

**Zeitschrift:** Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural

**Herausgeber:** Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF)

**Band:** 84 (1986)

**Heft:** 11

**Artikel:** Introduction à l'étude des marées terrestres

**Autor:** Ruymbeke, M. Van

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-233114>

### **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:** 13.07.2025

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

Beispiel können Wohnkerne in einem Flurbereinigungsgebiet genannt werden. Wie weit solche Vermessungen sich erstrecken, wird von den örtlichen Verhältnissen abhängen.

Terrestrische Vermessungen oder Gruppen solcher Vermessungen können später mit weiter entfernten photogrammetrisch bestimmten topographischen Grenzen verbunden werden. Letztere liegen untereinander im Makroverband fest.

Das zweite Beispiel bezieht sich auf den Begriff «Koordinatenkataster». Es besteht die Aussicht, dass die Anwendung von Koordinaten aus einem automatisierten Bestand viele der jetzigen Beschränkungen des Katasters beheben wird, weil Koordinaten auf verschiedenste Weise kombiniert werden können. So kann man vielerlei Pläne aus einem Datenbestand erzeugen. Auch ist es möglich, von beliebigen Koordinatenpunkten auszugehen, um eine Grenzwiederherstellung durchzuführen. Dabei wird jedoch vergessen, dass Koordinaten an sich nichts bedeuten. Sie sind abgeleitete Größen, eine Darstellungsweise von Form und gegenseitiger Lage von Geländeobjekten, wie sie durch Messungen bestimmt sind. Wenn die Vermessung gut auf ihre Zwecke abgestimmt ist, sind die Objekte mit einer Genauigkeit vermessen, die den Anforderungen regionaler oder lokaler Zwecke genügt. Die Genauigkeit der Koordinaten ist auch regional oder lokal, weil die Koordinaten aus den Messungen berechnet sind. Auch bei Koordinaten muss es also ein Übergangspunkt geben, der festgelegt von wo ab nicht die globalen Zwecke sondern die lokalen Zwecke überwiegen. Beim niederländischen Katastersystem für Einzelmessungen D'76 ist diesem Übergangspunkt zu wenig Aufmerksamkeit geschenkt worden. Das System ist stark auf die Vermessung «vom Grossen ins Kleine» ausgerichtet. Die Eigenmasse von «harten» Objekten haben dabei lokal kein grösseres Gewicht als die «abstrakte» geometrische Grundlage. Wenn Koordinaten aus verschiedenen, nicht miteinander zusammenhängenden Vermessungen kombiniert werden, können Rekonstruktionsfehler auftreten. Die Wahrscheinlichkeit dieser Fehler nimmt zu, wenn regionale und lokale Koordinaten kombiniert werden.

punkt geben, der festgelegt von wo ab nicht die globalen Zwecke sondern die lokalen Zwecke überwiegen. Beim niederländischen Katastersystem für Einzelmessungen D'76 ist diesem Übergangspunkt zu wenig Aufmerksamkeit geschenkt worden. Das System ist stark auf die Vermessung «vom Grossen ins Kleine» ausgerichtet. Die Eigenmasse von «harten» Objekten haben dabei lokal kein grösseres Gewicht als die «abstrakte» geometrische Grundlage. Wenn Koordinaten aus verschiedenen, nicht miteinander zusammenhängenden Vermessungen kombiniert werden, können Rekonstruktionsfehler auftreten. Die Wahrscheinlichkeit dieser Fehler nimmt zu, wenn regionale und lokale Koordinaten kombiniert werden.

#### Literatur

Anneveld J.C.: Zekerheid omtrent eigendomsgrenzen van onroerend goed. (Sicherheit bei Eigentumsgrenzen von Immobilien). Delft, Rijkscommissie voor Geodesie, 1984.

Baarda W.: Een analyse van de technische werkzaamheden van de landmeter van het Kadaster. (Eine Analyse der technischen Arbeiten des Katastergeometers). Rapport voor de Stasatscommissie inzake het Kadaster, Delft, Laboratorium voor Geodesie, 1957.

Baarda W.: Onzekerheidsgebieden in recht en geodetische techniek. (Unsicherheitsgebiete im Recht und in der geodätischen Technik). Rapport voor de Staatscommissie inzake het Kadaster, Delft, Laboratorium voor Geodesie, 1957.

De Haan P.: Kadaster en agrarisch recht. (Kataster und Agrarrecht). Zwolle, Uitgeversmaatschappij W.E.J. Tjeenk Wilink, 1962.

De Haan P.: Modeltheorie als brug tussen onroerend goedrecht en mathematische geodesie. (Modelltheorie als Brücke zwischen Immobilienrecht und mathematische Geodäsie). Bijdrage aan «Daar heb ik veertig jaar over nagedacht...», Feestbundel ter gelegenheid van de 65ste verjaardag van Professor Baarda, p. 405–421, Delft, Laboratorium voor Geodesie, 1982.

Polak C.H.F.: Recht en administratie. (Recht und Administration). Tijdschrift voor Kadaster en Landmeetkunde, 1954, p. 265–284.

Santema J.H.: Modellen in de wetenschap en de toepassing ervan. Historische en systematische beschouwing vanuit christelijk-wijzigend perspectief. (Modelle in der Wissenschaft und ihre Anwendung. Historische und systematische Betrachtung aus christlich-philosophischer Sicht). Delft, Delftse Universitaire Pers, 1978.

Handleiding voor de technische werkzaamheden van het Kadaster. (Dienststanweisung für die technischen Arbeiten des Katasters). Den Haag, Staatsuitgeverij, 1956.

Adresse des Verfassers:

ir. J.C. Anneveld  
Dienst van het Kadaster en de  
Openbare Registers  
Directie Gelderland  
Postbus 9015  
6800 DT Arnhem  
Niederlande

## Introduction à l'étude des marées terrestres

M. Van Ruymbeke

**Après avoir décrit le phénomène des marées terrestres et ses implications dans l'étude de notre globe terrestre, nous introduisons les trois types d'instruments que sont les gravimètres, les clinomètres et les extensomètres. Une description détaillée d'un circuit électronique adapté à des ponts à capacités variables termine l'article.**

**Einleitend wird das Phänomen der Erdgezeiten beschrieben und dessen Bedeutung für die Erforschung unseres Planeten. Sodann werden die drei dafür eingesetzten Instrumententypen Gravimeter, Klinometer und Extensometer vorgestellt. Den Abschluss bildet eine detaillierte Beschreibung der Elektronik zu einer Brückenschaltung mit veränderlichen Kapazitäten.**

### 1. Les phénomènes de marée

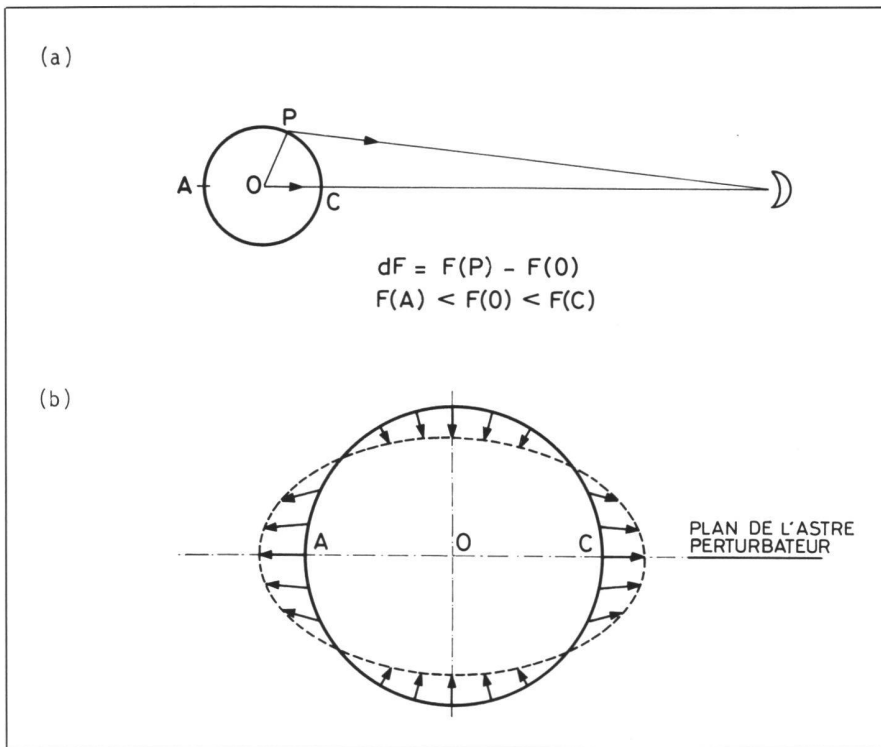
Sur Terre on peut considérer comme liée à la marée une grande variété de phénomènes naturels dont la périodicité dépend des mouvements de la Lune et du Soleil. La plu-

part d'entre eux ont des amplitudes tellement faibles qu'on ne peut les mettre en évidence que par des techniques de mesure très sophistiquées. Il en existe toutefois que l'on peut observer directement. C'est ainsi que sous l'effet des marées le niveau de la mer peut monter et descendre

de plusieurs mètres le long des côtes. Dans certains puits on peut observer des variations de niveau de plusieurs centimètres sous l'effet des variations de volume dans la croûte dues aux marées terrestres. Des phénomènes analogues ont pu être observés dans des lacs de lave. L'activité des geysers, le débit de certaines sources et puits de pétrole sont modulés de la même manière. Historiquement, la première allusion aux marées de la croûte peut être trouvée chez Pline l'Ancien dans son «*Historia Naturalis*». Il note qu'en Espagne il existe des sources situées non loin de la mer dont le débit varie en opposition avec les marées océaniques. Lorsque la marée monte, son débit diminue. Cela est tout à fait normal puisqu'à la marée haute correspond une expansion de la croûte.

On pourra citer ici aussi une liaison entre le déclenchement de certaines éruptions volcaniques et tremblements de terre, et les phases de la Lune (Van Ruymbeke et al., 1982).

Tous ces phénomènes apparemment disparates ont en commun une même cause astronomique liée à la force d'attraction de la Lune et du Soleil.



**Fig. 1: Déformation de la Terre induite par un astre perturbateur**  
**(a) Cet astre exerce une force  $F(P)$  en  $P$  et  $F(O)$  au centre de la Terre. On a un champ de force  $dF$  représenté en (b).**

## 2. Les forces de marée

Dans un système planétaire (Soleil-Terre ou Terre-Lune) il y a un équilibre global entre la force centrifuge et la force gravitationnelle. Toutefois des forces de marée vont apparaître à l'intérieur des corps célestes à cause des inégalités locales entre la force gravitationnelle variable en tout point de l'astre et la force axifuge constante due à la révolution képlérienne. (Melchior, P., 1983)

Comme le montre la figure 1 ces forces auront pour effet de déformer un cercle en une ellipse dont le grand axe coïncide avec la direction de l'astre perturbateur. Il apparaît deux bourrelets de marée opposés. Suite à la rotation de la Terre sur elle-même nous avons donc deux marées par jour. La période principale est de  $12^{\text{h}}25^{\text{m}}$  (onde de marée  $M_2$ ) pour la Lune et de  $12^{\text{h}}$  (onde de marée  $S_2$ ) pour le Soleil. Du fait que les corps perturbateurs ne sont pas dans le plan de l'équateur terrestre, il existe une *dissymétrie entre les deux marées*, faisant ainsi apparaître des ondes diurnes. Le mouvement orbital de la Lune donne naissance à des termes de 13,6 jours ( $M_m$ ) et de 27 jours (onde de marée  $M_f$ ). De façon analogue on observe des ondes de 6 mois ( $S_{sa}$ ) et de 1 an (onde de marée  $S_a$ ) dues au Soleil.

En effet la masse du Soleil est très grande comparée à celle de la Lune mais la distance qui sépare la Terre de ces astres étant également très différente, une évaluation numérique des forces de marée montre que l'effet de la Lune est le double

de celui du Soleil. Lorsque les deux astres sont alignés, ce qui se produit à la nouvelle et la pleine Lune, leurs forces de marée s'additionnent. Elles se soustraient par contre au premier et au dernier quartier. C'est ce qui explique l'importance des phases de la Lune sur l'amplitude des marées. Celle-ci sera trois fois plus grande dans le premier cas que dans le second.

## 3. Marées sur une Terre rigide

Si la Terre était parfaitement rigide les forces de marée ne produiraient aucune déformation du globe et on ne pourrait observer que les variations du champ de pesanteur.

L'intensité de la pesanteur varierait au maximum de 0,25 part pour un million ( $2,5 \text{ micromètres seconde}^{-2}$ ). Pratiquement cela signifie qu'une masse d'une tonne que l'on pèserait au maximum et au minimum de marée verrait son poids varier de 0,25 grammes seulement.

La verticale locale décrirait une ellipse et les inclinaisons maximales ne dépasseraient pas 250 nanoradians.

On parle de marée gravimétrique dans le premier cas et de marée clinométrique dans le second.

## 4. Marées sur une Terre élastique

La Terre se déforme parce qu'elle est élastique. C'est ce qui provoque les bourrelets décrits plus haut. Les déplacements ma-

xima seront de 50 centimètres suivant une direction radiale et de 15 centimètres seulement dans un plan horizontal. Ce sont ces effets et les variations de volume qui les accompagnent qui constituent les marées terrestres proprement dites.

Les déformations affectent à leur tour le champ des forces de marée. Considérons l'instant où la Lune passe au méridien d'un point du globe. La pesanteur diminue à cause de l'attraction de l'astre et puisque la Terre se déforme le point tend à s'éloigner de son centre ce qui réduit la pesanteur d'une quantité supplémentaire qui représente seize pour cent de l'effet gravitationnel direct. Par un raisonnement analogue on pourrait montrer que les oscillations de la verticale sont réduites de trente pour cent.

Les déformations peuvent être calculées avec précision à partir de modèles de la structure interne de la Terre et mesurées par des extensomètres.

Ces changements de forme du globe terrestre modifient les forces d'attraction auxquelles sont soumis les satellites artificiels. Ainsi un satellite évoluant à mille kilomètres d'altitude subit des perturbations d'une amplitude de l'ordre de cinquante mètres. Des phénomènes de résonance se manifestent sur certaines périodes des ondes de marée et pour certaines caractéristiques orbitales. C'est ainsi par exemple que la position du satellite GEOS 2 présentait une perturbation de 300 mètres due à la marée solaire  $S_2$ .

## 5. Marées dans les fluides

L'atmosphère et les océans sont eux-mêmes affectés par les forces de marée. Les mouvements sont très importants dans les hautes couches de l'atmosphère. L'effet prépondérant sur la pression atmosphérique se retrouve à la période de douze heures. L'amplitude de l'onde  $S_2$  atteint 500 micromètre à l'équateur. Par contre l'amplitude de l'onde  $M_2$  ne dépasse pas 25 microbar. Les phénomènes de marées océaniques sont extrêmement complexes. En effet, chaque bassin n'est capable de résonner que sur certaines périodes qui sont fonctions de ses dimensions et de la profondeur. C'est ainsi que le golfe du Mexique et le Tonkin ont un régime de marées diurnes alors que l'Atlantique et la mer du Nord sont à prédominance semidiurne.

Par contre les marées sont négligeables en général en Méditerranée mais elles atteignent une dizaine de centimètres dans l'Adriatique.

## 6. Couplage entre les différents types de marées

Une interaction existe entre les phénomènes de marée terrestre et les marées océaniques. Les masses fluides en mouvement exercent une attraction gravitationnelle en même temps qu'elles déforment la

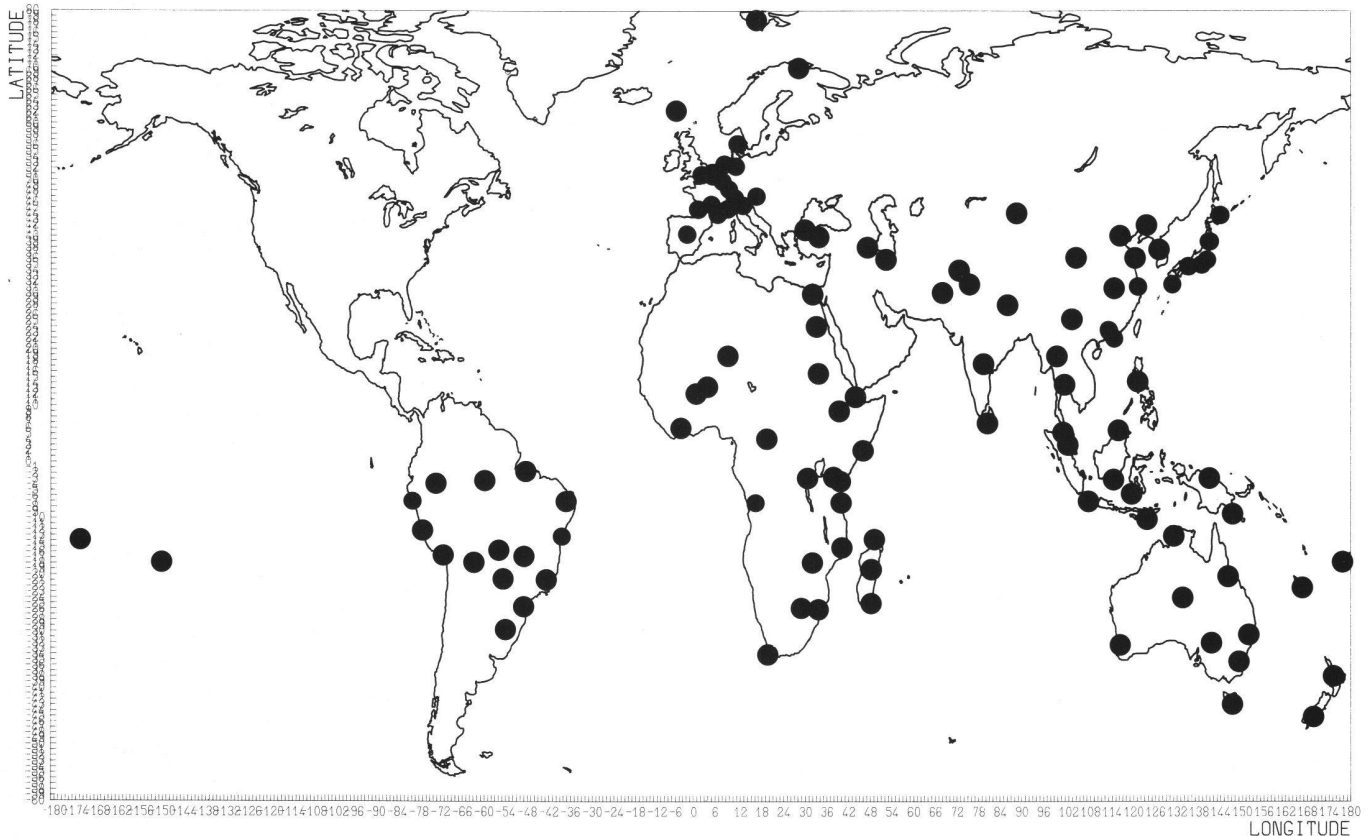


Fig. 2: Profils mondiaux de marée gravimétrique TWP. Positions des stations d'enregistrement occupées de 1973 à 1986.

surface terrestre par effet de surcharge. Ces effets indirects ne peuvent être dissociés du phénomène principal par des mesures car les périodes en jeu sont identiques.

La modélisation des effets indirects d'origine océanique requiert une connaissance de la marée sur l'ensemble des océans sous forme de cartes cotidales. Ces effets peuvent atteindre en amplitude vingt pour cent des phénomènes directs, par exemple plusieurs mètres sur la position des satellites artificiels et plusieurs centimètres pour ce qui est des déformations de la croûte. A titre d'exemple l'extrémité des Cornouailles s'enfonce de 10 centimètres à chaque marée haute.

Il y a 10 ans aucune solution satisfaisante ne pouvait être apportée à ce problème en raison des contradictions existant entre les cartes cotidales proposées par différents auteurs.

C'est ce qui donna une impulsion décisive aux mesures de marée gravimétrique sur une large échelle entreprise sous le nom de Trans World Profiles (TWP) par le Centre International des Marées Terrestres et l'Observatoire Royal de Belgique. Le but était de mesurer directement les effets indirects pour permettre une amélioration des modèles de marée océanique. Commencés en 1973, les TWP comptent déjà plus de nonante stations pour lesquelles on dispose de six mois à un an d'enregistrement

(figure 2). Ils ont déjà permis de démontrer la supériorité des nouvelles cartes cotidales publiées par E.W. Schwiderski (1979). Celles-ci permettent d'évaluer les effets indirects avec une précision permettant de mettre en évidence des anomalies régionales d'origine tectonique qui n'atteignent, elles, qu'un pour cent de l'amplitude de la marée.

La modélisation des effets de marée atmosphérique est assez simple. On peut appliquer aux variations mesurées de la pesanteur une correction globale de 3 nanomètres  $s^{-2}$  par millibar de variation de la pression locale.

## 7. Utilité de l'étude des marées terrestres

L'évaluation des forces de marée et des déformations qu'elles produisent devient indispensable dès que la précision dépasse un certain niveau.

Par exemple, si on recherche la précision du microgal ( $10^{-9}g$ ) dans les mesures absolues de la pesanteur il faut connaître les marées gravimétriques à mieux qu'un demi pour cent.

Dans les mesures de distances réalisées à l'aide des réflecteurs laser installés sur la Lune ou au moyen de grandes bases interférométriques (VLBI) on parle de la précision du centimètre. Cela signifie qu'il faut

assurer une précision de deux pour cent sur les marées de déformation. De même lorsqu'on veut déterminer les positions de satellites artificiels à mieux qu'un mètre, il faut pouvoir corriger des effets dus aux marées terrestres et océaniques à l'échelle mondiale.

En géophysique interne les marées terrestres ne peuvent fournir de modèles détaillés de la structure interne du globe car les observations faites à sa surface sont le résultat d'une intégration du phénomène depuis le centre de la Terre jusqu'à sa surface. En pratique, ce sont les modèles déduits des observations sismiques qui ont permis de calculer la réponse élastique de notre planète.

La contribution principale des marées terrestres dans ce domaine a été de confirmer l'existence dans le spectre des ondes diurnes d'une résonance liée à l'ellipticité du noyau liquide de la Terre. L'étude fine de cette résonance dans des stations permanentes où sont enregistrées toutes les composantes du phénomène devrait permettre de trancher entre différents modèles du noyau et surtout de vérifier la stabilité de l'effet.

En astronomie, les marées terrestres interviennent dans toutes les mesures de position sur la Terre.

Les marées zonales à longue période modifient le moment d'inertie de la planète autour de son axe de rotation diurne et produi-

# Partie rédactionnelle

sent donc des fluctuations de sa vitesse de rotation.

Le freinage séculaire de la rotation de la Terre est produit par les frottements exercés par les marées océaniques, la viscosité de la partie solide du globe étant trop élevée pour expliquer un tel phénomène. L'augmentation de la durée de chaque journée est de 1,6 secondes après 100 000 ans. Cette quantité à première vue négligeable, explique qu'il y a 400 millions d'années, l'année solaire comptait quatre cents jours.

## 8. Instrumentation

Les effets des marées terrestres se mesurent principalement par trois types d'instruments dont les signaux de sortie sont fonction (Ducarme, B., 1973):

- 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).

## 9. Mesures de la marée à l'aide de gravimètres

(Melchior, P., 1971)

La construction de tous les gravimètres répond au principe suivant: opposer à la pesanteur une force constante qui lui est presque égale et mesurer l'appoint.

On a fait appel aux forces élastiques exercées par la force antagoniste d'un ressort auquel une masse est suspendue d'une façon ou d'une autre.

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 dès l'abord quelques remarques qui sont d'application générale pour tous les gravimètres.

1. On doit limiter les dimensions des appareils car il faut réaliser une constance de température de l'ordre de  $0^{\circ}001$ .
2. Assurer une précision de  $10^{-9}$  correspond alors à mesurer des allongements de l'ordre du nanomètre.
3. Afin d'éliminer les variations de la poussée d'Archimède exercée par l'air atmosphérique, on enfermera l'appareillage dans une enceinte étanche.
4. Plus un gravimètre sera sensible, plus la course du ressort assurant sa «zone de mesure» sera restreinte.

Généralement, un gravimètre devra comprendre 2 et parfois 3 ressorts:

- a) un ressort maître qui constitue 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 cette graduation qui donnera la variation de g d'un point à un autre. La graduation est étalonnée en  $\mu\text{gals}$  par comparaison avec des mesures faites en des points où g a déjà été déterminé.

- c) un ressort de changement de zone qui permet de déplacer le fléau lorsque celui-ci est à bout de course.
5. Il y a lieu de pourvoir les fléaux d'un amortissement à air pour éliminer notamment les microséismes.  
Cet amortissement peut être assuré par une palette solidaire du bras et se déplaçant dans un boîtier étroit.

La résolution de ces appareils peut atteindre 0,1 microgal après avoir éliminé l'effet de la dérive instrumentale.

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

La supraconductivité des métaux est 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, après avoir produit avec un aimant un flux magnétique dans un anneau de plomb, on refroidit cet anneau jusqu'à le rendre supraconducteur, et si on éloigne l'aimant, on induit un courant continu permanent dans l'anneau et ce courant peut se maintenir indéfiniment.

Le gravimètre supraconducteur construit en 1968 par Prothero et Goodkind (Univ. Californie) consiste en une sphère supraconductrice de 2,54 cm de diamètre maintenue en «lévitation» dans le champ magnétique d'une paire d'anneaux en niobium, matériau supraconducteur qui produit un gradient de force vertical.

La position de la sphère est détectée par un transducteur de déplacement par pont capacitif qui 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 constituent la mesure des variations de g. Grâce à la stabilité inhérente des courants persistant dans un supraconducteur l'instrument présente peu de dérive et peu de bruit de fond.

La résolution atteint 10 nanogal pour une dérive annuelle après modélisation de quelques microgals.

L'appareil est plongé dans l'hélium liquide à l'intérieur d'un vase de Dewar.

L'appareil ne possède pas actuellement de système d'étalonnage et on procède par ajustement de l'amplitude de l'onde de marée  $M_2$  à la valeur déterminée au même site par un autre gravimètre.

Un tel instrument enregistre la marée à l'O.R.B depuis plus de trois ans. (Ducarme et al., 1985).

## 10. Les clinomètres

Si on redresse l'axe d'un pendule vertical 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 perpendiculairement 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

## 11. Les extensomètres

La figure 3 est une représentation schématique d'un extensomètre horizontal. Les ex-

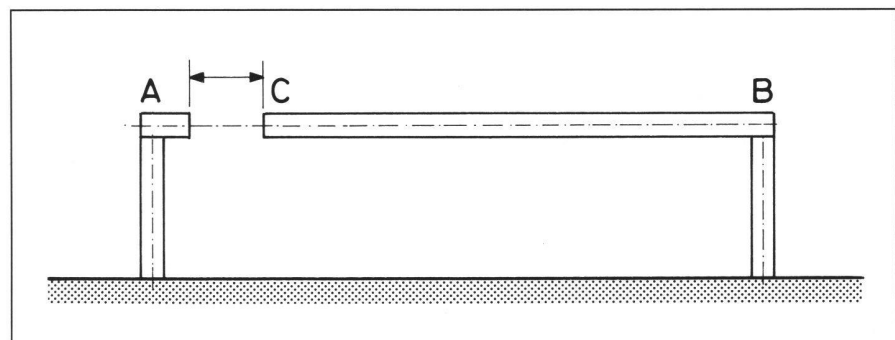
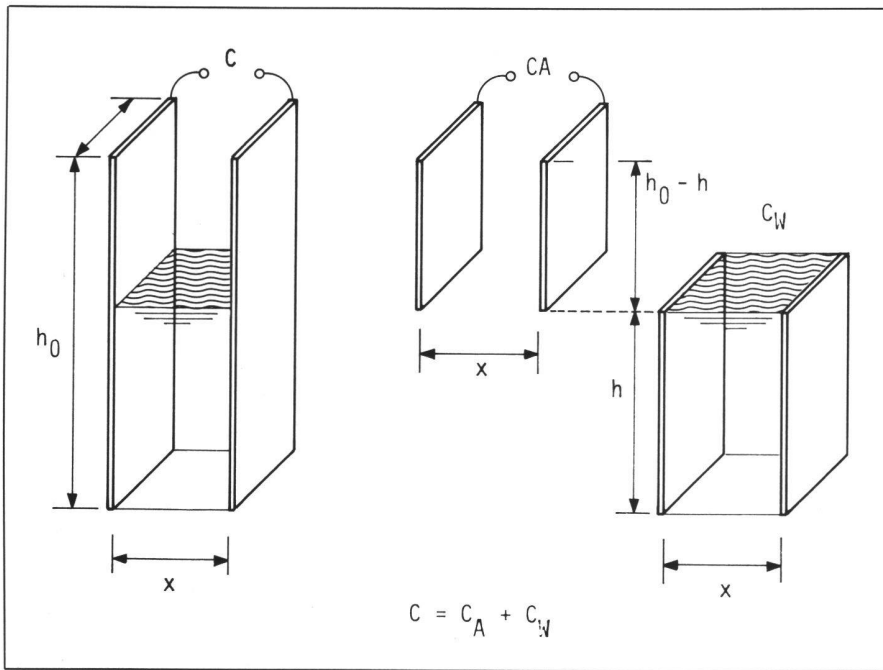


Fig. 3: Schéma d'un extensomètre horizontal.



$C = k (xy / z) = k S/z$  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  $z$ .

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

(a)      (b)      (c)

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. Comme par exemple à la Figure 4. 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 Ruymbek et al., 1985).  
 Notons qu'un volume conducteur de l'électricité correspond à un diélectrique de valeur infinie.

tensions et compressions de la croûte terrestre écartent ou rapprochent les deux ancrages A et B. Les effets sont 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.

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).

## 12. 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 capacités électriques 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

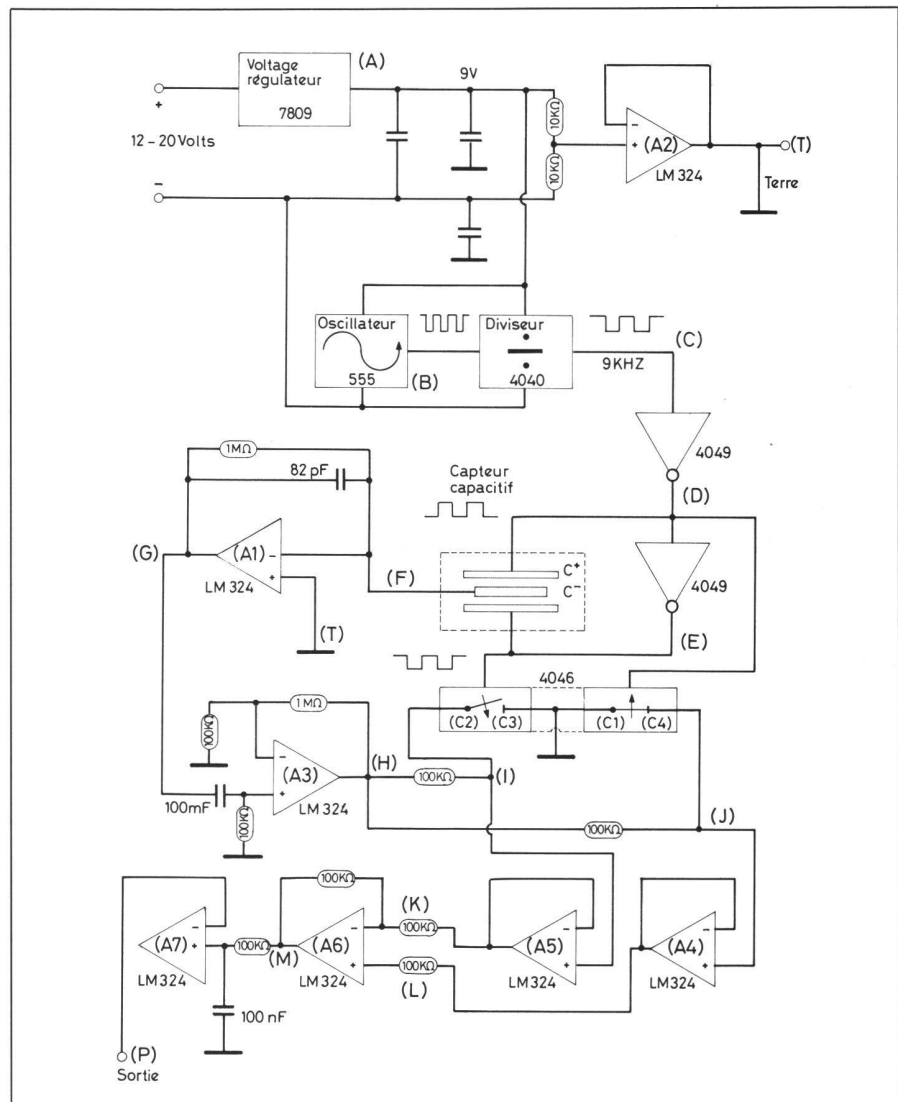


Fig. 5: Principe de l'électronique VRL pour pont de capacités.

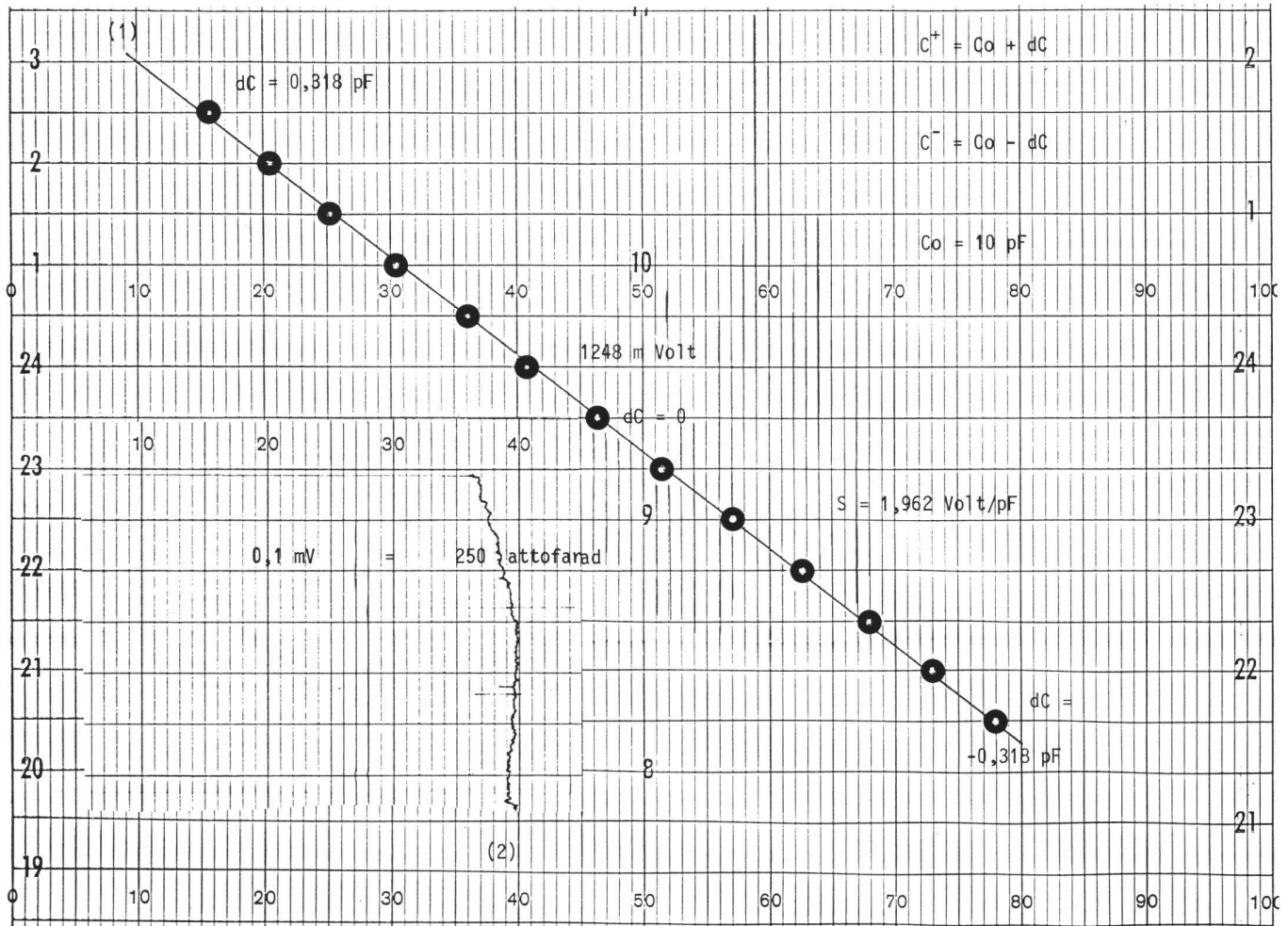


Fig. 6: Enregistrements du signal de sortie de l'électronique VRL placée sur un pont capacitif.

(1) variation de 636 femtofarad ( $63610^{-15}$  farad)

(2) bruit de fond ayant une amplitude inférieure à 10 attofarad ( $1010^{-18}$  farad).

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

La surface est une fonction linéaire de la position angulaire.

(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 pour

$$\frac{dz}{dx} = \frac{dx}{S(c)/S(b)} = x/z$$

( $x$  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 valeurs de  $x$  et  $y$  très supérieures à  $z$  relativement indépendants de celui-ci et n'interviennent que comme une capa-

acité constante en parallèle avec le capteur.

### 13. Mesure en pont des capacités électriques à l'O.R.B.

L'impédance de la capacité étant infinie pour des signaux continus, il nous faut pour faire la mesure utiliser des signaux alternatifs.

Pour des capacités simples, nous employons les deux méthodes suivantes:

- un circuit oscillant dont la fréquence  $f$  change avec la capacité qui modifie les conditions d'une contre réaction,
- la mesure du courant traversant la capacité par amplification de la chute de potentiel aux bornes d'une résistance de faible impédance placée en série dans le circuit.

Pour les cas de ponts de capacités ayant la plaque mobile centrale isolée électriquement, nous avons développé un circuit électronique à très haute résolution (figure

5). Comme il convient à la plupart des capteurs, nous en donnons une description détaillée.

L'alimentation électrique doit être flottante et peut varier entre 12 et 20 volts que le régulateur 7809 stabilise à 9 volts (A).

L'oscillateur 555 attaque le diviseur 4040 afin de disposer d'un signal carré (C) de 9 volts d'amplitude et d'une fréquence de 9 kilohertz.

Ce signal est inversé à deux reprises (D) et (E) afin d'alimenter en opposition de phase le pont capacitif ( $C^+$ ,  $C^-$ ) par deux signaux produits dans les mêmes conditions. A la sortie de ce transducteur le signal (F) est envoyé à l'entrée (-) d'un amplificateur opérationnel (A1) dont l'entrée (+) est à un potentiel de terre (T) produit de façon active à partir d'un pont de deux résistances de 10 kohm suivi d'un amplificateur à gain unité (A2) raccordé à la terre du système.

A la sortie de (A1) le signal (G) varie de sorte qu'au travers de la résistance de 1 Mohm et de la capacité de 82 picofarad la différence de voltage aux entrées de (A1) soit nulle. Cela permet entre autre de

garder constantes les forces électrostatiques générées dans le capteur. Après filtrage et amplification par (A3), le signal (H) est envoyé au travers de deux résistances de 100 kohm aux amplificateurs (A4) et (A5). Un détecteur de phase qui est constitué de deux paires d'interrupteurs électroniques montés en parallèle (C2, C3) et (C1, C4) alimentés respectivement par (D) et (E), annule alternativement durant une demi alternance les signaux (I) et (J). Un amplificateur (A6) fait la soustraction (M) de deux signaux (K) et (L), qui sera intégrée dans un filtre passe bas avant d'être amplifiée vers la sortie (P) par (A7). Ce circuit VRL n'utilise pas de transformateur et a une dynamique très large (Figure 6).

Son alimentation par une batterie 12 V standard le rend indépendant du réseau électrique. Sa fréquence de travail relativement basse (9 khertz) permet de ne pas devoir isoler le capteur des perturbations radioélectriques et évite de perturber l'environnement.

Ce circuit convient pour des capteurs dont les capacités varient entre 10 et 100 picofarad. Si la distance  $z$  entre les plaques est de 1 mm, la dynamique permet de détecter des déplacements  $dz$  de 1 nanomètre. Dans des bandes passantes étroites, un

mouvement de  $10^{-10}$  mètre est détectable. Ce circuit est très petit et peut être installé à l'intérieur des instruments. Un moulage sous résine diminue le bruit de fond d'un facteur important.

## 14. 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 ainsi que Mr. Ch. Poitevin qui a réalisé la carte du profil mondial.

### Bibliographie:

Cai Weixin, Van Ruymbeke, M., Tan Shiling: Extensomètre en quartz de très haute précision construit en collaboration par la Chine et la Belgique. *Croûte terrestre & Séisme*, Vol. 4, No 2, pp. 1-28 Inst. Seism. du Bur. Etat de Séism., Wuhan, Chine 1984.

Ducarme, B.: Problèmes instrumentaux liés à l'enregistrement et à l'analyse des phénomènes de Marées Terrestres, Diss. doctorale. U.C.L., 1973.

Ducarme, B., Van Ruymbeke, M., Poitevin, C.: 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.

Flick, J., Van Ruymbeke, M., Melchior, P.: 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.

Melchior, P.: *Physique et Dynamique planétaire*. Volume 2, Gravimétrie, Vander éditeur, 1971.

Melchior, P.: *The Tides of the Planet Earth*. Pergamon Press, 1983.

Schwiderski, E.W.: On charting global ocean tides. *Rev. Geophys. Space Phys.* 18, 1980.

Van Ruymbeke, M., Ducarme, B., De Becker, M.: Confirmation of the tidal influence on the Alaska-Aleutian earthquakes. XVIII Assembly Eur. Seism. Comm., Leeds, August 23-27, 1982, Vol. 2, pp. 388-402, Potsdam.

Van Ruymbeke, M., Delcourt, M.: A capacitive transducer for water level measurements: «Nivocap». *Proc. 10th Int. Symp. on Earth Tides*, Madrid Sept. 23-27, 1985.

Adresse de l'auteur:

Dr. M. van Ruymbeke  
Département I, Section Géodynamique  
Observatoire Royal de Belgique (O.R.B.)  
3, Avenue Circulaire, B-1180 Bruxelles

ZOLLITOPF



## Der Vollautomat



Die Totalstation Et-1 ist das Flaggschiff einer kompletten Gerätefamilie für die computerunterstützte und millimetergenaue Vermessung. Reichweiten von bis zu 2600 m, elektronische Winkelmessung, berührungsfreie Bedienung, automatische Kompensation der Erdkrümmung und externe Datenspeicher sind nur einige der vielen Rosinen.

Für Qualität, Präzision und praxismgerechte Konstruktion bürgt der Name: TOPCON. Verlangen Sie die Beweise:



WEIDMANN+SOHN

Abt. Präzisionsinstrumente  
Gustav-Maurer-Strasse 9  
8702 Zollikon, Tel. 01-39152 62

Für alles die richtige Optik