

Chaîne de contrôle et d'acquisition pour instruments géodynamiques

François BEAUDUCEL *

Institut de Physique du Globe de Paris, Dpt Sismologie, Lab Mécanique des Roches

Ernest DEPAUW

École Centrale des Arts et Métiers, Bruxelles

Michel VAN RUYMBEKE

Observatoire Royal de Belgique, Bruxelles

Avant-propos

Parmi les Sciences de la Terre, la géophysique est une discipline assez jeune qui cherche à comprendre tous les phénomènes naturels dynamiques — internes et externes — de la Terre et des autres planètes grâce aux sciences physiques. Elle étudie les structures sur toutes les échelles (du micromètre au globe tout entier) : l'observation y a donc une place privilégiée, et elle demande parfois des appareillages extrêmement sensibles sur une très large échelle de mesure. Regroupant des matières aussi diverses que la sismologie, la tectonique, la géodynamique spatiale, la mécanique des roches, le magnétisme, la volcanologie,... c'est une science pluridisciplinaire faisant appel aux techniques les plus évoluées.

Mise à part la sismologie qui bénéficie de très gros moyens de développement grâce au marché pétrolier, l'instrumentation géophysique n'est que rarement industrialisée et la plupart des matériels sont conçus par le laboratoire de recherche lui-même et fabriqués en très petite quantité.

Fondé en 1823, l'Observatoire Royal de Belgique (O.R.B.) a tout au long de son histoire eu des activités scientifiques couvrant de nombreux domaines; et ce, dans l'Europe et dans le monde. Ses activités actuelles se rapportent à l'astronomie, la mécanique céleste, l'astrophysique, la radio-astronomie, la physique solaire, la statistique stellaire, la géodynamique et la géodésie spatiale.

Outre les multiples collaborations avec les centres scientifiques étrangers, l'Observatoire est depuis 1973 chargé de la direction du Centre International des Marées Terrestres (coordination des observations de marées terrestres dans le monde) à la demande de l'Union Géodésique et Géophysique Internationale. Il réalise de ce fait une entreprise unique : un profil mondial consistant à mesurer en chaque point choisi et pendant une période de six mois, les caractéristiques de la marée. Au département "géodynamique et astronomie de position", section

* Ingénieur Électricité – Électronique de l'École Centrale des Arts et Métiers de Bruxelles. Titulaire d'un Diplôme d'Études Approfondies de Géophysique Interne à l'Université Paris 7 et actuellement conseiller scientifique et technique auprès du *Volcanological Survey of Indonesia* à Bandung (Java, Indonésie).

gravimétrie et marées terrestres, on retrouve un laboratoire d'électronique à la source de nombreuses innovations dans le domaine de l'instrumentation géodynamique de précision. A sa tête, le D^r Michel Van Ruymbeke — dont la réputation internationale dans ce milieu n'est plus à faire, anime une équipe très dynamique de chercheurs et techniciens au sein de laquelle ce travail de fin d'études a été effectué.

Introduction

Soumis principalement à l'influence de l'attraction de la Lune et du Soleil, le globe terrestre se déforme élastiquement, produisant ainsi une marée du sol — pouvant atteindre 50 centimètres par endroit — deux fois par jour, assez similaire à celle de la mer. Détecter et mesurer cette marée “terrestre” exige cependant des instruments extrêmement sensibles et précis : gravimètres, pendules horizontaux¹ et verticaux. Les gravimètres se prêtent particulièrement bien à une forme de “prospection” des interactions entre les marées océaniques et les marées terrestres. Un gravimètre est constitué essentiellement d'un balancier suspendu par des ressorts de précision et enfermé dans un boîtier maintenu à température rigoureusement constante ($50^{\circ}\text{C} \pm 0.002^{\circ}$). Installé en site fixe, dans un observatoire, le gravimètre enregistre en continu les variations temporelles de la pesanteur dues aux forces de marées résultant des mouvements respectifs de la Lune, du Soleil et de la Terre dans l'espace. Les déformations engendrées par les marées terrestres et océaniques et en particulier les effets réciproques du poids des marées océaniques sur la croûte terrestre et, inversement, de la marée terrestre sur le fond des océans, perturbent considérablement le mouvement orbital des satellites artificiels. Il est donc important d'injecter ces effets dans les calculs d'orbites, et donc de les modéliser. Cela ne peut se faire qu'à partir de mesures précises et homogènes, pratiquées sur toute la surface de la Terre. Ainsi, plusieurs centaines de stations temporaires de mesures ont été installées en Asie (dont 9 en Chine), Australie, Pacifique Sud, Afrique et Amérique du Sud.

En outre — et c'est un procédé tout à fait exclusif — les mesures de variations de gravité permettent de détecter des changements de répartition de masse à l'intérieur d'un édifice volcanique et deviennent ainsi un outil de surveillance et de modélisation.

La précision atteinte par un gravimètre est habituellement de 10^{-8} g (10 μgal) pour un appareil délicat à manipuler et coûtant plus de 50,000 \$! Il est généralement conçu pour délivrer ses résultats sur des graphiques par voie mécanique et / ou optique; mais la gestion informatisée des mesures incite à le munir d'un système d'enregistrement **numérique**. Il faut ainsi transformer les grandeurs physiques délivrées par l'instrument en un signal électrique (tension ou fréquence) modulée par la grandeur physique recherchée, puis en faire l'acquisition numérique. Les lieux de mesures sont aussi divers de par leurs emplacements géographiques que par leurs conditions météorologiques; un système de transmission radio des résultats n'est pas toujours possible, et la maintenance des appareils est de toute manière indispensable. Le système d'acquisition doit donc être non seulement fiable et performant “sur le terrain”, mais aussi autonome (faible consommation, capacité de stockage,...) et disposant d'une référence temporelle absolue.

¹ Un pendule horizontal, ou “inclinomètre”, quantifie les variations d'inclinaison du plan de mesure, grâce à un balancier fixé à l'une de ses extrémités et suspendu horizontalement à l'autre. Entièrement réalisé en silice (afin d'annuler toutes déformations thermiques), il permet une précision de l'ordre du centième de microradian. Il détecte ainsi la composante horizontale des déformations dues à la marée terrestre.

Description du projet dans son contexte

Le problème de l'enregistrement des données est donc un point crucial. Les anciens systèmes sont composés de convertisseurs en tension électrique et de tables traçantes, mais la gestion informatique des données oblige à encoder manuellement les points de mesure, et incite à abandonner ces méthodes. Au cours des deux dernières décennies, l'amélioration des systèmes d'acquisition a suivi — avec toujours une certaine inertie — l'évolution des techniques digitales, et l'on y retrouve deux grandes tendances :

- l'utilisation d'un PC et de son environnement *software* et *hardware* (réseau *IEEE 488* par exemple). Ce type de réalisation offre une grosse capacité de stockage, la souplesse d'utilisation, les possibilités d'extension; mais l'encombrement est élevé et la “robustesse” est faible sur le terrain.

- la conception d'une carte autour d'un micro-contrôleur présente un encombrement et une consommation minimales, mais la mise au point est coûteuse et le système n'est pas facile à faire évoluer. Cette approche se justifie dans le cas d'applications très spécifiques et produits en grand nombre d'exemplaires.

Vers la fin de l'année 1988, la firme Atari présente sur le marché le *Portfolio*, compatible PC “de poche” équipé d'un lecteur de carte-mémoire “flash” (au format carte de crédit) jusqu'à 256 Ko de capacité, constituant un *drive* ultra-rapide. De très petite taille (20 x 10 x 2 cm environ) et muni d'un écran graphique de 240 x 64 pixels, il ne coûte pas plus de 10 000 BEF. Utilisé dans une chaîne d'acquisition, il est le fruit du compromis souplesse d'utilisation / encombrement / prix et bien qu'appelé à être rapidement dépassé par la technique toujours croissante, il constitue aujourd'hui un intérêt certain pour les applications de l'Observatoire.

Dans le but d'apporter une contribution décisive aux systèmes de contrôle et d'acquisition des instruments géodynamiques “lents”², l'O.R.B. m'a donc proposé deux pôles de travail relativement indépendants :

- concevoir et réaliser un système d'acquisition multi-canaux sur PC portable, souple à utiliser et à maintenir, autonome, de grande dynamique et respectant les exigences temporelles (stabilité à long terme) et de précision des mesures. Spécialement adapté au *Portfolio*, il permettra l'acquisition de données sur tout appareil géodynamique servant à la mesure des marées : gravimètres bien sûr, mais aussi marégraphes, pendules, extensomètres, thermomètres...

- étudier un système de détection capacitive sur gravimètre en vue de sa transformation en système à contre-réaction électrostatique (asservissement). Le gravimètre délivrera alors un signal modulé en fréquence, directement connectable à la carte d'acquisition.

La technique d'intégration par compteur

Si les méthodes de conversion analogiques / numériques font l'objet de développements électroniques poussés — pour l'industrie de l'audio-vidéo par exemple — il n'en reste pas moins qu'il faut toujours, d'une manière générale, rechercher la ou les méthodes les mieux adaptées au

² Par opposition aux appareils de sismologie, qui mesurent des phénomènes jusqu'à 100 Hz — voire 10 kHz en sismique pétrolière — et demandent donc une acquisition rapide.

projet en cours; le plus récent des C.A.N., rapide et performant n'est pas nécessairement la solution optimale en termes technico-économiques.

Une des méthodes les plus anciennes de conversion A/N est la mesure de fréquence par comptage du nombre de pseudo-périodes contenues par le signal pendant un temps donné. Si le signal d'entrée est modulé en tension, on fabrique cette fréquence par un oscillateur commandé (*Voltage to Frequency Converter*). Présentant l'inconvénient majeur d'être lent et d'offrir une précision dépendante du temps de comptage et de la fréquence mesurée, ce principe est pourtant parfaitement adapté aux signaux de très longue période.

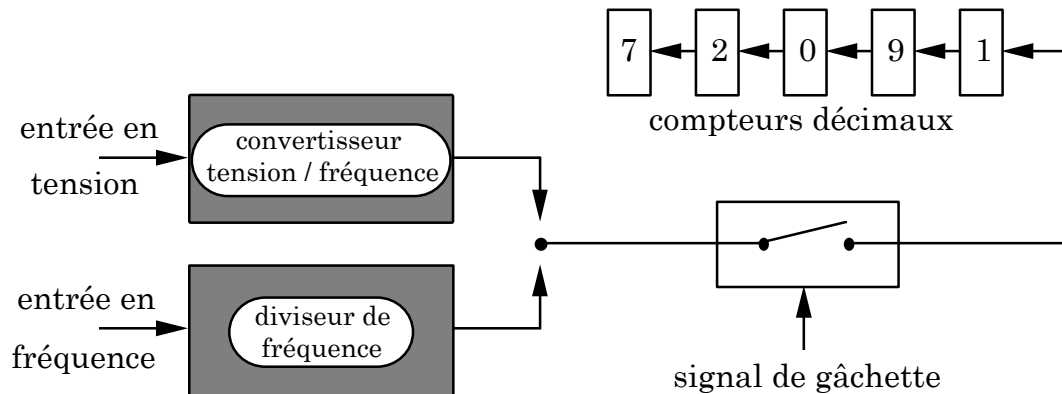


Figure 1. Schéma de principe d'un fréquencemètre à compteur. Le signal d'entrée est "transformé" en impulsions qui activent une cascade de bistables pendant un temps déterminé par le signal de gâchette.

L'interprétation fine des mesures demandent un filtrage des nombreux bruits indésirables; la présence de bruits basse fréquence³ oblige à abandonner les solutions offertes par les filtres analogiques. Or le comptage sur un temps suffisamment long traduit justement un filtre numérique à haute réjection aux bruits.

Soient le signal $s(t)$, image des variations de la grandeur physique que l'on veut mesurer, modulant la fréquence d'une porteuse alternative (signal carré par exemple); on peut montrer très simplement que le contenu du compteur après un temps T bien connu, est égal à

$$\int_T s(t) dt \text{ à } \pm 1.$$

Si ce n'est l'arrondi provoqué par ce résultat entier, le compteur est donc image parfaite de l'**intégrale définie** du signal $s(t)$. Équivalent à une moyenne — en divisant ce résultat par la constante T — ou encore une décimation, la fonction de transfert du système est donc un sinus cardinal, représenté dans un diagramme de Bode à la figure 2.

La méthode constitue donc intrinsèquement un véritable filtre "passe-bas" qui, en atténuant considérablement les fréquences supérieures à $1/T$, permet d'assurer le filtre anti-aliasing indispensable à l'échantillonnage en aval du traitement.

Grâce à cette méthode simple et au coût dérisoire, on réalise donc deux opérations fondamentales :

- filtrage très **sélectif** des bruits indésirables;
- conversion analogique / numérique **parfaitement linéaire**, sur une grande dynamique.

³ Périodes fondamentales des principaux signaux "parasites" rencontrés : 2.5 et 6 secondes (micro-séismes), 12 s (battements thermiques), 18 s (séismes).

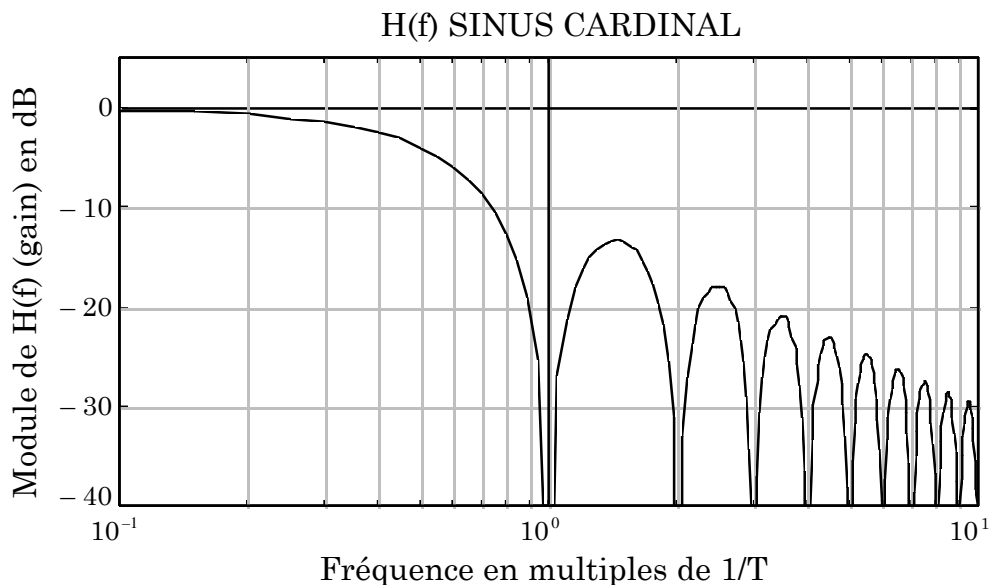


Figure 2. Fonction de transfert du calcul de moyenne : gain du système à compter en fonction de la fréquence du signal modulant. On remarque les atténuations infinies pour toutes les périodes multiples de $1/T$.

Réalisation d'une carte multi-canaux évolutive

Faute de documentation technique sur le *bus* du *Portfolio*, et dans le but de laisser libre l'interface série du PC — afin d'y connecter un modem par exemple — la gestion de la carte a été faite sur le port parallèle⁴. L'élaboration de la carte d'acquisition fut assez classique; construite autour d'un *bus* de commandes et de données, chaque canal est multiplexé et constitué d'un compteur 5 digits *BCD* à sortie 4 bits *3-state* (haute impédance). On peut en résumer les caractéristiques :

- pour chaque canal : mesure de signaux modulés en fréquence par intégration sur 100 000 points. Un diviseur de fréquence permet une mesure “fond d'échelle” pour une porteuse de 3.4 kHz à 28 MHz. L'adaptation d'une entrée en tension, autorise la mesure de signaux jusqu'à 3 V, et rend ainsi le système compatible avec les anciens appareils.
- nombre de canaux extensible par modules de 8, jusqu'à 64 maximum (simple mise en parallèle des connexions).
- période d'échantillonnage de 60 secondes. Intégration sur 59 secondes, contrôlée (signal de gâchette) par une horloge externe à quartz qui synchronise régulièrement celle du PC⁵.

⁴ L'interface parallèle d'un PC comporte 8 sorties mais aussi 5 entrées pour “dialoguer” avec une imprimante.

⁵ Sur les premiers prototypes, le contrôle du temps d'intégration se faisait par logiciel, sur base de l'horloge interne du PC. La synchronisation à long terme était assurée par le *bip* sonore horaire d'une montre externe. L'apparition d'une gigue importante (environ 0.003 %) nous a fait abandonner cette méthode.

Le programme d'acquisition interactif

La partie *hardware* fut limitée à son strict minimum; le contrôle de l'électronique (initialisation compteurs, multiplexage) a ainsi été affecté au logiciel. Écrit en *Turbo C*, celui-ci réalise toutes les opérations indispensables à une utilisation rapide et conviviale :

- lancé par simple initialisation du PC, il détecte automatiquement les canaux non-utilisés et configure la carte d'acquisition. L'utilisateur peut sélectionner ou imposer la fréquence d'échantillonnage (une ou dix minutes).

- les valeurs de chaque canal sont affichées en permanence, ainsi que les valeurs différentielles. Un graphique des dernières 24 heures permet la visualisation des mesures sélectionnées.

- le nom du fichier de données est attribué par le programme selon un code propre à l'Observatoire.

- les données sont compressées sur la carte-mémoire, à raison d'environ 1 octet par mesure et par canal⁶.

- les fichiers peuvent être "décompressés" par un second logiciel sur PC, autorisant ainsi les traitements graphiques et numériques, et l'archivage.

Structuré en plusieurs procédures, on peut si nécessaire ajouter au logiciel d'acquisition des traitements annexes sur les données, à condition que ceux-ci ne dépassent pas 50 secondes de calcul.

Mesure des performances du système

La dynamique du système ne se limite pas à 100 000 points : les compteurs peuvent saturer plusieurs fois, et connaissant l'ordre de grandeur de la mesure, on retrouve aisément la valeur absolue du signal. Le choix du diviseur de fréquence permet alors d'ajuster l'échelle des données.

L'apparition inévitable d'une gigue ("*jitter*") sur le contrôle du temps d'intégration induit une erreur sur l'acquisition de la mesure. Pour quantifier cette erreur, on connecte un oscillateur très stable à 1 000 004 Hz sur l'une des entrées en fréquence (division la plus faible — facteur 2), on fait ainsi saturer le compteur 295 fois, pour n'observer qu'une variation d'une unité. On détermine par conséquent le bruit à court terme du système, comme étant l'erreur relative sur la détermination de la fréquence mesurée :

$$\frac{Df}{f} = 3.4 \cdot 10^{-8}.$$

A long terme, l'effet de la température sur le quartz se fait sentir, et l'on obtient une dérive diurne (local non thermostaté) de 6 unités de compteur environ : $2 \cdot 10^{-7}$, ce qui est acceptable pour les applications demandées. En outre, certains laboratoires d'observation utilisent des locaux à température constante pour les instruments de mesure; le système d'acquisition y trouvera avantageusement sa place, travaillant ainsi en conditions optimales de précision.

Les entrées en tension sont caractérisées par la linéarité du convertisseur. Une mesure en laboratoire donne une non-linéarité inférieure à $3 \cdot 10^{-5}$, ce qui confirme les spécifications du constructeur. D'autre part, le bruit engendré par le système est d'environ 10^{-5} (100 dB de dynamique), ce qui une fois de plus convient tout à fait à notre application.

⁶ l'algorithme de compression, développé spécialement pour cette application, permet par exemple sur le *Portfolio* une autonomie de 50 jours pour une mesure toutes les 10 minutes sur 8 canaux, avec une carte de 64 Ko. Sur un PC portable classique, une disquette de 1.44 Mo permettrait 3 ans d'autonomie pour les mêmes spécifications.

Le prix de revient du système *Portfolio* complet s'élève globalement à 20 000 BEF pour 8 canaux (il faut compter 1 000 BEF de composants par module de 8 canaux supplémentaires).

Interfaces analogiques pour capteurs capacitifs

L'intérêt d'un système d'acquisition numérique par comptage, prend toute sa signification lorsque les appareils de mesure délivrent directement — et sans intermédiaire — une sortie modulée en fréquence. Un exemple frappant est l'utilisation du capteur d'humidité relative de *VALVO*⁷; présenté sous forme d'une petite capacité variable très bon marché, sa réponse $\Delta C = f(\text{HR})$ est non-linéaire mais connue. Une fois inséré dans un simple oscillateur RC à inverseurs numériques, on obtient un signal carré modulé sur une plage choisie de fréquences. Un élémentaire traitement numérique sur les données acquises permettra alors la détermination de l'humidité relative ambiante.

Depuis une dizaine d'années, le laboratoire du D^r Van Ruymbeke s'attache plus particulièrement à développer (ou à adapter) des capteurs capacitifs. Sur un gravimètre, où la lecture optique est difficile et obligatoirement manuelle, la construction d'un capteur assure une **automatisation** de l'instrument, et donc une **continuité** de la mesure. Pour cela, on place autour de la partie mobile deux plaques conductrices; le balancier est mis à la masse et constitue donc le point milieu d'une double capacité variable de seulement une dizaine de picoFarad⁸ — voir figure 3.

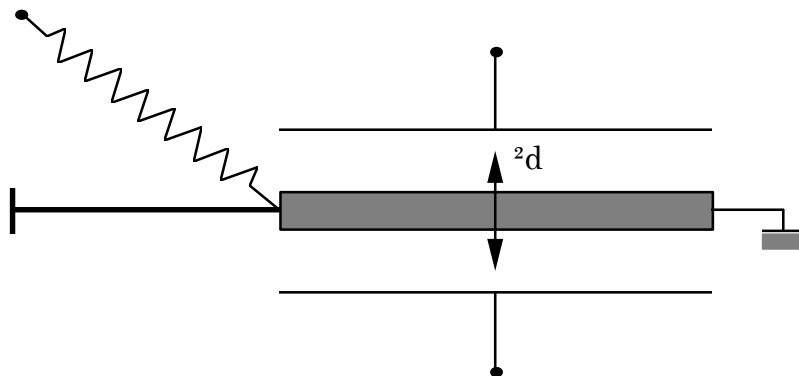


Figure 3. Schéma simplifié de la mise en place d'une double capacité à point milieu autour du balancier du gravimètre.

La mesure très fine de ces variations peut se faire de deux manières :

- par un pont capacitif et démodulation synchrone : on obtient ainsi une tension proportionnelle au déplacement Δd de la partie mobile⁹;
- par modulation de phase symétrique (grâce à un OU exclusif), la tension obtenue par mélange puis filtrage est cette fois proportionnelle à la capacité d'un des côtés.

Quelque soit la solution adoptée, la construction d'un bouclage électrostatique ("*feedback*") permet l'**asservissement** du gravimètre : le principe est d'appliquer une force variable sur la masse mobile, et ainsi maintenir le balancier à une position fixe centrale. La linéarité devient quasi-parfaite et la dynamique de mesure ne dépend plus que de la puissance de cette rétroaction.

⁷ Capteur distribué par la firme *Philips*.

⁸ 1 pF = 10^{-12} F.

⁹ Dans le cas idéal d'un condensateur plan infini.

La mesure de l'excitation électrostatique permet de connaître avec précision les “tentatives” de mouvement du balancier. La méthode “M.V.R.” (*Maximum Voltage Retroaction*) consiste à appliquer toute la force électrostatique (plusieurs centaines de volts) instantanément, dès la détection d'un mouvement infime de la partie mobile. Une maquette de laboratoire a ainsi été développée. Le réglage fin des composants du circuit a permis un hystéresis¹⁰ de seulement environ $15 \cdot 10^{-15}$ F.

Une fois le bouclage électrostatique réalisé, le produit numérique du signal de contrôle du *feedback* avec une horloge stable, génère une fréquence modulée en “tout ou rien”, qui, connectée au système d'acquisition mesure le **taux** d'application de la force sur l'une des deux plaques, c'est-à-dire les déplacements du balancier, et donc les variations de gravité terrestre.

Conclusions

La mesure et l'acquisition des données d'observations géophysiques et un vaste domaine en perpétuelle évolution. Contrairement à l'industrie, le développement de l'instrumentation géophysique n'est motivé que par le désir d'approfondir toujours plus la connaissance de notre Terre, et — à plus court terme — l'amélioration des conditions de travail sur le terrain; en ce sens, il n'y pas de “cahier des charges”. Les besoins sont pourtant réels et le présent travail démontre qu'il est possible de mettre au point des électroniques performantes et peu onéreuses.

Au cours de cette étude, plusieurs systèmes d'acquisition complets ont été réalisés et mis en fonctionnement sur des instruments géodynamiques dans plusieurs observatoires : à l'Université de Saõ Paulo (2 canaux *Portfolio*) — Brésil; aux laboratoires souterrains de Lanzarote : “Cueva de los Verdes” (16 canaux PC *Toshiba*) et “Jameos del Agua” (8 canaux PC *Schneider*) — îles Canaries; à Mons (8 canaux *Portfolio*) et au barrage de La Gileppe (8 canaux PC *Toshiba*) — Belgique.

Par la suite, l'O.R.B. a fait réaliser industriellement quelques exemplaires de la partie “hardware” en *Surface Mounting Technology* et les maquettes de laboratoire ont ainsi été remplacées. D'autres systèmes PC ont alors été installés : deux sur l'Etna — Sicile; un supplémentaire à Lanzarote et un au Chili.

Il existe encore de très nombreux observatoires (en volcanologie surtout) où les mesures sont faites sur papier ou au mieux, sur de vieilles machines lentes et encombrantes. Il est clair qu'aujourd'hui, la demande en systèmes de contrôle et d'acquisition des appareillages géodynamiques est élevée et loin d'être totalement rassasiée.

¹⁰ ou “*dead band*”. Ici, zone de mesure (intervalle de capacité) où la commutation s'effectue différemment suivant le sens du déplacement.