

La Thermométrie Géophysique à l'ORB de 1970 à nos jours

M. VAN RUYMBEKE¹, J. RASSON², G. TUTS¹

¹Observatoire Royal de Belgique

²Institut Royal Météorologique

Mesures thermiques au laboratoire de géodynamique de Walferdange

Introduction

La précision atteinte dans les laboratoires, de géophysique nécessite l'étude de tout Paramètre pouvant altérer les résultats des mesures.

A cet égard les influences thermiques doivent être considérées comme primordiales lorsque la période des phénomènes enregistrés dépasse les temps de relaxation thermique des composants employés...

L'intérêt porté à la thermométrie de précision répond aux questions soulevées par le Prof. P. Melchior, concernant l'enregistrement de certains effets induits par les marées terrestres. Dès 1970, de nouvelles techniques électroniques ont remplacé peu à peu les outils mécaniques et photographiques. Les sciences de l'observation des phénomènes naturels s'en trouvèrent bouleversées. Le calcul numérique se développa avec l'apparition d'ordinateurs capables de maîtriser les volumes d'informations nécessaires aux problèmes abordés. Des effets considérés comme négligeables devinrent synonymes de limites de précision.

Les précisions nécessaires aux interprétations théoriques requéraient le développement de méthodes originales. Cela a justifié notre intérêt pour la thermométrie adaptée à la quête des signaux les plus ténus. Seule la variabilité de la température est utile à nos recherches. Les périodes en jeu couvrent un spectre très large compris entre quelques secondes et plusieurs années.

Grâce à notre expertise qui fait l'objet de cet article, nous avons pu accepter de collaborer à la mise au point d'un capteur thermométrique à embarquer sur un satellite d'observation solaire.

Etablissement de profils thermiques dans une galerie de la mine de Walferdange (Grand-Duché de Luxembourg)

La galerie d'accès au laboratoire géophysique (Fig. 1) a une longueur de 700 mètres pour une couverture de roche maximale de 100 mètres. De plus, la couche de gypse est enfermée entre deux couches de matériaux imperméables qui entravent totalement toute circulation d'eau dans la galerie. Dans de telles conditions, ce site peut être considéré comme très bien protégé des effets climatologiques.

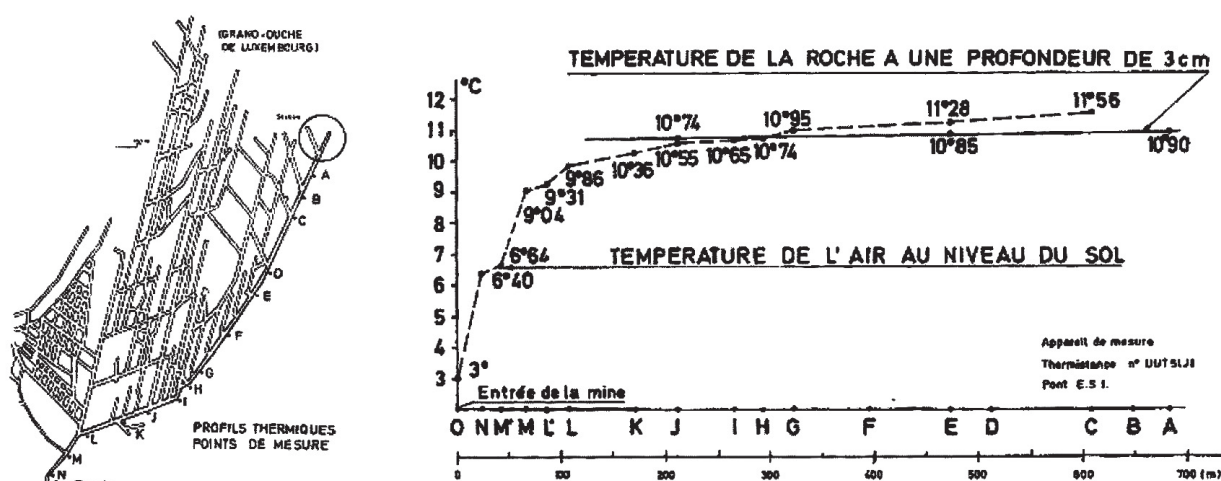


Fig. 1 Plan du réseau de galeries de Walferdange et graphique des profils thermiques réalisés le 10 novembre 1971, à 3 cm dans le sol et dans l'air.

* Article publié dans le Bulletin de la Société Royale Belge d'Astronomie, de Météorologie et de Physique du Globe "Ciel et Terre" Vol. 122, N° 2, Mars-Avril 2006, et repris dans le BSG avec l'amiable autorisation de l'auteur.

Afin d'observer l'amplitude réelle de l'atténuation des fluctuations thermiques saisonnières, nous avons réalisé une série de profils d'une quinzaine de points de mesure. La sonde utilisée comportait une thermistance de très bonne stabilité dans le temps et de grande résistivité pour minimiser les effets de dissipation par effet Joule. Les mesures sont prises à 3 cm de profondeur dans la poussière des remblais.

On réalisa en complément un profil de la température de l'air qui confirma l'existence d'une convection naturelle induite probablement par l'inclinaison de la galerie.

La comparaison des profils sur une année (Fig. 2) démontre qu'il n'y a plus d'effet significatif à 200 m de l'entrée.

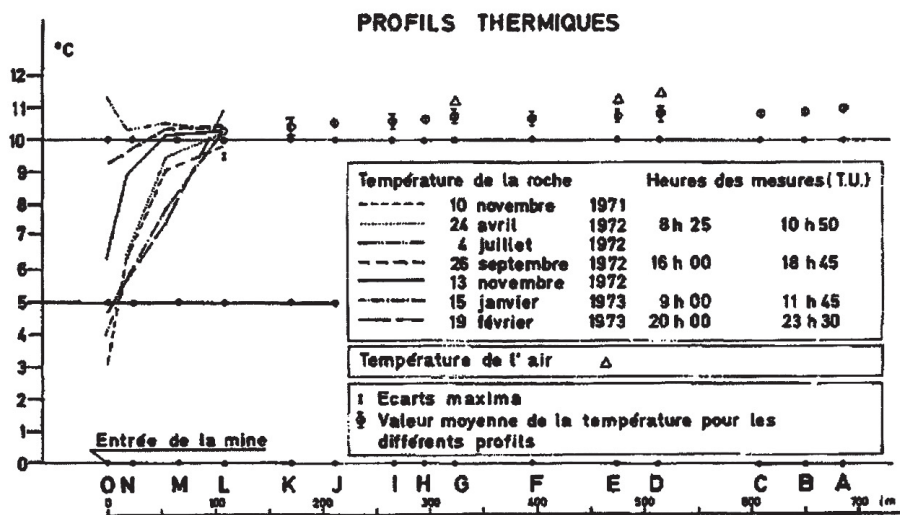


Fig. 2 Série de sept profils thermiques dans le sol.

Etude des variations thermiques diurnes et semidiurnes

Cette problématique prit une très grande importance dans les observations de marées terrestres car les périodes liées aux rythmes circadiens (24h) sont communes aux inductions gravitationnelles et climatologiques. Ces composantes, qui contribuent à la composition du spectre des marées, ne peuvent pas être séparées! La seule issue consistera à minimiser au mieux l'impact thermique. Il en est de même pour les variations de la pression atmosphérique qui présentent une composante persistante ayant une périodicité de 12 heures, à laquelle s'additionnent des variations erratiques. En milieu souterrain, la température ambiante ne sera plus influencée par la climatologie extérieure, alors que les effets de variation de la pression atmosphérique continueront de se manifester, induisant des variations adiabatiques de la température. Afin de mieux maîtriser la situation, un travail métrologique dédié à la thermométrie s'organisa au sein de l'ORB.

Un jeune chercheur participa pour son mémoire de licence [Rasson, J., 1977] à ce projet en se fondant sur les expériences en cours dans l'ancienne mine de Walferdange (Grand-Duché de Luxembourg) qui

abrite l'un des plus célèbres laboratoires de géodynamique. Citons quelques extraits de son rapport de travail :

« Ces instruments (gravimètres, clinomètres, extensomètres) sont astreints à mesurer des grandeurs extrêmement petites... »

On devra pouvoir apprécier une variation inférieure à 10^{-9} de g, à 0,1 nanoradian et à 1 nanomètre ! ... En raison de leur grande dimension, les extensomètres sont les plus sensibles aux variations de température.

On a vu que l'on était loin de leur assurer la stabilité du dix millième de degré. Il est donc nécessaire de pouvoir faire des corrections. Nous proposons de mettre parallèlement au cylindre extensométrique une barre d'aluminium dont on comparera en permanence la longueur à celle du cylindre par les techniques de mesure de micro-déplacements actuellement au point. Le prototype d'un tel thermomètre a déjà été construit. Il comparait la longueur (7 cm) d'une barre d'aluminium à celle d'un cylindre d'invar. On obtenait une résolution du millième de °C. Le dix-millième serait donc aisément atteint avec une pièce de 26 m ».

On retrouve ainsi le principe du thermomètre « mercure » dont les changements de volume microscopiques se lisent sur la longueur de la colonne qui occupe un capillaire de section infime.

En conclusion, les expansions thermiques, malgré leur petitesse, restent non négligeables lorsqu'on observe, en milieux souterrains, des phénomènes géodynamiques.

Ceci concerne les perturbations des signaux par des inductions d'origine thermique. Une situation inverse apparaît lorsque les phénomènes observés induisent eux-mêmes les variations de température. Analysons l'origine physique de ce type de mécanisme.

Etude des phénomènes géophysiques par l'observation des transferts d'énergie

La géophysique est l'application des lois physiques à l'environnement terrestre. Elle couvre de multiples domaines tels que la météorologie, la sismologie, la vulcanologie, l'étude des marées terrestres et océaniques, etc. Il est important d'approcher les origines de tous ces phénomènes physiques par le concept de l'énergie.

L'énergie est une grandeur caractéristique d'un système et marque sa capacité à effectuer un travail. Tous les phénomènes physiques sont générés par des facteurs énergétiques, sous forme d'un transfert ou d'une transformation d'énergie sous une ou plusieurs autres formes.

Citons l'énergie mécanique (potentielle ou cinétique), l'énergie électrique (avec plus particulièrement le comportement des électrons), l'énergie rayonnante (lumineuse ou sonore), l'énergie thermique (les transferts ou les pertes et gains de chaleur, effet Joule), les énergies chimique et nucléaire.

Le principe général de conservation de l'énergie est particulièrement intéressant pour l'étude et l'enregistrement des phénomènes géophysiques : en effet, l'énergie peut se transformer d'une forme dans une autre, mais aussi se décomposer sous plusieurs formes. L'énergie totale d'un système isolé reste cependant constante. Si le système n'est pas isolé, tout apport d'énergie au système augmente l'énergie de celui-ci. A l'inverse, un tel système peut libérer de l'énergie vers le milieu extérieur et aboutir à un état de plus faible énergie. L'évolution spontanée d'un système non isolé tend vers un état d'énergie minimale.

Intéressons-nous particulièrement à l'énergie thermique, laquelle accompagne un grand nombre de phénomènes géophysiques. La chaleur est, comme nous venons de le rappeler, une forme d'énergie, susceptible d'être échangée entre deux corps. L'échange de chaleur se manifeste entre autre par la modification de la température. Cette dernière est une propriété thermodynamique du corps et mesure l'agitation de la matière correspondant à un des états énergétiques du corps. Elle se mesure en kelvin (K) défini légalement comme la 273,16^e partie de la température thermodynamique du point triple de l'eau. Le zéro de cette échelle correspondrait à la température d'un corps d'énergie nulle. Cet état n'est évidemment pas accessible!

Pour mesurer la chaleur, nous utilisons principalement une des propriétés spécifiques des corps, dans certaines plages d'utilisation caractéristiques des conditions d'expérience. Il n'est par exemple pas possible d'utiliser un thermomètre à dilatation de mercure dans un volcan lorsque la température avoisine les 1000°C !

Mise en place de l'expertise thermique au sein de l'ORB

La grande diversité des situations rencontrées par l'ORB, lors des observations géophysiques, a nécessité l'élaboration d'un système de métrologie propre à ses besoins. Rappelons que dans notre approche, la première partie d'un instrument est généralement constituée d'éléments de l'environnement naturel subissant les effets à étudier. Cette spécificité nous amena à la mise en place d'un concept défini en 1993, par l'acronyme EDAS pour « Environmental Data Acquisition System ». L'arrivée récente de collègues européens dans ce projet justifia de le convertir en « European Data Acquisition for Scientists » [van Ruymbeke, M. & al., 1997a].

Définissons notre approche des éléments de la chaîne de mesure. Celle-ci se compose généralement d'un corps d'épreuve subissant l'effet d'une ou plusieurs mesurandes (nom donné aux paramètres observés). Un conditionneur transforme l'énergie captée par le corps d'épreuve, en un signal électrique enregistrable par un système d'acquisition de données. Le traitement de ces données par un logiciel adapté permet de préparer les graphiques et les tables à inclure dans le rapport de l'expérience.

Le système conçu à l'ORB privilégie l'uniformisation des chaînes de mesure. Le choix des

paramètres à observer et des corps d'épreuve mis en place restent à l'initiative du scientifique, ce qui justifie le « for Scientists » dans l'acronyme EDAS.

La standardisation est effective au niveau des conditionneurs, des signaux, des fichiers, des alimentations et de la présentation des résultats. Les signaux sont modulés en fréquence afin de disposer par comptage d'un signal résultant de l'application d'un filtre intégrateur rejetant les variations de courte période [Rasson, J., 1978] [van Ruymbeke, M. & Ducarme, B., 1978]. Le signal digital de sortie des compteurs est ensuite stocké par un système d'acquisition de données équipé de mémoires électroniques qui permettent de sauvegarder les informations avant le transfert vers un Pc. Le choix des noms de fichiers lors de l'archivage et du pré-traitement des enregistrements se fait de façon standard par un logiciel nommé MGR. Celui-ci comporte entre autre une procédure de traitement par « *stacking* », dénommé HICUM, qui permet d'extraire, pour une période déterminée, un signal de faible amplitude dans un environnement très « bruité » [van Ruymbeke, M. & al., 2003]. On sélectionne la période du « *stacking* » soit par le nom conventionnel de la composante sélectionnée suivant les conventions des études de marées, soit par l'argument de Doodson correspondant [Melchior, P., 1978], soit par sa durée. Cette méthode est linéaire et donc aisément applicable pour des recherches de tendances statistiques après application de tris des données suivant divers paramètres. Le logiciel MGR permet pour une périodicité déterminée de comparer simultanément par exemple, la présence d'un effet significatif dans des signaux d'un gravimètre, dans des positions données par un GPS et dans le contenu d'un catalogue sismique. Les graphiques obtenus pour deux histogrammes distincts, en mode de Lissajous, présentent les fonctions de corrélation comme le feraient des courbes paramétrées. On observera en priorité les périodes solaires S1 & S2, lunaire M2 et N2 ainsi que les périodes de battement telles que O1, P1, Mf, SAA, etc. Certaines présenteront uniquement des effets gravitationnels, tandis que d'autres sont composées de diverses inductions.

Le système EDAS est disponible grâce à un mode de production robotisé. Il offre un côté didactique indéniable. Citons par exemple, pour enregistrer de manière continue des paramètres météorologiques tels la température de l'air à l'intérieur ou à l'extérieur, la pression atmosphérique, la pluviosité, la luminosité, etc. De plus, comme nous l'avons indiqué, le système est validé par de nombreuses expériences dont quelques-unes sont décrites plus loin.

EDAS est peu coûteux, ouvert et extensible vers de nouvelles applications. Il est simple de compréhension et ne nécessite pas de compétences exceptionnelles. De tels systèmes enregistrent de par le monde et ce souvent dans des conditions très difficiles. Citons comme exemples, le sommet d'un volcan, un fond marin, une zone géothermale à plus de 200°C, une galerie de grotte saturée d'eau, un laboratoire pédagogique d'université, etc. Il constitue une solution pour les besoins scientifiques qui ne peuvent être rencontrés par les produits commercialisés, généralement conçus pour des demandes en très grand nombre.

Une part importante de EDAS se focalise sur la thermométrie de haute résolution. Nous avons privilégié des capteurs passifs n'influençant pas trop le milieu ambiant, avec le maximum de résolution et de stabilité ainsi que des petits temps de réponse.

Suivant les contingences, deux techniques sont envisagées dans notre approche utilisant soit les modulations de capacité électrique, soit celles de résistance électrique.

Avant d'aborder en détail l'utilisation des résistances variables avec la température (thermistances), décrivons un exemple de thermomètre à capacité variable.

Thermomètre capacitif pour la mesure de faibles variations, à très haute température

L'ORB a construit un thermomètre permettant de mesurer les petites variations de température à une température de plus de 300°C dans une zone géothermale située sur le site de Timanfaya (île de Lanzarote, Canaries) (Fig. 3).

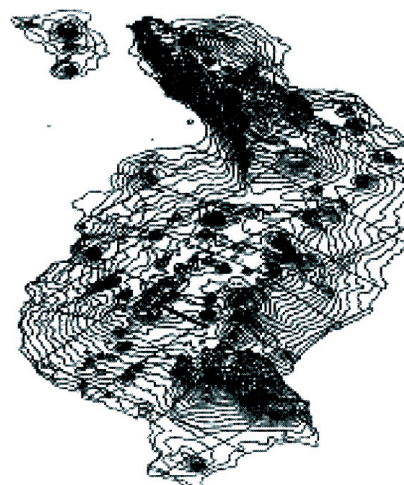


Fig. 3 Site de Timanfaya.

Ce thermomètre (*Fig. 4*) est constitué de trois parties métalliques coaxiales. Le cylindre intérieur, qui est plein, est introduit dans un tube, lui-même placé dans un autre tube qui sert de boîtier extérieur. Le cylindre intérieur et le cylindre intermédiaire sont les deux armatures d'une capacité dont la valeur est mesurée de manière continue par un oscillateur électronique. Les cylindres sont séparés par un fil d'amiante afin de minimiser la distance entre eux tout en évitant le risque de contact électrique. Lorsque la température est supérieure à 150°C, les circuits électroniques seront placés à une distance suffisante dans une zone protégée. La grande surface des armatures et la très faible distance qui les sépare permettent de disposer d'une capacité de plusieurs nanofarads et ainsi d'ignorer les capacités parasites

des câbles entre le capteur et son interface, qui sont négligeables. Le système est mis dans le sol. Le cylindre extérieur suit les variations de température ambiante tout en protégeant le thermomètre des effets du milieu environnant (par exemple, les mouvements du sol). Le tube intérieur étant constitué d'une grande quantité de matière, il présente une inertie thermique très supérieure au tube intermédiaire. La différence de temps de réponse des diamètres des cylindres intermédiaire et intérieur modifie par conséquent la capacité. Des systèmes EDAS basés sur ce principe enregistrent en continu, depuis 1995, la variation de température du milieu sur le site de Timanfaya [van Ruymbeke M. & al., 1997b].

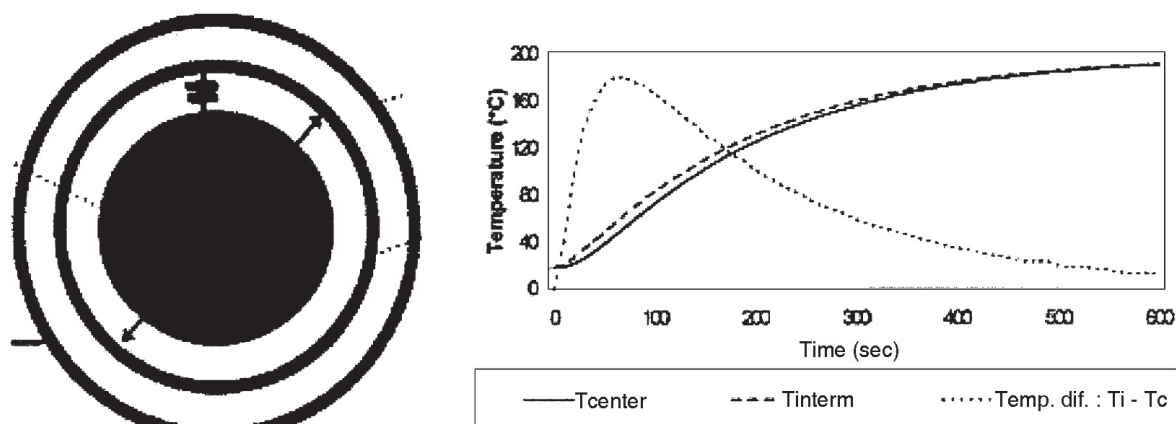


Fig. 4 (A gauche) : Section droite des cylindres constituant le thermomètre : cylindre intérieur plein (1^{ère} armature de la capacité) ayant une température T_{center} , cylindre intermédiaire (2^{ème} armature de la capacité) ayant une température T_{interm} et cylindre extérieur de protection ayant la température ambiante à observer. La capacité électrique entre les deux armatures sera une fonction de la différence de température ($T_{interm} - T_{center}$).

(A droite) : Le graphique montre les variations de T_{interm} & T_{center} pour un échelon de 160°, ainsi qu'une courbe amplifiée de la différence ($T_{interm} - T_{center}$).

Mesures Thermiques par changement de résistance électrique

Travaillant avec et pour des scientifiques qui souhaitent connaître les variations d'énergie d'un système, nous privilégions de mesurer des variations avec une résolution maximale. Nous pouvons mesurer de très petits changements grâce à l'utilisation de thermistances bien caractérisées par leur fonction de transfert.

Une expérience permettant de fixer les possibilités limites accessibles avec les thermistances eut lieu en 1977, à Walferdange [van Ruymbeke, M. & al., 1998]. Nous avons placé le thermomètre et ses interfaces électroniques à un mètre de profondeur dans un forage situé dans le fond d'une galerie.

Après un an de stabilisation, une variation artificielle de température de 13 microkelvins (*Fig. 5*) fut générée par un échauffement induit par un courant appliqué pendant quelques minutes. Le graphique montre que le niveau du bruit sur le signal correspond à quelques microdegrés près et que le retour à l'équilibre du thermomètre après l'interruption de la chauffe ne présente pratiquement pas d'hystérésis.

Si on dispose de thermomètres dans des forages en communication avec des aquifères, on peut enregistrer simultanément le niveau de l'eau et sa température (*Fig. 6*).

Nous avons constaté que l'apparition de bulles de gaz crevant la surface de l'eau s'accompagnait généralement d'une augmentation de la température.

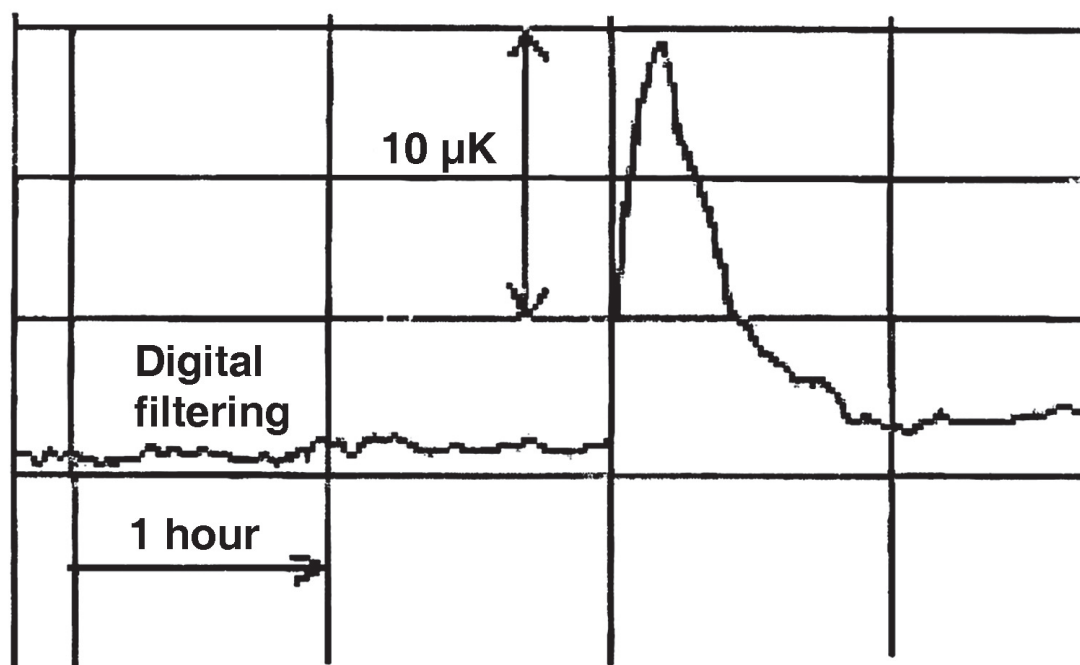


Fig. 5 Enregistrement à Walferdange, par le thermomètre équipé d'un pont de thermistances, d'une variation de température de 13 µK. Le site d'installation est le fond d'un forage d'un mètre de profondeur dans le gypse de la mine en bout de galerie.

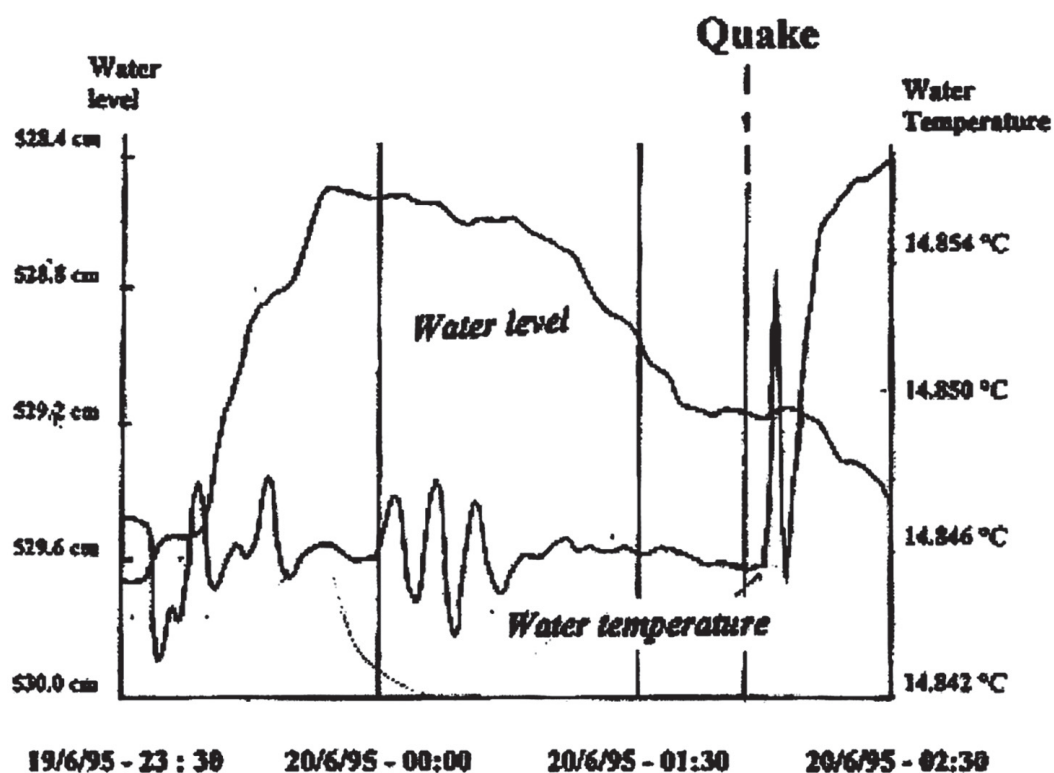


Fig. 6 Enregistrements simultanés du niveau d'eau et de la température dans un puits situé à la Faculté Polytechnique de Mons. L'échelle de gauche correspond au niveau d'eau (4mm par division) et celle de droite à la température (4 millidegré par division). On notera les variations thermiques induites par un tremblement de terre (quake) de magnitude 4,5 sur l'échelle de Richter situé à une distance de 13km du puits.

Ceci expliquerait l'augmentation de la température après la secousse sismique qui aurait libéré des bulles de gaz dans le fond du puits! Le déphasage de 6 minutes entre le séisme et la signature thermique proviendrait ainsi du délai nécessaire au transfert des bulles vers la surface.

Un autre exemple d'application de la thermométrie à la surveillance du mouvement de fluides fut mis en œuvre lors d'une éclipse totale de Soleil en 1994 [van Ruymbeke, M. & aL, 1998].

Un réseau EDAS, composé de plus de trente instruments de mesure, a été déployé au Brésil à cette occasion autour d'une station de gravimétrie et de clinométrie. On a ainsi pu observer les effets du passage de l'ombre de la Lune sur la pression atmosphérique, l'humidité, la luminosité et la température. Ayant à notre disposition des biologistes au centre de Pato Branco (Parana) qui nous a accueillis, nous avons profité de l'occasion pour expérimenter un capteur thermique placé dans les racines d'un eucalyptus (Fig. 7).

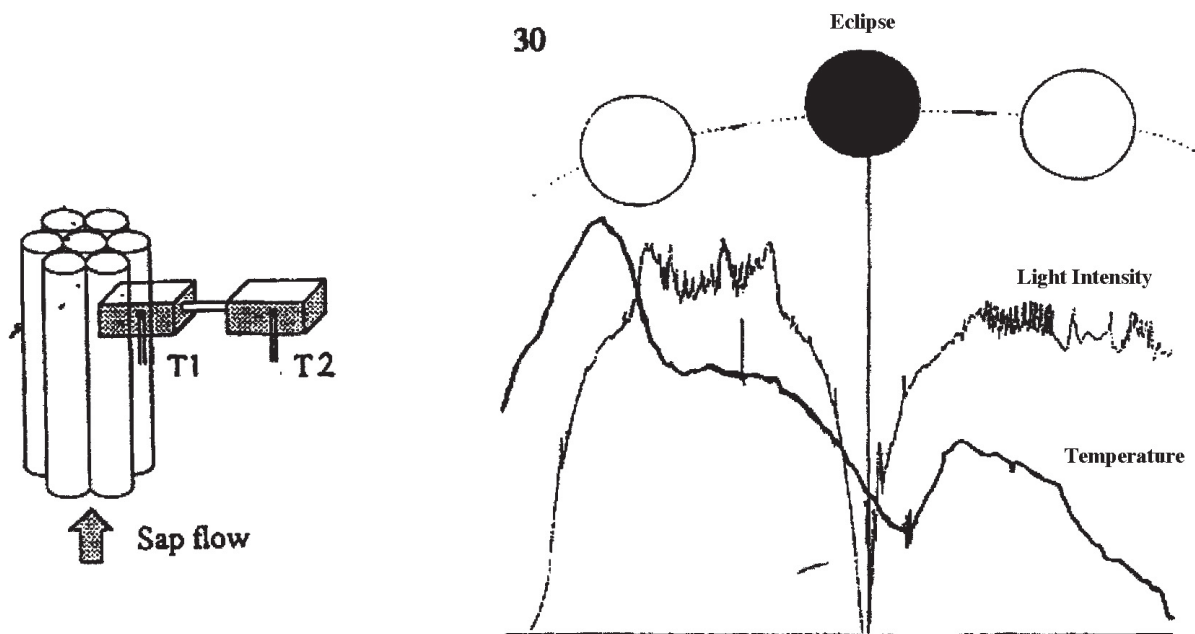


Fig. 7 (A gauche) : Modèle des deux masses dont les températures respectives sont T1 et T2. L'effet convectif de la sève agit sur T1 qui à son tour agit sur T2. Le signal repris sur le graphique est la différence entre T1 et T2. Après un délai suffisant, T1 et T2 se retrouvent à une même température et le signal revient à zéro! (A droite) : On observe simultanément les effets induits par l'éclipse sur la luminosité et sur la température enregistrée dans la racine de l'eucalyptus. Il apparaît une corrélation entre ces deux phénomènes. Notons l'existence d'un certain décalage entre les variations de luminosité, et celles en relation avec la signature thermique liée à l'évapotranspiration.

L'apport de chaleur venant du sol dépend de la vitesse d'écoulement de la sève. Si l'évapotranspiration se modifie, une variation de la convection induit une signature thermique. Des mesures différentielles ont été réalisées à l'aide de deux thermistances montées dans une configuration en pont. Un gradient de température apparaît. La masse supportant T2 réagira avec retard aux variations de T1. La différence entre les deux thermistances se comporte comme un filtre passe-bande entre quelques minutes et quelques heures de périodes.

Lors de cette expérience, un capteur d'humidité relative placé à l'intérieur du feuillage de l'arbre présenta un signal semblable à celui placé dans la racine.

Cette expérience démontre l'aptitude de la thermométrie à observer en continu des fluctuations de circulation de fluide induites par l'évapotranspiration. Notre capteur, par son placement dans le sol, est protégé d'effets climatiques importants qui influencent peu la température de la racine.

Si on ne dispose pas de gradient de température permettant de mettre en évidence la signature thermique des flux de fluides, une autre approche pour la mesure de vitesse d'écoulement consiste à comparer les températures en deux points situés de part et d'autre d'un point de chauffe. Cette méthode classique permet grâce à nos senseurs différentiels très sensibles, d'enregistrer des vitesses d'écoulement très faibles.

Un prototype du système EDAS a permis d'étudier les limites d'application de ce principe. Le capteur (Fig. 8) se compose de deux masses métalliques reliées entre elles par une petite baguette.

Les deux masses et la baguette sont composées de cuivre thermiquement conducteur ($K=1,10 \text{ W/cm}^\circ\text{C}$).

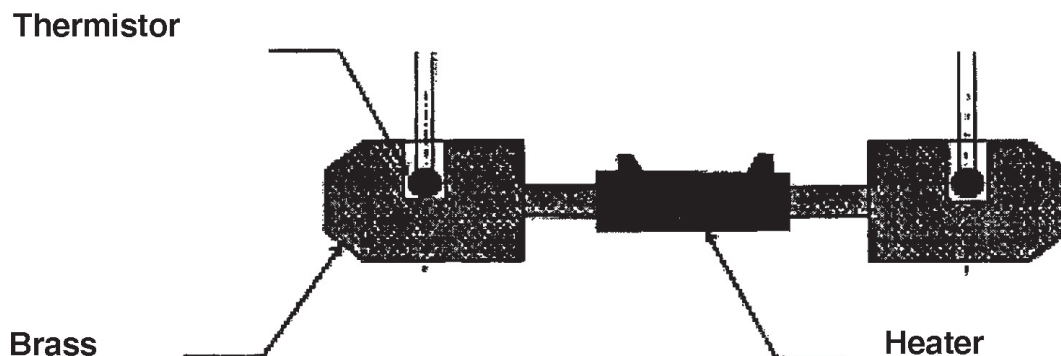


Fig. 8 Capteur d'observation de micromouvements de fluide. Les deux masses placées aux extrémités sont équipées de thermistances permettant de mesurer la différence de température entre celles-ci. L'axe qui relie les masses, agit comme un shunt thermique qui annule l'écart de température entre elles. Au centre de celui-ci, un élément chauffant injecte une certaine quantité de chaleur. Les deux masses subissent le même échauffement. Si ce système est plongé dans un fluide en mouvement, la convection va modifier cette situation et une des masses recevra plus d'énergie que l'autre en fonction de la vitesse qui influe ainsi sur la convection.

Cela permet à long terme d'assurer un équilibre thermique. Deux thermistances NTC de précision, enrobées de composant siliconé pour le transfert de chaleur, sont introduites dans les trous des masses. Ces thermistances sont branchées sur une interface

électronique EDAS qui donne un signal fonction de la différence de température [van Ruymbeke, M. & al., 1997a]. Lorsque nous plaçons ce dispositif dans un fluide en mouvement, les températures en divers points du pont thermique se modifient (Fig. 9).

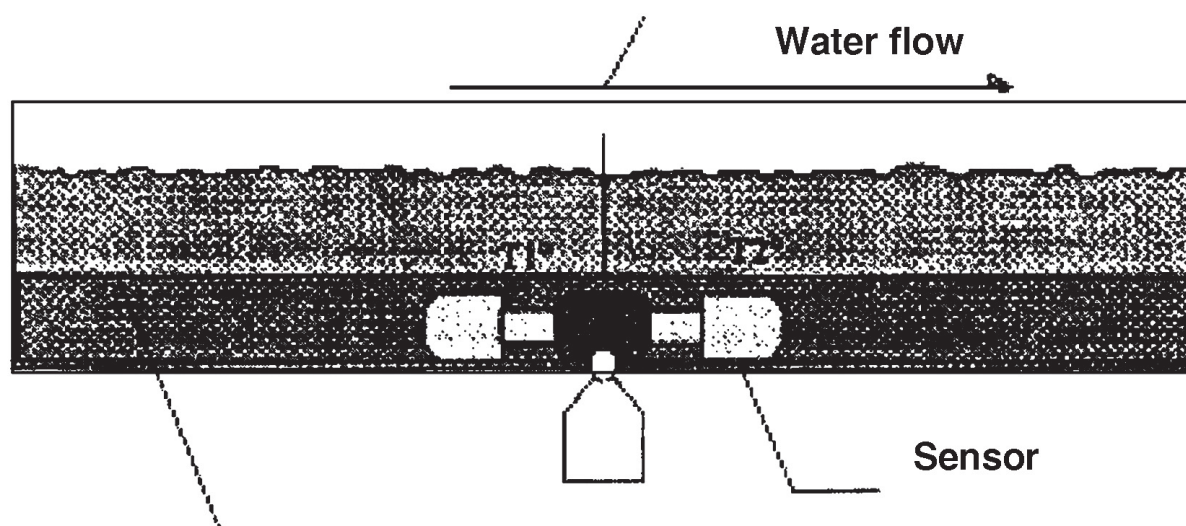


Fig. 9 Supposons que l'eau circule suivant la flèche, autour de notre dispositif. Elle refroidit la masse contenant la thermistance T1. Inversement, l'eau provenant de l'élément chauffant accroît la température de la masse contenant la thermistance T2. La différence de température ($T2 - T1$) reflète ainsi la vitesse d'écoulement de l'eau.

Une estimation des capacités des capteurs a été faite en utilisant un outil spécifique constitué d'une boîte contenant un mélange de fin gravier et d'eau qu'on incline grâce à un excentrique (Fig. 10).

Ceci permet de simuler pour divers types de matériaux, des mouvements de fluide.

On a une situation comparable à celle rencontrée dans des études de la percolation des eaux de pluie dans des couches de sous-sol.

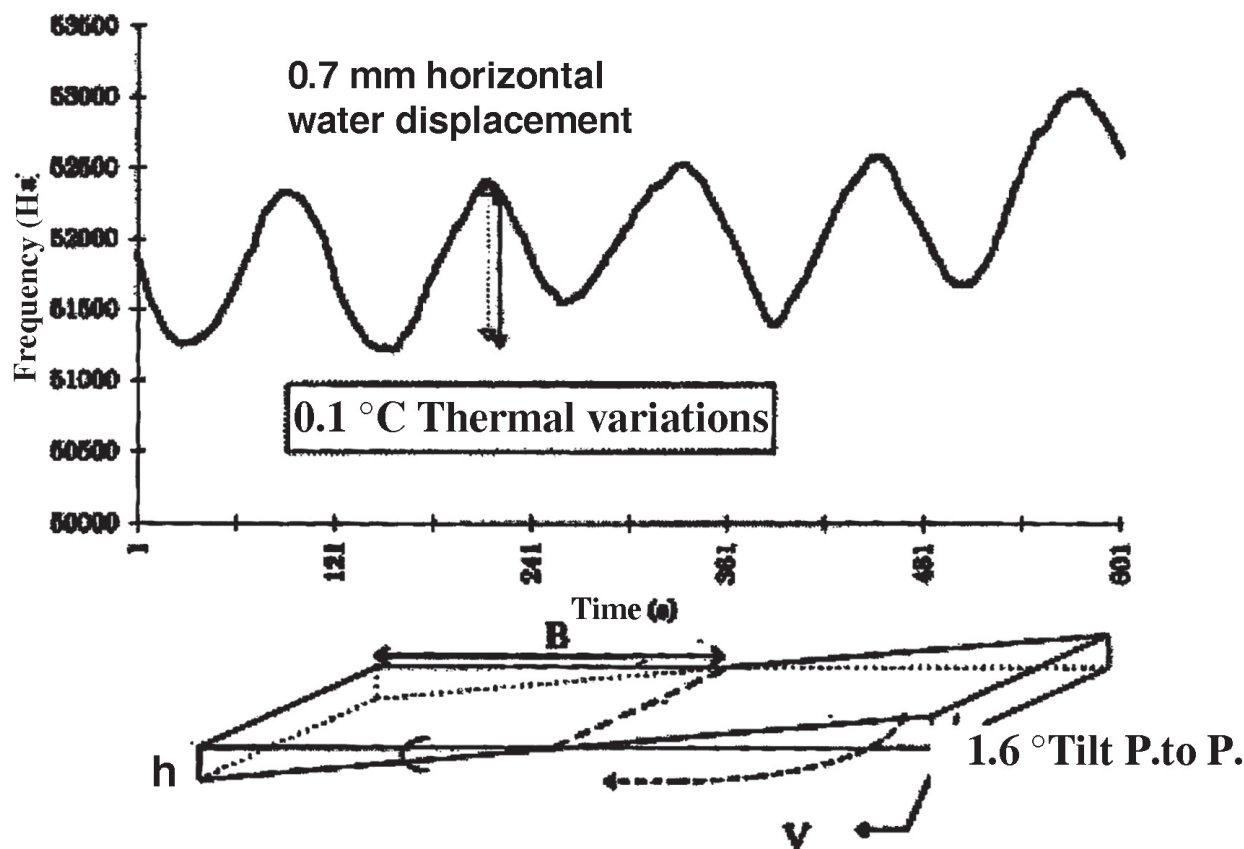


Fig. 10 Un moteur pas à pas fait tourner une roue équipée d'un excentrique. Celui-ci supporte une des extrémités d'un bac rempli de sable et d'eau. Il induit ainsi une inclinaison ayant, pour l'exemple ci-dessus, une période de 120 secondes. L'inclinaison déplace horizontalement l'eau d'un côté à l'autre au récipient, avec une amplitude d'environ 7 mm. Les différences de température produites par la chauffe ont une amplitude 0,1 K. Une résolution de 10 μ K correspondrait ainsi à un dix-millième de 14 mm, soit 1,4 μ m.

Projet du « Bolometer Oscillation System BOS » préparé par l'ORB

L'extrême sensibilité atteinte par nos thermomètres différentiels ouvre des perspectives dans le domaine des mesures de rayonnement. Le dispositif décrit à la figure 11 confirme la possibilité de mettre en évidence des changements infimes de l'énergie d'un rayonnement lumineux. Le principe est semblable à celui développé à la figure 7.

La différence principale réside dans le mode de transfert de l'énergie, non par conduction, mais par absorption du rayonnement qui tombe directement sur une des deux thermistances.

Les temps de réponse ne seront que de quelques secondes avec des dynamiques très larges (typiquement 100 dB).

L'intérêt de ce type de capteur consiste à avoir une sensibilité ne dépendant que des coefficients d'absorption de la surface frappée par les rayons. Par rapport aux capteurs optoélectroniques, la cavité se comporte comme un corps noir et est ainsi sensible à toutes les longueurs d'ondes du rayonnement.

Cette particularité justifie de compléter, par un de nos systèmes prénommé BOS (pour Bolometer Oscillation System), les divers senseurs d'observation de l'activité solaire prévus pour être embarqués sur le futur satellite Picard.

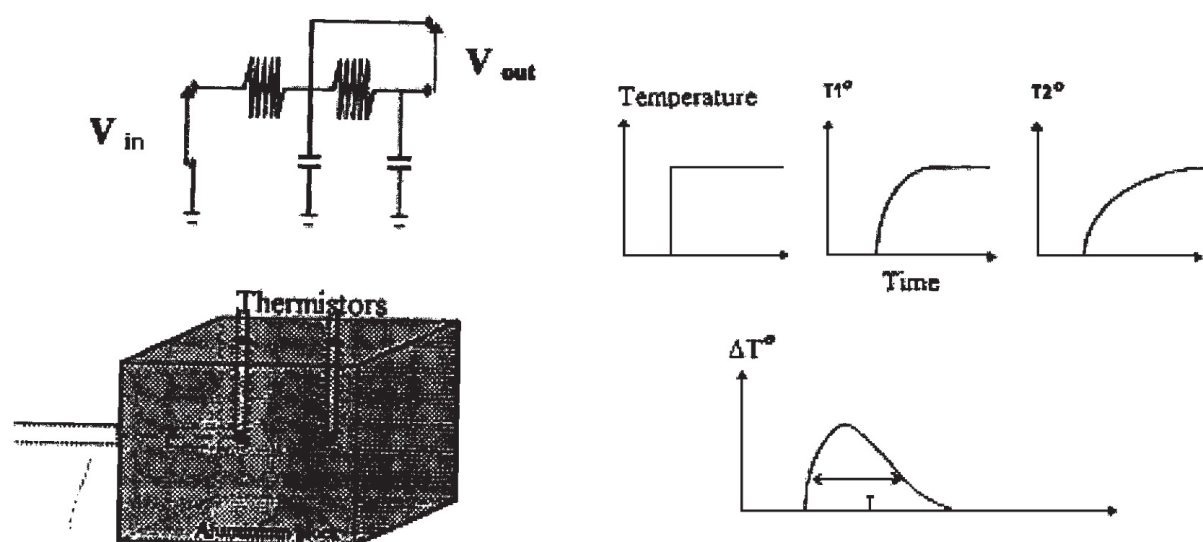


Fig. 11 (A gauche) : Circuit électrique équivalent et montage géométrique. Sans sollicitation, les deux thermistances seront à la température du bloc. Lorsque le rayon pénètre dans le capteur par l'ouverture à gauche du bloc, la première thermistance voit sa température augmenter alors que l'inertie thermique du bloc déphase la montée de la température de la seconde thermistance.

(A droite) : Les trois graphiques du dessus montrent respectivement la variation du rayonnement, la montée en température du premier thermomètre T1 et la montée plus lente de T2. Le graphique inférieur présente l'évolution de la différence de température entre T1 et T2.

Conclusions

Nous avons ainsi décrit différentes manières d'enregistrer des processus selon les effets thermiques qu'ils induisent :

- 1- le captage de la température (T°) en relation avec les fluctuations d'énergie,
- 2- la mesure de la différence de température (ΔT°) entre deux points pour détecter les fluctuations du gradient de température,
- 3- la mesure de la différence de température (ΔT°) entre deux points, mais avec injection d'énergie (ΔQ) pour détecter l'anisotropie dans la dissipation d'énergie ($\Delta T^\circ / \Delta Q$).

En guise de conclusion, retenons que la difficulté métrologique principale à surmonter lors de mesures de très petits signaux thermiques, vient du fait qu'un thermomètre ne mesure que sa propre température et que les méthodes de mesure doivent permettre que celle-ci soit la même que la température à mesurer !

Remerciements

Nous remercions toutes les personnes, proches ou lointaines, qui ont contribué par leurs remarques à nous donner la maîtrise de ce vaste domaine qu'est la métrologie géophysique. La pertinence des conseils de René Dejaiffe et Michel Everaerts nous a permis d'opérer le choix des thèmes abordés.

En particulier, nous voulons saluer les Instituts Supérieurs qui nous ont confié des étudiants pour des stages et des travaux de fin d'études. Ils ont permis d'être les artisans des progrès acquis.

Nous remercions le personnel de l'ORB pour son soutien constant dans notre démarche. Nous avons apprécié les remarques et l'aide que nous ont apportés Marie-Fr. Seny et François-X. Kremer dans la rédaction de cet article.

Le concept EDAS est le résultat de recherches rendues possibles grâce au support de la Commission des Communautés Européennes, DGXII, Programme Environnement, Climatologie et Risques Naturels, dans le cadre des contrats EV5-CT092-0189 et EV5-CT93-0283.

Références

- Melchior, P. *The tides of the planet*, Pergamon Press, 1978.
- Rasson, J. *Etude des perturbations thermiques au Laboratoire de géodynamique souterrain de Walferdange*, mémoire de licence UCL, 1977.
- Rasson, J. *Integrating techniques in earth tides recording*, BIM nr 79, 15 décembre 1978 pp 4816-4830, 1978
- van Ruymbeke, M. *Mesures thermiques au laboratoire de géodynamique de Walferdange*, Ciel et terre n°4, vol. 90, 1974.

- Van Ruymbeke, M. & Ducarme B. *Introduction of voltage to frequency converters as long term integrators adapted to data acquisition*, BIM nr 79, 15 décembre 1978, pp 4812-4815, 1978.
- Van Ruymbeke, M., Westerhaus H. & Fernandez J. *Temperature measurements*, Proceedings of the eleventh international symposium on Earth Tides, Stuttgart, 1989.
- Van Ruymbeke, M. *The Underground Laboratory for Geodynamics*, Conseil de l'Europe : Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, vol. 4, 1991.
- Van Ruymbeke, M., Beauducel Fr. & Somerhausen A. *The environmental data acquisition System (EDAS) developed at the Royal Observatory of Belgium*, Conseil de l'Europe : Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, vol. 14, 1997a.
- Van Ruymbeke, M., & M. *A probe for high temperature variations measurements in the field of geothermics*, Conseil de l'Europe : Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, vol. 14, 1997b.
- Van Ruymbeke, M. and Somerhausen A. *Experiments in Laboratory Field with precise thermometry*, 192 Seminar der Dr.W-H Heraeus & E. Heraeus-Stiftung, 1998.
- Van Ruymbeke, M., Howard R., Pütz E., Beauducel Fr., Somerhausen A. et Barriot J.-P. *An introduction to the use of HICUM for signal analysis*, BIM nr 138, 15 décembre 2003 pp 10955-10966, 2003.
-