

INSTRUMENTATIONS DEVELOPPEES A L'OBSERVATOIRE ROYAL DE BELGIQUE POUR LA MESURE DE DEFORMATIONS LENTES DU SOL

par

M. VAN RUYMBEKE

(4 figures)

RESUME.- Les capteurs géophysiques furent conçus dans le passé en n'employant uniquement que des dispositifs mécaniques et électriques. Les paramètres enregistrables à la sortie des instruments devaient être suffisamment grands que pour permettre leur observation directe. L'introduction de l'électronique dans les capteurs, les amplificateurs, les filtres, les enregistreurs, les bases de temps et les systèmes de traitement numérique a profondément modifié les performances et le champ d'application des appareillages.

Les capteurs basés sur des changements de capacité représentent généralement la solution pour la mesure de très faibles déplacements.

L'introduction de méthodes d'asservissement et le filtrage numérique ont permis d'améliorer les résultats de mesure des phénomènes de marée.

L'enregistrement des paramètres d'ambiance permet de mieux maîtriser l'interprétation des données.

ABSTRACT.- The geophysical instruments were built originally with mechanical and electrical transducers. The precision was limited and only large signals were observed.

The introduction of electronics for transducers, amplifiers, filters, recorders, time signals and data treatment has improved the possibilities.

For very small displacements, we use capacitive transducers.

The feedback systems with digital filter are improving tidal registrations.

It is important to measure the temperature and atmospheric pressure influences.

INTRODUCTION

Les capteurs géophysiques cherchent à traduire des grandeurs physiques qui sont les objets des mesures en une grandeur de sortie.

Ces grandeurs physiques désignées sous le nom de mesurande peuvent être de toute nature. Citons quelques exemples :

- paramètres géométriques (longueur, surface, volume, inclinaison, ...)
- paramètres dynamiques (vitesse, accélération, forces, ...)
- paramètres thermodynamiques (température, pression, ...)
- paramètres électriques (résistivité, magnétisme, ...)

La mesure de ces paramètres s'obtient par des opérations expérimentales qui concourent à leur connaissance.

Nous entendons par capteur tout dispositif qui soumis à l'action d'un mesurande m non électrique présente une caractéristique de nature électrique s (charge, tension, courant ou impédance) qui est une fonction de m

$$s = f(m)$$

Les effets des marées terrestres se mesurent principalement par trois types d'instruments dont les signaux de sortie sont fonction. (Melchior, P., 1983)

- des variations de pesanteur en un point pour le gravimètre

- de l'inclinaison du repère local par rapport à la verticale pour les clinomètres
- des déformations de la Terre dans une direction donnée pour les extensomètres.

Ces instruments transforment le paramètre à mesurer en des déplacements enregistrés par divers capteurs (Flick, J., *et al.*, 1985).

L'instrumentation utilisée actuellement par les géophysiciens atteint bien souvent les limites des possibilités techniques du moment. Citons par exemple l'ordre de grandeur des variations des paramètres observables par les appareils installés au Laboratoire Souterrain de Géodynamique de Walferdange (Grand Duché de Luxembourg):

- pour la pesanteur, la résolution est de 10^{-10} x g
- pour les inclinaisons de la verticale, elle est de 10^{-9} radian
- pour les extensions de la croûte terrestre, elle est de 10^{-10} de la longueur entre les points d'ancrage de l'extensomètre
- pour les changements de température, elle est de moins de 10^{-5} K
- pour les variations de pression, elle est d'environ $1 \mu\text{bar}$
- pour les capteurs capacitifs, retenons une résolution ultime de 10 attofarad (10^{-17} F)
- pour les déplacements induits par les crapaudines, retenons le nanomètre de résolution.

A partir des dispositifs adaptés à l'étude des marées terrestres, on peut imaginer des systèmes utilisables pour la mesure de déformations lentes du sol. En effet les résolutions nécessaires sont plus faibles vu l'amplitude des phénomènes à étudier.

MESURES DE LA MAREE A L'AIDE DE GRAVIMETRES

La construction de tous les gravimètres répond au même principe qui consiste à opposer à la pesanteur une force constante qui lui est presque égale et mesurer l'appoint variable (Melchior, 1971).

Pour cela on a fait traditionnellement appel à la force élastique exercée par un ressort auquel une masse est suspendue, cette force s'avérant extrêmement stable.

L'appareil se pèse ainsi en permanence lui-même. En pratique on utilise soit des ressorts métalliques soit des ressorts en quartz. Si l'on se propose dès le départ de mesurer la marée avec une précision de $1 \mu\text{gal}$ (10^{-9} g), on pourra faire quelques remarques qui sont d'application générale pour tous les gravimètres.

1. Pour les instruments utilisant des ressorts métalliques, il faut stabiliser la température à mieux que $0^{\circ}001$. Pour les appareils en quartz cette contrainte est moins sévère.
2. Afin d'éliminer les variations de la poussée d'Archimède exercée par l'air atmosphérique, on enferme l'appareillage dans une enceinte étanche.
3. Les contraintes précédentes limitent la longueur du ressort à une dizaine de centimètres pour un appareil transportable. Si l'on considère un gravimètre à ressort vertical analogue à un peson, il faudrait pouvoir détecter des déplacements de l'ordre de 0,1 nanomètre pour obtenir la précision de 10^{-9} g. A une époque où l'électronique n'était pas développée on a contourné ce problème en augmentant jusqu'à mille fois la sensibilité mécanique des gravimètres par un principe d'astatisation.
4. Il y a lieu de pourvoir le fléau d'un amortissement pour réduire l'influence de l'agitation du sol et en particulier du bruit microsismique. Cet amortissement peut être assuré par une palette solidaire du bras se déplaçant dans un boîtier étroit.
5. En général plus un gravimètre sera sensible, plus la course du ressort assurant sa «zone de mesures» sera restreinte. Un gravimètre devra comprendre deux et parfois trois ressorts. C'est le cas de la plupart des appareils de prospection (North American, Worden, Cintrex ...). On y trouve:
 - a) un ressort maître qui fournit la force antagoniste;
 - b) un ressort de mesure, très fin, qui permet à l'opérateur de ramener le fléau en sa position zéro et qui est commandé par une vis micrométrique à tambour gradué. C'est la lecture de ce micromètre qui donnera la variation de g d'un point à un autre à condition que la graduation soit étalonnée par comparaison de mesures faites en des points où g est préalablement connu grâce à une mesure absolue ou à un rattachement à une telle mesure. L'excursion totale du ressort de mesure détermine la zone de l'appareil qui est de quelques centaines de milligals;
 - c) un ressort de changement de zone qui permet de recentrer le fléau lorsque le ressort de mesure est à bout de course. Il y a une exception notable: le gravimètre LaCoste Romberg modèle G qui peut

couvrir l'entièreté de la planète en jouant sur le point d'attache supérieur du ressort maître, ce qui lui donne une zone de travail atteignant 7 gals.

La résolution des meilleurs appareils peut atteindre 0,1 microgal à condition d'éliminer l'effet de la dérive instrumentale qui peut varier entre un et cent microgals par jour.

Depuis peu les forces magnétiques sont utilisées dans des gravimètres à supraconductivité.

La supraconductivité des métaux est classiquement obtenue aux très basses températures que permet d'atteindre l'hélium liquide. A 4,15K la résistance du mercure tombe brusquement à zéro. Pour le plomb la température critique est 7,19K.

Si on piège un courant dans un anneau supraconducteur, ce courant peut se maintenir indéfiniment et le flux du champ magnétique induit est parfaitement stable.

Le gravimètre supraconducteur construit en 1968 par Prothero et Goodkind (Univ. Californie) utilise une sphère supra-conductrice de 2,54 cm de diamètre maintenue en «lévitation» dans le champ magnétique créé par une paire de bobinages supraconducteurs en fil de niobium, qui produisent un gradient de force vertical.

La position de la sphère est détectée par un transducteur de déplacement par pont capacitif. Le signal produit par le déséquilibre du pont permet de réaliser un système asservi par une force magnétique de contre réaction qui modifie très légèrement le champ principal. Les variations du voltage de contre réaction traduisent les variations de g .

Grâce à la stabilité inhérente des courants persistants dans un supraconducteur l'instrument ne présente pratiquement pas de dérive et un bruit de fond extrêmement bas.

Pour des périodes inférieures à 24h, la résolution atteint quelques nanogals (10^{-12} de g) et la dérive annuelle, après modélisation, ne dépasse pas quelques microgals.

Un instrument de ce type enregistre la marée à l'Observatoire Royal de Belgique depuis plus de quatre ans. (Ducarme *et al.*, 1986). Un réseau est actuellement opérationnel en Europe. Il comporte trois stations: Bruxelles, Francfort et Strasbourg.

Par des mesures de variations de la pesanteur on peut mettre en évidence des phénomènes géodynamiques. (Poitevin, Ch. 1990).

LES CLINOMETRES

Si dans un pendule vertical, on redresse l'axe le bras lui restant perpendiculaire, on obtient un pendule horizontal lorsque l'axe est devenu très proche de la verticale. Le montage est analogue à celui d'une porte tournant autour de ses gonds.

Le bras du pendule se met en équilibre dans le plan défini par la verticale locale et son axe de rotation.

Toute inclinaison du support perpendiculaire à ce plan ou toute variation de la direction de la verticale locale entraîne une rotation du bras qui se place dans le nouveau plan d'équilibre.

L'intérêt d'un tel instrument est que la sensibilité définie comme le rapport entre la rotation du bras et l'inclinaison du support ou la déviation de la verticale devient théoriquement infinie lorsque l'angle i entre l'axe et la verticale s'annule.

En effet la force de rappel du bras du pendule est une fonction de la projection de la pesanteur dans son plan d'oscillation.

Lorsque l'angle i tend vers zéro, cette force devient très petite et une très faible inclinaison du pendule provoquera un grand déplacement du bras.

La résolution du pendule horizontal Verbaandert-Melchior construit à l'O.R.B. est meilleure que le millième de seconde d'arc sur les mouvements de la verticale par rapport au repère lié au laboratoire.

Pour des mesures d'inclinaison, les pendules verticaux sont également utilisés, entre autre dans des puits de forage. Leur plage de travail est plus grande que pour des pendules horizontaux. La partie mobile peut être très massive et la longueur aussi grande que possible. Citons par exemple un pendule vertical de sept mètres que nous avons installé dans la Cueva de Los Verdes du volcan Corona à Lanzarote.

Les déplacements de la masse mobile sont enregistrés suivant les deux composantes horizontales avec une résolution inférieure à un micromètre, correspondant à environ un trentième de seconde d'arc.

La simplicité de ce type d'instrument le rend très efficace entre autre dans la surveillance de sites et de bâtiments de génie civil.

Si on veut mesurer la différence de niveau entre deux points distants ce qui revient à déterminer l'inclinaison de la verticale par rapport

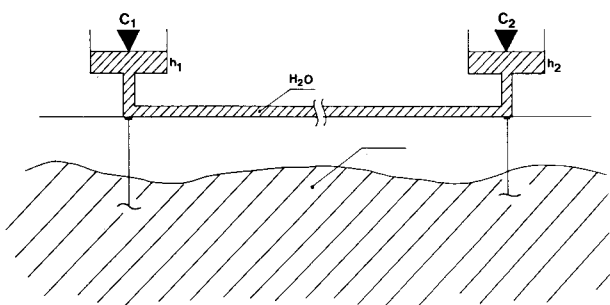


Fig. 1.- Les capteurs C_1 et C_2 mesurent les variations des niveaux d'eau h_1 et h_2 induites par les inclinaisons de la verticale dans le repère du laboratoire où se trouve l'instrument.

à l'axe qui les joint, on aura intérêt à utiliser des clinomètres à eau (figure 1).

En effet le temps nécessaire à l'écoulement du fluide est un filtre efficace pour éliminer le bruit en haute fréquence présent dans le mesurande. Le niveau de l'eau peut être mesuré par interférométrie optique, par un flotteur dont la position est donnée par un capteur de déplacement, ou par mesure capacitive ou résistive. Ce type d'instrument est très prometteur.

LES EXTENSOMETRES

La figure 2 est une représentation schématique d'un extensomètre horizontal. Les extensions et compressions de la croûte terrestre écartent ou rapprochent les deux ancrages A et B. Les effets sont pour les marées terrestres de l'ordre de $5 \cdot 10^{-8}$ de la longueur L , soit environ $1 \mu\text{m}$ pour 20 m.

On peut mesurer la distance A-B soit directement par des méthodes d'interférométrie laser, soit par l'intermédiaire d'un support rigide BC fixé en B. A ce moment on ne doit plus mesurer que les variations de l'appoint AC, ce qui est plus aisé.

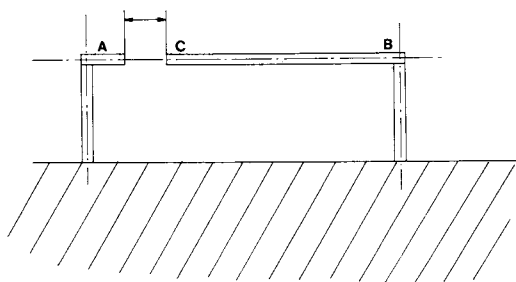


Fig. 2.- Les mouvements en B de l'extrémité de la barre sont induits par les mouvements de A. Le transducteur T n'enregistre ainsi que dl.

En pratique, il faut pour les méthodes interférométriques des installations très coûteuses car il faut stabiliser la longueur d'onde utilisée à mieux que 10^{-10} ce qui ne peut se réaliser que par des techniques laser très évoluées.

C'est pourquoi pour réaliser des systèmes économiques et d'une installation facile continue-t-on à utiliser la méthode du support rigide. Celui-ci doit être aussi peu sensible que possible aux perturbations thermiques et barométriques. Les matériaux employés à l'heure actuelle sont le quartz, le superinvar et le zerodur (Cai Weixin *et al.*, 1984)

On peut adapter cette technique à l'étude des déformations de sol en prêtant une attention spéciale aux effets thermiques.

LES CAPTEURS CAPACITIFS

La mesure des microdéplacements nécessite une technologie particulière où les capteurs capacitifs jouent un rôle privilégié. De tels capteurs ont été développés en utilisant les variations de capacité électrique entre des armatures mobiles les unes par rapport aux autres.

La capacité électrique C entre deux plaques rectangulaires identiques et parallèles de côté x et y et distantes de z se représente par :

$$C = k(xy/z) = k S/z \text{ picofarad.}$$

Dans l'air on a dans le cas où x , y et z sont exprimés en mètre :

$$k = 8.859 \text{ pF/m.}$$

Il est possible de modifier C en variant k , S ou z .

$$\frac{dC}{C} = \frac{dk}{k} + \frac{dS}{S} - \frac{dz}{z}$$

Envisageons les trois cas (a), (b) et (c) :

a) Pour faire varier k on peut remplacer le matériau compris entre les armatures par un autre dont la perméabilité magnétique est différente (exemple à la Figure 3). Un déplacement de l'eau dont la valeur diélectrique est d'environ 80 fois celle de l'air, va modifier fortement la capacité C de façon linéaire (Van Ruymbeke *et al.*, 1985). Notons qu'un volume conducteur de l'électricité correspond à un diélectrique de valeur infinie.

b) Les variations de la surface des armatures sont employées dans les condensateurs variables.

La surface est une fonction linéaire de la position angulaire.

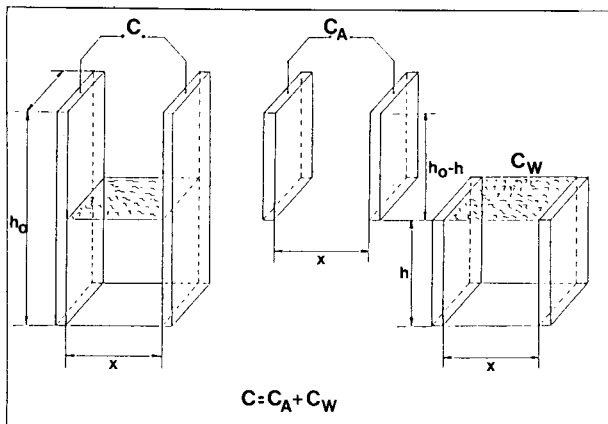


Fig. 3.- La capacité C est composée de deux capacités en parallèle C_A C_W . Lorsque le niveau d'eau h se modifie, la capacité C varie car les variations de C_A et C_W ne sont pas identiques vu les différences des valeurs diélectriques.

- c) Les capteurs basés sur une variation de distance entre les armatures sont les plus usités pour de faibles déplacements car leur sensibilité $S(c)$ est très grande comparée aux cas (a) et (b).

En effet le rapport des sensibilités pour (b) et (c) est dans le cas où

$$\begin{aligned} dz &= dx \\ S(c) / S(b) &= x/z \end{aligned}$$

(x est généralement beaucoup plus grand que z).

Le capteur de déplacement à modulation de z n'est pas linéaire. Ce problème peut être contourné en utilisant des systèmes montés en pont. Notons que les effets de bord dans les capteurs capacitifs sont pour des dimensions de x et y très supérieures à z relativement indépendants de celui-ci et n'interviennent que comme une capacité constante en parallèle avec le capteur.

La capacité électrique est le siège de forces électrostatiques fonction du voltage appliqué à ses bornes. il est possible par modification de celui-ci de créer des systèmes à boucle de contre réaction. les avantages principaux ainsi obtenus sont la constance de la sensibilité, une meilleure linéarité et une réponse non déphasée du système. (Van Ruymbeke, M. 1985).

LES THERMOMETRES DE HAUTE RESOLUTION

Différents thermomètres à base de thermistances ont été installés au laboratoire de Walferdange (Van Ruymbeke, M. 1974, Rasson, J. *et al.*, 1977).

La plage de ces thermomètres est d'environ deux degrés pour une résolution à court terme (quelques heures) de l'ordre du microkelvin.

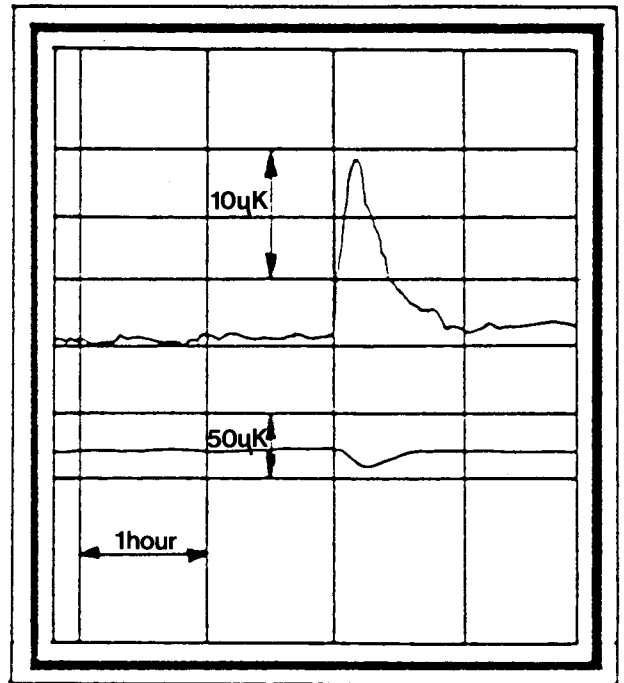


Fig. 4.- Pendant un interval de temps t de quelques minutes, un courant i est envoyé dans une résistance R pour chauffer le corps du thermomètre de quelques microdegrés.

La stabilité à long terme est meilleure que le millikelvin.

Il faut tenir compte de ce que la très faible différence de température entre le thermomètre et le milieu ambiant ne permet pas un rendement très favorable de l'échange thermique et que seule la possibilité de chauffer le thermomètre pendant un court intervalle de temps permet de vérifier son bon fonctionnement (figure 4).

Une version adaptée à la mesure dans des puits remplis d'eau est installée en Turquie dans le cadre d'un projet de recherche sur la prédiction de tremblements de terre par l'observation de tous les paramètres accessibles.

Des variations thermiques d'environ 10 microkelvin d'amplitude ont été mises en évidence par notre système, montrant sa très haute résolution.

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier le Professeur P. Melchior, Directeur de l'Observatoire Royal de Belgique, pour la mise à sa disposition des moyens scientifiques et techniques nécessaires à ses travaux.

Il remercie également le Dr. B. Ducarme pour sa collaboration lors de la rédaction de cet article.

BIBLIOGRAPHIE

- CAI WEIXIN, M., VAN RUYMBEKE, M., TAN SHILING, 1984.- Extensomètre en quartz de très haute précision construit en collaboration par la Chine et la Belgique. *Croûte terrestre & Séisme*, 4 (2): 1-28 *Inst. Seism. du Bur. Etat de Séism., Wuhan, Chine.*
- DUCARME, B., VAN RUYMBEKE, M., POITEVIN, C., 1986.- Three years of registration with a superconducting gravimeter at the Royal Observatory of Belgium. *Proc. 10th Int. Symp. on Earth tides, Madrid, Sept. 23-27, 1985. Consejo Sup. Invest. Cient.*, 113-129
- FLICK, J., VAN RUYMBEKE, M., MELCHIOR, P., 1985.- Instrumental developments at the underground laboratory of geodynamics (Walferdange, Grand Duché de Luxembourg). *Proc. 10th. Int. Symp. on Earth Tides, Madrid, Sept. 23-27, 1985. Consejo Sup. Invest. Cient.*, 83-102.
- MELCHIOR, P., 1971.- *Physique et Dynamique planétaire. Gravimétrie*, 2, Vander éditeur.
- MELCHIOR, P., 1983.- *The Tides of the Planet Earth*. Pergamon Press.
- POITEVIN, Ch., 1990.- Quel peut être l'apport de la gravimétrie à la tectonique récente et actuelle en Belgique? (cfr. ce volume).
- RASSON, J., VAN RUYMBEKE, M., 1977.- Underground meteorology at the Underground Laboratory of Geodynamics at Walferdange *Proc. 8th Int. Symp. on earth Tides - Bonn*, 399-408.
- VAN RUYMBEKE, M., 1974.- Mesures thermiques au Laboratoire de Géodynamique de Walferdange. *Observatoire Royal de Belgique, Comm. B., N° 86 / S Géoph.* 121.
- VAN RUYMBEKE, M., 1985.- Transformation of nine Lacoste Romberg gravimeter in Feedback systems. *Bull. Inf. Marées Terrestres* 95: 6202-6228.
- VAN RUYMBEKE, M., DELCOURT, M., 1985.- A capacitive transducer for water level measurements: «Nivocap». *Proc. 10th Int. Symp. on Earth Tides, Madrid Sept. 23-27, 1985. Consejo Sup. Invest. Cient.* 95-102.