indépendamment des erreurs et des incorrections d'observation :

1° Aux dénivellations temporaires continues.

2° Aux seiches.

3° Aux erreurs dans la détermination de la correction D de la pente du lac, calculée d'après les observations de 1871 à 1875.

4° Aux variations de la pente du lac causées par des changements dans les conditions d'écoulement du Rhône à Genève, et spécialement par l'ouverture et la fermeture du barrage de la machine hydraulique.

Les deux premières causes sont accidentelles et doivent disparaître dans des moyennes.

Tableau IX

Année limnimétrique 1876. Observations de Morges (et de Vevey []).

Janvier		Février		Mars		Avril		Mai		Juin		Juillet		Août		Septembre		Octobre		Novembre		Décembre	
<i>h</i> m	<i>d'</i> mm	<i>h</i> m	<i>d'</i> mm	<i>h</i> m	<i>d'</i> mm	<i>h</i> m	<i>d'</i> mm	<i>h</i> m	<i>d'</i> mm	<i>h</i> m	<i>d'</i> mm	<i>h</i> m	<i>d'</i> mm	<i>h</i> m	<i>d'</i> mm	<i>h</i> m	<i>d'</i> mm	<i>h</i> m	<i>d'</i> mm	<i>h</i> m	<i>d'</i> mm	<i>h</i> m	<i>d'</i> mm
1	1.353	— 22	1.062	1.305	— 3	1.692	— 3	1.689	— 5	1.667	— 19	2.457	— 2	2.618	— 3	2.460	— 4	1.923	— 34	1.378	— 20	1.377	— 16
2	41	— 22	59	32	— 22	77	— 4	91	— 24	87	— 2	56	— 1	37	— 20	55	— 20	21	— 16	54	— 58	75	— 48
3	38	— 22	50	77	— 9	65	— 7	91	— 34	1.701	— 2	50	— 20	29	— 9	12	— 1	06	— 8	52	— 7	77	— 56
4	35	— 8	41	1.413	— 16	61	— 8	87	— 21	17	— 9	64	— 21	37	— 5	2.385	— 10	1.866	— 25	38	— 43	1.406	— 42
5	32	— 44	32	49	— 9	52	— 0	81	— 9	40	— 21	79	— 12	47	— 2	51	— 4	79	— 22	32	— 29	12	— 37
6	20	— 47	26	70	— 36	48	— 3	62	— 16	66	— 15	99	— 6	36	— 18	16	— 12	56	— 17	25	— 1	24	— 70
7	08	— 12	17	1.512	— 49	45	— 13	44	— 11	1.802	— 19	36	— 10	30	— 24	2.286	— 10	41	— 19	18	— 9	46	— 11
8	02	— 34	08	33	— 19	43	— 3	28	— 46	55	— 10	54	— 9	31	— 18	64	— 59	26	— 8	13	— 9	1.504	— 31
9	1.290	— 21	0.996	45	— 10	40	— 11	17	— 4	1.924	— 17	54	— 6	17	— 9	63	— 14	05	— 4	05	— 10	21	— 2
10	1.302	— 23	84	93	— 21	24	— 10	05	— 14	65	— 19	93	— 12	10	— 1	38	— 14	1.799	— 19	1.296	— 2	30	— 39
11	1.272	— 11	78	1.617	— 40	23	— 32	1.592	— 12	2.025	— 51	2.607	— 11	2.535	— 1	20	— 19	90	— 33	87	— 47	35	— 25
12	54	— 11	66	32	— 78	51	— 56	93	— 20	78	— 18	19	— 32	85	— 11	2.183	— 4	70	— 17	93	— 6	33	— 39
13	45	— 32	57	98	— 116	60	— 24	92	— 30	2.130	— 16	02	— 61	72	— 1	60	— 8	50	— 15	1.308	— 41	34	— 20
14	30	— 38	48	1.755	— 24	45	— 19	82	— 5	46	— 11	05	— 43	72	— 9	33	— 4	35	— 20	11	— 10	33	— 6
15	18	— 42	45	73	— 18	23	— 41	70	— 14	52	— 1	01	— 15	67	— 0	10	— 4	13	— 15	11	— 26	32	— 12
16	12	— 54	45	88	— 7	11	— 2	47	— 10	71	— 18	03	— 10	72	— 2	2.080	— 2	1.693	— 12	11	— 10	30	— 19
17	03	— 1	57	76	— 5	00	— 13	40	— 29	88	— 10	08	— 18	58	— 18	52	— 3	68	— 16	14	— 14	24	— 25
18	1.194	— 21	72	94	— 13	1.583	— 26	35	— 26	92	— 9	18	— 4	52	— 3	60	— 9	49	— 15	18	— 23	24	— 47
19	85	— 26	87	1.803	— 10	1.613	— 25	39	— 19	89	— 2	27	— 16	48	— 9	54	— 18	26	— 17	17	— 13	24	— 30
20	79	— 3	1.002	1.794	— 8	40	— 17	49	— 0	88	— 1	16	— 22	71	— 50	38	— 14	1.599	— 22	48	— 1	19	— 29
21	67	— 30	38	79	— 13	42	— 4	60	— 20	96	— 3	07	— 18	67	— 27	12	— 6	76	— 11	66	— 8	32	— 37
22	58	— 5	86	64	— 10	50	— 4	70	— 8	2.216	— 15	— 15	— 15	79	— 3	1.988	— 5	61	— 30	66	— 45	29	— 22
23	52	— 12	98	67	— 7	47	— 22	1.604	— 24	32	— 5	2.602	— 1	77	— 63	61	— 20	42	— 3	75	— 26	27	— 14
24	43	— 7	1.143	55	— 6	45	— 30	17	— 12	53	— 22	06	— 13	62	— 2	36	— 6	23	— 8	72	— 20	26	— 23
25	34	— 5	58	37	— 16	57	— 3	41	— 21	96	— 9	40	— 7	86	— 1	26	— 12	03	— 10	66	— 23	18	— 12
26	22	— 7	73	37	— 18	58	— 18	52	— 9	2.334	— 10	58	— 2	65	— 8	11	— 6	1.480	— 13	67	— 25	16	— 7
27	13	— 4	88	34	— 15	54	— 11	58	— 17	83	— 0	46	— 0	34	— 15	1.897	— 24	60	— 9	67	— 12	08	— 51
28	04	— 17	1.242	12	— 22	49	— 4	52	— 25	2.404	— 1	40	— 9	17	— 2	76	— 30	43	— 1	79	— 15	01	— 22
29	1.092	— 10	75	17	— 32	77	— 16	49	— 15	23	— 3	31	— 18	2.495	— 11	95	— 89	24	— 10	80	— 19	1.497	— 62
30	86	— 25	—	14	— 13	84	— 27	47	— 7	43	— 1	31	— 7	59	— 8	1.903	— 93	10	— 17	81	— 6	92	— 18
31	77	— 9	—	04	— 1	—	—	56	— 17	—	—	20	— 10	57	— 64	—	—	1.394	— 13	—	—	92	— 55

Les dernières se reconnaîtront par l'étude des moyennes de d' .

Si d'abord je prends la moyenne générale de l'année, je la trouve être de $d' = + 2^{\text{mm}}$. Ce qui signifie, ou bien que la pente du lac a été réellement augmentée de 2 millimètres en moyenne, que ce soit par l'effet combiné des dénivellations temporaires, que ce soit par l'état d'ouverture des barrages de la machine de Genève, que ce soit par augmentation de la pente du lac elle-même, — ou bien que la correction D a été de 2^{mm} trop faible.

Si j'ordonne les observations d'après la hauteur absolue du lac, si je les divise en séries de 20 en 20 centimètres, j'obtiens pour d' les moyennes suivantes en 1876 :

Hauteur moyenne.	d'
m.	mm.
1.0	+ 11
1.2	— 3
1.4	— 13
1.6	+ 6
1.8	+ 10
2.0	+ 15
2.2	+ 9
2.4	— 0
2.6	— 6

D'après cela la pente du lac aurait été plus forte ou la correction D trop faible dans les hauteurs d'eau de $0^{\text{m}}9$ à $1^{\text{m}}1$ et de $1^{\text{m}}6$ à $2^{\text{m}}3$; la pente du lac aurait été plus faible ou la correction D trop forte dans les hauteurs du lac de $1^{\text{m}}2$ à $1^{\text{m}}5$ et au-dessus de $2^{\text{m}}4$.

Quelle est des différentes causes possibles celle qui en 1876 a causé ces écarts de d' , je ne puis le dire avec sûreté; mais je suis disposé à l'attribuer en partie à une insuffisance de la correction D qui devrait être rectifiée dans le sens indiqué.

Quant aux variations de d' dues à l'état du barrage de Genève, elles sont aussi évidentes que possible en automne. En effet, le barrage de la machine hydraulique a été fermé le 20

octobre, et tandis qu'auparavant la pente du lac était plus forte que la normale, elle est devenue subitement plus faible après la fermeture du barrage ;

c'est ce que montreront les moyennes de d'

du 1 au 20 octobre $d' = + 18$ millimètres.

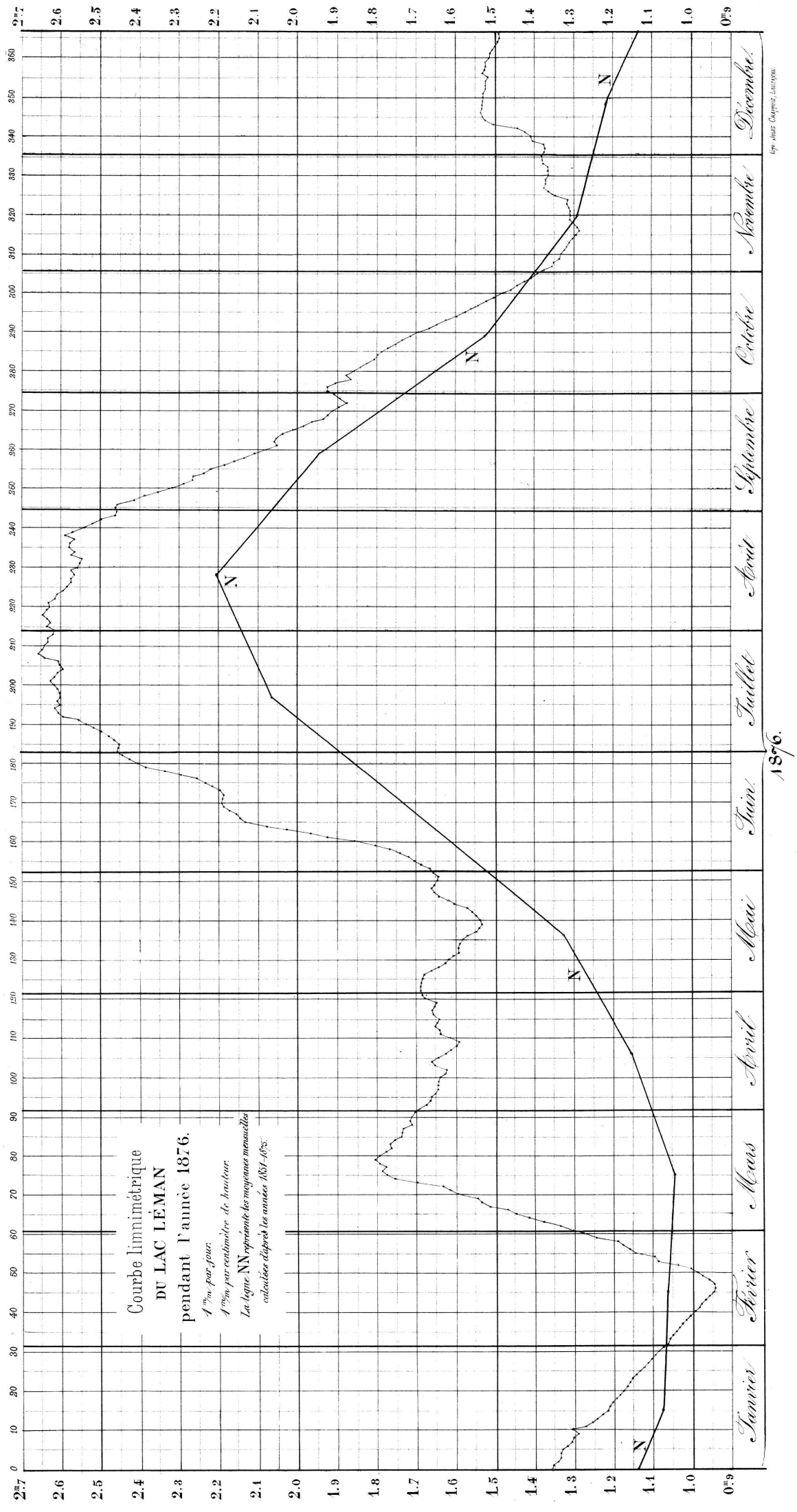
20 au 31 » $d' = - 9$ »

Différence $\underline{27}$ »

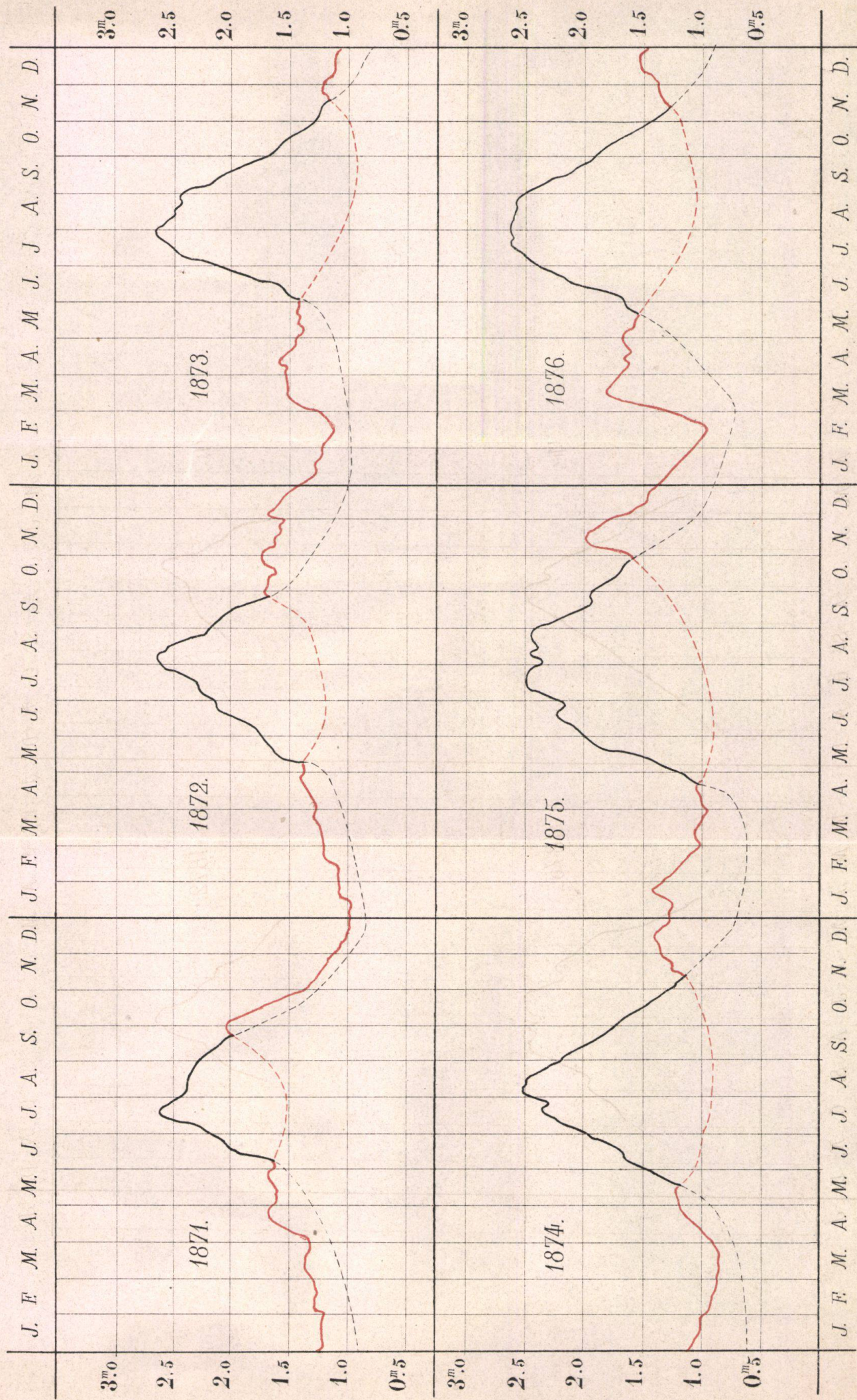
La fermeture du barrage en octobre 1876 a donc amené une diminution de la pente du lac de 27 millimètres. C'est là une démonstration très heureuse des faits que nous avons étudiés au § II ci-dessus.

Quant à l'effet de l'ouverture du barrage au printemps, il est beaucoup moins évident, l'ouverture ayant été progressive et ayant duré du 8 mars au 8 avril, d'après les notes que m'a communiquées M. Merle d'Aubigné.





Apr. Jour. Courbes, L. FOREL.



Impr. J. J. Chapuis, Lausanne.

Courbe limnimétrique des années 1871 à 1876. — Tracé noir: le lac Léman, lac alpin. — Tracé rouge: le lac Léman, lac de plaine.