



ÉCOLE POLYTECHNIQUE  
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

# Eléments de Géomatique

Polycopié 4 : Nivellement géométrique

Pierre-Yves Gilliéron  
Audrey Ueberschlag  
Geoffrey Vincent

Faculté de l'Environnement Naturel, Architectural et Construit  
Institut d'Ingénierie de l'Environnement  
Géomatique - Topométrie

Lausanne, édition Février 2014

# SOMMAIRE

<b><u>1. NIVELLEMENT GÉOMÉTRIQUE</u></b>	<b><u>3</u></b>
<b><u>1.1. CONCEPTS DE BASE</u></b>	<b><u>3</u></b>
1.1.1. LES NIVELLES	3
1.1.2. LES LUNETTES	8
<b><u>1.2. APPLICATION</u></b>	<b><u>14</u></b>
1.2.1. LA MÉTHODE	14
1.2.2. LES INSTRUMENTS	19
1.2.3. PRÉCISION DE LA LECTURE	21
1.2.4. CONTRÔLE ET RÉGLAGE DES NIVEAUX	22
1.2.5. CAUSES D'ERREURS DANS LE NIVELLEMENT	25
<b><u>RÉFÉRENCES</u></b>	<b><u>30</u></b>
<b><u>2. TABLE DES FIGURES</u></b>	<b><u>31</u></b>

## Avertissement

*La plupart des figures de ce polycopié ont été créées à l'EPFL. Toutefois, les auteurs ont utilisé un certain nombre de ressources dont les références sont citées. Si l'une ou l'autre de ces ressources ne sont pas référencées correctement ou font l'objet d'un droit d'usage particulier, nous vous prions de bien vouloir le signaler à l'auteur.*

*Toute utilisation de ce support de cours doit se faire avec le consentement de l'auteur.*

# 1. Nivellement géométrique

## 1.1. Concepts de base

La topométrie comprend l'ensemble des opérations de terrain et de bureau permettant d'une part la saisie d'objets naturels ou construits et d'autre part les travaux d'implantation qui consistent à placer dans le terrain des repères selon un projet (ex. emprise d'une construction). Les méthodes topométriques sont celles couramment utilisées par les géomètres avec des instruments comme les théodolites, les stations totales et les niveaux.

La topométrie est donc la boîte à outil de base du topographe. Elle comprend tout d'abord un ensemble de **méthodes** applicables sur le terrain permettant de **mesurer la position de points** (angle, distance, hauteur ou toute autre dimension) grâce à un **ensemble d'instruments**. Ensuite la position des points est déterminée par calcul ; ces **méthodes de calculs** font également partie de la topométrie.

Dans ce chapitre, ces éléments seront détaillés dans l'ordre suivant :

- instruments de base (nivelle, lunette et théodolite)
- méthodes de mesures (angle et distance)
- procédés de calculs (détaillés dans le chapitre 7).

### 1.1.1. Les nivelles

Lors des opérations topographiques, les instruments doivent nécessairement être placés à l'horizontale. Cette mise en place correcte des appareils ou éléments d'appareil se fait par un calage par rapport à la verticale ou l'horizontale. Cela est possible grâce à :

- une **nivelle** : calage manuel effectué par l'opérateur ou
- un **compensateur** : calage automatique

Une nivelle (ailleurs souvent appelée niveau à bulle) est un élément important qui fait partie intégrante de la majorité des instruments topographiques, ceux-ci pouvant même en comporter plusieurs. Il est par conséquent essentiel de bien connaître leurs propriétés, leurs caractéristiques, leurs fonctions et leurs emplois. La nivelle a été inventée à la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle par le savant français Thévenot et l'ingénieur des Ponts et Chaussées Chézy.

La partie essentielle de la nivelle est la fiole, petit récipient de verre ou de cristal, usinée selon une forme géométrique bien définie, donnant lieu à des nivelles de types différents et destinées à des applications appropriées. La fiole est remplie d'un liquide très fluide et pratiquement incongelable, généralement un mélange d'éther et d'alcool. La fiole n'est pas complètement remplie, un petit espace est laissé libre et constitue la bulle ; par ébullition du liquide, cet espace est en fait rempli de vapeur du liquide.

La fiole est elle-même montée dans un boîtier métallique, lié ou non à un instrument ou partie d'instrument.

Il existe deux types de nivelles :

- la **nivelle sphérique** ;
- la **nivelle torique**.

Cependant dans les deux cas, **en raison de la gravité, la bulle vient toujours se loger dans la partie la plus élevée de la fiole**.

Par ailleurs, il faut distinguer soigneusement les étapes de leur manipulation. Pour maîtriser les concepts, il faut comprendre les expressions suivantes :

1. **Centrer la bulle** : à l'intérieur de sa fiole
2. **Caler un élément** : par exemple rendre un axe vertical
3. **Régler la nivelle** : de sorte que l'élément soit calé lorsque la bulle est centrée.

### • **Nivelle sphérique**

Une nivelle sphérique est une fiole dont la partie supérieure est rodée en forme de calotte sphérique et contre laquelle vient se loger la bulle qui prend ainsi une forme circulaire. Sur le verre de la calotte sphérique est gravé un cercle dont le diamètre est légèrement supérieur à celui de la bulle. Ce cercle est le repère de la nivelle sphérique (Figure 6-1).

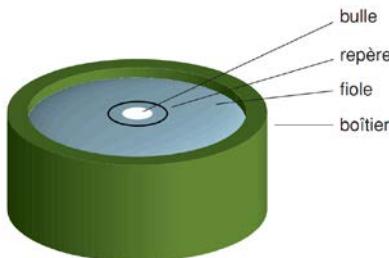


Figure 1-1 : Nivelle sphérique

On appelle plan directeur le plan tangent à la fiole au milieu du repère. **Lorsque la bulle est centrée dans le cercle repère, le plan directeur est horizontal.** La fiole doit être montée dans le boîtier ou par rapport à un élément d'appareil de telle sorte que le **plan directeur soit parallèle ou perpendiculaire à l'élément qui doit être calé** :

- parallèle à la base du boîtier s'il s'agit d'une nivelle servant à caler à l'horizontale un plan sur lequel elle peut être posée
- perpendiculaire à une arête du boîtier lorsqu'il s'agit de caler un élément à la verticale, tel une mire topographique
- perpendiculaire à l'axe d'un instrument comme l'axe principal d'un théodolite ou la canne de centrage d'un trépied

Du fait du relativement faible rayon de courbure de la calotte sphérique, généralement 7-8 m, une nivelle sphérique n'est pas très sensible et sert à des calages dont la précision n'a pas besoin d'être très grande : mise à la verticale d'une mire, d'un signal, calage approché d'un appareil.

- **Nivelle torique**

Une nivelle torique est faite d'une fiole qui est une portion de tore fermée aux deux extrémités. La bulle venant se loger dans la partie supérieure prend une forme allongée (Figure 6-2).

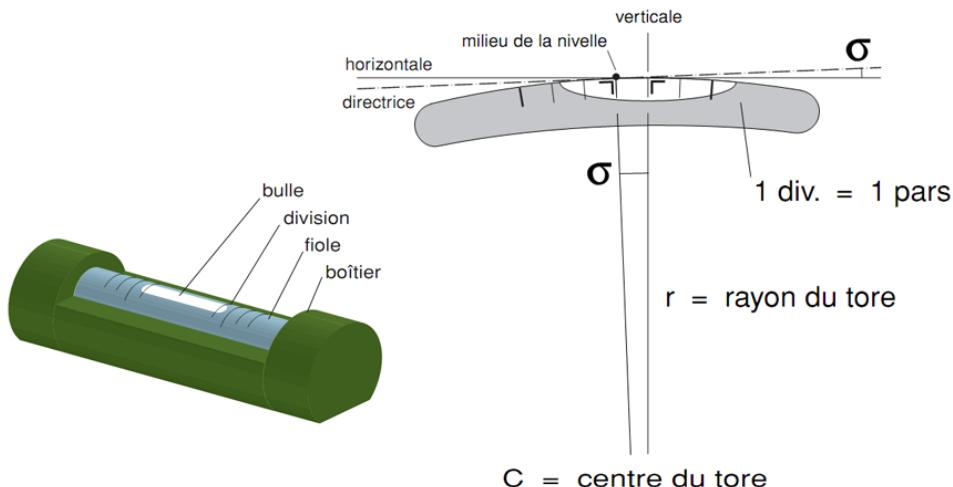


Figure 1-2 : Nivelle torique

Le boîtier a généralement une forme cylindrique et laisse apparaître la partie supérieure de la fiole ; l'on parle ainsi fréquemment aussi de nivelle cylindrique. Le cercle génératrice du tore a un diamètre d'environ 1 cm tandis que son cercle équatorial peut avoir un rayon de plusieurs dizaines de mètres. Sur la partie supérieure de la fiole est gravée une graduation qui permet le repérage de l'emplacement de la bulle (Figure 6-2).

Ce qui est déterminant est la position du milieu de la bulle ; on ne peut cependant pas lire directement cette position puisque le point milieu n'est pas matérialisé. Pour l'obtenir, on lit l'emplacement de chacune des deux extrémités de la bulle et la moyenne donne la position du milieu. Sachant cela, on peut raisonner par la suite en considérant directement le milieu de la bulle. De plus, **la tangente à la nivelle au point milieu de la bulle est toujours horizontale**.

L'intervalle de la graduation, appelé division ou pars, est normalisé :

$$1 \text{ division} = 1 \text{ div} = 1 \text{ pars} = 2 \text{ mm}$$

L'angle  $\sigma$  au centre du tore et qui intercepte une division de la graduation est la **caractéristique de la nivelle**. Si  $r$  est le rayon du tore, on a :

$$\sigma[\text{rad}] = \frac{1 \text{ div}}{r} = \frac{1 \text{ pars}}{r} = \frac{2 \text{ mm}}{r[\text{mm}]}$$

On constate aussi que la caractéristique est l'angle dont il faut incliner la nivelle pour que la bulle se déplace de 1 division

Les nivelles toriques sont plus ou moins sensibles selon le rayon du tore : plus le rayon est grand, plus la nivelle est sensible et plus sa caractéristique est petite. Cependant une caractéristique de 1" est une limite qu'il est difficile de dépasser, car si le rayon devient plus grand la bulle ne reste pratiquement plus en place.

## • Calage d'un plan

Soit un axe faisant avec l'horizontale un angle d'inclinaison  $i$ . La nivelle torique est posée sur cet axe, dans une 1<sup>ère</sup> position et le milieu de la bulle se trouve au point  $M_1$ . Le point  $A$  est sur la perpendiculaire à l'axe passant par le centre du tore. En faisant faire un demi-tour à la nivelle, 2<sup>ème</sup> position, le milieu de la bulle se trouve maintenant en un point  $M_2$  tandis que le point  $A$  est resté le même (Figure 6-3).

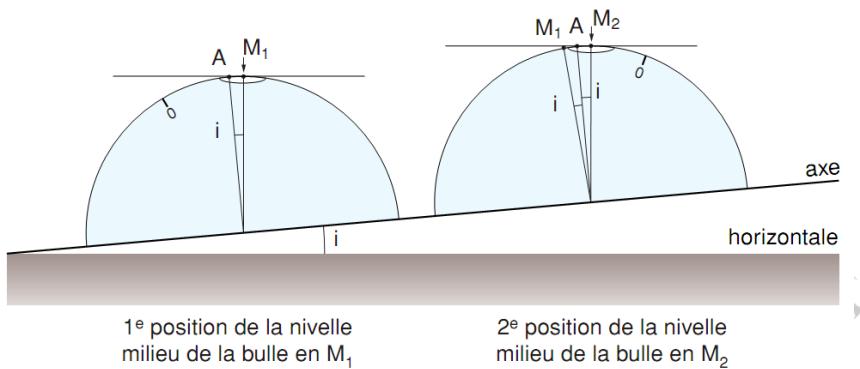


Figure 1-3 : Retournement d'une nivelle

On constate qu'après retournement de la nivelle, la bulle s'est déplacée d'un arc  $M_1M_2$  qui correspond à l'angle  $2i$  au centre du tore (par rapport au centre du cercle pour une nivelle sphérique). Ce repérage de la bulle est facilité par une graduation comportant deux repères particuliers sur la nivelle, dont l'écartement correspond à la longueur de la bulle. Ainsi, il faut retenir que :

**Par un retournement de la nivelle (demi-tour), le déplacement de la bulle sur la graduation met en évidence le double de l'angle d'inclinaison de l'axe dont elle dépend.**

En mesurant le déplacement de la bulle sur la graduation on obtient l'angle  $2i$  en nombre de divisions. Il est convertible en unité angulaire en multipliant par la caractéristique exprimée dans cette unité :

$$i^{\text{cc}} = \text{divisions.} \sigma^{\text{cc}}$$

Le point  $A$  (milieu entre  $M_1$  et  $M_2$ ) est dit **point de calage**. C'est là que se trouve le milieu de la bulle lorsque l'axe est horizontal (inclinaison  $i = 0$ ).

De plus, on appelle directrice la tangente à la nivelle au point  $A$ . Lorsque la bulle est centrée entre les repères, la directrice de la nivelle est horizontale.

S'il est possible d'agir sur l'inclinaison de l'axe, on peut alors le caler (amener à l'horizontale). La procédure de calage est la suivante :

- placer la nivelle sur l'axe et repérer l'emplacement  $M$  de la bulle (position initiale).
- retourner la nivelle d'un demi-tour (2<sup>ème</sup> position) et repérer le nouvel emplacement  $M_2$  de la bulle ou constater le déplacement de la bulle par rapport aux repères.
- agir sur l'inclinaison de l'axe pour ramener la bulle de la moitié de son déplacement  $M_1M_2$  : **Le centre de la bulle est au point de calage A et l'élément est calé. La bulle n'est donc pas forcément entre les repères lorsque l'élément est calé.**

Lorsque l'élément est calé, mais que la bulle n'est pas entre les repères, cela signifie que la nivelle présente une erreur de réglage. Ainsi, lorsque l'élément est calé, la directrice n'est pas horizontale mais elle fait avec celle-ci un angle  $\varepsilon$  qui est précisément son défaut de parallélisme ou de perpendicularité avec l'élément à caler : **c'est l'erreur de réglage  $\varepsilon$**  (Figure 6-4).

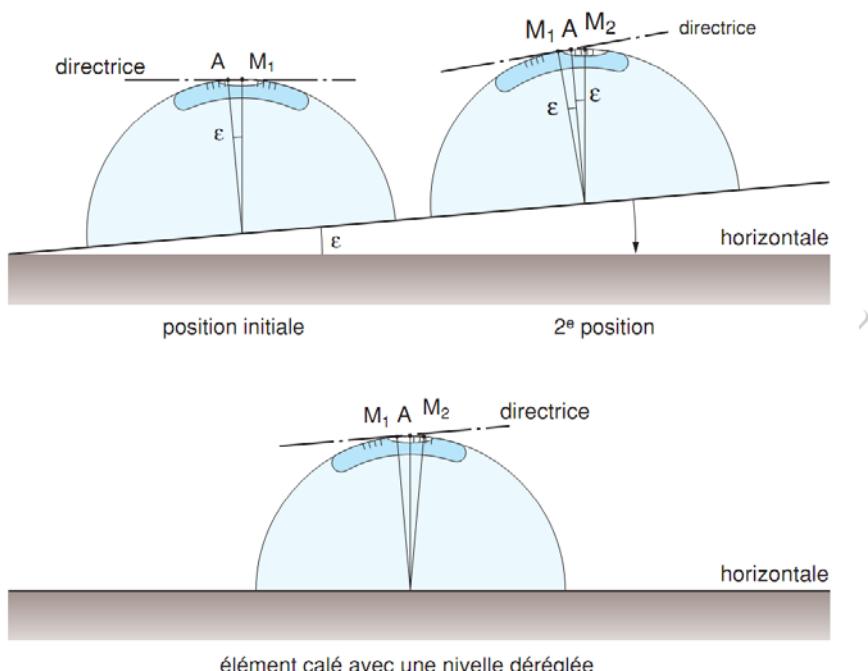


Figure 1-4 : L'erreur de réglage  $\varepsilon$

## • Contrôle et réglage des nivelles

### Nivelle torique

Une nivelle torique de calage est généralement montée sur un appareil de manière à pouvoir être réglée ; cela signifie que l'on peut modifier la position de la nivelle par rapport à l'élément à caler au moyen d'une vis de réglage (Figure 6-5).

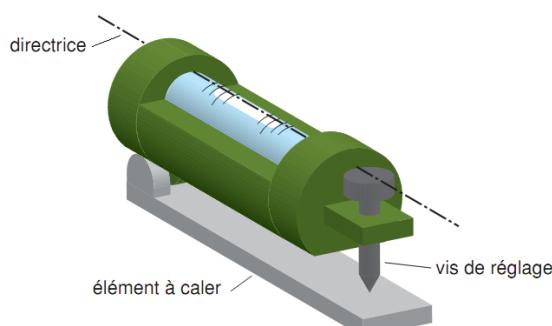


Figure 1-5 : Nivelle torique

Pour contrôler et régler une nivelle torique, il faut :

- agir sur la commande de calage et amener la bulle entre ses repères (position initiale).

- faire faire un demi-tour à la nivelle (2<sup>ème</sup> position) et constater le déplacement de la bulle.

Si le déplacement est nul, l'élément est calé et la directrice est restée horizontale ; elle est donc parallèle ou perpendiculaire à l'élément calé : **la nivelle est réglée**.

Si la bulle se déplace, agir sur le calage pour ramener la bulle de la moitié de son déplacement ; **l'élément est calé**. Mais si la bulle n'est pas entre les repères et la directrice n'est pas horizontale on met ainsi en évidence le défaut de réglage  $\varepsilon$ . Si l'on doit régler la nivelle :

- agir sur la vis de réglage de la nivelle pour ramener la bulle entre les repères.
- la directrice est horizontale, parallèle ou perpendiculaire à l'élément calé et la nivelle est réglée.

Pratiquement, cette suite d'opérations est à répéter pour vérification de la qualité du réglage. Cependant il est établi qu'un calage peut être fait avec une nivelle non réglée. C'est pourquoi, il n'est pas nécessaire que le réglage soit parfait, ce qui est d'ailleurs difficile voire impossible à réaliser avec une nivelle très sensible.

Un réglage proprement dit ne se fait que si le défaut est trop important. Partant du fait que l'on ne connaît pas a priori l'état de réglage d'une nivelle, il faut toujours procéder par retournement, constater le déplacement de la bulle et ramener celle-ci de la moitié de son déplacement s'il y a lieu. On fait du même coup le constat de l'état de réglage.

### Nivelle sphérique

La nivelle sphérique n'a pas de graduation mais un cercle repère qui définit le plan directeur ; celui-ci doit être parallèle ou perpendiculaire à l'élément à régler (condition de réglage).

En faisant faire un demi-tour à une nivelle sphérique, le déplacement de la bulle met aussi en évidence le double de l'erreur de calage ; le contrôle et réglage suit donc une procédure identique à celle établie pour une nivelle torique.

#### 1.1.2. Les lunettes

Sur les appareils topographiques, la lunette est l'élément d'observation, définissant un axe de visée et donnant une image agrandie des objets visés. Une lunette est aujourd'hui un instrument optique de haute qualité et relativement complexe (Figure 6-6). Elle fait partie intégrante des niveaux et des théodolites.

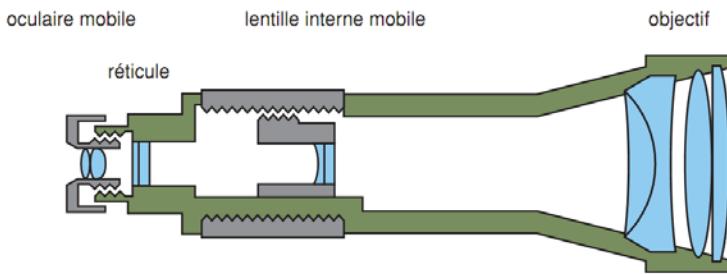


Figure 1-6 : Lunette

La lunette simple ou lunette astronomique a été inventée par *Képler* en 1611. Le réticule y fut introduit vers 1640 comme invention de l'anglais *William Gascoigne*, qui utilise d'abord des crins de cheval puis des fils d'araignée. C'est en 1778, qu'un mécanicien d'Augsburg, *G. Friedrich Brander* a décris pour la première fois une lunette avec distance fixe entre l'objectif et l'oculaire et comportant une lentille interne pour la mise au point.

Aujourd'hui l'objectif, l'oculaire et la lentille interne de mise au point sont faits chacun de plusieurs lentilles, constituant des systèmes composés qui assurent une correction quasi parfaite des aberrations. Les surfaces optiques sont traitées afin d'augmenter la clarté des lunettes et pour réaliser la suppression de reflets parasites.

En regardant à travers une lunette astronomique, on voyait une image renversée des objets visés. Cela n'était pas gênant en soi, toutefois, aujourd'hui, la plupart des lunettes des instruments modernes comportent un dispositif optique redresseur pour que l'on voie une image debout des objets visés.

Pour une utilisation correcte d'une lunette de visée, il est indispensable d'en connaître les principes optiques de fonctionnement. Il s'agit donc d'exposer ici le principe des lunettes par des schémas élémentaires, les parties optiques composées pouvant pour cela être assimilées à de simples lentilles convergentes ou divergentes.

## • Principe

La lunette astronomique, lunette classique, se compose de :

- **un objectif** : lentille convergente à relativement grande focale
- **un oculaire** : lentille convergente à relativement courte focale
- **un réticule** : traits formant un repère dans le champ de vision

D'un objet AB situé à l'infini, l'objectif forme dans son plan focal une image A'B' réelle, renversée et plus petite. En regardant A'B' à travers l'oculaire, qui joue ici le rôle d'une loupe, on en voit une image finale agrandie A''B'' (Figure 6-7).

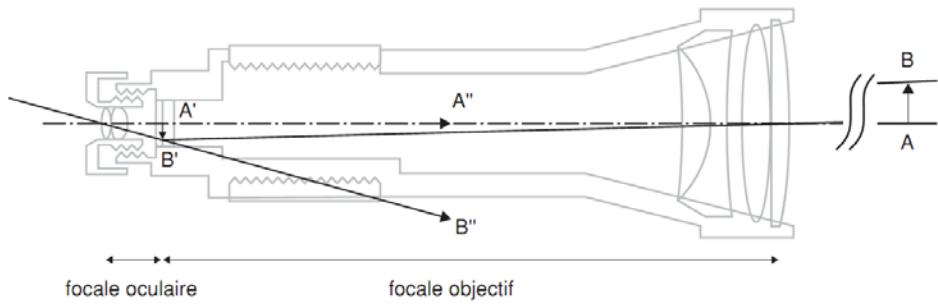


Figure 1-7 : Principe

Si  $A'B'$  est dans le plan focal de l'oculaire, l'image finale  $A''B''$  est renvoyée à l'infini et visible sans accommodation par un œil normal. Par contre, si c'est un œil myope qui doit voir cette image, il faut déplacer l'oculaire par rapport à  $A'B'$  pour que l'image finale  $A''B''$  se forme à distance de vision distincte proche.

Pour qu'une telle lunette permette de faire des pointés (observations centrées sur une cible, sur un signal ou autre objet dans le terrain), il faut qu'il y ait un repère dans son champ de vision.



Figure 1-8 : Le réticule

Le réticule est gravé sur une plaque de verre plan-parallèle proche de l'oculaire et il est vu à travers celui-ci en même temps que l'image  $A'B'$  (Figure 6-8). L'axe de visée est défini par le centre de l'objectif et le centre du réticule.

Le réticule et l'image  $A'B'$  doivent être dans un même plan afin que les images soient vues nettement, sans parallaxe. Ceci implique des mises au point :

- la mise au point de l'oculaire dépend des caractéristiques de l'œil : il faut pouvoir modifier la position de l'oculaire par rapport au plan du réticule pour que l'œil puisse en voir l'image nette sans accommodation, les traits du réticule doivent être vus nettement. Pour que l'image du fond (paysage) n'influence pas cette mise au point, il vaut mieux qu'elle soit complètement floue. Cette mise au point se fait par l'observateur avant d'entreprendre les pointés et n'est plus à modifier durant un cycle de mesures.
- la mise au point en fonction de l'éloignement de l'objet visé : il faut pouvoir déplacer l'ensemble réticule-oculaire pour amener le réticule

dans le plan de A'B' afin que l'œil voie simultanément et nettement le réticule et l'image de l'objet visé. Cette mise au point est correctement réalisée lorsqu'on constate l'absence de parallaxe en déplaçant légèrement l'œil derrière l'oculaire : l'observateur ne doit constater aucun déplacement relatif entre les traits du réticule et l'image de l'objet visé.

### • Les propriétés

A l'œil nu, on voit un objet éloigné AB sous un angle  $\alpha$  et à travers la lunette on voit son image A'B' sous l'angle  $\beta$  (Figure 6-9).

Le **grossissement** d'une lunette est le rapport du diamètre apparent de l'objet vu à travers la lunette à son diamètre apparent vu à l'œil nu :

$$G = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{f_{ob}}{f_{oc}}$$

Le grossissement, aussi égal au rapport de la focale de l'objectif sur celle de l'oculaire, est directement lié au **champ** de la lunette. Il s'agit de l'angle au sommet d'un cône ayant pour base l'ouverture d'un diaphragme et pour sommet le centre de l'objectif :

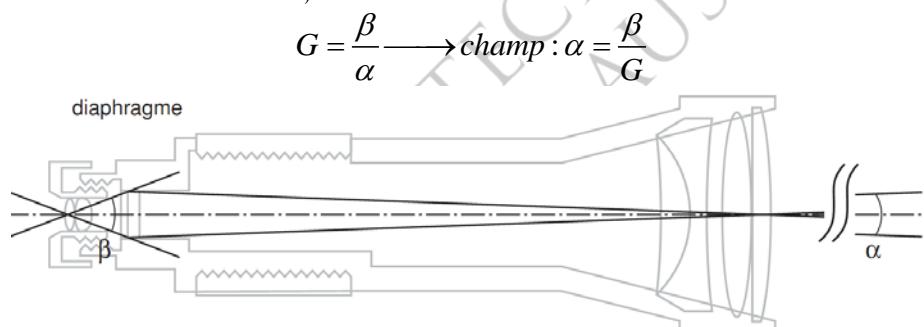


Figure 1-9 : Le champ de la lunette

La **clarté** est le rapport de la quantité de lumière reçue par l'œil à travers la lunette, à la quantité de lumière reçue en regardant l'objet à l'œil nu.

La clarté est :

- < 1 pour des objets de diamètre apparent sensible
- > 1 pour ceux qui n'ont pas de diamètre apparent

Un objet avec diamètre apparent vu à travers la lunette est grossi. La quantité de lumière est répartie sur une image rétinienne plus grande que si l'on regarde l'objet à l'œil nu ; cette image est donc moins claire. La clarté (< 1) est inversement proportionnelle au grossissement. L'effet est inverse pour une clarté supérieure à 1.

Vus à travers une lunette de fort grossissement, le ciel est plus sombre et les étoiles sont plus brillantes ; on en voit davantage qu'à l'œil nu.

L'**anneau oculaire ou pupille** est l'image que donne l'oculaire de l'objectif considéré comme objet.

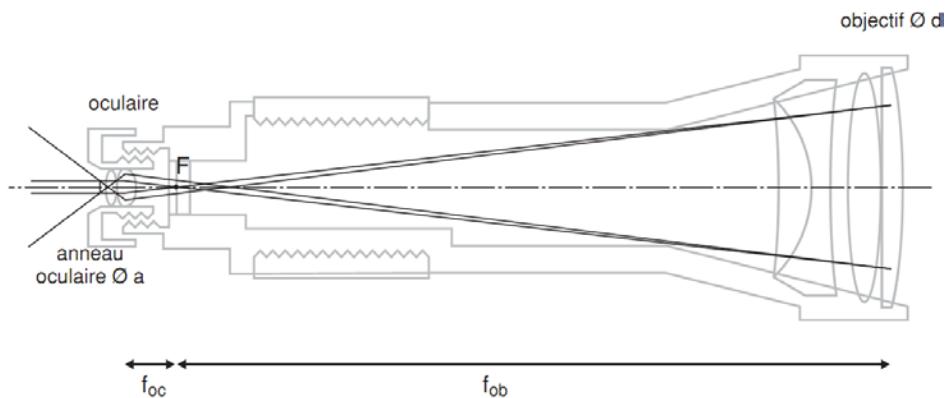


Figure 1-10 : L'anneau oculaire

Celui-ci est normalement plus petit que la pupille d'entrée de l'œil et il faut donc regarder dans la lunette en plaçant l'œil au niveau de l'anneau oculaire ; on voit ainsi tout le champ de la lunette.

On a :

$$G = \frac{f_{ob}}{f_{oc}} = \frac{d}{a} \rightarrow a = \frac{d}{G}$$

De manière générale, les lunettes utilisées en topographie privilégient le grossissement au détriment de la luminosité. C'est l'inverse des jumelles de chasseur, conçues pour de mauvaises conditions d'éclairage, dont la pupille doit être au moins aussi grande que celle de l'œil.

### • Mise au point interne et système optique

A l'époque de la lunette astronomique, quelques inconvénients d'utilisation liés aux principes précédents avaient été mis en évidence. Ces derniers ont été supprimés dans les lunettes modernes, à mise au point interne.

Ces lunettes ont une distance fixe de l'objectif au plan du réticule et un **système optique mobile interne** pour la mise au point des images :

- l'image de tout objet visé doit se former dans le plan du réticule.
- elle y est formée par un système composé de l'objectif convergent et d'une lentille divergente située entre l'objectif et le plan du réticule.
- la lentille divergente est mobile et son déplacement permet d'amener l'image précisément dans le même plan, celui du réticule à distance fixe de l'objectif.

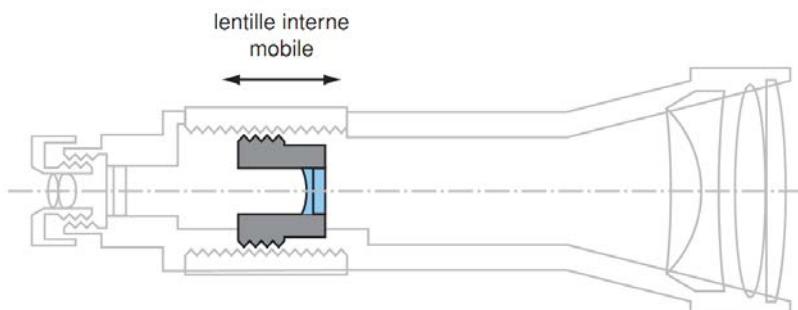


Figure 1-11 : La mise au point interne

En corrigeant les défauts principaux de la lunette astronomique, celle à mise au point interne présente donc les avantages suivants :

- corps de lunette de longueur constante ;
- lunette beaucoup plus courte que celle astronomique qui aurait un même grossissement ;
- stabilité de l'axe de visée ;
- meilleure étanchéité à la poussière, à l'humidité.

### • Les pointés

**Les pointés** consistent à amener très exactement l'axe de visée défini dans la lunette sur l'image d'un objet que l'on vise.

L'objet à viser peut être un repère, un voyant, un jalon, un signal, un clocher ou tout autre marque ou réalité dans le terrain et dont la définition géométrique est plus ou moins précise (Figure 6-12).

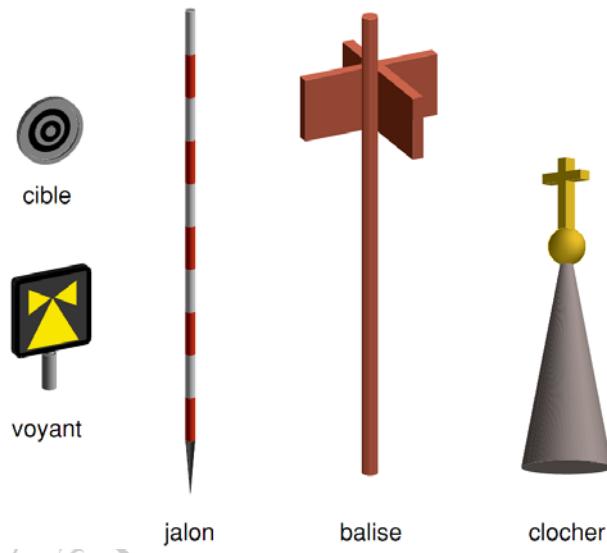


Figure 6-12 : Les types de pointés

L'élément qui sert à faire ces pointés est **le réticule** de la lunette, qui lui-même peut avoir diverses formes :

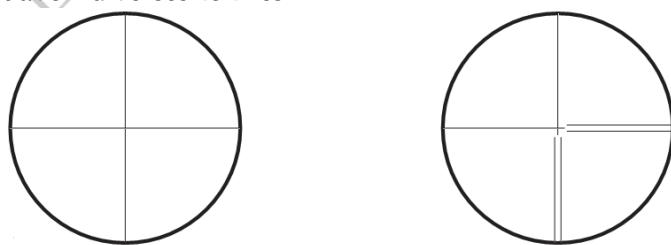


Figure 1-13 : Le réticule

C'est normalement le centre du réticule qui définit l'axe de visée ; il est cependant difficile d'amener très exactement ce centre sur un point particulier de l'objet à viser ou l'objet peut être recouvert par le réticule. Pour des mesures précises, il est préférable d'effectuer le pointé en se servant d'un seul trait de réticule pris au voisinage du centre ; cela oblige à faire 2 pointés successifs, un horizontal et le second vertical.

C'est pourquoi il est avantageux d'avoir un réticule qui est fait par moitié d'un **trait simple** et d'un **trait double**, aussi bien horizontal que vertical. Cela permet de choisir la meilleure manière d'effectuer le pointé selon l'image visible de l'objet à viser :

- s'il est possible de bien le centrer sur l'objet sans le recouvrir, on peut faire le pointé avec le "trait simple" : c'est un **pointé par superposition**
- dans le cas où l'image de l'objet le permet, il est préférable de faire le pointé en encadrant l'image par les "double-traits" : c'est un **pointé par encadrement**.

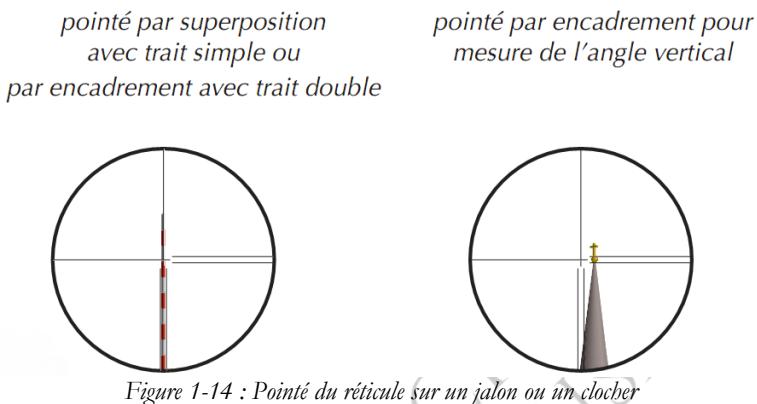


Figure 1-14 : Pointé du réticule sur un jalon ou un clocher

L'œil humain étant particulièrement apte à apprécier de légers décentrages, un pointé par encadrement est plus précis qu'un pointé par superposition.

## 1.2. Application

### 1.2.1. La méthode

Le **nivellement géométrique** ou **nivellement direct** est une méthode de détermination de différences de niveau.

L'équipement de nivellation comprend un instrument appelé **niveau** et une ou deux **lattes** ou **mires graduées** "verticales". Le niveau comporte une lunette qui peut tourner autour d'un axe quasi vertical et dont l'axe de visée doit être horizontal.

L'objectif de cette méthode est donc de déterminer la différence de niveau entre deux points A et B. Avec la lunette du niveau mis en station entre les deux points, viser la mire placée verticalement au point A, dit **point arrière**. Sur cette mire, lire la hauteur visée au-dessus du point sur lequel elle est posée. Cette lecture est notée  $r$  (rückwärts). Placer ensuite la mire verticalement sur le point B, dit **point avant** et la viser avec la lunette pour y faire une lecture  $v$  (vorwärts) (Figure 6-18).

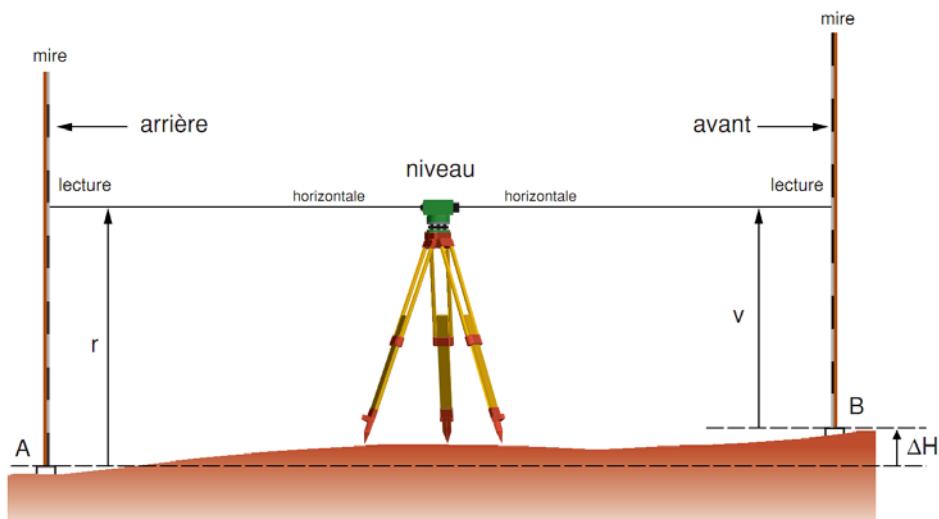


Figure 1-15 : Principe du nivellage géométrique

La différence “lecture arrière” moins “lecture avant” donne la différence de niveau du point avant par rapport au point arrière. Cette différence  $H$  est positive ou négative.

$$\Delta H = r - v$$

Afin que les lectures puissent se faire correctement sur la mire, les deux points A et B ne doivent pas être trop éloignés l'un de l'autre (longueur des visées quelques dizaines de mètres).

Lorsque les points (A et B) entre lesquels on veut déterminer la différence de niveau sont relativement éloignés l'un de l'autre, on procède par cheminement (Figure 1-16).

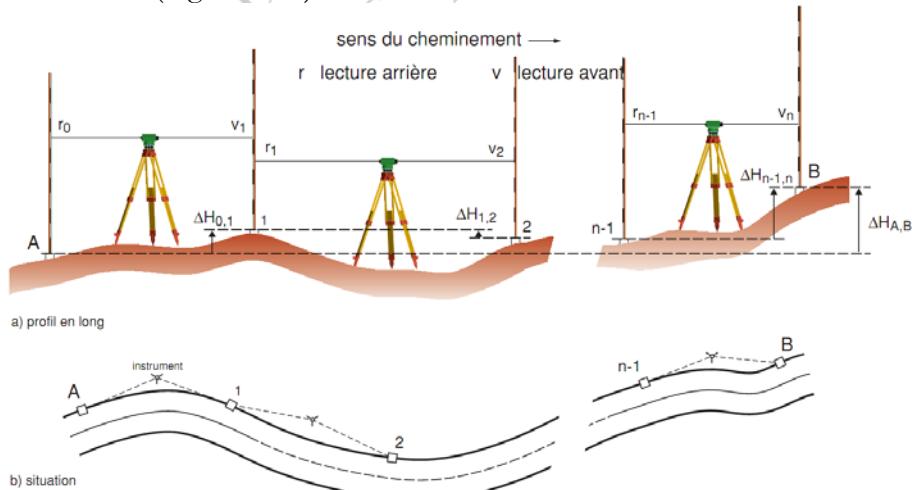


Figure 1-16 : Le cheminement géométrique

Dans ce cas-là, la mire est placée sur le point A et le niveau à portée raisonnable dans la direction permettant de “cheminer” vers B. Une première lecture arrière  $r_0$  est faite sur la mire ; celle-ci est ensuite déplacée en un point quelconque “1” et l'on fait avec la lunette du niveau une lecture avant  $v_1$ .

Le niveau est ensuite déplacé en une nouvelle station du cheminement, telle que l'on puisse viser la mire en "1" où on fait une lecture arrière  $r_1$ , puis la mire déplacée en un nouveau point "2" où l'on fait la lecture avant  $v_2$  ; on procède ainsi jusqu'à ce que le cheminement aboutisse au point B où il se termine par une lecture avant  $v_n$ .

La Figure 6-19 montre que :

$$\begin{aligned} \Delta H_{0,1} &= r_0 - v_1 & \text{Différence de niveau partielle} \\ \Delta H_{1,2} &= r_1 - v_2 \\ \dots \\ \Delta H_{n-1,n} &= r_{n-1} - v_n \\ \hline \Delta H_{AB} &= \sum (r - v) = \sum r - \sum v & \text{Différence de niveau totale} \end{aligned}$$

avec  $r$  : lecture arrière et  $v$  : lecture avant

Le signe des dénivellations, partielles ou totales, peut-être positif ou négatif : la somme avec son signe est toujours la différence de niveau du point final du cheminement par rapport au point initial

$$\Delta H_{AB} = H_B - H_A$$

Plusieurs types de niveling doivent être distingués ; le tableau suivant décrit leurs caractéristiques :

<b>Nivellement aller et retour</b>	Il consiste à effectuer un cheminement dans le sens $A \rightarrow B$ puis dans le sens $B \rightarrow A$ . Si l'écart entre les dénivellées obtenues $H_{AB}$ et $H_{BA}$ est acceptable, on prend la moyenne de ces différences de niveau avec le signe adéquat ( $H_{AB}$ et $H_{BA}$ sont de signe contraire).
<b>Nivellement rattaché</b>	C'est un cheminement entre 2 points dont on connaît l'altitude. Dans ce cas, on a un contrôle en comparant la dénivellée obtenue par le cheminement à la différence des altitudes des 2 points de rattachement. L'écart de fermeture est réparti sur les différences de niveau partielles.
<b>Nivellement fermé</b>	Il est parfois plus avantageux de faire une boucle qui vient se refermer sur le point de départ. On a un contrôle par le fait que la somme des dénivellées partielles devrait être nulle, mais il n'y en a pas sur les altitudes. L'écart de fermeture est aussi réparti sur les différences de niveau partielles.

Il a été décrit comment déterminer la dénivellation entre deux points A et B. Cependant ces derniers peuvent parfois être très rapprochés. On ne peut envisager d'effectuer un changement de station du niveau entre chacun d'eux. Ces points sont alors levés comme points lancés depuis une même station.

On peut traiter ces points de 2 manières.

- 1) hors cheminement : les mesures vers les points lancés sont traitées comme des lectures avant (certains formulaires comprennent une colonne spéciale pour les noter). Ces différences de niveau partielles n'interviennent pas dans le calcul de la somme des H. On obtient les altitudes des points lancés en ajoutant leur ( $\Delta H$ ) à l'altitude du point arrière.
- 2) dans le cheminement : les mesures vers les points lancés sont considérées à la fois comme des lectures avant et arrière. D'ailleurs, on peut inscrire la valeur lue dans les 2 colonnes.

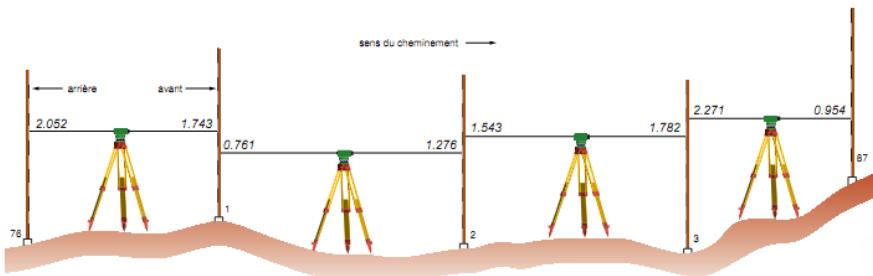
Les points lancés ne sont pas contrôlés. Les visées sont de longueurs différentes et de ce fait l'erreur de réglage du niveau (ligne de visée non horizontale) n'est pas éliminée. Cette pratique n'est valable que pour des nivelllements de moindre précision, lorsqu'une éventuelle faute sur une mesure "lancée" ne serait pas dommageable.

Sur un formulaire pour l'inscription des mesures et calculs relatifs à un cheminement, il est **indispensable de toujours inscrire** :

- l'affaire ou l'entreprise pour laquelle le nivelllement se fait la date des mesures
- le modèle et le n° de l'instrument et des mires, les conditions météorologiques pendant le travail, les noms de l'opérateur, du secrétaire et du porte-mire, éventuellement l'heure du début et de la fin d'un cheminement

 <b>NIVELLEMENT GEOMETRIQUE</b>	
Entreprise : <i>Exercice de topométrie</i>	Instrument : <i>NA20 606172</i>
Date : <i>22.05.01</i>	Observateur : <i>F. Perrin</i>

Points visés	Lectures		Dénivelées $\Delta H = r - v$	Dénivelées par section	Remarques Altitudes
	r	v			
76	2.052				
1	0.761	1.743	0.309		
2	1.543	1.276	- 0.515		
3	2.271	1.782	- 0.239		
87		0.954	1.317		
$\Sigma (r) =$	6.627	5.755	0.872	$\Sigma (r - v)$	Contrôle des calculs: $\Sigma (r - v) = \Sigma (r) - \Sigma (v)$
$-\Sigma (v) =$		- 5.755			
$\Sigma (r) - \Sigma (v) =$	0.872				



Procéder par portées arrière et avant d'égales longueurs.  
Longueur maximum des portées environ 30 m.  
Pour les niveaux manuels: centrer la bulle de la nivelle avant chaque lecture

Figure 1-17 : Exemple de formulaire de nivelllement

Pour la désignation des points :

- seules les “positions” **de la mire** sur des points matérialisés sont numérotées (la planimétrie ne joue aucun rôle).
- lorsque la mire est posée sur un point auxiliaire (qu'on ne peut retrouver) on note généralement une croix.

Les mesures :

- un cheminement commence toujours par une mesure arrière et se termine toujours par une mesure avant.
- les lectures “arrière” et “avant” sont inscrites toujours dans la même unité. Le nombre de décimales est fonction de l'instrument et de la précision à atteindre pour le résultat final (3 décimales généralement).

Pour les calculs :

- les différences de niveau partielles  $\Delta H = r - v$  se calculent au fur et à mesure de l'avancement du cheminement.
- dès qu'un cheminement est terminé, calculer la différence de niveau totale et en contrôler le calcul d'une part en additionnant les différences de niveau partielles  $\sum(r - v)$ , d'autre part en additionnant toutes les lectures “arrière” et toutes les lectures “avant”, puis leur différence  $\sum r - \sum v$ .

### 1.2.2. Les instruments

Actuellement, trois catégories de niveaux existent : les niveaux manuels, automatiques et numériques.

Le **niveau manuel**, qui n'est de nos jours plus utilisés, est présenté dans l'objectif de montrer les mécanismes d'un niveau. Il comprend une embase qui permet de le fixer sur un trépied et de le caler grâce aux vis calantes. La lunette peut tourner autour de l'**axe principal** qui devient vertical par calage lors de la mise en station, en se référant à une simple **nivelle sphérique** (Figure 6-21). L'axe de visée doit quant à lui être calé avant chaque mesure. Pour ce faire, il faut utiliser la nivelle torique et sa directrice doit être parallèle à l'axe de visée de la lunette.

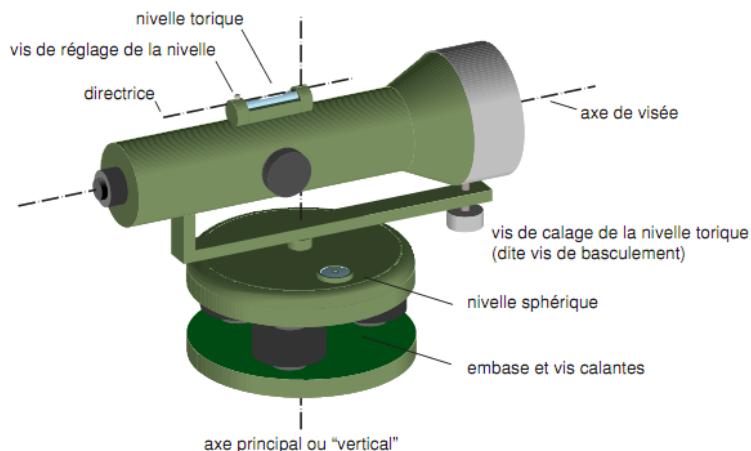


Figure 1-18 : Niveau à nivelle

Ces premiers niveaux ont ensuite été remplacés par des **niveaux automatiques** où la nivelle torique est remplacée par un compensateur. Ce dernier cale automatiquement l'axe de visée à l'horizontale après un calage grossier à l'aide de la nivelle sphérique.

Les **niveaux numériques** sont les niveaux « dernière génération ». Ils reposent sur l'utilisation d'une mire à code barre. L'instrument « lit » lui-même la mire à code barre. L'image de cette portion est ensuite traitée par un système de reconnaissance qui la compare à la référence mémorisée dans l'instrument afin de déterminer de quelle portion de mire il s'agit (Figure 6-22). Ainsi toute faute de lecture ou de retranscription sur la mire est supprimée.

Catégorie	Ecart-type sur 1km de cheminement double	Exemple Leica	Applications
<b>Niveaux automatiques</b>			
Niveau d'ingénieur	1.5 mm	NA728	Détermination altimétriques de précision en géodésie, en construction, en industrie
Niveau de précision	0.3 – 0.5 mm	NA2	Détermination altimétriques de haute précision en géodésie, en surveillance d'ouvrage
<b>Niveaux électroniques</b>			

Niveau d'ingénieur	0.7 – 1.5 mm	Sprinter 250M	Détermination altimétriques de précision en géodésie, en construction, en industrie
Niveau de précision	0.3 mm	DNA03	Détermination altimétriques de haute précision en géodésie, en surveillance d'ouvrage

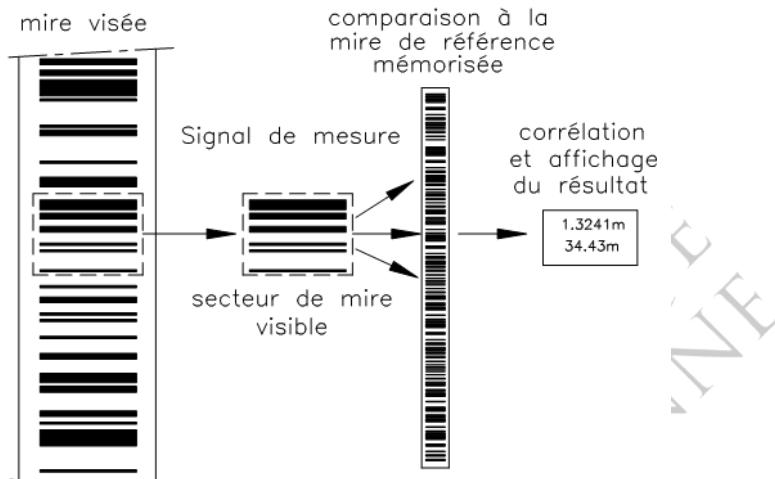


Figure 1-19 : Principe de détection d'un niveau numérique

L'utilisation de niveaux doit être combinée à l'utilisation de mire. Une mire de nivellation ordinaire a une longueur de 3 m ou de 4 m et est pliable ou coulissante pour le transport et le rangement. Elle est en bois ou en alu et la graduation est peinte sur une de ses faces. Elle comporte une graduation continue avec l'origine 0.000 correspondant au pied de la mire (Figure 6-23).

Les mires peuvent être calées grâce à une nivelle sphérique incorporée ou indépendante. Elles sont posées sur un socle de nivellation, appelé crapaud, lorsque que l'on veut s'assurer une bonne assise et assurer une certaine précision.

Pour une mire standard, la précision de la graduation est de l'ordre de  $\pm 0,5$  mm par mètre et celle de position des traits de l'ordre de  $\pm 0,15$  mm.

Normalement, la **graduation** comporte des champs centimétriques alternés noirs et blancs. Il y a différents modèles de dessin de graduation, qui doivent être suffisamment clairs pour que la lecture soit facile. Si l'on ne connaît pas une mire, la règle élémentaire est de **bien étudier la graduation avant d'entreprendre des mesures** afin de ne pas avoir à se poser des questions lorsqu'on la vise à travers la lunette et pour éviter des fautes d'interprétation de la graduation.

### 1.2.3. Précision de la lecture

La lecture se fait avec le trait horizontal du réticule qui se superpose sur la graduation de la mire.

Une mire de nivellation ordinaire est graduée en champs centimétriques alternés noirs et blancs (ou rouges et blancs). Le trait du réticule se superpose donc dans un tel champ et l'opérateur peut estimer la fraction d'intervalle pour avoir la lecture mieux qu'au cm (Figure 6-24).



Figure 1-21 : Lecture sur la mire

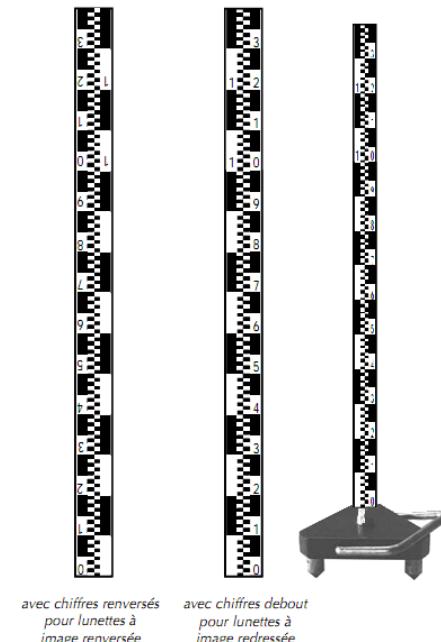


Figure 1-20 : Mires et socle de nivellation

La lecture sur cette figure vaut :

Chiffre à gauche 1m

Chiffre à droite 0,8m

Décompte des crans :

- Dans le 3e cran
- 0,02 m (!)

Fraction de cm estimée :

0.004 m

Soit 1.824m

L'erreur d'estimation commise n'est donc pas supérieure à  $\pm 1\text{mm}$ , ce qui revient à dire que l'erreur maximum d'estimation est :  $e = \pm 1 \text{ mm}$ .

Il faut pour cela que la mire soit proprement dessinée, qu'elle soit parfaitement immobile et que l'image qu'on en voit dans la lunette soit bien nette et sans parallaxe.

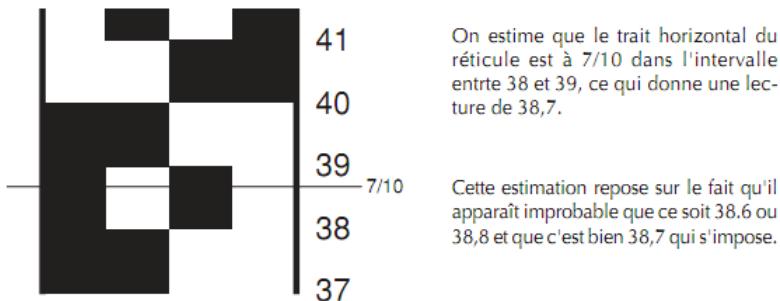


Figure 1-22 : Précision de la lecture sur la mire

Calculons à quelle distance il est encore possible d'estimer le millimètre sur une graduation centimétrique avec une lunette de grossissement  $G$ . Le pouvoir séparateur de l'œil étant de  $1' = 0,0003 \text{ rad}$ , cela signifie que **à l'œil nu le mm est juste encore appréciable à une distance :**

$$s = \frac{0.001\text{m}}{0.0003\text{rad}} = 3.3\text{m}$$

Et par conséquent : dans une lunette de grossissement  $G$ , le mm est juste encore appréciable à une distance :

$$s[\text{m}] = 3.3 \cdot G$$

C'est une portée maximale pour que l'on puisse encore estimer le mm. En fait, le travail sera confortable et cette estimation sans problèmes si l'on effectue des portées inférieures à la moitié de ces longueurs.

Grossissement	Portée maximum	Portée pratique
20x	67 m	30 m
25x	83 m	40 m
30x	100 m	50 m

Tableau 1-1 : Portée maximum et pratique en fonction du grossissement de la lunette

#### 1.2.4. Contrôle et réglage des niveaux

Il faut partir du principe que le parallélisme de la directrice et de l'axe de visée n'est jamais parfait et il faut tenir compte de ce défaut de réglage.

Lorsque la bulle de la nivelle est entre les repères, ou les extrémités de ses images en coïncidence, la directrice est horizontale, mais **l'axe de visée fait avec l'horizontale un petit angle  $i$** .

D'après la Figure 6-26, on voit que l'on a :

Différence de niveau correcte :  $\Delta H = r - v$

Lectures effectives :  $r'$  soit  $r + \Delta r$

$v'$  soit  $v + \Delta v$

Différence des lectures :  $r' - v' = r - v + \Delta r - \Delta v$

Par conséquent, si  $\Delta r = \Delta v$ , les erreurs dues au défaut d'horizontalité de la ligne de visée s'éliminent. Pour cela, il faut :

- **caler la nivelle torique avant chaque lecture** pour que l'axe de visée ait toujours le même défaut d'horizontalité  $i$
- **effectuer des portées d'égales longueurs** avant et arrière par rapport à une station du niveau

Dans ces conditions, la différence des lectures donne la différence de niveau correcte :

$$\Delta H = r' - v' = r - v$$

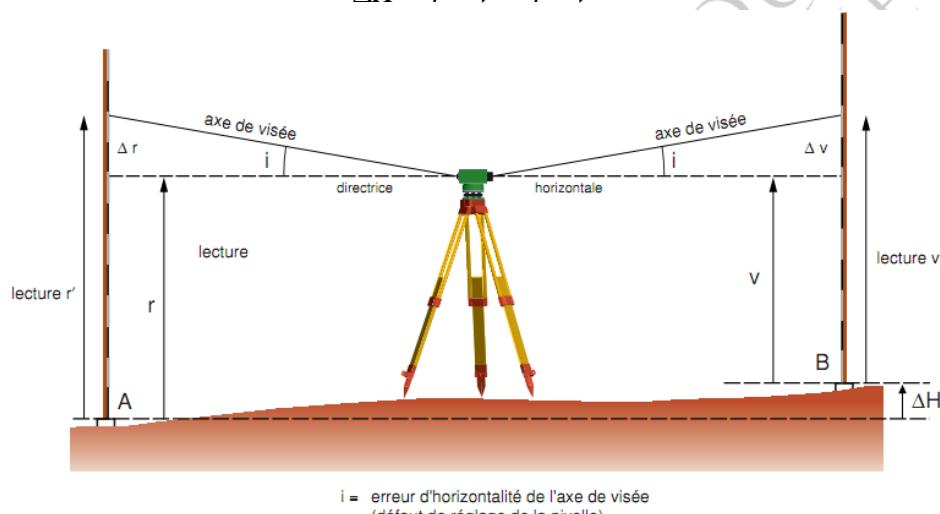


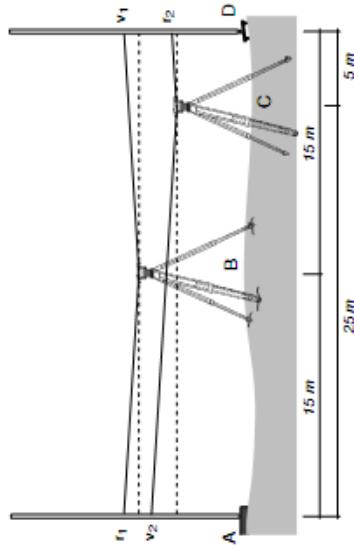
Figure 1-23 : Le défaut d'horizontalité du niveau

Cependant, le défaut d'horizontalité de l'axe de visée est parfois trop important ou des portées d'égales longueurs ne sont pas permises. Il est alors nécessaire de régler le niveau.

Une procédure de contrôle et réglage est décrite à la page suivante.

## Contrôle du niveau de chantier

Points visés	Lectures	Contrôle	Remarques
$r_1$			
$v_1$			
$r_1 - v_1$			
$r_2$			
$v_2$ calculé			
$v_2$ lu			
$w$			
$r_1$			
$v_1$			
$r_1 - v_1$			
$r_2$			
$v_2$ calculé			
$v_2$ lu			
$w$			



## Principe

De temps à autre et avant chaque travail important, on doit s'assurer que le niveau est bien réglé. L'instrument doit aussi être contrôlé lorsqu'il a reçu un choc.

On détermine une dénivellation avec des portées égales, puis on répète les mesures avec des portées inégales. Si l'axe de visée du niveau n'est pas horizontal, on obtient un écart entre les deux mesures de la dénivellation.

## Procédé

Sur terrain plat, on place la mire en A, sur un point bien matérialisé (p. ex. bordure en béton). On stationne en B à env. 15m de la mire. On fait à partir de cette station la lecture  $r_1$  sur A. On place la mire en D à une portée égale de B (au pas) sur le socle de nivellement. On fait la lecture  $v_1$ . L'instrument est ensuite mis en station en C, à env. 5m de la mire en D et l'on fait la lecture  $r_2$ . On déplace la mire en A et on fait la lecture  $v_2$ . On calcule l'écart de fermeture indûmement aller-retour (boucle).

$$w = (r_1 - v_1) + (r_2 - v_2)$$

Pour des raisons pratiques, le secrétaire calcule la lecture  $v_2$  avant que l'opérateur ne la lise, sans toutefois la communiquer.

$$(r_1 - v_1) + (r_2 - v_2) = 0$$

$$v_2 \text{ calculé} = (r_1 - v_1) + r_2$$

L'écart de fermeture est ainsi obtenu si l'on lit la lecture  $v_2$  connue.

$$w = v_2 \text{ calculé} - v_2 \text{ lu}$$

Le contrôle est accepté si  $|w| \leq 5 \text{ mm}$  (en supposant une précision de 1mm pour chaque lecture).

L'erreur systématique provoquée par une erreur d'excentricité de un mètre peut être estimée en calculant le quotient  $w/BC$ , soit  $w/10$  pour la disposition suggérée ci-dessus.

Cette valeur correspond au double de la pente de la ligne de visée.

## Réglage

Il est recommandé de répéter le contrôle afin de détecter d'éventuelles fautes de lecture. Si l'écart de fermeture est confirmé, on règle le niveau de manière à lire  $v_2$  calculé. En général, la vis de réglage permet de modifier la ligne de visée en déplaçant les fils du réticule.

En toute rigueur, il faudrait surcorriger d'un facteur  $AC / (AC - AD) = AC / 2BC$

soit 5/4 dans le cas ci-dessus. Cette surcorrection est souvent omise, car le réglage sur  $v_2$  calculé ramène l'écart de fermeture dans la marge admissible des erreurs de lecture.

Après un réglage, on répète toujours le contrôle

### 1.2.5. Causes d'erreurs dans le niveling

Un certain nombre d'**erreurs systématiques** et d'**erreurs accidentelles** entachent les résultats d'un niveling géométrique. Enumérons les plus marquantes d'entre elles.

- **Erreurs systématiques**

**L'erreur d'horizontalité de l'axe de visée** est due au défaut de réglage de la nivelle ou du compensateur. Pour une visée, elle provoque une erreur systématique, toujours dans le même sens, mais s'élimine sur la différence des lectures arrière et avant si on effectue des portées d'égales longueurs.

En considérant ici que les surfaces de niveau sont des sphères concentriques, on peut calculer l'**influence de la courbure de la Terre** sur la lecture d'une visée horizontale sur une mire située à distances (Figure 6-27).

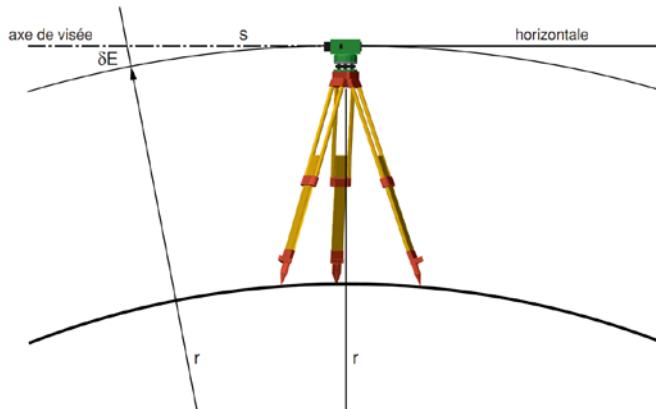


Figure 1-24 : Influence de la courbure de la Terre

En désignant par :

$r$  : rayon de courbure de la surface de niveau passant par l'instrument

$s$  : longueur de la visée

$\delta E$  : correction de la courbure de la Terre

$$\text{On a : } \delta E^2 = \frac{s^2}{2r}$$

$$\text{Soit pour } r = 6380 \text{ km et } s = 50 \text{ m} \rightarrow \delta E = 0.2 \text{ mm}$$

$$s = 100 \text{ m} \rightarrow \delta E = 0.8 \text{ mm}$$

Il est évident que cette erreur est la même sur les lectures arrière et avant si les visées sont de même longueur et qu'elle s'élimine donc en procédant par portées égales.

**L'effet de la réfraction du rayon de visée** est analogue à celui de la courbure de la Terre. Sachant que normalement la courbure du rayon

lumineux est  $k = 0,13$  fois plus petite que celle de la surface terrestre sphérique, l'erreur de réfraction est :

$$\delta R = k \cdot \frac{s^2}{2r} = 0.13 \cdot \delta E$$

C'est-à-dire négligeable pour de petites portées et totalement éliminée en procédant par portées égales.

Par fort ensoleillement, les couches d'air proches du sol sont surchauffées et provoquent une **réfraction différente entre les visées avant et arrière**. Si la mesure se fait dans un terrain en pente, l'une des visées est beaucoup plus proche du sol que l'autre et l'erreur de réfraction est différente sur les 2 lectures (Figure 6-28). Dans une pente régulière, cette erreur prend un caractère systématique. On ne peut y remédier qu'en évitant de faire sur la mire des lectures trop proches du sol et il faut réduire la longueur des visées.

Lorsque les conditions atmosphériques sont telles qu'elles peuvent provoquer ce phénomène, il faut en principe éviter toute lecture inférieure à 0,5 m au-dessus du sol. D'une manière générale, il y a lieu d'éviter toute visée rasante.

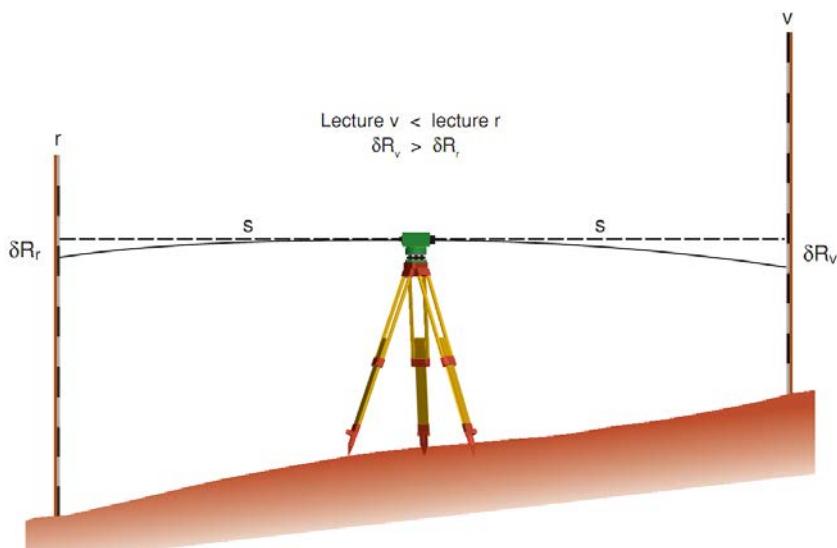


Figure 1-25 : Phénomène de réfraction proche du sol

On peut donc conclure qu'en effectuant des portées arrière et avant d'égale longueur, on élimine les erreurs dues

- au défaut de réglage de la nivelle ou du compensateur
- à la courbure de la Terre
- à la réfraction du rayon

Il est donc essentiel de faire des portées d'égales longueurs. Cependant, l'exactitude avec laquelle cette égalité doit être réalisée dépend de l'état de réglage du niveau, mais surtout de la précision à garantir sur les résultats du nivelingement.

S'il s'agit d'obtenir les différences de niveau à 0,5 cm près, il suffit de mesurer les portées au pas. Dans le cas contraire, il est préférable d'utiliser la chevillière.

### • Erreurs accidentelles

Les erreurs suivantes peuvent avoir un effet systématique ou aléatoire. On ne cite que les plus marquantes, qui peuvent entacher les résultats d'un niveling géométrique.

Les erreurs possibles sont :

- erreur de graduation de la mire (position des traits)
- erreur de calage de l'instrument
- éventuelle modification de l'état de réglage entre la mesure arrière et la mesure avant (par ex. si le niveau n'est pas protégé du soleil par un parasol)
- erreur de lecture sur la mire
- portées arrière et avant d'inégales longueurs
- tassement irrégulier du niveau ou de la mire

Notes :

ÉCOLE POLYTECHNIQUE  
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE  
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

## Références

On donne ici quelques références bibliographiques utiles et complémentaires au contenu de ce polycopié. Cette liste n'est de loin pas exhaustive.

Merminod B., (2008), Topométrie Terrestre, Polycopiés de l'EPFL, EPFL, Lausanne

Milles S., Lagofun J., (1999), Topographie et topométrie modernes - Tome 1 : Techniques de mesure et de représentation, Ed. Eyrolles

Milles S., Lagofun J., (1999), Topographie et topométrie modernes - Tome 2 : Calculs, Ed. Eyrolles

## 2. Table des figures

### Avertissement

*La plupart des figures de ce polycopié ont été créées à l'EPFL. Toutefois, les auteurs ont utilisé un certain nombre de ressources dont les références sont citées. Si l'une ou l'autre de ces ressources ne sont pas référencées correctement ou font l'objet d'un droit d'usage particulier, nous vous prions de bien vouloir le signaler à l'auteur.*

Figure 1-1 : Nivelle sphérique.....	4
Figure 1-2 : Nivelle torique .....	5
Figure 1-3 : Retournement d'une nivelle.....	6
Figure 1-4 : L'erreur de réglage $\varepsilon$ .....	7
Figure 1-5 : Nivelle torique .....	7
Figure 1-6 : Lunette.....	9
Figure 1-7 : Principe.....	10
Figure 1-8 : Le réticule.....	10
Figure 1-9 : Le champ de la lunette .....	11
Figure 1-10 : L'anneau oculaire .....	12
Figure 1-11 : La mise au point interne .....	12
Figure 1-12 : Les types de pointés .....	13
Figure 1-13 : Le réticule.....	13
Figure 1-14 : Pointé du réticule sur un jalon ou un clocher.....	14
Figure 1-15 : Principe du niveling géométrique .....	15
Figure 1-16 : Le cheminement géométrique.....	15
Figure 1-17 : Exemple de formulaire de niveling.....	18
Figure 1-18 : Niveau à nivelle .....	19
Figure 1-19 : Principe de détection d'un niveau numérique.....	20
Figure 1-20 : Mires et socle de niveling .....	21
Figure 1-21 : Lecture sur la mire .....	21
Figure 1-22 : Précision de la lecture sur la mire .....	22
Figure 1-23 : Le défaut d'horizontalité du niveau.....	23
Figure 1-24 : Influence de la courbure de la Terre .....	25
Figure 1-25 : Phénomène de réfraction proche du sol .....	26