

... Colloque du Creusot

Contrôle de la Planéité d'un Marbre et de la Rectitude d'une Glissière par la Méthode d'Autocollimation

par Yves ALAJOUANINE

1 — L'EMPLOI DES APPAREILS TOPOGRAPHIQUES EN TOPOMÉTRIE INDUSTRIELLE

La haute précision atteinte par les niveaux et les théodolites de haut de gamme les fait utiliser dans l'industrie et les laboratoires, où ils concurrencent les outillages optiques de métrologie, comme les lunettes d'alignement et d'autocollimation.

2 — LES CONTRÔLES DE POSITION DANS L'ESPACE

2.1 - Les observations de pointe avec décalage micrométrique

Pour les contrôles d'alignement, la lunette est en général dépourvue de micromètre d'oculaire, aussi est-elle équipée d'un micromètre amovible d'objectif dont la lame à faces parallèles pivote autour d'un axe placé perpendiculairement à l'axe optique dans un plan horizontal ou vertical pour mesurer les écarts des cibles. L'opérateur transfère leur image au centre du réticule et mesure sur le micromètre le déplacement effectué. Lorsque le micromètre d'objectif est intégré au corps de la lunette, on peut déverser l'instrument entier d'un angle droit pour mesurer dans le sens perpendiculaire les décalages.

L'axe optique de la lunette doit conserver une excellente fidélité dans le corps de la lunette, malgré les distances variables de mise au point sur les différentes cibles. Sinon deux visées symétriques s'effectuent en déversant la lunette d'industrie d'un demi-tour, ou en pratiquant le double retournement du théodolite, pour utiliser la lecture moyenne.

La réfraction atmosphérique altère les mesures de décalage : elles sont bien comparables entre elles, lorsque l'éloignement et l'environnement sont exactement identiques.

Un alignement doit être observé dans le sens "AB" et "BA" pour éliminer l'influence de la réfraction.

La lunette peut avoir un basculement limité en site, et être solidaire d'une nivelle tubulaire de haute précision, pour constituer une lunette d'atelier (c'est-à-dire un niveau de géométrie). Si l'appareil est en bon état de marche, l'axe optique est rendu horizontal grâce au réglage de la nivelle avant d'observer chaque cible, après avoir éventuellement fait pivoter en azimut la lunette autour de la station de nivellement. Certains niveaux de haute précision présentent une vis micrométrique de fin basculement pour mesurer des inclinaisons différentielles. La bonne méthode est d'employer la graduation marquant la perpendicularité entre l'axe optique et l'axe de pivotement, pour rendre celui-ci vertical au moyen de la grande nivelle lors de la mise en station du niveau.

Lorsque les points observés sont placés en dehors du champ opératoire, une mire graduée d'industrie en invar palpe le point. Le micromètre de la lunette vise alors une graduation centimétrique de la mire. Pour ne pas faire de confusion, il est recommandé que les graduations croissent dans le même sens pour lire la mire et son appoint au micromètre, afin d'éviter des fautes en consignait les observations.

La méthode utilisée en nivellement permet l'estime du 0,01 millimètre, sans être gênée par des solutions de continuité dans les contrôles soit d'alignement soit de planéité. En utilisant une visée rendue parallèle à l'ensemble des points à observer, on évite le repérage des points en élévation ou en planimétrie, quitte à placer en positions respectives convenables, le dispositif de mesure et la structure concernée : c'est efficace pour simplifier les observations topométriques et les calculs.

2.2 - Les contrôles d'alignement pris en enfilade

Lorsque les positions à observer sont pointées en enfilade, il est bon de placer à la fin de l'alignement une cible de contrôle de stabilité, visée régulièrement par l'axe optique de référence.

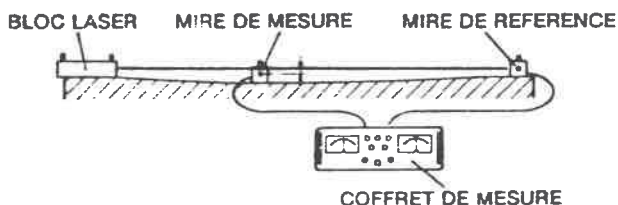
Les cibles utilisées en contrôles périodiques sont remises en place au moyen de centrage forcé dans des alésages. Ce sont parfois des voyants quadrillés en X & Y avec une origine pour repérer la position de l'axe optique de la lunette d'alignement.

Les systèmes de contrôle d'alignement sont divers et nombreux.

— L'alignoscope Ahrend utilise la méthode de Van Heel en plaçant trois accessoires aux points A, B et C respectivement : une source lumineuse observée à travers un petit trou créant des franges de diffraction ; une "plaque zonée" métallique très mince portant en couronnes concentriques d'égale largeur des couleurs alternées différentes ; et en C une lunette astronomique avec réticule dite "télescope". L'axe optique entre A et C est stable par suite de la mise au point fixe à l'infini du télescope. Grâce à des mouvements transversaux micrométriques la plaque zonée peut s'aligner sur l'axe de la lunette. Portée 100 m. Précision 1/200000.

— L'oculaire amovible laser Kern ou Wild adaptable sur un instrument de la même marque, peut pratiquer la méthode des franges de diffraction à travers un diaphragme iris d'objectif rendu très fin, la lunette étant réglée au point à l'infini en donnant un impact avec point central net. Si la lunette vise à distance finie, l'opérateur réduit le diamètre de l'impact laser à sa volonté en fermant le diaphragme iris d'objectif.

— L'équipement Sopenem "Rectilas" de contrôle d'alignement laser utilise 2 capteurs "quadricellule" disposés à la fin du faisceau, et au milieu grâce à un renvoi semi-transparent latéral dans le capteur mobile apte pour une précision cumulée de 0,002 mm par mètre jusqu'à 30 mètres.



— Le système de mesure à laser Hewlett-Packard 5528A compte les franges d'interférométrie produites par le déplacement du capteur coin de cube, le long de l'alignement. Au moyen d'accessoires on mesure le tangage et le lacet, la planéité, la rectitude, le parallélisme et l'équerrage. L'interféromètre à réflecteur asservi du CERN permet le déplacement du coin de cube sans guidage mécanique, pour franchir les cas de solution de continuité entre les poutres ou les marbres.

2.3 - La méthode générale de contrôle d'alignement ou de planéité

Lorsqu'est nécessaire le repérage d'un point en longueur sur une droite ou en planimétrie sur une surface, le topographe relève chaque point en utilisant le procédé topométrique convenant à chaque cas.

— La tachéométrie électronique combine les mesures angulaires faites au théodolite précis à la seconde genre Wild T2, avec des distances prises simultanément au distancemètre en estimant le millimètre, ou séparément avec un distancemètre plus précis ME 3000 (Kern) ou Telluromètre MA100.

— La microtriangulation calculée en temps réel est plus commode lorsque la précision maximum est demandée et obtenue grâce aux théodolites Kern E2 ou Théomat Wild T 2000, connectés à un ordinateur affichant aussitôt la précision atteinte sur les XYZ de la dernière intersection, parfois refaite par les opérateurs géomètres. Un impact laser peut représenter une cible projetée par un oculaire laser monté sur un théodolite équipé d'un diaphragme iris réglable d'objectif.

— Le cheminement de polygonation en centrage forcé des points concernés s'utilise pour de longs alignements avec intervalles de 10 à 20 mètres, lorsque l'emploi d'un contrôleur à fil ne convient pas sur place. Un traitement par les moindres carrés de l'ensemble des coordonnées XYZ des points observés, dégage l'équation de la droite ou du plan moyen et l'écart type obtenu. Un calcul fixe l'écart de chaque point par rapport à la droite ou au plan moyen en date du premier ou du dernier contrôle.

3 - LES CONTRÔLES DE DIRECTION

3.1 - La méthode d'autocollimation

Un collimateur est une lunette projetant un faisceau de rayons lumineux parallèles. La source est située au foyer de l'objectif, par exemple à la place du réticule d'une lunette astronomique. La direction indiquée par la source observée à travers l'objectif du collimateur ne varie pas lorsque celui-ci et l'appareil d'observation subissent une translation relative. La direction reste visible tant plus que les deux instruments restent mieux dans leur champ optique réciproque.

Le collimateur est souvent remplacé par un dispositif d'autocollimation autonome : miroir plan pour un axe d'orientation et prisme dièdre droit pour un plan d'orientation perpendiculaire à l'arête du dièdre. Il faut mettre une source lumineuse dans l'appareil topographique observant le miroir : celui-ci renvoie l'image du réticule éclairé lorsque la mise au point de la lunette de l'instrument est exactement réglée à l'infini et que la direction observée est perpendiculaire au miroir ou au prisme. Deux dispositifs sont utilisés pour projeter l'image du réticule :

— l'oculaire amovible d'autocollimation remplace l'oculaire normal dans la fixation. Un flux lumineux latéral est envoyé entre l'oculaire et le réticule de l'appareil au moyen d'un miroir semi-transparent. L'ombre chinoise projetée du réticule paraît dans le champ de la lunette. Alors l'opérateur pointe avec les vis de fin mouvement, pour mettre le reflet du réticule en superposition avec l'image de celui-ci (fig. 5).

Les schémas ci-joints sont dans le texte de P. Jackson cité en annexe. L'oculaire laser est en pratique un oculaire d'autocollimation amovible facilitant l'emploi d'un miroir éloigné, disposé pour renvoyer l'impact à vue, dans l'objectif de la lunette de l'appareil topographique.

— le dispositif d'éclairage est intégré dans la lunette, afin qu'elle projette un réticule lumineux permettant une observation plus lointaine et plus précise qu'avec l'oculaire amovible d'autocollimation (fig. 7).

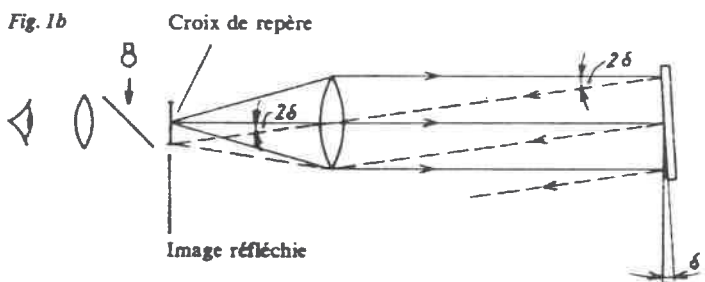
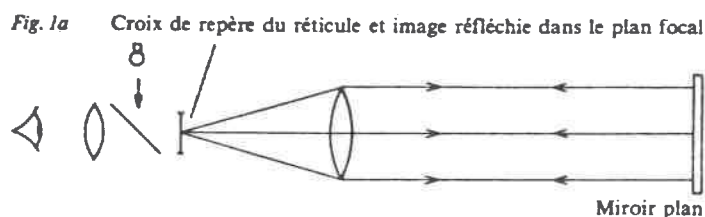


Fig. 1 Autocollimation

- a) En haut: La croix de repère et son image réfléchie sont en coïncidence. La ligne de visée (rayons parallèles) est à 90° sur la surface du miroir.
b) En bas: Le miroir a été légèrement incliné, angle δ , les rayons réfléchis sont décalés de 2δ . La croix de repère n'est plus en coïncidence avec son image réfléchie.

3.2 - La méthode d'autoréflexion

La méthode d'autoréflexion s'utilise lorsque l'image réfléchie est trop faible. L'opérateur fait alors la mise au point à la distance double de l'éloignement du miroir, et vise avec l'appareil l'image de l'objectif de la lunette renvoyée par le miroir. On éclaire fortement une couronne circulaire transversale jaune phosphorescent fixée autour de la monture de l'objectif. Des traits noirs en croix représentent la trace du plan vertical passant par l'axe optique et la trace du plan défini par l'axe optique et l'axe de basculement du théodolite. Celui-ci est pointé sur son propre réticule avec l'oculaire d'autocollimation, à condition que le miroir soit plus loin que la moitié de la distance minimum de visée.

3.3 - Les propriétés de l'autocollimation

La fig. 1b montre que la déviation angulaire 2δ peut s'observer avec un réticule à échelle si le théodolite reste fixe, quand le miroir tourne de l'angle δ . En fig. 2 le théodolite pivote d'un angle égal à celui de la rotation du miroir, lorsque celui-ci est visé perpendiculairement au moment des lectures d'angles. La distance minimum d'autocollimation n'est limitée que par le volume du matériel, grâce aux rayons lumineux parallèles utilisés par la mise au point fixée à l'infini (fig. 3).

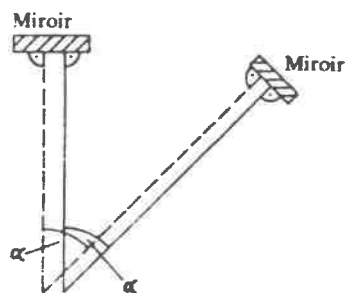


Fig. 2
Le centrage de l'instrument n'a pas d'influence sur la valeur de l'angle α , lorsque la mesure se fait par autocollimation.

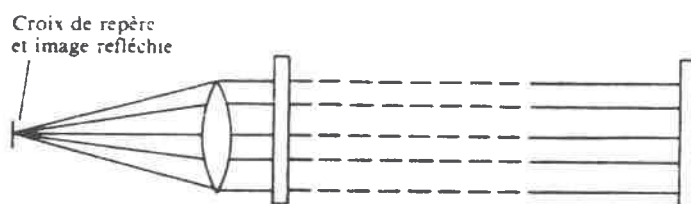


Fig. 3
Une lunette focalisée sur infini émet des rayons parallèles, il n'y a donc pas de distance minimum en autocollimation.

4 — LE CONTRÔLE DE LA PLANÉITÉ D'UN MARBRE

La méthode d'autocollimation est utilisée pour contrôler les variations d'inclinaison d'un miroir fixé sur un socle servant de niveau d'atelier grâce aux variations d'angle zénithal du théodolite visant le miroir. La distance d séparant les deux pieds extrêmes du socle, multipliée par la tangente de l'écart par rapport à l'angle zénithal moyen, donne la variation algébrique altimétrique du pied avant du socle par rapport au pied arrière, avec comme référence la surface plane moyenne du marbre. Celui-ci est contrôlé suivant 8 itinéraires rectilignes : les côtés d'un rectangle avec leurs médiatrices et les diagonales (Méthode de Rahn). Chaque profil est repéré par des points de contrôle espacés par l'écart " d " entre les pieds palpeurs sous le socle. Celui-ci chemine de proche en proche chaque alignement ; " d " joue un rôle de filtre d'ondulations. L'opérateur illustre le résultat en dessinant le profil altimétrique en long pour chaque itinéraire. Sur la fig. 22 le trait continu représente le profil brut calculé avec les angles zénithaux. En tiretés le profil compensé par rapport au marbre est calculé avec les variations d'angles zénithaux par rapport à leur valeur moyenne.

Le procédé peut s'informatiser grâce aux théodolites enregistreurs Kern E2 ou Wild T 2000 connectés sur un ordinateur : voir en bibliographie la référence au CETIM, qui utilise un niveau électronique d'atelier EDA. Pour dégager la surface du marbre, le théodolite est placé à la hauteur du miroir sur une console Wild GST9 fixé au bâti par un serre-joint.

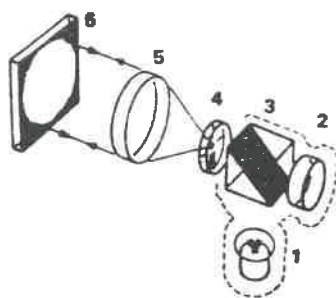


Fig. 5
Oculaire d'autocollimation
Wild GOA

- 1 socle et ampoule
- 2 oculaire
- 3 cube de Lummer
- 4 réticule (croix de repère)
- 5 objectif de la lunette
- 6 miroir plan

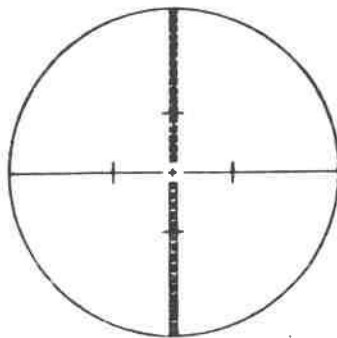


Fig. 6
Oculaire d'autocollimation Wild
GOA sur T2. Le croquis représente
l'image réfléchie du réticule
lorsque le miroir est proche de la
lunette (cf. 2.4).

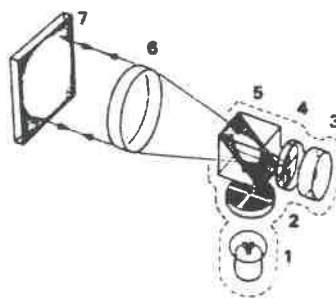


Fig. 7
Oculaire d'autocollimation intégré,
Wild T2+GUFA, Wild T3A.

- 1 socle et ampoule
- 2 croix lumineuse verte
- 3 oculaire
- 4 réticule de la lunette
- 5 cube de Lummer
- 6 objectif de la lunette
- 7 miroir plan

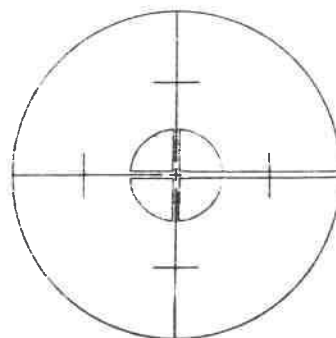


Fig. 8
Oculaire d'autocollimation intégré
Wild T2+GUFA, Wild T3A. La
croix du réticule de la lunette doit
être centrée dans la croix lumineuse
verte. Notre croquis représente
l'image réfléchie, lorsque le
miroir est proche de la lunette
du T2+GUFA (cf. 2.4).

5 — LE CONTRÔLE DE LA RECTITUDE D'UNE GLISSIÈRE

Les variations de basculement et de pivotement du miroir fixé au socle, sont mesurées en autocollimation par un théodolite placé sur la console Wild GST9 accrochée à la glissière horizontale, disposée sur la machine-outil qui l'a usinée. Le socle est équipé sur un côté de deux palpeurs écartés de la même distance que les deux pieds extrêmes sous le socle, pour coller à la surface verticale de la glissière lors de la mesure de l'angle azimutal sur le miroir. La position du socle éloigné au maximum sert de référence en azimut, pour vérifier la stabilité relative entre le théodolite et la glissière, pendant un contrôle de lacets. Contrôler la rectitude de la glissière, c'est intersecter les effets de lacets et de tangages traduits des mesures d'angles horizontaux et verticaux.

Le contrôle des graduations d'une table divisée (fig. 26) s'obtient en centrant un théodolite entraîné par la table, et en revisant un miroir ou un collimateur servant de référence azimutale, sans être gêné par un défaut de centrage du théodolite. Cette particularité est utilisée pour mesurer des cheminements directs d'angles horizontaux avec des côtés très courts : les gisements des axes optiques de 2 théodolites se visant réciproquement en lumière parallèle, différent de 200 grades sans pour cela être en coïncidence.

L'utilisation simultanée en autocollimation des 2 angles AZ & VZ permet la mesure de l'effet de mutation d'un axe, en observant un miroir fixé perpendiculairement à cet axe de rotation (fig. 23 et 24).

La mesure de la précision d'une équerre optique d'industrie, s'effectue par exemple avec deux théodolites en se visant l'un l'autre directement d'une part, et à travers le prisme pentagonal d'autre part.

6 — L'INTÉRÊT DE LA TOPOMÉTRIE DE HAUTE PRÉCISION DANS L'INDUSTRIE

Les possibilités offertes d'utiliser en outillage optique les niveaux et les théodolites intéressent de plus en plus les services de contrôle de l'industrie, notamment en métrologie dimensionnelle appliquée en grande longueur avec une haute précision pour les constructions mécaniques, en chaudronnerie nucléaire, etc... Les appareils topographiques de haut de gamme atteignent la précision angulaire maximum espérée, pour un faible coût : leur fabrication en série est plus importante pour la topographie classique, que pour les besoins de la topométrie fine dans l'industrie.

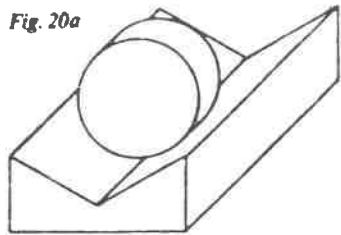


Fig. 20a

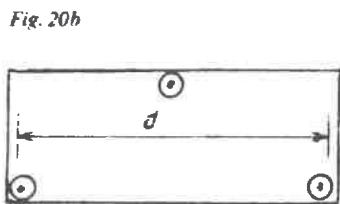


Fig. 20b

Fig. 20

- a) Miroir d'autocollimation en monture circulaire (p.ex. GAS1 Wild) pouvant être placé sur une base munie d'une rainure en V.
b) Surface inférieure de la base à trois pieds; d représente la distance entre les pieds.



Si le tain du miroir est au verso du verre plan-parallèle, l'image réfléchie sera perturbée par des reflets parasites et manquera de netteté.

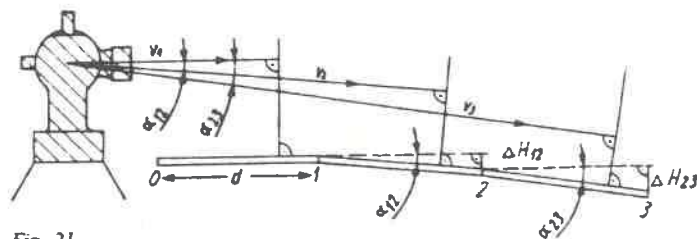


Fig. 21

Contrôle de planité

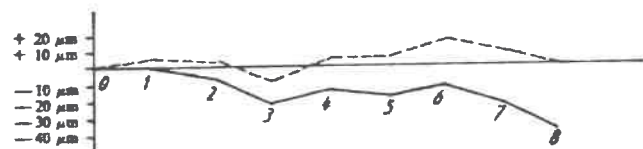
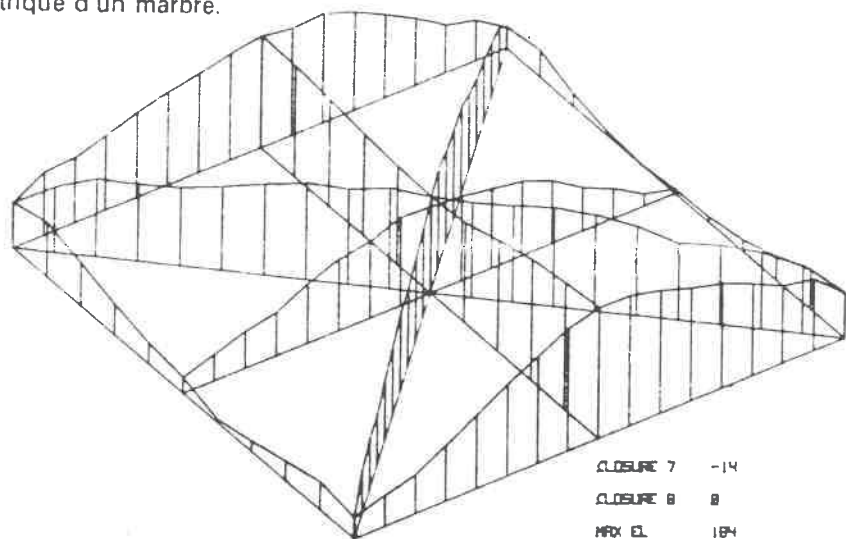
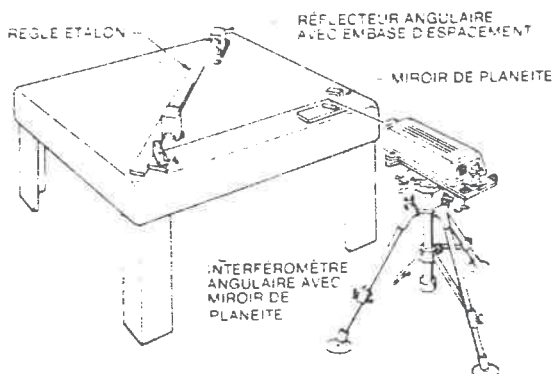


Fig. 22

Graphique des résultats

Vue isométrique d'un marbre.



Élévation numérique du même marbre en μ

64	85	92	105	120	131	140	151	156	151	154	139	118	95	68	57	38
52															65	
76		112						156							76	38
		108													88	
61			118					158					95			18
			118										102			
43				128				142					125			6
				136									128			
38					134			138		132						8
						142		143								
22	37	52	61	84	121	108	125	136	119	112	105	88	61	42	17	6
							127	134								
4						128		148		136						8
						114				142						
15					113			156			136					16
					102						126					
27				87				178				188				34
				74									112			
42								178						188		56
38	4	55	79	124	138	151	173	184	184	173	159	148	132	109	101	67

CLOSURE 7 -14
CLOSURE 8 8
MAX EL 184

Fig. 24a

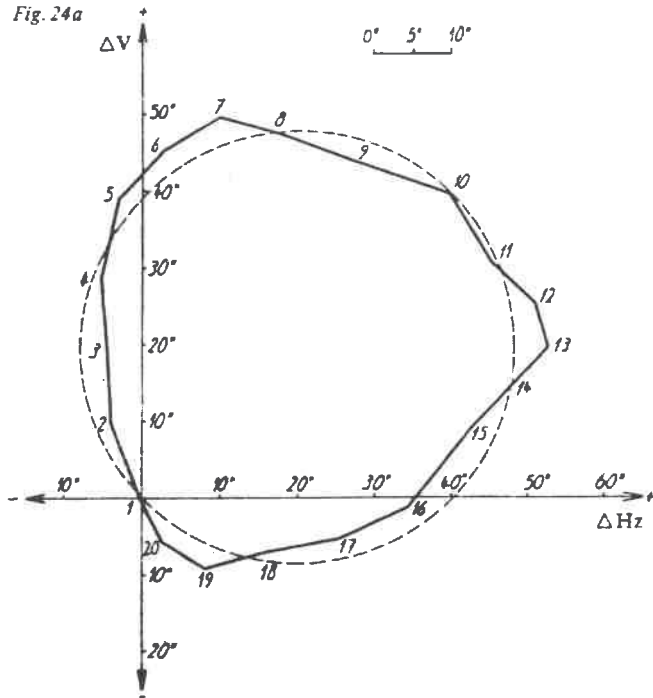


Fig. 24b

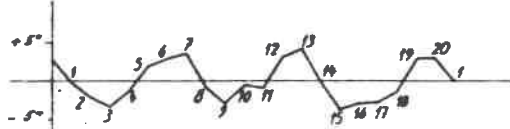


Fig. 24
a) Mesure de la précision de rotation du cylindre. Mesures faites sur 20 positions, chaque 20° (18°).
b) Graphique des écarts par rapport à la position initiale de l'axe. Le maximum de la nutation est d'env. $\pm 4^\circ$.

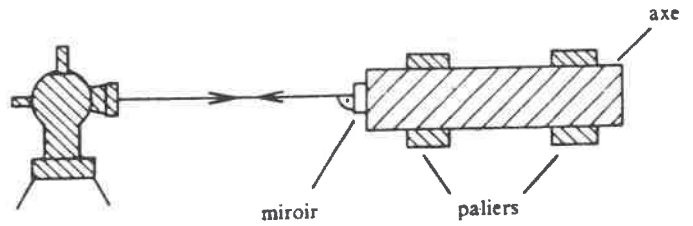


Fig. 23
Mesure de la précision de rotation d'un cylindre.

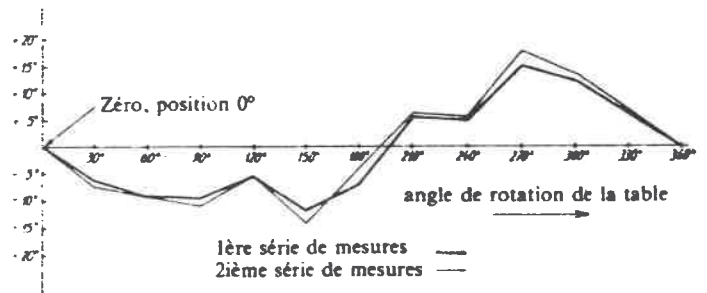


Fig. 26
Contrôle d'une table divisée. Le graphique démontre les erreurs angulaires de la table, c'est-à-dire la valeur obtenue par soustraction de l'angle indiqué par les divisions et de l'angle mesuré au théodolite.

REPRODUCTION PHOTOGRAPHIQUE

- agrandissements
- réductions
- remises à l'échelle en tous formats
- réductions/assemblages de plans à échelle imposée

- confection
- reproduction
- travaux spéciaux sur mosaïques topographiques

- travaux sur supports polyester
- typons offset
- tramés ou trait

HAUTE PRECISION

LART

PHOTO-REPROGRAPHIE PHOTO-CARTOGRAPHIE

LES APPLICATIONS DE LA
REPRODUCTION TECHNIQUE

5, rue de la Véga
75012 PARIS

347.15.92