

Zeitschrift: Archives des sciences physiques et naturelles
Herausgeber: Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève
Band: 8 (1926)

Artikel: Influence de la pression sur la marche des montres
Autor: Jaquerod, Adrien
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-742380>

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: 10.01.2026

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

INFLUENCE DE LA PRESSION

SUR

LA MARCHE DES MONTRES

PAR

Adrien JAQUEROD

(Avec 7 fig.)

Les variations de pression barométrique ont, sur la marche des montres, une influence complexe; elle se traduit par un effet global qui a déjà fait l'objet de plusieurs recherches, quelques-unes très anciennes.

Il ne semble pas que l'on ait jamais cherché à préciser, dans un même travail, la part qui revient aux différents facteurs et il faut avouer que c'est difficile. Je n'ai pas la prétention d'y être parvenu; mais je crois que les observations que je publie aujourd'hui jetteront peut-être un certain jour sur cette intéressante question¹.

Comment peut-on, dans ses grandes lignes, comprendre cette influence, c'est ce qu'il convient d'examiner tout d'abord. Comme c'est le cas pour la température, par exemple, on peut dire que la pression agit sur la marche des montres de façon à la fois directe et indirecte. Les organes réglants sont le balancier et le ressort spiral, dont les oscillations, de période constante,

¹ Je tiens à remercier ici la fabrique « Les Longines » de St-Imier, et en particulier son distingué directeur, M. Pfister, qui ont mis aimablement à ma disposition, pour cette recherche, un certain nombre d'excellents chronomètres, quelques-uns pourvus de balanciers spécialement construits. La cloche pneumatique décrite plus loin sort des ateliers de la même maison et a été gracieusement offerte au laboratoire.

assurent la régularité de la marche. Ces organes se meuvent dans l'air qui, d'une part, s'associe à leur mouvement et, d'autre part, tend à l'amortir en créant un frottement. Lorsque la pression atmosphérique varie, la masse d'air entraînée varie aussi, et dans le même sens; il se produit un changement du moment d'inertie du balancier, un changement aussi de l'inertie apparente du spiral, d'où une variation de période. C'est l'effet direct. Une augmentation de pression produit un retard dans la marche, et réciproquement.

En toute rigueur, il faudrait encore tenir compte du fait que l'amortissement, fonction de la pression, influence la marche; on sait en effet que la période d'oscillation T , dans le cas d'un amortissement caractérisé par le décrément logarithmique Δ , est à la période sans amortissement \mathfrak{T} dans le rapport:

$$\frac{T}{\mathfrak{T}} = \sqrt{1 + \frac{\Delta^2}{4\pi^2}}$$

Mais, comme l'ont montré des expériences faites dans un autre but dans ce laboratoire, cet effet est toujours extrêmement petit, et n'excéderait qu'exceptionnellement 0,1 seconde sur la marche diurne. On peut donc le négliger.

D'un autre côté, le freinage éprouvé par le balancier varie lui-même avec la pression; il s'en suit des changements correspondants de l'amplitude des oscillations. Si ces dernières étaient rigoureusement isochrones, l'effet sur la marche serait nul; mais comme l'isochronisme n'est jamais qu'approximativement réalisé, ce facteur entre à son tour en jeu et constitue l'action secondaire ou indirecte. Sa grandeur et même son signe sont variables, et dépendent de la construction de la montre; ils ne peuvent être prévus *a priori*. Pour certaines montres, il y a « avance aux petits arcs », c'est-à-dire que la période du balancier diminue avec l'amplitude des oscillations. Comme l'augmentation de pression barométrique provoque toujours une diminution d'amplitude, elle agira sur la marche de ces montres en causant une avance. L'inverse se produira avec les montres qui « retardent aux petits arcs ».

On voit qu'il est faisable de s'arranger, par construction,

pour que les effets direct et indirect soient de signe contraire, et on a même proposé de compenser l'effet de pression en profitant de cette circonstance et en agissant sur l'isochronisme. Ce serait évidemment possible, du moins approximativement, mais présenterait des inconvénients sérieux, car il existe d'autres défauts, provenant du manque d'isochronisme, et dont l'influence se ferait alors sentir.

Peut-on prévoir quantitativement l'effet de pression, en supposant, bien entendu, l'isochronisme réalisé, puisque ce dernier peut changer jusqu'au signe du phénomène? Il ne semble pas. Le problème aérodynamique paraît insoluble de par sa complexité. Il ne s'agit pas, en effet, du cas schématique d'une sphère ou d'un ellipsoïde tournant dans un milieu fluide indéfini, ou limité par une surface semblable. Il s'agit d'un organe de forme compliquée rappelant, avec les vis qui chargent son pourtour, l'apparence d'une roue de moulin à palettes, logé dans une cavité aux contours capricieux et même variables par suite du mouvement des rouages, organe qui oscille rapidement. Le spiral, dans ses pulsations, déplace également l'air ambiant. De telles conditions échappent à une analyse mathématique complète.

Il est cependant possible de se rendre compte du rôle joué par les deux facteurs essentiels, caractéristiques de l'atmosphère ambiante: la densité et la viscosité du gaz.

Le moment d'inertie du balancier est augmenté, du fait du gaz entraîné par lui. Si l'on admet, ce qui semble plausible, que la masse qui constitue cette surcharge possède un rayon de giration invariable, qu'elle est de plus proportionnelle à la viscosité, de coefficient η , et à la densité du milieu, ρ , si l'on appelle I_0 le moment d'inertie du balancier dans le vide, il deviendra dans le gaz:

$$I = I_0(1 + A\eta\rho), \quad (1)$$

A étant une constante variant avec la forme et les dimensions du système et celle de la cavité limite. Le gaz mis en mouvement par le spiral produit aussi une augmentation de masse de l'organe réglant; la correction que ce phénomène comporte peut être considérée comme comprise dans la même relation.

Si C est le moment élastique du spiral pour une torsion de 1 radian, la période d'oscillation est:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{C}} = 2\pi \sqrt{\frac{I_0}{C} \sqrt{1 + A\eta\rho}}. \quad (2)$$

Comme le produit $A\eta\rho$ est très petit vis-à-vis de l'unité, puisque les variations de période n'atteignent jamais que quelques dix-millièmes, on pourra écrire approximativement, en appelant T_0 la période dans le vide:

$$T = T_0 \left(1 + \frac{A}{2}\eta\rho\right), \quad (3)$$

et, au même degré d'approximation, on aura pour la « marche » de la montre:

$$m = m_0 (1 - B\eta\rho), \quad (4)$$

m_0 étant la marche dans le vide et B une nouvelle constante.

Supposons tout d'abord la température constante. La viscosité du gaz est, dans de larges limites, indépendante de la pression; la densité est proportionnelle à la pression. On pourrait donc s'attendre, d'après la relation 4, à ce que la montre subisse, du fait de l'atmosphère ambiante, un retard proportionnel à la pression. On a en fait souvent admis une variation linéaire (P. Ditisheim, par exemple). Nous verrons qu'en réalité le phénomène présente une allure parabolique, du moins aux faibles pressions.

Quelle sera maintenant l'influence de la température sur l'effet de pression ? La densité ρ du gaz est, à pression constante, en raison inverse de la température absolue; la viscosité η n'est pas tout à fait proportionnelle à cette température, mais l'est cependant de façon grossièrement approchée. Il y aura donc à peu près compensation dans le produit des deux facteurs, et l'on peut s'attendre à ce que la température, du moins dans des limites restreintes, soit sensiblement sans influence.

Le phénomène dépendra, cela va sans dire, de la nature du gaz ambiant et le produit $\eta\rho$ sera caractéristique à cet égard.

Considérons, par exemple, les trois milieux: air, anhydride carbonique, hydrogène. Les valeurs relatives de η et ρ sont les suivantes, rapportées à l'air:

η	ρ	$\eta \rho$
Air . . . 1	1	1
CO ² . . . 0,8	1,52	1,22
H ² . . . 0,5	0,07	0,035

On voit par ce tableau que, dans l'anhydride carbonique, on doit s'attendre à un effet de pression égal à 1,22 fois celui obtenu dans l'air; la forte densité du premier gaz est en partie compensée par une viscosité moindre que celle de l'air. Dans l'hydrogène, l'effet n'est plus, si nos suppositions sont exactes, que le $1/30$ de ce qu'il est dans l'air, c'est-à-dire négligeable: une montre remplie d'hydrogène doit se comporter à peu près comme si elle était placée dans le vide. Il y aurait là un moyen d'éliminer l'influence de la pression, mais il serait peu pratique. Comme nous le verrons, ces prévisions sont, dans leurs grandes lignes, corroborées par l'expérience.

PARTIE EXPÉRIMENTALE.

Pour connaître de façon certaine l'allure d'un phénomène dans une région donnée de la variable dont il dépend, il est nécessaire d'en poursuivre l'étude de part et d'autre de cette région. Ce qui revient à dire, si l'on utilise une représentation graphique: pour fixer expérimentalement l'allure de la courbe sur une portion d'arc A B, il faut tracer cette courbe sur une étendue beaucoup plus grande, en deça de A et au-delà de B. Partant de ce principe, j'ai commencé par étudier l'influence de la pression sur la marche des montres entre deux atmosphères et 15 mm de mercure environ, alors que le domaine utile des pressions est compris entre 1 et $1/4$ d'atmosphère, ce qui correspondrait à un changement d'altitude de 0 à 11000 mètres.

J'ai d'ailleurs pensé, à côté du but directement chronométrique, qu'une étude systématique de ce genre ne serait pas sans intérêt du point de vue de la physique pure et permettrait peut-être de préciser certaines particularités délicates du domaine de la résistance des fluides.

Les expériences ayant fourni des résultats un peu inattendus, je les ai poursuivies en poussant les pressions jusqu'à 4 atmosphères, et le vide jusqu'au centième de millimètre de mercure.

L'appareillage utilisé est simple et consiste essentiellement en une cloche de bronze cylindrique, de 10 cm de diamètre sur 4,5 cm de profondeur, et de 1 cm d'épaisseur de paroi, munie d'un rebord soigneusement rodé, large de 2,5 cm. Ces dimensions sont suffisantes pour permettre d'y introduire un chronomètre de bord. La cloche est fermée par une rondelle de glace épaisse d'un centimètre, maintenue contre le rebord de la cloche par 6 équerres munies de vis de pression. L'étanchéité est assurée par un joint constitué d'un anneau de caoutchouc graissé. Un tube de bronze soudé à la cloche et un raccord en caoutchouc épais relient cet appareil à un manomètre à mercure, à air libre, qui conjointement avec le baromètre fournit la pression de l'atmosphère gazeuse; une trompe à eau permet de descendre jusqu'à 15 mm de mercure environ. Pour les pressions supérieures à l'atmosphère, la trompe est remplacée par une simple pompe à bicyclette, qui fournit très facilement une surpression de 2 à 3 atmosphères.

La pression désirée une fois obtenue, un robinet de verre soigneusement graissé permet d'isoler l'appareil. Il est cependant très difficile de maintenir la pression à une valeur constante, surtout s'il s'agit d'une surpression, car le joint à caoutchouc de la cloche n'est jamais parfaitement étanche. Ce fait ne présente d'ailleurs pas d'inconvénient, étant donné que chaque mesure ne dure qu'une heure environ; durant ce laps de temps, la pression peut varier de 0,5 à 5 millimètres, comme le montrent les lectures faites toutes les demi-heures. La pression moyenne est donc connue, dans les cas les plus défavorables, à un millimètre près, ce qui est amplement suffisant, puisque la marche de la montre ne varie pour un millimètre que de 0,01 à 0,02 secondes par jour et que des variations acciden-

telles bien plus importantes se produisent de temps à autre, même chez les meilleurs mouvements.

La plus basse pression atteinte dans cette série de mesures est de 10-15 mm. On peut la maintenir très constante en laissant la trompe à eau fonctionner durant tout le temps de la mesure.

La détermination de la marche de la montre en expérience, enfermée dans la cloche pneumatique, a toujours été faite par la méthode des coïncidences exposée récemment dans ce journal¹. J'ai déjà insisté sur les grands avantages que présente ce procédé dans une recherche du genre de celle qui nous occupe: gain de temps considérable, sans nuire à la précision; faculté de procéder à la détermination de la marche sous 5 à 6 pressions différentes en un seul jour, sans qu'il soit par conséquent nécessaire de toucher à la montre pour la remonter, etc. Je pense qu'il n'est pas nécessaire d'y revenir.

Une difficulté peut se présenter aux faibles pressions; l'amplitude des oscillations devenant très grande, il peut arriver que la montre « rebatte », c'est-à-dire qu'à l'extrémité de sa course, le piton du balancier vienne frapper la fourchette, ce qui détruit naturellement l'isochronisme. On en est immédiatement averti par une avance considérable de la montre, avance qui peut atteindre *des minutes* par jour, et qui est, dans tous les cas, hors de proportion avec ce qu'on peut attendre de l'abaissement de pression.

Lorsque cela se produisait, je me suis tiré d'affaire de la façon suivante: l'amplitude moyenne des oscillations diminue graduellement, comme l'on sait, depuis le moment du remontage jusqu'à la fin du temps normal de marche (36 heures en général) par suite de l'affaiblissement du moment moteur. Il suffit donc de commencer par l'étude des fortes pressions, lorsque le ressort est « au haut » comme disent les horlogers, et de terminer par les basses pressions, le ressort étant « au bas », pour éviter sûrement le rebattage. On y trouve encore l'avantage que le défaut d'isochronisme se manifeste le moins possible, puisqu'il y a compensation partielle, au point de vue de l'amplitude, entre

¹ *Archives* (V) 5, p. 469 (1923).

l'effet de pression et celui du remontage. On obtient de la sorte, au mieux, l'effet de la pression seule sur la marche.

Ce mode de faire serait naturellement inapplicable avec l'ancienne méthode d'observation, la montre devant rester sous la cloche, à une même pression, durant 24 heures. C'est encore un avantage de la méthode des coïncidences.

I. ETUDE COMPLÈTE DE L'INFLUENCE DE LA PRESSION SUR UNE MONTRE.

Afin de mettre en évidence les deux effets, direct et indirect, dont il est question dans l'introduction, j'ai étudié séparément, et pour une même montre, les trois points suivants:

1^o L'influence globale de la pression sur la marche, et celà dans trois atmosphères différentes.

2^o L'influence de la pression sur l'amplitude des oscillations dans trois gaz également.

3^o L'isochronisme.

Les deux derniers éléments étant connus, il est possible de ramener la marche sous différentes pressions à ce qu'elle aurait été pour une amplitude constante, et d'en déduire par suite l'effet de la seule pression sur la période, donc l'effet primaire ou direct.

Les expériences ont porté sur une montre du type dit « à force constante », munie du mécanisme imaginé par M. Pellaton-Schild. La force motrice du ressort n'y est pas transmise directement à l'échappement; celui-ci est commandé par un petit ressort en forme de spirale, qui est remonté chaque seconde par le jeu des rouages. Le moment moteur, et par suite les impulsions d'entretien données au balancier, repassent donc périodiquement par les mêmes valeurs toutes les secondes. L'amplitude reste alors constante, du moins dans des limites très étroites; elle ne varie pas, durant 24 heures, de plus de un à deux degrés, tandis que dans un mouvement ordinaire, même de chronomètre très soigné, ces variations peuvent atteindre, et même dépasser 30 degrés dans l'espace de peu de minutes; il est impossible de déterminer de façon exacte, dans ces der-

nières conditions, l'influence assez faible de la pression sur l'amplitude.

1^o *Effet global.* — Les mesures, conduites comme il est dit plus haut, ont été effectuées successivement dans l'air, dans l'anhydride carbonique et dans l'hydrogène. Voici, par exemple, les résultats d'une série de mesures effectuées dans l'air. Je m'étais assuré, au préalable, que la montre ne « rebattait » pas aux basses pressions, de sorte que l'ordre dans lequel les pressions étaient réalisées n'avait pas d'importance; l'amplitude étant d'ailleurs constante pour une pression donnée, il eût été inutile d'employer le moyen indiqué ci-dessus:

Pression (mm Hg)	Marche ¹ (Retard en 24 h.)
731	52,4 sec
16	39,4
375	46,5
730	51,6
1090	54,8
1445	58,1
729	52,1
.	
le lendemain	
730	52,3
1478	57,9
19	38,6

On voit qu'à la pression ordinaire (730 mm environ) la marche n'est pas absolument constante, ce qui d'ailleurs n'a jamais lieu pour aucune montre; de petites variations accidentelles, dont la cause est encore assez mystérieuse, se produisent toujours. Par contre on ne remarque pas d'effet systématique produit soit par le vide, soit par des pressions élevées. D'autres séries ont été effectuées dans l'air, et, à ces variations accidentelles près, qui parfois peuvent décaler toutes les mesures de 0,5 ou même 1 seconde, ont fourni des résultats identiques.

Afin de ne pas multiplier les tableaux numériques je donne uniquement des graphiques pour rendre compte de ces expériences et d'autres qui suivront. Ces graphiques ont été soigneu-

¹ Cette montre avait été déréglée pour l'observation des coïncidences, et présentait un retard moyen considérable.

sement tracés, à une grande échelle, et de façon à respecter au mieux les diverses mesures individuelles, puis calqués et

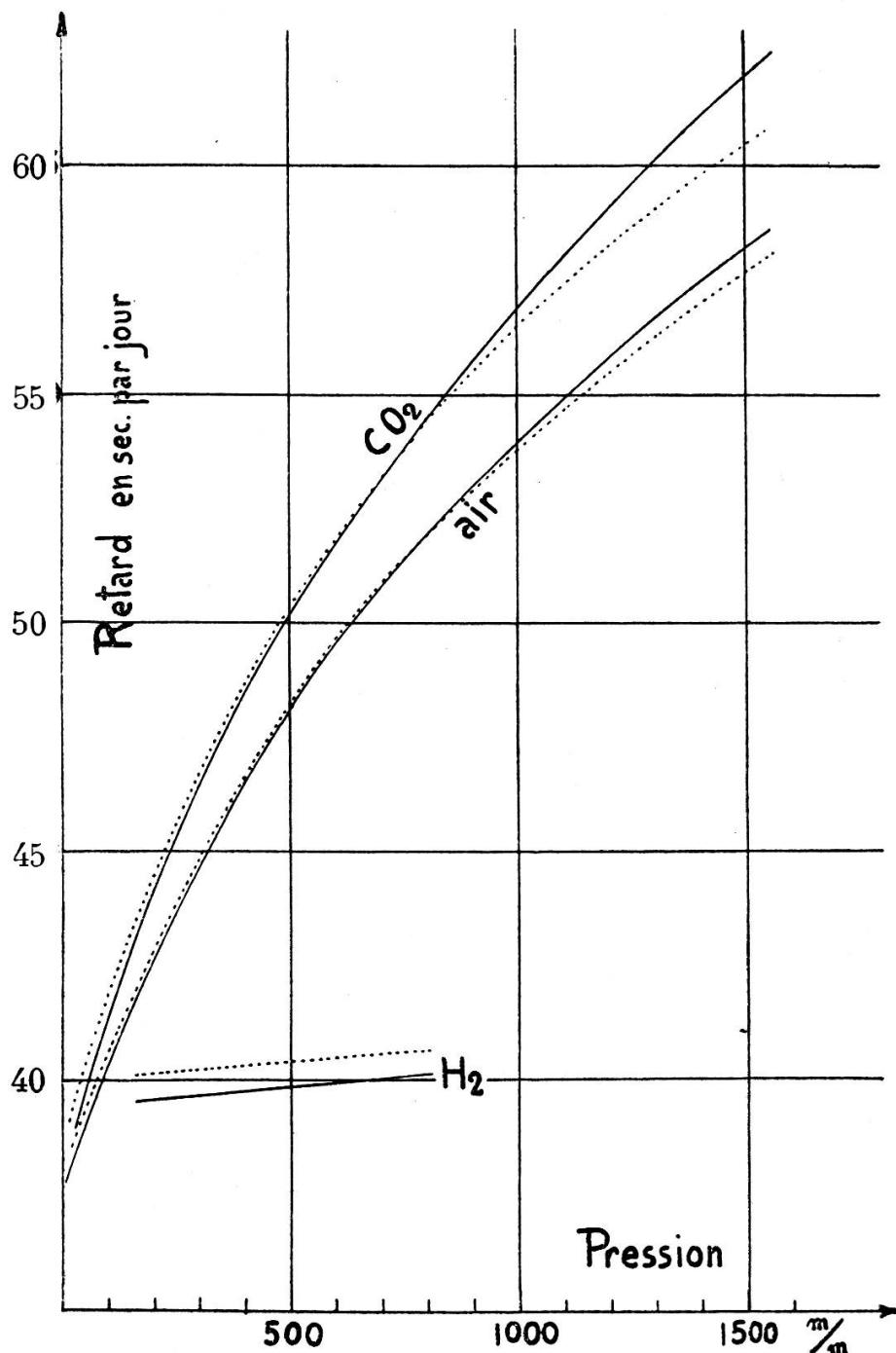


Fig. 1.

photographiés. Sur les reproductions qui accompagnent cet article, on peut très facilement lire les marches à une demi-

seconde près, ce qui est suffisant, étant donné que les incertitudes expérimentales sont du même ordre.

Dans la figure 1, la courbe en pointillé marquée *air* montre l'influence de la pression sur la marche, à une température constante de 19° environ. On voit que la variation n'est pas du tout linéaire, mais que la courbe s'incurve de façon très visible, présentant sa concavité à l'axe des pressions. Comme nous le verrons plus loin, ce résultat est général, et se retrouve sur tous les chronomètres que j'ai observés, à une exception près.

Pour opérer dans l'anhydride carbonique, la pompe à bicyclette fut remplacée par un tube de CO₂ liquide tel qu'en fournit l'industrie, qui donne ce gaz à un état de pureté très suffisante (plus de 99 %) et sous une pression élevée. Il va sans dire que la cloche fut 5 à 6 fois vidée et remplie d'anhydride carbonique avant de commencer les mesures, afin d'expulser complètement l'air.

L'hydrogène était fourni par un petit appareil de Kipp, contenant du zinc pur et de l'acide sulfurique pur; les mêmes précautions furent prises, pour les remplissages, que dans le cas de l'anhydride carbonique. Comme l'appareil de Kipp ne livre le gaz que sous une pression à peine supérieure à la pression atmosphérique, les mesures n'ont pu être effectuées aux pressions élevées. C'est une lacune que j'espère combler avant longtemps.

Les courbes en pointillé de la figure 1, marquées CO₂ et H₂, font voir le résultat de ces déterminations.

On retrouve, dans le cas de l'anhydride carbonique, l'incurvation présentée déjà par la courbe relative à l'air, et la similitude des deux phénomènes est frappante; dans l'hydrogène l'effet, comme il fallait s'y attendre, est extrêmement faible, et la marche est pratiquement indépendante de la pression.

On pourrait penser que l'incurvation des courbes que l'on attendait droites ou à peu près, provient du défaut d'isochronisme, puisque l'amplitude est fonction de la pression du gaz de remplissage. Les deux autres études faites sur la même montre vont nous montrer qu'il n'en est rien.

2^o *Influence de la pression sur l'amplitude¹ des oscillations.* — Ces déterminations ont été faites avec le même appareillage. La lunette d'observation était réglée de façon qu'on vit, dans le champ, le balancier tout entier, soigneusement centré. L'oculaire de la lunette est muni d'un réticule formé de deux fils à angle droit, et peut tourner sur lui-même en entraînant une aiguille qui se déplace sur un cercle gradué, permettant de lire facilement le quart de degré.

Le balancier de la montre était muni d'un doigt d'acier, de 0,3 mm de diamètre, placé radialement, et éclairé vivement par une petite lampe électrique. Lors du passage par l'élongation extrême, ce doigt brille fortement, et donne un trait lumineux avec lequel on fait coïncider l'un des fils, toujours le même, du réticule. Il est donc très facile de suivre les variations d'amplitude et de les mesurer en degrés. Pour obtenir les amplitudes en valeur absolue, il faut connaître le zéro, soit la position d'équilibre du balancier. Pour cela, on règle la pression de façon que les élongations opposées aient lieu sur un même diamètre; la perpendiculaire fournit le zéro cherché.

Les mesures ont porté sur les trois gaz: air, anhydride carbonique, hydrogène; la figure 2 rend compte des résultats et montre des particularités intéressantes.

Dans l'air et l'anhydride carbonique, la variation est très sensiblement linéaire, de 15 à 1500 mm de mercure environ, limites atteintes dans ces observations. Les deux droites se coupent, à une pression de 450 mm environ, pour laquelle l'amplitude est la même dans les deux gaz. Au-dessus, l'influence freinante de l'anhydride carbonique l'emporte; au-dessous, c'est celle de l'air.

Comment expliquer ce dernier phénomène? On sait que la résistance d'un fluide est une fonction compliquée des variables qui interviennent, lorsque la vitesse est appréciable et la forme du corps en mouvement compliquée, comme c'est le cas ici. Cette résistance contient certainement plusieurs termes, les uns

¹ Par *amplitude*, nous entendons toujours l'élongation maximum, mesurée à partir de la position d'équilibre. C'est donc la moitié de la course totale du balancier.

dépendant de la viscosité et les autres de la densité du milieu; les premiers sont prépondérants aux faibles pressions, puisqu'alors la densité devient négligeable; ils doivent garder une valeur à peu près constante, lorsque p varie, puisque η est indépendant de p . Les autres termes croissent au contraire avec p et deviennent à leur tour prépondérants, et ceci de plus en plus. Ainsi s'explique l'intersection des deux droites, puisque

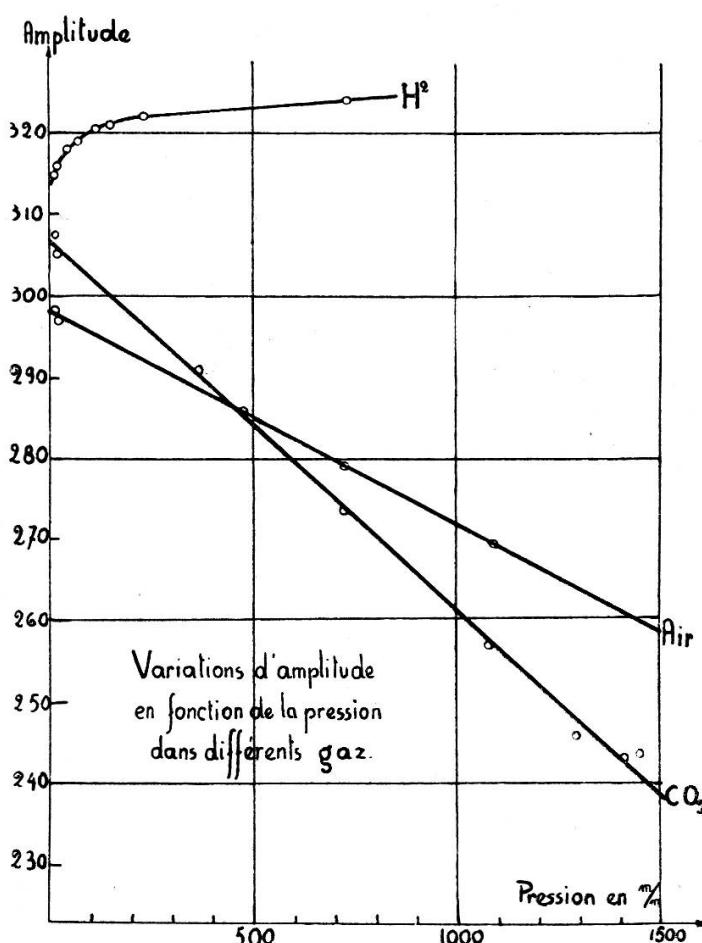


Fig. 2.

la viscosité de l'anhydride carbonique est notablement plus faible que celle de l'air, tandis que l'inverse a lieu, sous une même pression, pour les densités.

L'influence de l'hydrogène est bien, d'une façon générale, ce qu'on doit attendre de la faible densité de ce gaz, c'est-à-dire que l'amplitude y est toujours très grande, et à peu près constante. On remarque cependant une particularité bien éton-

nante: aux basses pressions, l'amplitude *diminue* de plus en plus. De sorte que, partant de 15 mm par exemple et augmentant la quantité d'hydrogène dans la cloche, on voit l'amplitude *augmenter* progressivement. J'ai répété plusieurs fois l'expérience, et toujours avec le même résultat. Je n'y ai trouvé qu'une explication: c'est que ce phénomène n'est qu'apparent, et provient d'une pénétration d'air dans la cloche, les joints n'étant pas parfaits. Lorsque la pression de l'hydrogène est notable, ces traces d'air n'ont pas d'effet visible; aux basses pressions au contraire elles se font sentir en diminuant l'amplitude. Je compte néanmoins trancher cette question en effectuant de nouvelles expériences qui excluront la possibilité de rentrées d'air.

Il est enfin un dernier point que soulève l'inspection du graphique (fig. 2). Les courbes dans les différents gaz y sont prolongées depuis la pression de 15 mm, limite atteinte, jusqu'à la pression zéro. Et elles n'aboutissent pas du tout au même point. Or il est bien évident que si l'on pouvait faire le vide parfait, les oscillations auraient même amplitude, que ce vide fût fait sur de l'air, sur de l'anhydride carbonique, ou sur de l'hydrogène. Il faut donc de toute nécessité que les deux droites relatives à l'air et à l'anhydride carbonique se raccordent à la courbe de l'hydrogène, et cela par des arcs à courbure très prononcée. On sait d'ailleurs qu'aux faibles pressions le coefficient de viscosité des gaz cesse d'être proportionnel à la pression, mais diminue rapidement avec elle.

J'ai tenu à m'en assurer en poussant le vide beaucoup plus loin que dans les premières séries de mesures. J'ai employé dans ce but une pompe à huile de Fleuss, à grand débit, mue par un moteur électrique qui m'a permis, malgré des fuites, très faibles à la vérité, de faire descendre la pression jusqu'à un centième de millimètre. La pression était alors mesurée à l'aide d'une jauge de MacLeod. Les expériences n'ont porté que sur l'air, puisque les plus petites fuites auraient rendu illusoires les résultats obtenus avec d'autres gaz. La figure 3 rend compte de ces essais (courbe 1), qui ont été complétés par des mesures faites avec un chronomètre Nardin, muni du même dispositif à force constante (courbe 2).

On voit que, conformément aux prévisions que nous venons de faire, une incurvation très brusque de la droite intervient dans les derniers millimètres, et que l'amplitude croît fortement; l'augmentation est de 15 degrés lorsqu'on passe de 10 mm à 0,01 mm de mercure, alors que, si la variation restait linéaire, elle serait insensible.

Ces mesures aux très basses pressions sont d'ailleurs les moins sûres, car le vide très poussé agit sur l'huile qui lubrifie le pivot du balancier, en produisant sans doute une évaporation partielle, de sorte que, revenant à la pression normale,

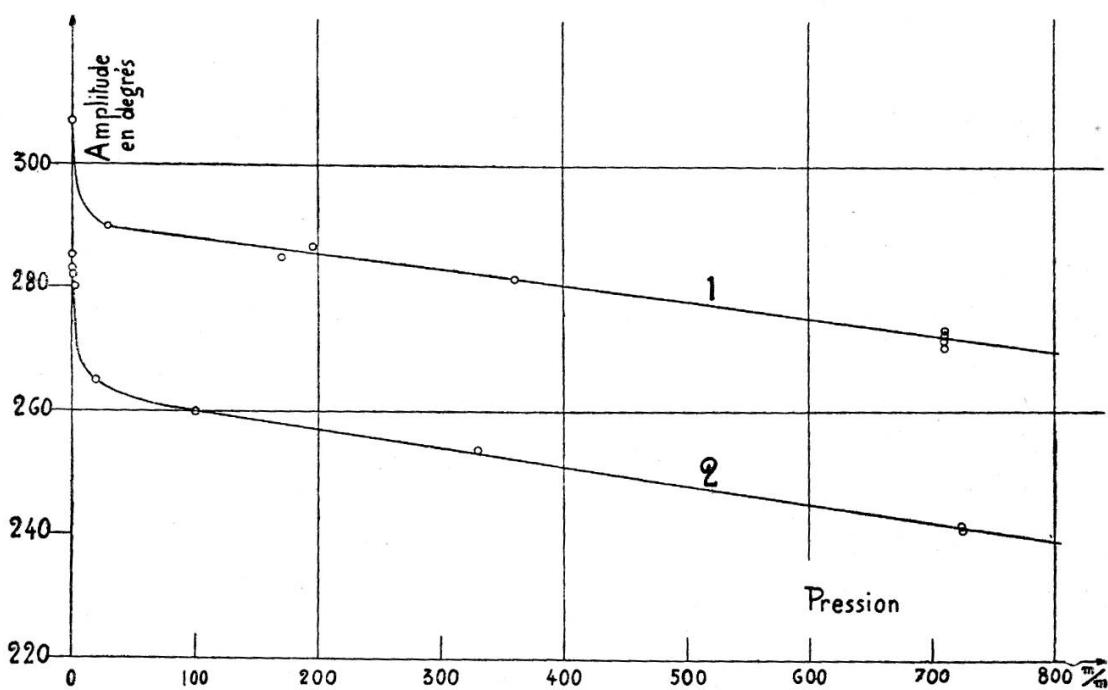


Fig. 3.

on trouve une amplitude diminuée de 4 à 5 degrés. Sans cette cause d'erreur, l'amplitude dans le vide serait encore plus grande.

Les mesures de marche dans les vides élevés ne présentent pas d'anomalies spéciales, et les courbes se continuent régulièrement jusqu'à la pression zéro.

3^e *Etude de l'isochronisme.* — Avec la montre employée, cette étude peut se faire facilement, car un mécanisme spécial permet de régler la « force constante » du petit ressort moteur à diverses valeurs; l'amplitude des oscillations varie parallèle-

ment, et il suffit de déterminer la marche pour chacun des réglages individuels. La manipulation nécessaire respecte entièrement, cela va sans dire, le mécanisme de l'échappement, le balancier et le ressort spiral.

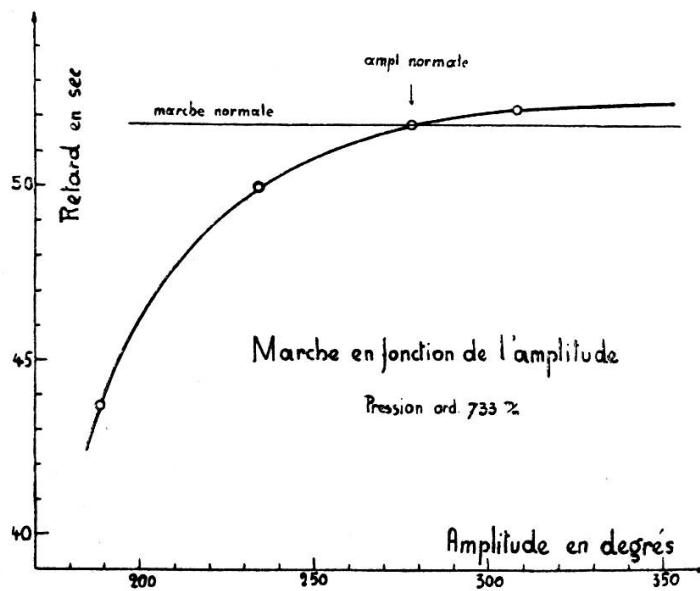


Fig. 4.

J'ai opéré pour quatre amplitudes différentes; les résultats sont reportés sur le graphique de la figure 4. On voit que la diminution d'amplitude produit une avance, d'abord très faible, puis de plus en plus prononcée.

* * *

*Réduction des observations à une amplitude constante:
détermination de l'effet primaire.*

Il est facile maintenant de se rendre compte de ce que serait l'influence de la pression sur la marche si l'isochronisme était rigoureusement réalisé. En effet, les courbes de la figure 2 donnent l'amplitude des oscillations; la figure 4 fournit immédiatement la correction à apporter à la marche pour la ramener à une amplitude constante, par exemple celle que l'on observe à la pression atmosphérique ordinaire; et cette correction, apportée aux courbes de la figure 1 (courbes pointillées), donne

l'effet cherché. Les trois courbes ainsi corrigées sont tracées en trait plein sur la figure 1.

Les corrections à apporter, dans le cas de l'air, sont faibles, et ne dépassent nulle part 0,6 seconde; elles sont indiquées dans le tableau suivant:

pression	15 mm	500	725	1000	1500
amplitude.	297°	284	279	272	259
correction.	— 0,25 sec	— 0,1	0	+ 0,25	+ 0,6

Dans le cas de l'anhydride carbonique, aux pressions élevées notamment, les corrections sont plus importantes, puisque l'influence de l'atmosphère de CO₂ est plus marquée sur l'amplitude. Pour l'hydrogène au contraire, elles sont faibles partout, et constantes, puisque l'amplitude elle-même est à très peu près constante.

Les courbes corrigées (trait plein) font voir que l'incurvation présentée par les courbes brutes, dans l'air et l'anhydride carbonique, subsiste presque telle quelle. Il est donc bien établi que cette incurvation ne provient pas du défaut d'isochronisme, mais qu'elle est de nature primaire, et dépend de l'influence même du milieu dans lequel se meut le balancier. Quelle est son origine? Il ne m'est pas possible pour le moment de me prononcer de façon certaine. Peut-être la force centrifuge joue-t-elle un rôle, comme on l'a soupçonné; l'anneau gazeux entraîné par le balancier dans son mouvement oscillatoire serait partiellement expulsé de ce fait, et sa masse diminuée, ce qui accélérerait la marche de la montre, donc diminuerait le retard; et comme cette force centrifuge est proportionnelle au carré de la vitesse, donc, toutes choses égales, au carré de l'amplitude, elle introduirait dans l'expression (1) de l'introduction (p. 95), et par suite aussi dans l'expression (4), un terme contenant le carré de la pression. En effet l'amplitude, comme nous l'avons montré, décroît proportionnellement à la variation de pression. Cet effet centrifuge, dans tous les cas, jouerait bien dans le sens voulu.

Nous pouvons maintenant comparer les résultats corrigés pour l'air et l'anhydride carbonique, et voir comment se réali-

sent les prévisions faites au début de cet article. Nous disions que l'effet d'une atmosphère gazeuse doit dépendre du produit $\eta\rho$ de la viscosité par la densité du milieu, et que par suite l'effet dans l'anhydride carbonique devait être 1,22 fois celui présenté par l'air. Les résultats expérimentaux apportent une confirmation remarquable à cette supposition.

Déterminons en effet, dans les deux cas, pour des pressions correspondantes, le retard apporté par la présence de l'atmosphère gazeuse à la marche sous une pression nulle, et faisons le rapport $\frac{\text{retard dans CO}_2}{\text{retard dans l'air}}$, nous trouvons les nombres suivants:

pression	500	1000	1300
rapport	1,22	1,19	1,22

La moyenne est donc pratiquement celle prévue par la théorie esquissée, et la concordance dépasse même de beaucoup ce qu'on aurait pu espérer.

L'hydrogène ne se prête pas à une semblable vérification, les variations de marche étant, dans ce gaz, par trop faibles.

Variation de l'effet de pression avec la température.

J'ai dit dans l'introduction que, si l'effet de pression était bien proportionnel au produit $\eta\rho$, il devait y avoir une compensation approximative dans l'influence de la température, et que cet effet devait rester le même quelle que fût la température, du moins dans des limites suffisamment restreintes.

Afin de contrôler cette assertion, j'ai déterminé l'influence de la pression entre 15 et 1500 mm de mercure pour trois températures différentes: la température ordinaire (17°), celle d'un bain d'eau froide courante maintenue à 2° et enfin celle d'une étuve à 44° . La cloche pneumatique était logée dans l'enceinte à température fixe, et les déterminations faites comme plus haut par la méthode des coïncidences. Il faut prendre garde de ne pas commencer une mesure de marche sans avoir laissé la montre une heure et demie au moins après qu'elle a été

changée de température, car ce laps de temps est nécessaire à l'établissement de l'équilibre thermique du balancier et de l'enceinte.

Ce contrôle a été établi, pour des raisons d'ordre pratique, non sur la montre ayant servi aux études rapportées plus haut, mais sur un chronomètre des Longines, dont la marche s'était trouvée très régulière.

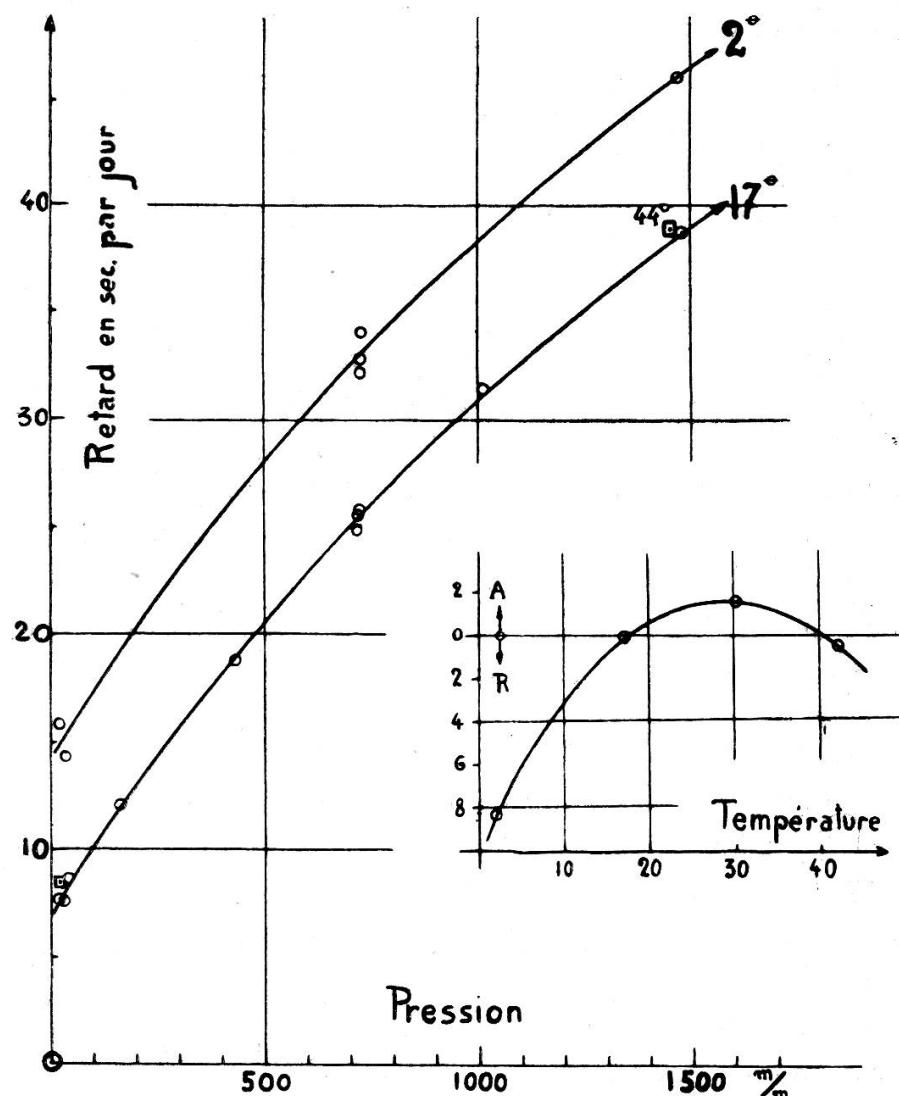


Fig. 5.

La figure 5 montre le résultat; la courbe à 44° n'a pas été tracée, étant trop voisine de celle à 17° ; d'ailleurs deux points seulement ont été obtenus, ce qui a paru suffisant; ces points sont, sur la fig. 5, entourés d'un carré. On remarque que les

ordonnées, pour une pression donnée, présentent une différence constante. Il est donc évident que cette différence ne provient pas d'une action de la température sur l'effet de pression, mais qu'elle accuse simplement une imperfection dans la compensation thermique du balancier.

Pour m'en assurer, j'ai fait encore une détermination de la marche à une température intermédiaire de 30° , à la pression ordinaire, et il m'a été possible de tracer la courbe complète de l'influence de la température sur la marche de cette montre, à pression constante. Cette courbe est reproduite dans le cartouche de la figure 5. En faisant la correction relative à la compensation, tous les points expérimentaux retombent avec une précision considérable sur une seule et même courbe.

Il semble bien qu'on puisse conclure, conformément aux prévisions, en affirmant que l'effet de pression sur la marche d'une montre ne dépend pas sensiblement de la température. C'est donc à tort que l'on avance parfois que l'effet de l'air atmosphérique est proportionnel à la *densité* de cet air; on assimile peut-être, pour le faire, le cas du balancier de la montre à celui du pendule d'une horloge; dans la période de ce dernier intervient la poussée aérostatische qui diminue le moment moteur proportionnellement au poids spécifique du gaz ambiant. Ce n'est pas le cas pour un balancier de montre.

II. ETUDE DE L'EFFET GLOBAL SUR QUELQUES MONTRES; INFLUENCE DES DIMENSIONS ET DE LA FORME DU BALANCIER.

Il est intéressant, et il peut être important pour la pratique, de se rendre compte de la façon dont la pression agit sur la marche de montres différentes, et munies notamment de balanciers de forme et de diamètre variés.

Il est clair, tout d'abord, que la construction du mécanisme entier, notamment celle de l'échappement, fera sentir son influence de façon notable, et qu'il ne sera guère possible de généraliser. Si l'isochronisme, par exemple, est moins bien réalisé que dans la montre qui a servi de type à cette étude, il aura un effet plus marqué; cet effet pourra même changer de

signe comme je l'ai dit au début, et diminuer l'influence de l'atmosphère au lieu de l'augmenter. Mais en n'opérant que sur des chronomètres de premier ordre, on sera cependant orienté sur l'importance de la correction à appliquer pour ramener la marche à une pression constante, et c'est le but de l'étude dont je vais parler pour terminer.

Les expériences ont été faites en premier lieu entre 15 et 1500 mm de pression, sur trois chronomètres de bord (diamètre du mouvement 52 mm) et sur trois chronomètres de poche de dimensions variables provenant tous de la fabrique des Longines, donc sur des pièces de même construction, et partant plus facilement comparables. Les balanciers étaient de diamètres aussi différents que possible, certains même avaient été spécialement construits pour cette recherche.

La figure 6 rend compte des observations. Le diamètre du balancier (diamètre extérieur de la serge) est inscrit à côté de chacune des courbes. Pour faciliter la comparaison, on a toujours supposé que la marche était correcte dans le vide, et porté en ordonnée les retards relatifs, provenant de l'atmosphère gazeuse.

On remarque tout d'abord une similitude frappante dans l'allure des courbes; l'incurvation peut être plus ou moins prononcée, mais les variations sont peu importantes, et ces courbes ne se coupent jamais. De plus, et d'une façon générale, l'effet de pression est d'autant plus prononcé que le balancier est plus petit. Il y a pourtant des exceptions, qu'il eût d'ailleurs été facile de faire disparaître en laissant tomber les séries d'observations correspondantes; mais il m'a paru justement intéressant d'attirer l'attention sur ces exceptions, qui font bien ressortir la complexité du phénomène.

La plus frappante est celle relative au balancier de 21,2 mm, dont la courbe se place au-dessus de celle du balancier de 19,3 mm. Elle est peut-être explicable: le balancier 21,2 mm étant anormalement grand pour l'espace dans lequel il se meut, il a fallu diminuer la tête des vis dont est muni son pourtour et qui servent au réglage. Ces vis ne sont donc plus dans la proportion normale, et l'effet de pression est plus grand que ne le comporterait le diamètre. Il est vrai qu'on s'attendrait à un

écart en sens inverse, l'air entraîné devant, semble-t-il, être en moins grande quantité puisque les aspérités sont moindres;

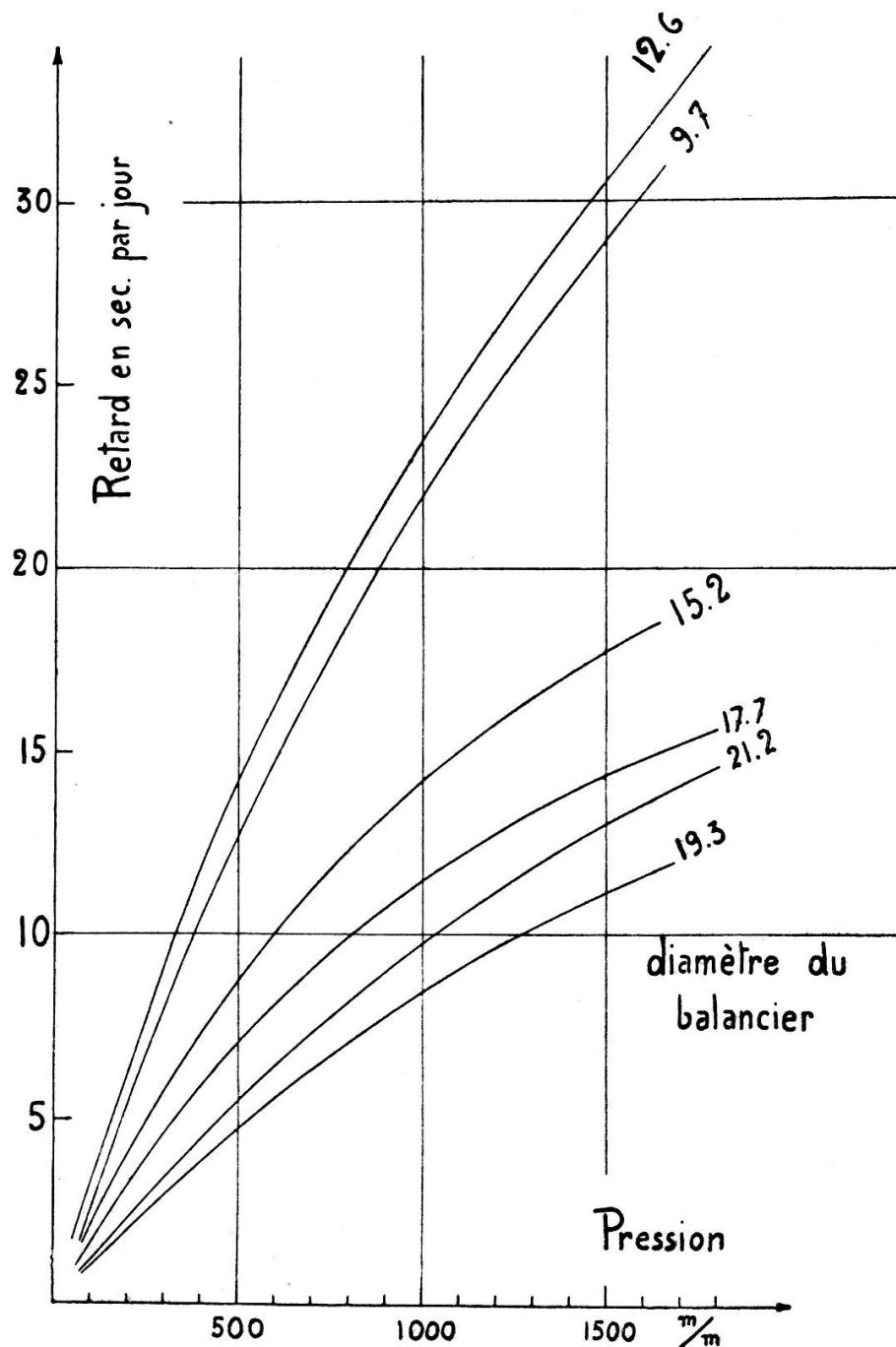


Fig. 6.

mais nous retrouverons une anomalie semblable en parlant des balanciers de révolution. Une autre exception existe dans

l'intervention des courbes relatives aux balanciers de 12,6 et 9,7 mm.

Il n'est pas possible de représenter par un nombre l'effet de pression sur un balancier donné, comme ce serait le cas si la fonction était linéaire, ainsi qu'on l'a cru longtemps, et de calculer un coefficient exprimant le retard par mm de pression. A titre comparatif cependant j'ai déterminé sur les courbes de la figure 6 la valeur $\frac{dm}{dp}$ pour la pression moyenne de 725 mm, en menant la tangente au point d'abscisse 725. Il est visible que ce coefficient angulaire serait notablement plus grand aux faibles pressions, et plus petit aux fortes pressions.

Diamètre du balancier (extérieur de la serge)	Retard par mm de pression dans le voisinage de 725 mm
21,2	0,0083
19,3	0,0073
17,7	0,0090
15,2	0,0109
12,6	0,0187
9,7	0,0179

* * *

La seconde série de mesures a porté sur sept chronomètres munis de balanciers de types différents; les uns sont des balanciers compensés ordinaires, bimétalliques, munis de vis et coupés; les autres des anneaux sans coupure, reliés au pivot par un bras diamétral; le dernier enfin est un disque plein, muni sur son pourtour d'un renflement destiné à augmenter son moment d'inertie; il est entièrement de révolution. Ces montres sont aussi de construction différente.

Afin de pousser plus loin les courbes de pression, j'ai modifié le manomètre à air libre, dont la hauteur a été portée à trois mètres, et m'a permis d'atteindre des pressions de 4 atmosphères.

La figure 7 reproduit les courbes obtenues. Celles en trait plein se rapportent aux balanciers compensés et coupés; celles en pointillé aux balanciers non coupés et de révolution, ou à peu près (certains ont un bras diamétral). Voici le détail des

caractéristiques de ces balanciers; les numéros correspondent à ceux de la figure.

Nº	Genre	Diam. du balancier ¹	Grandeur du mouvement (diamètre)
1	bal. compensé	19,3 mm	54 mm
2	id.	14,8	41
3	id.	12,6	32
4	id.	7,5	21
5	disque fer doux entièrement de révolution	21,8	54
6	anneau non coupé nickel	17,0	54
7	id.	16,7	41

L'inspection de la figure 7 appelle d'emblée certaines remarques.

Tout d'abord l'incurvation des courbes se retrouve partout, sauf pour la montre n° 4 qui, par exception, donne un graphique linéaire. Il est évident que, par hasard, le défaut d'isochronisme est tel que l'effet secondaire (variation d'amplitude) se combine avec l'effet primaire de pression pour redresser la courbe. Comme il s'agit d'une montre de très petites dimensions, il n'y a rien d'extraordinaire à trouver une anomalie pour l'effet global.

On voit de plus que, *grossost modo*, les courbes se classent, de bas en haut, dans le sens des diamètres de balancier décroissants; mais les exceptions sont importantes et paraissent systématiques: les balanciers pleins, de révolution et non coupés, sont placés trop haut, c'est-à-dire que l'effet de pression est sur eux plus considérable que pour les balanciers compensés et munis de vis, de même diamètre. En outre, l'incurvation est plus prononcée pour ces balanciers pleins, et les courbes pointillées, qui y sont relatives, coupent toutes des courbes continues. La courbe 5 qui présente au maximum ce caractère, se rapporte au balancier entièrement de révolution, en forme de disque muni d'un renflement sur le pourtour, donc à celui qui s'écarte le plus, quant à sa structure, du balancier ordinaire.

¹ Pour les balanciers compensés, le diamètre est celui de l'extérieur de la serge.

compensé. Il est surprenant de voir que l'air a une influence plus grande sur un balancier sans aspérités, qui semblerait

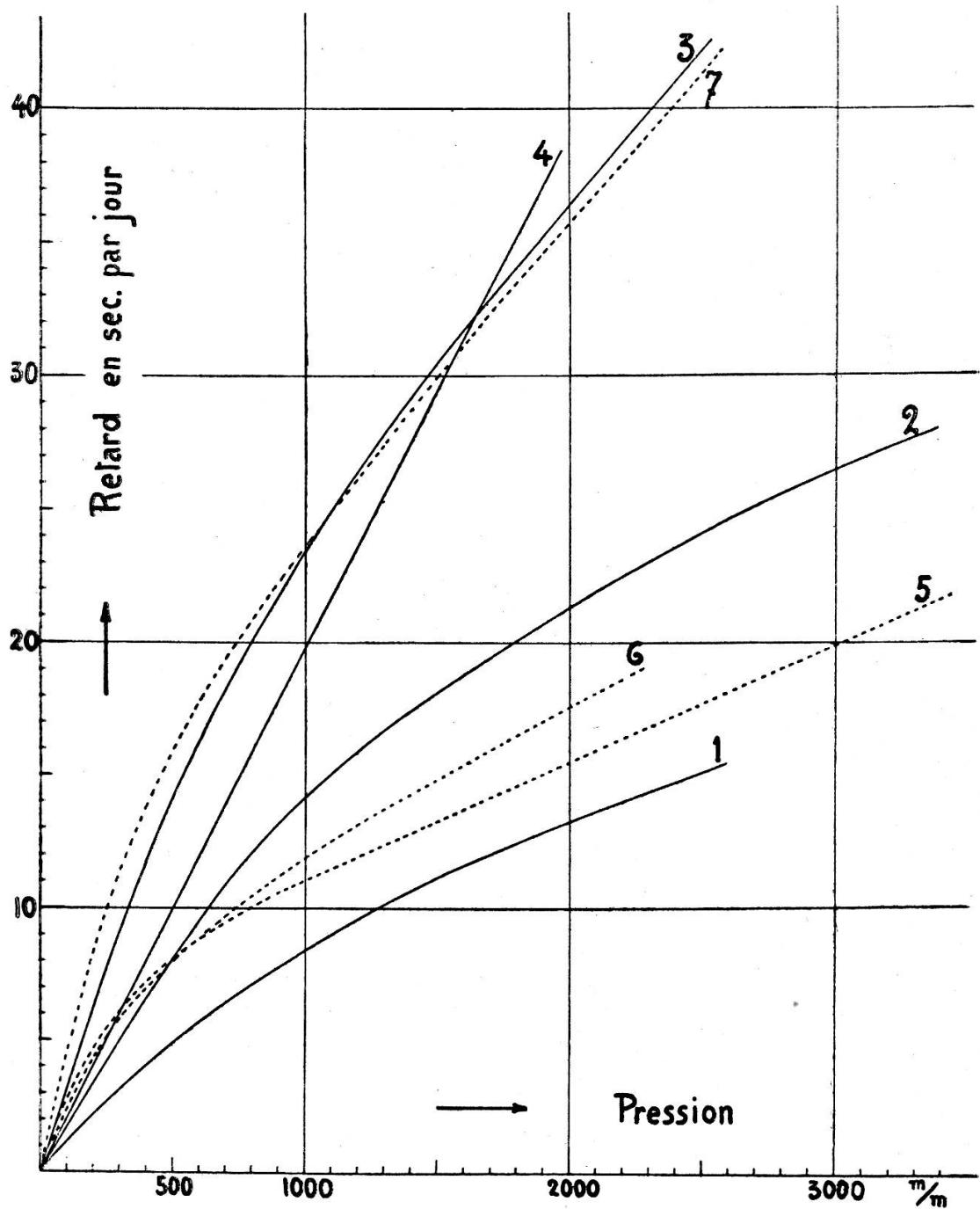


Fig. 7.

donc ne pas offrir de prise, sauf par la seule viscosité, et moindre sur un balancier muni de vis sur son pourtour. Peut-

être faut-il faire intervenir, pour expliquer cette différence, la force centrifuge agissant sur le balancier coupé (et non sur l'air entraîné, cette fois); aux faibles pressions, donc aux grandes amplitudes, cette force centrifuge a le maximum d'effet, et tend à augmenter le moment d'inertie, donc à faire retarder la montre; les points relatifs aux faibles pressions se trouveraient ainsi relevés, et la courbe redressée quelque peu. Cet effet secondaire n'affecte naturellement pas un balancier plein. Resterait encore à expliquer la grande incurvation, aux basses pressions, des courbes pointillées. Je crois qu'il faut attendre de nouveaux éléments expérimentaux avant de tenter une explication.

Une remarque, en passant, à propos de la courbe 5; c'est celle qui présente le minimum de certitude. Les montres 6 et 7, à balancier annulaire non coupé, étaient munies de spiraux d'élinvar, et ne présentaient pratiquement pas de coefficient thermique; du moins les variations de température de quelques dixièmes de degré qui se produisent durant la journée nécessaire à l'étude des pressions sont-elles sans effet appréciable. La montre N° 5 au contraire, un chronomètre de bord de la meilleure construction, avait été muni, en vue d'une recherche spéciale, d'un balancier en forme de disque et d'un spiral d'acier; elle n'était donc pas du tout compensée, et sa marche variait de 11 secondes par degré. J'ai été obligé, pour l'étude aux différentes pressions, de maintenir la température constante au moyen d'un thermostat spécial, mais des variations de l'ordre du dixième de degré ont pu passer inaperçues.

Enfin une remarque générale est la suivante: la courbure des courbes diminue lorsque la pression augmente; au-dessus de 1000 à 1200 mm, elles deviennent presque des droites. C'est un phénomène que j'ai remarqué sur plusieurs autres graphiques non reproduits dans ce travail.

Pour terminer, voici les coefficients moyens de l'effet de pression, $\frac{dm}{dp}$, se rapportant à la pression de 725 mm, que l'on déduit des courbes de la figure 7. Les remarques faites plus haut à propos de la figure 6 subsistent entièrement au sujet de l'emploi de ces coefficients.

N° de la montre	Variation de marche pour 1 mm de pression
1	0,0073 seconde
2	0,0127 »
3	0,0187 »
4	0,00197 »
5	0,0062 »
6	0,0080 »
7	0,0144 »

Il est assez remarquable que, pour les montres de fort calibre, comme les chronomètres de bord et les chronomètres de poche, le coefficient de l'effet de pression soit voisin de celui relatif aux régulateurs astronomiques; ce dernier est en effet de l'ordre de 0,008 et 0,015 seconde/mm. Le phénomène qui lui donne naissance est cependant notablement différent.

* * *

RÉSUMÉ.

L'influence de l'atmosphère gazeuse dans laquelle se meut le balancier est double; l'effet primaire ou direct consiste dans l'entraînement partiel de cette atmosphère, qui produit une augmentation d'inertie dépendant de la densité ρ et de la viscosité η du gaz; l'effet indirect ou secondaire provient du frottement qui diminue l'amplitude des oscillations et fait apparaître les défauts d'isochronisme.

J'ai étudié pour une montre l'effet de ces divers facteurs en observant successivement: l'influence de la pression sur la marche (fig. 1); l'influence de la pression sur l'amplitude des oscillations (fig. 2 et 3); l'isochronisme (fig. 4). Les deux premières études ont porté sur l'air, l'anhydride carbonique et l'hydrogène.

Les expériences concernant l'effet de la pression sur l'amplitude ont conduit à des résultats intéressants, du point de vue de la physique, notamment aux très basses pressions, et dans le cas de l'hydrogène.

De cette série d'essais on déduit l'effet primaire; il est proportionnel au produit $\eta\rho$ de la viscosité par la densité du milieu

gazeux (fig. 1, courbes pleines). La température n'agit pratiquement pas sur l'effet de pression, par suite d'une compensation: lorsque la température s'élève, la densité du gaz diminue, à pression constante, et sa viscosité augmente; le produit reste à peu près constant (fig. 5).

J'ai ensuite mesuré l'effet de la pression sur la marche pour une série de montres de dimensions et de types différents (fig. 6 et 7) entre 15 mm et 3000 mm de mercure, soit entre 0 et 4 atmosphères.

Toutes les courbes représentatives sont notablement incurvées (à une exception près, due à un hasard de construction); aux hautes pressions, l'incurvation diminue et la variation est presque linéaire.

L'effet de pression est, *grossost modo*, d'autant plus grand que le balancier est plus petit. Avec les balanciers non coupés et sans vis, l'effet est augmenté, contrairement à ce qu'on aurait attendu, et l'incurvation de la courbe plus prononcée.

Il est impossible de prévoir *a priori* un coefficient de l'effet de pression pour une montre de type donné; la courbe doit être déterminée dans chaque cas. Je donne quelques exemples de ces coefficients, se rapportant à la pression de 725 mm. Ils oscillent entre 0,006 et 0,02 secondes par mm de pression.

Mai 1926.

*Institut de physique,
Université de Neuchâtel.*
