

convergence et nivellement optique de haute précision en tunnels et galeries

Charles Veillard
Géomètre Expert DPLG diplômé de l'ESGT



Équipement de repères – Ligne B du RER – Paris

RÉSUMÉ

La réalisation d'ouvrages souterrains de plus en plus nombreux, y compris à faible profondeur en milieu urbain, nécessite des suivis minutieux du comportement des excavations et soutènements pendant et après les phases travaux. Cet article évoque les derniers développements de la méthode mise au point par le Cabinet VEILLARD et OLIVIER; depuis plusieurs années, une méthode fiable, précise et originale.

ABSTRACT

Construction of underground sites are more and more numerous, even in town planning with low depth. That needs to follow up possible distortions and settlements during and after works. This article deals with the last developpments of the method perfected by VEILLARD and OLIVIER office. For several years, a reliable, accurate and original method.

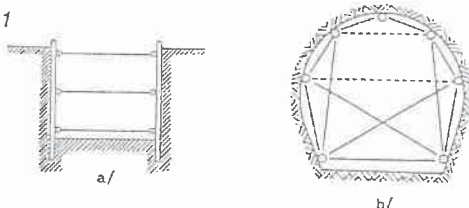
1 – PRÉLIMINAIRES

1 – 1 – Définitions

1 – 1 – 1 – Convergence :

Dans les travaux publics (TP), les mesures de convergence (ou convergencemétrie ou simplement convergence) ont pour but de mesurer le rapprochement ou l'éloignement relatif de deux éléments : parois de galeries, piédroits de tunnels, soutènements, blindages,...

figure 1



Les topographes chargés d'effectuer ces mesures déterminent les longueurs entre des éléments à un moment donné, puis redéterminent ces mêmes longueurs quelques temps après. C'est la variation de ces longueurs qui intéresse les responsables des Travaux

Publics ; il s'agit d'une mesure différentielle, la valeur de la longueur elle-même importe peu.

1 – 1 – 2 – Opto-convergence :

L'opto-convergence est la technique qui permet de faire des mesures de convergence par des procédés opto-électroniques, par opposition aux mesures de convergence mécaniques qui elles, utilisent un ruban en acier ou un fil en métal invar.

1 – 2 – Systèmes mécaniques de mesures de convergences.

1 – 2 – 1 – Généralités :

Ces systèmes réalisent des mesures directes immédiatement comparables aux précédentes, en première approximation. Il faut parfois, pour affiner les résultats, tenir compte de la température (ruban en acier) et de l'étalement.

Chaque mesure nécessite :

- la fixation des extrémités du fil invar ou du ruban d'acier sur le repère fixe scellé, opération assez délicate car il faut toujours appliquer la même force de serrage,

- la mise en tension du fil ou du ruban, soit par un ressort (système assez grossier et peu sûr), soit par traction du type vis-écrou sous le contrôle d'un dynamomètre de précision, soit par d'autres systèmes (balance,...),
- la lecture de la mesure avec un comparateur ou un compteur.

1 – 2 – 2 – Différents modèles :

Plusieurs fabricants ou organismes ont créé de tels systèmes, citons :

- DISTINVAR du CERN (conseil Européen pour la recherche Nucléaire) : fil invar, mise en tension par bascule. Dispositif lourd et peu pratique sur les chantiers.
- DISTOMETRE ISETH (École Polytechnique Fédérale de Zurich) : fil invar tendu à 8 kg sous contrôle d'un dynamomètre précis (70 g). Système souple, bien conçu, permettant des mesures dans toutes les directions d'un demi-espace, mais nécessitant un fil par distance à mesurer.
- DISTOMATIC TELEMAT (licence Coyne et Bellier) : fil invar, motorisé pour la tension, arrêt automatique commandé par un dynamomètre précis. Nécessitant un fil par distance et une implantation précise des repères.
- INTERFELS (Appareil austro-germanique) : ruban d'acier perforé tous les décimètres, tension par ressort. Moins précis mais très souple d'emploi.
- DISTANCEMETRE ORIENTABLE du CETE (Centre d'Études Techniques de l'Équipement à Lyon) : constitué d'une série de fils invar de différentes longueurs (10 m, 5 m, 3 m, 1 m, 0,5 m, 0,3 m,...) muni chacun d'un système d'accrochage très précis permettant de réaliser toutes les longueurs et éviter ainsi l'utilisation d'un fil par distance. La tension est contrôlée par un dynamomètre : ce système mesure dans toutes les directions d'un demi-espace.
- INVAROMATIC de la société GEOCIM allié à la fois la motorisation du DISTOMATIC et la souplesse du DISTANCEMETRE ORIENTABLE qui n'exige pas un fil par distance.

1 – 2 – 3 – Avantages :

L'avantage principal du fil invar réside dans sa précision, mais celle-ci ne peut-être obtenue que si les conditions de travail sont bonnes et si les opérateurs sont très soigneux. Autre avantage, le résultat est connu immédiatement et la comparaison avec la mesure précédente peut être faite sur le terrain. Le développement du fil invar est dû au fait que les méthodes optiques (intersection de visées de deux théodolites,...) étaient lourdes et longues.

1 – 2 – 4 – Inconvénients :

- lourdeur du procédé, surtout lorsque les points sont peu accessibles et qu'il faut utiliser de grandes échelles,
- impossibilité de travailler pendant qu'une circulation quelconque s'effectue sur le chantier (trains, engins divers ou personnel),

- utilisation interdite en présence de courants électriques (fils de trolley, de caténaires ou rails de traction),
- impossibilité de faire des mesures lorsque les points d'accrochage sont devenus inaccessibles (hauteur de terrassement trop grande, obstacles matériels entre points d'ancrage),
- difficulté de surveiller de longues portées de fil (>20 m),
- présence d'aération naturelle ou forcée faisant vibrer le fil et rendant la lecture très imprécise,
- lourdeur et encombrement du matériel,
- nécessité d'étalonner l'appareil sur un banc de contrôle,
- nécessité d'utiliser au moins deux opérateurs, les impératifs de temps conduisant plutôt à en employer trois ou quatre.

Enfin, il est très important de savoir que les systèmes mécaniques ne fournissent pas de nivellement précis des repères. Si celui-ci s'avère nécessaire, il doit être exécuté par des procédés traditionnels, ce qui allonge d'autant la durée d'intervention.

2 – L'OPTO-CONVERGENCE

Précisons en premier lieu que cette méthode n'a pu apparaître qu'avec les instruments modernes : les tachéomètres électroniques à distancemètre parfaitement coaxial à la lunette, ainsi qu'avec la précision atteinte par ces mêmes distancemètres.

En ce qui concerne la mesure des angles, la haute résolution des systèmes de lecture assurait depuis longtemps la précision nécessaire.

L'opto-convergence, contrairement aux systèmes mécaniques, ne donne pas directement tous les résultats, ces derniers provenant de calculs appliqués aux mesures électro-optiques.

2 – 1 – principe de l'opto-convergence :

Le principe simplifié est le suivant :

Avec un tachéomètre électronique de précision (T) mis en situation en un point quelconque, on vise une cible réfléchissante fixée en A. On note la distance suivant la pente $D_p = TA$, l'angle vertical VA et l'angle horizontal LA .

À partir de coordonnées quelconques du point T, il est possible de calculer des coordonnées XA , YA , ZA pour le point A.

De la même façon, en visant un point B depuis la même station affectée des mêmes coordonnées que précédemment, il est possible de calculer des coordonnées XB , YB , ZB .

On voit que depuis cette station T il est possible de calculer autant de groupes de coordonnées que l'on aura jugé utile de fixer de cibles réfléchissantes (C, D,...). Il est donc possible de calculer la longueur dans l'espace du segment AB, puis des segments BC, CD,..., AC, AD...

En revenant une heure, six heures, un jour, une semaine ou un mois plus tard, le tachéomètre T occupant une position quelconque par rapport à la précédente (à ceci près que les mêmes points doivent pouvoir être

visés) affectée de coordonnées quelconques, il sera possible de recalculer les cordes AB, BC, CD,... et les comparer aux mesures précédentes.

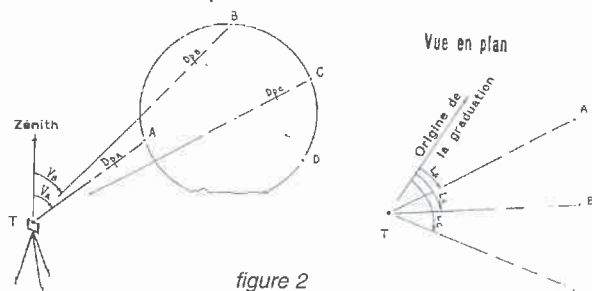


figure 2

2 - 2 - matériels :

Pour obtenir la même précision pratique qu'avec le fil invar, il faut des tachéomètres électroniques (stations totales) de haute précision nominale aussi bien en angle (résolution 1 à 2 dmgr) qu'en distance (résolution 0.1 à 0,2 mm).

Il est nécessaire que l'optique émettrice-réceptrice du distancemètre soit coaxiale à l'axe optique de la lunette afin d'éliminer les erreurs parasites d'excentricité, de parallaxe,...

Les instruments doivent avoir des corrections bi-axes (position de l'axe principal dans l'espace), et les mesures doivent être enregistrées sur un carnet électronique de terrain.

On recense par ordre alphabétique :

- GEODIMETER, modèle 540 ou 640. Appareil très puissant en distances, dispose en plus d'une touche D qui permet d'augmenter le nombre des mesures à distance.
- LEICA, modèle TC 2 002. Appareil de haute classe modèle TC1800.

Ces deux appareils nécessitent une lentille additionnelle pour les mesures sur cibles en papier rétro-réfléchissant sur des distances inférieures à 20 mètres.

- NIKON, modèle DTM 750.
- SOKKIA, modèle NET2 - 3D, fonctionne avec le système MONMOS, système conçu pour l'opto-convergence avec de nombreux accessoires.
- ZEISS, modèle REC ELTA 2, appareil puissant.

2 - 3 - Équipement

2 - 3 - 1 - Prismes :

- Le point de visée peut être constitué d'un prisme classique, d'un mini-prisme (moins cher) sur lequel il faut avoir dessiné une cible (croix, cercle,...) pour viser toujours le même point quel que soit l'angle d'incidence, puisque les stations sont libres.
- Ce type d'équipement est assez coûteux (2 500 F le premier, 1 300 F le second, prix HT 1995), surtout s'il n'est pas récupéré en fin de chantier, ce qui peut arriver s'il est devenu inaccessible ou trop onéreux à reprendre.
- L'avantage de ce type de matériel est que tout tachéomètre électronique coaxial est utilisable sans modification ni accessoire. De plus, les visées peuvent être longues bien que limitées par la qualité du pointé et l'imprécision sur la mesure de la distance.

2 - 3 - 2 - Autres cibles :

D'autres fournitures sont utilisées en raison de leur faible prix :

- catadioptrés (20 à 80 F HT suivant leur taille) sur lesquels il faut dessiner une croix (figure 3 a)
- papier autocollant rétro-réfléchissant genre SCOTCHLITE de 3 m, constitué de micro-prismes à raison de 100 à 400 par alvéole (15 à 25 F HT suivant la taille, vendue en feuille de 1 m² à 1 000 F HT).

a/

b/

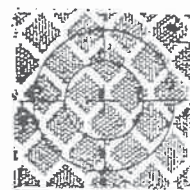


figure 3

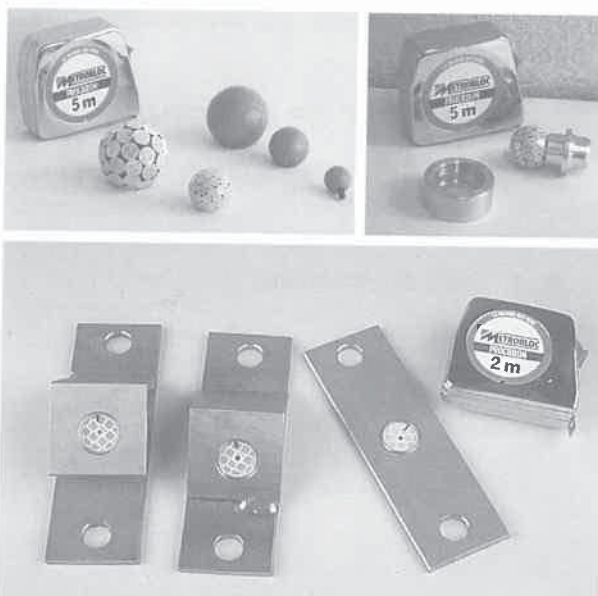
2 - 3 - 3 - Repère de convergence et nivellement, breveté par Monsieur VEILLARD.

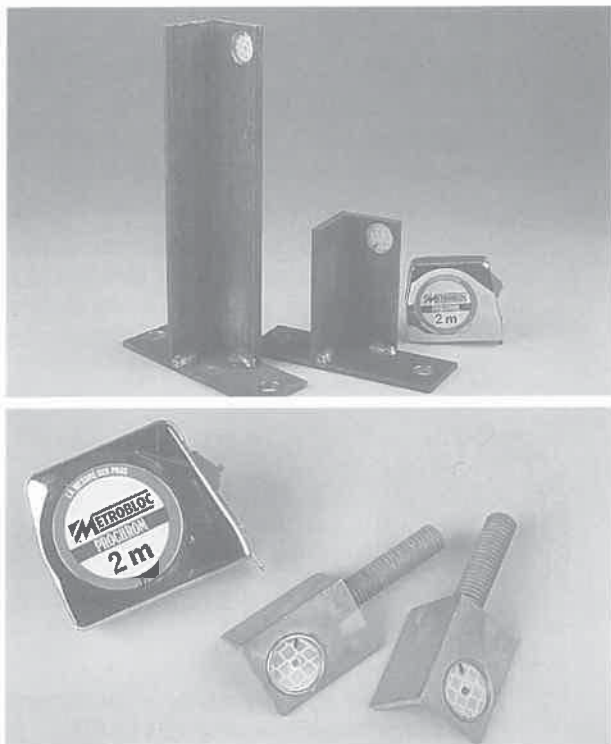
Les repères brevetés mis au point par Monsieur VEILLARD, sont constitués de deux pastilles en papier rétro-réfléchissant insérées dans un système de centrage très précis permettant de viser des deux côtés tout en conservant la haute précision du système (150 à 200 F HT en 1995).

Pour améliorer encore ses repères, Monsieur VEILLARD a mis au point des sphères brevetées de 16 à 50 m de diamètre.

En réalité, il s'agit d'une sorte de polyèdre formé de cercles constitués de pastilles de papier rétro-réfléchissant. Ainsi ce repère peut être visé de toutes les directions. C'est naturellement le centre du polyèdre qui est calculé (prix plus 30 % environ des repères ci-dessous).

Divers exemples :





Le faible coût de ces repères permet de les abandonner à la fin des mesures. Par contre tous les tachéomètres électroniques ne sont pas utilisables ; certains peuvent être modifiés, d'autres doivent recevoir des accessoires spécifiques.

2 - 3 - 4 - Installation des équipements :

Pour l'opto-convergence, les repères sont très légers, ne sont soumis à aucune contrainte, sont collés ou fixés avec des goujons dans des trous de Ø 10 mm réalisés avec une perceuse sur accus. Ils sont utilisables immédiatement après leur fixation.

Rappelons que pour les fils invar, les repères sont assez gros (25 mm de diamètre) et sont, soit scellés au mortier, à la résine, au soufre,... dans des trous faits au perforateur (respecter le temps de prise), soit vissés sur une douille autoforeuse genre SPIT ROC, Ø 20 mm mise en place à l'aide d'un pistolet électro-pneumatique assez puissant.

3 - ANALYSE DE LA MÉTHODE

La méthode repose sur la haute précision de mesure des distances et des angles, même si pour ces dernières elle était déjà acquise depuis un certain temps.

3 - 1 - précision théorique

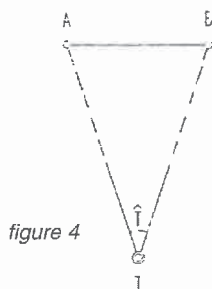


figure 4

Pour simplifier l'exposé, nous nous plaçons dans le cas d'un triangle où les points A et B sont situés à la même altitude.

La corde à mesurer est $AB = C$, le tachéomètre est en T, d'où l'on mesure l'angle T et les distances $TA = TB = D$

$$\text{On a : } C^2 = 2D^2 - 2D^2 \times \cos T = 2D^2 (1 - \cos T) \quad (1)$$

3 - 1 - 1 - Erreur due à la mesure de distance

On peut écrire :

$$C^2 = D^2 (1 - \cos T) + D^2 (1 - \cos T) \quad (1\text{bis})$$

Cette écriture met en évidence le fait que les longueurs TA et TB sont mesurées indépendamment et donc que les erreurs commises sur chacune d'elles ne s'additionnent pas mais se composent quadratiquement, d'où les calculs :

En différenciant (1bis) par rapport à D, on obtient :

$$2C \delta C D = 2D (1 - \cos T) \delta D + 2D (1 - \cos T) \delta D$$

$$\delta C D = \frac{D (1 - \cos T) \delta D + D (1 - \cos T) \delta D}{C}$$

et en appliquant la remarque ci-dessus :

$$\delta C D = \frac{D \delta D \sqrt{2 (1 - \cos T)}}{C} \quad (2)$$

3 - 1 - 2 - Erreur due à la mesure de l'angle :

En différenciant (1) par rapport à T, on obtient :

$$\delta C T = \frac{2D^2 \times \sin T \delta T}{2C} \quad \text{avec } \delta T \text{ en radian}$$

$$\delta C T = \frac{D^2 \sin T \delta T'' \times \sin 1''}{C} \quad (3)$$

Le signe '' symbolise le décimilligrade (dmgr) qui vaut 0.0001 grade $\sin 1'' = 1.57 \times 10^{-6}$

$= \pi/2000000$ est le coefficient de transformation des décimilligrade en radian.

3 - 1 - 3 - Erreur sur la corde C

La composition quadratique des erreurs $\delta C D$ et $\delta C T$ nous donne l'erreur δC sur la détermination de la corde C.

$$\delta C = \sqrt{\delta C D^2 + \delta C T^2} \quad (4)$$

Il est rappelé que ces formules ont été établies pour le cas où les points A et B sont à la même altitude.

3 - 1 - 4 - Ordre de grandeur :

Pour une corde $C = 8 \text{ m}$, des distances $TA = TB = D = 20 \text{ m}$, l'angle T vaut 25.6 grades.

Si l'on prend comme erreur sur la distance

$\delta D = \pm 1 \text{ mm}$ et comme erreur sur l'angle

$\delta T = \pm 5 \text{ dmgr}$, on obtient :

$$\begin{aligned} \delta C D &= \pm \frac{2 \times 20 \times 0.001 \times (1 - 0.92)}{8} \\ &= \pm \frac{0.040 \times 0.08}{8} = \pm 0,0004 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\delta C D = \pm 0,4 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \delta C T &= \pm \frac{20^2 \times 0.39 \times 5 \times 1.57 \times 10^{-6}}{8} \\ &= \pm 19.5 \times 5 \times 1.57 \times 10^{-6} = \pm 0,00015 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\delta C T = \pm 0,15 \text{ mm}$$

L'erreur résultante sera :

$$\delta C = \sqrt{0.4^2 + 0.15^2} = \pm 0,43 \text{ mm}$$

On voit dans cet exemple la prépondérance de l'erreur sur la distance. En réalité, l'erreur $\delta D = \pm 1 \text{ mm}$ est trop forte car les distances sont courtes, mesurées plusieurs fois, (d'où une amélioration par la moyenne) et les conditions atmosphériques sont le plus souvent homogènes du fait des courtes distances. La pratique montre une erreur $\delta D' = \pm 0,5 \text{ mm}$.

3 – 1 – 5 – Tableau des valeurs :

Le tableau ci-dessous reprend quelques dimensions de figures, et nous nous sommes placés dans deux cas de précision :

1^{er} cas (K1) - erreur sur les distances D :

$$\delta D = \pm 1 \text{ mm}$$

– erreur sur l'angle T :

$$\delta T = \pm 5 \text{ dmgr}$$

Ce cas correspond aux précisions données par les constructeurs.

2^e cas (K2) - erreur sur les distances D :

$$\delta D = \pm 0,5 \text{ mm}$$

– erreur sur l'angle T :

$$\delta T = \pm 3 \text{ dmgr}$$

Ce cas correspond aux précisions observées dans la pratique (répétition des mesures) en apportant un grand soin aux observations. (cf. tableaux ci-dessous)

		CORDE 5 m				CORDE 10 m			
D		T	δC_D	δC_T	δC	T	δC_D	δC_T	δC
(m)		(gr)	(mm)	(mm)	(mm)	(gr)	(mm)	(mm)	(mm)
10	K1	32.2	0.36	0.08	0.36	66.7	0.71	0.07	0.71
	K2		0.18	0.05	0.18		0.36	0.04	0.36
20	K1	16.0	0.18	0.16	0.24	32.2	0.35	0.16	0.39
	K2		0.09	0.09	0.13		0.18	0.09	0.20
30	K1	10.6	0.12	0.24	0.26	21.3	0.24	0.23	0.33
	K2		0.06	0.14	0.15		0.12	0.14	0.18
40	K1	8.0	0.09	0.31	0.33	16.0	0.18	0.31	0.36
	K2		0.04	0.19	0.19		0.09	0.19	0.21
50	K1	6.4	0.07	0.39	0.40	12.8	0.14	0.39	0.42
	K2		0.04	0.24	0.24		0.07	0.23	0.24
60	K1	5.3	0.06	0.47	0.47	10.6	0.12	0.47	0.48
	K2		0.03	0.28	0.28		0.06	0.28	0.29

		CORDE 20m				CORDE 30 m			
D		T	δC_D	δC_T	δC	T	δC_D	δC_T	δC
(m)		(gr)	(mm)	(mm)	(mm)	(gr)	(mm)	(mm)	(mm)
10	K1	200.00	1.41	0.00	1.41				
	K2		0.71	0.00	0.71				
20	K1	66.7	0.71	0.14	0.72	108.0	1.06	0.10	1.07
	K2		0.35	0.08	0.36		0.53	0.06	0.53
30	K1	43.3	0.47	0.22	0.52	66.7	0.71	0.20	0.74
	K2		0.24	0.13	0.27		0.35	0.12	0.37
40	K1	32.2	0.36	0.30	0.47	48.9	0.53	0.29	0.61
	K2		0.18	0.18	0.25		0.27	0.18	0.32
50	K1	25.6	0.28	0.38	0.48	38.8	0.42	0.37	0.57
	K2		0.14	0.23	0.27		0.21	0.22	0.31
60	K1	21.3	0.24	0.46	0.52	32.2	0.35	0.46	0.58
	K2		0.12	0.28	0.30		0.18	0.27	0.33

3 – 1 – 6 – Configurations optimales

L'examen des tableaux ci-dessus montre que la résultante δC décroît, passe par un minimum, puis croît à nouveau. Ceci laisse pressentir qu'il existe une configuration dans laquelle la relation entre la longueur de la corde C et les distances D est telle que l'on obtient une erreur minimale.

Cette configuration est réalisée lorsque les erreurs dues à la distance D et à l'angle T sont égales, ce qui permet d'écrire :

$$\frac{\sqrt{2} \times D \times \delta D (1 - \cos T)}{C} = \frac{D^2 \times \sin T \delta T}{C}$$

$$\text{ou } \sqrt{2} \delta D (1 - \cos T) = D \times \sin T \delta T$$

$$\text{mais } (1 - \cos T) = \sin T \times \tan \frac{T}{2}$$

$$\text{d'où } \sqrt{2} \delta D \sin T \times \tan \frac{T}{2} = D \times \sin T \delta T$$

$$\text{ou en simplifiant et en remarquant que } \tan \frac{T}{2} \approx \frac{C}{2D}$$

on peut écrire

$$\frac{\sqrt{2} \times \delta D \times C}{2D} = D \times \delta T \text{ ou } 2D^2 \times \delta T = \sqrt{2} \times \delta D \times C$$

$$\text{et enfin } D^2 = \frac{\sqrt{2} \times \delta D \times C}{2 \delta T} \quad (5)$$

Dans l'option K1 du paragraphe 3 – 1 – 5, en sachant que :

$$\delta T = \pm 5 \text{ dmgr} = \pm 7.85 \times 10^{-6} \text{ rad}$$

on aura

$$D^2 = \frac{0.707 \times 0.001 \times C}{7.85 \times 10^{-6}}$$

$$D = \sqrt{90,077 \times C} = 9.490,906 \sqrt{C}$$

d'où le tableau :

C	5 m	10 m	20 m	30 m
D	21,2 m	30,0 m	42,4 m	52,0 m

Dans l'option K2, en sachant que :

$$\delta T = \pm 3 \text{ dmgr} = \pm 4,71 \times 10^{-6} \text{ rad}$$

on aura $D = 8.661777 \sqrt{C}$

d'où le tableau :

C	5 m	10 m	20 m	30 m
D	19,4 m	27,4 m	38,7 m	47,4 m

3 – 2 – QUELQUES RÉSULTATS PRATIQUES

3 – 2 – 1 – Présentation des mesures effectuées pour la RATP

En juin 1994, lors du passage du tunnelier de METEOR (Métro Est-Ouest Rapide) au-dessus de la voie 2 du RER B (Réseau Régional, ligne B) entre la station CHÂTELET et SAINT MICHEL- NOTRE DAME, huit auréoles ont été installées pour surveiller le mouvement éventuel du tunnel de la ligne B en exploitation.

Il est précisé :

- que les mesures ont été faites quatre fois du 13 au 23 juin,
- que les mesures étaient rattachées en nivellement sur des zones stables car on craignait surtout des mouvements verticaux,
- qu'à titre d'essai, un grand nombre de visées atteignaient 50 m et que le rattachement en nivellement était très important (voir autre application au paragraphe 4 – 2).

3 – 2 – 2 – Résultats

Les mouvements constatés ont été négligeables, de l'ordre de la précision de la méthode. Dans les zones situées au dehors de l'influence du passage du tunnelier, 47 cordes observées quatre fois ont été calculées, ce qui a permis de déterminer 148 écarts par rapport à la moyenne arithmétique de chacune des cordes, ce qui est autant plus justifié que dix jours seulement séparent les premières mesures des dernières.

Le classement de ces écarts a donné l'histogramme ci-dessous, en sachant que les écarts (exprimés en dixièmes de millimètre) ont été regroupés de la façon suivante :

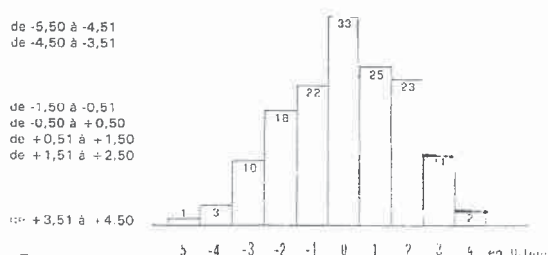


figure 5

On constate une très belle répartition campaniforme des écarts, ce qui montre l'homogénéité des résultats et la sûreté de la méthode.

L'écart moyen arithmétique de ces 148 mesures est $e_a = 0,16 \text{ mm}$, avec 73 écarts négatifs (maximum : $-0,475 \text{ mm}$) et 70 écarts positifs (maximum $+0,425 \text{ mm}$) (des décimales superflues ont été conservées).

L'erreur moyenne quadratique (ou écart-type) est

$$e_{mq} = \pm 0,194 \text{ mm, retenons :}$$

$$e_{mq} = \sigma = \pm 0,2 \text{ mm}$$

3 – 3 AVANTAGES DE L'OPTO-CONVERGENCE

3 – 3 – 1 – Rapidité

La rapidité est l'une des premières qualités de la méthode. Elle est présente dès l'installation des repères (voir 2 – 3 – 3). Lors de l'opération citée au paragraphe 3 – 2 – 1, les huit auréoles ont été équipées et observées lors de la première nuit, durant la coupure de courant de traction (de 1 h 30 à 4 h 30), coupure nécessaire uniquement lors de l'équipement (personnel au voisinage de la caténaire). Il est juste de préciser qu'un certain nombre de personnes était sur le site dans le seul but de s'informer sur la méthode. Lors des opérations suivantes, la méthode fait gagner encore plus de temps en raison du matériel réduit (un tachéomètre et un trépied) ; il est alors inutile de transporter des échelles lourdes et encombrantes, ce qui économise du temps et la main d'œuvre.

Enfin l'opto-convergence se révèle plus rapide sur les mesures elles-mêmes que le fil invar qui nécessite des vissages sur des boulons d'ancrage, la mise en tension correcte, la lecture, les transcriptions et les dévissages. Cette rapidité est également due à l'enregistrement informatique et automatique des données ; le technicien n'a qu'à faire la visée, assurer un bon pointé et appuyer sur une touche pour lancer toute la série des mesures d'angles et distances ainsi que leur enregistrement.

Si l'on désire avoir une information plus globale sur les mouvements de l'ouvrage ausculté, il est nécessaire de niveler des repères, or l'opto-convergence le fait automatiquement si on le désire, et sans supplément de temps.

La publication quasi-automatique des résultats par usage l'informatique est très rapide.

3 – 3 – 2 – Souplesse

Le fait majeur de ne pas être obligé de se mettre en station sur un point déterminé, de pouvoir faire une station libre, de laquelle il faut seulement voir les points à ausculter offre un gros avantage à la méthode : il est même primordial sur les chantiers d'ouvrage en construction.

Cette liberté de station permet de ne pas gêner le passage des voitures en ville, des engins sur les chantiers, des trains ou des métros sur les voies ferrées, ... et de se tenir à l'écart des zones dangereuses : rivières, canaux, caténaires, rails traction, ...

La souplesse de la méthode se trouve dans la faculté de viser des points d'abord dangereux ou difficilement accessibles dès leur installation, ou qui le sont devenus à la suite de travaux (par exemple, cas de terrassements entre deux parois moulées).

Sur les chantiers, il arrive que de lourds coffrages en attente, des déblais, un engin en panne, ... empêchent de tendre un fil invar entre les repères, ce qui entraîne l'impossibilité de la mesure qui est généralement possible avec l'opto-convergence. Avec celle-ci, le nombre d'impossibilités de mesures est de l'ordre de 1 % (dû le plus souvent à la destruction des repères) sur les chantiers très encombrés alors qu'il atteint 20 % avec le fil invar.

3 – 3 – 3 – Rentabilité

La conjugaison de la rapidité et de la souplesse de la méthode entraîne naturellement une bien meilleure rentabilité que le fil invar.

Les expériences ont montré qu'un seul opérateur en opto-convergence mesure plus de cordes que quatre personnes mesurant au fil invar durant le même laps de temps ; le rapport de productivité est de huit à vingt fois

supérieur pour l'opto-convergence. La supériorité est d'autant plus marquée que l'environnement des zones de mesures est plus difficile (points en hauteur, peu accessibles), plus dangereux (caténaires, rails de traction, piles de pont,...) ou plus mal desservi (zone de galerie, de tunnel éloigné d'un accès,...).

Il est à noter que le matériel du fil invar coûte environ quatre fois moins cher que celui de l'opto-convergence (tachéomètre et logiciels), mais pour ce dernier il n'est pas spécifique et est utilisable par toutes activités topographiques.

3 – 3 – 4 – Informatisation

L'opto-convergence utilise du matériel électronique totalement informatisé. À son retour du terrain, le technicien « vide » le carnet informatique de l'appareil dans un micro ordinateur qui va faire les calculs et établira les tableaux des résultats ainsi que les graphiques si nécessaire.

3 – 3 – 5 – Sûreté, sécurité

L'informatisation totale de l'opto-convergence assure au procédé une grande sûreté, présente dès la saisie des données (aucune faute de lecture ou de transcription possible), puis au moment des calculs et enfin à la sortie des résultats. Quand à la malveillance, il faudrait de bonnes connaissances topographiques à la personne mal intentionnée pour « corriger » des lectures afin d'obtenir un résultat convenu à l'avance.

3 – 4 DÉFAUT DE L'OPTO-CONVERGENCE

3 – 4 – 1 – Risques et remèdes

Avec le matériel utilisé par cette méthode, les causes d'erreurs ou de fautes sont principalement humaines et la réussite repose donc sur le technicien qui doit être sérieux, consciencieux et très informé des conséquences graves que peuvent avoir des résultats erronés. En conséquence, de bonnes conditions de travail doivent être assurées.

On peut recenser comme fautes :

a) pointé fait à la croisée d'un fil stadimétrique vertical avec le trait horizontal du réticule. Cela peut se produire lors des travaux dans l'obscurité, bien que maintenant les réticules soient éclairés.

Les réticules avec des cercles concentriques gravés peuvent éviter cette faute, la simple suppression des traits stadimétriques verticaux et horizontaux réglerait ce problème. L'observation des points dans les deux positions de la lunette peut pallier cette faute.

b) usage d'un appareil déréglé (collimation horizontale ou verticale...). Un tel appareil mal utilisé, c'est-à-dire sans respecter les procédés opératoires adéquats, entraîne des résultats douteux.

c) réfraction du rayon lumineux. Le passage d'une visée très près d'un obstacle dont la température diffère de la température ambiante (cas d'un tuyau transportant un fluide plus chaud ou plus froid que la galerie) dévie la visée, d'autant plus que la visée est plus proche ou que l'écart de température est plus grand.

Cette anomalie est difficile à déceler car la répétition des mesures ne la révèle pas. Il faut s'astreindre à faire passer les visées à plus de 10, 20 voire 30 cm d'un obstacle suivant la différence de température.

d) repère mal scellé. Le scellement dans un support instable fait que le repère bouge sous l'effet de son propre poids (exemple d'un scellement dans une croûte de bentonite sur une paroi moulée).

Informers les techniciens qui posent les repères de la possibilité de ce type d'incident.

e) confusion d'un repère avec un autre dans un ouvrage ou beaucoup de repères sont scellés (*voir tunnel, en début d'article*).

Un numéro sur les cibles, lisible par l'opérateur, doit éviter ce genre de problème. Des cibles de couleur (inexistantes en 1995) seraient très utiles. Ici encore, la répétition des mesures devrait révéler la visée fautive.

D'une façon générale et surtout dans les cas a), e) et peut-être b), si l'instrument est très déréglé, les anomalies entraînent une absence de calculs de la corde, ce qui est certes gênant, mais beaucoup moins grave que l'annonce d'un résultat faux.

3 – 4 – 2 – Interprétation

En calculant des cordes d'une auréole à l'autre (à condition qu'elles soient toutes observées depuis la même station) on peut confirmer des résultats surprenants et même préciser laquelle des deux extrémités bouge.

Par exemple, *figure 6*, on constate que la corde CD, « tendue » entre deux parois moulées diminue. Il est impossible de dire si c'est le point C qui se déplace vers l'intérieur, ou le point D, ou bien les deux.

En calculant les cordes AD, ED, et BC, FC et selon leurs vérifications, on peut par déduction préciser laquelle des extrémités se déplace. Pour continuer l'exemple ci-dessous, les cordes AB et EF sont constantes donc a priori les points A, B, E, F sont stables (ou alors ils bougent deux à deux en même temps et dans le même sens !...) mais les cordes AD et ED diminuent alors que les cordes BC et FC ne varient pas, on déduit logiquement que c'est le point D qui se déplace.

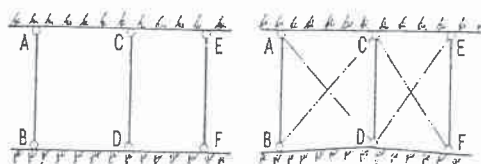


figure 6

Pour résoudre le cas vu ci-dessus, on peut également travailler dans un système local X, Y, Z, mais toujours dans le même. La ou les positions du tachéomètre sont toujours libres, mais elles sont déterminées par relèvement dans l'espace sur deux, trois, quatre,... points fixes connus dans les trois coordonnées.

4 – ÉVOLUTION ACTUELLE DE LA CONVERGENCE MÉTRIE OPTIQUE

À la date où nous mettons sous presse, le Cabinet VEILLARD et OLIVIER, travaille au développement d'un module de semi-automatisation des mesures s'appuyant sur l'utilisation des appareils de la génération qui utilise une caméra et un écran CCD permettant un pointé automatique des repères.

Ce module est en phase d'étude et nous pourrions sans doute évoquer plus tard les possibilités réelles que ce nouveau type d'appareil peut présenter. En particulier nos recherches s'orientent, bien sûr, vers un gain de temps appréciable des mesures sur le terrain et aussi la disparition de la partie fastidieuse de ces mesures. De plus le système peut fonctionner sans aucun éclairage.