

## Un Accéléromètre Capillaire

par

Mishio ISHIMOTO

### 毛細管加速度計

所員 石本巳四雄

#### 梗概

地震動の建築物其他に及ぼす影響を研究するにはその運動が與へる加速度を知る事が第一に必要である。加速度を目的として直接これを測定する器械は大別して二つの原理に據るものであるが、第一類は空中に放出せられた物體の劃く經路に注意して目的を達するものである。第二類は振動體の固有振動周期を極めて短かくして加速度によつて極めて僅かの變位を爲すのを測定するものである。勿論この變位は極めて僅かであつて、その固有振動周期の自乗に比例して減少するものであるから、これを如何にして擴大するか問題となり、電氣的方法によるもの、器械的方法によるもの等が考案されてある。著者は毛細管を用ひて振動體の極めて僅かの變位を測定する器械を製作し實驗したのである。

第一圖は水平加速度を測定する目的のために製作された器械の模型圖であるが、比較的大なる質量 ( $M$ ) が二つのゴム製パッキング ( $b_1, b_2$ ) を隔て二つの金屬板  $P_1, P_2$  によつて壓せられてある。 $P_2$  の中心には穴を穿つてこれが毛細管  $T$  に通じて居る。 $M, b_2$  及び  $P_2$  による空間は成る可く小にするために別の金屬板  $P_3$  が挿入され  $P_2$  に固着してある。鉤  $c$  は静力及び彈性絲による試験に役立つものである。毛細管  $T$  の一部分は極めて細くしてある爲め、この振動體の固有振動が完全に減衰され、他の部分は比較的太く此所に少量の液體が置かれる。勿論管は極めて僅か傾斜して居るのでコック  $R$  を開く時には液體は安定の位置に止る。この液體の運動は顯微鏡對物レンズにより擴大され寫眞装置によつて記録されるものであるが、 $T$  の右方に置いてある光源の光束が、この液體面の反射によつて生ずる光點を利用するのが便利である。

質量  $M$  は  $b_1, b_2$  によつて力を受けて居るので固有振動周期を有つが、その周期は計算上 0.014 秒である。なほこの器械に單弦運動による力が與へられるとして計算した結果は實驗上求めた値とよく合ふ。毛細管中の液體は  $M, b_2$  及び  $P_2$  による空間のために固有振動を有つが、それも計算によれば 0.032 秒であり、然もその振動は毛細管の細い部分で完全に減衰されて居るのである。液體は種々の條件の下にてヘプタンが最も適當である事が云へる。

第一實驗は鉤  $c$  に重さによる力を與へ液體の動きが測定されたがこれは計算と等しい値を出して居る。第二實驗は  $c$  に彈性を有する絲の一端を附し適當の張力を與へその他端には周期を異にした等振幅を與へて試験したのである。(第三圖) 0.5 秒附近迄は感度が一定であり乍らそれ以下は急に減少する。これはこの器械に自己振動が存在する事に歸因する事が出来、理論的にもこの現象は容易に説明出来る。第三實驗は四本の木の棒にて吊

された振動臺上に加速度計を乗せ、この臺が單弦運動をする。周期は木棒の長さを變ずる事及び彈性力を附加する事に由つて 1.96 秒から 0.38 秒迄得られた。この臺が自己振動により次第に振幅が減ずるのを觀測して數本の直線を得たが（第六圖）これは理論的によく合ふ。この圖から臺の振幅は一定にし、その周期によつて加速度計の振れの變化を見たが周期の大なる中は理論的の値とよく一致するに反し、周期が小となるに従つて多少の差異を生ずる。（第七圖）然るに第二實驗の結果を補正として顧慮する時には實驗上得たものとよく合ふ故、これは同じく自己振動に依る欠陥である事が證明される。第四實驗は同じく振動臺上に加速度計を置きモートルを用ひて振動が興へられたが、これから得た結果は第七圖に得たものと等しいものであつた。

以上は水平加速度計に就いてのみ行はれた實驗であるが上下加速度計に於いても第一、第二實驗は容易に行はれその結果も同様の値を得て居る。上下振動臺の製作の困難のために全く動力的の試験が終了してないが水平動の時の結果より見てもこの上下加速度計は實際の測定に適應して正しい値を指示する事は信じて疑はないものである。

## 1. Introduction.

Quand on veut étudier la résistance des bâtiments, des ponts, des digues, etc., pendant un tremblement de terre, on a besoin d'étudier surtout la force ou bien l'accélération provenant du mouvement sismique. Les séismographes les plus employés sont basés sur le principe de l'enregistrement du déplacement ou de la vitesse des mouvements sismiques tandis que l'on compte très peu d'instruments mesurant directement l'accélération.

Bien que chaque accéléromètre ait son caractère particulier, on peut néanmoins partager ce genre d'appareils en deux classes. Ceux de la première classe sont basés sur l'étude de la trajectoire d'un objet qui est lancé dans l'espace. Cette trajectoire est enregistrée photographiquement et elle détermine la vitesse ou l'accélération de ce système. Parmi les instruments appartenant à cette classe, on compte l'accéléromètre à jet de mercure<sup>1)</sup> et l'accéléromètre à flamme.<sup>2)</sup> Néanmoins, la réalisation de ces instruments se heurte à de telles difficultés que la perfection n'en a pas encore été annoncée, malgré la simplicité de leur théorie.

Ceux de la deuxième classe sont des instruments comportant un système vibrant, c'est-à-dire qu'ils comprennent une masse et une matière élastique donnant la force restitutive. La période de ce système est petite par rapport aux variations de la force appliquée et sous l'action de cette dernière la masse

1) J. Hartman : Phil. Mag. No. 18, 1927.

2) K. Prytz : Journ. de Phys. et Rad. No. 6, 1923.

se déplace un peu, provoquant la déformation de la matière élastique. Cette déformation est certes assez petite pour que l'on soit obligé de la mesurer par un procédé capable de l'amener à une valeur convenable. Dans cette deuxième classe, nous avons l'appareil du Prince Galizine qui utilise les propriétés piézo-électriques du quartz;<sup>1)</sup> le séismographe accélérométrique du Prof. T. Tamaru<sup>2)</sup> et l'appareil utilisant les variations de capacité électrique dues à la déformation d'une membrane du Prof. J. Obata,<sup>3)</sup> etc. Tous ces instruments sont construits avec une période propre petite par rapport aux variations de la force appliquée.

Si l'on désigne par  $y$  le déplacement relatif de la masse dans cet instrument, l'équation générale des mouvements sous l'action d'une force périodique sera de la forme

$$(1) \quad \frac{d^2y}{dt^2} + 2\kappa \frac{dy}{dt} + p^2y = f \sin nt$$

qui a pour solution

$$(2) \quad y = A \sin (nt + \delta) + \text{terme d'oscillation propre}$$

$$\text{où} \quad A = \frac{f}{\sqrt{(p^2 - n^2)^2 + 4\kappa n^2}}, \quad \text{tg } \delta = \frac{2\kappa n}{p^2 - n^2}$$

en posant la condition  $n$  infiniment petit par rapport à  $p$  et rejetant le terme d'oscillation propre, on a

$$(3) \quad y = \frac{1}{p^2} f \sin nt, \quad \delta = 0$$

Remplaçons  $p$  par  $\frac{2\pi}{T_0}$ , où  $T_0$  est la période propre de ce système. Comme on le voit dans l'équation (3), la force appliquée est déterminée par le déplacement de la masse, lequel diminue avec le carré de  $T_0$ . Par conséquent, tout en réduisant que possible la période de l'accéléromètre, il faut d'autre part chercher quelque moyen qui puisse correctement amplifier le déplacement de la masse. Il est très difficile de réaliser cette amplification mécaniquement; cela tient à l'emploi d'un certain nombre de tiges dont chacune deviendrait la source de vibrations et l'enregistrement de l'amplification du déplacement de la masse deviendrait incorrect. Si l'on emploie la méthode électrique, il est possible

1) B. Galizine : Proc. Roy. Soc. No. A 673, 1919.

2) T. Tamaru : Proc. Imp. Acad. of Japan. Vol. III No. 1, 1927.

3) J. Obata : Proc. Phys-math. Soc. of Japan 3rd Ser. Vol. 9, No. 5 1927.

d'avoir une amplification mesurable; mais les phénomènes électrostatiques s'accompagnent toujours de pertes sensibles et l'observation sera douteuse surtout si le mouvement est lent. L'emploi de la lampe à trois électrodes se heurte aux mêmes difficultés.

Ce que l'on considère, cependant, comme le défaut des instruments de la deuxième classe est qu'il existe une période propre du système. Quand la force appliquée n'est pas continue, comme c'est le cas pour les chocs ou les explosions, le système va osciller avec la période propre que l'on voit dans l'équation (2). Pour éviter ce phénomène, il est nécessaire de le faire amortir complètement. On a donc les conditions suivantes pour construire un accéléromètre de la deuxième classe : a) il faut diminuer la période propre par rapport aux variations de la force appliquée; b) comme conséquence de la diminution de la période propre, il faut choisir un procédé capable d'amplifier correctement la déformation; c) l'amortissement de l'oscillation propre doit être suffisant pour qu'il ne subsiste aucune trace de l'oscillation propre même en cas d'application de force discontinue. Avec ces trois conditions, j'ai essayé de construire un accéléromètre comportant un tube capillaire.

## 2. Construction et calculs.

Il y a deux types de cet accéléromètre: l'un pour mesurer l'accélération verticale et l'autre pour mesurer l'accélération horizontale. Les expériences que j'ai exécutées ont porté principalement sur le type horizontal: l'aspect général de l'instrument est représenté schématiquement par la figure 1.

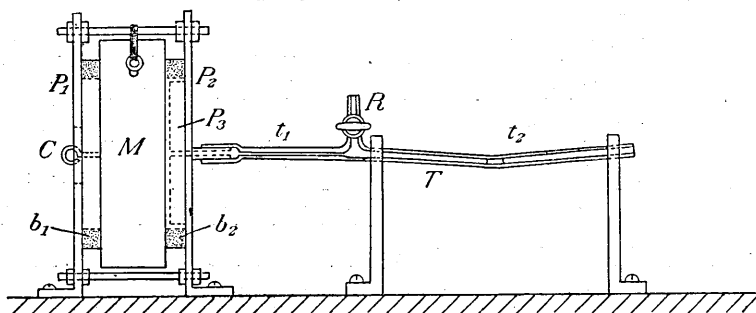


Fig. 1.

Une masse de plomb  $M$  placée entre deux bourrelets de caoutchouc  $b_1$ ,  $b_2$ , est comprimée indirectement par deux plaques de métal  $P_1$ ,  $P_2$ , au moyen de

4 boulons. Il y a une petite ouverture au centre de la plaque  $P_2$ , ouverture qui communique avec le tube capillaire  $T$ . Pour avoir un espace d'air minimum compris entre  $M$ ,  $b_2$  et  $P_2$ , une autre plaque  $p_3$  percée également d'une ouverture en son centre est fixée sur la face intérieure de  $P_2$ . Un crochet fixé sur l'autre face de la masse sera employé pour l'étalonnage statique ou l'étalonnage exécuté avec un fil élastique tendu.

Une partie du tube capillaire  $t_1$ , située le plus près de la masse  $M$ , est laissée assez étroite, afin d'agir comme amortisseur d'air. L'autre portion du tube  $t_2$ , où l'on dispose un liquide, n'est pas si étroite (2,5 mm de diamètre) et elle est très peu inclinée afin d'avoir une position d'équilibre pour le liquide. Par l'ouverture d'une robinet  $R$ , les pressions sur les deux côtés du liquide deviennent égales et celui-ci se place en position d'équilibre. Comme le mouvement du liquide est observé par l'objectif d'un microscope et un appareil d'enregistrement photographique, il est préférable d'avoir un point image clair dans un champ sombre. Disposant une source lumineuse au bout du tube  $T$ , le faisceau de lumière pénètre dans le tube jusqu'au liquide, en supposant le faisceau parallèle. La surface de liquide sera considérée comme un parabolôïde par suite de la tension superficielle. Elle réfléchira la lumière en donnant un point lumineux qui se déplace toujours avec le liquide. A l'autre extrémité du liquide, on observera aussi un point lumineux réfléchi totalement par la surface du parabolôïde et bien que son image ne soit pas rigoureusement un point, elle a plus d'intensité et elle est plus avantageuse pour enregistrer les déviations du liquide.

Or comme la masse  $M$  est comprimée par deux bourrelets de caoutchouc, elle a une période propre représentée par la formule suivante:

$$(4) \quad T_0' = 2\pi \sqrt{\frac{MH}{2EA}}$$

où  $E$ : module de Young du caoutchouc.

$H$ : épaisseur du caoutchouc.

$A$ : aire sectionnelle du caoutchouc.

$M$ : masse de plomb.

Dans le cas pratique, j'ai  $E=2,1 \times 10^7$  dyne/cm<sup>2</sup>,  $H=1$  cm,  $A=23,5$  cm<sup>2</sup> et  $M=4,9$  kg: et si l'on met ces valeurs dans la formule (4), on a

$$T_0' = 0,014 \text{ sec.}$$

C'est une valeur assez petite par rapport à la période du mouvement sismique, laquelle atteint plus d'une seconde.

La sensibilité de cet instrument depend: 1° du degré de déformation du caoutchouc sous l'action de la force appliquée 2° du rapport des aires sectionnelles intérieures du bourrelet et du tube capillaire 3° de l'amplification optique. Si l'on appelle  $h$  la variation d'épaisseur du caoutchouc sous l'action de la force appliquée  $f$ , on a

$$(5) \quad h = \frac{fH}{2EA}$$

Remplaçant les lettres par les valeurs des constantes,

$$(5)' \quad h = 1,01 \times 10^{-9} f$$

Supposons que le mouvement sinusoïdal représenté par

$$(6) \quad \xi = a_0 \sin \frac{2\pi}{T} t$$

produit la force; nous avons

$$(7) \quad f = M \frac{d^2\xi}{dt^2} = -M \cdot \frac{4\pi^2 a_0}{T^2} \sin \frac{2\pi}{T} t$$

et si l'on pose  $T=1$  sec.  $a_0=2,5$  mm  $M=4,9$  kg. dans la formule (7), on a

$$f_{max} = 4,83 \times 10^4 \text{ dynes}$$

Le diamètre intérieur du bourrelet étant 10 cm. et celui du tube capillaire 2,5 mm, le mouvement du liquide  $h'$  provoqué par cette force sera

$$h' = 0,782 \times 10^{-1} \text{ cm.}$$

en supposant l'air incompressible. On peut permettre cette amplification par suite du rapport de la masse de plomb et la masse du liquide étant suffisamment grand.

Le grandissement de l'objectif est 5, et nous aurons finalement comme déviation de l'accéléromètre:

$$(8) \quad h'' = 3,92 \text{ mm.}$$

Dans tous les cas la sensibilité de cet accéléromètre sera représentée pour le déplacement périodique:

$$(9) \quad h'' = \frac{MH}{2EA} \frac{d^2\xi}{dt^2} \frac{s_1}{s_2} \cdot N = \frac{T_0'^{1/2}}{4\pi^2} \frac{d^2\xi}{dt^2} \frac{s_1}{s_2} \cdot N$$

où  $s_1, s_2$ : les deux aires intérieures respectives du bourrelet et du

tube capillaire.

$N$ : grandissement de l'objectif.

Il semble *a priori* possible d'augmenter la sensibilité de cet instrument; mais 1° il n'est pas possible d'augmenter  $T_0'$ , la période propre devant rester petite, 2° augmenter  $s_1/s_2$  est aussi impossible, nous expliquerons plus loin pourquoi, 3° en augmentant  $N$ , on grandit l'image obtenue sur la pellicule photographique, ce qui n'est pas avantageux. Pour ces raisons, je crois qu'il est difficile d'avoir un accéléromètre de ce type ayant une plus grande sensibilité.

Il y a encore une partie vibrante dans cet instrument: c'est à cause de l'espace d'air compris entre la masse et le liquide. J'ai déjà fait observer qu'il faut diminuer l'espace d'air dans cet instrument autant que possible et de plus qu'il faut laisser l'aire sectionnelle du tube capillaire, où se trouve le liquide, assez grande. Ces conditions sont nécessaires pour avoir une période de système aussi petite que possible. Bien que cette période soit petite, elle ne peut cependant être négligée pour avoir un accéléromètre ayant une sensibilité uniforme pour toutes les périodes et il est nécessaire d'avoir une partie de tube capillaire assez étroite pour que la variation du système soit complètement amortie. Naturellement la viscosité du liquide intervient plus ou moins, mais le diamètre de la partie du tube où se trouve ce liquide étant assez grand, la viscosité ne joue pas un rôle important.

L'équation qui déterminera le mouvement de ce système sera

$$(10) \quad \rho\pi R^2 L \frac{d^2x}{dt^2} + k \frac{dx}{dt} + \frac{\pi^2 R^4 p_0 \gamma}{v_0} x = 0$$

où  $L$ : longueur du liquide dans le tube.

$\rho$ : densité du liquide.

$R$ : rayon intérieur du tube.

$p_0$ : pression atmosphérique.

$v_0$ : volume de l'espace d'air.

$\gamma$ : rapport des deux chaleurs spécifiques de l'air.

Négligeant l'effet de la viscosité du liquide et pour simplifier les résultats, on a supposé que la variation de pression aux deux extrémités de la portion où le tube est plus étroit, n'est pas grande. Dans cette supposition, l'air est considéré comme un fluide incompressible et on pourra appliquer la formule suivante:

$$(11) \quad k = 8\pi l \eta \cdot \frac{R^2}{r^2}$$

où  $l$  : longueur de la partie étroite du tube.

$r$  : rayon intérieur de cette partie.

$\eta$  : viscosité de l'air.

Choissant des valeurs convenables de  $l$  et  $r$ , on pourra rendre ce système aperiodique.

Or, de l'équation (10), on déduit la période  $T_0''$  de ce système en négligeant le terme d'amortissement :

$$(12) \quad T_0'' = 2\pi \sqrt{\frac{\rho L v_0}{\pi R^2 \rho_0 \gamma}}$$

Pour avoir  $T_0''$  aussi petit que possible, il faut que  $\rho$ ,  $L$  et  $v_0$  soient petits et  $R$  grand comme je l'ai fait remarquer plus haut. Or si l'on pose  $\rho=0,7$ ,  $L=0,5$  cm,  $R=1,25$  mm,  $v_0=5,0$  cm<sup>3</sup>,  $\rho_0=10^6$  c.g.s. et  $\gamma=1,4$  dans (12), on aura

$$(13) \quad T_0'' = 0,032 \text{ sec.}$$

Cette valeur est également assez petite par rapport à la variation de mouvement considérée. Quant au coefficient d'amortissement de (11), il me semble, dans le cas pratique, qu'on peut faire amortir ce système en essayant des tubes de différents diamètres, bien que la formule soit insuffisante.

Pour le choix du liquide on a les quatre conditions suivantes: a) la densité doit être petite, b) la viscosité doit être petite, c) pas de solidification, ni d'évaporation à la température ordinaire, d) il ne doit pas se transformer à la longue. Parmi les liquides ne se transformant pas avec le temps, j'ai choisi ceux dont la viscosité est petite.

Tableau I.

liquide	viscosité (0°c)	température de solidification	température d'ébullition	densité (20°c)
Pentane	0,00283 c.g.s.	-200° c.	36,2 c.	0,626
Ether	286	-123,3	34,6	714
Hexane	396	- 94,3	69,0	660
Heptane	519	- 97,1	98,4	684

Dans ce tableau, on peut choisir l'heptane comme remplissant le mieux les conditions exigées et toutes les expériences sont exécutées avec ce liquide.



Quant à la viscosité, on constate qu'elle ne joue pas un grand rôle dans l'amortissement du système pour des valeurs de cet ordre de grandeur.

### 3. Expériences.

J'ai essayé de connaître les caractéristiques de cet accéléromètre. La première expérience est exécuté dans le cas d'une force statique. Au crochet *c* (Fig. 1.) j'ai attaché un fil de soie transmettant l'effet de la force statique de pesanteur par l'intermédiaire d'une poulie. Comme le montre la figure 2, les

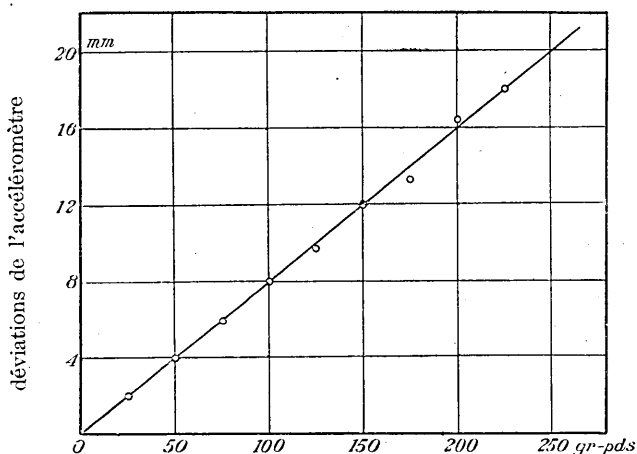


Fig. 2.

déviations du liquide sont proportionnelles à l'intensité de la force appliquée et elles atteignent presque 4 mm. pour la valeur d'accélération de  $\frac{1}{100}$  de g.

Quand la déviation du liquide devient suffisamment grande, elle ne parvient pas immédiatement à sa dernière position à cause de la viscosité. Pour avoir une valeur théorique de la déviation du liquide en fonction de la force statique, on aura une équation dérivée de (9):

$$(14) \quad h'' = \frac{mgH}{2EA} \cdot \frac{s_1}{s_2} N$$

où *m* est la masse ajoutée pour donner la tension au fil. Si l'on pose *m* = 50 gr dans (14), on a

$$(15) \quad h'' = 4,0 \text{ mm.}$$

qui coïncide très bien avec le résultat de l'expérience représentée par la figure 2.

La deuxième expérience est exécutée à l'aide d'un fil élastique de caoutchouc dont une extrémité est attachée au crochet *c*. A l'autre extrémité du fil j'ai

provoqué un mouvement sinusoïdal à amplitude constante et de différentes périodes. J'ai, naturellement, laissé la tension de ce fil assez grande pour que la période propre du fil soit petite par rapport à la période appliquée. Par conséquent la masse recevra la même amplitude de forces ayant des périodes différentes. Grâce à cette méthode, J'ai obtenu facilement une courbe d'étalonnage qui est presque horizontale dans la région considérée. (Fig. 3)

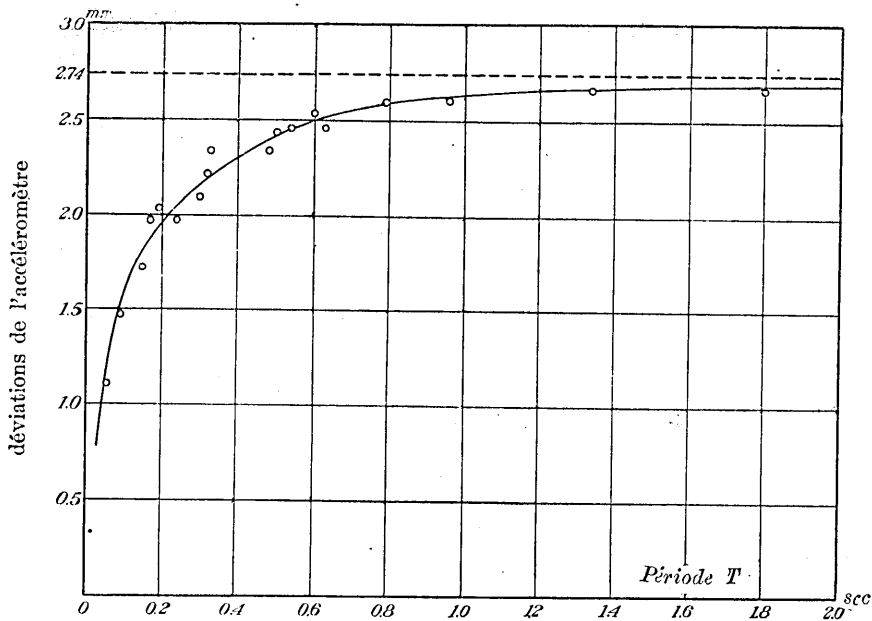


Fig. 3.

J'ajouterai que cette courbe d'étalonnage coïncide bien avec celle résultant d'une expérience exécutée sur une plate-forme oscillante jusqu'à 0,3 sec. de période, bien que cette méthode d'étalonnage ne corresponde pas exact aux cas pratiques surtout la période diminue. Au commencement de cette expérience, cependant, je n'ai pas mis de partie étroite au tube capillaire et la courbe trouvée était telle qu'il existe une sensibilité maxima correspondant à la période propre. On en conclut que la viscosité du liquide n'intervient pas beaucoup pour faire amortir ce système.

Cette courbe d'étalonnage montre que la sensibilité demeure presque constante jusqu'à 0,5 sec. de période, tandis qu'elle diminue brusquement quand la période approche de zéro. Ceci provient, naturellement, de la propriété du système vibrant et même la solution de (2) ou l'oscillation forcée de (10) donne

aussi ce caractère. Le phénomène de diminution de sensibilité en approchant de zéro est parfaitement rigoureux comme un phénomène naturel. D'autre part, si la sensibilité est constante jusqu'à zéro, l'accéléromètre enregistrera principalement les forces de période presque nulle. Cela tient à ce que l'amplitude de l'accélération est représentée par  $\frac{4\pi^2 a_0}{T^2}$  et elle devient infinie pour  $T=0$ , quel que soit  $a_0$ . D'ailleurs tout système qui a sa période propre, donne une courbe de ce genre sous l'action d'une force périodique. De l'équation (2), on a pour l'amplitude d'oscillation de la masse de ce système:

$$A = \frac{f}{\sqrt{(p^2 - n^2)^2 + 4\kappa^2 n^2}}$$

posant  $\frac{n}{p} = q$  et  $\frac{\kappa^2}{p^2} = S$  comme nouveaux paramètres, on a

$$(15) \quad A = \frac{f}{p^2} \frac{1}{\sqrt{(1 - q^2)^2 + 4Sq^2}}$$

et  $\frac{1}{q} = \frac{T}{T_0}$

On aura donc la figure 4, ayant  $\frac{T}{T_0}$  pour abscisses et  $\frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{T_0^2}{T^2}\right)^2 + 4S \frac{T_0^2}{T^2}}}$

pour ordonnées. On obtient une série de courbes en changeant la valeur de  $S$  et on a une courbe convenable pour  $S = \frac{1}{2}$ . La diminution de sensibilité quand

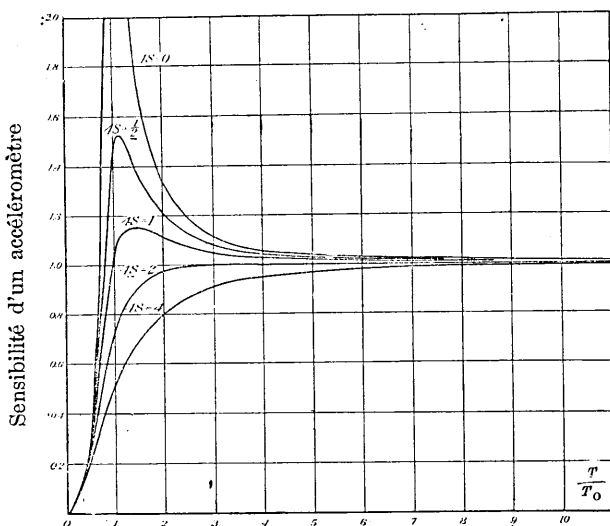


Fig. 4.

$\frac{T}{T_0}$  approche de zéro se présente de la même façon pour toutes les courbes

quel que soit le degré d'amortissement. Ces phénomènes s'observent dans le cas de cet accéléromètre. Précédemment, j'ai fait remarquer qu'il y a deux systèmes d'oscillation propre: l'un est l'oscillation de la masse avec le caoutchouc et l'autre est l'oscillation du liquide avec un espace d'air. Cependant quand on amortit la dernière avec un amortisseur d'air, la première est amortie aussi par du fait que sa période propre est plus petite.

La troisième expérience est faite sur une plate-forme suspendue par quatre tiges de bois, et on change la période en faisant varier la longueur de ces tiges. Pour vérifier que la déviation de l'accéléromètre est proportionnelle à l'amplitude des déplacements demeurant dans la même période, on observe la diminution de l'amplitude d'oscillation de la plate-forme.

Le déplacement de la plate-forme est enregistré au moyen d'une plaque de verre (à faces planes et parallèles) qui se trouve placée entre l'objectif et la pellicule photographique. Elle est inclinée à  $45^\circ$  et une source lumineuse est placée en dehors de la plate-forme perpendiculairement au mouvement de celle-ci. L'image de cette source et celle de la déviation du liquide sont enregistrées en même temps sur une pellicule photographique enroulée sur un tambour entraîné par un mouvement d'horlogerie. Par suite de l'existence de l'épaisseur de la plaque, on a deux images de déplacement enregistrées sur la

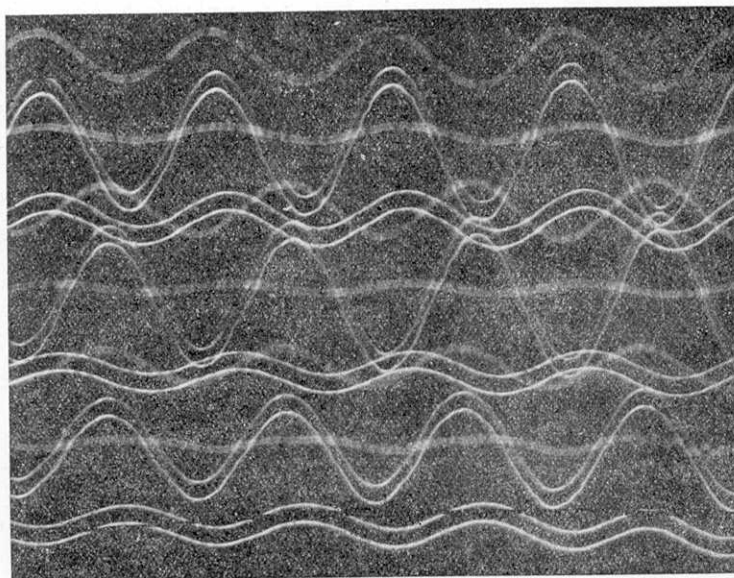


Fig. 5. ( $T=1,96$  sec.)

pellicule comme la montre la figure 5.

L'existence de l'inéquilibre des masses du régulateur d'horlogerie donne l'oscillation de force à l'accéléromètre. Bien que l'accéléromètre montre tel enregistrement de l'origine de ces conditions, on ne peut pas le considérer tout de suite l'indication d'accélération. C'est parce que cette période a une valeur comparable à la période propre d'accéléromètre. C'est, cependant, une vérification de l'existence d'une oscillation ayant ses amplitudes très petites. La figure 5 montre clairement ce phénomène.

En diminuant la longueur des tiges et en appliquant une force élastique, je suis parvenu à des enregistrements correspondant à des périodes 1,98 sec. jusqu'à 0,38 sec. D'après des enregistrements d'accélération exécutés par cette méthode, j'ai obtenu le diagramme figure 6 qui montre le rapport entre le déplacement et l'accélération.

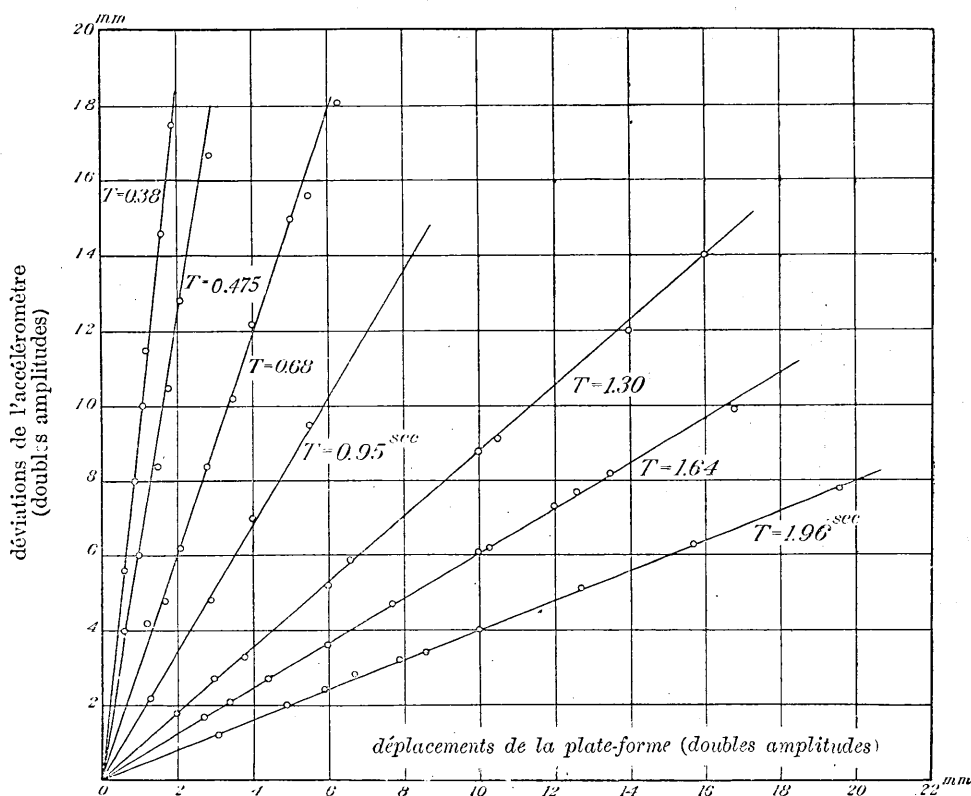


Fig. 6.

On voit dans celui-ci que la déviation de l'accéléromètre est toujours une

fonction linéaire de l'amplitude du déplacement. Pour connaître la relation entre la déviation et la période, j'ai recherché d'après la figure 6, la déviation qui correspond à 5 mm. de double amplitude de déplacement pour toutes les périodes et j'ai obtenu le tableau suivant:

Tableau II.

période ( $T$ )	$\frac{1}{T^2}$	déviation de l'accéléromètre pour 5 mm. de double déplacement de la plate-forme	calculs	différences	diff/calculs
1,96 sec.	0,261	2,0 mm.	2,1 mm.	0,1	0,05
1,64	0,372	3,0	3,0	0,0	0,00
1,30	0,592	4,4	4,7	0,3	0,06
0,95	1,11	8,5	8,9	0,4	0,05
0,68	2,16	15,0	17,3	2,3	0,13
0,475	4,43	30,5	35,5	5,0	0,14
0,38	6,93	46,0	55,3	9,3	0,17

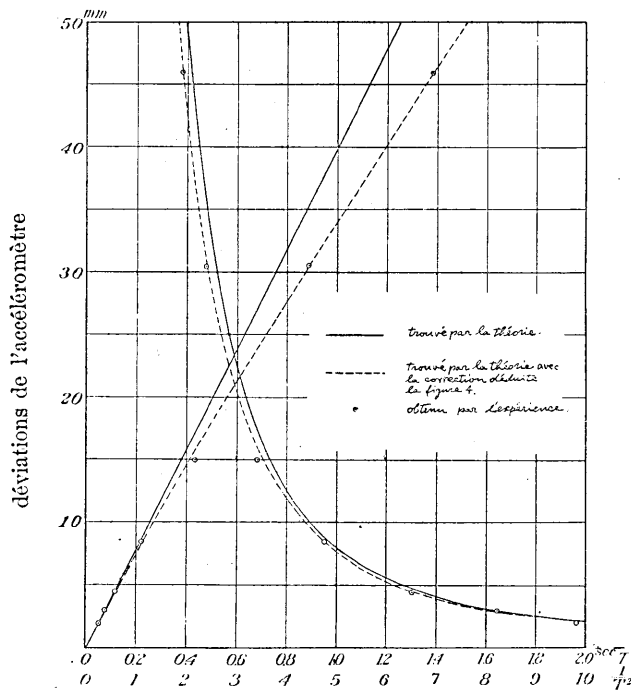


Fig. 7.

Dans le tableau on trouve une certaine différence entre la déviation établie par l'expérience et celle établie par le calcul. Cela tient à la diminution de

la sensibilité quand la période diminue et si l'on compare cette différence à la courbe de la figure 3, on observera que les chiffres concordent. J'ai représenté ces données dans la courbe de la figure 7. La déviation représentée par l'échelle de  $1/T^2$  correspond d'après le calcul à une ligne droite quand la période est grande; mais le fait qu'elle ne suit plus cette ligne droite lorsque la période diminue, est dû à la diminution de la sensibilité.

La quatrième expérience est faite avec une plate-forme que l'on fait osciller à l'aide d'un moteur. Cette plate-forme était posée sur quatre billes d'acier et les ébranlements étaient provoqués par une tige poussée directement par le moteur. Dans ce cas, cependant, bien que le déplacement paraisse devoir être représenté par une courbe sinusoïdale, les indications de l'accéléromètre n'ont pas ce caractère: il y a des rides qui se superposent à l'onde fondamentale, et dont les périodes sont différentes. Cela tient à deux défauts d'installation: l'un est l'imperfection mécanique de la connection de la tige avec le moteur qui comporte un certain jeu; et l'autre tient aux aspérités de la surface des rails où roulent les billes d'acier. Afin d'éviter ces conditions, j'ai introduit un ressort au milieu de la tige au moyen de laquelle le mouvement réciproque du moteur donne principalement la force à la plate-forme. Naturellement, le mouvement de celle-ci était sans à-coups et son amplitude d'oscillation diminuait avec sa période. Ceci convenait très bien à mes intentions; la déviation de l'accéléromètre conserve toujours la même amplitude quelle que soit la période. Mais comme il y a une période de résonance de la plate-forme dans le cas d'un ressort, j'ai ajouté un amortisseur à huile afin d'éviter de trop grandes amplitudes de résonance. Les résultats que j'ai obtenus par cette expérience coïncident bien avec ceux qu'on a trouvés par une autre méthode. De plus j'ai tenté de trouver s'il y avait quelque différence de phase entre le déplacement et la déviation; je me suis assuré, cependant, qu'il n'avait aucune différence entre les deux jusqu'à la période de 0,2 sec. qui était la limite de cette expérience. On a aussi des rides qui se superposent aux ondes principales et celles-ci sont remarquables surtout si le mouvement est lent.

Mes études ont porté jusqu'ici sur un accéléromètre d'un type destiné à mesurer les mouvements horizontaux. La construction d'un accéléromètre pour les mesures de mouvements verticaux est cependant plus facile. Il y a seulement un bourrelet de caoutchouc sur lequel est disposée une masse  $M$  (3kg.); les autres arrangements sont les mêmes que ceux de l'instrument horizontal.

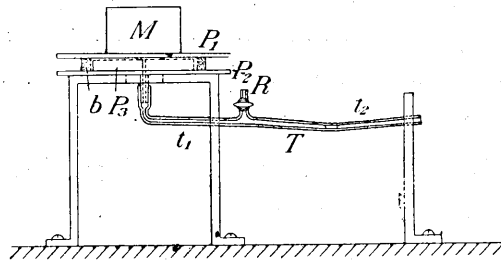


Fig. 8.

A cause de la difficulté de réalisation d'une plate-forme oscillant verticalement, je n'ai pas encore obtenus de résultats d'expérience faite sur des forces purement dynamiqués. Néanmoins, à la suite de l'expérience statique et de l'expérience faite avec un fil élastique tendu, j'ai pu m'assurer que la sensibilité de l'appareil est uniforme. Les deux expériences sont représentées par la figure 9 qui montre que l'appareil est sensible même pour une valeur d'un millièrne de l'accélération de la pesanteur, bien que sa période propre soit un peu augmentée.

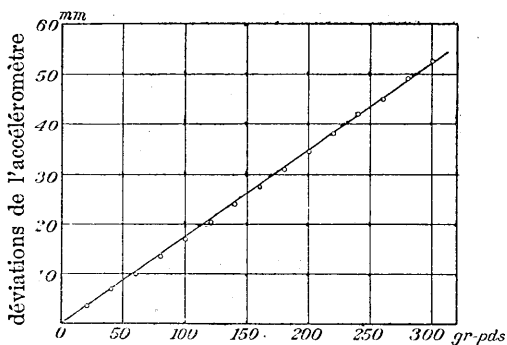


Fig. 9. a

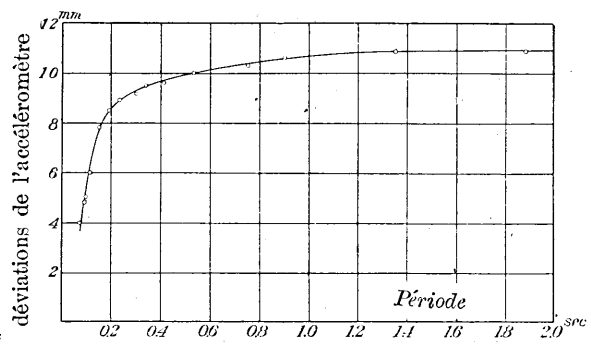


Fig. 9. b

#### 4. Remarques.

On constate que les variations de pression atmosphérique provoquent une certaine déviation du liquide. Ceci est dû à l'existence de l'espace d'air dans cet instrument. D'une part je l'ai rendu beaucoup moins sensible par la diminution de cet espace; d'autre part, je projette de construire un accéléromètre ayant un tube capillaire communiquant avec deux espaces situés des deux côtés de la masse. Il en résultera naturellement, quelques difficultés pour



---

l'étalonnage avec un fil élastique tendu, de l'éclairage du liquide par une source lumineuse, etc. Les applications de cet instrument ne se bornent pas à l'étude des phénomènes sismiques. Il y a d'autres problèmes, tels que ceux concernant les vibrations des trains, les ébranlements des bateaux, etc. pour lesquels cet accéléromètre pourra être utilisé et pourra donner d'intéressants résultats.

Pour terminer, je tiens à exprimer mes vifs remerciements à Monsieur le Professeur K. Suyehiro, directeur de cet Institut, dont les conseils m'ont été très utiles, ainsi que Monsieur le Sous-professeur S. Mizushima, dont les suggestions à propos du choix des liquides m'ont été infiniment précieuses.

Juillet 1927.

Institut de Recherches sur  
les Tremblements de terre,  
Université Impériale de Tokyo.

---