

# Topométrie : Mesure des distances



# Table des matières

<b>Chapitre I. Définitions.....</b>	<b>5</b>
1. Un peu d'histoire.....	5
2. Objectifs.....	6
3. Relations entre types de distances.....	7
<b>Chapitre II. Mesures directes.....</b>	<b>11</b>
1. Chaînes, rubans, fils.....	11
2. Les erreurs systématique de chaînage.....	13
<b>Chapitre III. Mesures indirectes.....</b>	<b>17</b>
1. Angle stadimétrique.....	17
2. Angle constant.....	18
3. Mesures indirectes.....	18
<b>Chapitre IV. Appareils Electroniques de Mesures de Distances (EDM).....</b>	<b>21</b>
1. Principes.....	21
2. Ondes Utilisées.....	24
3. Influence du milieu.....	26
4. Modèle d'erreur d'un EDM.....	28
<b>Bibliographie.....</b>	<b>33</b>



# Définitions

## 1. Un peu d'histoire

Jusqu'au XVIIIème siècle l'unité de longueur était le pied et la toise ; le pied valait environ 0,31 m et la toise mesurait 6 pieds (1,9 m).

A la fin du XVIIIème siècle, suite aux observations géodésiques, l'académie des sciences proposait un étalon qui ait une réalité physique et soit basé sur la largeur de la circonférence terrestre : le mètre est alors défini comme l'équivalent de la dix millionième partie du quart du méridien terrestre. Les travaux de mesure de l'arc de méridien DUNKERQUE - BARCELONE donnent au mètre la valeur de 0,513074 toise, et l'étalon est matérialisé par le règle en platine du pavillon de Breteuil à Sèvres.

En 1875 le système métrique est adopté par 17 pays.

En 1960, la conférence des poids et mesures propose pour mètre une définition basée sur la longueur d'onde de radiations d'atomes du KRYPTON 86.

Actuellement la définition du mètre est basée sur la vitesse de la lumière dans le vide ( $c = 299\,792\,458$  m/s)

En pratique au niveau des laboratoires (CERN - Ministère de l'industrie - Bureau des poids et mesures) l'étalon est fourni par un interféromètre à laser basé sur le principe des franges d'interférence de Young de précision inférieure à  $10\ \mu$  (0,01 mm).

## 2. Objectifs



### Explication

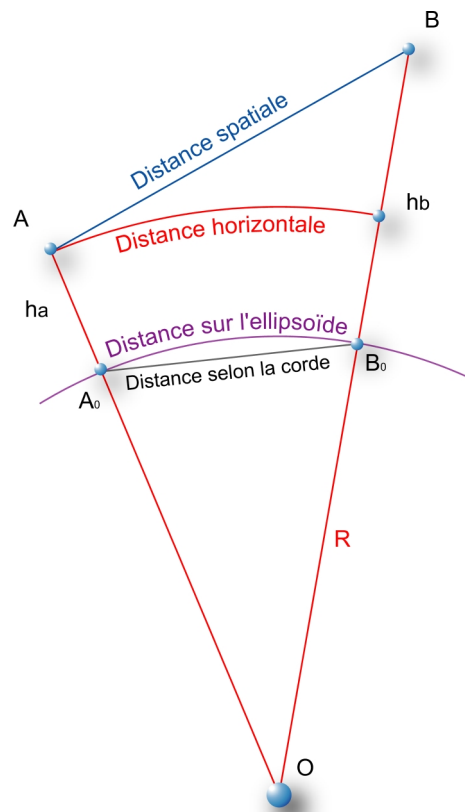
Les appareils de mesures de distances permettent d'obtenir la distance selon la pente (distance spatiale) entre l'instrument et le point de mesure (réflecteur, prisme...). L'utilisateur souhaite généralement travailler dans un système utilisant une représentation plane de la Terre, image d'un ellipsoïde de référence, il faut donc déduire des mesures effectuées la distance réduite à la projection utilisée.

Le passage d'une distance spatiale à une distance réduite en représentation se décompose généralement comme suit :

- ◆ Mesures
  - Distance spatiale ( $D_p$ )
  - Angle Zénithale ( $Z$ )
  - ou dénivelée ( $\Delta H$ )
- ◆ Calcul de la distance horizontale
  - Correction de courbure terrestre
  - Correction de réfraction
- ◆ Calcul de la distance sur l'ellipsoïde
  - Correction d'altitude
- ◆ Calcul de la distance en représentation
  - Correction d'altération linéaire



## Exemple



▲ SCH. 1

Notations :

- ◆  $D_p$  : distance spatiale (celle mesurée par un EDM.)
- ◆  $D_e$  : distance réduite à l'ellipsoïde.
- ◆  $D_c$  : distance selon la corde.
- ◆  $D_h$  : distance « horizontale ».
- ◆  $h_a, h_b$  : hauteur de A et B au dessus de l'ellipsoïde de référence.
- ◆  $R$  : rayon de courbure de l'ellipsoïde de référence dans la direction AB (rayon du cercle osculateur)

## 3. Relations entre types de distances

### 3.1. Relation rigoureuse $D_p$ - $D_c$

Si  $\alpha$  est l'angle entre les vecteurs  $OA$  et  $OB$ , on a (Al Kashi) :

$$D_p^2 = (R + h_A)^2 + (R + h_B)^2 - 2\cos \alpha (R + h_A)(R + h_B)$$

En appliquant le même raisonnement au triangle  $(A_0, O, B_0)$ , on obtient une relation entre  $D_c$  et  $D_p$ :

$$D_c = D_p \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{h_A - h_B}{D_p}\right)^2}{\left(1 + \frac{h_A}{R}\right)\left(1 + \frac{h_B}{R}\right)}}$$

On ne connaît en général que  $h_A$  et  $h_B$  altitudes orthométriques déterminées par rapport au Géoïde. La différence  $N = h - H$  n'excède pas en France quelques mètres et son influence est négligeable en topométrie courante.

Il y aurait lieu d'y songer lorsque l'on utilise d'autres systèmes (RGF 93 par exemple) où  $N$  peut atteindre 50 m ou si l'on mesure de grandes distances.



### Choix du rayon de courbure $R$ :

Suivant la précision requise en France on prendra  $R = 6.372$  km. Si l'on connaît  $j$  (même approchée), on utilisera des rayons de courbures issue de l'étude de la géométrie de l'ellipsoïde

- ◆ Rayon de courbure totale  $R = \sqrt{N\rho}$
- ◆ Rayon de courbure moyenne  $\frac{1}{R} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{\rho} + \frac{1}{N}\right)$
- ◆ Ou encore la valeur de  $R$  calculée en fonction de l'azimut (Formule d'Euler)

$$\frac{\sin^2 Az}{N} + \frac{\cos^2 Az}{\rho} = \frac{1}{R_n}$$

- ◆ avec  $N = \frac{a}{w}$ ,  $\rho = \frac{a(1 - e^2)}{w^3}$  et  $w = \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}$

### 3.2. Relation $D_e$ - $D_c$

$$\begin{cases} \alpha = \frac{D_e}{R} \\ \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{D_c}{2R} \end{cases} \Rightarrow D_e = 2R \arcsin\left(\frac{D_c}{2R}\right)$$

ou en effectuant le développement limité de  $\arcsin\left(\frac{D_c}{2R}\right)$  ( $\alpha$  est un petit angle)

$$D_e = D_c \cdot \left(1 + \frac{D_c^2}{24R^2} + \frac{3}{640} \cdot \frac{D_c^4}{R^4} + \dots\right) \approx D_c \cdot \left(1 + \frac{D_c^2}{24R^2}\right)$$

### 3.3. Relation $D_e$ - $D_h$

En appliquant le théorème de Thalès on trouve

$$\frac{D_h}{R+h} = \frac{D_e}{R} \Rightarrow D_h = D_e \left(1 + \frac{h}{R}\right)$$



Ce qui implique que la distance horizontale entre A et B dépend de l'altitude considérée. En topométrie la distance couramment utilisée est la distance horizontale moyenne

$$Dh_{moyen} = De \left( 1 + \frac{(h_a + h_b)}{2R} \right) = De \left( 1 + \frac{(h_{moyen})}{R} \right)$$

Ceci impose de connaître l'altitude moyenne pour calculer une distance horizontale. Dans les logiciels de réductions de distance et donc de calculs de coordonnées utilisés par la plupart des tachéomètres, on trouve une formule qui est la suivante :

$$D_H = D_P \cdot \sin Z - \frac{D_P^2 \cdot \sin 2Z}{2R} \cdot \left( 1 - \frac{k}{2} \right)$$

(Le coefficient k est le rapport entre la courbure terrestre et la courbure des rayons lumineux) En réalité cette valeur de DH correspond à la distance horizontale correspondant au point A. Cette formule fait intervenir la distance zénithale Z observée au moment de la mesure et tient compte d'une correction dite niveau apparent qui correspond à la courbure du rayon lumineux et de la sphéricité de la terre.

### 3.4. Relation De-Dprojection

#### Rappel

Toutes les représentations planes de l'ellipsoïde altèrent les distances ellipsoïdales dans un rapport dénommé module linéaire.

Cette altération dépend :

- ◆ Du lieu ( $\alpha, \varphi$ )
- ◆ Des formules et caractéristiques de la projection

#### Exemple

En France la projection conique conforme de Lambert de l'ellipsoïde Clarke 1880 IGN admet pour module linéaire la quantité :

$$\mu = \frac{nR_\phi}{N_\phi \cos \phi} = \frac{\sin \phi_0 R_\phi}{N_\phi \cos \phi} \approx k_0 \left( 1 + \frac{(R - R_0)^2}{2N_{\phi_0} \rho_{\phi_0} k_0} \right) \approx k_0 \left( 1 + \frac{(Y - Y_0)^2}{2R^2} \right)$$



# Mesures directes

## 1. Chaînes, rubans, fils

La mesure directe des distances s'effectue au moyen de chaînes, rubans, fils plus ou moins précis suivant la qualité des matériaux qui les composent. Suivant la précision recherchée il faudra tenir compte de diverses corrections.

### 1.1. Rubans en toile

Ils sont fabriqués en tissu de fibre de verre enrobé de matière plastique polyester ; ils sont imputrescibles et résistants et peu extensibles. La tension d'utilisation est de 2 kg environ. Ils sont dits de « précision courante » de 5 mm pour 10 m. Ils sont contrôlés par le fabricant, mais ne possèdent en général pas de certificat d'étalonnage.

### 1.2. Rubans en acier

Il existe une grande variété de rubans acier qui peuvent se distinguer :

- ◆ par la longueur 10, 20, 50, 100 m et parfois plus tel les rubans des puits de mine utilisée en mode suspendu.
- ◆ par l'intervalle des graduations (millimétrique – centimétrique ou décimétrique) et le type de la graduation (trous, rivets, impression gravée ou chimique ...)
- ◆ par la nature du métal :
  - acier inoxydable, acier au chrome, au carbone etc....on les utilise en général à plat sous tension de 5 à 10 kg assurée par un dynamomètre.
- ◆ Par leur précision :
  - Fine : pour les rubans métalliques ; elle est de 1,5 mm pour 10 m pour laquelle l'utilisateur peut demander un certificat d'étalonnage.
  - Spéciale : rubans acier - carbone ; elle est de 0,75 mm pour 10 m : ces rubans sont livrés avec un certificat d'Etalonnage.

### 1.3. Rubans (ou fils) Invar



#### Rappel

L'Invar est un alliage de 64 % de fer, 36 % de nickel (environ) auquel sont ajoutés du chrome pour la dureté et du manganèse (étirage) et du carbone. Le coefficient de dilatation est pratiquement nul et parfois négatif. Leur fabrication est délicate ; après coulage et tréfilage, les fils sont refroidis de 100 à 20°C durant 6 mois, puis battus pour stabiliser l'alliage. Ils sont très fragiles, pèsent environ 500 g. On les utilise sous tension de 8 ou 10 kg connue à quelques grammes près et en mode suspendu.

Les bases géodésiques de l'IGN ont été mesurées à l'aide de fils de 24 m de diamètre 1,65 mm. Les lectures s'effectuent à 0,1 mm sur 2 réglés au moyen de loupes et simultanément. La distance mesurée est constante (24 m). De nombreuses mesures nécessitent encore l'utilisation de fil d'invar notamment en mesure de convergence dans le génie civil et en métrologie.

Les distances plus courtes sont obtenues au moyen de rubans Invar de longueur 12 m, largeur 6,5 mm, épaisseur 0,5 mm. Ces rubans sont gradués tous les 10 cm par deux traits espacés de 2 mm et ne possèdent qu'un seul réglé de lecture.

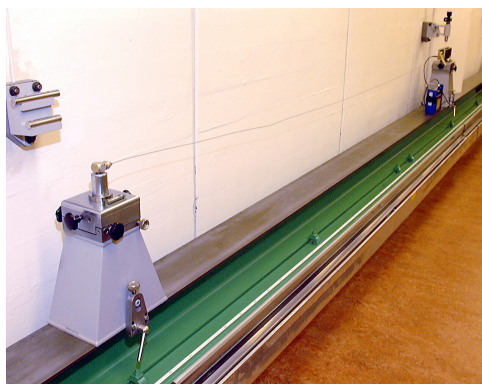
On peut obtenir avec ces rubans une précision inférieure à 0,1 mm pour 24 m.

### 1.4. Distinvar



#### Rappel

Cet appareil a été développé pour la métrologie des accélérateurs de particules qui demande des précisions très élevées de l'ordre de 0,1 mm. Le fil est identique à l'invar géodésique ; il ne mesure que des longueurs constantes de 1 à 50 m avec un débattement de 5 cm. Une extrémité est fixe et l'autre asservie à une balance qui assure une tension de 15 kg au fil pour 1,5 kg de poids tenseur sur le bras de la balance. Au moyen de la vis associée au compteur on déplace la balance jusqu'à rendre le bras horizontal (signal donné par une diode infrarouge ; la résolution du compteur est de 0,01 mm, mais l'écart type est de 0,03 mm).



▲ IMG. 1

## 2. Les erreurs systématique de chaînage

### 2.1. Etalonnage



#### Conseil

Tout appareillage fournissant une précision donnée doit être garanti par un étalonnage. Celui-ci consiste à comparer les valeurs indiquées à un étalon de mesure généralement bien plus précis (banc d'étalonnage à étalon invar, interféromètre). Les constructeurs doivent être en mesure de fournir des certificats d'étalonnage délivrés par le bureau des Instruments de mesure du Ministère de l'Industrie ou un organisme certifié.

Un étalonnage doit préciser :

- ◆ Le mode : à plat ou sous tension
- ◆ La température (en général 20°C)
- ◆ La tension d'étalonnage



#### Explication

*Correction d'étalonnage*

En général c'est la valeur à ajouter à l'observation (lecture) pour obtenir la vraie valeur. Sur les bancs se sont des microscopes qui se déplacent et mesurent les graduations rondes de la chaîne, donnant ainsi la valeur vraie de la longueur de chaîne. Il peut en être différemment (cas des distance mètres) où c'est l'appareil qui mesure l'ETALON. Il est plus prudent de se faire préciser le signe de la correction.

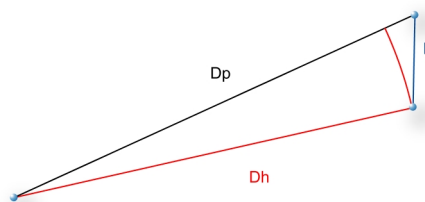
$$C_{instrument} = L_{vraie} - L_{observee}$$



#### Attention

Lorsque l'on effectue une « implantation », il faut alors tenir compte de ces corrections, mais en les appliquant à l'opposé. Un étalonnage rigoureux doit être effectué sur toutes les graduations de la chaîne (tous les mètres), car il est en fait proportionnel à la longueur. Suivant les cas, il faut apporter une correction d'horizontalité.

### 2.2. Défaut d'alignement ou d'horizontalité



▲ SCH. 2

On mesure une distance  $D_p$  dite « suivant la pente » que l'on projette à l'horizontale, «  $D_h$  », il faut donc mesurer la dénivelée ou le défaut d'alignement  $h$ .

On peut calculer par Pythagore, mais on utilise très souvent la correction

$$C = -\frac{h^2}{2D}$$

Cette correction est *négative*.

### 2.3. Correction de tension



#### Rappel

Avant sa limite de déformation permanente 30 kg/mm<sup>2</sup> et sa rupture 50 à 60 kg/mm<sup>2</sup> un ruban ou un fil prend une déformation élastique.



#### Définition

On définit la module d'élasticité  $E$  = module de Young comme étant l'allongement (en mm) pour 1000g de tension, pour 1 mm de section et 1 m de longueur.

1.  $E$  Acier = 20 000

2.  $E$  Invar = 15 000 à 16 000

$$C_{Tension(mm)} = L_{(m)} \cdot \frac{Tension_{(g)}}{Section_{(mm^2)}} \cdot \frac{1}{E}$$

En mode mesure la correction est positive. Elle peut être importante pour  $L=10m$ ,  $T=5kg$  et  $s=5mm^2$   $C_T$  vaut alors 0.5mm (elle se compense avec la correction de chaînette, mais elle est importante à PLAT)

### 2.4. Correction de dilatation



#### Définition

$$L = L_0 \cdot (1 + \alpha \Delta t) \text{ et } C_{dilatation} = L_{mesuree} \cdot (\alpha \Delta t)$$

$\alpha$  coefficient de dilatation qui vaut 1,2 à  $1,7 \cdot 10^{-5}$  pour l'acier et  $1 \cdot 10^{-6}$  pour l'INVAR.

Cette correction est très importante, par exemple une variation de 10°C par rapport à l'étalonnage d'un ruban de 10 m en acier donne une correction de :  $C_m = 10 \cdot 1,5 \cdot 10^{-5} \cdot 10 = 10^{-3} \text{ mm} = +1,5 \text{ mm}$ .

### 2.5. Correction de chaînette



#### Définition

C'est la différence entre la corde AB et la longueur AB du fil en équilibre sous son propre poids.

$$C_{Chainette(m)} = \frac{(L_{(m)})^3 a^2}{24} \text{ avec } a = \frac{p}{T} = \frac{poids/lineaire_{(g/m)}}{Tension_{(g)}}$$

En mode mesure la correction est négative (on mesure « trop long »).



### Exemple

Exemple pour  $L = 20 \text{ m}$ ,  $p = 20 \text{ g/m}$ ,  $T = 10 \text{ kg}$

$$C_{\text{Chainette}} = \frac{20^3}{24} \times \left( \frac{20}{10^4} \right)^2 = -1,3 \times 10^{-3} = -1,3 \text{ mm}$$

## 2.6. Correction de poids en mode suspendu



### Définition

On peut utiliser également des chaînages pour mesurer des différences d'altitudes. Le fil est alors en mode « suspendu » et s'allonge aussi sous l'action de son propre poids.

$$\Delta L_{(m)} = \frac{1}{E} \times \frac{p}{s} \times \frac{L_{(m)}^2}{2}$$

Avec  $p$  = poids linéaire en g/m et  $s$  = section en  $\text{mm}^2$ .



### Exemple

Pour un fil de 80m, en INVAR, tel que  $p = 20 \text{ g/m}$  et  $s = 2 \text{ mm}^2$ . On trouve

$$\Delta L_m = \frac{1}{16000} \times \frac{17}{2} \times \frac{80^2}{2} = 1,7 \times 10^{-3} = 1,7 \text{ mm}$$

Cette correction s'ajoute à la correction de tension. Elle est également positive. Pour mémoire : afin d'éviter les oscillations du fil on propose des tensions proportionnelles à la longueur de celui-ci tel que  $T_{\text{kg}} = 10 + 0,08 L_m$

## 2.7. Les erreurs de support

De telles précisions ne peuvent être obtenues que si les supports sont suffisamment conséquents pour recevoir des tractions de 10 à 20 kg.

## 2.8. Les erreurs mécaniques

Les erreurs de jeux d'axes, de non alignement des réglets peuvent être très importants lorsque la précision avoisine 0,1 mm.

## 2.9. Nature du sol

Ne pas oublier que le sol (béton par exemple) est lui aussi assujéti à la dilatation (Béton @ acier) sur de grands ouvrages d'art la dilatation (bien connue) peut être énorme et lors d'un mesurage il est préférable de préciser la température correspondant à l'époque de la mesure.

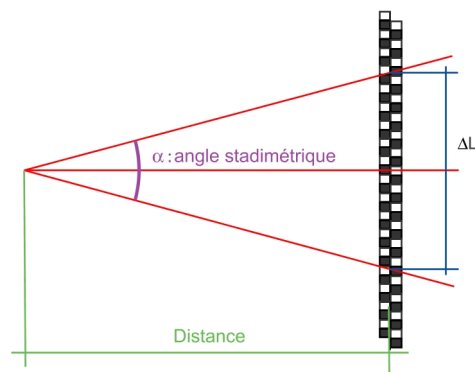
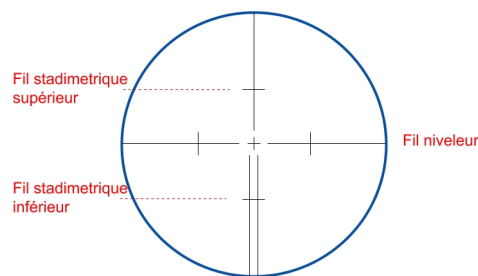




# Mesures indirectes

## 1. Angle stadimétrique

Cet angle est matérialisé par deux traits gravés sur le tableau focal (réticule). Ils peuvent aussi être horizontaux et valent en général un angle  $\alpha = 1/100$  radian et on parle alors d'angle stadimétrique « constant ».



## 2. Angle constant

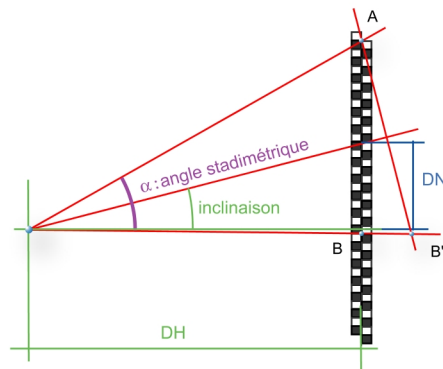


### Démarche

On effectue les lectures "stadimétriques" sur des mires « parlantes ». La mire est généralement verticale.

$$D = \frac{\Delta L}{2} \cot \frac{\alpha}{2} \text{ et si par construction } \frac{1}{2} \cot \frac{\alpha}{2} = 100 \text{ alors } D = \frac{l}{2} \cdot \frac{1}{\tan \frac{\alpha}{2}} = 100 \cdot \Delta L$$

Par exemple sur une mire de nivellement de précision on utilise les « fils stadimétriques » pour contrôler les lectures et l'égalité des portées (niveaux optiques).



▲ SCH. 5

Lorsque le voyant ou la mire est observé avec un site  $i$ , alors la « distance stadimétrique » s'exprime :

$$D_s = 100 \cdot AB' = 100 \cdot AB \cdot \cos i \text{ (avec } AB = \text{différence de lecture).}$$

$$D_s = 100 \cdot AB' = 100 \cdot \Delta L \cdot \cos^2 i \text{ et } DN = 100 \cdot \Delta L \cdot \cos i \cdot \sin i$$



### Attention

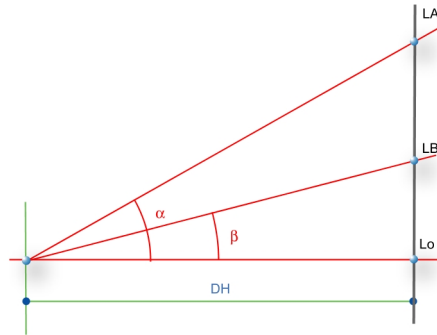
Lorsque l'on utilise des fils stadimétriques horizontaux, on mesure une distance suivant la pente.

## 3. Mesures indirectes



### Démarche

On utilise des mesures de « site  $i$  » effectuées sur mires parlantes verticales



▲ SCH. 6

$\tan \alpha = \frac{L_A}{DH}$   $\tan \beta = \frac{L_B}{DH}$  et  $L_0$  lecture fictive horizontale (non mesurée).

$$\begin{cases} L_A - L_0 = \tan \alpha \cdot Dh \\ L_B - L_0 = \tan \beta \cdot Dh \end{cases} \text{ et finalement } \frac{L_A - L_B}{\tan \alpha - \tan \beta} = Dh$$

Cette méthode peut encore «dépanner» si l'on dispose d'une bonne mire et d'un théodolite précis.



# Appareils Electroniques de Mesures de Distances (EDM)

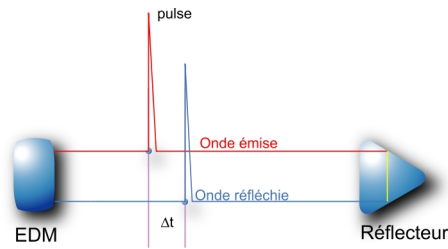
## 1. Principes

### 1.1. Principes

#### **Rappel**

Les mesures de distances électroniques datent de la 2ème guerre mondiale avec l'apparition des RADARS. Les premiers distance-mètres à usage géodésique apparaissent aux environs de 1960 (Géodimètre - Telluromètre), ils permettent de mesurer des distances de plusieurs dizaines de km quasi instantanément, alors qu'elles auraient nécessité auparavant plusieurs mois à plusieurs personnes (bases mesurées au fil invar).

### 1.2. Ondes pulsées



▲ SCH. 7 : ONDES PULSÉES



### explication

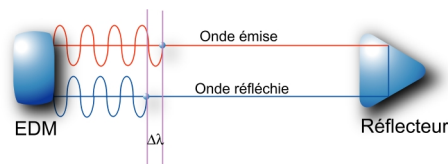
On mesure le temps de propagation aller-retour d'un train d'onde à très grosse énergie émis en très peu de temps. Cette méthode est utilisée pour les distances (terre lune-terre satellites) énormes mais également dans les dispositifs de mesures sans prisme.

L'équation d'une telle mesure s'exprime simplement :

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

Pour obtenir un appareil de mesure d'une précision de l'ordre de 1mm à 100m, il faut mesurer le temps avec une précision de l'ordre de  $10^{-5}$ s et une résolution de l'ordre de  $10^{-12}$ s.

### 1.3. Ondes entretenues

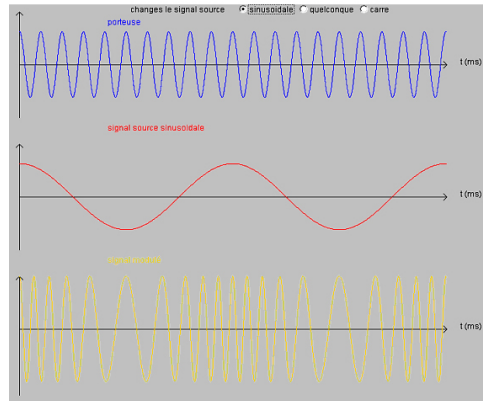


▲ SCH. 8 : ONDES ENTRETENUES



### explication

Un train d'onde est émis en permanence, il se réfléchit (ou est ré-émis pour les ondes radio) sur une surface réfléchissante, le problème consiste à mesurer un nombre entier de longueur d'onde et un appoint. On procède par mesure de phase  $\Delta \Phi$ . A de très grandes fréquences les mesures de phase sont très difficiles, on choisit de moduler l'onde porteuse qui reste très rectiligne, mais plus facile à mesurer en phase.



▲ IMG. 2



### Définition

Une onde électromagnétique peut se décrire sous la forme d'une onde sinusoidale d'équation :

$$y = a \sin \omega t \text{ avec } \omega = 2\pi f, f = \frac{c}{\lambda}, \omega t = \Phi$$

- ◆ a : amplitude (mètres)
- ◆ f : fréquence (hertz)
- ◆  $\Phi$  : phase (radians)
- ◆  $\lambda$  : longueur d'onde (mètres)

La fréquence est le nombre de fois qu'un phénomène a été ou est observable pendant une unité de temps. Un phénomène est périodique si les caractéristiques observées se reproduisent à l'identique pendant des durées égales consécutives. La période ou longueur d'onde du phénomène est la durée minimale au bout de laquelle il se reproduit avec les mêmes caractéristiques. La période est l'inverse (au sens mathématique) de la fréquence. Si l'unité de temps choisie est la seconde, la fréquence est mesurée en hertz (symbole : Hz), du nom du physicien Heinrich Hertz.



### Démarche

La mesure d'un EDM est une mesure de déphasage entre le signal émis et le signal reçu.

$$\Delta\Phi = \omega \cdot \Delta t = 2\pi f \cdot \Delta t$$

La mesure de déphasage est ensuite convertie en temps :

$$\Delta t = \frac{\Delta\Phi}{2\pi f}$$

Puis en distance :  $D = \frac{c \cdot \Delta\Phi}{4\pi f} + k \cdot \frac{\lambda}{2}$  le nombre k correspond à une ambiguïté sur le nombre de longueur d'onde à résoudre pour retrouver la distance.



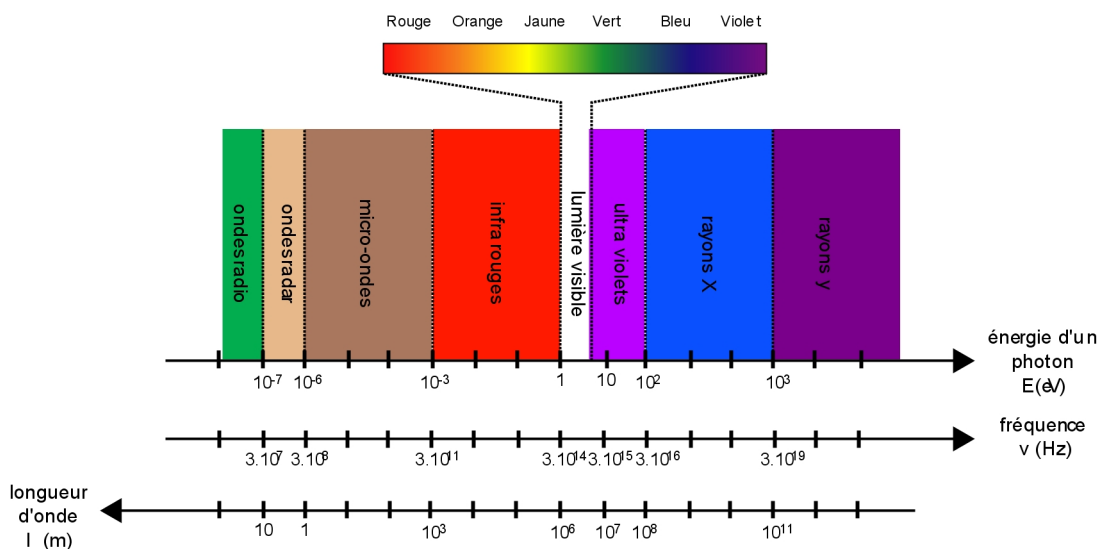
## Complément

Une méthode consiste à faire varier les fréquences de modulation, on agit par combinaisons linéaires de fréquences et par division successives par 10. On obtient un schéma de mesure comme suit :

Sur la fréquence	F = 15 KHz	on mesure	4,82 km
Sur la fréquence	F = 150 KHz	on mesure	8,29 hm
Sur la fréquence	F = 1,5 MHz	on mesure	2,93 dm
Sur la fréquence	F = 15 MHz	on mesure	9,312 m
Dont les combinaisons donnent :			D = 4829,312 m

▲ TAB. 1

## 2. Ondes Utilisées



▲ SCH. 9

### 2.1. Ondes radio

Le procédé offrait beaucoup d'avantages, mais la mesure était trop influencée par la vapeur d'eau et les réflexions parasites. Actuellement, il est abandonné.



## 2.2. Ondes lumineuses

Elles sont plus rectilignes, peu sensibles à la vapeur d'eau du milieu, elles demandent de bonnes visibilités car la lumière émise doit se réfléchir sur les *prismes ou miroirs* et revenir

### 2.2.1. Ondes infra-rouges

#### Rappel

Le rayonnement *infrarouge* (IR) est un rayonnement électromagnétique d'une longueur d'onde supérieure à celle de la lumière visible mais plus courte que celle des micro-ondes. Le nom signifie « en-deçà du rouge » (du latin *infra*: « en-deçà de »), le rouge étant la couleur de longueur d'onde la plus longue de la lumière visible. Cette longueur d'onde est comprise entre 700 nm et 1 mm

Les infrarouges sont souvent subdivisés en IR proches (0,7-5  $\mu$  m), IR moyens (5-30  $\mu$  m) et IR lointains (30-1 000  $\mu$  m). Toutefois cette classification n'est pas précise, chaque domaine d'utilisation ayant sa propre idée de la frontière entre les différents types.

Les infrarouges sont souvent associés à la chaleur car, à température normale, les objets émettent spontanément des radiations dans le domaine des infrarouges, la relation exacte étant donnée par la loi du rayonnement du corps noir ; par ailleurs, le rayonnement infrarouge met en vibration les atomes du corps qui les absorbe et donc élève sa température (transfert de chaleur par rayonnement).

La longueur d'onde utilisée couramment en topométrie est  $\lambda = 0.92\text{mm}$  (arséniure de gallium).

### 2.2.2. Ondes laser

#### Rappel

Le Laser est un dispositif qui amplifie la lumière (et plus généralement tout rayonnement électromagnétique). Une source Laser associe un amplificateur à une cavité optique généralement constituée de deux miroirs, dont un à fuite émet le faisceau. Les caractéristiques géométriques de cet ensemble imposent la géométrie du faisceau émis, toujours très directif (peu divergent) et, spatialement et temporellement, cohérent. Ainsi la lumière laser est extrêmement directionnelle. De plus le rayonnement émis est d'une grande pureté puisqu'il ne contient qu'une longueur d'onde précise imposée par le milieu amplificateur. Les longueurs d'ondes concernées étaient d'abord les micro-ondes (masers) puis elles se sont étendues aux domaines de l'infrarouge, du visible, de l'ultraviolet et on commence même à les appliquer aux rayons X.

La longueur d'onde courante utilisée en topométrie est  $\lambda = 0.63\text{mm}$  (helium-neon) ou  $\lambda = 0.55\text{mm}$  (vapeur de mercure).

On retrouve cette technologie dans de nombreuses applications de mesures de distances :



Distance-mètre



Tachéomètre



Scanner-Laser

▲ IMG. 3

### 3. Influence du milieu



#### Explication

La mesure de distance dépend de la vitesse du signal dans le milieu de propagation.

Avec  $D = \frac{c_0}{2n} \cdot \Delta t$  pour une onde pulse se par exemple

- ◆ D : distance spatiale
- ◆  $C_0$  : vitesse de la lumière dans le vide = 299792458 m/s
- ◆  $n = \frac{c_0}{c}$  indice de réfraction du milieu de propagation, c vitesse de l'onde dans le milieu. La valeur courante de n est de l'ordre de 1,000290.

On appelle co-indice de réfraction la quantité  $N = (n-1) \cdot 10^6 \approx 300$

Ce co-indice de réfraction varie avec :

- ◆ La longueur d'onde utilisée
- ◆ La température
- ◆ La pression
- ◆ L'humidité



#### Méthode

Les constructeurs imposent à n une valeur conventionnelle  $n_c$

La distance affichée est alors :

$$D_0 = \frac{c_0}{2n_c} \cdot \Delta t$$

il faut donc appliquer une correction qui s'exprime :

$$C_{meteo} = D_0(n_c - n) = D_0(N_c - N) \cdot 10^{-6}$$

$$C_{meteo}(mm) = D_0(km) \cdot (N_c - N)(ppm)$$



### Remarque

1ppm en distance correspond à 1 mm pour une distance de 1 km



### Exemple de formule de corrections météorologiques (Trimble 3605)

:

#### Correction atmosphérique

Comme la vitesse de la lumière varie légèrement lorsqu'elle traverse l'atmosphère à des pressions et des températures différentes, il faut appliquer un facteur de correction atmosphérique pour obtenir la distance correcte. Ce facteur de correction atmosphérique se calcule à l'aide de la formule suivante:

$$ppm = 274,41 - 79,39 \cdot \frac{p}{(273,15 + t)} + 11,27 \cdot \frac{p_w}{(273,15 + t)}$$

p = pression en millibars

p<sub>w</sub> = pression partielle de la vapeur d'eau en millibars

t = température de l'air sec en degrés centigrades (Celsius)

La pression partielle de la vapeur d'eau (p<sub>w</sub>) se calcule à l'aide de la formule suivante.

$$p_w = \frac{h}{100} \cdot 6,1078 \cdot e^{\left(\frac{17,269 \cdot t}{237,3 + t}\right)}$$

OU

$$p_w = 6,1078 \cdot e^{\left(\frac{17,269 \cdot t}{237,3 + t}\right)} - (0,000662 \cdot p(t - t'))$$

p = pression en millibars

p<sub>w</sub> = pression partielle de la vapeur d'eau en millibars

t = température de l'air sec en degrés centigrades (Celsius)

t' = température humide en degrés centigrades (Celsius)

h = humidité relative en %

Trimble 5600 calcule et corrige ces valeurs automatiquement. Veuillez -vous assurer que l'instrument fonctionne avec les unités correctes, MNU 65, Unités.

▲ IMG. 4



### Influence de la météo sur la distance

Modèle d'erreur :  $dN \approx -1.1dT + 0.37dP_s - 0.05dP_v$

- ◆ Une variation de température de +/- 1° entraîne une variation de distance de 1ppm
- ◆ Une variation de pression de +/-3mmHg entraîne une variation de distance de 1ppm
- ◆ Une variation de pression de vapeur saturante de +/-20mmHg entraîne une variation de distance de 1ppm

## 4. Modèle d'erreur d'un EDM

### 4.1. Erreurs aléatoires

Il faut distinguer les erreurs dues à l'instrument de celles dues à son utilisation ; ces dernières ne peuvent être éliminées et sont souvent des fautes.

- ◆ mauvais centrages
- ◆ mauvais pointés
- ◆ conditions météo hasardeuses (brume, pluie, visées rasantes)
- ◆ mauvais réglage de la fonction PPM : beaucoup d'appareils ont la possibilité d'introduire directement les valeurs de PPM ; il est donc recommandé de s'assurer que ces valeurs correspondent aux conditions météo de l'instant de la mesure.

Il est préférable de travailler systématiquement avec PPM à zéro et de calculer la correction séparément.



#### Conseil

De bonnes observations consistent à effectuer plusieurs mesures dans des conditions différentes : refaire les centrages, excentrer les prismes sur alignement, attendre des changements de météo, observer un réseau déterminé par des mesures de distances fortement surabondant.

Le modèle des erreurs aléatoires de mesures suit l'hypothèse suivante :

$$e_{\text{aléatoires}} = e_{\text{constante}} + e \cdot D$$

Les constructeurs proposent des corrections sous la forme  $\alpha + \beta D$  dans lesquelles  $\alpha$  et  $\beta$  représentent la précision due respectivement aux erreurs de phase (erreurs cyclique comprises) de et de fréquence exprimées par  $\alpha_{\text{mm}} + \beta_{\text{PPM}}$ .

On trouve par exemple :

Type	Précision	Type de lumière	Portée
TRIMBLE- série 5600 (anciens Geotronics)	2mm+2PPM	Infra-rouge/laser	200m/5km
TRIMBLE- type 3600 (anciens Zeiss)	2mm+2PPM	Infra-rouge	5km
LEICA-TCA 2003	1mm+1PPM	Infra-rouge	10-20 km
LEICA-TCR 700	2mm+2PPM	Infra-rouge/laser	100m/5km

▲ TAB. 2



TRIMBLE 5600



TRIMBLE 3600



LEICA TCA 2003



LEICA TCR 700

▲ IMG. 5

## 4.2. Etalonnage



### a) Méthode de la base inconnue :

Cette méthode ne nécessite pas de base connue, mais elle suppose que «a» est constante quelque soit la longueur de la distance. Soit trois repères A B C parfaitement alignés en site (horizontalement) et en azimut (direction) :

Si ces points ne sont pas alignés en site, il faut faire du nivellement et réduire à l'horizontale On mesure AB (lecture  $l_1$ ), BC (lecture  $l_2$ ), AC (lecture  $l_3$ )

Si «a» est la correction à apporter à  $D_{OBS}$  pour obtenir  $D_{VRAIE}$  alors

$$a = D_{vrai} - D_{obs}$$

et en écrivant que :

$$AC = AB + BC = l_3 + a = l_1 + a + l_2 + a \text{ on obtient } a = l_3 - l_1 - l_2$$



### Remarque

cette valeur peut atteindre plusieurs centimètres

## 4.3. Réflecteurs



### Prismes

L'onde lumineuse est réfléchiée par une surface taillée dans un coin de cube appelée prisme réflecteur. La précision optique et mécanique de ces coins de cube est très variable et conduit à toute une gamme de produits .



▲ IMG. 6

La mesure sera pratiquement toujours possible lorsque l'on utilise un dispositif réflecteur, à portée raisonnable (jusqu'à plusieurs km) et correctement orienté.

On distingue :

- ◆ Miroirs : Ils nécessitent une excellente orientation, et sont donc très peu utilisés.
- ◆ Catadioptrés : surface granuleuse réfléchissante (feux de voitures) - sont utilisés mais sur des distances très courtes inférieures à 100 m. On peut également avoir du ? retour ? sur de la peinture.
- ◆ Prismes : dits aussi « coin de cube ».

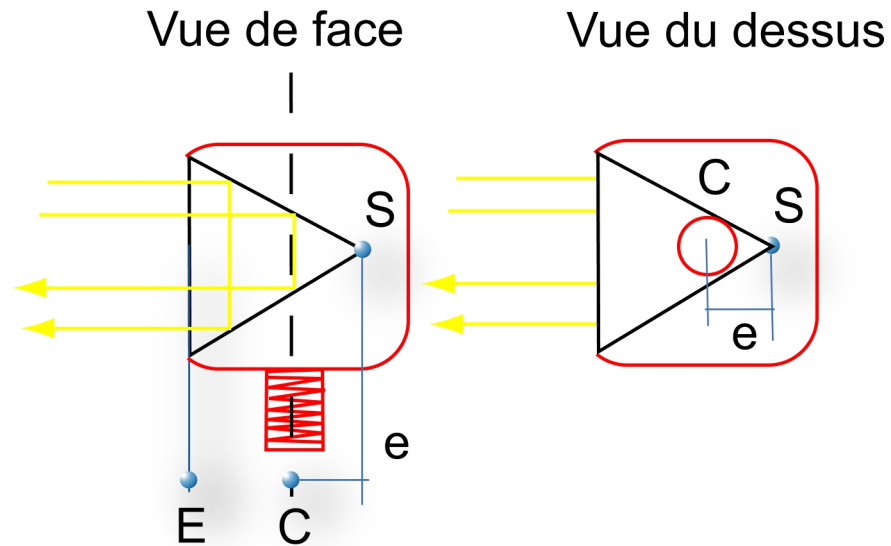
C'est le dispositif le plus courant. Composé d'une pyramide à base triangulaire et de miroirs à  $90^\circ$ . Métallisés et laqués, protégées par un verre (ce qui évite la poussière, et les condensations internes). Il faut faire attention à courte distance aux réflexions parasites possible sur la face avant non traitée.

Avantage :

- la lumière est renvoyée dans la même direction.  
le trajet optique est identique pour tous les rayons à celui qui se réfléchirait directement au sommet du coin de cube S.

Inconvénients (voir schéma ci dessous):

- l'indice  $n = 1,5$  du verre produit un ralentissement et donne un trajet plus long d'où un problème de constante de prisme associée au centrage C.  $e = nES - EC$  qui entraîne un étalonnage
- Variation de la constante en cas de désorientation.  $e_1 = nES - EA$  (plan vertical)  $e_2 = nES - Eh$  (plan horizontal)
- En cas de site (visées inclinées) il faut donc privilégier les prismes basculant.



▲ SCH. 10



### Recommandations

- ◆ Sur grandes distances ( $> 1$  km), utiliser plusieurs prismes (de 3 à ..n).
- ◆ attention à la visibilité et l'humidité : la buée peut provoquer des réflexions parasites.
- ◆ attention aux prismes de marques différentes : l'étalonnage peut varier suivant les constructeurs.
- ◆ l'étalonnage (voir méthode d'étalonnage) n'est valable que pour un couple appareil et prisme car il tient également compte de la constante interne de l'appareil. C'est une erreur constante (systématique).
- ◆ à courtes distances attention aux réflexions parasites dues à la face d'entrée du prisme.





# Bibliographie

**BRABANT M**, "Maîtriser la Topographie, des observations au plan", AFT, 542 pages pages, Groupe Eyrolles, Paris, 2003.

**DUFOUR J**, "Introduction à la Géodésie", ENSG-IGN, 334 pages pages, Hermes science Publications, Paris, 2001.

"Consulter les dossiers du mois" *in* "Géomètre", 2006.

**LEAUTHAUD J**, "Cours de topométrie générale", ENSG, Marne la Vallée, 2003.

"Consultez les articles relatifs à la Topométrie" *in* "XYZ", 2006.

"<http://www.aftopo.org>", 2006.

"<http://www.geometre-expert.fr/>", 2006.