

# COURS TOPOGRAPHIE



## Table des matières

1	Unités de mesure en topographie .....	4
2	LE THEODOLITE .....	4
3	PRINCIPE DE FONCTION NEMENT .....	4
4	CARACTERISTIQUES DES THEODOLITES .....	6
5	Réglages de la station .....	7
6	Orientation des visées .....	7
7	Les angles verticaux .....	9
8	Calcul de dénivelée .....	10
9	Définitions .....	12
9.1	Introduction .....	12
10	Mesure des angles horizontaux .....	13
10.1	La réitération .....	14
10.2	Le double retournement .....	15
10.3	. Terminologie des mesures d'angles horizontaux .....	17
10.4	Lecture simple .....	17
10.5	Séquence .....	17
10.6	Paire de séquences .....	18
10.7	Tour d'horizon .....	19

11	Mesure des angles verticaux.....	19
11.1	Valeur moyenne d'un angle vertical par double retournement .....	22
11.2	Collimation verticale.....	22
12	Instruments de mesure.....	23
12.1	Organes principaux d'un théodolite .....	23
12.1.1	. Système de centrage/verticalisation <b>Objectifs</b> .....	25
12.1.2	. Système de calage fin de l'axe principal .....	27
12.1.3	Système de visée LUNETTE ASTRONOMIQUE .....	30
12.1.4	Systèmes de lecture .....	33
12.2	Bilan des erreurs.....	35
12.2.1	Défaut de verticalité de l'axe principal.....	36
12.2.2	Erreur de collimation horizontale.....	37
12.2.3	. Erreur de collimation verticale.....	37
12.3	Processus d'observation .....	39

## 1 Unités de mesure en topographie

Les angles en topographie sont observés et mesurés dans **le sens topographique** ou dans **le sens des aiguilles d'une montre**. L'unité angulaire employée est le grade (**gr**). Les unités de mesure employées en topographie sont reprises dans le **tableau I. 1**.

Grandeur	Unité	Symbole
Distance	Mètre	m et Km
Angle	grade	gr
Surface	Mètre carré	m <sup>2</sup>

Tableau I. 1. Unités de mesure en topographie.

## 2 LE THEODOLITE

Un théodolite est un appareil permettant de mesurer des angles horizontaux (angles projetés dans un plan horizontal) et des angles verticaux (angles projetés dans un plan vertical). Le terme théodolite regroupe l'ensemble des appareils à lecture « mécanique » par vernier gradué en comparaison aux appareils « électroniques », dont la lecture se fait sur un écran à affichage numérique. La mécanique de base des théodolites électroniques est souvent la même que celle des théodolites classiques.

## 3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

La figure ci-dessous montre le schéma de principe du fonctionnement d'un théodolite.

(P): Axe principal, il doit être vertical après la mise en station du théodolite et doit passer par le centre de la graduation horizontale (et le point stationné).

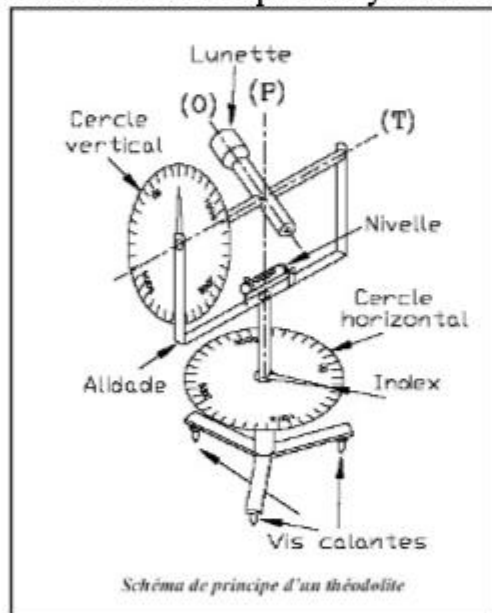
(T): Axe secondaire (ou axe des tourillons), il est perpendiculaire à (P) et doit passer au centre de la graduation verticale.

(O): Axe optique (ou axe de visée), il doit toujours être perpendiculaire à (T), les trois axes (P),(T) et (O) devant être concourants.

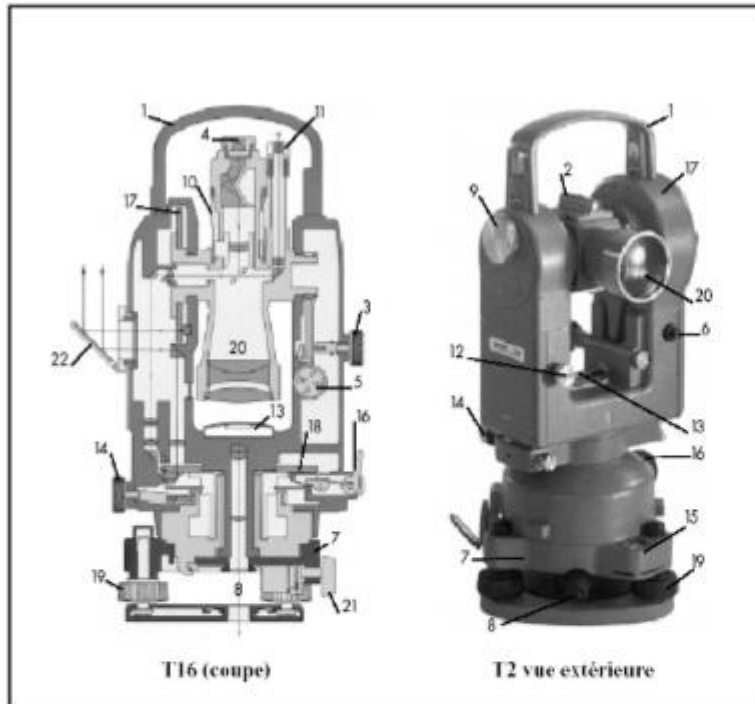
L'alidade : C'est un ensemble mobile autour de l'axe principal (P) comprenant le cercle vertical, la lunette, la nivelle torique d'alidade et les dispositifs de lecture (symbolisés ici par des index).

Le cercle vertical (graduation verticale). Il est solidaire de la lunette et pivote autour de l'axe des tourillons (T).

Le cercle horizontal ou limbe (graduation horizontale). Il est le plus souvent fixe par rapport à l'embase mais il peut être solidarifié à l'alidade par un système d'embrayage.



## 4 CARACTERISTIQUES DES THEODOLITES



### Légende

1. Poignée amovible	12. Commutateur de lecture Hz-V
2. Viseur d'approche	13. Nivelles d'aidade
3. Vis de blocage de la lunette	14. Vis d'alidade de fin pointé
4. Oculaire de la lunette	15. Nivelles sphérique
5. Vis de fin pointé	16. Débrayage du limbe (T16)
6. Contrôle d'automatisme	17. Cercle vertical
7. Embase amovible	18. Cercle horizontal
8. Plomb optique	19. Vis calantes
9. Micromètre optique	20. Objectif
10. Bague de mise au point	21. Blocage de l'embase
11. Microscope de lecture	22. Éclairage des cercles

### Le Théodolite

➤ Appareil similaire au niveau de chantier, optique, réglages, axe de rotation

➤ mais dont la lunette est inclinable, axe de basculement

- d'où des réglages plus intuitifs,
- et une technique complexe.

## 5 Réglages de la station

- 3 vis calantes
- Une nivelle sphérique guide les premiers réglages.
- Une nivelle d'alidade (tubulaire) pour obtenir la verticalité parfaite de l'axe de rotation.

Ce réglage très fin n'est fait qu'une fois à la mise en station. Il suffit ensuite de vérifier qu'il est conservé.

- Un plomb optique pour préciser la position par rapport à un repère situé au sol

## 6 Orientation des visées

- Rotation de l'alidade (dans le plan horizontal)
  - Vis de déblocage et de blocage
  - Vis de fin de rotation
- Inclinaison de la lunette (dans un plan vertical)



- Vis de déblocage et de blocage
- Vis de fin de **basculement**
- Viseur sur le dessus de la lunette
- Initialisation des angles horizontaux – Blocage du limbe
- Option : retournement du théodolite



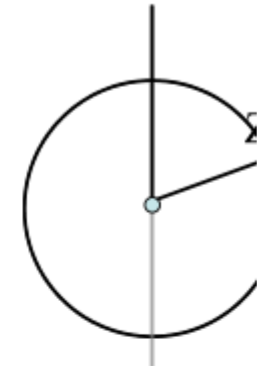
#### Ajustement des visées et des lectures

- Le réticule guide la visée (sur une mire graduée)
  - Netteté de la mire à l'aide d'une bague de mise au point
  - Netteté du réticule au niveau de l'oculaire de la lunette
- Les angles sont lus (lunette bloquée) dans un microscope de lecture
  - Situé sur le côté de la lunette
  - Éclairé par des fenêtres et des miroirs
- Le bouton du micromètre (la plus grosse vis sur le côté), – déplace les graduations des angles V et Hz
  - pour lire le 1/100ème de grade avec précision dans un cadre indépendant de la lecture des grades.



## 7 Les angles verticaux

- Références verticales définies par rapport à la verticalité de l'axe de rotation
- Le zénith : angle zénithal ( $Z$ )
- Le nadir : angle nadiral ( $N$ )
- Retournement de la lunette :  $Z = 400 - V'$  (et  $H_z' = H_z \pm 200$ )



$V$  et  $H_z$  = angles lus dans le microscope,  $V'$  et  $H_z'$  en position retournée.

- L'angle de pente ( $\alpha$ )
- $Z + \alpha = 100 \text{ grades}$  •  $\sin(Z) = \cos(\alpha)$  et  $\cos(Z) = \sin(\alpha)$
- $\alpha > 0$  ou  $\alpha < 0$  et  $\cos(-\alpha) = \cos(\alpha)$

Calcul de distance

- La distance lunette-mire ( $D$ )
  - FSH-FSB ( $\times 100$ ) surestime cette distance – car la visée sur la mire est oblique.
  - $D = (\text{FSH-FSB}) \times 100 \times \cos(\alpha)$
  - $\alpha$  = angle de pente de la visée
- La distance horizontale ( $D_h$ )
  - C'est la projection de  $D$  sur un plan horizontal

$$- D_h = D \times \cos(\alpha) = (FSH-FSB) \times 100 \times \cos^2(\alpha)$$

$$- D_h = (FSH-FSB) \times 100 \times \sin^2(Z)$$

- Z : angle zénithal

## 8 Calcul de dénivelée

- Décomposition de la dénivelée point de station-point visé
  - 1. La hauteur tourillon ( $H_t$ ) - axe de basculement de la lunette.
  - 2. La lecture au fil niveleur (FN)
  - 3. La dénivelée de la ligne de visée ( $\Delta z$ ) -  $z =$  coordonnée verticale –  $\Delta z > 0$  si la visée est vers le haut,  $\Delta z < 0$  sinon.

$$alt_v = alt_s + H_t + \Delta z - FN$$

- v : point visé - s : point de station.

La dénivelée de la ligne de visée est fonction de  $D_h$  et de Z.

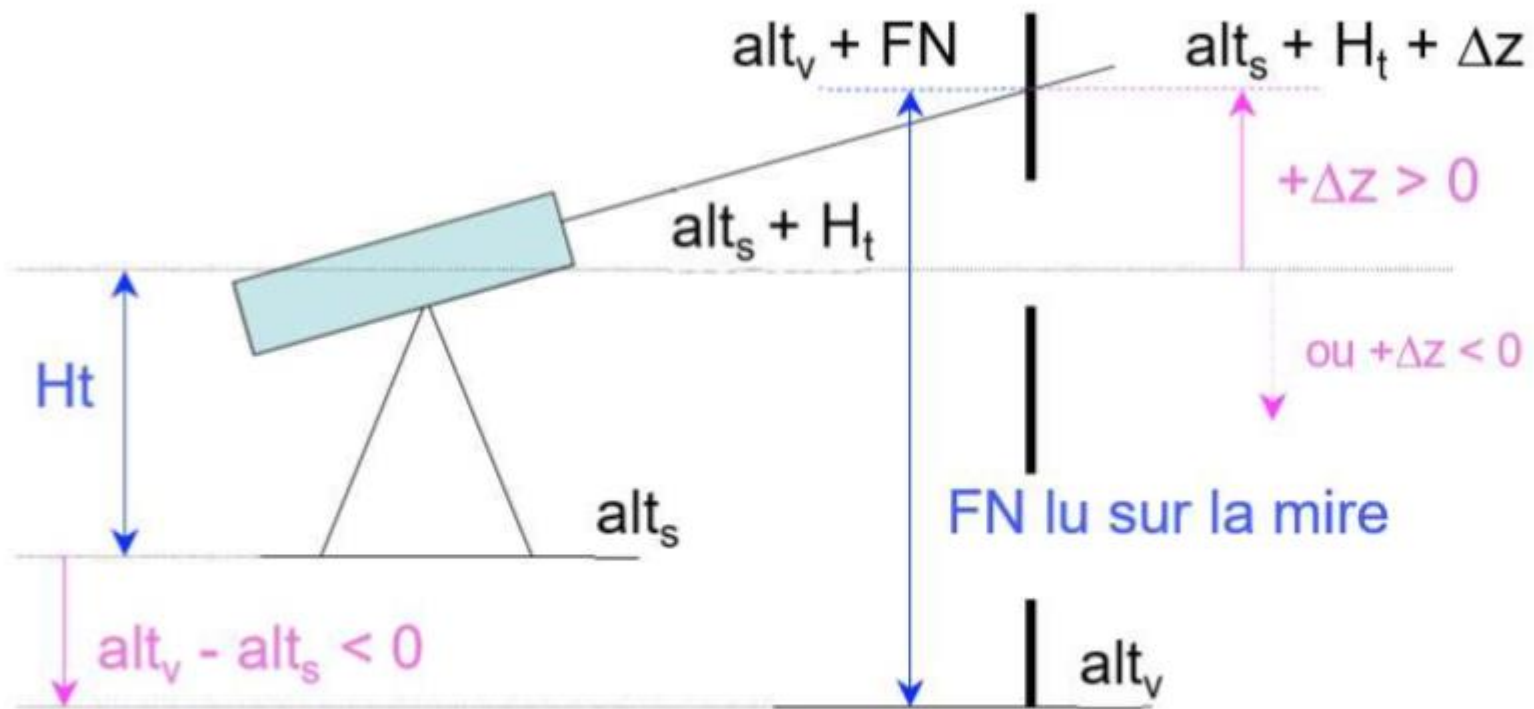
- $D_h$  et  $\Delta z$  sont perpendiculaires ; avec la ligne de visée ils forment un triangle rectangle dont un angle est  $\alpha$  (ou  $-\alpha$ ) et l'autre Z (ou  $200-Z$ ) –

$$\Delta z = (FSH-FSB) \times 100 \times \sin(\alpha) \times \cos(\alpha) = (FSH-FSB) \times 100 \times \sin(Z) \times \cos(Z)$$

- $\alpha =$  angle de pente de la visée, Z = angle zénithal de la visée



Altitudes et dénivelées



**Bilan :**

$$alt_v - alt_s = H_t + \Delta Z - FN$$

## 9 Définitions

### 9.1 Introduction



Figure 1 CERCLE HORIZONTAL RÉPÉTITEUR

Dans l'histoire du positionnement les instruments de mesures d'angles occupent une place privilégiée. La détermination des longitudes et latitudes astronomiques a été essentiellement basée sur la mesure d'angles horizontaux et verticaux, associée à des mesures de temps. Pendant longtemps la précision de ces mesures angulaires a été largement supérieure à celle des instruments de mesures de distances. Il a fallu attendre l'apparition des appareils électroniques de distances dans les années 1980 pour voir s'inverser cette tendance.

## 10 Mesure des angles horizontaux

Les angles horizontaux (azimutaux) peuvent être mesurés en deux manières différentes :

1- Observés et dessinés directement sur une feuille de papier placée sur une planchette horizontale. L'instrument utilisé est un goniographe composé d'un trépied, d'une planchette, d'un organe de visée et d'une règle.

2- Mesurés à l'aide d'un goniomètre. Dans ce cas les instruments utilisés sont les suivants :

Equerres optiques qui ne permettent que de tracer sommairement des perpendiculaires ou de s'aligner entre deux points.

Cercles d'alignement avec lesquels les angles horizontaux peuvent être mesurés. Ces instruments ont été remplacés par les théodolites.

Théodolites dont les lectures ne se font plus sur des verniers mais à l'aide de microscopes permettant d'apprécier, suivant le degré de précision de l'instrument : le cgon, le mgon, le dmgon.

Le choix de la méthode d'observation angulaire dépendra de l'instrument utilisé et de la précision recherchée.

L'angle horizontal observé à l'aide d'un théodolite est un angle plan, compté positivement dans le sens horaire. La lunette d'observation pivote dans un plan vertical, quelque soient les positions altimétriques de A et B, l'angle observé est identique " AH ".

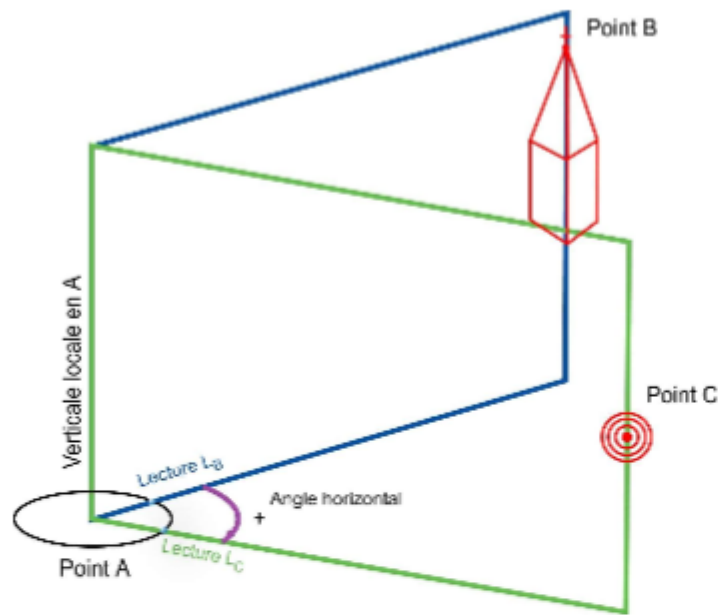


Figure 2 : ANGLE HORIZONTAL

### Explication

<sup>1</sup>Angle plan d'un dièdre formé par la verticale locale et les 2 points visés

En pratique cet angle est calculé par différence de lectures effectuées sur un cercle horizontal gradué de 0 à 400 grades dans le sens des aiguilles d'une montre appelé "limbe".

$$AIH_{(BC)} = l_C - l_B$$

### 10.1 La réitération

Cette méthode est utilisée avec les théodolites munis d'un dispositif de décalage de limbe (bouton avec lequel on peut amener une lecture prédéterminée). La lunette restant pointée sur l'objet visé.

La mesure des angles se fera par séquences et tour d'horizon.

- On appelle séquence un ensemble de lectures effectuées en une même station, avec une seule position du cercle vertical, une origine prédéterminée du limbe, et d'un contrôle de fermeture sur l'origine (référence).
- On appelle paire de séquences, deux séquences successives avec décalage du limbe, retournement de la lunette (CG, CD) et inversement du sens d'observation.
- On appelle tour d'horizon l'observation successive des points A, B, C, D,... A. Le point A choisi comme référence est observé de nouveau afin de boucler le tour complet et d'assurer un contrôle dit de fermeture.

## **10.2 Le double retournement**

C'est une manipulation consistant en un demi-tour simultané de la lunette et de l'alidade (figure 1). Cette technique de mesure permet d'éliminer certaines erreurs systématiques et de limiter les fautes de lecture. Lors d'une mesure d'angle horizontal, cela permet :

- De doubler les lectures et donc de diminuer le risque de faute de lecture ;
- De ne pas toujours lire sur la même zone du limbe, donc de limiter l'erreur due aux défauts de graduation du limbe ;
- D'éliminer les défauts de collimation horizontale (défaut de perpendicularité de l'axe optique) et de tourillonnement (défaut de perpendicularité de l'axe tourillons).

L'erreur de centrage sur le point de station et l'erreur de calage de l'axe vertical ne sont pas éliminées par cette manipulation. Il convient donc de soigner ces opérations.

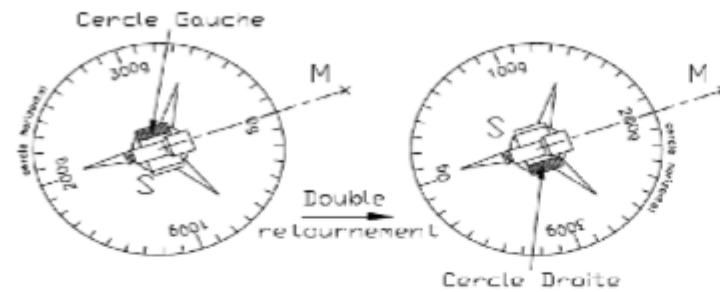


Figure 3 retournement.

Si l'on appelle  $H_{ZCG}$  la valeur lue en cercle gauche, et  $H_{ZCD}$  celle lue en cercle droit, on doit observer:

$$H_{ZCD} = H_{ZCG} + 200$$

En effet, le double retournement décale le zéro de la graduation de 200 gon (fig. 3.20) ; ceci permet un contrôle simple et immédiat des lectures sur le terrain. La différence entre les valeurs  $H_{ZCG}$  et  $(H_{ZCD} - 200)$  représente la combinaison des erreurs de collimation, de mise en station, de lecture, etc.

La lecture de l'angle horizontal  $H_z$  mesuré vaut alors:

$$H_z = \frac{H_{ZCG} + (H_{ZCD} - 200)}{2} \quad \text{si } H_{ZCD} > 200 \text{ gon}$$

$$H_z = \frac{H_{ZCG} + (H_{ZCD} - 200 + 400)}{2} = \frac{H_{ZCG} + (H_{ZCD} + 200)}{2} \quad \text{si } H_{ZCD} < 200 \text{ gon}$$



### 10.3. Terminologie des mesures d'angles horizontaux

#### 10.4 Lecture simple

L'appareil étant dans sa position de référence (par exemple CG sur la figure 3.21), et le zéro de la graduation horizontale n'étant pas modifié après mise en station, l'opérateur effectue une lecture azimutale  $L_A$  sur le point A puis une lecture  $L_B$  sur B et en déduit l'angle  $\hat{ASB}$  (noté aussi  $HZ_{AB}$ ):

$$\hat{ASB} = L_B - L_A$$

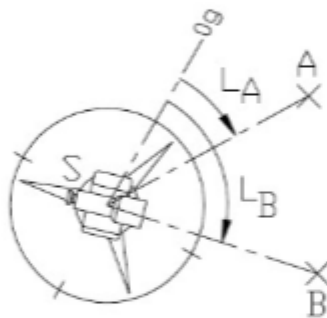


Figure 4 Lecture d'un angle horizontal.

#### 10.5 Séquence

On appelle séquence un ensemble de  $(n + 1)$  lectures effectuées à partir d'une même station sur  $n$  directions différentes avec la même position des cercles horizontaux et verticaux, le contrôle de fermeture sur la référence et la répercussion sur les  $n$  lectures de l'écart de fermeture sur la référence (sur laquelle on ramènera les angles à zéro).

Par exemple, sur la figure 3, la référence est le point R sur lequel l'opérateur effectue la première lecture  $L_{R1}$ , on fait **une lecture sur chaque point** en tournant en sens horaire et une dernière **lecture de fermeture** sur le point R  $L_{R2}$ .

Par calcul, les lectures sont ensuite ramenées à la référence R en soustrayant aux autres lectures **la moyenne des deux lectures sur la référence**. Pour cela, on calcule :

- la fermeture de la séquence :  $F^S = |L_{R1} - L_{R2}|$  - la moyenne sur la référence :  $L_R = (L_{R1} + L_{R2})/2$

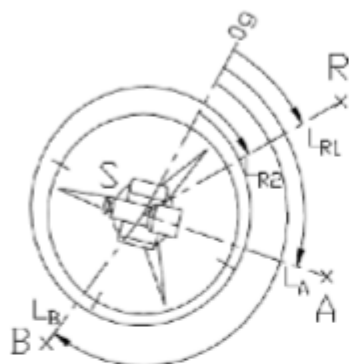


Figure 5 Séquence.

La lecture sur la référence devient donc  $L_R = 0$ .

### 10.6 Paire de séquences

Une paire de séquence est l'association de deux séquences successives avec **un décalage de l'origine du limbe, le retournement de la lunette et l'inversion du sens d'observation**. Cette méthode permet de minimiser certaines erreurs systématiques.

Généralement, l'opérateur effectue une séquence en CG dans le sens horaire de rotation de l'appareil puis effectue un double retournement et enfin effectue la séquence en CD dans le sens trigonométrique (sens inverse horaire).

Pour une seule paire de séquences on décale l'origine du limbe de 100 gon ; le double retournement décale déjà l'origine du limbe de 200 gon (figure 4).

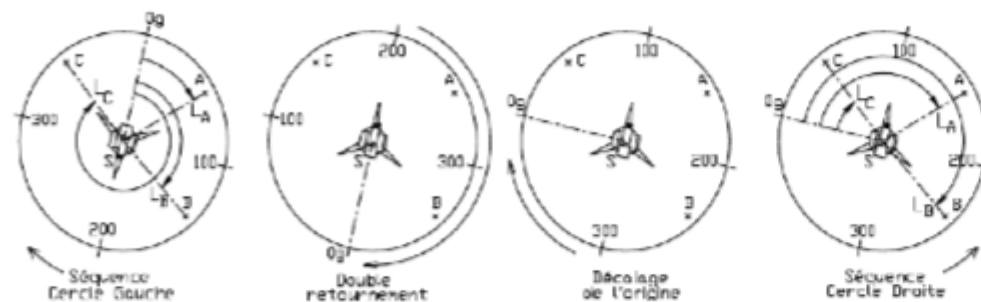


Figure 6 Paire de séquences avec décalage de l'origine.

### 10.7 Tour d'horizon

Le tour d'horizon est le résultat final de la combinaison des observations angulaires (séquences) en une même station et rapportées à une même référence R.

Lors du calcul, on détermine la valeur moyenne de l'écart sur la référence : c'est la somme algébrique de tous les écarts de lecture d'une même paire divisée par  $(n + 1)$ ,  $n$  étant le nombre de directions visées y compris la référence.

### 11 Mesure des angles verticaux

L'angle vertical est un angle, mesuré dans un plan vertical, entre la verticale en A et la ligne de visée vers l'objet " B ". L'origine de cet angle peut être le zénith, on parlera alors d'angle zénithal ou de distance zénithale (astronomie), mais aussi le plan horizontal en A, on parlera alors d'inclinaison ou de site.

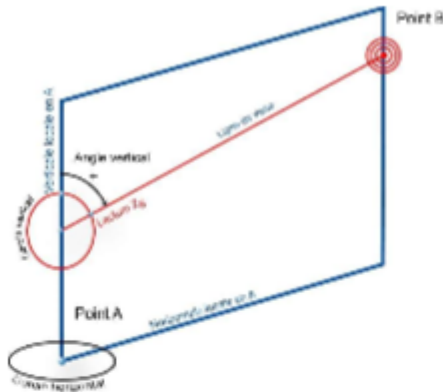


Figure 7 ANGLEVERTICAL

Dans les cours de topométrie cet angle est appelé indifféremment :

- ◆ Angle vertical de A vers B
- ◆ Angle zénithal de A vers B
- ◆ Distance zénithale de A vers B
- ◆ Zénithale de A vers B

La ligne de visée peut également être caractérisée par l'angle mesuré à partir du plan horizontal local et dénommé angle de site ou inclinaison, noté  $i$ . La valeur numérique de cet angle peut être également donnée sous la forme de sa pente exprimée en %.

Relation entre distance zénithale, site et pente:

$$Dz - i = \frac{\pi}{2} \text{ avec } Dz \in [0, \pi] \text{ et } i \in \left[ -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right]$$

$$p(\%) = 100 \cdot \tan i = 100 \cdot \cot Dz$$

Les théodolites ou tachéomètres ont en plus de leur fonction "*goniomètre*", une fonction "*éclimètre*"; c'est-à-dire qu'ils permettent la mesure des angles verticaux.

Le limbe (cercle) vertical des tachéomètres à fonction éclimètre peut être gradué en:

Site (i) angle de la visée avec l'horizontale.

Angle zénithal (z) angle de la visée avec la verticale ascendante.

Angle nadiral (n) angle de la visée avec la verticale descendante.

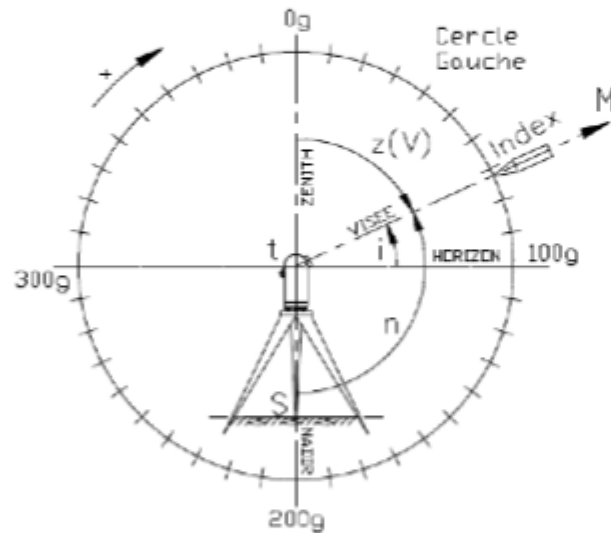


Figure 8 Angles verticaux  $i$ ,  $z$  et  $n$ .

Les relations entre ces angles sont :

- L'angle  $i$  est compté **positif dans le sens inverse horaire** de manière à obtenir un angle de site positif pour une visée au-dessus de l'horizon et un angle de site négatif pour une visée en dessous de l'horizon.

- L'angle  $n$  est compté positif en sens inverse horaire; il vaut  $0\text{ gon}$  au nadir et  $200\text{ gon}$  au zénith.

### 11.1 Valeur moyenne d'un angle vertical par double retournement

Nous admettrons que la position de référence de notre appareil mécanique est le cercle à gauche (CG).

Après un double retournement le sens d'évolution de la graduation du cercle vertical est inversé. L'angle lu en cercle droit  $Z_{CD}$  n'est donc pas « directement comparable » avec l'angle lu en cercle gauche  $Z_{CG}$ , comme c'était le cas avec les angles horizontaux.

La relation entre les deux lectures est :

$$Z_{CG} = 400 - Z_{CD}$$

En CG:

$$i_{CG} = 100 - Z_{CG}$$

$$i_{CG} = n_{CG} - 100$$

En CD:

$$i_{CD} = 300 - n_{CD}$$

$$i_{CD} = Z - 300$$

L'angle final moyen déduit des deux lectures est :

$$n = 200 - Z \quad i = 100 - Z \quad i = n - 100 \quad \text{où:}$$

$$Z = (400 + Z_{CG} - Z_{CD})/2$$

### 11.2 Collimation verticale

Dans le cas où le cercle vertical ne cale pas à l'angle zéro au zénith. La ligne 0~200 gon fait avec la verticale un petit angle  $z_0$  appelé **défaut de collimation verticale**.

On élimine ce défaut soit par double retournement, soit par des visées directes et des visées inverses.

$$Z_0 = (Z_{CG} + Z_{CD} - 400)/2$$

## 12 Instruments de mesure

### 12.1 Organes principaux d'un théodolite

Les éléments principaux constitutifs d'un théodolite sont les suivants :

3 axes concourants

- ◆ Axe principal ou pivot matérialisant la verticale de l'instrument.
- ◆ Axe de basculement ou axe des tourillons.
- ◆ Axe optique défini par la lunette de visée.

2 cercles gradués ◆ Cercle horizontal.

◆ Cercle vertical

1 dispositif de centrage et de mise à la verticale du pivot.

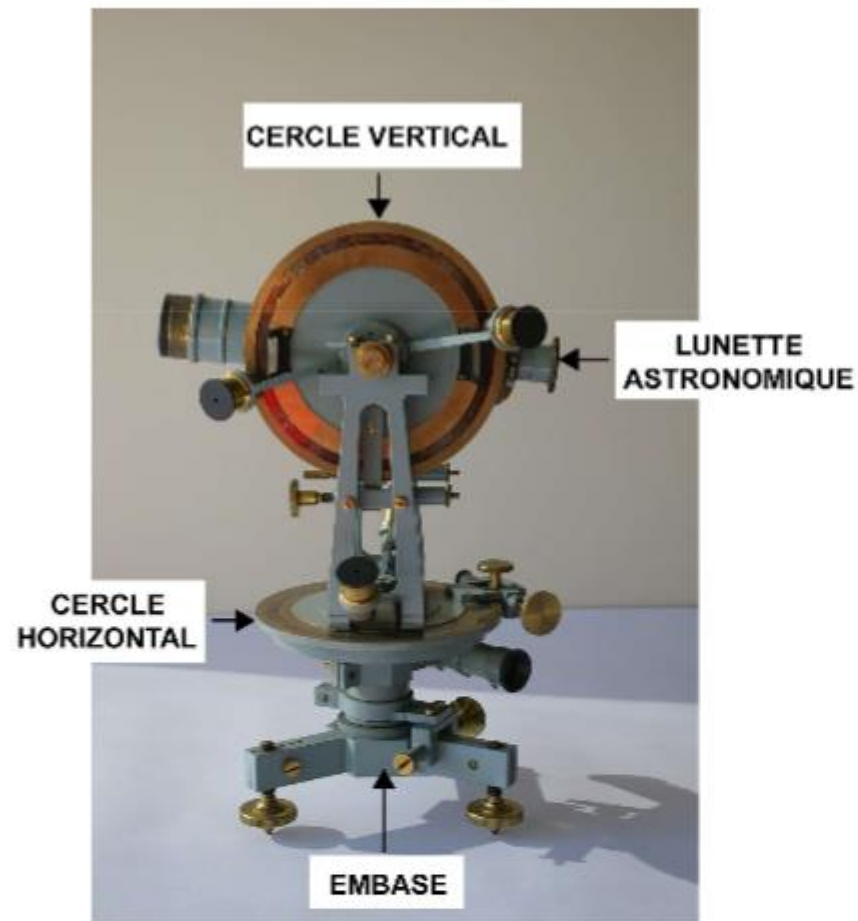


Figure 9 ORGANES DE BASE D'UN THÉODOLITE

[Les organes de base d'un théodolite sont particulièrement visibles sur les appareils anciens.]



### 12.1.1 . Système de centrage/verticalisation Objectifs

- ◆ Assurer la verticalité approchée de l'axe principal des instruments de mesures (théodolites, voyants, prismes).
- ◆ Centrer cette verticale sur un repère matérialisé au sol.

#### 12.1.1.1 Moyens

##### VERTICALITE APPROCHEE

- ◆ A l'aide d'une bulle sphérique

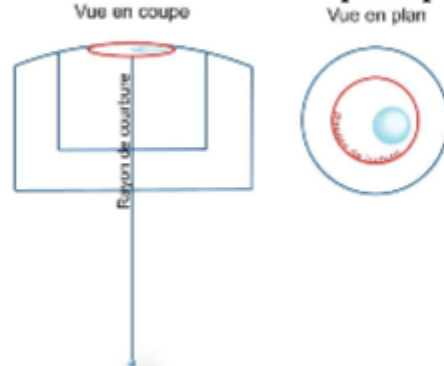


Figure 10 BULLESPHÉRIQUE

Une bulle sphérique de rayon de courbure  $\approx 2m$  est montée sur une embase munie de vis "calantes<sup>2</sup>". Le rayon de courbure est calculé afin qu'une incertitude de calage de la bulle à l'intérieur de son repère de lecture provoque une incertitude résultante à  $\approx 2m$  négligeable pour effectuer l'étape suivante le centrage.

[2 Ces vis permettent de verticaliser l'axe principal du théodolite]

- ◆ A l'aide d'une nivelle électronique

Sur les appareils modernes la bulle sphérique est remplacée par une nivelle électronique (basée sur des mesures d'inclinométrie) qui, une fois calée entre ses repères, assure la verticalité approchée de l'appareil.

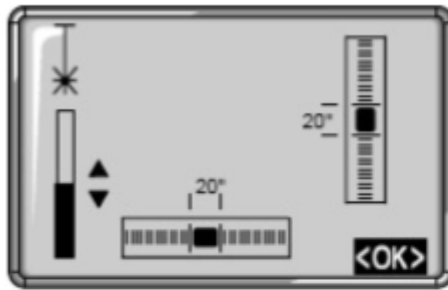


Figure 11 NIVELLEÉLECTRONIQUE

#### DISPOSITIF DE CENTRAGE

- ◆ Fil à plomb
- ◆ Plomb optique
- ◆ Plomb laser
- ◆ Appareils spécifiques

Un des dispositifs ci-dessus entre en jeu pour effectuer le centrage des instruments de mesures

Chaque dispositif de centrage nécessite l'utilisation d'une méthode appropriée pour obtenir la verticalité des instruments et le centrage sur le point de mesure.

Méthode de centrage au plomb optique

1. Pré-centrer à 1 ou 2 cm près à l'aide d'un fil à plomb.
2. Avec les vis calantes de l'embase du voyant (ou théodolite) amener le réticule du plomb optique sur le repère: la bulle sphérique (ou autre) n'est plus alors dans ces repères.
3. Au moyen des jambes coulissantes du trépied, ramener la bulle sphérique entre les repères et recommencer en (2), 2 ou 3 itérations suffisent.

### 12.1.1.2 Remarque

Cette méthode pré suppose que la nivelle sphérique est réglée, c'est à dire que lorsque la bulle est au centre du repère de lecture, la direction indiquée par le plomb optique est bien la direction verticale. Dans le cas contraire il faudra au préalable corriger ce défaut en utilisant un plomb optique tournant par exemple.

#### 12.1.2 . Système de calage fin de l'axe principal

Objectifs

Rendre l'axe principal de l'instrument vertical.

#### 12.1.2.1 Moyens

A L'AIDE D'UNE NIVELLE TORIQUE

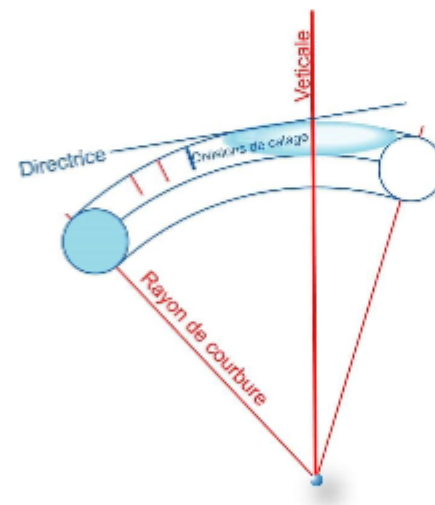


Figure 12 NIVELLE TORIQUE

- ◆ Elle est constituée d'un tore comprenant un liquide (alcool, éther) et une bulle de vapeur saturante.
- ◆ La fiole pivote sur une partie fixe associée à une vis de réglage.

- ◆ On appelle directrice la droite tangente au milieu des graduations de calage.
- ◆ la nivelle est calée si la bulle est entre ces repères (la directrice n'est pas forcément à l'horizontale).
- ◆ la nivelle est réglée si, lorsque la bulle est calée, la directrice est horizontale.

### 12.1.2.2 Méthode

Bien que moins nécessaire sur les appareils modernes munis de dispositifs de correction sur les mesures, il est utile de connaître la manière de rendre vertical un appareil :

- ◆ Horizontaliser une direction :

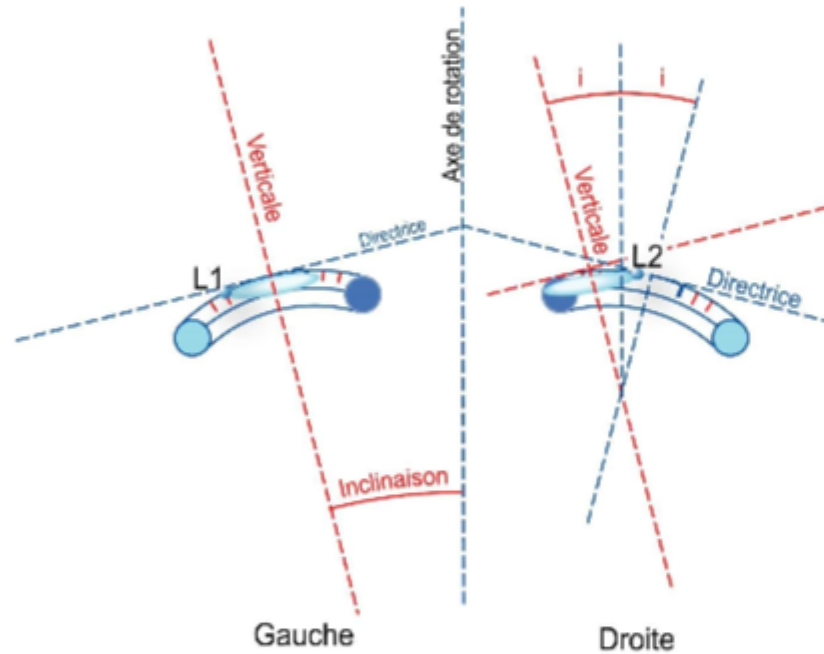


Figure 13 INCLINAISON VERTICAL

Effectuer la lecture de bulle position Gauche ou Droite (L1) puis effectuer le retournement à 200 g.( double retournement).

Lire ensuite en position Droite ou Gauche (L2). L1 et L2 s'effectuant par rapport à une origine identique (en général par rapport au cercle vertical). On "ramène" la bulle à  $(L1 + L2) / 2$  au moyen des vis calantes: i s'annule et l'axe est ainsi rendu vertical.

◆ Horizontaliser un plan

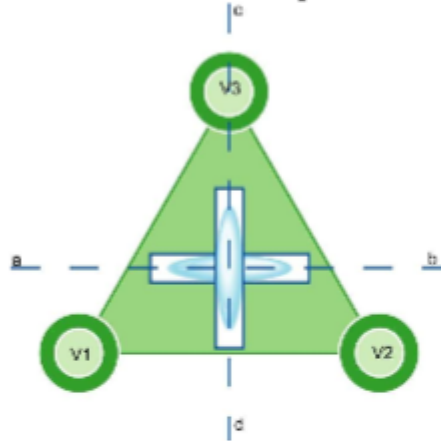


Figure 14 VISCALANTES

Pour un théodolite muni de 3 vis calantes (V) agir sur (V1 et V2) dans le sens contraire afin d'horizontaliser la direction ab (en la faisant pivoter autour de l'axe cd) puis agir uniquement sur V3 pour horizontaliser ensuite la direction cd.

◆ Appareils modernes

Sur les théodolites munis d'un ou deux inclinomètres il n'est plus nécessaire de rendre l'axe principale parfaitement vertical. Les données des inclinomètres sont mesurées en permanence, et permettent de corriger les mesures angulaires horizontales et verticales en temps réel.

### 12.1.3 Système de visée LUNETTE ASTRONOMIQUE

Il ne s'agit pas d'un cours d'optique, mais de définir quelques concepts très simples sur la manière de comprendre et de régler la lunette d'un théodolite. La lunette astronomique est très schématiquement définie par un oculaire, un réticule, un système divergent et un objectif.

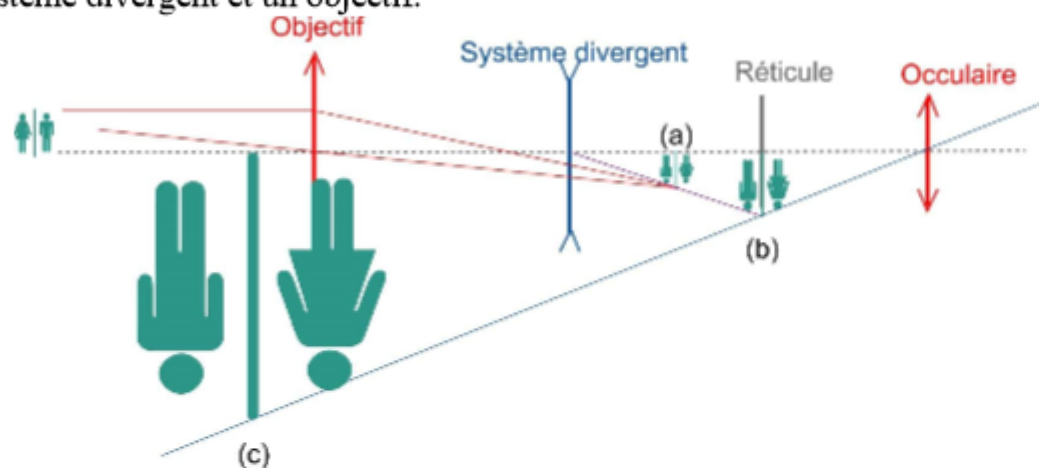


Figure 15 LUNETTE ASTRONOMIQUE

- ◆ La Ligne de visée : c'est la ligne définie par la droite joignant l'œil, le centre du réticule, le centre de l'objectif et l'objet.
- ◆ Objectif : c'est une lentille convergente de focale  $F \gg 20$  cm destinée à collecter la lumière en provenance de l'objet visé. De diamètre environ 40 mm; Elle donne de l'objet une image (a) (croquis ci-dessus)
- ◆ Système divergent : c'est un ensemble mobile de lentilles. Ce système permet de déplacer l'image (a) de l'agrandir, de réduire la longueur de la lunette donc la hauteur des tourillons, de permettre un meilleur basculement autour de l'axe des tourillons, et un meilleur équilibrage de la lunette. L'image réelle objective (a) est transformée en une image (b), au voisinage de laquelle on trouve le réticule.

◆ Réticule : c'est une lame à face parallèle solidaire du corps de la lunette, mais éventuellement réglable ; des traits d'épaisseur de 3 à 5 mm sont gravés sur cette lame de verre. On trouve plusieurs types de réticule selon qu'il s'agisse de niveau ou de théodolite. Ces réticules sont composés de différents « fils » simples de bissection, doubles d'encadrement, « stadimétriques » pour des mesures de distance, niveleurs pour des visées horizontales.

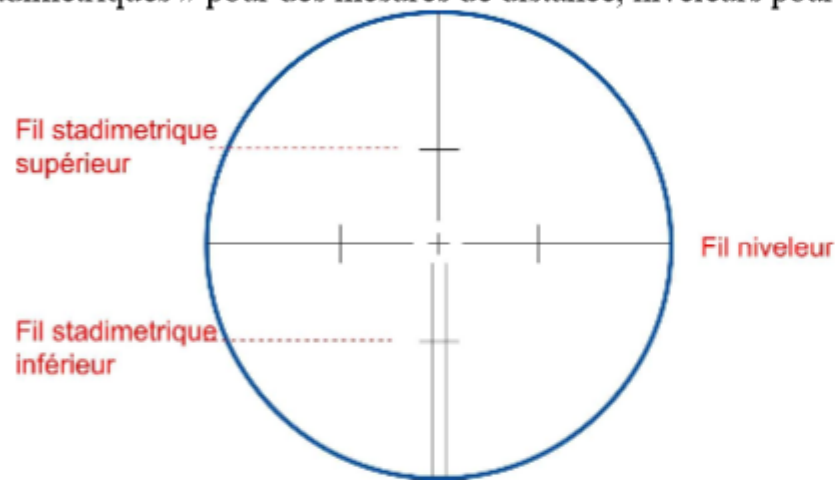


Figure 16 RÉTICULE

◆ Oculaire : c'est un système mobile de lentilles convergentes qui fait office de "loupe" pour agrandir les images et en faire une image virtuelle (c), (b) étant situées entre la lentille et son foyer objet. La focale  $f$  est très petite, de l'ordre de 1 cm. Son diamètre est petit (7 à 8 mm) voisin de la pupille de l'œil.

Pointés

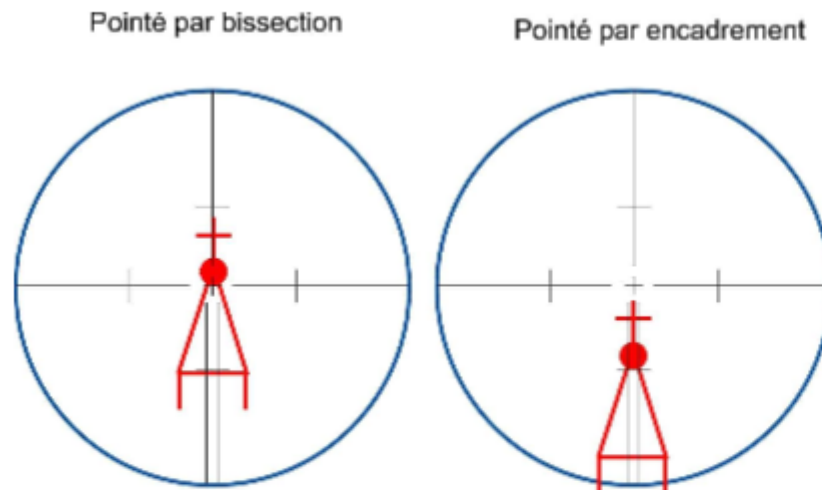


Figure 17 TYPES DE POINTÉS

La manière d'effectuer le pointé dépend de la taille de l'objet ; il faut donc que l'œil puisse juger par symétrie. On recommande en général de pointer par " encadrement ", mais encore faut-il que l'image permette d'apprécier raisonnablement la symétrie des écarts aux deux fils. Si ce n'est pas le cas, on pointe par " bissection " avec la même réserve. Le meilleur étant d'utiliser les deux méthodes simultanément si l'objet le permet. *Précision du pointé*

Elle n'a rien à voir avec la résolution instrumentale voisine actuellement de 0,5dmgr. Elle dépend de beaucoup de facteurs externes :

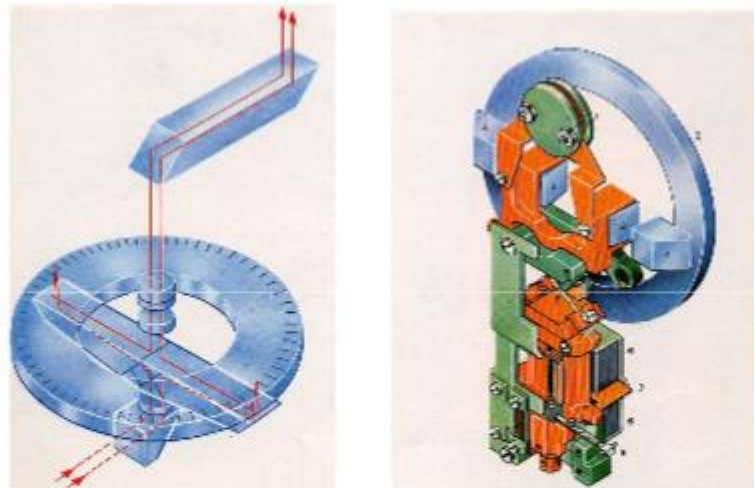
- ◆ Eclairage du point (partie ombrée invisible : phase).
- ◆ Forme de l'objet.
- ◆ Conditions atmosphériques (réfraction verticale, latérale).
- ◆ Distance de l'objet.
- ◆ Vision de l'opérateur et son habilité, grossissement de la lunette.



#### *12.1.4 Systèmes de lecture*

##### APPAREILS ANCIENS

Les appareils anciens sont munis de deux cercles en verre appelé limbes. L'observation de ces limbes permet d'effectuer des lectures d'angles horizontaux et verticaux. La lecture sur ces limbes s'effectue au moyen d'un dispositif d'affichage muni d'un micromètre.



Dispositif d'affichage des lectures et de fin pointé au micromètre

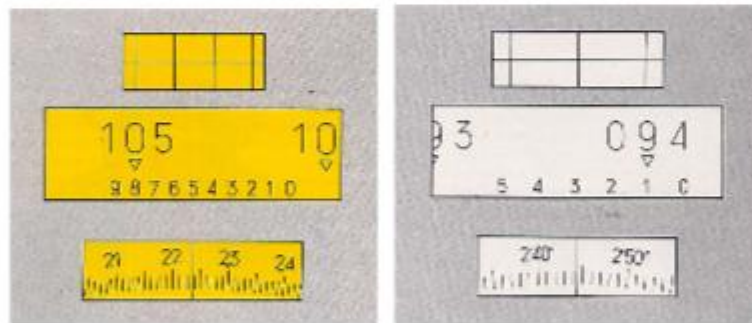


Figure 18 Le principe des anciens appareils

APPAREILS MODERNES

Des progrès considérables dus à l'électronique et à l'optique ont, en l'espace de quelques années, transformé les théodolites en véritable ordinateur de terrain. Les erreurs les défauts mécaniques de l'instrument sont pris en compte et corrigés avant l'affichage des mesures.

#### 12.1.4.1 ATTENTION

S'il s'agit d'appareils confortables, précis, sûrs, ils doivent faire cependant l'objet de contrôles réguliers.

### 12.2 Bilan des erreurs

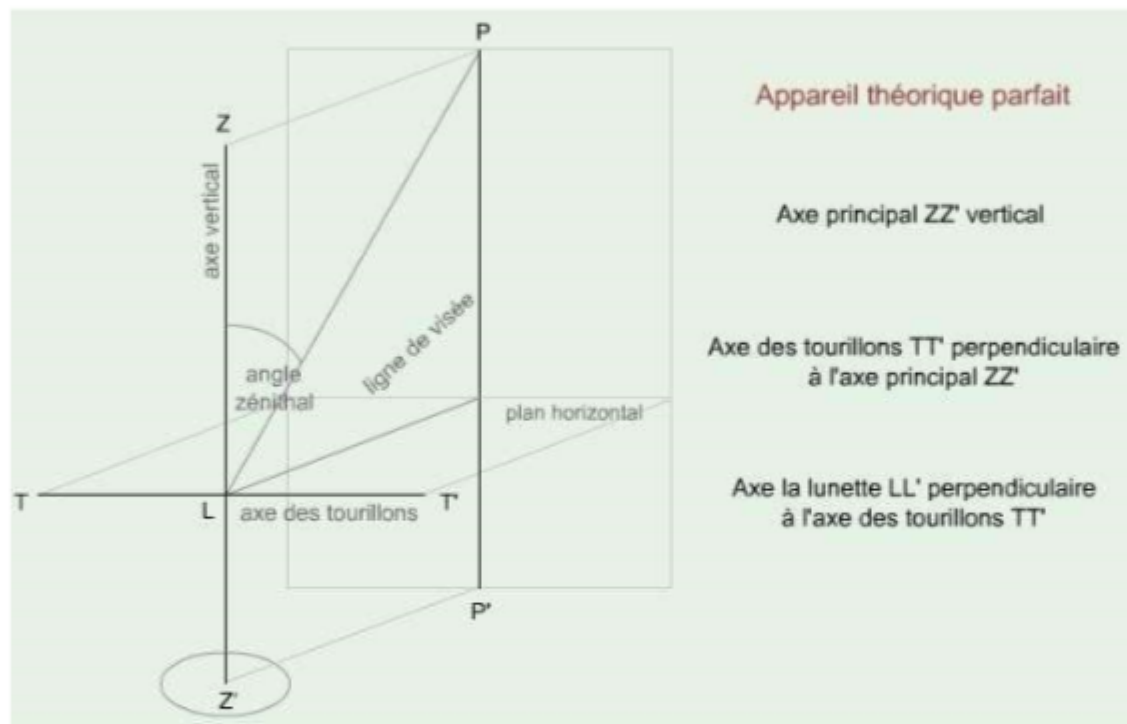


Figure 19 DÉFAUT DE VERTICALITÉ DE L'AXE PRINCIPAL

### 12.2.1 Défaut de verticalité de l'axe principal

♦ L'axe principal n'est jamais parfaitement vertical. Il subsiste un défaut de verticalité qui provoque une erreur sur la mesure de l'angle horizontal :

$$\text{Erreur de verticalité : } \varepsilon_{(\text{radians})} = \beta_{(\text{radians})} \cdot \cot Dz$$

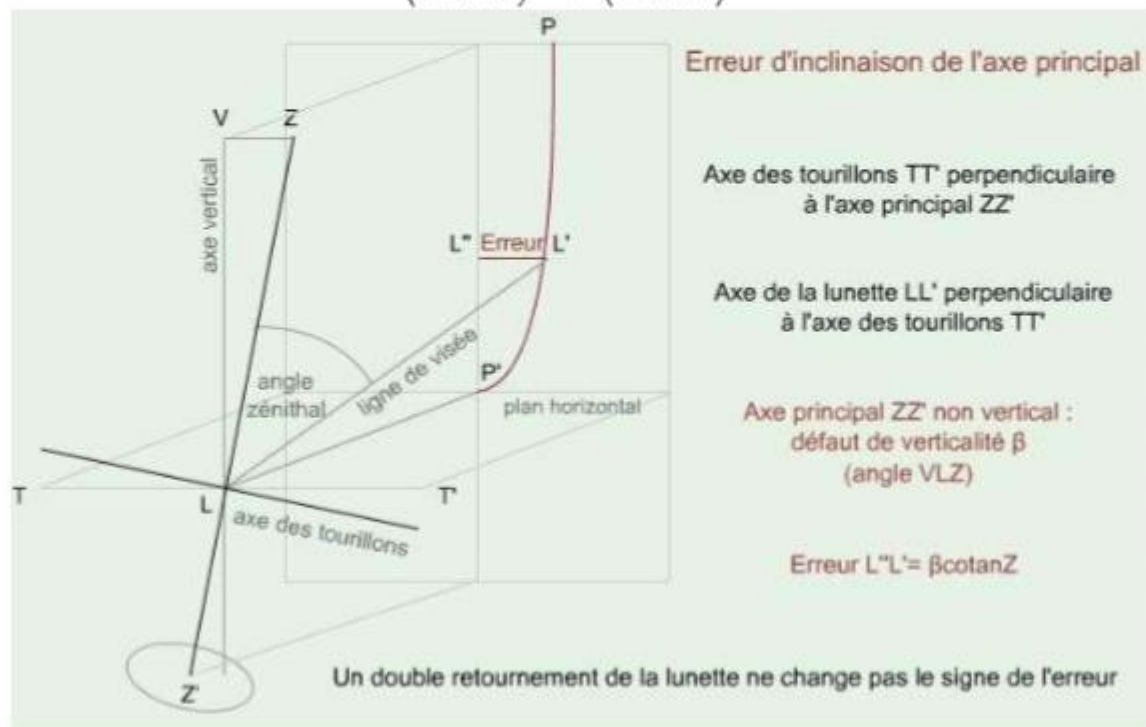


Figure 20 DÉFAUT DE VERTICALITÉ DE L'AXE PRINCIPAL

**2.2. Erreur de tourillonnement** ♦ L'axe des tourillons TT' n'est pas rigoureusement perpendiculaire à l'axe principal.

IL subsiste un défaut de perpendicularité  $\beta$  qui provoque une erreur sur la mesure de l'angle horizontal  $\varepsilon$  :

Elle n'a pas d'incidence lorsque la lunette est horizontale, mais augmente en fonction du site.

Erreur de tourillonnement :  $\varepsilon_{(radians)} = \beta_{(radians)} \cdot \cot Dz$

### 12.2.2 Erreur de collimation horizontale

C'est le défaut de perpendicularité de l'axe optique avec l'axe des tourillons. Sur le plan horizontal, la lunette est décalée d'un angle  $\beta$ .

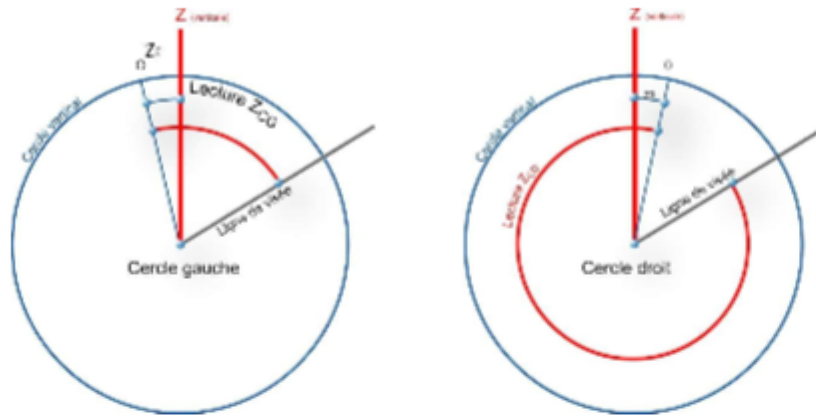
Erreur de collimation horizontale :  $\varepsilon = \frac{\beta}{\sin Z}$

### 12.2.3 . Erreur de collimation verticale

La mesure de la distance zénithale "Z" s'effectue sur un limbe (cercle) vertical, associé à son propre système de verticalisation utilisant soit :

- ♦ Une bulle dont on mettra en général les deux extrémités en coïncidence.
- ♦ Un système de prismes pendulaires dits « automatique » :
- ♦ Un inclinomètre vu précédemment sur les appareils électroniques.

Quoi qu'il en soit, l'origine de lecture doit parfaitement être sur la verticale physique réelle de l'instrument, ce qui n'est jamais le cas. Cette origine présente un défaut de verticalité  $Z_0$  ( Zénithale de l'origine)



### 12.2.3.1 Définition

On appelle cercle directeur, le cercle dont les graduations augmentent en même temps que la valeur de la distance zénithale (par exemple la position C1 sur les appareils électroniques de type AGA, ou le cercle gauche des T2). C'est en général la position où le clavier (lorsqu'il n'est pas double) est face à l'opérateur.

L'horizontale est donnée par la valeur voisine de 100 grades, alors qu'elle vaut 300gr dans l'autre position.

### 12.2.3.2 Méthode

Détermination de  $Z_n$

On procède par *double retournement* : (voir croquis ci-dessus )

◆ En position C1 - on vise un repère « R », on lit

$$Z_1 \rightarrow z_{reelle} = z_1 - z_0$$

◆ on tourne la lunette de 200g autour de l'axe principal, puis de 200g autour de TT' (axe des tourillons) pour viser de nouveau « R » ; le limbe vertical n'a effectué qu'une seule rotation, l'origine o est placée alors symétriquement autour de l'axe principal :

$$\text{alors } z \text{ réelle} = 400 - (z_2 - z_0) \text{ d'où } z_{\theta} = \frac{z_1 + z_2 - 400}{2} \text{ et } z \text{ réelle} = z_1 - z_0$$

### 12.3 Processus d'observation

Le processus d'observation doit tenir compte des erreurs précédemment étudiées. Il doit :

- ◆ Minimiser les erreurs accidentelles.
- ◆ Corriger ou éliminer les erreurs systématiques.

Celles-ci s'effectuent par succession de séquence "cercle droit" - "cercle gauche". Il est important d'effectuer à chaque séquence des "fermetures" afin contrôler la stabilité de l'appareil. Cette fermeture consiste à remesurer le premier point visé, l'écart entre la première valeur et la seconde est appelé écart de fermeture de la séquence. *Exemple de processus pour un théodolite ancien type T2 (principe de réitération à 4 séquences)*

On observe en général à 2 pointés, ce qui paraît suffisant, par rapport à la précision

Les observations sont ensuite réduites pour fournir un tour d'horizon ou sont calculées les moyennes des paires de séquences réduites sur la même référence.

On observe en général à 2 pointés, ce qui paraît suffisant, par rapport à la précision.

Position du cercle	D	G	G	D
Lecture au limbe	0	100	50	150
Lecture des appoints	50	500	250	750

#### ▲ TAB. 1

Les observations sont ensuite réduites pour fournir un tour d'horizon ou sont calculées les moyennes des paires de séquences réduites sur la même référence.

Exemple de processus pour un théodolite numérique

- ◆ Travaux de grande précision

On effectuera 2 séquences (une Droite et une Gauche), avec « fermeture » du tour d'horizon. Autant que faire se pourra chaque visée comportera plusieurs pointés suivant la nature du point visé si l'on souhaite conserver une précision correspondant à celle du théodolite.

- ◆ Travaux de précision courante

Pour plus de rapidité d'exécution, il est possible d'effectuer des mesures à une séquence (une seule position de lunette), avec fermeture pour validation. Dans ce cas, le modèle d'erreur calculé par le tachéomètre doit correspondre au plus près avec le modèle d'erreur réel de l'instrument. Il est donc nécessaire d'effectuer la calibration de ces erreurs avant les mesures (inclinomètre, collimation, tourbillonnement) sous peine de dégrader la mesure par un modèle d'erreur trop approché.