

# Visées de Théodolites en collimation réciproque

par M. FAYE et B. JOUGAN  
Professeurs au Lycée Technique d'État Victor Bernard à Morez

Deux théodolites mis en collimation réciproque n'ont leurs axes parallèles que si leur mise au point sur l'infini est parfaite. Rien n'étant parfait, quelle sera l'erreur sur le parallélisme d'un défaut résiduel de mise au point ? Telle est la première question qui se pose quand on prétend opérer par ces méthodes. Cette erreur influencera directement la valeur  $dv_0$  dont il faudra (par le calcul) faire tourner les tours d'horizon pour les amener en coïncidence.

Nous avons demandé à M. Petitjean, chef de tra-

vaux du Lycée Technique d'État "Victor Bernard" à Morez, son avis sur la question. Nous publions, ci-dessous, le texte qu'ont bien voulu rédiger pour XYZ les professeurs Michel Faye et Bernard Jougan. Nous le faisons suivre d'une monographie sur la profession de technicien supérieur en instruments d'optique et de pression, à laquelle le Lycée Technique de Morez forme chaque année de nombreux jeunes gens.

A. MEMIER

## 1 — LE THEODOLITE

**1.1 Rôle :** sa lunette à réticule permet de viser des points matériels. L'instrument donne la mesure des angles de rotation de la lunette autour d'un axe vertical et d'un axe horizontal concourants.

**1.2 La Visée** d'un point objet est obtenue en faisant coïncider son image avec la croisée du réticule. Pour cela il a fallu non seulement orienter la lunette avec précision, mais d'abord la mettre au point en fonction de la distance du point visé, c'est-à-dire "focaliser" l'image à pointer dans le plan du réticule.

**1.3 La Finesse** de la visée est limitée, dans une lunette bien conçue, par les possibilités de l'œil qui observe à travers l'oculaire.

Le grossissement  $G$  de la lunette peut être défini comme une amplification angulaire : deux rayons entrant dans l'objectif en faisant entre eux un petit angle  $\alpha$  sortent de l'oculaire en faisant un angle  $G \cdot \alpha$ . De sorte que, si "l'angle d'acuité visuelle" de l'œil est  $\beta$ , la finesse de visée est  $\frac{\beta}{G}$ .

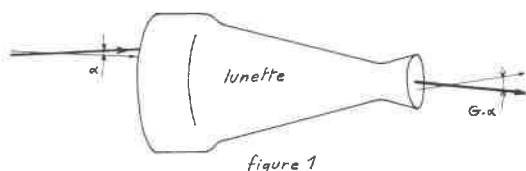


figure 1

## 2 — PROBLEME DE LA MICROTRIANGULATION

### 2.1 La méthode des Visées Parallèles

La précision avec laquelle les points à viser sont stationnés et balisés, suffisante pour les mesures habituelles de triangulation au théodolite, ne l'est pas pour la microtriangulation de haute précision à portée de quelques mètres.

Une méthode particulière de visée entre deux théodolites est proposée : l'un vise l'image du réticule de

l'autre, que l'objectif de ce dernier forme à l'infini. Le second théodolite fonctionne alors en collimateur, son réticule étant éclairé à travers l'oculaire. Les axes de visée des deux théodolites sont parallèles si l'image intermédiaire est bien à l'infini (faisceau bien cylindrique).



figure 2

### 2.2 Questions

2.2.1 Comment peut-on régler cette image intermédiaire à l'infini, et avec quelle précision ?

2.2.2 Quelle est l'influence de l'erreur résiduelle de ce réglage sur le parallélisme des visées des deux lunettes ?

## 3 — RÉGLAGE D'UNE LUNETTE DE VISÉE SUR L'INFINI

3.1 On peut procéder par Autocollimation dans un miroir plan (fig. 3). L'oculaire de la lunette est remplacé par un oculaire d'autocollimation muni d'un dispositif d'éclairage du réticule, ce qui permet le fonctionnement simultané en collimateur et en lunette. Si le réglage à l'infini est bon, un faisceau issu du réticule qui est alors dans le plan focal de l'objectif sort de l'instrument parfaitement cylindrique. Si l'on renvoie cette lumière à l'aide d'un miroir bien plan, le faisceau réfléchi est parfaitement cylindrique. C'est donc dans le plan focal de l'objectif que se forme une "image-retour" du réticule, qui est par conséquent coplanaire au réticule.

L'opérateur qui observe ces deux figures à travers l'oculaire vérifie leur coplanéité en déplaçant trans-

versalement son œil. Un défaut se traduirait par un déplacement relatif d'une figure par rapport à l'autre (effet de "parallaxe").

3.2 Pour estimer la précision du réglage, on peut raisonner de deux manières :

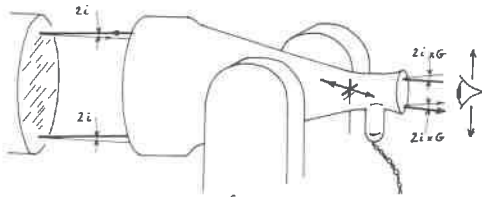


figure 3

### 3.2.1 Avec les rayons lumineux

La figure 3 représente une lunette bien mise au point sur l'infini par autocollimation. Le miroir étant ici imparfaitement perpendiculaire aux faisceaux (incidence  $i$ , angle des faisceaux =  $2i$ ), "l'image-retour" est légèrement au-dessous du réticule.

L'oculaire en donne des faisceaux décalés angulairement :

- le "faisceau retour", conjugué (prolongement optique) du faisceau réfléchi par le miroir (rayons dessinés en traits fins),
- le faisceau issu du réticule, qu'on peut considérer comme conjugué du faisceau incident sur le miroir, car les deux proviennent du même point : le réticule (rayons dessinés en traits épais).

Les rayons de ces faisceaux font entre eux un angle de  $2i \cdot G$  (voir 1-3 : grossissement), mais cet an-

gle étant le même d'un bord à l'autre, l'œil ne perçoit aucune parallaxe lorsqu'il se déplace (ici verticalement), recevant diverses parties de ces faisceaux.

Si le réglage est mauvais (figure 4), le faisceau incident sur le miroir n'est plus cylindrique. Soit  $\hat{e}$  le défaut de parallélisme de ses rayons extrêmes, ici en convergence. On voit que, d'un bord à l'autre de l'ouverture, la position angulaire des rayons aller et retour varie de  $2\hat{e}$ .

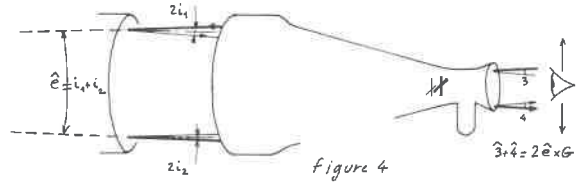


figure 4

L'œil reçoit alors des rayons dont l'un se déplace par rapport à l'autre de  $2\hat{e} \cdot G$ , d'où effet de parallaxe d'un bord à l'autre.

Si on admet que l'œil peut percevoir une parallaxe égale à son angle d'acuité visuelle  $a$ , on a :

$$2\hat{e} \times G = a \text{ d'où } \hat{e} = \frac{a}{2G}$$

exemple : pour  $a = 1'$   
 $G = 28 \text{ } \hat{e} \approx 1''$

### 3.2.2 Avec les images

Un défaut de mise au point de l'objectif consiste en un petit décalage entre son plan focal  $F'_o$  et le réticule R. L'image de R est formée par l'objectif (de longueur

Fig 5 : autocollimation - défaut de mise au point (très exagéré) :

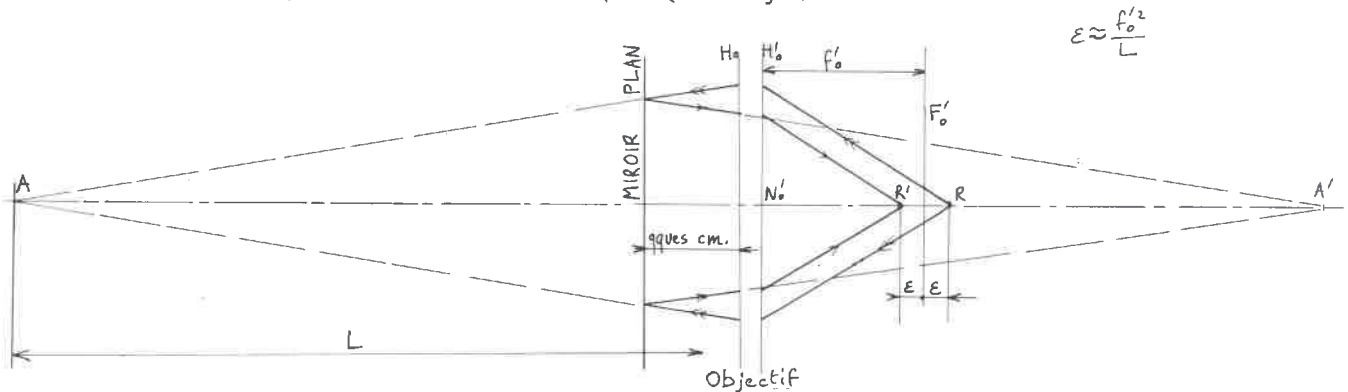
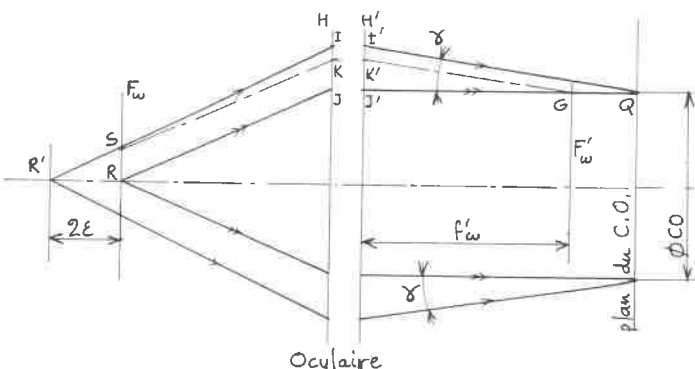


Fig 6 : effet de parallaxe - pour simplifier on suppose le réticule dans le plan focal objet  $F'_w$  de l'oculaire



$$- \gamma = \frac{1'J'}{J'Q}$$

- or :  $J'Q \parallel$  axe oculaire parce que RJ vient de  $F_w$

G dans le plan  $F'_w$  parce que  $SK \parallel RJ$

$I'Q \parallel K'G$  parce que les incidents viennent du même point S du plan  $F_w$ .

$$RS \approx E \cdot \frac{\phi \cdot C.O.}{f'_w}$$

$$- \text{donc } \gamma \approx \frac{E \cdot \phi \cdot C.O.}{f'^2_w} \quad \text{ou} \quad \frac{E \times \text{ouverture}}{f'_o \times f'_w}$$

focale  $f'_0$ ) en un point A à une distance  $L = f'^2_0 / \xi$  de l'instrument. Le miroir donne de A une image A' symétrique par rapport à son plan, donc située à environ L de l'instrument, mais "de l'autre côté". L'objectif donne de A' l'image-retour R' décalée de  $2\xi$  par rapport à R.

$$2\xi = 2f'^2_0 / L$$

Rappels : le grossissement de la lunette (§ 1-3) est égal au rapport des longueurs focales de l'objectif et de l'oculaire, et aussi au rapport des diamètres de l'ouverture de l'objectif et de son image après l'oculaire (le "cercle oculaire") :

$$G = f'_0 / f'_w = \text{Ø ouverture} / \text{Ø c.o.}$$

Ainsi pour un objectif de longueur focale 212, de diamètre libre 40, un grossissement de lunette égal à 28 conduit à un oculaire de longueur focale 7,5 mm et un cercle oculaire de diamètre 1,4 mm.

La figure 6 montre la relation entre  $\xi$  et le déplacement angulaire relatif  $2\gamma$  de R' par rapport à R quand l'œil se déplace transversalement d'un bord à l'autre du cercle oculaire :

$$2\gamma = 2\xi \frac{\text{Ø ouverture}}{f'_0 \cdot f'_w}$$

Un "effet de parallaxe"  $2\gamma$  permet donc de détecter une erreur de mise au point définie par une distance :

$$L = f'^2_0 / \xi = \frac{\text{Ø ouverture} \times f'_0}{f'_w \times \gamma}$$

On peut recevoir un effet  $2\gamma = 1'$  soit  $3 \cdot 10^{-4}$  radian.

L'exemple numérique cité donnerait alors :

$$L = \frac{56 \text{ km}}{f'_w (\text{en mm})}$$

3.2.3 Si la distance focale  $f'$  de l'oculaire d'auto-collimation est plus longue que celle de l'oculaire normal, le grossissement est moins fort, la distance L est moins longue.

3.2.4 On a supposé le miroir parfaitement plan. Le défaut de planéité du miroir qui produirait une erreur du même ordre de grandeur que celle qui a été étudiée serait d'environ  $0,025 \mu\text{m}$ , soit 0,1 frange d'interférence.

#### 4 — INFLUENCE DE L'ERREUR RÉSIDUELLE DE RÉGLAGE À L'INFINI SUR LE PARALLÉLISME DES VISÉES

Après réglage d'un théodolite sur l'infini par auto-collimation (§ 3), puis mise au point de l'autre sur ce premier en supprimant toute parallaxe, les deux théodolites sont pointés l'un sur l'autre, ou plutôt sur un point très éloigné, sommet du faisceau intermédiaire. Ceci est possible du fait que, bien que les lunettes soient conçues pour viser de quelques mètres à l'infini, ce réglage comporte une petite marge permettant la mise au point sur un point lointain virtuel situé "de l'autre côté" (côté oculaire).

##### 4.1 En raisonnant sur les rayons lumineux

Notons que le sommet A du faisceau intermédiaire est un point très lointain: pour  $e = 1''$  et diamètre d'ouverture  $\text{Ø} = 40 \text{ mm}$ , A est distant d'environ 8 km. Ceci n'a pu être bien représenté sur la figure 7 où les angles sont fortement exagérés.

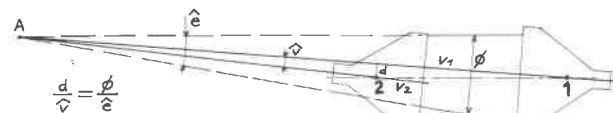


Figure 7

On voit que l'angle d'erreur  $\hat{v}$  de parallélisme des visées  $v_1$  et  $v_2$  des deux instruments est d'autant plus petit par rapport à l'angle  $\hat{e}$  du faisceau que d est petit par rapport à  $\text{Ø}$ .

Si d était égal ou supérieur à  $\text{Ø}$ , il ne passerait plus de lumière d'un instrument à l'autre, donc d est nécessairement très inférieur à  $\text{Ø}$  (voir § 4.3). On voit donc que l'erreur de visée  $\hat{v}$  est très inférieure à l'angle du faisceau  $\hat{e}$ , lui-même non supérieur à la limite de définition des instruments.

##### 4.2 En raisonnant sur les images

La figure 9 montre que le défaut du parallélisme des visées est  $\gamma \approx d/L$  soit :

$$\gamma \approx \frac{f'_w \times d}{f'_0 \times \text{Ø ouverture}}$$

d étant très inférieur au

diamètre d'ouverture (§ 4.3).

Fig 8 : visées parallèles :

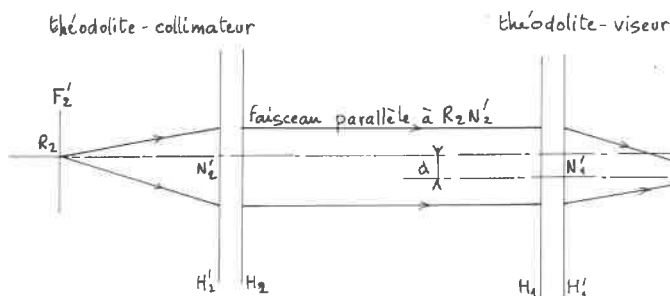


image de  $R_2$  à l'infini dans la direction  $R_2 N'_2$

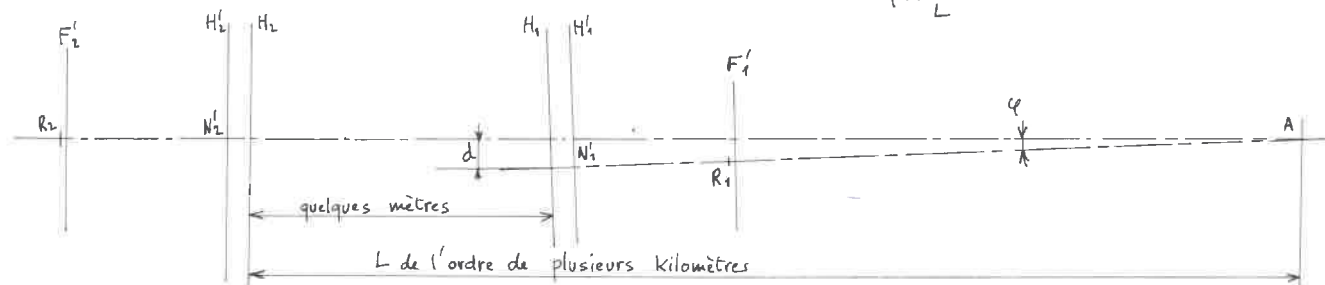
éléments cardinaux de chaque objectif:

plans principaux H et H'  
point nodal image N'  
plan focal image F'

Bien que, dans le théodolite-collimateur, les éléments  $H'_2$   $N'_2$   $F'_2$  soient situés dans le même espace optique que le point émetteur  $R_2$ , ils sont désignés comme éléments images.

Fig 9 : défaut de parallélisme, lui défini comme angle des directions de visées des deux lunettes

$$\varphi \approx \frac{d}{L}$$



Ainsi, en admettant  $d = 2 \text{ mm}$ , on trouverait, avec les valeurs du § 3.2.2. :  $\varphi \approx 2,5 \cdot 10^{-7}$  radian soit un sixième de seconde centésimale.

4.3 On doit pouvoir réduire le décalage  $d$  à 1 mm ou peut-être moins en faisant préalablement une visée proche d'un des théodolites (celui qui n'a pas été mis au point par autocollimation) sur l'axe maté-

riel de l'autre.

#### 4.4 Conclusion

Il apparaît donc que, après focalisation d'un théodolite par autocollimation dans un miroir bien plan, l'erreur résiduelle de ce réglage a un effet négligeable sur le parallélisme de sa visée avec celle du deuxième théodolite.

## La Section de Techniciens Supérieurs en instruments d'optique et de précision du Lycée Technique d'État "Victor Bernard" à Morez (Jura)

Le technicien supérieur en instruments d'optique et de précision, collabore, en contact direct avec le chercheur ou l'ingénieur, à la conception ou à la réalisation des dispositifs de recherche ou des appareils industriels non seulement dans le domaine de la construction des instruments d'optique, mais également dans tous les secteurs où l'optique, sans être le but essentiel, est un "moyen" auquel il est fait appel.

Sa formation scientifique générale est donnée avec le langage et les méthodes mathématiques employées dans le premier cycle de l'enseignement.

Sa formation technologique doit lui permettre d'assumer une responsabilité technique et, éventuellement, la coordination d'un groupe de travail et de s'adapter à certaines des tâches suivantes :

- Effectuer l'analyse fonctionnelle d'un ensemble donné (analyse de constatation) et en tirer les conclusions, en particulier en ce qui concerne les réglages, les moyens de réglages, les tolérances fonctionnelles des composants optiques et mécaniques.
- Collaborer avec des ingénieurs ou d'autres techniciens à l'étude d'un instrument ou d'un montage de laboratoire, le réaliser au niveau de la "maquette"

l'expérimenter ; participer à la conception du prototype, suivre et contrôler sa réalisation.

- Collaborer avec les services d'études et méthodes aux réalisations de pré-série et de série en s'attachant en particulier à faire respecter les fonctions optiques.
- Effectuer l'installation ou le dépannage d'appareils.
- Exercer une activité technico-commerciale, après avoir reçu un complément de formation.

En conséquence, il doit posséder :

- des connaissances approfondies en optique théorique et pratique qui lui permettent d'analyser un ensemble optique donné, de collaborer à la réalisation d'un avant-projet d'instrument, d'effectuer toutes mesures,
- des connaissances en mécanique théorique, en technique de construction, en fabrication mécanique qui lui permettent de concevoir ou de guider le choix des solutions concernant les liaisons des composants optiques, leurs guidages et les chaînes cinématiques nécessaires,