



(12) FASCICULE DE BREVET

- (11) N° de publication : **MA 35700 B1** (51) Cl. internationale : **G01C 9/00**
(43) Date de publication : **01.12.2014**

-
- (21) N° Dépôt : **35936**
(22) Date de Dépôt : **27.05.2013**
(71) Demandeur(s) : **UNIVERSITE MOULAY ISMAIL, MARJANE 2, BP:298 MEKNES (MA)**
(72) Inventeur(s) : **BRI Seddik**
(74) Mandataire : **Errakhi Rafik**

-
- (54) Titre : **Inclinomètre électromagnétique**
(57) Abrégé : Le dispositif proposé est un inclinomètre électromagnétique, constitué d'une poutre encastrée à une extrémité et dont l'extrémité libre est solidaire à une masse sismique, ce système mécanique permet la conversion des forces exercées sur la masse sismique dus au inclinaisons par rapport à l'horizontale, en des déplacements de l'extrémité libre de la poutre encastrés, à ce dispositif, est associé un circuit magnétique constitué de deux bobines plates, (l'une est solidaire à l'extrémité libre de la poutre et l'autre est placée sur un support fixe, les plans des deux bobines sont quasiment parallèles, la bobine réceptrice placée sur la partie mobile du système mécanique, permet la conversion des déplacements en tension via la bobine émettrice et le circuit de conditionnement, cette tension est affichée par un voltmètre numérique de précision 0.01mV. L'étalonnage de l'inclinomètre électromagnétique de 0° à 90°, nous permet son utilisation pour effectuer des mesures avec une précision $0.01^\circ < \Delta 0.04^\circ$. La gamme d'utilisation de cet inclinomètre est comprise entre 0° et 90°, les mesures sont reproductibles et les déformations de la poutre sont parfaitement réversibles dans cette gamme de mesures qui peut être élargie à un intervalle allant de 0 à 180°, en apportant des améliorations à ce dispositif.

Abrégé

Le dispositif proposé est un inclinomètre électromagnétique, constitué d'une poutre encastree à une extrémité et dont l'extrémité libre est solidaire à une masse sismique, ce système mécanique permet la conversion des forces exercées sur la masse sismique dus au inclinaisons par rapport à l'horizontale, en des déplacements de l'extrémité libre de la poutre encastree, à ce dispositif, est associé un circuit magnétique constitué de deux bobines plates, (l'une est solidaire à l'extrémité libre de la poutre et l'autre est placée sur un support fixe, les plans des deux bobines sont quasiment parallèles, la bobine réceptrice placée sur la partie mobile du système mécanique, permet la conversion des déplacements en tension via la bobine émettrice et le circuit de conditionnement, cette tension est affichée par un voltmètre numérique de précision 0.01mV.

L'étalonnage de l'inclinomètre électromagnétique de 0° à 90° , nous permet son utilisation pour effectuer des mesures avec une précision $0.01^\circ \leq \Delta\theta \leq 0.04^\circ$.

La gamme d'utilisation de cet inclinomètre est comprise entre 0° et 90° , les mesures sont reproductibles et les déformations de la poutre sont parfaitement réversibles dans cette gamme de mesures qui peut être élargie à un intervalle allant de 0 à 180° , en apportant des améliorations à ce dispositif.

Inclinomètre électromagnétique

01 DEC 2014

Introduction.

Un inclinomètre est un instrument qui permet la mesure des angles par rapport à l'horizontale, il trouve ses applications dans le domaine des géosciences, en génie civile, et militaire.

Les principales technologies sont les capteurs à pendule simple, l'inclinomètre à pendule asservi, les inclinomètres au Silicium.

Le dispositif que nous proposons est un inclinomètre électromagnétique à poutre encastrée, son principe de fonctionnement repose sur la loi fondamentale de la dynamique, les lois fondamentales de l'électromagnétisme et les propriétés mécaniques d'élasticité d'une poutre encastrée à une extrémité.

1- Description de l'inclinomètre électromagnétique.

L'inclinomètre électromagnétique est constitué d'une poutre rectangulaire encastrée à une extrémité, (photo1, PE, SF) et sur l'autre extrémité on a fixé sur la face inférieure une bobine plate de 30 spires, et de rayon 2cm, (photo1. BM) une deuxième bobine plate identique est fixée sur un support solide (photo1, SF, BF) au dessous et en face de la bobine fixée sur la poutre, les deux bobines plates sont situées sur des plans parallèles distant de x . Une masse M est solidaire à la face supérieure sur l'extrémité libre de la poutre encastrée (photo1.M). Le dispositif contient aussi un circuit électronique de conditionnement (fig.2) du signal électrique, une alimentation stabilisée symétrique $\pm 15V$ et un voltmètre numérique. La bobine plate fixe (BF, photo1) bobine émettrice, est alimentée par un signal sinusoïdal provenant d'un oscillateur de Wien dont les conditions de phase et d'amplification sont satisfaites. La deuxième bobine plate réceptrice (BM, photo1) est fixée sur la partie inférieure sur l'extrémité libre de la poutre. Les deux bobines réceptrice et émettrice sont reliées au circuit de conditionnement par l'intermédiaire des fils de connexions (photo1, FC). Les deux bobines sont quasiment parallèles, distantes de x l'une de l'autre, x étant la distance variable inter bobines et qui dépend de l'angle de l'inclinaison θ par rapport à l'horizontale.

2- Principe de fonctionnement.

La bobine fixe (fig2, photo1, BF) est alimentée par un oscillateur de Wien (fig2), de fréquence $f_0 = 16 \text{ KHz}$, dont les conditions de phase et d'amplification sont satisfaites ($f_0 = 1/2\pi RC$, avec $R = 100 \Omega$ et $C = 0.1 \mu F$). La condition d'amplification $A = 1 + R_2/R_1 = 3$ ($R_2 = 2.2k\Omega$ et $R_1 = 1k\Omega$). A est le gain en tension. Cet oscillateur est suivi de deux amplificateurs suiveurs d'isolement, pour alimenter la bobine fixe, et par conséquent, elle est parcourue par un courant variable dans le temps, créant ainsi une induction magnétique variable le long de son axe. Cette dernière crée, à travers la bobine mobile (photo1, BM), un flux variable, Φ , et une force électromotrice induite variable et mesurable entre ses bornes. La valeur maximale de cette f.e.m induite dépend de la distance x séparant les deux bobines, et le flux Φ est proportionnel à l'induction magnétique, B , dont la variation, en fonction de x le

long de l'axe des deux bobines est donnée par la relation suivante : $B(x) = \mu_0 N I R^2 / 2(R^2 + x^2)^{3/2}$, avec I le courant parcourant les bobines, R leur rayon, N leur nombre de spire, et x la distance séparant les deux bobines. Pour $x = 0$, la relation précédente devient $B(0) = \mu_0 N I / 2R$ qui correspond à une induction maximale. La masse sismique M solidaire à l'extrémité libre de la poutre encadrée est soumise à une force $F = M g \cos \theta$, suivant la direction de l'axe joignant les centres des bobines, c-à-d dans une direction perpendiculaire aux plans parallèles des bobines, et où θ est l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale. Lorsqu'on fait diminuer l'angle d'inclinaison θ par rapport à l'horizontale (photo1), ceci se traduit par une augmentation de $\cos \theta$ donc de la force F , et la poutre subit une flexion dont l'amplitude dépend de l'intensité de la force exercée sur l'extrémité libre de la poutre, et de ce fait la bobine mobile s'approche de la bobine fixe, la distance x séparant les deux bobines diminue ; ce qui a pour effet, l'augmentation de la tension maximale induite aux bornes de la bobine mobile. Cette dernière étant de faible amplitude, il a fallu apporter des circuits d'amplifications, de redressement et de filtrage (Fig2), pour rendre cette tension exploitable. A la sortie du circuit de conditionnement, un potentiomètre (Fig2) suivi d'un suiveur permet le réglage de la sensibilité du capteur, un circuit approprié du réglage d'offset a été conçu également. Deux filtres de Butter Worth sont utilisés pour éliminer les ondulations résiduelles après le filtre Π .

Le circuit de conditionnement (fig2, photo3), est alimenté par une source de tension symétrique stabilisée, $\pm 15V$.

L'inclinomètre électromagnétique ainsi proposé, est constitué de deux convertisseurs, le premier est le système mécanique (poutre encadrée, avec une masse sismique M constante solidaire à son extrémité libre, c'est le convertisseur force-déplacement. La projection du poids de la masse sismique sur l'axe passant par les centres des bobines, varie selon l'équation $F = M g \cos \theta$. Le second est un circuit magnétique permettant la conversion du déplacement en tension (convertisseur déplacement-tension) via le circuit électronique de conditionnement. Les variations de l'angle d'inclinaison θ entraînent des variations de la force F appliquée à l'extrémité libre de la poutre encadrée, donc de la distance x inter bobines qui se traduit par des variations de la tension.

3- Caractéristiques de l'inclinomètre électromagnétique.

L'inclinomètre électromagnétique proposé est caractérisé par une dérive d'origine, Lorsqu'on met le dispositif en marche, il y a une dérive lente, et après environ quelques dizaines minutes de fonctionnement, cette dérive devient très faible ($5\mu V/min$) et la tension de sortie est presque stabilisée à une constante. La courbe caractéristique de l'inclinomètre, $V=f(\theta)$, est obtenue, en faisant varier θ de 0° à 90° par pas de 10° et en relevant la tension correspondante, à l'aide d'un voltmètre de précision $\Delta V = 0.01$ mV. (tableau1, figure 1).

La réponse de l'inclinomètre $V(\theta)$, n'est pas linéaire, et elle obéit à une relation polynomiale d'ordre 3 dont le coefficient de corrélation $r^2 = 1$ et l'écart-type σ compatible avec la précision expérimentale.

$$V(\theta) = \sum_0^3 a_i \theta^i$$

Les coefficients de cet ajustement polynomial sont :

$$a_0 = 90.42154 ; a_1 = 0.39258 ; a_2 = -0.0108 \cdot 10^{-4} ; a_3 = 1.62413 \cdot 10^{-8}.$$

a- Tableau d'étalonnage de l'inclinomètre électromagnétique.

L'étalonnage de l'inclinomètre électromagnétique a été effectué dans les meilleures conditions de fonctionnement, les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau ci-dessous.

θ°	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
V(mV)	90.07	93.50	94.98	92.40	89.75	84.65	78.35	71.10	61.60	49.70

La distance inter bobine minimale correspond à $\theta = 0$ est $x_0 = 2\text{mm}$, et doit correspondre à une la tension maximale délivrée par le capteur, due à la force maximale subite par la masse sismique M. La valeur maximale obtenue expérimentalement correspond à 20° , ceci s'explique par le fait que les deux bobines ne sont pas disposée initialement de façon horizontale et il faut procéder à un ajustement des plans avant d'entamer les mesures. C'est en quelques sortes un décalage d'origine qui provient de la poutre en flexion qui oriente le plan de la bobine mobile de 20° par rapport à l'horizontale. La précision de cet inclinomètre dépend des éléments propres au dispositif expérimental (bobines, distance inter bobine, nombre de spires, élasticité de la poutre, circuit de conditionnement du signal), et de la qualité de l'appareil de mesure utilisé. La sensibilité de l'inclinomètre est donnée par la relation $S = \Delta\theta/\Delta V$, elle est comprise entre $1^\circ/\text{mV}$ et $4^\circ/\text{mV}$ ($1^\circ/\text{mV} \leq S \leq 4^\circ/\text{mV}$), la précision sur les angles d'inclinaisons θ est donnée par $\Delta\theta = S \Delta V$ ($0.01^\circ \leq \Delta\theta \leq 0.04^\circ$).

L'étendu de mesure de l'inclinomètre électromagnétique proposé est limité entre 0° et 90° .

Le choix de la poutre est crucial, elle doit être parfaitement élastique, la technologie de fabrication des matériaux élastique est parfaitement maîtrisée, et les performances de l'inclinomètre électromagnétique à poutre encastree peuvent être améliorées en utilisant des matériaux de très grandes performances, (module d'élasticité, endurance, résistance à la fatigue,...etc.). Ces améliorations peuvent conduire également à l'élargissement de la gamme de mesure de 0° à 180° .

Conclusion.

Le principe de fonctionnement de l'inclinomètre électromagnétique repose sur les lois fondamentales de l'électromagnétisme, et les propriétés mécaniques d'élasticité d'une poutre encastree à une extrémité.

Il est constituée d'un convertisseur force –déplacement et d'un circuit magnétique qui sert de convertisseur déplacement-tension. L'étendu de mesure est compris entre 0° et 90° , et qui peut être élargit. Des améliorations peuvent être apportées à ce dispositif en insérant un filtre en amont de l'alimentation afin d'empêcher les impulsions parasites provenant du secteur, d'atteindre ou d'altérer la tension de sortie du circuit de conditionnement de l'inclinomètre, on peut également mettre la cellule magnétique dans une cage de Faraday (boitier métallique en Cuivre ou en Aluminium) pour protéger le circuit magnétique des rayonnements électromagnétique avoisinant le capteur. On peut aussi procéder à un blindage, en remplaçant les fils de connexions par des câbles coaxiaux, et mettre dans un boitier métallique l'alimentation et le circuit de conditionnement. L'utilisation d'une poutre de propriétés mécaniques appropriées permettra d'une part d'élargir la gamme de mesure, et d'autre part augmenter la sensibilité et la précision de l'inclinomètre. Cet instrument trouvera ses applications dans l'enseignement, la recherche scientifique et dans l'industrie. D'autres améliorations peuvent être apportées au circuit électronique de conditionnement, et en complétant la chaine de mesure par une acquisition numérique des données.

Revendications

- 1- Dispositif formant un inclinomètre électromagnétique, caractérisé en ce qu'il est constitué d'une poutre rectangulaire encastrée à une extrémité, d'un circuit magnétique, un circuit électronique ; l'extrémité libre de la poutre encastrée est solidaire à une masse sismique M.
- 2- Selon la revendication1, le circuit magnétique est un dispositif caractérisé en ce qu'il est constitué de deux bobines plates parallèles, dont l'une est mobile reliée à l'extrémité libre de la poutre encastrée, et l'autre bobine est fixée sur un support, placée au dessous et de façon parallèle à la bobine mobile, de telle sorte que l'axe passant par les centres des deux bobine soit perpendiculaire à l'horizontale pour un angle d'inclinaison nul. Le circuit électronique prélève le signal électrique de la bobine mobile et permet l'affichage de la tension par l'intermédiaire d'un voltmètre numérique.
- 3- Selon la revendication2, les variations de la tension prélevée de la bobine mobile (réceptrice) ne dépendent que de la distance inter bobines x , en relation avec l'inclinaison par rapport à l'horizontale.
- 4- Selon la revendication 2, la bobine fixe (émettrice) est alimentée par un oscillateur de Wien, et par influence d'induction magnétique, la bobine mobile reliée à l'extrémité libre de la poutre rectangulaire encastrée, est le siège d'une f.e.m. variable dont l'amplitude maximale dépend de la distance inter bobine en relation avec l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale.

Courbe caractéristique de l'inclinomètre électromagnétique

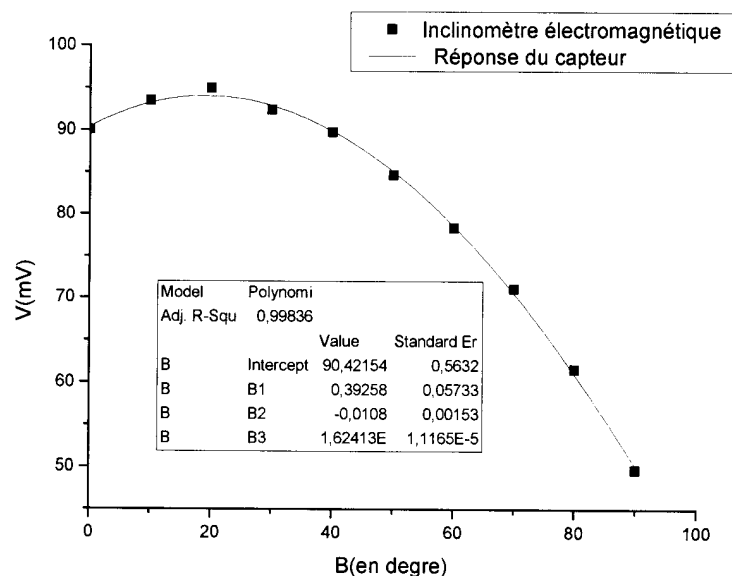


Fig.1. Variations de la tension en fonction de l'angle θ d'inclinaison.

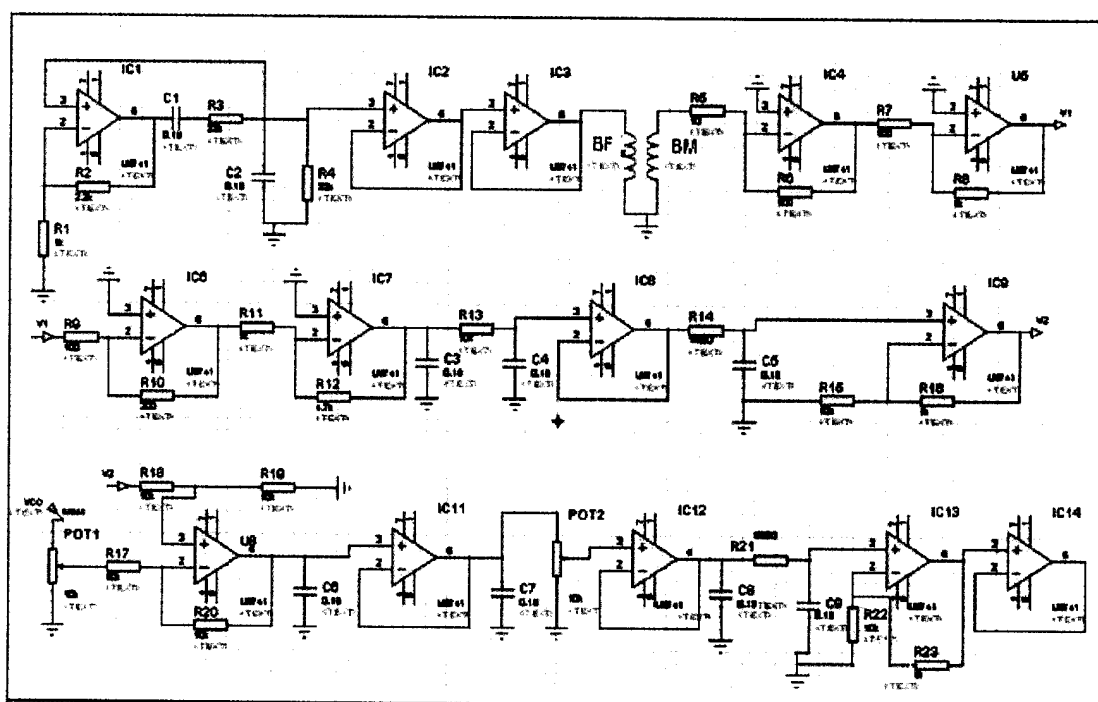
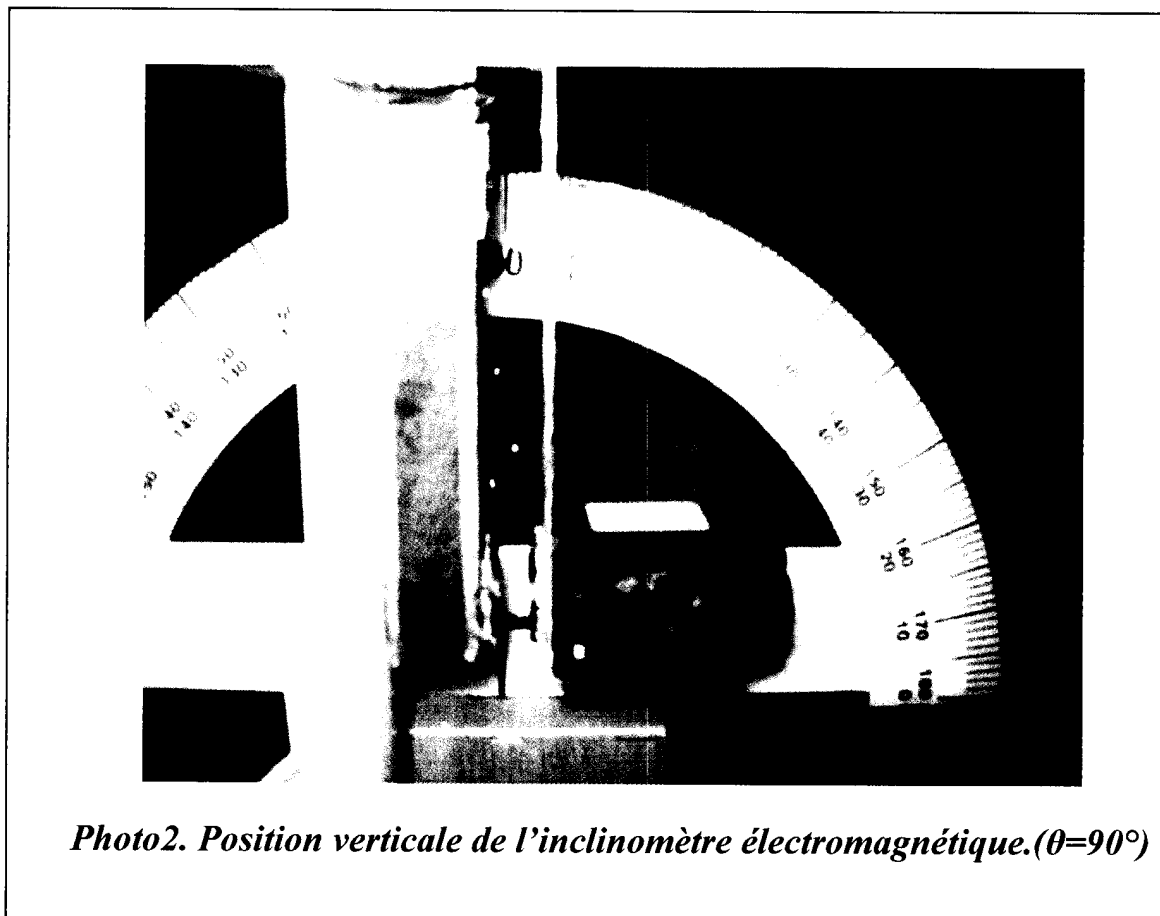
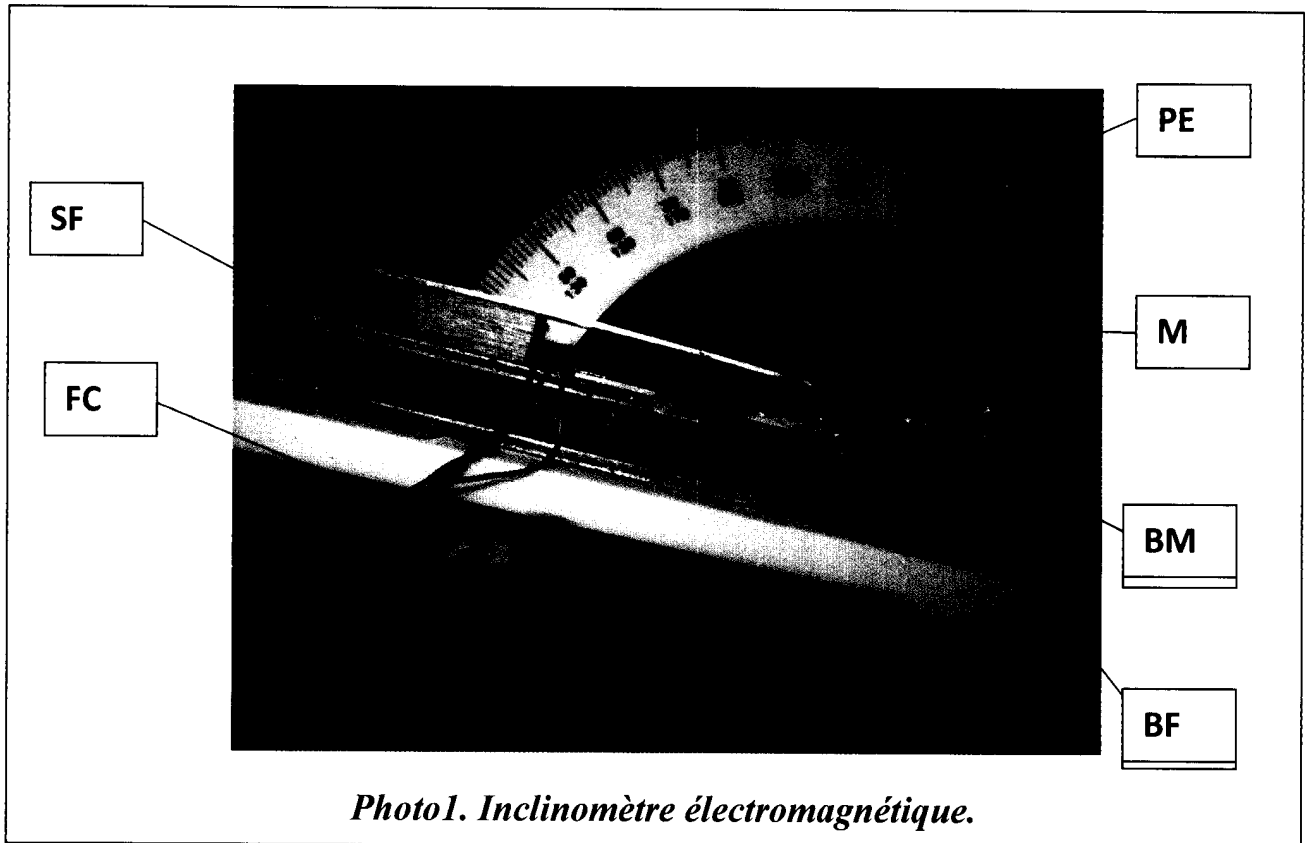


Fig.2 Circuit électronique de l'inclinomètre électromagnétique



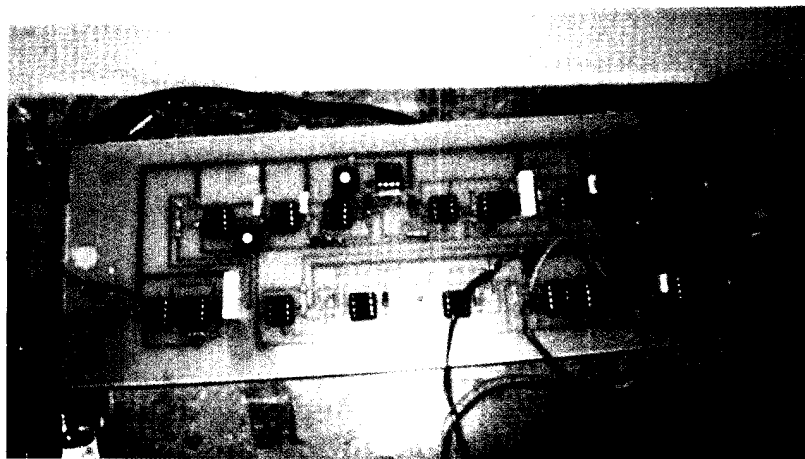


Photo3. Circuit de conditionnement.