

**Zeitschrift:** Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles  
**Herausgeber:** Société Vaudoise des Sciences Naturelles  
**Band:** 17 (1880-1881)  
**Heft:** 86

**Artikel:** Mémoire sur le nouveau baromètre enregistreur de l'observatoire météorologique de Lausanne  
**Autor:** Dufour, Henri / Amstein, H.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-259366>

### **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:** 03.01.2026

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

## MÉMOIRE

SUR LE

## NOUVEAU BAROMÈTRE ENREGISTREUR

DE L'OBSERVATOIRE MÉTÉOROLOGIQUE DE LAUSANNE

PAR

HENRI DUFOUR et D<sup>r</sup> H. AMSTEIN

professeurs à l'Académie de Lausanne.

Pl. XXVIII, XXIX et XXX.



## INTRODUCTION

Les appareils enregistreurs prennent chaque année une place plus grande dans les observatoires météorologiques. Grâce à eux, en effet, on peut, au moyen d'un nombre relativement restreint d'observations directes, obtenir avec une exactitude suffisante, un nombre de chiffres aussi grand qu'on le veut, chiffres qui serviront ensuite dans les calculs des moyennes. A ce titre seul ces appareils sont devenus indispensables; mais les instruments enregistrant d'une manière continue ont en outre l'avantage de donner à l'observateur des renseignements qu'il n'obtiendrait pas au moyen d'observations directes fréquemment répétées; en effet, l'étude attentive de la forme de la courbe tracée par un enregistreur, ou de ce que nous appellerions volontiers l'allure de l'instrument, est souvent aussi précieuse et aussi intéressante que les valeurs absolues qu'on peut tirer de ses indications.

Dans l'étude des variations de la pression barométrique, par exemple, tous ceux qui ont comparé les tracés fournis par un enregistreur à marche continue avec les résultats d'observations horaires savent combien, tout en restant identiques dans leurs caractères généraux, les deux courbes peuvent différer dans les détails, et combien sont précieux pour l'observateur ces détails du tracé continu qui permettent de

voir les modifications que la pression subit parfois en quelques minutes.

On comprend donc l'importance acquise par les appareils enregistreurs dans les observatoires et pourquoi leur nombre est déjà si grand. Une chose cependant empêche encore que ces appareils ne soient plus répandus, c'est leur prix souvent très élevé. Les divers systèmes si ingénieux que l'on possède aujourd'hui sont la réalisation très parfaite d'idées originales, et ils font honneur aussi bien aux constructeurs qu'aux inventeurs, mais les uns et les autres oublient souvent qu'il faut viser à la simplicité et au bon marché sans sacrifier l'exactitude, si on veut que les appareils enregistreurs se répandent dans toutes les stations. Ce sont ces considérations qui nous engagent à décrire ici le baromètre enregistreur d'une construction simple que nous employons depuis deux ans avec avantage au laboratoire de physique de l'Académie de Lausanne.

### HISTORIQUE

L'histoire du baromètre enregistreur à mercure a été faite avec beaucoup de soin et nous renvoyons les personnes que cette question intéresse aux mémoires spéciaux, entr'autres aux travaux de MM. H. Wild <sup>1</sup> et Radau <sup>2</sup>.

On peut, nous semble-t-il, diviser ces instruments en quelques groupes qui les renferment tous.

1° Enregistreurs photographiques, surtout employés en Angleterre; le principe de ces appareils se devine. Un faisceau de lumière traverse la chambre barométrique et impressionne un papier sensible qui se déplace horizontalement. La colonne de mercure intercepte ce faisceau et à chaque déplacement de cette colonne correspond une variation dans la partie impressionnée du papier.

<sup>1</sup> H. Wild. *Repertorium für Meteorologie*, Bd. III, 1874. III<sup>e</sup> partie, p. 113. *Selbstregistrirende Barometer*.

<sup>2</sup> Radau. *Zur Geschichte und Theorie des Wagbarometers*. Pogg. Ann. Bd. 133, p. 430. 1868.

2° Enregistreurs mécaniques des déplacements de la colonne mercurielle qui se trouve dans la branche ouverte d'un baromètre siphon. Cet enregistrement peut avoir lieu par une sonde électrique qui vient à des intervalles de temps égaux se mettre en contact avec le mercure et le rencontre plus ou moins promptement suivant la hauteur du mercure dans le tube ; les mouvements de cette sonde sont transmis à un appareil inscripteur. C'est sur ce principe qu'est construit l'appareil de Hough, par exemple.

On peut aussi enregistrer mécaniquement les mouvements de l'extrémité de la colonne de mercure au moyen d'un flotteur dont les déplacements sont transmis à l'appareil inscripteur. C'est le cas de l'appareil de Bryson. On peut rattacher à ce groupe d'appareils le nouveau baromètre construit par M. Rédiér et auquel cet artiste a appliqué son ingénieux système de mouvement différentiel.

3° Dans le troisième groupe de baromètres enregistreurs à mercure, nous plaçons tous les instruments dans lesquels on utilise les variations du poids du tube ou de la cuvette, variations qui résultent du passage du mercure de la cuvette dans le tube ou réciproquement. Le *baromètre-balance*, si connu aujourd'hui, est le type de ce groupe. L'enregistrement peut être continu ou discontinu. L'équilibre entre le poids variable du tube ou de la cuvette et le contre-poids constant est obtenu en fixant ce contre-poids sur un levier faisant un certain angle avec le bras horizontal qui soutient le tube ou la cuvette. L'équilibre peut être aussi obtenu en déplaçant le contre-poids sur un bras de levier horizontal comme cela se fait sur la balance romaine, ce sont les déplacements automatiques de ce contre-poids qui sont enregistrés. Un instrument construit sur ce principe a été imaginé récemment par M. Sprung<sup>1</sup>. Ce mode d'enregistrement peut être naturellement appliqué à d'autres instruments.

<sup>1</sup> *Wagebarograph mit Laufgewicht*. Zeitschrift für Meteorol., Bd. XVI, Jänner 1881.



Les indications données par tous ces instruments doivent être, comme pour le baromètre ordinaire, réduites à 0°, à moins qu'ils ne soient munis de pièces accessoires servant à compenser l'influence de la température.

4° Dans l'appareil que nous proposons et qui ne peut rentrer dans aucun des groupes précédents, on utilise pour l'enregistrement *les déplacements du centre de gravité d'une colonne de mercure* de forme convenable librement suspendue. L'appareil se compose d'un tube de verre tel que A B C D E F (fig. 1, Pl. I), rempli de mercure et soutenu par un axe horizontal O placé au-dessus du centre de gravité. Lorsque la pression barométrique augmente, le mercure s'élève dans la partie AB du tube et s'abaisse dans la branche ouverte EF, l'instrument tout entier s'incline et le style S se déplace à droite; l'inverse a lieu si la pression diminue<sup>1</sup>.

Dans ce système le poids de l'instrument reste constant, l'appareil est d'une seule pièce et forme un levier coudé du premier genre dont les moments des deux bras varient avec la pression barométrique. A chaque pression correspond une position d'équilibre fixe et stable. A cause de ces propriétés nous appellerons l'instrument *baromètre-levier*.

A ce type d'appareils peut se rattacher le baromètre peu connu et qui n'a, croyons-nous, jamais été employé, inventé par M. O'Reilly. Il est composé d'un tube barométrique ordinaire placé obliquement dans une cuvette de forme cylindrique; l'axe du cylindre est horizontal et forme l'axe de rotation de l'instrument; un contre-poids fait équilibre au poids du tube<sup>2</sup>.

Tels sont, à notre connaissance, les divers modes d'enregistrement employés avec le baromètre à mercure.

<sup>1</sup> Voir pour le principe de l'instrument : *Bull. Soc. vaud. des sciences naturelles*. Vol. XVI, p. 46. 1879. *Archives des sc. phys. et natur.* Vol. II, Troisième période, 1879, p. 127.

<sup>2</sup> O'Reilly *Proceedings of the Royal Irish Academy*. Vol. I, sér. II. Session 1869-70, n° 21, p. 31.

Dans ce mémoire nous donnerons d'abord la théorie mathématique du baromètre-levier, nous décrirons ensuite les deux instruments employés au laboratoire de physique de l'Académie de Lausanne; puis nous indiquerons les résultats obtenus avec ces instruments.

---

## PREMIÈRE PARTIE

### Théorie du baromètre.

Dans l'étude suivante, la colonne mercurielle sera considérée comme un fil parfaitement cylindrique. Elle pourra même être remplacée par une ligne pesante et homogène, car l'expérience prouve que dans une colonne oblique de petit diamètre le niveau du mercure n'est pas horizontal, mais presque perpendiculaire à l'axe du tube; d'ailleurs la section constante de la colonne disparaît des équations.

Le tube se compose (voir fig. 2 pl. I) : 1° d'une tige AB de la longueur  $(a + b)$ ; 2° de deux tiges,  $BO_1$  et  $AO_2$ , perpendiculaires à la première, chacune de la longueur  $k$ , et 3° de deux tiges courbes,  $O_1 M_1$  et  $O_2 M_2$ , dont la longueur est variable, puisqu'il ne sera tenu compte du tube qu'en tant qu'il est rempli de mercure.

A chaque angle  $\varphi$  (voir fig. 2) correspond une hauteur barométrique déterminée. Les parties courbes du tube peuvent-elles être déterminées de manière que les variations de l'angle  $\varphi$  soient proportionnelles à celles de la hauteur barométrique? Tel est le problème qui se présente naturellement à l'esprit et dont la solution serait d'une haute importance théorique.

Les tentatives qui ont été faites pour arriver à la solution de ce problème n'ont pas abouti. Ni l'une ni l'autre des deux solutions, présentées dans ce mémoire, ne satisfait complètement soit aux exigences de la science, soit aux besoins de la

pratique. Malgré ses résultats insuffisants, l'étude suivante ne sera peut-être pas dénuée de tout intérêt scientifique.

Les deux courbes seront rapportées à deux systèmes de coordonnées relatives rectangulaires, dont les origines se trouvent respectivement en  $O_1$  et  $O_2$ . Soient  $x, y$  les coordonnées du point  $M_1$  de la courbe supérieure,  $\xi, \eta$  celles du point  $M_2$  de la courbe inférieure. Ces coordonnées sont des fonctions inconnues de l'angle  $\varphi$  qui, pour toute cette recherche, sera considéré comme la variable indépendante. Lorsque la tige AB fait l'angle  $\varphi$  avec la verticale, les longueurs des deux courbes ont pour expression

$$\text{arc } O_1M_1 = s = \int_{-\varphi_1}^{\varphi} ds$$

et

$$\text{arc } O_2M_2 = \sigma = - \int_{\varphi}^{\varphi_1} d\sigma = \int_{\varphi_1}^{\varphi} d\sigma,$$

où  $-\varphi_1$  désigne l'angle qui correspond à la position limite du baromètre dans laquelle l'extrémité libre de la courbe supérieure coïncide avec l'origine  $O_1$ . L'angle  $+\varphi_1$  a une signification analogue pour la courbe inférieure. Ces angles peuvent être choisis assez grands pour que jamais la longueur d'aucune des deux branches courbes ne soit complètement réduite à zéro. Il suffit, en effet, d'employer assez de mercure pour que, dans aucune position possible du baromètre, le mercure ne descende jusqu'aux points  $O_1$  et  $O_2$ .

Il est à remarquer que, lorsque l'angle  $\varphi$  augmente, la longueur de la courbe  $O_2M_2$  diminue; la différentielle de l'arc  $d\sigma$  doit, par conséquent, être prise négativement.

Les coordonnées relatives  $X, Y$  du centre de gravité de la courbe  $O_1M_1$  sont données par les formules

$$X = \frac{\int_{-\varphi_1}^{\varphi} x ds}{s}, \quad Y = \frac{\int_{-\varphi_1}^{\varphi} y ds}{s},$$

tandis que les coordonnées relatives  $\Xi$ ,  $H$  du centre de gravité de la courbe  $O_2M_2$  sont

$$\Xi = \frac{\int_{\varphi_1}^{\varphi} \xi d\sigma}{\sigma}, \quad H = \frac{\int_{\varphi_1}^{\varphi} \eta d\sigma}{\sigma}.$$

Lorsque le baromètre est en équilibre dans une position quelconque, la somme des moments de toutes ses parties par rapport au point de suspension  $O$  est nulle. Les forces qui sollicitent l'appareil sont les poids de ses différentes parties. Comme tels, elles sont proportionnelles aux longueurs de ces parties. Pour établir l'équation des moments, on peut se figurer que chaque force est appliquée au centre de gravité de la partie dont elle représente le poids, et il suffit de remplacer les poids par les longueurs respectives, puisque, par hypothèse, toutes les parties du baromètre sont parfaitement cylindriques et homogènes. De cette manière on obtient les moments suivants :

$$\text{Moment de } OB = \frac{1}{2} b^2 \sin \varphi,$$

$$\text{» } BO_1 = k (b \sin \varphi + \frac{1}{2} k \cos \varphi),$$

$$\text{» } O_1M_1 = s [b \sin \varphi + (X + k) \cos \varphi + Y \sin \varphi],$$

$$\text{» } OA = -\frac{1}{2} a^2 \sin \varphi,$$

$$\text{» } AO_2 = -k (a \sin \varphi + \frac{1}{2} k \cos \varphi),$$

$$\text{» } O_2M_2 = -\sigma [a \sin \varphi + (\Xi + k) \cos \varphi - H \sin \varphi].$$

L'équation des moments devient :

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} b^2 \sin \varphi + k (b \sin \varphi + \frac{1}{2} k \cos \varphi) + \\ & + s [b \sin \varphi + (X + k) \cos \varphi + Y \sin \varphi] - \\ & - \left\{ \frac{1}{2} a^2 \sin \varphi + k (a \sin \varphi + \frac{1}{2} k \cos \varphi) + \right. \\ & \left. + \sigma [a \sin \varphi + (\Xi + k) \cos \varphi - H \sin \varphi] \right\} = 0, \end{aligned}$$

ou, en remplaçant  $X$ ,  $Y$ ,  $\Xi$ ,  $H$  par leurs valeurs

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} b^2 \sin \varphi + k (b \sin \varphi + \frac{1}{2} k \cos \varphi) + (b \sin \varphi + k \cos \varphi) \int_{-\varphi_1}^{\varphi} ds + \\ & + \cos \varphi \int_{-\varphi_1}^{\varphi} x ds + \sin \varphi \int_{-\varphi_1}^{\varphi} y ds - \frac{1}{2} a^2 \sin \varphi - k (a \sin \varphi + \frac{1}{2} k \cos \varphi) - \\ & - (a \sin \varphi + k \cos \varphi) \int_{\varphi_1}^{\varphi} d\sigma - \cos \varphi \int_{\varphi_1}^{\varphi} \xi d\sigma + \sin \varphi \int_{\varphi_1}^{\varphi} r_l d\sigma = 0, \end{aligned}$$

ce qui peut s'écrire

$$\begin{aligned} & \sin \varphi \int_{-\varphi_1}^{\varphi} (b + y) ds + \cos \varphi \int_{-\varphi_1}^{\varphi} (k + x) ds - \sin \varphi \int_{\varphi_1}^{\varphi} (a - r_l) d\sigma - \\ & - \cos \varphi \int_{\varphi_1}^{\varphi} (k + \xi) d\sigma = \left[ \frac{1}{2} (a^2 - b^2) + k (a - b) \right] \sin \varphi. \end{aligned}$$

Si l'on pose encore pour abrégé

$$E = \frac{1}{2} (a^2 - b^2) + k (a - b) = (a - b) \left( \frac{a + b}{2} + k \right)$$

l'équation des moments prend la forme

$$\begin{aligned} \text{I. } E \sin \varphi &= \sin \varphi \int_{-\varphi_1}^{\varphi} (b + y) ds + \cos \varphi \int_{-\varphi_1}^{\varphi} (k + x) ds - \\ & - \sin \varphi \int_{\varphi_1}^{\varphi} (a - r_l) d\sigma - \cos \varphi \int_{\varphi_1}^{\varphi} (k + \xi) d\sigma. \end{aligned}$$

En projetant le fil de mercure entier sur la verticale, on trouve pour la hauteur  $h$  de la colonne barométrique :

$$h = (a + b + y - r) \cos \varphi - (2k + x + \xi) \sin \varphi.$$

D'autre part, la condition que la variation de l'angle  $\varphi$  soit proportionnelle à celle de  $h$ , peut être exprimée par l'égalité

$$h = \mu + \lambda \varphi,$$

où  $\mu$  et  $\lambda$  signifient des constantes, à savoir  $\mu$  la hauteur moyenne de la colonne barométrique de l'endroit et  $\lambda$  la valeur réciproque de l'amplification que l'appareil devrait montrer. On a ainsi comme deuxième équation fondamentale

$$\text{II. } \mu + \lambda \varphi = (a + b + y - r) \cos \varphi - (2k + x + \xi) \sin \varphi.$$

Une troisième équation enfin est donnée par la condition que la longueur totale du fil de mercure soit constante. En laissant de côté les parties invariables du fil, on trouve

$$\text{III. } \int_{-\varphi_1}^{\varphi} ds + \int_{\varphi_1}^{\varphi} d\sigma = \text{const.} = c.$$

---

### I.

Les courbes cherchées  $O_1M_1$  et  $O_2M_2$  sont évidemment de même nature, et nous supposons que les fonctions inconnues  $x, y$ , resp.  $\xi, \eta$ , qui représentent les coordonnées relatives rectangulaires d'un de leurs points, permettent le développement suivant les puissances entières et ascendantes de  $\varphi$ .

Dans cette première solution du problème proposé, les calculs seront faits dans l'hypothèse que ces développements se réduisent aux deux premiers termes. Géométriquement parlant, cela revient à substituer aux courbes cherchées leurs



tangentes aux points qui correspondent à l'angle  $\varphi = 0$ . Cette solution ne peut donc être considérée que comme une première approximation. L'essai de remplacer les courbes par des sections coniques osculatrices, c'est-à-dire d'arrêter les développements de  $x, y, \xi, \eta$  seulement aux termes en  $\varphi^2$  est resté sans résultat.

Soit

$$\begin{cases} x = x_0 + A\varphi, \\ y = y_0 + B\varphi, \end{cases} \quad \begin{cases} \xi = \xi_0 + C\varphi, \\ \eta = \eta_0 + D\varphi, \end{cases}$$

où  $x_0, y_0, A, B$  et  $\xi_0, \eta_0, C, D$  sont des constantes à déterminer. Pour  $\varphi = -\varphi_1$ , on doit avoir  $x = y = 0$ , et pour  $\varphi = \varphi_1$ , il faut que  $\xi$  et  $\eta$  s'évanouissent. Il s'ensuit que

$$\begin{cases} x_0 = A\varphi_1, \\ y_0 = B\varphi_1, \end{cases} \quad \begin{cases} \xi_0 = -C\varphi_1, \\ \eta_0 = -D\varphi_1. \end{cases}$$

Puis

$$\begin{cases} dx = Ad\varphi, \\ dy = Bd\varphi, \\ ds = d\varphi \sqrt{A^2 + B^2}, \end{cases} \quad \begin{cases} d\xi = Cd\varphi, \\ d\eta = Dd\varphi, \\ d\sigma = d\varphi \sqrt{C^2 + D^2}. \end{cases}$$

Par suite de l'équation III, on a

$$ds + d\sigma = 0$$

et par conséquent

$$\sqrt{A^2 + B^2} + \sqrt{C^2 + D^2} = 0,$$

$$s = \sqrt{A^2 + B^2} \int_{-\varphi_1}^{\varphi} d\varphi = \sqrt{A^2 + B^2} (\varphi + \varphi_1),$$

$$\sigma = -\sqrt{A^2 + B^2} \int_{\varphi_1}^{\varphi} d\varphi = \sqrt{A^2 + B^2} (\varphi_1 - \varphi),$$

$$s + \sigma = 2\varphi_1 \sqrt{A^2 + B^2} = c.$$

En posant pour abréger

$$\frac{c}{2\varphi_1} = m,$$

on tire de cette dernière équation

$$(\alpha) \quad \sqrt{A^2 + B^2} = \frac{c}{2\varphi_1} = m.$$

Si dans l'équation II on introduit à la place des fonctions  $x, y, \xi, \eta$  leurs valeurs, il vient

$$\begin{aligned} \mu + \lambda\varphi = & [a + b + y_0 - \eta_0 + (B - D)\varphi] \cos \varphi - \\ & - [2k + x_0 + \xi_0 + (A + C)\varphi] \sin \varphi, \end{aligned}$$

ou en remplaçant  $\sin \varphi$  et  $\cos \varphi$  par leurs séries et en arrêtant ces séries aux termes en  $\varphi^2$  inclusivement

$$\begin{aligned} \mu + \lambda\varphi = & a + b + y_0 - \eta_0 + [B - D - (2k + x_0 + \xi_0)]\varphi - \\ & - \left[ \frac{1}{2}(a + b + y_0 - \eta_0) + (A + C) \right] \varphi^2. \end{aligned}$$

La comparaison des termes aux mêmes puissances de  $\varphi$  dans les deux membres de cette équation conduit aux égalités

$$(\beta) \quad \mu = a + b + y_0 - \eta_0,$$

$$(\gamma) \quad \lambda = B - D - (2k + x_0 + \xi_0).$$

Le terme négligé

$$(\delta) \quad f_1 = - \left( \frac{1}{2}\mu + A + C \right) \varphi^2$$

permet d'estimer approximativement l'erreur qu'on commet dans le calcul de  $h$ , en posant  $h = \mu + \lambda\varphi$ .

En vue de former l'équation des moments, on calculera successivement

$$\begin{aligned}\int_{-\varphi_1}^{\varphi} ds(b+y) &= m \int_{-\varphi_1}^{\varphi} d\varphi (b+y_0+B\varphi) = m \left[ (b+y_0)\varphi + \frac{1}{2}B\varphi^2 \right]_{-\varphi_1}^{\varphi} = \\ &= m \left[ (b+y_0)\varphi_1 - \frac{1}{2}B\varphi_1^2 + (b+y_0)\varphi + \frac{1}{2}B\varphi^2 \right]\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\int_{-\varphi_1}^{\varphi} ds(k+x) &= m \int_{-\varphi_1}^{\varphi} d\varphi (k+x_0+A\varphi) = m \left[ (k+x_0)\varphi + \frac{1}{2}A\varphi^2 \right]_{-\varphi_1}^{\varphi} = \\ &= m \left[ (k+x_0)\varphi_1 - \frac{1}{2}A\varphi_1^2 + (k+x_0)\varphi + \frac{1}{2}A\varphi^2 \right]\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\int_{\varphi_1}^{\varphi} d\sigma(a-\eta) &= -m \int_{\varphi_1}^{\varphi} d\varphi (a-\eta_0-D\varphi) = -m \left[ (a-\eta_0)\varphi - \frac{1}{2}D\varphi^2 \right]_{\varphi_1}^{\varphi} = \\ &= m \left[ (a-\eta_0)\varphi_1 - \frac{1}{2}D\varphi_1^2 - (a-\eta_0)\varphi + \frac{1}{2}D\varphi^2 \right],\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\int_{\varphi_1}^{\varphi} d\sigma(k+\xi) &= -m \int_{\varphi_1}^{\varphi} d\varphi (k+\xi_0+C\varphi) = -m \left[ (k+\xi_0)\varphi + \frac{1}{2}C\varphi^2 \right]_{\varphi_1}^{\varphi} = \\ &= m \left[ (k+\xi_0)\varphi_1 + \frac{1}{2}C\varphi_1^2 - (k+\xi_0)\varphi - \frac{1}{2}C\varphi^2 \right].\end{aligned}$$

En introduisant les valeurs trouvées dans l'équation I on obtient

$$\begin{aligned}E \sin \varphi &= m \left[ (b-a+y_0+\eta_0)\varphi_1 + \frac{1}{2}(D-B)\varphi_1^2 + \right. \\ &\quad \left. + (a+b+y_0-\eta_0)\varphi + \frac{1}{2}(B-D)\varphi^2 \right] \sin \varphi + \\ &\quad + m \left[ (x_0-\xi_0)\varphi_1 - \frac{1}{2}(A+C)\varphi_1^2 + (2k+x_0+\xi_0)\varphi + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2}(A+C)\varphi^2 \right] \cos \varphi.\end{aligned}$$

Si l'on remplace encore

$$\begin{array}{ll}\sin \varphi & \text{par } \varphi \\ \cos \varphi & \text{par } 1 - \frac{1}{2}\varphi^2\end{array}$$

et que l'on néglige les termes en  $\varphi^3$ , mais non ceux qui contiennent le facteur  $\varphi_1^2\varphi$ , il vient

$$\begin{aligned}
 (\varepsilon) \quad E \varphi = & m [(x_0 - \xi_0) \varphi_1 - \frac{1}{2}(A + C) \varphi_1^2] + \\
 & + m [2k + x_0 + \xi_0 + (b - a + y_0 + \eta_0) \varphi_1 + \frac{1}{2}(D - B) \varphi_1^2] \varphi \\
 & + m [a + b + y_0 - \eta_0] + \frac{1}{2}(A + C) - \frac{1}{2}(x_0 - \xi_0) \varphi_1 + \frac{1}{4}(A + C) \varphi_1^2] \varphi^2.
 \end{aligned}$$

Le premier membre de cette équation devient identique au second, à des grandeurs du deuxième ordre près, si l'on pose

$$(\zeta) \quad 0 = x_0 - \xi_0 - \frac{1}{2}(A + C) \varphi_1 = \frac{1}{2}(A + C) \varphi_1$$

$$(\eta) \quad E = m [2k + x_0 + \xi_0 + (b - a + y_0 + \eta_0) \varphi_1].$$

La somme des termes négligés (soulignés dans l'équation précédente) représente approximativement l'erreur qu'entraîne l'application de ces formules. Si elle est désignée par  $f_2$ , on a

$$\begin{aligned}
 f_2 = m \left\{ \frac{1}{2}(D - B) \varphi_1^2 \varphi + [u + \frac{1}{2}(A + C) - \frac{1}{2}(x_0 - \xi_0) \varphi_1 + \right. \\
 \left. + \frac{1}{4}(A + C) \varphi_1^2] \varphi^2 \right\}
 \end{aligned}$$

ou en vertu de l'équation ( $\zeta$ )

$$(\vartheta) \quad f_2 = m \left\{ \frac{1}{2}(D - B) \varphi_1^2 \varphi + [u + \frac{1}{2}(A + C)] \varphi^2 \right\}$$

En résumé, les équations qui servent de base au calcul de ce baromètre enregistreur, sont les suivantes :

$$(1) \quad 0 = A + C$$

$$(2) \quad \sqrt{A^2 + B^2} + \sqrt{C^2 + D^2} = 0$$

$$(3) \quad \sqrt{A^2 + B^2} = m = \frac{c}{2\varphi_1}$$

$$(4) \quad \frac{E}{m} = 2k + x_0 + \xi_0 + (b - a + y_0 + \eta_0) \varphi_1$$

$$\text{où } E = (a - b) \left[ \frac{1}{2} (a + b) + k \right]$$

$$(5) \quad \lambda = B - D - (2k + x_0 + \xi_0)$$

$$(6) \quad \mu = a + b + y_0 - \eta_0$$

$$(7) \quad \begin{cases} x_0 = A\varphi_1, \\ y_0 = B\varphi_1, \end{cases} \quad \begin{cases} \xi_0 = -C\varphi_1 \\ \eta_0 = -D\varphi_1 \end{cases}$$

$$(8) \quad f_1 = - \left( \frac{1}{2} \mu + A + C \right) \varphi^2$$

$$(9) \quad f_2 = m \left\{ \frac{1}{2} (D - B) \varphi_1^2 \varphi + \left[ \mu + \frac{1}{2} (A + C) \right] \varphi^2 \right\}$$

Dans les quatre premières de ces équations on pourrait considérer  $A, B, C, D$  comme inconnues et  $k$  comme une constante donnée. Cependant, dans l'intérêt de la simplicité des calculs il paraît préférable d'admettre encore une relation arbitraire entre les quatre quantités  $A, B, C, D$  et d'envisager, par contre,  $k$  comme nouvelle inconnue. Par suite de l'équation (1) on a

$$A = -C,$$

et l'équation (2) donne

$$B = \pm D.$$

La relation

$$A = -B,$$

admise arbitrairement, entraîne l'égalité

$$C = \pm D.$$

Alors l'équation 3) fournit

$$A = -C = -B = D = -m \sqrt{\frac{1}{2}},$$

où le choix des signes a été guidé par des considérations essentiellement pratiques.

Les formules telles qu'elles peuvent servir immédiatement au calcul numérique, prennent maintenant la forme :

$$(3^a) \quad A = -C = -B = D = -\frac{c}{2\varphi_1\sqrt{2}},$$

$$(4^a) \quad c[2(k+x_0) + (b-a+2y_0)\varphi_1] = (a-b)[a+b+2k]\varphi_1,$$

$$(5^a) \quad \lambda = 2(B - k - x_0)$$

$$(6^a) \quad \mu = a + b$$

$$(7^a) \quad x_0 = \xi_0 = -y_0 = -\eta_0 = A\varphi_1$$

$$(8^a) \quad f_1 = -\frac{1}{2}\mu\varphi^2$$

$$(9^a) \quad f_2 = \frac{c}{2\varphi_1}[\mu\varphi^2 - B\varphi_1^2\varphi].$$

APPLICATION NUMÉRIQUE. — Soit, en prenant pour la hauteur barométrique moyenne de Lausanne 720<sup>mm</sup> <sup>1</sup> :

$$a + b = 0,72 \text{ mètres.}$$

et puis  $a - b = 0,20 \quad \gg$

d'où  $\begin{cases} a = 0,46 & \gg \\ b = 0,26 & \gg \end{cases}$

$$c = 0,15 \quad \gg$$

$$\varphi_1 = 0,20 \quad \gg$$

$$m = \frac{c}{2\varphi_1} = \frac{3}{8}$$

<sup>1</sup> Cette hauteur est trop élevée de 3<sup>mm</sup>.1; la hauteur barométrique moyenne, d'après cinq années d'observations faites à l'Asile des aveugles (507 mètres), est de 716<sup>mm</sup>.9. On a adopté le chiffre de 720<sup>mm</sup> pour simplifier les calculs numériques.



Alors on tire de (3<sup>a</sup>)

$$A = -C = -B = D = -\frac{3}{8\sqrt{2}} = -0,265165,$$

de (7<sup>a</sup>)

$$x_0 = \xi_0 = -y_0 = -\eta_0 = -0,053033$$

de (4<sup>a</sup>)

$$k = 0,216036$$

et de (5<sup>a</sup>)

$$\lambda = 0,204324$$

D'après ces chiffres la longueur des branches transversales est

$$k = 216 \text{ m. m.},$$

l'amplification que l'appareil devrait donner est

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0,204324} = 4,9 \text{ (appr.)}$$

Les branches  $O_1M_1$  et  $O_2M_2$  sont rectilignes et font avec l'axe positif des  $X$  correspondants un angle de  $-45^\circ$  (fig. 3).

L'angle  $\varphi$  dépassera rarement les valeurs

$$\varphi = \pm 0,1 = \pm 5^\circ 43' 46'',5.$$

Les hauteurs barométriques, calculées au moyen de la formule

$$h = \mu + \lambda\varphi = 0,72 + 0,204324 \varphi$$

pour ces angles extrêmes, à savoir

$$(\varphi = 0,1) \quad h = 0,7404324 \text{ mètre}$$

$$(\varphi = -0,1) \quad h = 0,6995676 \quad \gg$$

se trouvent être trop grandes *théoriquement* de

$$-f_1 = \frac{1}{2} \mu \varphi^2 = 0,36 \times 0,01 = 0,0036 \text{ mètre}$$

et dans l'équation des moments

$$E\varphi = \frac{c}{2\varphi_1} [2k + x_0 + \xi_0 + (b - a + y_0 + r_0) \varphi_1] \varphi + \dots$$

le premier membre est plus grand que le second

pour  $\varphi = 0,1$  de  $f_2 = \frac{c}{2\varphi_1} (\mu\varphi^2 - B\varphi_1^2\varphi) = 0,002302$

et pour  $\varphi = -0,1$  de  $f_2 = 0,003098$ .

Pour savoir jusqu'à quelle valeur de  $\varphi$  on peut théoriquement espérer que la formule  $h = \mu + \lambda\varphi$  donne les valeurs de  $h$  justes à un demi-millimètre près, il suffit de poser

$$f_1 = \frac{1}{2}\mu\varphi^2 < 0,0005,$$

d'où l'on tire

$$\varphi < \sqrt{\frac{2.0,0005}{\mu}},$$

ou

$$\varphi < \sqrt{\frac{0,0005}{0,36}} < 0,037268.$$

Mais comme

pour  $\varphi = + 0,037$ ,  $f_2 = 0,000222$

et pour  $\varphi = - 0,037$ ,  $f_2 = 0,000517$

et que, pour différentes raisons, on ne peut pas savoir exactement l'influence que ces erreurs théoriques dans l'équation des moments exercent sur la marche de l'appareil, la théorie ne peut pas indiquer avec certitude les limites entre lesquelles les variations de l'angle  $\varphi$  restent proportionnelles aux variations de la colonne barométrique.

## II

Pour simplifier les calculs, l'appareil sera suspendu au milieu O de la tige principale AB, dont la longueur est  $2a$ ; les tiges transversales BO<sub>1</sub> et AO<sub>2</sub> ne sont pas changées, tandis que les branches O<sub>1</sub>M<sub>1</sub> et O<sub>2</sub>M<sub>2</sub> ont les longueurs respectives  $\xi$  et  $\eta$  et sont parallèles à AB. De plus, en un point de la tige OA est adapté une sorte de came CDE, le long de laquelle peut glisser un fil portant un poids constant (Voir fig. 4).

Le problème qui se présente maintenant est celui de déterminer la forme de la came de manière que les variations de l'angle  $\varphi$  soient proportionnelles aux variations de la colonne barométrique.

Soit  $l$  la longueur d'une colonne de mercure dont le poids est égal au poids additionnel en question. Le bras de levier de ce poids additionnel doit varier avec l'angle  $\varphi$ ; il peut, en conséquence, être représenté par une fonction de  $\varphi$ ,  $f(\varphi)$ , qui sera déterminée ultérieurement.

Dans ces nouvelles conditions la hauteur  $h$  de la colonne barométrique devient

$$h = 2a \cos \varphi - 2k \sin \varphi + (\xi - \eta) \cos \varphi.$$

Pour qu'on ait rigoureusement

$$h = 2a + 2\lambda\varphi,$$

c'est-à-dire pour que les variations de  $\varphi$  soient parfaitement proportionnelles aux variations de  $h$ , on posera

$$2a + 2\lambda\varphi = 2a \cos \varphi - 2k \sin \varphi + (\xi - \eta) \cos \varphi.$$

De cette équation, dans laquelle  $2\lambda$  représente la valeur réciproque de l'amplification attendue, on tire

$$\xi - \eta = 2 \frac{a + \lambda\varphi - a \cos \varphi + k \sin \varphi}{\cos \varphi}.$$

D'ailleurs

$$\xi + \eta = 2c,$$

si  $c$  signifie une constante.

Ces deux équations donnent

$$\xi = c + \frac{a + \lambda\varphi - a \cos \varphi + k \sin \varphi}{\cos \varphi}$$

$$\eta = c - \frac{a + \lambda\varphi - a \cos \varphi + k \sin \varphi}{\cos \varphi},$$

ou en posant pour abréger

$$A = \frac{a + \lambda\varphi - a \cos \varphi + k \sin \varphi}{\cos \varphi}$$

$$(1) \quad \xi = c + A$$

$$(2) \quad \eta = c - A.$$

L'équation des moments prend la forme, si l'on fait abstraction du poids de la came,

$$\begin{aligned} & \xi (a \sin \varphi + k \cos \varphi + \frac{1}{2} \xi \sin \varphi) = \\ & = \eta (a \sin \varphi + k \cos \varphi - \frac{1}{2} \eta \sin \varphi) + lf(\varphi). \end{aligned}$$

On en tire

$$\begin{aligned} lf(\varphi) &= \xi (a \sin \varphi + k \cos \varphi + \frac{1}{2} \xi \sin \varphi) - \\ & - \eta (a \sin \varphi + k \cos \varphi - \frac{1}{2} \eta \sin \varphi), \end{aligned}$$

ou, en introduisant les valeurs de  $\xi$  et  $\eta$

$$(3) \quad lf(\varphi) = 2A(a \sin \varphi + k \cos \varphi) + (c^2 + A^2) \sin \varphi.$$

Après avoir ainsi trouvé la fonction  $f(\varphi)$ , il reste encore à déterminer la forme de la came. A cet effet, la courbe cher-

chée sera rapportée à un système de coordonnées relatives rectangulaires, dont l'origine est le point O et dont l'axe positif des X se confond en direction avec la droite OA, et l'axe positif des Y se trouve à droite de la tige AB.

Lorsque la droite AB fait un angle  $\varphi$  avec la verticale, le fil quitte la came en un point  $x, y$ , où la tangente à la courbe cherchée est nécessairement parallèle à la verticale. Traduit en géométrie, le problème qu'il importe de résoudre, est le suivant : Déterminer l'enveloppe d'une ligne droite mobile dont la distance à l'origine est une fonction donnée  $f(\varphi)$  de l'angle  $\varphi$  que cette droite fait avec l'axe positif des X.

Soient  $x, y$  les coordonnées du point de contact de la droite mobile dans l'une quelconque de ses positions. Si l'on désigne les coordonnées courantes par X, Y, cette droite a pour équation

$$Y - y = \frac{dy}{dx} (X - x)$$

et sa distance à l'origine est donnée par l'expression

$$\frac{-y + x \frac{dy}{dx}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}}.$$

Par suite des conditions énoncées, on a

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} \varphi,$$

d'où (4)  $dy = \operatorname{tg} \varphi . dx$

et 
$$\frac{-y + x \operatorname{tg} \varphi}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}} = f(\varphi)$$

ou (5) 
$$-y + x \operatorname{tg} \varphi = \frac{f(\varphi)}{\cos \varphi}.$$

En différentiant cette équation , on obtient

$$-dy + dx \operatorname{tg} \varphi + x \frac{d\varphi}{\cos^2 \varphi} = d \frac{f(\varphi)}{\cos \varphi}$$

ou en vertu de l'équation (4)

$$\frac{x}{\cos^2 \varphi} \cdot d\varphi = d \frac{f(\varphi)}{\cos \varphi}.$$

Cette équation donne

$$(6) \quad x = \cos^2 \varphi \cdot \frac{d}{d\varphi} \frac{f(\varphi)}{\cos \varphi}$$

et de l'équation (5) on tire

$$(7) \quad y = x \operatorname{tg} \varphi - \frac{f(\varphi)}{\cos \varphi}.$$

Les deux équations (6) et (7) ensemble représentent la courbe cherchée. On peut les mettre sous la forme

$$x = \cos^2 \varphi \cdot \frac{\cos \varphi f'(\varphi) + f(\varphi) \sin \varphi}{\cos^2 \varphi} = f'(\varphi) \cos \varphi + f(\varphi) \sin \varphi$$

$$y = f'(\varphi) \sin \varphi + f(\varphi) \frac{\sin^2 \varphi}{\cos \varphi} - \frac{f(\varphi)}{\cos \varphi} = f'(\varphi) \sin \varphi - f(\varphi) \cos \varphi.$$

Ainsi, la forme qu'il faut donner à la came est déterminée par les deux équations

$$\begin{cases} x = f'(\varphi) \cos \varphi + f(\varphi) \sin \varphi, \\ y = f'(\varphi) \sin \varphi - f(\varphi) \cos \varphi. \end{cases}$$

Or,

$$lf(\varphi) = (c^2 + A^2 + 2Aa) \sin \varphi + 2Ak \cos \varphi$$

$$lf'(\varphi) = 2(A'a - Ak + AA') \sin \varphi + [c^2 + A^2 + 2(A'k + Aa)] \cos \varphi.$$

En introduisant ces valeurs dans les équations précédentes, il vient



$$\begin{cases} lx = A^2 + 2Aa + c^2 + A'[(a + A) \sin 2\varphi + k(1 + \cos 2\varphi)], \\ ly = A'[(a + A)(1 - \cos 2\varphi) + k \sin 2\varphi] - 2Ak, \end{cases}$$

où

$$A = \frac{a + \lambda\varphi - a \cos \varphi + k \sin \varphi}{\cos \varphi},$$

$$A' = \frac{k + \lambda \cos \varphi + (a + \lambda\varphi) \sin \varphi}{\cos^2 \varphi}.$$

APPLICATION NUMÉRIQUE. — Soit

$$a = 0,36, \quad k = 0,2, \quad \lambda = \frac{1}{8}, \quad c = 0,075.$$

L'angle  $\varphi$  dépassera rarement les valeurs  $\varphi = \pm 0,08$ . Il suffira donc de calculer  $x$  et  $y$  pour les trois valeurs  $\varphi = 0$ ,  $\varphi = \pm 0,08$  pour reconnaître, si la solution du problème proposé qui vient d'être donnée, est susceptible d'une application pratique. On trouve successivement

1° pour  $\varphi = 0$  :

$$A = 0, \quad A' = 0,325$$

$$\begin{cases} lx = 0,135625 \\ ly = 0 \end{cases}$$

2° pour  $\varphi = 0,08$  :

$$A = 0,27221, \quad A' = 0,356445$$

$$\begin{cases} lx = 0,189622 \\ ly = 0,002232 \end{cases}$$

3° pour  $\varphi = -0,08$  :

$$A = -0,024911, \quad A' = 0,298537$$

$$\begin{cases} lx = 0,091024 \\ ly = 0,001730 \end{cases}$$

La constante positive  $l$  étant arbitraire, on peut en disposer encore. Mais de deux choses il arrivera nécessairement l'une. Suivant qu'on choisit  $l$  très petit ou près de l'unité, les valeurs correspondantes de  $x$  seront relativement grandes ou petites. Dans le premier cas, la came prendrait des dimensions qui seraient en disproportion avec l'appareil, et il ne serait plus permis de négliger son poids. Dans le second cas, le poids additionnel qu'il faudrait employer serait trop considérable pour que l'appareil conservât sa sensibilité.

Ainsi l'on voit que cette deuxième solution, bien que préférable à la première au point de vue de la théorie pure, n'en offre cependant pas les avantages pratiques. Elle a été donnée ici pour faire voir quelles sont les difficultés qui, jusqu'à présent, ont rendu impossible une solution satisfaisante du problème proposé.

---

## DEUXIÈME PARTIE

### Description du baromètre-levier.

La théorie ne donnant aucune solution complètement satisfaisante du problème, il a fallu faire une série de recherches expérimentales pour déterminer la meilleure disposition à adopter dans la construction du baromètre. Dans ces recherches il faut tenir compte du fait que l'instrument doit être d'une construction facile, en outre certaines considérations pratiques obligent à sacrifier quelques-unes des indications que la théorie démontre être nécessaires pour obtenir une proportionnalité approchée.

Pour être utile, l'appareil doit être : 1° *exact*, 2° *sensible*, 3° donner une *amplification* suffisante; amplification qui du reste peut être différente pour les diverses hauteurs barométriques, pourvu qu'elle soit connue.

La première condition, l'*exactitude*, exige absolument qu'à une hauteur barométrique donnée ne corresponde jamais qu'une seule position du tube coudé; cette condition est toujours facile à réaliser entre des limites plus étendues que celles entre lesquelles l'instrument doit fonctionner.

Par *sensibilité*, nous désignons la propriété de l'instrument d'indiquer *sans retard* les plus faibles variations de la pression, même si ces variations n'ont qu'une courte durée; pour que l'appareil ait cette qualité, que tous les enregistreurs n'ont pas au même degré, il faut que l'instrument ne soit pas trop lourd. La sensibilité, telle que nous l'entendons, est une qualité qui doit être considérée comme indispensable chez tous les instruments à enregistrement continu. Elle a moins d'importance pour les appareils qui n'enregistrent que toutes les heures par exemple.

L'*amplification* n'a pas besoin d'être définie; l'étude théorique qui précède nous a montré qu'on ne peut pratiquement la rendre constante, nous avons donc cherché une méthode simple qui permît de graduer directement chaque appareil et de former ainsi une table de réduction d'un emploi facile.

La première chose à faire était de construire un appareil au moyen duquel on peut déterminer pour chaque tube si les conditions précédentes étaient satisfaites et surtout comment variait l'amplification. Nous avons construit dix tubes barométriques de diverses formes, les principales sont représentées par les figures 1, 2, 3, 5, 6, 8, Pl. I. Chacun de ces tubes a été successivement étudié de la manière suivante, fig. 8, Pl. I.

Le tube à essayer BB porte sur la branche ouverte un robinet R, il est rempli à la manière ordinaire de mercure pur. Un collier en laiton A (fig. 7) garni de liège serre le tube au point qu'on veut; ce collier porte les couteaux CC' dont les arêtes sont sur une même ligne droite passant par le centre du collier. Ces couteaux reposent sur deux plans d'acier vissés sur une plaque de laiton échancrée (voir fig. 2, Pl. II, et fig. 8, Pl. I) supportée par une console de fer K scellée dans un mur.

Grâce à cette disposition, le tube barométrique oscille dans un plan vertical, perpendiculaire à l'arête des couteaux. Une tige légère terminée par une aiguille très fine est placée dans le prolongement du tube et se meut devant une règle *rr* divisée en  $\frac{1}{2}$  millimètres. Dans certains cas un poids P était placé sur le tube barométrique et permettait, par son déplacement, de faire varier l'amplification.

Les mesures se font de la manière suivante. Un cathétomètre TT (fig. 8) est fixé bien verticalement à un mètre environ du plan d'oscillation du tube barométrique; la lunette L du cathétomètre étant horizontale et dans la position 1, on vise la partie supérieure de la colonne de mercure contenue dans le tube barométrique B, puis on lit la position que la lunette occupe sur l'échelle du cathétomètre; cela fait on amène la lunette dans la position 2 et on vise l'extrémité de la colonne de mercure dans la branche ouverte du tube barométrique, on lit également la position de la lunette sur l'échelle, la différence entre les deux lectures donne en millimètres la hauteur de la colonne de mercure contenue dans le tube.

Cette hauteur correspond à une certaine position du style devant la règle divisée *rr*, on note cette position. Dans cette première opération nous supposons le robinet R ouvert. La lecture cathétométrique faite dans ces conditions permet de juger si le tube est bien construit puisque la hauteur observée est la hauteur barométrique, cette hauteur est comparée à celle du baromètre normal placé dans la même salle.

Cette première opération faite, on incline le tube barométrique, à gauche ou à droite d'une certaine quantité, puis on ferme le robinet R et on abandonne le tube à lui-même; après quelques oscillations il prend une position fixe, on lit de nouveau au cathétomètre la différence de niveau des ménisques de mercure, puis la position du style *s* sur l'échelle. Cette opération est répétée pour 15 ou 20 positions différentes du tube barométrique, on obtient ainsi 15 ou 20 points qui permettent de construire la courbe de l'amplification de l'instrument. Cette courbe serait une droite si l'amplification était

constante; en réalité lorsqu'on prend pour abscisses les hauteurs barométriques et pour ordonnées les distances du style à la ligne de foi, la courbe est convexe du côté de l'axe des abscisses. Dans nos mesures, la valeur de chaque point de la courbe était la moyenne arithmétique de trois lectures de hauteur faites pour une même position du tube.

Cette méthode de graduation est très pratique, elle exige seulement que le robinet R ferme bien et qu'on use de précautions dans le maniement du cathétomètre, il importe en effet de s'assurer à chaque lecture que la lunette est parfaitement horizontale si on veut éviter des erreurs considérables. On peut ainsi graduer un tube barométrique pour une variation de pression plus grande que toutes celles qu'il aura à indiquer dans la pratique, et cela en un temps relativement court<sup>1</sup>. C'est un grand avantage que ne possèdent pas les autres enregistreurs à mercure qui sont toujours gradués par comparaison avec les instruments à observations directes, mode de graduation qui peut exiger, suivant les circonstances, plusieurs mois, sans qu'on soit assuré d'avoir atteint les limites entre lesquelles l'instrument doit se mouvoir.

Au laboratoire de physique de l'Académie, où se trouvent nos instruments, on peut admettre comme hauteurs barométriques exceptionnelles les cotes 690<sup>mm</sup> et 733<sup>mm</sup><sup>2</sup>.

Le principe de graduation des tubes étant connu, il est inutile de donner ici les résultats des nombreux essais faits sur différents tubes. Après avoir étudié les formes diverses représentées dans les figures de la planche I, nous nous sommes arrêtés aux deux formes représentées par les figures 1 et 8,

<sup>1</sup> Avec un peu d'habitude on peut facilement déterminer 15 points en 4  $\frac{1}{2}$  à 5 heures, et cela en faisant 3 mesures indépendantes (soit 6 lectures) pour chaque point. La différence entre deux lectures successives dépasse rarement 0<sup>mm</sup>.1.

<sup>2</sup> On peut citer comme valeurs extrêmes de la pression observées au laboratoire :

10 janvier 1859,	732.6.	10 mars 1869,	692.0.
10 février 1859,	739.6.	20 janvier 1873,	690.5.
23 décembre 1879,	731.15.		



Pl. I, comme étant les plus faciles à réaliser et étant celles qui donnent les meilleurs résultats.

A titre d'exemple nous donnons dans la troisième partie la graduation de l'un de nos baromètres tel qu'il est employé depuis quelques mois.

Le laboratoire possède actuellement deux instruments, l'un à tracé continu, l'autre à pointage d'heure en heure. La planche II donne une vue d'ensemble du premier de ces appareils.

Le tube barométrique A, B, C, D, E, F a les dimensions suivantes :

Longeur AB = EF =	130 <sup>mm</sup>
» BC = DE =	220 <sup>mm</sup>
» CD =	713 <sup>mm</sup>
Diamètre intérieur du tube	6 <sup>mm</sup>

Le tube est serré au point O par un collier qui porte les couteaux, exactement semblable à celui décrit précédemment (page 572) et représenté dans la figure 7, Pl. I, et fig. 2, Pl. II<sup>1</sup>.

Le point de suspension O du tube est situé dans cet appareil à 281<sup>mm</sup> de C et à 432<sup>mm</sup> de D. Une console en fonte est solidement fixée contre le fond de l'armoire qui protège l'instrument. Sur cette console on a vissé la pièce L, fig. 2, qui porte deux plans d'acier *pp* sur lesquels reposent les deux couteaux CC. La figure 2 représente à une échelle plus grande que celle de la figure 1, l'extrémité de la console K, la plaque de laiton L et le collier de suspension.

<sup>1</sup> Dans un autre appareil on a employé pour soutenir le tube le mode de suspension représenté dans la figure 3, Pl. II, qui est analogue à celui imaginé par M. Hasler pour suspendre le fléau du baromètre-balance de M. Wild. On voit que le collier est soutenu par deux ressorts métalliques MM qui se fixent en A et en B contre les extrémités du support en laiton L représenté dans la figure 2, Pl. II. Lorsque le tube barométrique s'incline, les lames métalliques verticales MM fléchissent un peu à gauche ou à droite. Ce mode de suspension est préférable si le tube barométrique est très lourd. Dans le cas d'un tube léger la suspension sur couteaux est plus délicate.



A l'extrémité D du tube barométrique est fixé l'appareil inscripteur (fig. 1 et 4, Pl. II), qui se compose d'une lame mince  $r$  à laquelle est fixée une tige d'aluminium  $a$  supportant le tube fendu  $l$  fait en laiton mince. Ce tube, grâce à son élasticité, serre un tube de verre  $v$  de 2 centimètres environ de longueur sur 4<sup>mm</sup> de diamètre, effilé à son extrémité inférieure; en outre, un fragment de plume d'oie  $t$ , recourbé comme l'indique la figure 4, est pressé par le collier  $l$  contre le tube de verre, de sorte que l'extrémité effilée du tube touche la plume. On introduit dans le tube de verre une certaine quantité d'encre formée de violet d'aniline dissout dans l'eau additionnée d'un peu de glycérine; cette encre ne doit pas être trop fluide, elle s'écoule lentement par l'orifice inférieur du tube  $v$ , et maintient la plume  $t$  toujours humide; le tracé obtenu est très fin, il suffit de remettre une goutte d'encre dans le tube tous les quinze jours pour obtenir un tracé continu et sans taches. La glycérine empêche cette encre de s'évaporer. La plume d'oie est préférable à la plume de métal; depuis deux ans que ce style fonctionne, on n'a jamais changé la plume qui ne paraît avoir subi aucune altération.

La distance de l'extrémité du style au point D étant de 20 cent., il en résulte que la pointe de la plume décrit un arc de cercle de 632 mill. de rayon; l'amplitude totale de son excursion étant 12 cent., la valeur de l'angle  $\varphi$  compris entre les deux positions extrêmes du tube est de plus de 10°.

Il nous reste à décrire le mécanisme servant à produire le déroulement du papier.

Un rouleau de papier de 18 centimètres de largeur (papier pour télégraphe Morse) est placé sur l'axe d'une grosse bobine en bois B, soutenue par deux consoles identiques à la console K<sup>1</sup>.

La bande de papier passe entre deux cylindres en laiton RR', à surface rugueuse, supportés par deux consoles identi-

<sup>1</sup> On trouve ces consoles en fonte dans le commerce; celles que nous employons ont 15 cent. de longueur sur 12 cent de hauteur, et coûtent la modique somme de 0 fr. 70.

ques aux précédentes. L'un des cylindres R peut se déplacer un peu dans un plan horizontal, il est pressé contre l'autre par deux ressorts, de sorte que la bande de papier est serrée entre eux. L'axe du cylindre R' se prolonge et porte 3 poulies de diamètres différents, tournées dans la même pièce de bois. (La figure 1, Pl. II, ne montre en P que la plus grande de ces poulies.)

Le mouvement est produit par l'horloge H, placée sur l'un des côtés de l'armoire qui protège l'appareil. Cette horloge est à poids et marche six jours sans être remontée, la hauteur de l'armoire étant de 1<sup>m</sup>30. Le poids, qui n'est pas visible dans la figure, est suspendu à une corde; cette corde, au lieu de descendre verticalement sous l'horloge, passe d'abord sur un petit treuil T (représenté à part, fig. 5, Pl. II), de là elle descend verticalement dans l'armoire. Le treuil est ainsi mis en mouvement par la descente du poids. Enfin, un cordon sans fin  $f, f, f$  (fig. 1) réunit l'une des trois poulies du treuil (fig. 5) à l'une des trois poulies montées sur l'axe du cylindre de laiton; ce cylindre, en tournant, entraîne le papier. En combinant les six poulies deux à deux on peut obtenir ainsi neuf vitesses différentes de déroulement du papier. La vitesse que nous avons adoptée est de 4<sup>mm</sup> par heure.

Le pointage des heures se fait au moyen d'un électro-aimant, dont l'armature est montée sur un levier droit, analogue à celui du récepteur du Morse. Ce levier est terminé par une pointe qui fait toutes les heures un trou sur le bord du papier.

Le courant de la pile (élément au sel ammoniac) est établi par l'aiguille des minutes qui ferme le contact  $c$ , lorsqu'elle passe sur l'heure XII.

Il nous reste à décrire un dernier appareil indispensable pour que l'instrument marque sans retard les variations de la pression barométrique. On sait que lorsqu'on fait une lecture au baromètre, il faut frapper légèrement sur le tube de l'instrument pour détruire l'adhérence du mercure, et pour que ce liquide prenne sa position d'équilibre. Cette nécessité

s'impose aussi avec les appareils enregistreurs, et on a dû imaginer pour ces instruments des dispositions souvent assez complexes pour ébranler l'appareil avant l'enregistrement. Dans les appareils qui, comme le nôtre, marchent d'une manière continue, il y a encore une cause d'erreur qui peut être assez grave, c'est le frottement de la plume sur le papier. Quelque faible que soit ce frottement, il occasionne toujours une légère résistance au déplacement, résistance qui fait que l'appareil n'accuse pas les extrêmes d'une façon aussi nette qu'il le devrait. Pour corriger ces deux défauts, il faut que le style soit fréquemment détaché du papier, de sorte que pendant un instant l'instrument soit librement suspendu dans l'air sans autre frottement que celui des couteaux; il faut, en outre, que la colonne barométrique reçoive fréquemment aussi un léger ébranlement qui détruise l'adhérence du mercure.

Ce double effet est obtenu très simplement dans notre appareil de la manière suivante: Une tige de verre  $v, v, v$  (fig. 1, Pl. II) soutenue par un ressort  $s$  est placée entre le papier et le style  $r$ ; elle peut osciller dans un plan horizontal. L'extrémité libre de cette tige sort de l'armoire en passant au travers d'une fente ménagée à cet effet dans la paroi au-dessus de laquelle se trouve la pendule.

Une tige de sapin  $t$ , soutenue par un ressort  $s'$  fixé au point  $z$ , peut osciller parallèlement au plan de la même paroi. L'extrémité inférieure de cette tige est attachée à l'extrémité de la tige de verre. L'ensemble forme ainsi deux côtés d'un rectangle, dont l'angle oscille librement.

Le pendule  $P$  de l'horloge a 80 cent. de longueur; il porte une lentille pesant 800 grammes, et fait de petites oscillations (4 centimètres). A chaque oscillation à droite, le bord de la lentille touche légèrement la tige  $t$  et la pousse à droite, la tige de verre participe au mouvement et soulève le style  $r$ . Ce choc est suffisant pour communiquer un léger ébranlement à la colonne de mercure et détruire l'adhérence. La durée d'une oscillation simple du pendule étant de 1 seconde, la plume est soulevée ainsi toutes les deux secondes. L'appareil

est ainsi constamment ébranlé et obéit immédiatement aux variations de pressions, comme le montrent les courbes reproduites dans la Pl. III.

Telles sont les pièces principales de l'appareil à marche continue que nous employons depuis deux ans et qui nous satisfait entièrement <sup>1</sup>.

L'appareil précédent est le premier que nous ayons construit; nous avons bientôt éprouvé le besoin d'avoir un second instrument donnant des observations horaires, et nous avons réservé l'appareil à marche continue et à grande amplification pour les études de certains détails de tracés, tels que les variations barométriques brusques au moment des orages, etc., etc.

Ce second instrument ne diffère du premier que par le mode d'enregistrement. Le tube supporte à la partie inférieure une lame de laiton mince, terminée par une pointe d'acier. Le pointage se fait électriquement au moyen de l'appareil de M. Hipp <sup>2</sup>, appareil analogue à celui construit par MM. Hasler et Escher pour le baromètre-balance de M. Wild <sup>3</sup>. La principale différence est que dans l'instrument de MM. Hasler et Escher un électro-aimant sert à produire le pointage et que le recul de l'armature détermine l'avancement du papier qui *suit* ainsi le pointage, tandis que dans l'appareil de M. Hipp il y a deux électro-aimants indépendants, l'un détermine le pointage et l'autre l'avancement du papier. Il faut naturellement que l'horloge produise deux contacts électriques successifs. Dans l'appareil que nous employons, les deux

<sup>1</sup> Il faut remarquer que les divers points de la tige de verre ne se déplacent pas de la même quantité, puisque cette tige oscille autour de *s*; mais le déplacement de l'extrémité de cette tige étant très petit (1<sup>mm</sup>5 environ), et le style ne s'approchant jamais à plus de 20 cent. du point *s* et ne s'éloignant pas à plus de 32 cent., l'effet produit sur le style est de le soulever de 0<sup>mm</sup>5 à 0<sup>mm</sup>75 suivant la position qu'il occupe. On peut donc admettre que cet effet est très sensiblement le même que celui qui serait produit par un déplacement de la tige de verre parallèlement à elle-même.

<sup>2</sup> Voir Bulletin de la Société des sciences naturelles de Neuchâtel, 1865, p. 49.

<sup>3</sup> *Repertorium für Meteorologie*. 1874, Bd III, p. 131.



contacts se suivent à une minute d'intervalle; celui qui détermine le mouvement du papier *précède* le contact de pointage.

L'avantage de l'enregistrement intermittent est que le tube barométrique est absolument libre pendant tout le temps qui sépare deux pointages, il n'y a donc pas de frottement du style sur le papier. Mais il faut, comme dans l'appareil précédent, détruire avant chaque observation l'adhérence du mercure au verre, c'est-à-dire qu'il faut produire un ébranlement du tube. Ce résultat est suffisamment atteint par le fait que le papier avance 1 minute avant que le pointage ait lieu. Le choc de l'armature sur l'électro-aimant suffit pour communiquer à tout l'appareil une légère vibration dont on constate l'effet en observant la surface des ménisques de mercure au moment où le choc a lieu.

L'amplification donnée par cet appareil est plus petite que celle de l'instrument précédent, la bande de papier a 10 cent. de largeur seulement, la pointe du style étant à 50 cent. de l'axe de rotation, et parcourant un arc de 9 cent. de longueur, l'angle que forment les deux positions extrêmes du tube est de  $10^{\circ}17'$ .

La pendule qui détermine les contacts est une pendule de la Forêt-Noire, marchant six jours avec une régularité très satisfaisante. Les contacts sont établis toutes les heures, comme dans l'appareil précédent, par l'aiguille des minutes. La pile employée est composée de 6 éléments zinc charbon entourés de sciure de bois imbibée d'une solution de sel ammoniac, éléments imaginés par M. J. Cauderay, à Lausanne. Ces piles se recommandent particulièrement pour cet usage à cause de leur durée et de la facilité de leur entretien.

Les indications précédentes suffisent, nous l'espérons, pour que les personnes qui le désireraient puissent construire sans trop de frais les instruments que nous venons de décrire.

---

## TROISIÈME PARTIE

## Résultats obtenus.

Nous devons examiner maintenant si les instruments décrits réalisent les conditions nécessaires d'exactitude et de sensibilité, puis comment varie l'amplification.

La condition d'*exactitude* est remplie, pour les deux instruments, entre des limites plus étendues que celles entre lesquelles ils doivent fonctionner. C'est-à-dire, qu'entre ces limites, à chaque hauteur barométrique ne correspond qu'une position du tube et réciproquement. Cette condition ne suffit pas encore, il faut s'assurer en outre que le tube occupe bien la même position pour la même pression mesurée pendant que le baromètre monte ou pendant qu'il baisse. Cette condition n'est remplie que si les ménisques de mercure dans les deux branches conservent pendant les deux périodes la même courbure. Pour obtenir ce résultat, l'ébranlement de l'appareil avant le pointage est nécessaire; nous avons vu comment cet ébranlement est produit, et l'expérience nous a montré que ce procédé suffit pour atteindre le but proposé.

La *sensibilité* telle que nous l'avons définie est complètement satisfaisante, comme le montrent les fig. 1, 2 et 3, Pl. III. Ces courbes reproduisent en vraie grandeur les tracés de l'appareil à marche continue pendant des variations rapides de la pression barométrique.

La fig. 1 représente les variations de la pression barométrique pendant la nuit très orageuse du 19 au 20 août 1881. A 10 h. 25 m., une forte averse mêlée de grêle est tombée à Lausanne; d'autres averses, accompagnées de coups de tonnerre assez violents, se sont succédé jusqu'au matin. Nous n'avons malheureusement pas pu contrôler par des mesures directes la marche de l'instrument pendant cette nuit-là. L'appareil a tracé cette courbe au laboratoire, dans un bâtiment complètement inhabité et loin de tout ébranlement

artificiel. Le baromètre est enfermé dans une armoire vitrée, scellée contre le mur dans une salle fermée.

La fig. 2, Pl. III, représente le tracé du même instrument le 21 août, pendant qu'un orage accompagné de grêle se déchaînait, entre 2 et 3 heures, sur le district de Morges, où il détruisait la plus grande partie de la récolte des vignes. Cette courbe présente quelque intérêt, car elle nous a permis de nous assurer par des observations directes que l'instrument obéit sans retard aux variations même très rapides de la pression.

A Lausanne, une forte pluie d'orage commençait à tomber à 2 h. 20 m.; elle était bientôt accompagnée d'une chute de grêle qui dura trois minutes. Le baromètre de la station (baromètre météorologique suisse) marquait  $714^{\text{mm}}.7$  à  $0^{\circ}$ , à 2 h. 20 m.; *cinq* minutes plus tard, il marquait  $715^{\text{mm}}.6$  à  $0^{\circ}$ . La baisse fut moins rapide que la hausse; à 2 h. 45 m., la hauteur barométrique était  $715^{\text{mm}}.2$ ; enfin à 3 h.,  $715^{\text{mm}}.0$ . On voit que cette variation rapide a été exactement reproduite par l'enregistreur. L'amplification donnée par l'instrument est de  $4^{\text{mm}}$  pour  $1^{\text{mm}}$ .

Dans ce cas, comme nous l'avons souvent observé, l'augmentation de pression a *précédé* de très peu l'abondante chute de pluie et de grêle chassée par un fort coup de vent du nord-ouest.

La fig. 3, Pl. III, reproduit la courbe tracée par l'enregistreur le 11 juin 1880. Les variations de la pression résultent dans ce cas d'ondées abondantes et fréquentes, séparées par des périodes pendant lesquelles le soleil brillait avec éclat. Cette courbe, tracée par un autre tube barométrique, est à l'échelle de  $2^{\text{mm}}.3$  pour  $1^{\text{mm}}$ .

Ces exemples suffisent pour montrer que le baromètre-levier a une sensibilité suffisante pour indiquer fidèlement les variations rapides de la pression atmosphérique. Cet appareil a donc toutes les qualités spécialement requises d'un enregistreur à marche continue.

Nous avons indiqué précédemment le principe de la mé-



thode employée pour déterminer l'*amplification* de l'instrument; nous donnons dans les pages suivantes, à titre d'exemple, le détail des mesures faites pour graduer l'enregistreur à pointage sec, et le résultat de cette opération.

Le tube barométrique a la forme représentée dans la fig. 8, Pl. I; ses dimensions sont les suivantes :

$$\text{Hauteur DE} = 709^{\text{mm}}.$$

$$\text{CD} = 210^{\text{mm}}.$$

$$\text{EF} = 210^{\text{mm}}.$$

Le couteau est à  $282^{\text{mm}}$  du point D. — La pointe du style à 50 centimètres du couteau.

On a déterminé au cathétomètre les différences de niveau des deux ménisques pour 33 positions du tube. Quelques-unes de ces positions étant très rapprochées, on a pris la moyenne arithmétique des hauteurs qui leur correspondent, ainsi que des distances du style à la ligne de foi, et on a obtenu ainsi 25 points différents qui ont servi à déterminer la courbe de l'amplification.

Cette courbe a été construite en prenant pour abscisses les hauteurs cathétométriques observées, et représentées à l'échelle de  $10^{\text{mm}}$  pour  $1^{\text{mm}}$ , et pour ordonnées des distances des divers points à la ligne de foi, à l'échelle de  $5^{\text{mm}}$  pour  $1^{\text{mm}}$ . Une réduction de cette courbe est représentée sur la planche III, fig. 4.

C'est sur la courbe originale qu'on a relevé les chiffres contenus dans le tableau I. Un second tableau, que nous ne reproduisons pas ici, puisqu'il ne sert que pour un instrument particulier, donne les hauteurs barométriques correspondant aux distances du style à la ligne de foi, mesurées de millimètre en millimètre. Ce tableau et la courbe permettent également de réduire les observations relevées sur le papier en hauteurs barométriques vraies. Les distances des divers points à la ligne de foi sont mesurées au compas et transportées sur une échelle métrique donnant le  $0^{\text{mm}}.1$ .

Exemple : On relève sur le papier 42<sup>mm</sup>.3 ; à cette hauteur correspond, d'après la courbe, une hauteur barométrique de 717<sup>mm</sup>.60. La hauteur absolue de la colonne de mercure dans le tube de l'instrument étant de 0<sup>mm</sup>.2 inférieure à la hauteur du baromètre de station, la hauteur barométrique vraie, d'après les indications de l'enregistreur, est de 717<sup>mm</sup>.60 + 0<sup>mm</sup>.20 = 717<sup>mm</sup>.80. Le baromètre de la station marquait au même moment 717<sup>mm</sup>.90.

On trouvera plus loin d'autres exemples de hauteurs déterminées au moyen de cette courbe.

Il était naturel de chercher si une formule empirique convenable ne permettrait pas de déterminer les résultats des observations.

D'après la nature de la courbe, on a essayé d'employer une formule de la forme :

$$y = ax + bx^2 + cx^3 \dots$$

en cherchant d'abord si les deux premiers termes seuls suffisaient.

Dans cette équation,  $y$  exprime l'excès de la hauteur barométrique mesurée, sur une hauteur arbitraire prise comme origine ; on a adopté pour cette origine la cote 690<sup>mm</sup>, donc  $y = h - 690^{\text{mm}}$ . La valeur de  $x$  est en millimètres la distance du point de la courbe correspondant à la hauteur  $y$  jusqu'à la ligne de foi correspondant à 690<sup>mm</sup>.

Les quantités  $a$ ,  $b$  sont les constantes à déterminer. Pour calculer leur valeur, on a formé 8 équations telles que :

$$y = ax + bx^2$$

$$y_1 = ax_1 + bx_1^2$$

$$\vdots \quad \vdots \quad \vdots$$

en donnant à  $y$ ,  $y_1$  les valeurs 5<sup>mm</sup>, 10<sup>mm</sup>, 15<sup>mm</sup> ..... 40<sup>mm</sup>, et à  $x$ ,  $x_1$ , etc., les valeurs correspondantes déduites de la courbe. Ces huit équations sont :

$$\begin{aligned}
 5 &= a (5.9) + b (5.9)^2 \\
 10 &= a (12.1) + b (12.1)^2 \\
 15 &= a (18.8) + b (18.8)^2 \\
 20 &= a (26.2) + b (26.2)^2 \\
 25 &= a (34.4) + b (34.4)^2 \\
 30 &= a (44.5) + b (44.5)^2 \\
 35 &= a (57.9) + b (57.9)^2 \\
 40 &= a (76.3) + b (76.3)^2
 \end{aligned}$$

Les valeurs des constantes déterminées au moyen des huit équations par la méthode des moindres carrés sont :

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{\Sigma (x^2 y) \Sigma (x^3) - \Sigma (xy) \Sigma (x^4)}{[\Sigma (x^3)]^2 - \Sigma (x^2) \Sigma (x^4)} \\
 b &= \frac{\Sigma (xy) \Sigma (x^3) - \Sigma (x^2 y) \Sigma (x^2)}{[\Sigma (x^3)]^2 - \Sigma (x^2) \Sigma (x^4)}
 \end{aligned}$$

Les calculs effectués donnent

$$\begin{aligned}
 a &= 0.885 \\
 b &= -0.0047
 \end{aligned}$$

donc l'équation de la courbe est

$$y = 0.885x - 0.0047x^2.$$

Le tableau suivant donne le résultat du calcul pour les valeurs de  $x$  dans les huit équations normales :

$x$	$y$		$\Delta$	$\Delta^2$
	Calculé.	Observé.		
5.9	5.058	5.000	+ 0.058	0.00336
12.1	10.020	10.000	+ 0.020	0.00040
18.8	14.978	15.000	— 0.022	0.00048
26.2	19.961	20.000	— 0.039	0.00152
34.4	24.882	25.000	— 0.118	0.01392
44.5	30.075	30.000	+ 0.075	0.00563
57.9	35.485	35.000	+ 0.485	0.23523
76.3	40.163	40.000	+ 0.163	0.02657

$$\Sigma \Delta^2 = 0.28711$$

La colonne  $\Delta$  contient les différences entre les valeurs calculées et les valeurs observées,  $\Delta^2$  les carrés de ces différences.

L'erreur moyenne est :

$$E = \sqrt{\frac{\sum \Delta^2}{n - m}} = \pm 0.219$$

$n$  étant le nombre des observations et  $m$  le nombre des constantes, soit 2.

L'erreur probable est :

$$0.6744897 E = \pm 0.1423.$$

Ainsi l'équation précédente représente d'une manière assez rapprochée les résultats des observations entre 690<sup>mm</sup> et 730<sup>mm</sup>, limites extrêmes de la pression au laboratoire.

Le tableau suivant donne les résultats obtenus pour quelques observations particulières relevées au hasard à plusieurs jours d'intervalle et comparées aux observations barométriques directes :

Distance à la ligne de foi $x$	Hauteur barométrique		Hauteur vraie.	Différence 4 — 2	Différence 4 — 3
	d'après la formule.	d'après la courbe.			
1	2	3	4	5	6
38.3	715.64	715.70	715.80	+ 0.16	+ 0.10
50.4	721.63	721.50	721.80	+ 0.17	+ 0.30
24.5	707.12	707.10	706.90	— 0.22	— 0.20
36.9	714.86	714.80	714.60	— 0.26	— 0.20
37.3	715.08	715.10	714.90	— 0.18	— 0.20
29.4	710.35	710.35	710.40	+ 0.05	+ 0.05
39.9	716.51	716.60	716.70	+ 0.19	+ 0.10
35.3	713.94	714.05	713.90	— 0.04	— 0.15
29.1	710.16	710.20	710.35	+ 0.19	+ 0.15
42.3	717.80	717.75	717.90	+ 0.10	+ 0.15

La première colonne contient les résultats du relevé des points sur le papier; la seconde, la hauteur barométrique calculée par la formule et corrigée par l'addition de la constante  $0^{\text{mm}}.2$  indiquée précédemment; la troisième, la hauteur barométrique relevée sur la courbe et corrigée comme dans la colonne 2; la quatrième donne la hauteur du baromètre météorologique suisse; enfin les cinquième et sixième colonnes contiennent les différences.

On voit que les différences entre les résultats fournis par l'enregistreur et ceux donnés par les lectures directes varient entre  $0^{\text{mm}}.04$  et  $0^{\text{mm}}.26$ . C'est-à-dire que l'erreur d'observation résultant d'une lecture faite au hasard sur l'enregistreur n'atteint pas  $0^{\text{mm}}.3$ . Il faut remarquer que le baromètre météorologique suisse ne permet de mesurer que  $0^{\text{mm}}.1$ .

La différence des résultats entre les observations directes et les indications de l'enregistreur peut être réduite dans la pratique si l'observateur fait chaque jour, comme c'est l'usage, une ou deux lectures barométriques directes, au moyen desquelles on établit la correction de l'enregistreur pour la journée.

Le baromètre-levier ne comporte-t-il pas une précision plus grande? Plusieurs raisons nous portent à croire que l'exactitude de ses indications peut être supérieure à celle qui résulte des observations précédentes.

En effet, l'instrument qui a servi à ces mesures est un appareil d'étude construit en grande partie au laboratoire, avec des pièces dont plusieurs n'ont pas la perfection mécanique qu'elles auraient si elles avaient été construites par un mécanicien habile. Les couteaux de suspension, entr'autres, pourraient être beaucoup plus délicatement construits. Une autre cause d'erreur plus importante encore et inévitable dans les conditions données, résulte des erreurs possibles dans les mesures cathétométriques qui ont servi à la graduation de l'appareil.

Nous avons dit précédemment que lorsque les lectures sont soigneusement faites, deux mesures successives peuvent ne pas différer de plus de  $0^{\text{mm}}.10$ ; l'excellent cathétomètre



employé permet d'atteindre à une précision plus grande, le vernier donnant directement  $0^{\text{mm}}.02$ ; malheureusement, le plancher de la salle dans laquelle sont placés les instruments est loin de présenter toute la stabilité désirable. Il en résulte que malgré le réglage le plus soigné, la position de la lunette pendant une lecture varie constamment au moindre mouvement de l'observateur. La lunette étant à  $0^{\text{m}}.85$  du tube, un déplacement vertical de  $0^{\text{mm}}.5$  à son extrémité produirait une erreur de lecture de plus de  $3^{\text{mm}}$ .

On a cherché à atténuer cette cause d'erreur par le soin avec lequel on a fait les lectures, mais elle n'en subsiste pas moins, et on ne peut s'étonner que l'écart qui existe entre les valeurs observées et les valeurs données par l'enregistreur atteigne parfois presque  $0^{\text{mm}}.3$ .

Il est encore un fait sur lequel nous devons attirer l'attention en terminant.

Dans les tableaux qui précèdent, nous donnons les hauteurs barométriques observées, *réduites à  $0^{\circ}$* , tandis que nous n'avons fait subir aucune correction aux valeurs données par l'enregistreur. Grâce en effet à la construction de l'instrument, l'influence de la température est négligeable; l'appareil étant formé d'une seule pièce, le tube barométrique, il n'y a pas, comme dans le baromètre-balance, passage du mercure du tube mobile dans la cuvette fixe. Le poids total de la partie mobile de l'instrument est absolument indépendant des variations de la température. En outre, grâce à la symétrie de l'appareil et entr'autres à l'égalité des deux bras horizontaux, les variations que la température peut produire sur les parties de l'appareil situées à droite et à gauche de la verticale sont sensiblement égales et se détruisent. Ce fait explique pourquoi il n'est pas nécessaire de faire subir de correction de température aux indications du baromètre-levier, et par conséquent ses indications donnent directement la hauteur barométrique réduite à  $0^{\circ}$ .

---

## CONCLUSION

En résumé, le baromètre-enregistreur que nous venons de décrire présente les propriétés suivantes :

Le tube barométrique est d'une construction facile et d'un prix peu élevé.

Les variations de la pression atmosphérique se transforment immédiatement et sans aucun intermédiaire en déplacements du style inscripteur, qui forme corps avec le tube barométrique lui-même.

On peut donner à l'appareil l'amplification qu'on désire, soit en faisant varier la distance du point de suspension au centre de gravité, soit en faisant varier la longueur des bras horizontaux.

L'appareil est à peu près indépendant des variations de température.

La surface de mercure en contact avec l'air est très petite, de sorte que l'altération de cette surface ne peut modifier que très peu et très lentement les indications de l'instrument.

La légèreté de l'appareil permet une suspension simple et assure à l'instrument une grande sensibilité; il se prête très bien à l'enregistrement continu et à l'étude des variations rapides de la pression atmosphérique.

De tous les baromètres-enregistreurs à mercure que nous connaissons, le baromètre-levier est celui qui peut être construit au prix le plus bas, tout en conservant une exactitude suffisante pour les besoins de la pratique <sup>1</sup>.

Nous rappelons en terminant un fait qui est très connu, mais qu'on oublie souvent d'utiliser, c'est que le principe sur lequel repose la construction du baromètre-levier est un

<sup>1</sup> Le baromètre à enregistrement continu nous a coûté 150 fr.; celui à pointage sec 250 fr.; le prix de l'appareil de pointage est à lui seul de 198 fr.



principe général et applicable à d'autres instruments. Ce fait, très simple, est celui-ci :

*Toutes les fois qu'un phénomène produit dans un appareil le mouvement d'une colonne liquide pesante, on peut utiliser les déplacements du centre de gravité résultant de ce mouvement, pour obtenir l'enregistrement mécanique du phénomène observé.*

Lorsqu'il s'agit d'appareils de démonstration, l'application de cette simple règle peut rendre souvent d'utiles services.

Lausanne, août 1881.

---

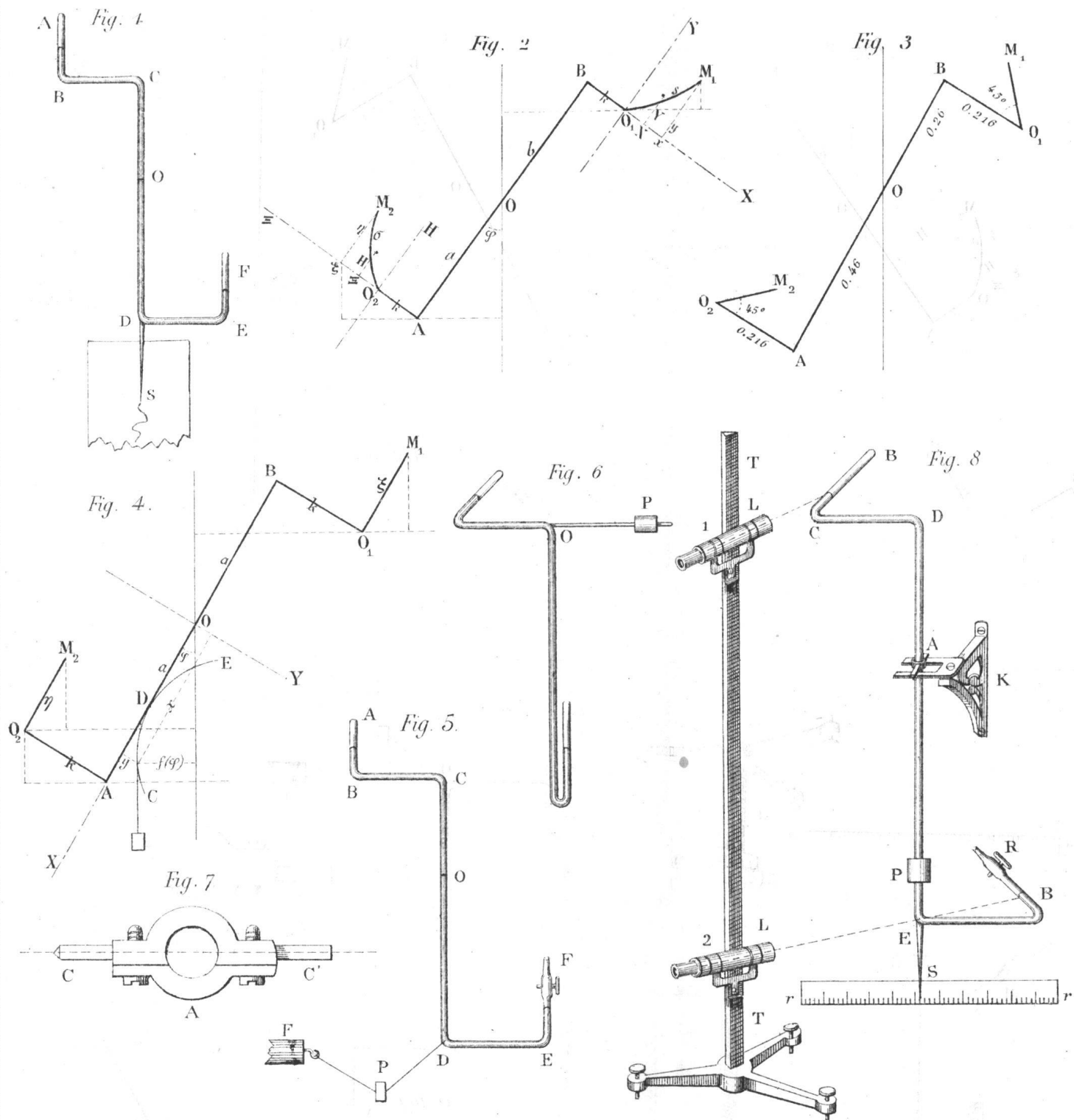


Fig. 1

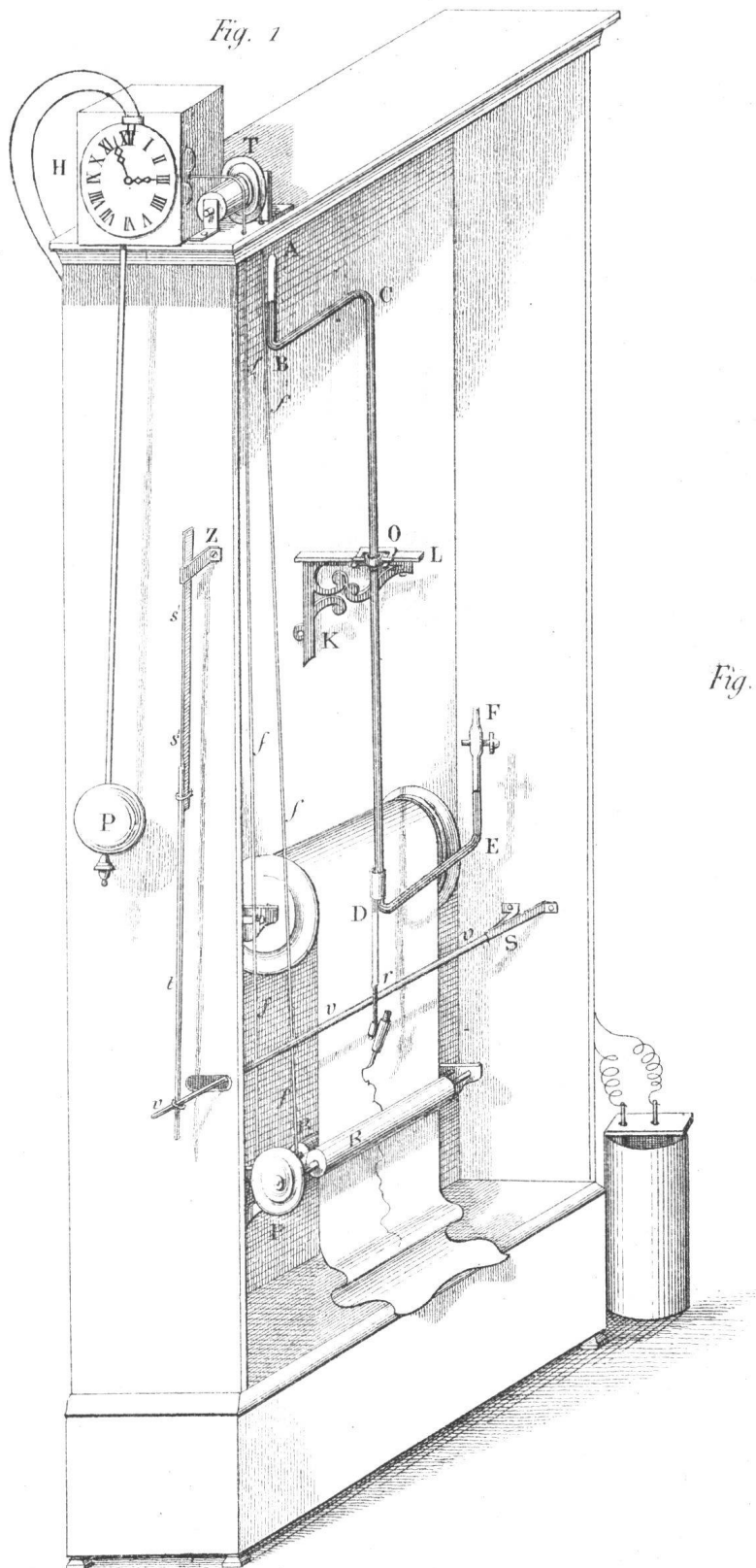


Fig. 5

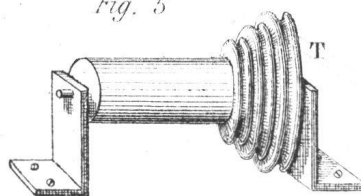


Fig. 4

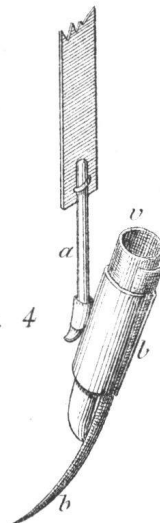


Fig. 3

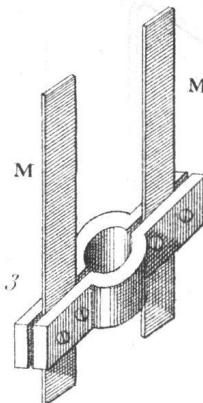
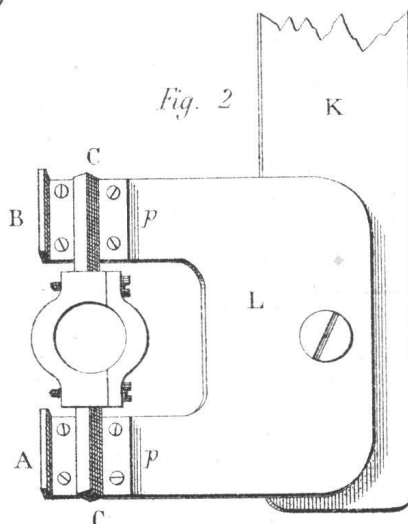
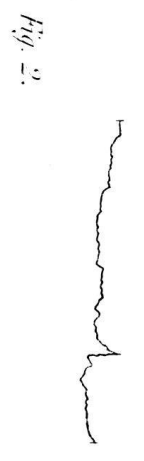


Fig. 2



21 Août  
1881

Nuit du 19 au 20 Août  
1881



soir . . . . . 12 h . . . . . matin . . . . . soir

9 8 7 6 5 4 3 2 1 12 11 10 9 8 7 6 5 4

11 Juin 1880



Fig. 4

heures fréquentes  
de 10 à 5 h

10 8 6 4 2 12 10 8 6

jour

Echelle { horizontale 5 mm = 1 mm  
          { verticale 2 mm = 1 mm

Tableau I.

Hauteurs barométriques.	Dist. à la ligne de foi.	Différences.	Hauteurs barométriques.	Dist. à la ligne de foi.	Différences.
mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.
690	2.9	1.1	711	30.8	1.5
91	4.0	1.2	12	32.3	1.6
92	5.2	1.2	13	33.9	1.7
93	6.4	1.2	14	35.6	1.7
94	7.6	1.2	715	37.3	1.9
695	8.8	1.3	16	39.2	2.0
96	10.1	1.3	17	41.2	1.9
97	11.4	1.2	18	43.1	2.0
98	12.6	1.2	19	45.1	2.3
99	13.8	1.2	720	47.4	2.3
700	15.0	1.4	21	49.7	2.5
01	16.4	1.4	22	52.2	3.0
02	17.8	1.2	23	55.2	2.8
03	19.0	1.4	24	58.0	2.8
04	20.4	1.3	725	60.8	3.3
705	21.7	1.4	26	64.1	3.4
06	23.1	1.4	27	67.5	3.6
07	24.5	1.6	28	71.1	3.8
08	26.1	1.5	29	74.9	4.3
09	27.6	1.5	730	79.2	5.5
710	29.1	1.7	31	84.7	

