Ce document est la propriété exclusive de Chafiq HANAOUI (chafiq.512@gmail.com) - 24 avril 2017 à 15:47

Chapitre 2

Mesures des angles

2.1 Le théodolite

2.1.1 Conception

Le théodolite est un instrument de mesurage des angles, constitué essentiellement de trois axes concourants et de deux *goniomètres* appelés généralement *cercles* (figure 2.1).

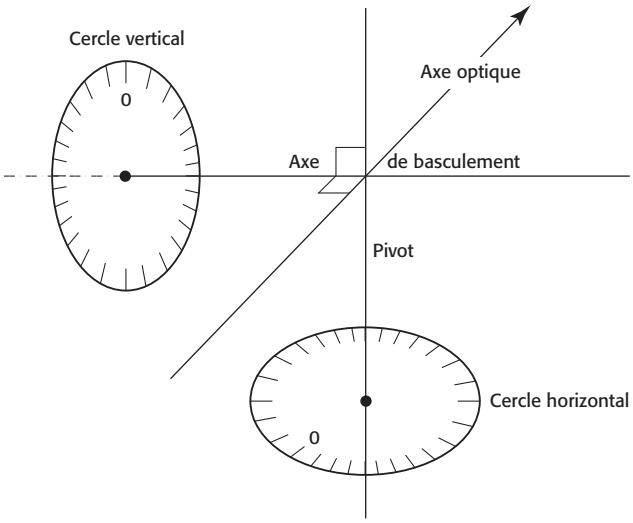


Figure 2.1. Schéma du théodolite.

02Brabant.indd 57 28/09/11 11:08

Ce document est la propriété exclusive de Chafiq HANAOUI (chafiq.512@gmail.com) - 24 avril 2017 à 15:47

On distingue :

– le *pivot*, ou axe principal, *calé verticalement* et *centré* c'est-à-dire confondu avec la verticale du point au sol ou au « toit » en travaux souterrains ; le théodolite est alors *en station* c'est-à-dire prêt pour le mesurage des angles horizontaux et verticaux ;
– l'*axe de basculement*, encore appelé axe secondaire ou axe des tourillons, perpendiculaire au précédent, donc horizontal au moment des observations ;
– l'*axe optique* de la lunette, perpendiculaire à l'axe de basculement, balaye un plan de visée vertical ;
– le *cercle horizontal*, centré sur le pivot, permet la mesure des angles horizontaux ;
– le *cercle vertical*, ou éclimètre, centré sur l'axe de basculement, autorise la mesure des angles verticaux.

À l'heure actuelle, deux catégories d'instruments sont utilisés :

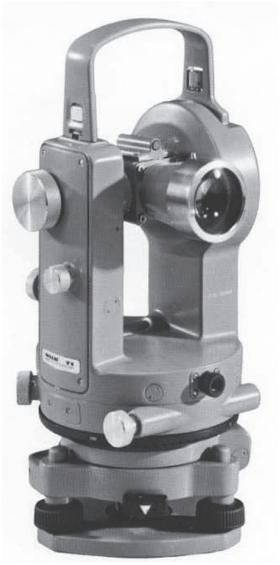


Figure 2.2. Théodolite optique.

Figure 2.3. Théodolite électronique.

Document Leica

– *les théodolites optiques* (figure 2.2), instruments anciens, avec lesquels l'opérateur procède à une lecture optique en estimant généralement le milligrade pour les théodolites ordinaires, le décimilligrade pour les théodolites de précision ;
– *les théodolites électroniques* (figure 2.3), à lecture automatique, le microprocesseur intégré gérant le déroulement de la mesure et transmettant à l'affichage à cristaux liquides les lectures des cercles horizontal et vertical, avec une résolution pouvant atteindre 0,1 mgon.

Les sociétés européennes Leica et Trimble ont cessé la fabrication des théodolites optiques, désormais supplantés par les théodolites électroniques dans tous les ordres de précision.

www.bouquin.tk

02Brabant.indd 58 28/09/11 11:08

2.1.2 Pivot

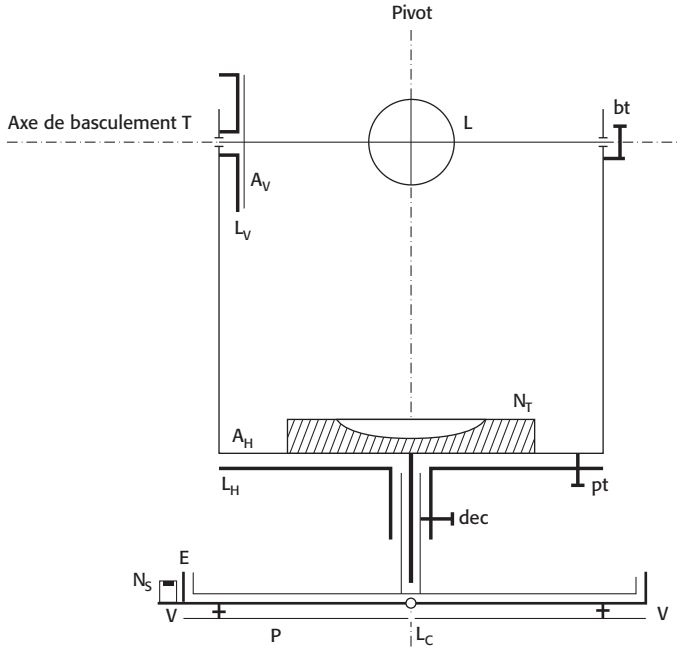


Figure 2.4. Coupe du théodolite.

2.1.2.1 Embase

La *plaque de base* P (figure 2.4), fixée sur la tête du trépied ou sur une console spéciale, porte *l'embase* E *à trois vis calantes* V formant un triangle équilatéral dont le pivot est le centre ; les vis calantes permettent le basculement de l'instrument, mouvement amorti par une plaque ressort.

Le calage sommaire de l'embase est réalisé avec la *nivelle sphérique* Ns, constituée d'une fiole en verre taillée intérieurement dans sa partie utile suivant une calotte sphérique, remplie incomplètement d'alcool ou d'éther très fluide, l'espace occupé par les gaz ayant la forme d'une *bulle circulaire*. *La nivelle est calée* lorsque la bulle est concentrique au cercle-repère gravé sur la fiole (figure 2.5) ; si tout était parfait, le pivot serait alors vertical.

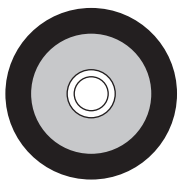


Figure 2.5. Nivelle sphérique.

Ce document est la propriété exclusive de Chafiq HANAOUI (chafiq.512@gmail.com) - 24 avril 2017 à 15:47

02Brabant.indd 59 28/09/11 11:08

Ce document est la propriété exclusive de Chafiq HANAOUI (chafiq.512@gmail.com) - 24 avril 2017 à 15:47

La sensibilité s d'une nivelle est la valeur de l'angle de basculement pour un déplacement connu du cercle-repère ou des graduations, la bulle restant immobile à la partie la plus élevée de la cuve ; conventionnellement, cet angle est exprimé en minutes sexagésimales pour un déplacement apparent de la bulle égal à 2 mm, la sensibilité des nivelles sphériques de théodolite variant de 8' à 10'.

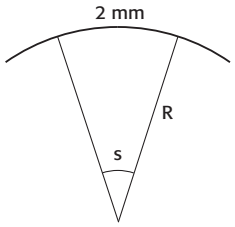


Figure 2.6. Sensibilité d'une nivelle.

Sachant que : $360° = 2\pi \text{ rad} \Rightarrow 1° = \frac{\pi}{180} \text{ rad} \Rightarrow 1' = \frac{\pi}{60 \times 180} \text{ rad}$,

le calcul du rayon de courbure R (figure 2.6) pour une sensibilité de 8' est immédiat :

$$2 \text{ mm} = R \cdot s_{rad} \Rightarrow R = \frac{0{,}002}{8\,\frac{\pi}{60 \times 180}} \approx 0{,}86 \text{ m}.$$

La *précision de calage* est environ quatre fois meilleure que la sensibilité ; elle correspond à un calage de la bulle de l'ordre du demi-millimètre.

Une *lunette de centrage* Lc coudée à angle droit, appelée couramment *plomb optique*, permet de visualiser le prolongement du pivot et par conséquent de *centrer* l'instrument sur un point au sol lorsque le pivot est calé, en confondant leurs verticales. Sur certains instruments électroniques récents, le plomb optique est remplacé par un *plomb laser* dont le rayon marque au sol le prolongement du pivot ; le centrage est facilité par une translation du théodolite dans l'embase qui n'altère pas le calage.

La cuvette de centrage de l'embase peut recevoir indifféremment le théodolite, un prisme réflecteur, etc., ces différents éléments étant centrés mécaniquement à mieux que 0,1 mm ; ce dispositif, appelé *centrage forcé*, est bloqué par un verrou.

2.1.2.2 Calage du pivot

La flasque de centrage du théodolite verrouillé dans l'embase porte le manchon d'axe, lequel pivote avec l'alidade A_H du cercle horizontal. Le calage sommaire du pivot effectué avec la nivelle sphérique est affiné avec la nivelle torique d'alidade N_T, dont la fiole porte des graduations symétriques par rapport à un centre de symétrie non représenté (figure 2.7).

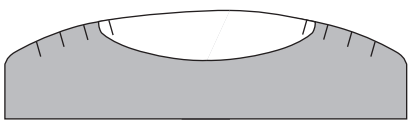


Figure 2.7. Nivelle torique.

La nivelle est calée quand les extrémités de la bulle sont symétriques par rapport au milieu des graduations ; la bulle occupe alors sa *position de calage*, à ne pas confondre avec la *position de réglage* (§ 2.2.2) laquelle correspond seule à un pivot vertical.

www.bouquin.tk

Pour une longueur *d'échelon*, autrement dit une longueur entre deux graduations, égale à 2 mm, la sensibilité des nivelles toriques d'alidade varie de 60" à 20"; la précision de calage est environ quatre fois meilleure.

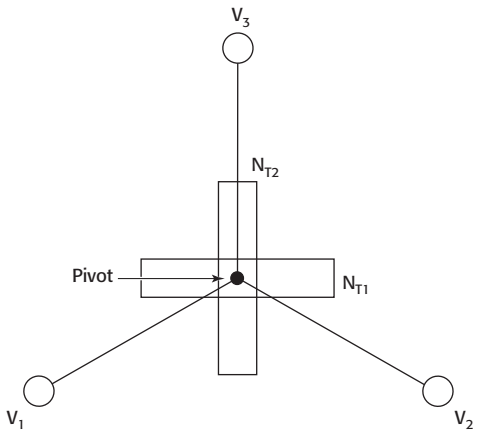


Figure 2.8. Calage du pivot.

Pour caler le pivot vertical (figure 2.8) :

- amener la nivelle à la position N_{T1} parallèle à la direction V_1-V_2 joignant deux vis calantes, puis caler la bulle en jouant simultanément et en sens contraires sur les vis V_1 et V_2 lesquelles basculent le pivot dans le plan vertical V_1-V_2 ;
- tourner l'alidade *d'un quart de tour* pour placer la nivelle dans la position N_{T2} perpendiculaire à la précédente, autrement dit parallèle à la direction Pivot-V_3, puis caler la nivelle en jouant uniquement sur la vis V_3 ; le pivot est alors à l'intersection des deux plans verticaux V_1-V_2 et Pivot-V_3, donc vertical ;
- recommencer une seconde fois la manipulation car la rotation de V_3 influe légèrement sur le calage antérieur de V_1-V_2.

Sur les théodolites électroniques récents, la nivelle torique est remplacée par une nivelle électronique à deux axes orthogonaux, calée à l'affichage (figure 2.9).

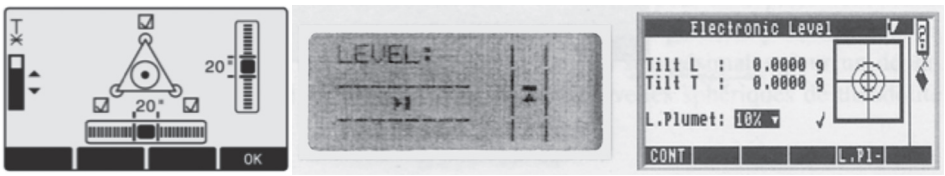


Figure 2.9. Nivelles électroniques.

Document Leica

Certains théodolites n'ont qu'une nivelle sphérique compte tenu :

- soit de la faible précision espérée,
- soit de la correction automatique de la lecture du cercle horizontal par un compensateur électronique bi-axes.

Ce document est la propriété exclusive de Chafiq HANAOUI (chafiq.512@gmail.com) - 24 avril 2017 à 15:47

www.bouquin.tk

02Brabant.indd 61 28/09/11 11:08

2.1.3 Cercle horizontal

2.1.3.1 Goniomètre

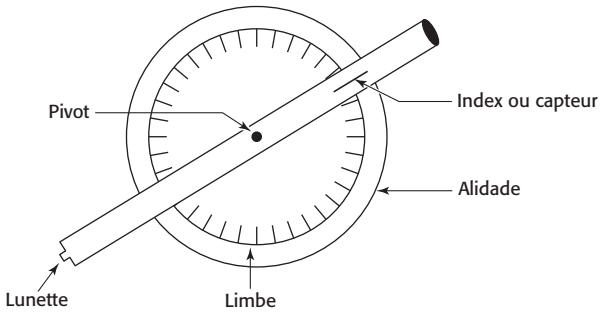


Figure 2.10. Goniomètre.

Un goniomètre est essentiellement constitué d'un *limbe* et d'une *alidade* (figures 2.4 et 2.10) :

- le limbe plan circulaire L_H (figure 2.4) porte l'échelle à traits chiffrée généralement en grades et croissant dans le sens des aiguilles d'une montre pour les théodolites optiques, incrémentée dans un sens ou dans l'autre, en grades ou en degrés, pour les théodolites électroniques ;
- l'alidade A_H est le cercle plan concentrique au limbe, mobile avec le pivot, qui porte la lunette et un index pour les théodolites optiques, un capteur pour les théodolites électroniques.

Sur certains théodolites, le plomb optique est monté sur l'alidade, notamment les instruments démunis de centrage forcé.

2.1.3.2 Lectures

La lecture optique mesure la valeur d'échelle du limbe depuis le zéro origine jusqu'à l'index de l'alidade ; le développement du limbe étant limité, la longueur d'échelon de l'échelle à traits photogravés sur verre l'est aussi et par conséquent, l'index se positionne généralement entre deux traits (figure 2.11).

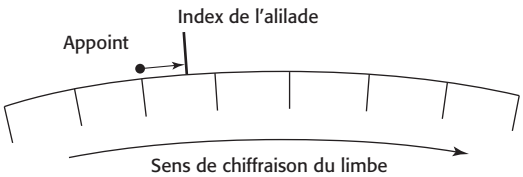


Figure 2.11. Lecture du cercle.

La valeur de la lecture optique est donc la somme de la valeur du trait qui précède l'index et de l'appoint, valeur de la partie d'échelon qui les sépare, obtenu à l'estime ou à l'aide d'un micromètre.

Ce document est la propriété exclusive de Chafiq HANAOUI (chafiq.512@gmail.com) - 24 avril 2017 à 15:47

www.bouquin.tk

La lecture électronique affiche la valeur d'échelle sous forme numérique (figure 2.12). Les théodolites électroniques permettent l'enregistrement automatique des mesures sur un module ou sur une carte mémoire interchangeable, qui autorise leur transfert automatique ultérieur dans un système de traitement informatique, supprimant ainsi toute erreur de saisie ou de transmission. Les opérateurs doivent être attentifs au fait que toutes les erreurs systématiques du théodolite traditionnel sont présentes dans les théodolites et tachéomètres électroniques, sauf peut-être l'erreur de graduation.

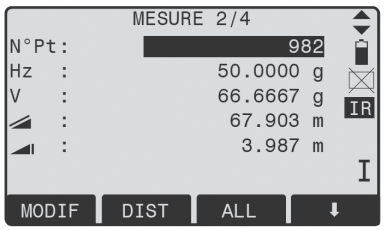


Figure 2.12. Lecture électronique.

2.1.3.3 Mouvements

La vis de *pivotement* pt (figure 2.4) libère la rotation de l'alidade et du pivot, la valeur de cette rotation étant mesurée par le déplacement de l'index devant les graduations du limbe ; la vis de pivotement est toujours complétée par une vis de *fin pointé*, indispensable, coaxiale sur les instruments récents. Certains théodolites ont une vis de pointé à deux vitesses : rapide-pointé grossier, lent-fin.

Sur les théodolites les plus récents, la vis de pivotement est supprimée ; la rotation est à frottement dur avec une vis de fin pointé.

La rotation du cercle-limbe par rapport au pivot est commandée par un bouton de décalage du cercle : dec, avec lequel l'opérateur peut amener une graduation quelconque du limbe 0, 100, etc. aux environs immédiats de l'index.

Les théodolites électroniques peuvent conserver une lecture pendant la rotation de l'alidade, signaler chaque angle de 100 gon mesuré, être motorisés, c'est-à-dire pivoter à l'aide de servomoteurs, ou robotisés – le pointé et la lecture étant alors entièrement automatiques (§ 6.2.1).

2.1.4 Cercle vertical

L'alidade A_H porte deux montants verticaux (figure 2.4) qui soutiennent l'axe T sur lequel est centrée la lunette L. Cette dernière bascule, en balayant un plan vertical de visée, à l'aide de la vis de basculement bt complétée par sa vis de fin pointé ou, sur les instruments les plus récents, avec une unique vis sans fin.

Centré sur l'axe T le goniomètre vertical est constitué schématiquement d'un limbe immobile L_V fixé au montant et d'une alidade A_V solidaire de l'axe, dont l'index bascule dans le plan vertical en suivant l'inclinaison de la lunette ; cette dernière pouvant effectuer un tour complet, l'opérateur observe avec le cercle vertical à sa gauche, position dénommée cercle à gauche CG, ou à sa droite, position cercle à droite CD, ou encore positions 1 et 2 lorsque le montant qui porte le cercle vertical n'est pas apparent, cas fréquent avec les théodolites récents.

www.bouquin.tk

Ce document est la propriété exclusive de Chafiq HANAOUI (chafiq.512@gmail.com) - 24 avril 2017 à 15:47

La position en *cercle directeur* est celle qui correspond à la manipulation la plus commode de l'instrument, compte tenu de sa configuration générale ; dans cette position ergonomique, le limbe de l'éclimètre fournit l'angle zénithal de la visée, compris entre 0 gon et 200 gon pour la plupart des théodolites optiques, l'angle zénithal l'angle d'inclinaison ou la pente au choix pour les théodolites électroniques.

La mesure des angles zénithaux se référant à la verticale physique du centre de l'éclimètre, le zéro origine doit être situé exactement au zénith du centre ; cette condition est remplie par un *index automatique* basé sur l'équilibre d'un liquide ou d'un pendule, qui peut atteindre une précision de calage supérieure à 0,1 mgon sur les théodolites électroniques de précision.

La mesure d'un angle vertical ne nécessitant qu'une visée, l'éclimètre ne comporte pas de décalage du cercle.

2.1.5 Axe optique

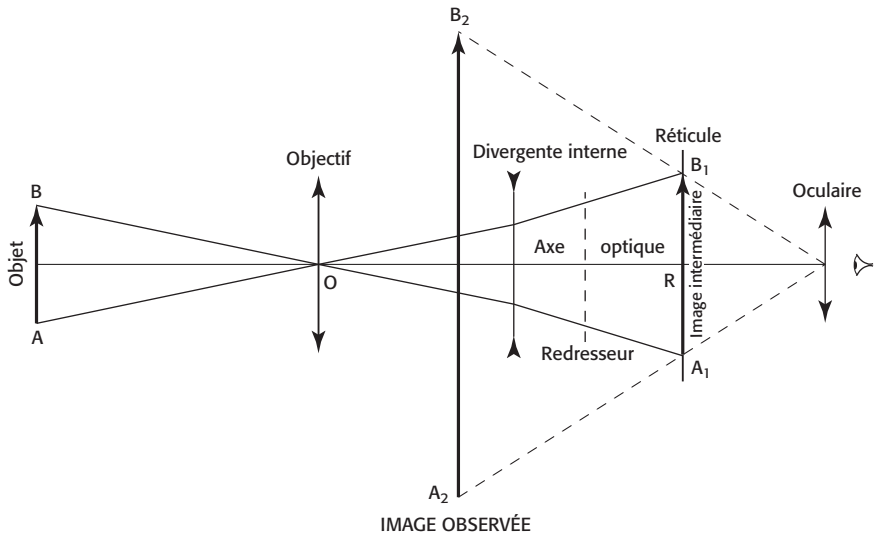


Figure 2.13. Lunette topographique.

2.1.5.1 Lunette

L'*axe optique* d'une lunette (figure 2.13) est la droite joignant le centre de l'objectif O au centre du réticule R.

L'*objectif* est constitué d'un ensemble de lentilles accolées qui se comporte comme une lentille convergente, c'est-à-dire donne d'un objet AB une image réelle renversée.

Un *prisme redresseur* oriente l'image dans le même sens que l'objet vu à l'œil nu.

La *divergente de mise au point*, mobile à l'intérieur de la lunette, forme avec l'objectif un « objectif à foyer variable » et permet à l'opérateur de placer l'image intermédiaire A_1B_1 exactement dans le plan du réticule.

Le *réticule* est un disque de verre à faces parallèles, fixe par rapport à l'objectif, portant entre autres une croix, intersection de deux diamètres perpendiculaires, qui visualise l'axe optique (figure 2.14) ; c'est en somme un écran transparent sur lequel est placée l'image intermédiaire.

Ce document est la propriété exclusive de Chafiq HANAOUI (chafiq.512@gmail.com) - 24 avril 2017 à 15:47

www.bouquin.tk

02Brabant.indd 64 28/09/11 11:08

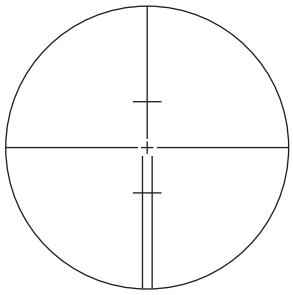


Figure 2.14. Réticule.

L'*oculaire* est un ensemble de lentilles qui se comporte comme une loupe, agrandit l'image intermédiaire et les traits du réticule pour donner l'image A_2B_2 observée par l'opérateur ; les oculaires coudés à angles droits autorisent les visées zénithales.

2.1.5.2 Mise au point

Diriger la lunette vers une surface claire, puis régler l'oculaire pour obtenir la netteté des traits du réticule ; ne jamais viser le soleil sans filtres spéciaux sous peine de lésions.

Amener le signal dans le champ de la lunette à l'aide du viseur-collimateur (figure 2.15).

Figure 2.15. Viseur-collimateur.

Document Leica

Mettre au point la netteté de l'image à l'aide de la bague de mise au point, puis affiner les deux réglages : oculaire et mise au point.

Vérifier l'absence de parallaxe, en déplaçant l'œil devant l'oculaire pour s'assurer que les traits du réticule restent fixes par rapport à l'image observée.

Observer dans une lunette les deux yeux ouverts, ce qui est beaucoup plus facile qu'une première expérience peut le laisser croire.

Ce document est la propriété exclusive de Chafiq HANAOUI (chafiq.512@gmail.com) - 24 avril 2017 à 15:47

www.bouquin.tk

02Brabant.indd 65 28/09/11 11:08

Ce document est la propriété exclusive de Chafiq HANAOUI (chafiq.512@gmail.com) - 24 avril 2017 à 15:47

2.1.5.3 Qualités d'une lunette

Grossissement

C'est le rapport de l'angle α' sous lequel on voit l'objet dans la lunette, à l'angle α sous lequel on le voit à l'œil nu : $G = \frac{\alpha'}{\alpha}$; il varie de × 25 à × 35 en général, mais des oculaires interchangeables donnent des grossissements plus importants.

Pouvoir séparateur

Le pouvoir séparateur de l'œil, ou acuité visuelle, est l'angle minimal sous lequel deux points sont vus distinctement. Pour que le cerveau distingue deux taches lumineuses séparées, il faut que deux cônes tapissant la rétine soient atteints par la lumière alors que celui qui les sépare ne l'est pas ; le pouvoir séparateur de l'œil normal est à peu près de 20 mgon. Le pouvoir séparateur d'une lunette est l'angle minimal sous lequel deux points sont vus distinctement dans celle-ci ; pour un grossissement × n il vaut sensiblement : $\frac{20}{\times n}$ mgon.

Champ

Partie de l'espace visible dans la lunette ; le champ, inversement proportionnel au grossissement, est de l'ordre de : $\frac{330}{\times n}$ mgon.

Clarté

Rapport d'éclairement de l'image rétinienne observée dans la lunette à celui obtenu à l'œil nu ; plus le grossissement est important, moins la lunette est claire. L'optique des lunettes est spécialement traitée pour obtenir le maximum de clarté.

Absence d'aberrations

Les différentes aberrations : sphéricité, astigmatisme, courbure, volume de champ, chromatisme, distorsion sont corrigées au mieux par la combinaison de plusieurs lentilles convergentes et divergentes en verres différents.

Étanchéité

Une lunette doit être étanche à l'humidité et à la poussière.

2.2 Précision des mesures d'angles

2.2.1 Erreurs parasites

Faute de lecture, décelée par la paire de séquences, qui est une série de lectures indépendantes les unes des autres (§ 2.3.3).

Faute de saisie, notamment pour les lectures écrites sur carnet.

Décalage du limbe, dû à une confusion des vis, un déplacement consécutif à un choc contre le trépied, etc.

Pointé avec un trait stadimétrique (§ 4.1.2.3) au cours de la mesure d'un angle vertical.

02Brabant.indd 66 28/09/11 11:08

2.2.2 Erreurs systématiques

2.2.2.1 Défaut de verticalité du pivot

Cette erreur de signe variable est égale à : $e = \arcsin(\sin \hat{i} \cdot \text{cotan } \hat{V})$, formule dans laquelle $\hat{i}$ représente l'angle du pivot et de la verticale.

Elle est éliminée uniquement avec les théodolites électroniques munis d'un compensateur à deux axes orthogonaux ; pour tous les autres, elle entache les lectures azimutales et par conséquent *l'opérateur ne soigne jamais assez le calage de la nivelle torique ou électronique*. Le calage doit être corrigé, entre les différentes séquences, si la bulle s'est éloignée de sa position de réglage de plus d'un échelon.

Pour déterminer la *position de réglage* d'une nivelle torique placée en fin de calage dans la position N_{T2} parallèle à Pivot-V_3 (figure 2.8) :

– faire un demi-tour avec l'alidade ;
– si la bulle reste à sa position de calage, autrement dit ne bouge pas, le pivot est vertical, la nivelle réglée, les positions de calage et de réglage confondues ;
– si la bulle se déplace (en réalité c'est la fiole) de plus d'une longueur d'échelon, corriger *la moitié* du déplacement avec la vis calante V_3, ce qui a pour effet de rendre le pivot vertical dans le plan Pivot-V_3 ; la bulle est alors à sa position de réglage, qui serait celle à utiliser pour le calage du théodolite si on ne réglait pas la nivelle.

Le *réglage de la nivelle torique* consiste à corriger l'autre moitié du déplacement initial de la bulle avec la vis de basculement de la fiole, afin de confondre position de calage et position de réglage ; bien entendu, une fois le réglage effectué, il faut caler le théodolite avant les observations.

Le *réglage de la nivelle sphérique* consiste à rendre concentriques le cercle repère et la bulle circulaire en jouant sur les vis de la fiole, le pivot ayant été calé auparavant vertical avec la nivelle torique.

2.2.2.2 Inégalité des échelons du limbe

Pratiquement éliminée par la moyenne de deux mesures à origines décalées de 100 gon, autrement dit de deux réitérations, supprimée par une lecture électronique faite avec un capteur dynamique qui examine à chaque mesure tous les échelons du cercle.

2.2.2.3 Excentricité des cercles

Excentricité des cercles limbe et alidade du fait des jeux nécessaires à la rotation de cette dernière ; erreur de la forme $e = \arcsin\left(\frac{r \cdot \sin \alpha}{R}\right)$, éliminée par la moyenne des lecture diamétralement opposées. Pour certains instruments, notamment les théodolites ordinaires, cette erreur est négligeable.

2.2.2.4 Défaut d'horizontalité de l'axe de basculement

En désignant par $\hat{t}$ l'angle d'inclinaison de l'axe de basculement, encore appelé erreur de tourillonnement, l'erreur résultante sur la lecture azimutale vaut : $e = \arcsin(\sin \hat{t} \cdot \text{cotan } \hat{V})$, éliminée par *double-retournement* ou automatiquement par un compensateur sur certains théodolites électroniques. Après avoir pointé le signal CG par exemple et lu l'angle azimutal, le double-retournement consiste à basculer la lunette puis à pivoter le théodolite d'un demi-tour pour pointer à nouveau le signal CD et faire la lecture ; la moyenne des deux lectures CG et CD est affranchie du tourillonnement.

www.bouquin.tk

Ce document est la propriété exclusive de Chafiq HANAOUI (chafiq.512@gmail.com) - 24 avril 2017 à 15:47

Ce document est la propriété exclusive de Chafiq HANAOUI (chafiq.512@gmail.com) - 24 avril 2017 à 15:47

2.2.2.5 Excentricité du viseur

Quand l'axe optique ne coupe pas le pivot ; négligeable en général, éliminée par le double-retournement.

2.2.2.6 Collimation horizontale

Si l'axe optique n'est pas perpendiculaire à l'axe de basculement, le défaut de perpendicularité $\hat{c}$, appelé collimation horizontale, fait décrire à l'axe optique un cône au lieu d'un plan vertical de visée et entraîne sur la lecture du cercle horizontal une erreur de la forme $e = \arcsin\left(\frac{\sin \hat{c}}{\sin \hat{V}}\right)$, éliminée par le double-retournement ou automatiquement sur certains théodolites électroniques.

2.2.2.7 Dérive

Déplacement lent et progressif du zéro de l'échelle ou plus généralement de l'indication au cours du temps. Elle provient souvent de la torsion du trépied, mouvement de vrille dû essentiellement aux variations de température ; pour réduire la dérive, travailler à l'ombre d'un parasol, éviter les longues stations, tourner l'alidade alternativement vers la droite et vers la gauche au cours des séquences successives.

2.2.2.8 Correction d'index ou collimation verticale

Elle est due au fait que le zéro origine du limbe vertical n'est pas exactement au zénith du centre ; éliminée par le double-retournement pour les instruments à index automatique ou nivelle de collimation ou encore automatiquement sur certains théodolites électroniques.

2.2.2.9 Erreur de réfraction

Sur une grande longueur, un rayon lumineux qui traverse des couches d'air d'indices de réfraction différents subit des déviations :

- la réfraction verticale, due au fait qu'en atmosphère calme la densité de l'air décroît avec l'altitude ce qui diminue l'indice de réfraction et par conséquent courbe le rayon vers le sol ;
- la réfraction latérale d'une visée proche d'une paroi rocheuse exposée au soleil par exemple est difficile, sinon impossible, à évaluer.

2.2.3 Erreurs accidentelles

2.2.3.1 Erreur de centrage

Le pivot vertical n'étant pas confondu avec la verticale physique du point de station au sol ou au toit ; elle varie de 0,5 mm environ à quelques millimètres selon le dispositif de centrage. L'erreur de centrage peut également affecter le signal, jalon planté « derrière » un piquet par exemple.

2.2.3.2 Erreur de pointé, l'axe optique ne coupant pas la verticale du signal

Le pointé est l'appréciation de l'écart existant le long d'une ligne : jalon, balise, mire, etc. ; le cerveau fait la moyenne des résultats obtenus par tous les cônes rétiniens situés le long de cette ligne, ce qui explique que le pointé ait une précision supérieure au pouvoir séparateur. Avec une lunette de grossissement × n on admet généralement les précisions suivantes : pointé

www.bouquin.tk

02Brabant.indd 68 28/09/11 11:08

Ce document est la propriété exclusive de Chafiq HANAOUI (chafiq.512@gmail.com) - 24 avril 2017 à 15:47

ordinaire $\frac{10}{\times n}$ mgon, encadrement $\frac{5}{\times n}$ mgon soit deux fois mieux, coïncidence c'est-à-dire prolongement de droites $\frac{2,5}{\times n}$ mgon soit quatre fois mieux que le pointé ordinaire.

L'erreur de pointé dépend également des dimensions, de la forme et de l'éclairage du signal ; pointer un jalon près du sol de manière à réduire l'influence de son défaut de verticalité (figure 2.16).

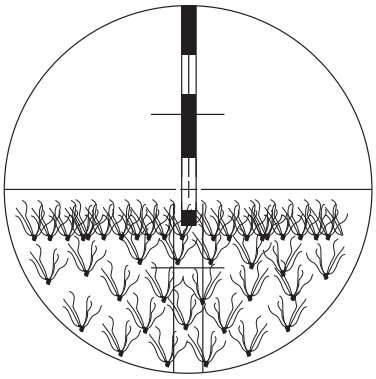


Figure 2.16. Pointé.

2.2.3.3 Erreur de lecture

Essentiellement fonction du dispositif de mesure de l'appoint pour une lecture optique.

2.2.3.4 Flamboiement de l'air

Le brassage des couches d'air de températures et de densités différentes se traduit dans la lunette par des images floues et mouvantes.

2.2.4 Écarts-types

Selon la norme DIN 18723, l'écart-type sur une direction mesurée dans les deux positions de la lunette varie de 2 à 3 mgon pour un théodolite ordinaire de résolution 1 mgon, de 0,2 à 1 mgon pour un théodolite de précision de résolution 1 dmgon, aussi bien pour le cercle horizontal que pour le cercle vertical.

2.3 Mesurage d'un angle horizontal

2.3.1 Mises en station

Mettre un théodolite en station consiste à réaliser simultanément le *calage* vertical du pivot et le *centrage* sur la verticale physique du point de station.

Le théodolite est fixé sur la tête d'un trépied à trois jambes coulissantes dont la tête évidée autorise une petite translation de l'appareil, la lunette étant à hauteur des yeux de l'opérateur debout. Ce dernier, après avoir placé l'instrument sensiblement au centre de la tête et réglé les vis calantes à mi-course, dispose l'ensemble trépied-théodolite au-dessus du point au sol en estimant au mieux l'horizontalité de la tête du trépied et le centrage du point, tout en enfonçant les jambes à refus si le sol est meuble ; il peut aussi mettre seulement le trépied en station à l'estime et y fixer le théodolite après coup. Dans une forte pente, placer deux jambes du trépied sur une même courbe de niveau en aval du point, la troisième en amont. La qualité de cette *mise en station à l'estime* conditionne la réussite des manipulations suivantes réalisées dans l'ordre chronologique :

www.bouquin.tk

02Brabant.indd 69 28/09/11 11:08

Ce document est la propriété exclusive de Chafiq HANAOUI (chafiq.512@gmail.com) - 24 avril 2017 à 15:47

1. Pointer le plomb optique ou plomb laser sur le point au sol avec les vis calantes.
2. Caler la nivelle sphérique de l'embase en jouant sur les longueurs des jambes du trépied.
3. Caler le pivot vertical à l'aide des vis calantes et de la nivelle torique ou électronique.
4. Centrer le plomb optique ou plomb laser sur le point de station en translatant l'instrument sur la tête du trépied.
5. Terminer par un calage soigné du pivot.
6. Éventuellement, affiner une seconde fois le centrage puis le calage.

En dessous d'un point au « toit » ou au « plafond », après avoir mis le théodolite en station à l'estime :

1. Caler le pivot puis basculer la lunette à l'horizontale pour lire l'angle zénithal : V = 100 gon.
2. Centrer le repère de centrage de la lunette sous la pointe d'un fil à plomb en translatant l'appareil sur la tête du trépied.
3. Terminer par un calage soigné.
4. Éventuellement, affiner une seconde fois le centrage puis le calage.

Un viseur zénithal fixé sur la lunette permet la mise en station sous un point au toit avec une précision de 1 à 2 mm pour une hauteur de 10 m.

Selon les travaux à réaliser, d'autres dispositifs peuvent être mis en œuvre :

– centrage à l'aide d'un fil à plomb suspendu en dessous de la tête du trépied ;
– canne télescopique à nivelle sphérique donnant la hauteur de l'instrument au-dessus du point ;
– trépieds centrants avec ou sans canne ;
– consoles spéciales ;
– plaque de centrage sur pilier ;
– douille et boule de centrage forcé ;
– oculaires coudés à angle droit, plomb optique zénithal de précision, etc.

2.3.2 Séquence

La *séquence* est un ensemble de n + 1 lectures effectuées au théodolite, en une même station, sur n directions différentes, avec une même origine du limbe, une même position du cercle vertical par rapport à la lunette, contrôle de fermeture sur la référence et répartition de l'écart de fermeture sur les diverses composantes de la séquence.

Le résultat est *l'angle compté depuis la référence dans le sens de chiffraison du limbe*, généralement le sens des aiguilles d'une montre.

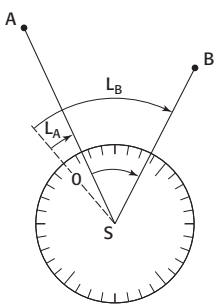


Figure 2.17. Séquence.

www.bouquin.tk

Ce document est la propriété exclusive de Chafiq HANAOUI (chafiq.512@gmail.com) - 24 avril 2017 à 15:47

Pour observer la séquence la plus simple, sur n = 2 directions (figure 2.17), l'opérateur :

1. Pointe le signal de référence A en cercle directeur et lit la lecture d'ouverture ou lecture de départ Ld.
2. Tourne la lunette dans le sens des aiguilles d'une montre pour pointer le signal B et lire L_B.
3. En continuant à tourner dans le même sens, ferme la séquence en pointant à nouveau la référence A et fait la lecture de fermeture Lf.
4. Calcule immédiatement la fermeture angulaire : Lf – Ld, différence entre les lectures de fermeture et d'ouverture et s'assure qu'elle est inférieure à la tolérance correspondante ; aucun dépassement n'étant admis, les observations doivent le cas échéant être reprises immédiatement.
5. Retient pour lecture sur la référence la moyenne des lectures d'ouverture et de fermeture : $L_A = \frac{Ld + Lf}{2}$.
6. L'angle azimutal de SB par rapport à SA étant égal à : $(\overrightarrow{SA}, \overrightarrow{SB}) = L_B - L_A$ et les lectures devant toujours être réduites à zéro sur la référence, l'opérateur présente la différence : $L_B - L_A$ comme la lecture qui aurait été faite sur B si celle sur la référence avait été rigoureusement nulle, ce qui revient à retrancher L_A à elle-même.

Exemple

Point visé	Hauteur Pointé	Cercle Horizontal	Cercle Vertical	Distance	Lectures Réduites			Ecarts	Remarques
				Traits Stadi.	Séquences	Paires	Tours		
A		217,430 gon			CG → 0				
B		346,072			128,641				
A		217,432						2 mgon	

Réduction des lectures au fur et mesure des observations, manuellement pour la saisie sur carnet, automatiquement avec certains théodolites électroniques.
La séquence n'offre ni contrôle, ni suppression ou réduction des erreurs systématiques et accidentelles.

2.3.3 Paires de séquences

La *paire de séquences* est une association de deux séquences successives avec retournement de la lunette et inversion du sens de pivotement, ainsi que, pour les anciens instruments, notamment les théodolites optiques, décalage de l'origine ; par extension, la paire est aussi la valeur moyenne des résultats obtenus dans chaque séquence. Le décalage du cercle entre les deux séquences d'une même paire est égal à 100 gon, valeur qui élimine pratiquement l'erreur d'inégalité des échelons du limbe quand elle ne l'est pas par lecture électronique.

En topographie, où les observations angulaires excèdent rarement deux paires, les lectures sur la référence sont voisines de 0 gon et 100 gon pour la première paire, 50 gon et 150 gon pour la seconde, de manière à exploiter au mieux la graduation du limbe. Avec un théodolite dont la position cercle directeur est CG, muni d'un limbe dont la chiffraison croît dans le sens des aiguilles d'une montre, l'opérateur peut utiliser les combinaisons mnémotechniques de séquences suivantes :

www.bouquin.tk

Ce document est la propriété exclusive de Chafiq HANAOUI (chafiq.512@gmail.com) - 24 avril 2017 à 15:47

– une paire : CG 0 ↷ CD 100 ↶

– deux paires : CG 0 ↷ CD 100 ↶ CG 50 ↷ CD 150 ↶

Pour chaque séquence, la lecture de départ prédéterminée est obtenue de manière approchée par décalage du cercle avec les théodolites optiques, exacte par introduction au clavier avec les théodolites électroniques.

Pour les séquences « tourne à gauche », en saisie manuelle, « remonter » le carnet.

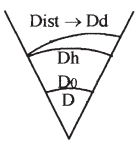
Sous réserve que chaque séquence ferme dans les tolérances, si L_{BG} et L_{BD} représentent respectivement les lectures réduites CG et CD sur le signal B prendre leur moyenne arithmétique comme valeur de la paire : $L_B = \frac{L_{BG} + L_{BD}}{2}$; conserver toutes les décimales de calcul au cours des réductions successives pour *n'arrondir à l'approximation des mesures que la moyenne finale de toutes les paires*.

Exemple

Opérateur - Date :
Température :
Pression :

STATION : 2002
Hauteur Instrument :

Correction d'index :
Altération Lambert :
ppm atmosph :



Distances :
- brute : Dist
- directe : Dd
- horizontale : Dh
- niveau zéro : D0
- Lambert : D

Point visé	Hauteur Pointé	Cercle Horizontal	Cercle Vertical	Distance Traits Stadi.	Lectures Réduites Séquences	Lectures Réduites Paires	Lectures Réduites Tours	Ecarts	Remarques
2001		0,120gon			cg 0 → 0	0			
2003		186,593			186,4725	186,473			
2001		0,121						1 mgon	
2001		100,084			cd 100 ← 0			0	
2003		286,558			186,474				
2001		100,084							

L'opérateur réduit les lectures, manuellement en carnet, automatiquement selon l'instrument ou le terminal de terrain utilisé, immédiatement après les observations de façon à reprendre sur-le-champ les mesures fausses ou hors tolérances.

Peuvent être soumis à tolérances :

– l'*écart de fermeture* de chaque séquence ;
– l'*écart des lectures* pour une direction, écart entre la valeur d'une paire de séquences et la moyenne générale de toutes les paires ;
– l'*écart sur la référence*, somme algébrique, divisée par n + 1, de tous les écarts de lecture d'une même paire, n étant le nombre de directions y compris la référence.

www.bouquin.tk

02Brabant.indd 72 28/09/11 11:08

Ce document est la propriété exclusive de Chafiq HANAOUI (chafiq.512@gmail.com) - 24 avril 2017 à 15:47

Si une lecture d'une séquence est fausse ou hors tolérance et que l'opérateur ne puisse pas la reprendre immédiatement, par suite d'une visibilité insuffisante en fin de journée par exemple, il doit abandonner les deux lectures de la paire car seule leur moyenne est affranchie des erreurs systématiques instrumentales.

La paire de séquences contrôle les observations en détectant les erreurs parasites et améliore la précision en supprimant ou en réduisant les erreurs systématiques et accidentelles. *Les théodolites électroniques à capteurs dynamiques, qui intègrent l'ensemble de la graduation du limbe à chaque lecture, s'affranchissent, de ce fait, du décalage du cercle ;* de même, la correction électronique des erreurs de collimation horizontale et de tourillonnement n'implique plus, pour elles, le double-retournement.

2.3.4 Tour d'horizon

Le tour d'horizon est le résultat final de la combinaison des observations azimutales en une même station, rapportées à une même référence et ramenées sur cette référence à une même valeur.

L'opérateur choisit une des directions du tour comme référence compte tenu de la nature du signal, de son éloignement et des conditions de visibilité au moment des observations. La référence est désignée par A, les autres directions par B, C, etc. au fur et à mesure où on les rencontre en tournant dans le sens des aiguilles d'une montre (figure 2.18).

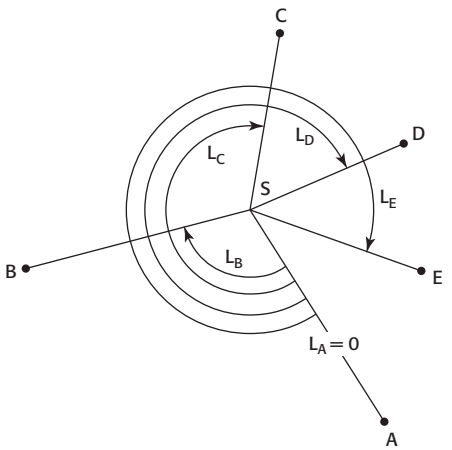


Figure 2.18. Tour d'horizon.

Opérer par paires de séquences, réduire les lectures manuellement ou automatiquement avec un logiciel, en tenant compte des tolérances de fermeture pour les séquences, les écarts de lecture et les écarts sur la référence.

Le résultat du tour réduit se présente comme la liste des lectures que l'opérateur aurait faites sur les différentes directions, si la lecture sur l'une d'elles choisie comme référence avait été rigoureusement nulle ; réduction automatique sur certains théodolites électroniques et terminaux de terrain.

www.bouquin.tk

Exemple

Opérateur - Date :

Température :
Pression :

STATION : 500 - château d'eau de MONDÉTOUR
Hauteur Instrument :

Correction d'index :
Altération Lambert :

ppm atmosph :

Distances :
- brute : Dist
- directe : Dd
- horizontale : Dh
- niveau zéro : Do
- Lambert : D

Point visé	Hauteur Pointé	Cercle Horizontal	Cercle Vertical	Distance Traits Stadi.	Lectures Réduites Séquences	Lectures Réduites Paires	Lectures Réduites Tours	Ecarts	Remarques
A MONTHLERY Tour autodrome		0,3891 gon			CG 0 → 0	0	0		
B GOMERÉ clocher		123,7434			123,35425	123,35585	123,3567	-0,9 mgon T=1,3	
C CORBEVILLE		256,3036			255,91445	255,91520	255,9155	-0,3	
D VILLEJUST		331,6436			331,25445	331,25480	331,2558	-1,0	
E NOZAY clocher		362,1364			361,74725	361,74745	361,7486	-1,2	eref = -0,6 mgon T=0,8
A		0,3892						0,1 T=2,8	
A		100,4691			CD 100 → 0			-0,9 T=2,8	
B		223,8270			123,35745				
C		356,3855			255,91595				
D		31,7247			331,25515				
E		62,2172			361,74765				
A		100,4700							
A		50,3440			CG 50 → 0	0			
B		173,7024			123,3584	123,3575 25		0,8 T=1,3	
C		306,2592			255,9152	255,915775		0,3	
D		381,6010			331,2570	331,256825		1,0	
E		12,0940			361,7500	361,749725		1,1	eref = 0,6
A		50,3440						0	
A		150,1188			CD 150 → 0			0,9 T=2,8	
B		273,4750			123,35665				
C		6,0347			255,91635				
D		81,3750			331,25665				
E		111,8678			361,74945				
A		150,1179							

Ce document est la propriété exclusive de Chafiq HANAOUI (chafiq.512@gmail.com) - 24 avril 2017 à 15:47

02Brabant.indd 74 28/09/11 11:08

2.4 Mesurage d'un angle zénithal

2.4.1 Observations

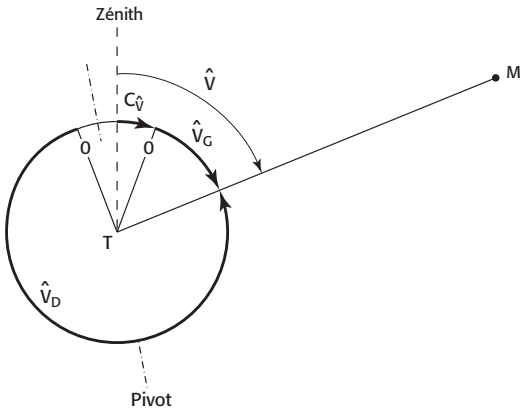


Figure 2.19. Angle zénithal.

Soit à mesurer l'angle zénithal de la visée $\overrightarrow{TM}$ (figure 2.19) avec un éclimètre dont le zéro serait proche du zénith du centre et dont la chiffraison croît de 0 gon à 400 gon en position CG par exemple.

Pointer le signal M avec le grand trait horizontal médian du réticule, lire $\hat{V}_G$; double-retournement, pointer M en position CD, lire $\hat{V}_D$.

Le dispositif de collimation du cercle vertical – qu'il soit manuel comme les nivelles toriques des anciens théodolites ou automatique pour les instruments actuels – ne cale pas le zéro exactement au zénith, mais dans deux positions symétriques faisant l'angle $|c_{\hat{V}}|$ avec la verticale du centre du limbe.

Dès lors : $$\hat{V} = \hat{V}_G + |c_{\hat{V}}| = 400 - (\hat{V}_D + |c_{\hat{V}}|) \Rightarrow \hat{V} = \frac{\hat{V}_G + (400 - \hat{V}_D)}{2}$$

Cette formule donne l'angle zénithal quel que soit le défaut de verticalité du pivot du théodolite.

2.4.2 Correction d'index

La correction d'index $c_{\hat{V}}$, encore appelée correction de collimation verticale, est l'angle zénithal positif ou négatif du zéro origine des graduations, dans la position CG par exemple si cette dernière est la position cercle directeur ; elle vaut en grandeur et en signe $c_{\hat{V}} = \frac{400 - (\hat{V}_G + \hat{V}_D)}{2}$. Dans le cas où une seule visée dans une position donnée de la lunette est faite sur le point M, l'angle zénithal $\hat{V}$ est obtenu, avec une précision réduite, à partir de cette seule lecture à laquelle s'ajoute algébriquement la correction d'index :

$$\hat{V} = \hat{V}_G + c_{\hat{V}} = 400 - (\hat{V}_D + c_{\hat{V}}).$$

Un dispositif de collimation verticale, manuel ou automatique, ne donnant pas des résultats constants dans le temps, la correction d'index doit être déterminée régulièrement.

www.bouquin.tk

Ce document est la propriété exclusive de Chafiq HANAOUI (chafiq.512@gmail.com) - 24 avril 2017 à 15:47

2.4.3 Application

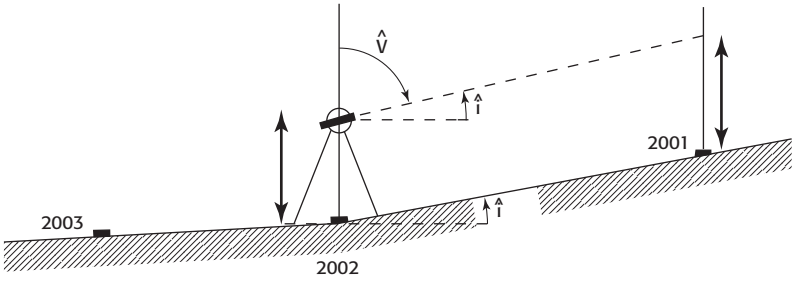


Figure 2.20. Mesure de l'inclinaison du terrain.

Pour mesurer la pente, supposée constante, du côté de cheminement (§5.3.1) 2002-2001 et du côté 2002-2003 (figure 2.20) l'opérateur, en station au sommet 2002, mesure l'angle zénithal $\hat{V}$ de la visée effectuée sur un point placé à la verticale du sommet 2001, trait sur jalon par exemple, à une hauteur égale à celle de l'axe de basculement du théodolite au-dessus de 2002 ; le quadrilatère formé par les deux verticales, la visée et le sol étant un parallélogramme, la visée est parallèle au sol et par conséquent : $\hat{i} = 100 - \hat{V}$.

Opérateur - Date :

Température :
Pression :

STATION : 2002
Hauteur Instrument :

Correction d'index :
Altération Lambert :

ppm atmosph :

Distances :
- brute : Dist
- directe : Dd
- horizontale : Dh
- niveau zéro : D0
- Lambert : D

Point visé	Hauteur Pointé	Cercle Horizontal	Cercle Vertical	Distance	Lectures Réduites			Ecarts	Remarques
				Traits Stadi.	Séquences	Paires	Tours		
2001		0,120 gm	97,185 gm		cg 0 / 0	0			
2003		186,593	106,406		186,4725	186,473			
2001		0,121						1 mgm	
2001		100,084	302,827		cD 100 / 0			0	
2003		286,558			186,474				
2001		100,084							

$$\hat{V}_{2002-2001} = \frac{97{,}185 + (400 - 302{,}827)}{2} = 97{,}179 \text{ gon}$$

$$P_{2002-2001} = \tan(100 - \hat{V}_{2002-2001}) \approx 4{,}4\ \%$$

$$c_{\hat{V}} = \frac{400 + (97{,}185 + 302{,}827)}{2} = -0{,}006 \text{ gon}$$

$$\hat{V}_{2002-2003} = 106{,}406 - 0{,}006 = 106{,}400 \text{ gon}$$

$$P_{2002-2003} = \tan(100 - \hat{V}_{2002-2003}) \approx -10{,}1\ \%$$

www.bouquin.tk

Ce document est la propriété exclusive de Chafiq HANAOUI (chafiq.512@gmail.com) - 24 avril 2017 à 15:47

2.5 Orientation

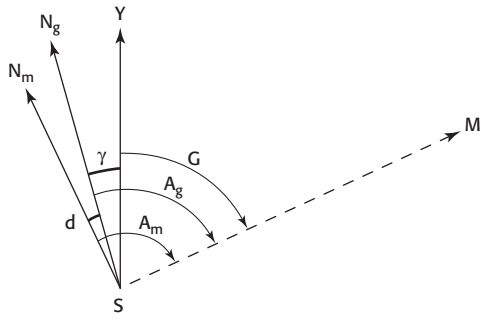


Figure 2.21. Orientation.

La direction $\overrightarrow{SM}$, définie par le point de station S et le signal M (figure 2.21), est orientée dans le plan par rapport au « nord » du point S : nord du quadrillage c'est-à-dire axe des ordonnées positives du système de projection, nord géographique ou nord magnétique.

2.5.1 Orientation dans le système de projection

Le topographe stationne un point connu en coordonnées, observe un tour d'horizon sur des points également connus, puis calcule le G_0 de station (§ 9.2.2) gisement du zéro origine du cercle horizontal du théodolite ; le G_0 est une constante d'orientation de la station par rapport à l'axe des Y positifs du quadrillage (Lambert par exemple), qui induit immédiatement les gisements G de toutes les directions observées sur des points inconnus.

À noter qu'une orientation sur une seule direction de gisement connu est difficile à contrôler et n'offre qu'une précision limitée.

Enfin, l'orientation depuis un point GPS (§ 6) implique l'intervisibilité avec un autre point connu, ce qui peut contraindre à la mise en place d'un second point GPS à seule fin de pouvoir s'orienter.

2.5.2 Orientation magnétique

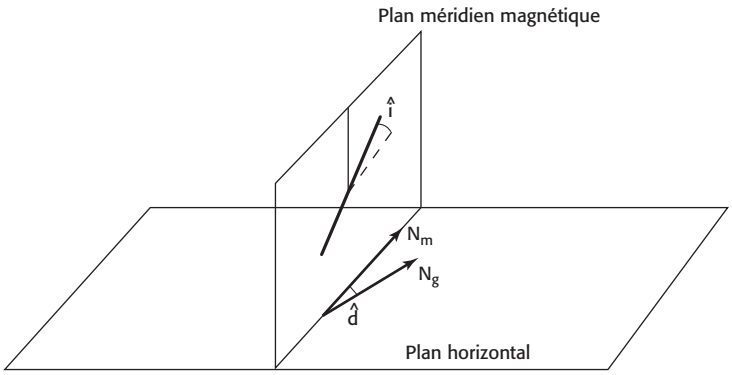


Figure 2.22. Nord magnétique.

www.bouquin.tk

Ce document est la propriété exclusive de Chafiq HANAOUI (chafiq.512@gmail.com) - 24 avril 2017 à 15:47

Ce document est la propriété exclusive de Chafiq HANAOUI (chafiq.512@gmail.com) - 24 avril 2017 à 15:47

Un barreau aimanté suspendu en son centre de gravité prend en chaque point de la surface terrestre une position qui caractérise le champ magnétique terrestre (figure 2.22).

À un instant et en un lieu donnés, le barreau forme avec le plan horizontal un angle $\hat{i}$ appelé inclinaison, variable selon la latitude, supprimé en topographie par l'équilibrage du barreau. *La déclinaison magnétique* $\hat{d}$ est le rectiligne du dièdre formé par le plan vertical contenant le barreau – ou plan méridien magnétique – avec le plan méridien géographique, autrement dit l'angle du nord magnétique et du nord géographique ; elle varie dans le temps et dans l'espace.

Les variations dans le temps sont *annuelles*, diminution de l'ordre de 0,15 gon ces dernières années, et *diurnes*, plus fortes en été qu'en hiver ; les variations dans le temps sont parfois perturbées fortement par des orages magnétiques liés à l'activité solaire.

Les variations dans l'espace sont traduites en isogones, courbes qui joignent les points d'égale déclinaison, reproduites tous les 5 ans environ sur les cartes isogoniques ; en France, les isogones sont le plus souvent orientées nord-sud, la variation moyenne étant de l'ordre de – 0,007 gon/km d'ouest en est.

Enfin, la nature du sous-sol, les lignes à haute tension, certains ouvrages métalliques, etc. perturbent localement la déclinaison.

Les instruments spécifiques de l'orientation par rapport au nord magnétique du moment et du lieu sont :

- le *déclinatoire*, aiguille ou barreau aimanté mobile dans un boîtier fixé sur un des montants de la lunette du théodolite ;
- la *boussole*, en particulier la *boussole circulaire de théodolite* qui pivote avec l'alidade ;
- le *théodolite-boussole*, équipé d'un limbe horizontal porté par un barreau aimanté qui oriente le zéro origine de la chiffraison vers le nord magnétique, les lectures représentant par conséquent les azimuts magnétiques ;
- la *jumelle électronique* (§ 3.3.5).

Du fait surtout de l'incertitude sur la valeur de la déclinaison, *l'écart-type d'un azimut magnétique est de l'ordre de 10 cgon*, ce qui explique que désormais, en topographie, l'orientation magnétique est limitée à la reconnaissance et aux levés expédiés.

2.5.3 Orientation gyroscopique

Le gyroscope de théodolite permet la mesure directe de l'azimut géographique ; fixé sur un pontet au-dessus de l'instrument, il occupe toujours la même position par rapport au plan vertical de visée de la lunette.

Sa fabrication est désormais arrêtée car il n'a guère été utilisé que dans certaines mines souterraines ou organismes militaires.

2.5.4 Orientation astronomique

Le topographe détermine l'azimut géographique d'une direction matérialisée sur le terrain, à partir de l'azimut d'un astre obtenu par des observations faites généralement sur le soleil ou l'étoile polaire, suivies de calculs « astronomiques » largement automatisés.

02Brabant.indd 78 28/09/11 11:08

L'*orientation sur le soleil passe* par la mesure de l'angle zénithal et la mesure de l'heure, suivies de la résolution du triangle de position, triangle sphérique dont les sommets sont l'astre, le pôle géographique et le zénith de la station. Les observations nécessitent que le théodolite soit équipé de prismes oculaires, ou mieux d'oculaires coudés à angle droit, avec filtres ; le prisme solaire d'objectif Roelofs facilite grandement le pointé.

Précision de l'azimut de l'ordre de 0,005 gon.

L'*orientation sur l'étoile polaire* comporte plus de difficultés d'observation mais fournit une meilleure précision qui peut atteindre 0,2 mgon, avec le matériel approprié, pour une soirée d'observation aux latitudes moyennes.

Ce document est la propriété exclusive de Chafiq HANAOUI (chafiq.512@gmail.com) - 24 avril 2017 à 15:47

www.bouquin.tk

Ce document est la propriété exclusive de Chafiq HANAOUI (chafiq.512@gmail.com) - 24 avril 2017 à 15:47

www.bouquin.tk

02Brabant.indd 80 28/09/11 11:08