

A LA CONQUÊTE D'UNE NOUVELLE FRONTIÈRE DANS LES MESURES DE MICRO-DÉFORMATIONS

par Jean GERVAISE

Abstract

The Terrameter is a bi-wavelength EDM instrument that has been tested under varying meteorological conditions. The system, exploiting the dispersive character of the air, can determine the measured distance to better than 1 part in 10^7 , without the usual need for meteorological observations and corrections. The Terrameter simultaneously measured the optical path lengths at two wavelengths (red, 638.8 nm and blue, 441.6 nm). With an internal micro-computer, the correct baseline distance is computed, eliminating the first order effects of temperature, pressure and relative humidity fluctuations along the measured line. The instrument is designed to a precision of better than 0.1 mm.

The Applied Geodesy for LEP is taken as an example for the comparison of the results obtained with different types of instruments. The error ellipses are worked out for simulation of the adjustment of the LEP network achieved with a Terrameter, a Hewlett-Packard 3808 A, trilateration only, a Hewlett-Packard 3808 A and a Theodolite T3, trilateration and triangulation, a Geodolite alone, trilateration, a Geodolite and a Theodolite T3, trilateration and triangulation.

These results show that the Terrameter is superior to other available distance measuring instruments in accuracy and has the advantage of a considerable reduction in time for the measurements.

I. GÉNÉRALITÉS

La mesure de distance par procédé optique est basée sur la connaissance de la vitesse de la lumière dans l'atmosphère. Dans les instruments électromagnétiques de mesure de distance (EDM), la limite principale de la précision des mesures vient du fait que la vitesse moyenne de propagation est mal con-

nue. Cette incertitude est due à l'inhomogénéité et aux turbulences de l'atmosphère qui entraînent des variations de l'indice de réfraction le long du chemin de propagation. La distance mesurée ou "longueur du chemin optique" est fonction de la distance vraie et de l'indice de réfraction.

$$R = \int_0^D n dx$$

R = longueur du chemin optique,

D = distance vraie,

n = indice optique de réfraction.

Dans les instruments conventionnels qui utilisent la modulation de la lumière pour mesurer les distances, comme le géodimètre développé par Bergstrand en 1950, la précision est limitée par la connaissance de l'indice de réfraction le long du chemin optique au moment de la mesure. Dans de nombreuses applications, seules les déterminations des paramètres météorologiques sont effectuées au point de station. Ceci implique des conditions atmosphériques uniformes entre le point de station et le point visé ou de courtes distances. Pour de longues portées ou des précisions supérieures, de l'ordre de 1.10^{-7} , l'intégration des variations de l'indice le long du chemin optique doit être réalisée. Une solution consiste à faire voler un avion porteur d'instruments au-dessus du chemin de propagation afin de déterminer les paramètres météorologiques au moment de la mesure. D'autres consistent à placer des instruments de saisie des données le long du chemin optique ou d'utiliser des moyennes établies sur de longues périodes pour atténuer les fluctuations météorologiques. Ces méthodes peuvent donner de bons résultats lorsque les conditions atmosphériques sont favorables. Les mesures rapides et de très grande précision nécessitent une mesure directe de l'indice moyen de réfraction sur le chemin optique au lieu d'une approximation.

Dans les instruments EDM conventionnel utilisant une seule modulation de l'onde porteuse, la distance est donnée par :

$$D = (K + k) c/2nf$$

K = nombre des entiers,

k = nombre fractionnaire des demi-longueurs d'onde,

c = vitesse de la lumière dans le vide,

f = fréquence de modulation,

n = indice de groupe de réfraction de l'air, déterminé au moment de la mesure de distance.

La précision de la mesure est limitée par celle de la détermination de la valeur moyenne de n sur le chemin optique. Sur de courtes distances, il n'est pas difficile de déterminer la température et la pression avec des précisions suffisantes. Pour de grandes distances et sur des distances plus longues, la détermination de l'indice moyen de réfraction devient très difficile à cause de la sensibilité de l'indice n aux paramètres météorologiques, de l'ordre de $1 \cdot 10^{-6}$ par degré Celsius pour la température et $3 \cdot 10^{-7}$ par millibar de pression atmosphérique.

Une méthode de mesure précise a été proposée par Prilepin (1957) et indépendamment par Bender & Owens (1965). Elle est basée sur les caractéristiques de dispersion de l'air dans la région visible du spectre. Du fait de cette dispersion, deux signaux de longueurs d'onde différentes se propagent sur le chemin à des vitesses différentes. En mesurant la différence des vitesses moyennes sur le chemin optique, les effets de l'atmosphère peuvent être éliminés de la mesure de distance entre deux points.

La longueur du chemin optique s'exprime par :

$$R = \langle n \rangle L = L + S$$

où $\langle n \rangle$ = valeur moyenne de l'indice de groupe de réfraction

S = contribution de la longueur additionnelle apparente due à l'indice de réfraction de l'air.

$$S = \int_0^L (n - 1) dx$$

Pour deux longueurs d'onde, une dans le rouge et l'autre dans le bleu, la différence des chemins optiques est :

$$\Delta S = S_B - S_R$$

que l'on peut écrire :

$$\Delta S = \int_0^L (1/A_R) (n_R - 1) dx$$

avec

$$A_R = \frac{n_R - 1}{n_B - n_R}$$

A_R étant indépendant de la densité atmosphérique type et dépendant assez peu de la composition de l'atmosphère, Owen (1967) obtient en première approximation :

$$S_R = \langle A_R \rangle S$$

Finalement,

$$L = R_R - S_R$$

où

$$L = R_R - \langle A_R \rangle (R_B - R_R)$$

La distance vraie peut être ainsi déterminée en mesurant les chemins optiques R_B et R_R du même

chemin de propagation et évite l'effet de l'atmosphère sur la mesure optique.

II. LE TERRAMÈTRE

Contrairement aux instruments de mesure qui utilisent une approximation de l'indice de réfraction de l'air à partir d'échantillons de température, de pression et de vapeur d'eau, le Terramètre (fig. 1 & 2) fait une mesure directe et précise de l'indice de réfraction simultanément grâce aux mesures de la distance avec deux longueurs d'ondes optiques, une dans le

Fig. 1

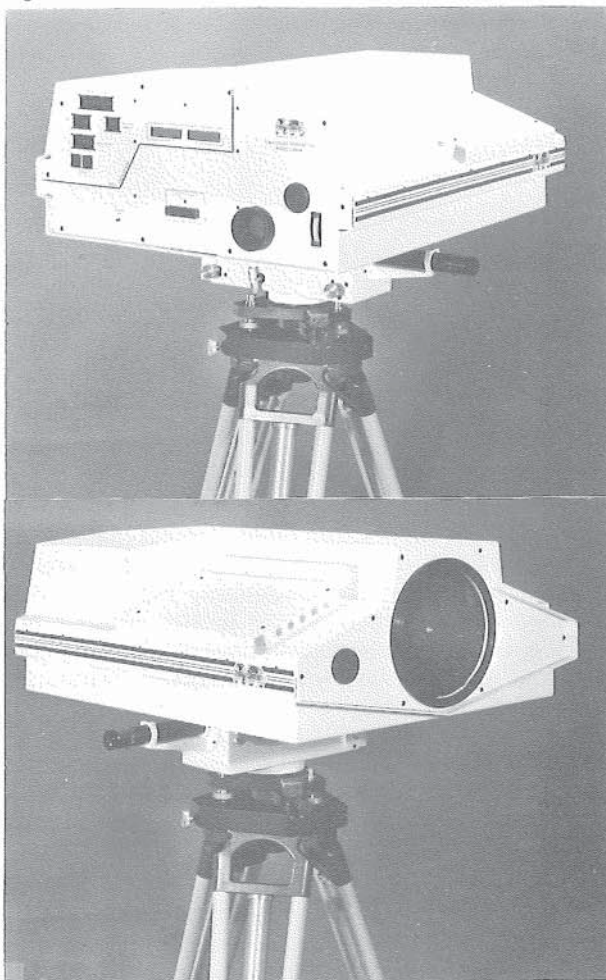


Fig. 2

rouge et l'autre dans le bleu. L'instrument calcule les termes correctifs à partir de la différence de la longueur du chemin optique entre les deux longueurs d'onde et calcule la vraie distance. Ceci élimine automatiquement les effets du premier ordre de la température, de la pression de l'air et de la vapeur d'eau (Earnshaw & Hernandez (1972), Hernandez (1972), Huggett (1974), Huggett & Slater (1975), Hernandez & Earnshaw (1976)).

La méthode de mesure est la même que celle de l'expérience Fizeau pour la mesure de la vitesse de la lumière. Dans cette expérience, la lumière renvoyée par un rétro-rélecteur éloigné revient sur le photo-détecteur si une liaison temporelle et spatiale précise existe entre le faisceau lumineux aller et retour. La lumière est reçue par le détecteur uniquement si le temps de transit de celle-ci est exactement égal à un nombre entier de périodes de modulation. La techni-

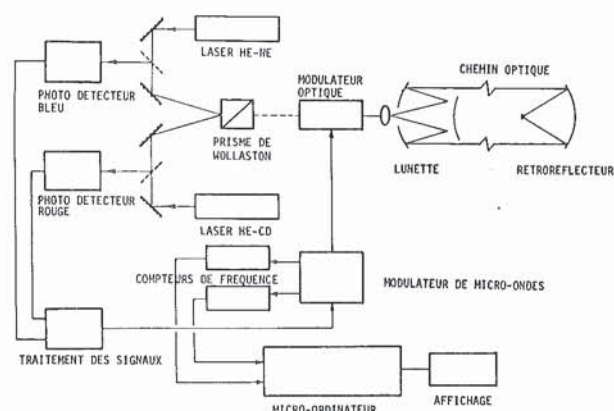


Fig. 3

que de la roue dentée de Fizeau a été modernisée par Michelson en premier et par Bergstrand en 1950. La roue dentée destinée à interrompre périodiquement le faisceau était remplacée par une cellule de Kerr.

Dans le Terramètre (fig. 3), la lumière rouge et bleue des lasers He-Ne et He-Cd entre dans un prisme de Wollaston avec un angle et une polarisation convenables pour rendre les faisceaux sortant colinéaires. La lumière passe à travers un modulateur de micro-ondes qui module l'ellipticité de la lumière polarisée à 3 GHz. La lumière, transmise par le télescope Cassegrain, traverse le chemin à mesurer et est renvoyée par le rétro-réflecteur (fig. 4). Le faisceau est reçu par la même optique utilisée pour la transmission et passe une seconde fois à travers le modulateur où l'ellipticité de la polarisation est augmentée ou diminuée selon la phase de l'excitation du modulateur. Les faisceaux sortant du prisme sont séparés par couleur et dirigés sur les photo-détecteurs. Les sorties analogues des photo-détecteurs sont enregistrées et utilisées pour contrôler la fréquence du modulateur pour chaque couleur. Les fréquences sont constamment réglées afin qu'un minimum de lumière soit reçu par les photo-détecteurs.



Fig. 4

Les fréquences internes sont mesurées et les valeurs utilisées dans le micro-ordinateur pour calculer la distance vraie. Comme A_R est une fonction peu dépendante des paramètres météorologiques au point de mesure, des valeurs approchées de la température, de la pression et de l'humidité relative sont introduites manuellement dans l'instrument. Avec

ces données, le micro-ordinateur détermine la distance vraie qui s'affiche digitalement sur un écran à cristaux liquides placé à l'arrière du Terramètre. Un enregistrement de toutes les entrées, les fréquences internes et la distance vraie, peut être obtenu soit sur un terminal, soit sur une imprimante à partir de l'interface du Terramètre, avec un intervalle de 10 secondes.

Un étalon de fréquence à rubidium est utilisé pour calibrer les compteurs qui mesurent les fréquences internes utilisées pour les calculs de distance. Cet étalon est plusieurs fois plus précis qu'il n'est nécessaire et évite ainsi tout ré-étalonnage.

La seule erreur restante est celle du centrage du Terramètre. Cette erreur est diminuée en utilisant des niveaux de coïncidence de très haute sensibilité et des plombs optiques à forts grossissements, les deux pouvant être contrôlés sur le terrain et corrigés à chaque mise en station. L'instrument peut être centré avec une précision inférieure à 0.1 mm.

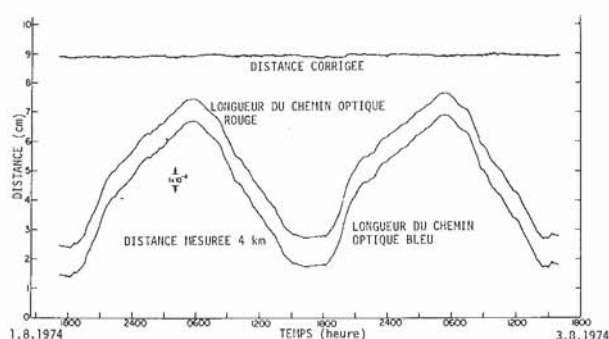


Fig. 5

Les faisceaux laser sortant de l'instrument sont dirigés sur un rétro-réflecteur éloigné. Une lunette d'alignement de grossissement 24 située sur l'instrument est utilisée pour viser le faisceau réfléchi. L'opérateur peut alors ajuster finement le pointé sur un verre dépoli monté à l'arrière de l'instrument.

La distance approchée, la température, l'humidité relative et la pression barométrique sont introduites manuellement dans l'instrument. Le Terramètre est alors entièrement automatique et la distance corrigée apparaîtra sur l'écran digital.

Des mesures continues (fig. 5) ont été enregistrées lors d'une opération qui a duré 47 heures sur une distance de 4,0 km. Elles montrent les fluctuations journalières de la longueur du chemin optique. Celles-ci sont principalement fonction de la température ; la variation de la température diurne était de 12° C. L'humidité relative et la pression atmosphérique variaient de 42 à 85 % et 1020 à 1015 mb respectivement pendant cette période de 47 heures. Si la différence entre les longueurs optiques bleues et rouges est mesurée pour chacune d'elles à leurs valeurs maximum et minimum, on trouve une variation de 6×10^{-7} . Si cette valeur est multipliée par 20, valeur approchée de A_R , le résultat est 12×10^{-6} . Ce terme correctif annule totalement les variations mesurées dans la longueur du chemin optique rouge et fournit la distance corrigée.

Les principales informations concernant le Terramètre sont données dans le tableau 1.

Tableau 1 :
Caractéristiques techniques du Terramètre

Portée	1 à 20 km
Précision	1.10^{-7}
Sources laser	Hélium-néon (rouge) 632.8 nanomètre, 5 mw Hélium-cadmium (bleu) 441.6 nanomètre, 10 mw
Modulation	Polarisation modulée à 3000 MHz (longueur d'onde pour la modulation : 10 cm)
Méthode de mesure	Fizeau
Optique	Emetteur et récepteur Cassegrain de 20 cm. Rétro-réflecteur œil de chat. Emetteur et récepteur à température compensée.
Divergence du Faisceau	Limitée par l'atmosphère à 2×10^{-4} radian
Oscillateur	Etalon de fréquence à rubidium
Stabilité de l'oscillateur	2.10^{-10} à 25° C après 10 min. de chauffage, 3.10^{-11} par sec., 4.10^{-11} par mois
Calculs	Microprocesseur - calcul en temps réel
Temps de mesure	10 secondes
Température de fonctionnement	- 20° C à + 35° C
Plomb optique	Lunette grossissement 20, rotation à 360° pour contrôle sur terrain
Coulisses croisées	Centrage par coulisses croisées orthogonales pour mise en station précise sur les repères
Angle de pente	$\pm 15^{\circ}$ (75° à 105° en angle zénithal)
Puissance d'entrée	115 ± 10 V courant alternatif, 50 - 60 Hz
Réflecteur	Foyer interne, grossissement 24
Échelle de lecture	Directement en m avec une résolution de 10^{-5} m
Dimensions	76,2 cm \times 63,5 cm \times 27,9 cm
Poids	34 kg, bâti 8,2 kg

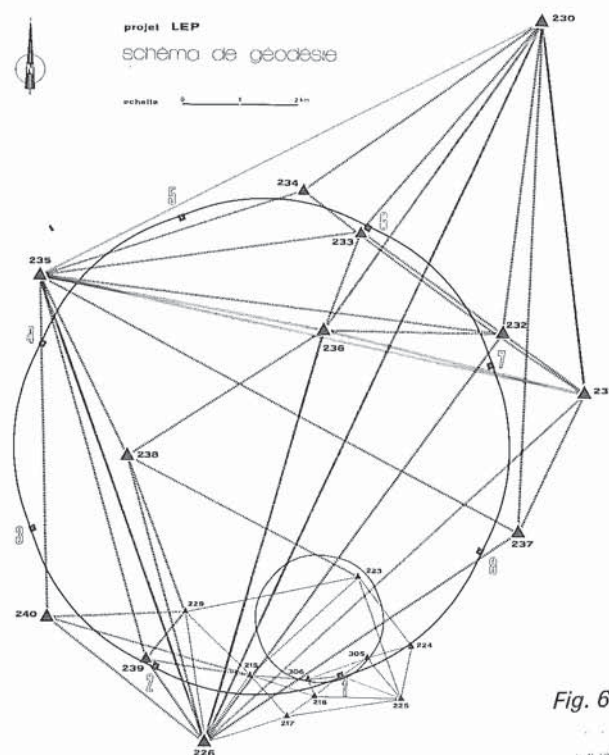


Fig. 6

III. ANALYSE DE LA PRÉCISION D'UN RÉSEAU GÉODÉSIQUE - EXEMPLE : RÉSEAU LEP

L'analyse de la précision d'un réseau bidimensionnel plan consiste à résoudre la matrice covariance des divers paramètres du réseau. Cette résolution s'applique à un réseau déjà mesuré aussi bien qu'à un réseau projeté.

Pour illustrer l'emploi du Terramètre, nous avons calculé les ellipses d'erreur du réseau prévu pour la géodésie de LEP, Large Electron-Positron Collider du CERN, dont la construction est prévue pendant les années 1980 et l'exploitation de la physique pour les années 1990. Il s'agit d'un anneau de collisions de 27 km de circonférence qui sera creusé pour partie dans la molasse du Bassin Genevois et pour partie sous le Jura. Le schéma du réseau géodésique (fig. 6) n'est pas définitif. Il sera donc optimisé lorsque l'on passera au stade de la réalisation.

A titre de comparaison, nous avons également calculé les ellipses d'erreur pour d'autres instruments :

- Hewlett Packard 3808 A - trilatération
- Hewlett Packard 3808 A / Théodolite T3 - trilatération-triangulation
- Géodolite - trilatération
- Géodolite / Théodolite T3 - trilatération-triangulation

Le tableau 2 fournit les valeurs des ellipses d'erreurs absolues, issues de la simulation du réseau LEP.

Le tableau 3 donne les écarts-types et les écarts maximum calculés à partir des résultats précédents.

A partir du tableau 2 on peut facilement mettre en évidence qu'avec le Terramètre le fait de doubler la trilatération par une triangulation de qualité n'apporte aucune amélioration de la précision. Ceci est vérifié par le diagramme de la figure 7 dont l'inter-

Tableau 2 :**SIMULATIONS DU RÉSEAU GÉODÉSIQUE DE LEP - ELLIPSES D'ERREUR ABSOLUES**

Point géodésique No	Terramètre			HP 3008 A			HP 3808 A + Théodolite T3			Géodolite			Géodolite + Théodolite T3		
	o	u	v	o	v	v	o	u	v	o	u	v	o	u	v
226	-	0	0	-	0	0	-	0	0	-	0	0	-	0	0
230	191	0.4	0	191	5.3	0	191	4.5	0	191	3.7	0	191	3.2	0
233	117	0.5	0.4	109	7.2	5.3	2	4.3	3.6	117	4.6	3.6	190	3.0	2.8
235	41	0.5	0.3	40	6.9	4.7	21	4.6	3.8	41	4.7	2.8	34	3.5	2.4
231	69	0.5	0.4	74	7.7	6.0	192	4.8	4.2	69	5.2	4.0	8	3.5	3.3
236	105	0.5	0.4	104	8.1	5.5	40	4.0	3.5	105	5.4	3.7	75	3.1	2.7
239	26	0.4	0.2	27	7.6	3.8	134	2.7	2.4	26	3.9	1.8	24	2.0	1.5
238	50	0.5	0.3	51	8.7	4.4	51	3.9	3.5	50	5.3	2.5	50	3.2	2.1
237	96	0.6	0.4	96	9.2	6.1	11	5.4	4.7	96	6.5	4.1	64	4.0	3.6
232	74	0.5	0.4	82	8.0	6.4	15	4.7	4.0	74	5.2	4.3	19	3.6	3.1
240	18	0.5	0.2	20	9.7	4.3	180	3.2	2.9	18	5.4	2.1	12	2.6	1.7
234	148	0.7	0.4	148	12.2	6.4	199	5.2	4.3	148	7.6	3.9	163	3.9	3.1
215	94	0.4	0.2	92	7.2	4.6	162	2.9	2.4	94	3.8	2.0	110	2.0	1.7
223	125	0.6	0.3	135	10.9	6.8	139	5.1	4.0	125	6.1	3.4	128	4.0	2.4
229	65	0.4	0.2	64	8.1	4.0	90	2.8	2.5	65	4.4	1.9	69	2.2	1.5
m.q = $\frac{u^2}{n}$		0.5	0.3		8.2	5.0		4.1	3.3		5.1	3.0		3.1	2.4

O : gisement du grand axe de l'ellipse (en grade)

u : grand axe de l'ellipse en mm (écart-type)

v : petit axe de l'ellipse en mm

N.B : réseau traité en bloc (variations de coordonnées) et en figure libre (1 point fixe - 226 -, 1 orientation - 230 -)

Tableau 3 :**SIMULATIONS DU RÉSEAU GÉODÉSIQUE DE LEP ÉCART TYPE ET ÉCART MAXIMUM**

	Terra- mètre	HP 3808 A	HP 3808 A + Théodolite T3	Géo- dolite	Géodolite + Théodolite T3
u	0.5	8.2	4.1	5.1	3.1
v	0.3	5.0	3.3	3.0	2.4
t					
moyen	0.4	6.6	3.7	4.0	2.7
u max	1.3	21.9	10.9	13.6	8.3
v max	0.8	13.4	8.8	8.1	6.4
max					
moyen	1.1	17.7	9.9	10.8	7.4
★ max = $t \times 2.67$			99 %		

prétation montre à l'évidence que le gain d'un ordre de grandeur dans la précision des mesures de distances va apporter, dans des cas bien précis, des résultats qui vont obliger à repenser la philosophie des mesures dans le domaine de la géodésie appliquée. Ceci est vrai pour les accélérateurs de particules, pour la recherche des mouvements de l'écorce terrestre et la prédiction des tremblements de terre, la stabilité des grandes structures, barrages et réservoirs,

la stabilité des sols pour de grands projets et tout le domaine de la métré-ingénierie de demain.

IV. CONCLUSION

Pour le LEP, la géodésie de surface reste une nécessité. La chaîne métrologique souterraine de 27 km qui sert à la mise en place des éléments du système de confinement magnétique est beaucoup trop souple pour ne pas passer par des points obligés. Les coordonnées de ces piliers seront descendues par des puits, tous les 3,3 km, coordonnées issues du réseau géodésique de surface mesuré avant l'installation de chaque octant.

Le tableau 4 montre les différents facteurs qui interviennent dans la précision lors des deux étapes successives des travaux.

Si, dans les travaux d'appui au génie civil, la précision de la géodésie de surface pèse de tout son poids sur l'écart-type de l'ensemble des opérations, on voit avec stupeur que l'utilisation du Terramètre en géodésie appliquée ramène le vieux problème de la descente des verticales au premier ordre. Nous allons devoir attaquer ce problème et essayer de trouver des solutions nouvelles qui permettent de conserver la précision obtenue par les mesures au Terramètre, et ramener ainsi l'écart-type à 0,7 mm et l'écart maximum à moins de 2 mm. Un certain nombre de possibilités s'ouvrent à nous et nous allons les tester dans les mois à venir.

Tableau 4 :

GÉODÉSIE DE SURFACE

I. Appui au Génie Civil pour guidage des machines à forer

Appareil de mesure de distance : HP 3808 A

	Écart type	Variance
— Géodésie	6,6	43,56
— Rattachement géodésie au puits	2,0	4,00
— Descente du point au niveau du tunnel	1,0	1,00
— Rattachement au fond du puits	1,0	1,00
		49,56

Écart type : 7 mm

Écart maximum : 18,7 mm

II. Géodésie appliquée

Appareil de mesure de distance : Terramètre
Pilier définitif sur les bâtiments de surface

	Écart type	Variance
— Géodésie	0,4	0,16
— Descente du point au niveau du tunnel	1,0	1,00
— Rattachement à la chaîne de métrologie	0,5	0,25
		1,41

Écart type : 1,2 mm

Écart maximum : 3,3 mm

BIBLIOGRAPHIE

— "Two color Terrameter - Its application and accuracy", E.N. Hernandez & G.R. Huggett, Technical papers ACSM Congress, 27 - 27.02.1981, Washington.

— "Optics", E. Hetch & A. Zajac, Addison-Wesley Publishing Company Reading, Massachusset.

— "Applied Geodesy for LEP", J. Gervaise, CERN LEP Note 1981 (en cours de publication).

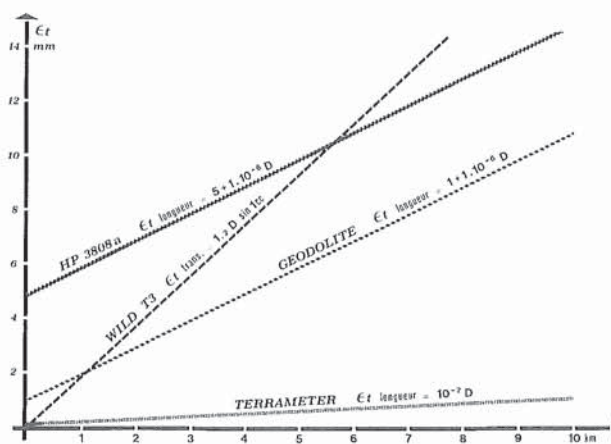


Fig. 7



ATELIERS DEMAILLE reprographie

10, RUE SAULPIC 94300 VINCENNES

374.51.36

Héliographie • Gélatinographie • Photocopie • Copies Circulaires • Dessin • Composition IBM • Photocomposition • Photo industrielle • Microfilm • Impression offset • Toute la fourniture et le matériel pour bureaux d'études et d'architectes