

TOPOGRAPHIE GENERALE

Année Scolaire
2019/2020

Notes de cours
Ecole Supérieur de Technologie, LAAYOUNE

Ayad BOUTQLMOUNT, Ingénieur
Géomètre Topographe

I. Introduction à la topographie

1. Définitions

La topographie est la science qui permet la mesure puis la représentation sur un plan ou une carte des formes et détails visibles sur le terrain, qu'ils soient naturels (notamment le relief et l'hydrographie) ou artificiels (comme les bâtiments, les routes, etc.). Son objectif est de déterminer la position et l'altitude de n'importe quel point situé dans une zone donnée, qu'elle soit de la taille d'un continent, d'un pays, d'un champ ou d'un corps de rue.

2. Disciplines associées :

La topographie est associée à plusieurs disciplines qui la complètent, à savoir :

- **La géodésie** est la science qui étudie les formes et les dimensions de la terre, mais aussi ses propriétés physiques, gravité, champ de pesanteur, et dont les travaux aboutissent à la représentation plane de vastes étendues.
- **La télédétection** spatiale est la mesure ou l'acquisition d'informations sur un objet ou un phénomène, par l'intermédiaire d'un instrument de mesure n'ayant pas de contact avec l'objet étudié. C'est l'utilisation à distance de n'importe quel type d'instrument (par exemple, d'un avion, d'un engin spatial, d'un satellite ou encore d'un bateau) permettant l'acquisition d'informations sur l'environnement.
- **La photogrammétrie** qui est l'art permettant de déterminer et de représenter des objets à partir d'images numériques ou argentiques. On parle de photogrammétrie aérienne ou terrestre.
- **La lasergrammétrie**, ou le relevé par laser-scanner 3D, permet l'acquisition sans contact d'objet de grandes scènes complexes en trois dimensions. Les résultats sont de véritables représentations numériques des objets et scènes scannées par le levé de plusieurs millions de points tridimensionnels par seconde. Leurs utilisations permettent un gain de précision dans les mesures tout en offrant dans les plus brefs délais de nouvelles perspectives de résultats et de valorisation.
- **La bathymétrie** consiste à déterminer la forme des fonds aquatiques : étude des rivières, des rivages pour des projets d'installations portuaires. Le géomètre-topographe est rarement amené à utiliser un sondeur bathymétrique, mais peut en exploiter les résultats couplés, par exemple, à des coordonnées GPS ou à un nuage (scan) de points 3D. La bathymétrie est plutôt du ressort des hydrographes.
- **La cartographie** désigne la réalisation et l'étude des cartes géographiques et géologiques. Elle est très dépendante de la géodésie. Le principe majeur de la cartographie est la représentation de données sur un support réduit représentant un espace généralement tenu pour réel. L'objectif de la carte, c'est une représentation concise et efficace, la simplification de phénomènes complexes (politiques, économiques, sociaux, etc.) à l'œuvre sur l'espace représenté afin de permettre une compréhension rapide et pertinente.

Les étapes de réalisation d'une carte :

1- Définition du projet cartographique.

2- La collecte des informations qui consiste à: *Relever des contours et de l'espace support à représenter (fond de carte) ;

*Relever des données statistiques à représenter sur cet espace.

3- sélection des informations et de conception graphique (icônes, styles),

4- Assemblage (création de la carte) et renseignement de la carte (légende, échelle, rose des vents).

- **La carte topographique**, par opposition à la carte thématique, est une représentation exhaustive et fidèle d'une partie de la surface terrestre à une date donnée. La carte topographique est dite de base quand elle représente la plus grande échelle via laquelle une zone donnée est couverte. Dans le cas de la carte topographique du Maroc, on distingue trois échelles de base :

- 1/25.000 : cette échelle couvre toute la cote (de Saidia au nord jusqu'à Tiznit au sud) Ouest) en plus des zones à potentiel économique développé (Fès, Marrakech,...).

- 1/50.000 : cette échelle est établie pour les régions du moyen, haut et Anti Atlas.

- 1/100.000 : cette échelle couvre les zones sahariennes et l'oriental.

L'ANCFCC, est le producteur exclusif de la carte topographique, conformément à la loi 58-00.

Son contenu est :

- L'orographie : c'est la représentation du relief via les courbes de niveau, les points cotés ainsi que les talus.

- L'hydrographie : c'est tout ce qui concerne les cours d'eau (permanents et temporels) ainsi que les puits, sources, fontaines, chaâba...

- La végétation : désigne le couvert végétal et cultures diverses.

- La planimétrie : couvre les constructions, les réseaux (routiers, ferroviaire, électrique...), les détails remarquables...

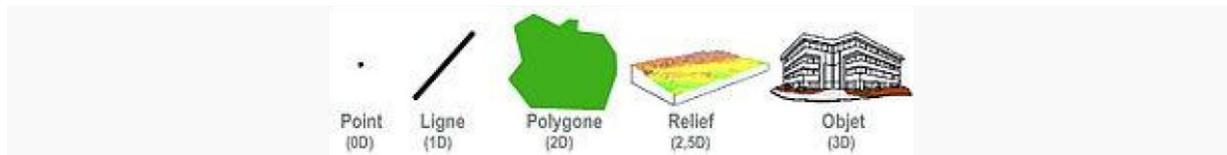
- **Un système d'information géographique (SIG)** est un système d'information conçu pour recueillir, stocker, traiter, analyser, gérer et présenter tous les types de données spatiales et géographiques. De nos jours, rares sont les cartographes "purs". En effet, la géographie et l'informatique sont couplées : cet ensemble forme la géomatique. Les géomaticiens sont des professionnels capables de réaliser de la cartographie mais aussi de gérer des systèmes d'information (données, bases de données, architectures informatiques ...), spécifiquement appelés des SIG.

Un système d'information géographique est constitué de cinq composants majeurs.

Les logiciels qui assurent les fonctions suivantes :

- Acquisition : saisie des informations géographiques sous forme numérique
- Archivage : gestion de base de données
- Analyse : manipulation et interrogation des données géographiques
- Affichage : mise en forme et visualisation
- Abstraction : représentation du monde réel
- Anticipation : la prospective

Les données



Les données géographiques sont importées à partir de fichiers ou saisies par un opérateur. Une donnée est dite « géographique » lorsqu'elle fait référence à un (ou plusieurs) objet(s) localisé(s) à la surface de la terre. Ses coordonnées sont définies par un système géodésique (ou système de référence spatiale).

Les matériels informatiques

Le traitement des données se fait à l'aide des logiciels sur un ordinateur de bureau ou sur un ordinateur directement sur le terrain. L'ordinateur de terrain avec GPS et laser télémètre permet la cartographie et la collecte des données. La construction de la carte en temps réel et la visualisation de la carte sur le terrain augmente la productivité et la qualité du résultat. La tendance depuis les années 2000 est orientée vers une cartographie précise et interactive, où l'analyse des données se font de plus en plus in situ, sur le terrain, de même que la validation. Des systèmes client-serveur en intranet, extranet voire via Internet facilitent ensuite, et de plus en plus, la diffusion des résultats. **Les savoir-faire**

Un système d'information géographique fait appel à une connaissance technique et à divers savoir-faire, et donc divers métiers, qui peuvent être effectués par une ou plusieurs personnes. Le spécialiste doit mobiliser des compétences en géodésie (connaissance des concepts de système de référence et de système de projection), en analyse des données, des processus et de modélisation (analyse Merise, langage UML par exemple), en traitement statistique, en sémiologie graphique et cartographique, en traitement graphique. Il doit savoir traduire en requêtes informatiques les questions qu'on lui pose. **Les utilisateurs**

Comme tous les utilisateurs de systèmes d'information géographique ne sont pas forcément des spécialistes, un tel système propose une série de boîtes à outils que l'utilisateur assemble pour réaliser son projet. N'importe qui peut, un jour ou l'autre, être amené à utiliser un SIG. Le niveau de compétences requis pour la conduite des opérations les plus basiques, est généralement celui de technicien supérieur. Mais afin d'assurer une bonne qualité d'interprétation des résultats de l'analyse des données et des opérations avancées, celles-ci sont généralement confiées à un ingénieur disposant d'une bonne connaissance des données manipulées et de la nature des traitements effectués par les logiciels. Enfin, des spécialistes sont parfois amenés à intervenir sur des aspects techniques précis.

3. Métier du Topographe

a. Géomètre expert en France :

Le géomètre-expert est une personne exerçant un métier qui consiste, en résumé, à établir différentes mesures touchant les propriétés foncières.

La loi n°46-942 du 7 mai 1946, instituant l'Ordre des géomètres experts, dispose que les géomètres-experts inscrits au tableau de l'ordre sont seuls habilités à effectuer les opérations ayant pour but l'établissement de procès-verbaux, plans de bornage...

Le géomètre-expert intervient dans différents domaines : le foncier, l'information géographique, l'aménagement rural, l'immobilier, le diagnostic technique, l'ingénierie et maîtrise d'œuvre ou encore l'urbanisme. Le géomètre-expert peut également jouer un rôle de conseil dans la gestion de l'immeuble.

Le géomètre-expert est seul habilité à fixer les limites des biens fonciers par une opération de délimitation appelée bornage. Bénéficiant de larges compétences juridiques et techniques et d'une connaissance certaine du terrain, il conseille de manière fiable les propriétaires actuels ou futurs sur la mitoyenneté, la division foncière et les servitudes. Il joue également un rôle capital dans la mise à jour et la conservation des données concernant la délimitation et la consistance de la propriété foncière. Le géomètre-expert en général n'est pas tout seul, il est accompagné de géomètres assistants, topographes, d'experts juridiques, de conseillers, etc.

b. Dans le monde :

La Fédération Internationale des Géomètres :

La FIG a été fondée en 1878 lors du congrès des géomètres à Paris et sur l'initiative de deux géomètres, un Belge et un Français.

La FIG est une fédération d'associations nationales et est le seul organe international qui représente toutes les disciplines liées à la topométrie. C'est une organisation non

gouvernementale reconnue par les Nations Unies et dont le but est d'assurer que ces disciplines topométriques et tous ceux qui les pratiquent satisfassent aux besoins des marchés et des communautés qu'ils servent. Elle poursuit son objectif en promouvant la pratique de la profession et en encourageant le développement du niveau professionnel.

La Fédération des Géomètres Francophones :

La Fédération des Géomètres Francophones a été créée le 24 novembre 2005 à Rabat (Maroc). L'assemblée constitutive réunissait les représentants des différentes associations francophones membres de la FIG.

c. Au Maroc :

✓ L'ORDRE NATIONAL DES INGENIEURS GEOMETRES TOPOGRAPHES (ONIGT)

L'Ordre National des Ingénieurs Géomètres Topographes (ONIGT) est une institution dotée de la personnalité morale et créée par la loi 30-93. Cette loi délègue et confère à l'ONIGT les pouvoirs pour réglementer et gérer l'exercice de la profession d'Ingénieur Géomètre Topographe (IGT) au Maroc.

C'est l'instance qui défend les intérêts moraux et matériels de ses membres et qui œuvre pour rehausser le niveau de la profession par l'organisation de sessions de formation continue, de manifestations scientifiques et professionnelles. Elle veille sur le respect des règles déontologiques de la profession et mène des actions sociales.

L'ONIGT est structuré en un Conseil National et des Conseils Régionaux. Les membres de ces conseils sont élus pour un mandat de quatre ans, et leur Président est investi par Dahir Royal.

Le dévouement des élus et des instances de l'ONIGT et leur engagement à développer et à rehausser le niveau de l'ingénierie nationale prend différentes formes et actions multiples visant à maintenir un niveau de formation adéquat pour tous les IGT et à mieux organiser l'exercice de la profession.

Actuellement, on compte plus de 1000 IGT inscrits au tableau de l'ONIGT, exerçant dans les secteurs privé et public.

✓ ACTES PROFESSIONNELS DE L'INGENIEUR GEOMETRE TOPOGRAPHE (IGT) :

Suivant le développement socio-économique du Maroc, la réglementation de l'exercice de l'ingénierie topographique, est passée d'un système d'agrément de géomètres privés à une profession organisée en Ordre.

C'est ainsi que la loi 30-93 relative à l'exercice de la profession d'ingénieur géomètre topographe et instituant l'Ordre National des Ingénieurs Géomètres Topographes a été promulguée par le Dahir n° 1-94-126 du 14 Ramadan 1414 (25 février 1994) et publiée au B.O n° 4246 du 16-3-1994. Ses décrets d'application n° 2-94-266 et 2-94-267, pour leur part, ont été publiés au B.O. n° 4292 du 1-2-1995. Cette loi définit :

- Les modes et les conditions d'exercice de la profession autant par le secteur public que par les entreprises privées et les bureaux d'études.
- Le mode d'institution de l'Ordre National des Ingénieurs Géomètres Topographes et la réglementation de la composition du Conseil National et des conseils régionaux ainsi que les conditions de leur désignation.
- Les sanctions et les mesures disciplinaires pour fautes professionnelles ou non-respect des dispositions législatives et réglementaires régissant la profession.

✓ **Les missions de l'IGT :**

L'ingénieur géomètre topographe est chargé, en son propre nom et sous sa responsabilité, de procéder à toutes études ou opérations d'établir tout plans et documents y relatifs relevant de la géodésie, la cartographie topographique, des levés cadastraux à toutes échelles et par tout procédé, de la délimitation des levés cadastraux à toutes échelles et par tout procédé, de la délimitation des biens fonciers, de l'expertise foncière, de la copropriété et des lotissements.

Le domaine d'activité de l'Ingénieur Géomètre Topographe est vaste et varié. Il intervient dans les secteurs suivant : Agriculture, Equipement, Transport, Habitat, Urbanisme, aménagement du territoire, gestion des réseaux, exploitation minière, prospection pétrolière, ...Il est l'expert par excellence dans des domaines tels que : le Cadastre, la Cartographie, la Photogrammétrie, la Géodésie, ...Il maîtrise les technologies de pointe à savoir les systèmes de positionnement par satellite, la Télédétection, les Systèmes d'Information Géographique. L'IGT de part sa formation polyvalente et sa maîtrise des techniques d'acquisition, de traitement et d'exploitation des données, il est la cheville charnière de tout projet de développement urbain ou rural.

-FONCIER :

L'ingénieur géomètre topographe joue un rôle primordial dans le domaine de l'immatriculation foncière:

Enquêtes juridiques.

Bornage et délimitation de la propriété.

Etablissement des plans cadastraux.
Mise à jour des titres fonciers. Etc.

-URBANISME :

Missions de l'IGT en matière d'urbanisme :

Délimitation des zones concernées.
Prise de vue aérienne.
Stéréo Préparation.
Restitution photogrammétrique.
Etablissement et complèment des documents. Exécution
des plans d'aménagement.

-LOTISSEMENT & MORCELLEMENT

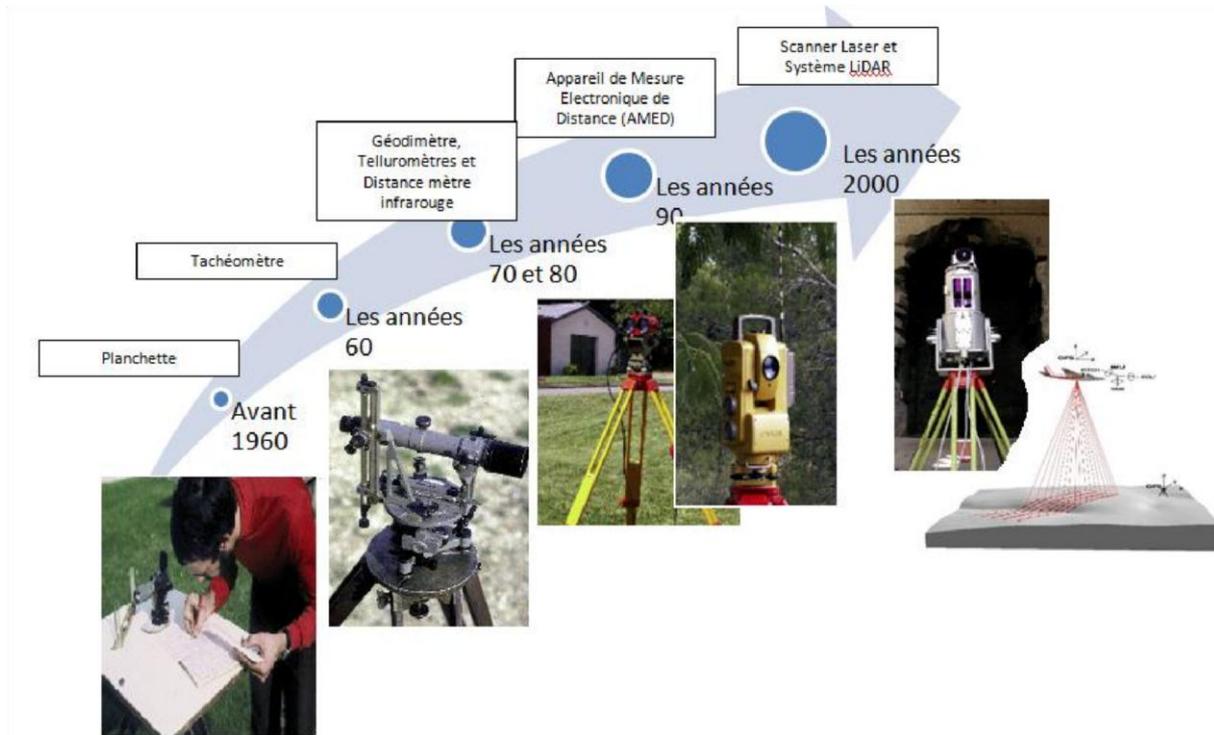
Enquête foncière.
Expertise de la valeur de la propriété.
Etude de faisabilité du projet : aspect juridique, urbanistique, économique.
Confection du plan topographique de base.
Confection du dossier d'étude V.R.D.
Plan du piquetage des réseaux.
Plan de calage du lotissement et bornage des blocs.
Dossier technique cadastral.
Assistance auprès des services de la commune, du cadastre et de la conservation foncière.

-LOGEMENT :

Etablissement du plan de conception.
Rétablissement des bornes avant construction et fourniture des côtes de palier.
Implantation des constructions.
Contrôle des limites au niveau des fondations.
Contrôle de verticalité pour les hauts immeubles.
Etablissement des plans et règlements de copropriété.
Assistance auprès des services du cadastre et de la conservation foncière.

II. Avancement technologique de la topographie

La topographie a suivi l'avancement de la technologie au fil du temps. Les appareils et les méthodes de traitement ont évolué depuis les années 1960 suivant le processus suivant:



- Durant les années 1960, le travail se faisait à la **planchette** qui était composée d'une alidade servant aux intersections et relèvements, d'un éclinètre déterminant les points en mesurant la distance et d'une règle à calcul permettant les réductions de distance à l'horizontale et le calcul des altitudes.
- L'apparition du **tachéomètre** a permis le contrôle des mesures de distance et la réduction directe à l'horizontale en ajoutant un système de barrette latérale.
- Les **géodimètres** apparus au début des années 70 utilisaient une onde lumineuse modulée dont les impulsions lumineuses sont dirigées vers une station éloignée dont on recherche la distance. Après réflexion sur un miroir installé en cette station, on les reçoit dans un récepteur placé à côté de l'émetteur. Ces impulsions lumineuses sont ensuite transformées en courant électrique et on peut alors déterminer la distance à mesurer en fonction de la longueur d'onde des impulsions.
- Du même principe que les géodimètres, les **telluromètres** utilisaient les ondes électromagnétiques et les **distance-mètres** les ondes infrarouge.
- Les appareils de mesure électronique de distance (**AMED**) ont évolué à partir de la fin des années 80 de la mesure optique des angles et électronique des distance vers une mesure électronique des angles et distance ainsi que l'enregistrement des observations sur un carnet

électronique intégré à l'appareil. A la fin des années 90, les AMED (aussi dits stations totales) robotisées était sur le marché: l'opérateur pouvait manipuler son AMED via un ordinateur portable lié par connexion radio à la station totale. Finalement en 1998, des AMED qui mesurent les distances sans réflecteur sont apparus et utilisent pour le levé un rayon laser qui est réfléchi sur la cible.

III. Généralités sur la topographie conventionnelle

1. Notions sur les systèmes de projection

Il est important de connaître dans la topographie les différents types de coordonnées utilisées, les systèmes de projection où ces coordonnées sont connues et les transformations appliquées pour passer d'un système à un autre. En effet, dans la topographie nous travaillons avec des systèmes mathématiques qui modélisent la réalité. **a. Les surfaces**

En topographie, nous distinguons 3 types de surfaces:

- **La surface topographique:** est la surface observée, celle du terrain naturel.
- **Le géoïde:** une surface physique correspondant au niveau moyen de la mer prolongé en dessous des continents.
- **L'ellipsoïde de révolution:** est une surface mathématique qui approche au mieux la surface du géoïde et qui permet de le modéliser.

L'ellipsoïde adopté au Maroc est l'ellipsoïde **Clarke1880**.

L'ellipsoïde associé au système mondial est **WGS84**.

b. Réseau géodésique:

- Un réseau géodésique est un ensemble de points construits d'une façon permanente à la surface terrestre et dont la position est connue avec grande précision.
- On distingue:
 - Le réseau planimétrique.
 - Le réseau altimétrique.
- Les étapes pour établir un réseau géodésique sont :
 - Choix de l'ellipsoïde local: au Maroc on adopte l'ellipsoïde **Clarke1880**.

- Choix de l'origine du réseau: Au Maroc le point fondamental est le point Merchich. Le point origine du réseau est le point où la surface du géoïde et la surface de l'ellipsoïde se confondent.
- Mesure de la base géodésique: qui est le vecteur entre le point origine et le premier point du réseau.
- Détermination de l'orientation d'un coté du réseau: cette détermination se fait à l'aide d'observations astronomiques.
- Extension du réseau.
- Au Maroc, les réseaux géodésiques sont divisés en 4 ordres:

Ordre	Longueur des cotés
1 er	30 à 40 Km
2eme	20 à 30 Km
3eme	10 à 20 Km
4eme	2 à 10 Km

c. Les systèmes de coordonnées:

- ✓ **Le système de coordonnées tridimensionnellesgéocentriques**

Un système de référence géocentrique est un repère (O, X, Y, Z) tel que :

- O est proche du centre des masses de la terre (au mieux à quelques dizaines de mètres près pour les systèmes réalisés par géodésie spatiale) ;
- L'axe OZ est proche de l'axe de rotation terrestre ;
- Le plan OXZ est proche du plan du méridien origine.

Les coordonnées d'un point dans ce système sont **(X, Y, Z)** appelées **coordonnées cartésiennes**.

✓ **Le système de coordonnées géographique**

Les coordonnées d'un point dans ce système sont **(λ, ρ, h)** appelées **coordonnées géographiques** et sont définies comme suit:

- **La longitude λ**: qui est l'angle horizontal entre le méridien Greenwich et le méridien du point considéré.
- **La latitude ρ**: qui est l'angle vertical entre la normale au point considéré et le plan de l'équateur.
- **La hauteur h**: distance suivant la normale entre le point considéré sur la surface topographique et sa projection sur l'ellipsoïde.

Le passage du système géographique au système géocentrique se fait selon les formules suivantes:

$$X = (N+h) \cos \varphi \cos \lambda$$

$$Y = (N+h) \cos \varphi \sin \lambda$$

$$Z = (N(1-e^2) + h) \sin \varphi$$

Où **e** (l'excentricité de l'ellipsoïde) et **N** sont calculées en fonction du demi grand axe et du demi petit axe de l'ellipsoïde comme suit:

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}$$

$$W = \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}$$

$$N = \frac{a}{W}$$

✓ **Le système de coordonnées tridimensionnelles locales**

Un système de coordonnées tridimensionnelles locales est un ellipsoïde dont le centre ne correspond pas au centre de masse de la terre et qui est adopté pour une zone donnée.

Au Maroc le système tridimensionnel local repose sur l'ellipsoïde **Clarke1880**.

$$\begin{pmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{pmatrix} + \Delta \cdot \begin{pmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & \varepsilon_Z & -\varepsilon_Y \\ -\varepsilon_Z & 0 & \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y & -\varepsilon_X & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{pmatrix}$$

Le passage d'un système de coordonnées tridimensionnelles géocentriques vers un système de coordonnées tridimensionnelles locales se fait suivant les équations de similitude 3D à 7 paramètres:

$$\mathbf{X}_i = \mathbf{X}_j + \mathbf{T} + \Delta \mathbf{X}_j + \mathbf{R} * \mathbf{X}_j$$

Tel que **T** est le vecteur de translation, **Δ** est le facteur échelle et **R** la matrice de rotation.

Exemple: la transformation des coordonnées de l'ellipsoïde WGS84 adopté pour le GPS dans le monde vers l'ellipsoïde Clarke 1880 adopté au Maroc se fait selon ce système tel que: $R=0$, $\Delta=1$ et $T=(31,146,47)$.

d. Les projections:

Une projection sert à passer des coordonnées tridimensionnelles aux coordonnées planes. Elle vise l'établissement des cartes et des plans.

Pour passer à un plan (carte), on a besoin d'abord de projeter la surface du géoïde (qui est la surface physique) sur la surface de l'ellipsoïde, et ensuite projeter celle-ci sur le plan. Et pour passer de l'ellipsoïde au plan onchoisi un système de projection donné:

- ✓ **Projection cylindrique:** l'application de la sphère sur un cylindre sécant ou tangent à la sphère. Le cylindre étant développable, on peut en faire un plan sans déformations. (exemple: Projection Mercator dite UTM)
- ✓ **Projection conique:** les méridiens ont pour image des **droites concourantes** en un point image du pôle. Les parallèles ont pour image des **cercles concentriques** autour de ce point. L'espace irrégulier des parallèles permet d'assurer la conformité de la projection. (Exemple: Projection conique conforme de Lambert adoptée au Maroc pour transformer les coordonnées (X,Y,Z) de Clarke 1880 en coordonnées sur plan (carte) (E,N,H))

Par ailleurs une projection peut avoir plusieurs caractéristiques:

- **projection équivalente** : conserve localement les surfaces ;
- **projection conforme** : conserve localement les angles, donc les formes ;
- **projection aphyllactique** : elle n'est ni conforme ni équivalente, mais peut être équidistante, c'est-à-dire conserve les distances sur les méridiens.

2. Théorie des erreurs:

✓ **Définition:**

En général, aucune mesure et aucun calcul appuyés sur les mesures ne fournissent un résultat rigoureusement exact. Les mesures sont susceptibles d'être entachées d'une inexactitude que l'on classe en fautes et erreurs. $\xi = d - D$

ξ : erreur

d : mesure

D : vraie valeur

La théorie des erreurs répond aux questions suivantes:

- Quelle valeur faut-il adopter pour la quantité des mesures?
- Quelle est la précision des mesures effectués?
- Quelle mesure à adopter?

A condition que les erreurs soient suffisamment petites pour que **leurs carrés ou leurs produits deux à deux soient négligeables** et que le nombre des mesures soit assez grand.

✓ **Types de mesures:**

On distingue deux types de mesures:

- **Mesures directes:** On appelle « mesure directe » un résultat qui est obtenu directement à partir d'un instrument de lecture.
- **Mesures indirectes:** On appelle « mesure indirecte » un résultat obtenu par un calcul.

✓ **Types d'erreurs:**

Par ailleurs les fautes et erreurs commises pendant les mesures sont de 4 types:

- **Les fautes:** sont des erreurs grossières dues à un oubli, une négligence ou une maladresse de l'opérateur.
- **Erreurs systématiques:** elles suivent les lois physiques et peuvent être corrigées par des procédures spéciales lors des mesures ou par des modèles de correction. Elles sont d'origine **instrumentale, personnelle** ou **naturelle**.
- **Erreurs accidentelles (aléatoires) :** elles restent lorsqu'on enlève les mesures grossières et on corrige les erreurs systématiques. En dépit de leur aspect anarchique, ces erreurs obéissent à des lois statistiques quand les mesures sont répétées un grand nombre de fois.

Exemples:

- Transcription d'un mauvais chiffre. **Faute**
- Pointé sur un mauvais point. **Faute**
- Erreur de centrage d'un instrument. **Erreur accidentelle**
- Erreur de lecture sur un cercle gradué. **Erreur accidentelle**
- Erreur de tension au moment du chaînage. **Erreur systématique** - Erreur due à la température au moment de la mesure. **Erreur systématique**

✓ **Etude des erreurs accidentelles:**

1. l'erreur vraie – l'erreur résiduelle :

Cas 1 : X connue et x_i mesures de X .

Donc l'erreur vraie $\xi_i = x_i - X$.

Cas 2 : X inconnue et soit X_e l'estimation de X.

Donc l'erreur résiduelle est $v_i = x_i - X_e$.

Nous remarquons que tant les erreurs accidentelles existent, une mesure n'est jamais la vraie valeur de la grandeur mesurée donc elle présente toujours une estimation par rapport à la réelle valeur. De ce fait, il est nécessaire de présenter avec chaque mesure faite sa précision qui quantifie quant à elle le degré de dispersion des valeurs mesurées par rapport à la valeur vraie.

2. Propagation des erreurs

La loi de propagation des erreurs est une formulation mathématique pour déduire la précision d'une mesure A qui est fonction des paramètres x, y et z: $A = f(x, y, z)$.

En supposant que les incertitudes sur ces paramètres: Δx , Δy et Δz sont suffisamment petites et aléatoires pour que leurs produits deux à deux et tous les termes d'ordre supérieur soient négligeables. Nous obtenons la précision sur A en dérivant la fonction f par rapport à ces trois termes x, y et z et nous obtenons:

La loi de la propagation des erreurs est exprimée sous la formule

$$\sigma_A^2 = (\delta f / \delta x)^2 \sigma_x^2 + (\delta f / \delta y)^2 \sigma_y^2 + (\delta f / \delta z)^2 \sigma_z^2$$

telles que nous connaissons les précisions σ_x , σ_y et σ_z sur ses trois paramètres.

Donner la précision sur les coordonnées d'un point inconnu exprimées comme suit:

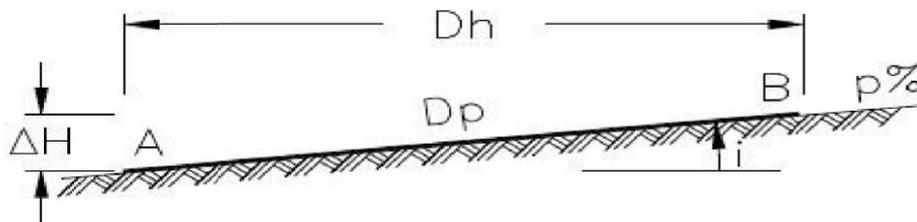
$$X_M = X_c + D * \sin(\alpha)$$

$$Y_M = Y_c + D * \cos(\alpha)$$

3. Mesures linéaires:

On distingue trois types de mesure de distances:

- ✓ **Mesure directe:** aussi appelée chaînage et qui correspond à la mesure de distance par une chaîne ou un ruban invar. Cette mesure doit prendre en compte la pente du terrain, tel que la distance mesurée soit la distance horizontale et non inclinée entre les points:



La distance est calculée par la formule:

$$Dh = Dp \cdot \cos i = Dp \cdot \sqrt{\frac{1}{1 + \tan^2 i}} = \frac{Dp}{\sqrt{1 + p^2}}$$

Ce type de mesure doit prendre en compte les erreurs systématiques suivantes:

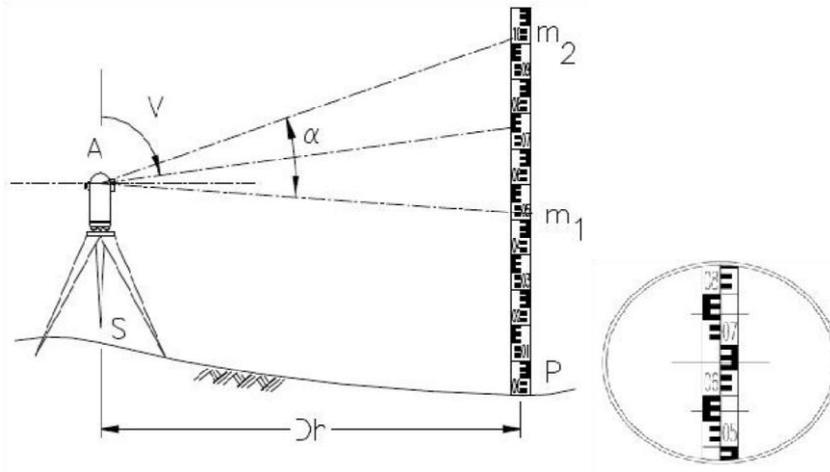
- **Erreur d'étalonnage:** est la valeur à ajouter à la mesure donnée par le ruban pour correspondre à la valeur étalon.
 - **Erreur de dilatation:** due à la variation de la température lors de la mesure.
 - **Erreur due à la pente:** C'est la correction que l'on nomme réduction à l'horizontale.
- ✓ **Mesure indirecte:** est une mesure que l'on obtient sans avoir à parcourir la longueur à mesurer. Elle se fait suivant deux méthodes:
- **La stadimétrie:**

la longueur à mesurer est interceptée sur une mire par les fils stadimétriques du réticule de visée.

Le procédé s'appelle la stadimétrie.

La mire s'appelle la stadia.

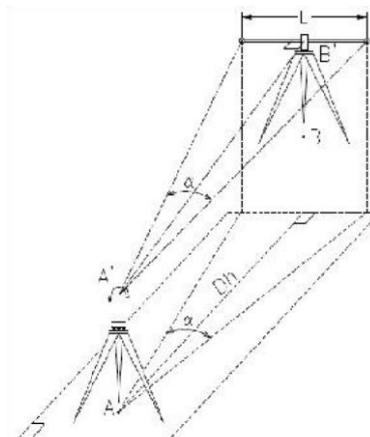
L'appareil s'appelle le stadimètre.



La distance est calculée par:

$$Dh = \frac{m_2 - m_1}{2 \tan \frac{\alpha}{2}} \sin^2 V$$

- **La parallactique:** cette méthode nécessite l'emploi d'un théodolite et d'une stadia. Une stadia est une règle comportant deux voyants (triangulaires ou circulaires) dont l'écartement est connu (généralement 2 m). Il existe des stadias Invar pour des mesures de haute précision. La stadia est dotée d'une nivelle sphérique et d'un viseur pour régler sa perpendicularité par rapport à la ligne de visée.



La distance est calculée comme suit:

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{L}{2Dh} \Rightarrow Dh = \cot \frac{\alpha}{2}$$

- ✓ **Mesure électronique:**

les **appareils électro-optiques** utilisent une onde électromagnétique modulée par une onde porteuse lumineuse de type lumière blanche, infrarouge ou laser. Ce sont les plus utilisés dans le domaine de la topométrie.

□ **Principe des AMED:**

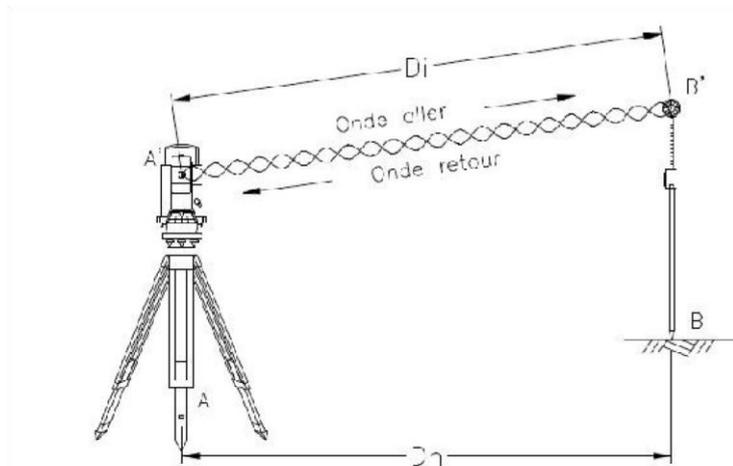
Un train d'onde est envoyé de A vers B, après réflexion sur le réflecteur sur B, son retour au point A permet de calculer la distance parcouru:

$$D = \frac{1}{2} \cdot V \Delta t$$

Avec V vitesse de la propagation de l'onde.

Δt le temps mis par l'onde pour l'aller et retour.

Pour obtenir un appareil de mesure d'une précision de 1mm tout les 100m, il faut mesurer le temps avec une précision de l'ordre de 10^{-5} . ceci est techniquement impossible à mesurer avec précision sauf avec une horloge atomique (10^{-13} s) d'où la solution de mesure de déphasage:



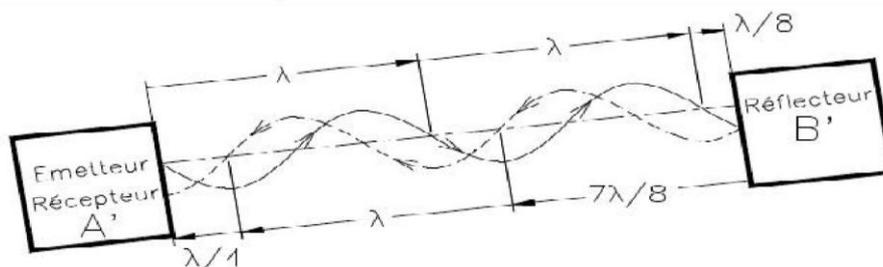
La mesure de la distance sera faite par la **mesure du déphasage de l'onde retour** par rapport à l'onde aller: $\Delta\Phi = \omega \cdot \Delta t = 2\pi f \Delta t$

La mesure de déphasage est ensuite convertie en temps:

$$\Delta t = \Delta\Phi / 2\pi f$$

$$D = \frac{1}{2} \cdot v \Delta t = c \frac{\Delta\Phi}{2\pi f} + \frac{1}{2} \cdot n\lambda$$

n: ambiguïté sur le nombre de longueur d'une onde à résoudre pour déterminer la distance



□ **Erreurs affectant la mesure par AMED:**

1. Système de mesure.

une erreur **proportionnelle** due à un défaut de fréquence de l'émetteur. Un décalage de fréquence de f entraîne une erreur D sur la distance.

Ces deux erreurs impliquent des calibrages réguliers de l'émetteur et du système de mesure de phase.

2. Densité de l'atmosphère.

Plus le milieu traversé est dense, plus l'indice de réfraction du milieu augmente et plus l'onde est ralentie.

L'indice de réfraction est fortement dépendant de la température et de la pression, mais indépendant de l'humidité pour des ondes lumineuses.

La mesure directe de la distance inclinée D_i doit donc subir une correction atmosphérique qui peut être faite de trois manières différentes.

3. Absorption de l'atmosphère.

Ce phénomène d'absorption qui tend à diminuer l'amplitude de l'onde émise, il **limite simplement la portée des visées.**

4. Dispersion du faisceau lumineux.

La tache lumineuse envoyée par ce dernier augmente donc au fur et à mesure de la distance parcourue par l'onde. Cela crée une dispersion de l'énergie puisque seule une partie de l'onde émise frappe le réflecteur et limite ainsi la portée de l'appareil. Sur de grandes portées, on utilise donc des réflecteurs à plusieurs miroirs juxtaposés.

5. Trajet de l'onde

La distance inclinée mesurée par l'appareil doit subir les corrections suivantes dues à la sphéricité terrestre, à la réfraction atmosphérique et aux réflexions parasites de l'onde.

La **réfraction atmosphérique** et la **sphéricité terrestre.**

La **réflexion des ondes sur des obstacles**

□ Précisions des AMED:

La précision sur la détermination des distance par AMED est donnée par la formule: $\sigma_D =$

$$\pm (a+b \cdot D)$$

telS que a et b sont des coefficients exprimés en millimètre donnés par le constructeur et D la distance en Km.

• Réduction des distances.

Toutes les distances mesurées par les techniques vues précédemment doivent être transformées avant d'être retranscrites sur une carte en raison des problèmes de représentation plane de l'ellipsoïde.

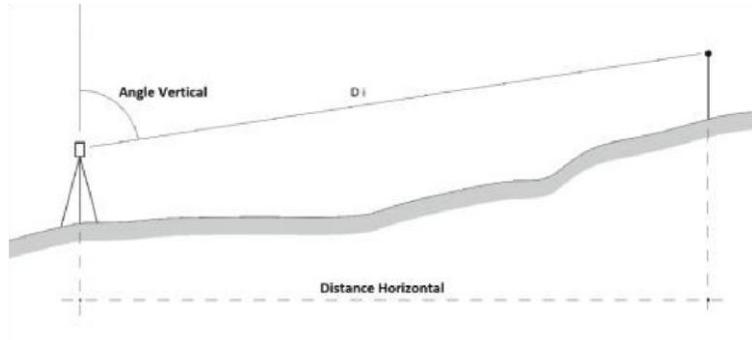
Toutes les longueurs mesurées doivent subir avant d'être introduites dans les calculs topométriques une triple correction :

- **Réduction a l'horizontale:** La correction due à la pente est donnée par la formule :

$$C = - (\Delta H)^2 / 2Dp$$

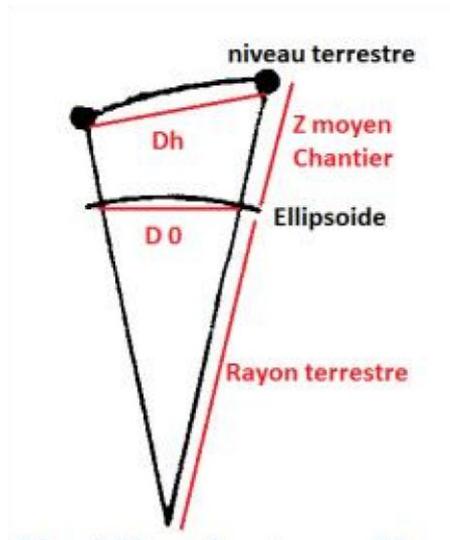
La distance horizontale est donnée par la formule :

$$D_h = D_p + C$$



- **Réduction au niveau de l'ellipsoïde:** en considérant que HA et HB sont les altitudes des points A et B par rapport auxquels on veut mesurer la distance, on a : La distance réduite à l'ellipsoïde est donnée par la formule : $D_0 = D_h \cdot [1 - (H_m/R)]$

Tel que D_h : La distance à l'horizontal, R : rayon terrestre et H_m : altitude moyen du terrain.



- **Réduction au plan de projection:** C'est une quantité algébrique que l'on ajoute à D_0 pour obtenir la distance définitive D_r . Elle dépend du système de projection utilisé (projection conique conforme Lambert Maroc). Le facteur échelle est défini en un point comme suit :

$K = ds'/ds$ où ds' l'élément linéaire sur le plan et ds l'élément linéaire sur l'ellipsoïde.

La distance réduite au plan de projection est donnée par la formule : $D_r = D_0 * (1-K)$ D_r distance réduite au plan de projection D_0 distance réduite à l'ellipsoïde.

Application:

Soit une distance inclinée de 147 m observée sur un chantier d'une altitude moyenne de 40 m et de pente moyenne de 2 %. La zone de levé est caractérisée par une projection ayant comme facteur échelle 36 cm/km

- Calculer la distance quand elle sera reportée sur un plan de projection?
 - Même Calcul pour une distance de 1Km.
 - Remarques?

4. Mesures angulaires:

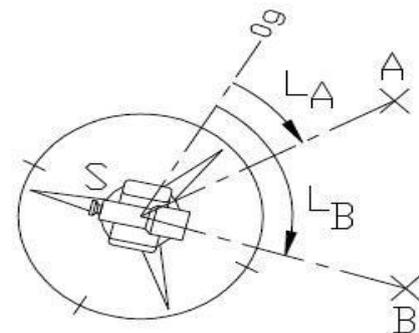
La mesure angulaire concerne la mesure des angles horizontaux et verticaux:

a. Mesure d'angle horizontal

L'angle horizontal est un angle plan mesuré à l'aide d'un théodolite et compté positivement dans le sens horaire. Angle horizontale AB

est: $AH(AB) = LA - LB$

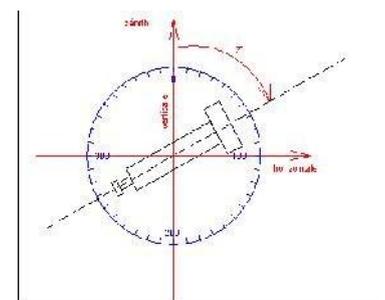
LA : lecture effectuée en visant A **LB : lecture effectuée en visant B** Schéma :



b. Mesure d'angle vertical:

C'est un angle mesuré dans un plan vertical entre la verticale en un point A et la ligne de visée vers un point B.

L'origine de cet angle est le zénith, on parle dans ce cas d'angle zénithal ou distance zénithale.



- **c. Système d'unités**
On peut exprimer les angles mesurés selon trois systèmes:

- f.
 - Le système sexagésimal (degré)
 - Le système centésimal (grades)
 - Le radian

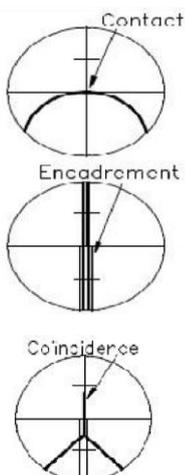
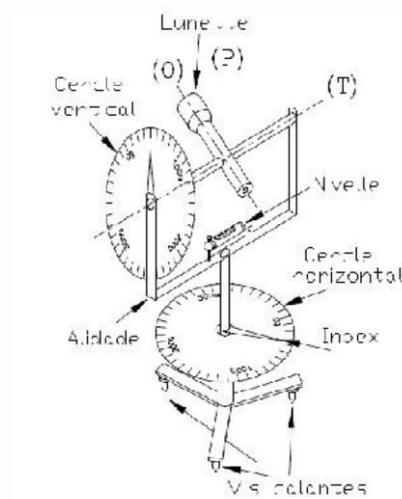
Et on a la relation entre les trois systèmes: $1^\circ = 100 \text{ grades} = \frac{\pi}{180} \text{ radians}$

d. Appareil de mesure des angles

Selon la nature de l'angle, On distingue plusieurs catégories dont :

- Un cercle permet la mesure d'angles horizontaux uniquement.
- Le clinomètre permet la mesure directe de pentes avec une précision de 0,5 %.
- Les théodolites permettent la mesure des angles horizontaux et verticaux.
- Le tachéomètre est un théodolite couplé à un système de mesure de distances (du grec tachéo, qui signifie rapide). On distingue :
 - le tachéomètre à diagramme est un ancien modèle mécanique à utiliser avec des mires spéciales. La précision espérée sur une mesure de distance est de l'ordre de $\pm 14 \text{ cm}$ pour une distance de 50 m
 - le tachéomètre électronique est un théodolite couplé à un AMED.

e. Principe de fonctionnement d'un théodolite



Un appareil de mesure d'angles comporte:

- **Trois axes concourants:** l'axe de visée qui est l'axe de la lunette, l'axe des tourillons qui est l'axe perpendiculaire au cercle vertical et l'axe vertical de l'appareil qui est perpendiculaire au cercle horizontal.

- **Deux cercles gradués:** qui donne les valeurs d'angles mesurés.

Un dispositif de centrage et de mise à la verticale: qui est un ensemble de vis calantes pour caler l'appareil avant de commencer à lever.

Principe de mesure:

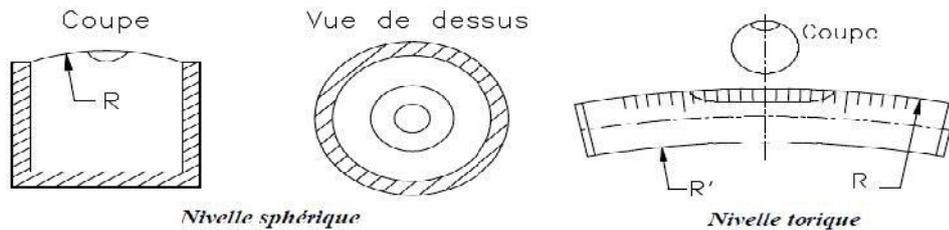
Avant d'effectuer une mesure sur un appareil topographique de mesure d'angle (et de distance), il est nécessaire de passer par:

- **Mise en station:**
 - ✓ **Centrage** : faire passer l'axe principale (vertical) par le point de la station.
 - ✓ **Calage** : amener les nivelles dans la position d'équilibre pour l'horizontalité et la verticalité de l'instrument.

Une nivelle est un petit récipient de cristal appelé aussi fiole. Elle est remplie d'un mélange d'alcool et d'éther dans lequel subsiste une bulle de vapeur.

la nivelle sphérique soit une nivelle d'approche dont le calage est multidirectionnel

La nivelle torique, est unidirectionnelle, sert au calage fin.



- **Réglage de la lunette:**
 - ✓ **Mise au point sur réticule** : ce réglage dépend de la vue de chaque opérateur, en agissant sur l'oculaire, on doit obtenir des traits de la réticule très nets.
 - ✓ **Mise au point sur l'objet** : rendre l'image très nette en éliminant la parallaxe.
- **le Pointé de la cible**

Le pointé ordinaire ou par contact.

Le pointé par encadrement : l'objet pointé est encadré par deux fils parallèles du réticule.

Le pointé par coïncidence : le fil vertical du réticule tend à se confondre avec l'objet pointé.

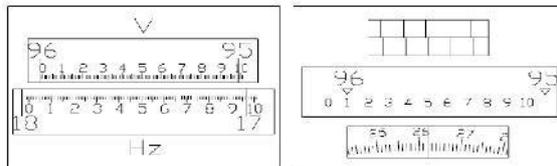
La précision de pointé dépend de beaucoup de facteurs externes:

L'éclairage du point, forme de l'objet, conditions atmosphériques, l'éloignement de l'objet, grossissement de la lunette...

- **Lecture angulaire**

La lecture angulaire sur les appareils optico-mécaniques se lisait sur des graduations. Pour les appareils électroniques, les lectures sont affichées

directement sur l'écran.



g. Calcul de l'erreur sur l'angle horizontal α : $\alpha = LA - LB$

Après propagation des erreurs:

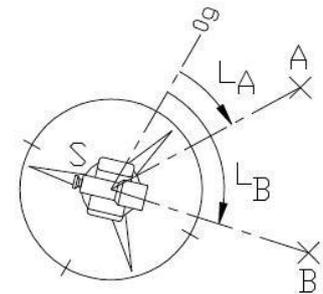
$$\sigma\alpha^2 = \sigma LA^2 + \sigma LB^2$$

$$\text{Donc } \sigma\alpha = \sqrt{2} \cdot \sigma D$$

Avec erreur de la mesure angulaire : $\sigma D^2 = \sigma L^2 + \sigma p^2$.

σp : Erreur de pointage

σL : Erreur de lecture



Exemple :

Théodolite T2 avec une précision de lecture de $\sigma L = \pm 0,25 \text{ mgon}$

Théodolite T16 avec une précision de lecture de $\sigma L = \pm 1 \text{ mgon}$

En général $\sigma p = \pm 1 \text{ mgon}$.

Quelle est la l'erreur sur les angles mesurés avec les deux théodolites?

Application:

Soit un point visé 3 fois successives dont on mesure l'angle horizontal et la distance. La valeur des lectures est donnée en grade.

On considère que l'appareil de mesure a une précision angulaire sur une lecture de : $\sigma L = 0.0001$ grade

On considère que l'AMED de mesure a une précision sur la distance de : $\sigma D = \pm(3 \text{ mm} + 5 \text{ ppm} \cdot D)$ mm

Compléter le tableau suivant:

Station connue	Lecture sur référence	Lecture sur point visé	Angle horizontal	Précision sur l'angle horizontal	Distance au point visé	Précision sur la distance
S1	0.0003					
		142.2003			20.369	
	0.0002					
		142.2002			20.367	
	0.0003					
		142.2004			20.368	

h. Calcul d'erreur sur l'angle vertical :

L(C.G) : lecture cercle gauche.

Z : Distance zénithale Vraie.

Zo : défaut de non coïncidence du zéro du cercle vertical avec le zénith.

En position C.G : **Z= LCG – Zo**

En position C.D : **Z= Zo + 400 -LCD**

La lecture zénithale réduite (corrigée):

$$Z_o = (LCD + LCG - 400)/2.$$

Et donc sur chaque point il suffit de mesurer sur un seul cercle pour avoir $Z_c = LCG - Z_o$

Ou $Z_c = Z_o - LCD + 400$