

Mesure des altitudes

Table des matières

Chapitre I. Définitions..... 5

Partie A. Altitudes.....	5
1. Altitudes.....	5
Partie B. Nivellement.....	6
1. Principes.....	6
2. Nivellement direct ou géométrique.....	6
3. Nivellement trigonométrique.....	7
4. Nivellement par GPS.....	8
Partie C. Réseau de nivellement français.....	9
1. Réseau de nivellement.....	9
2. Exemple de fiche de nivellement.....	10

Chapitre II. Matériels utilisés en nivellement..... 13

Partie A. Niveaux.....	13
1. Éléments constitutifs d'un niveau.....	13
2. Niveaux à bulles.....	14
3. Niveaux automatiques.....	15
4. Niveaux numériques électroniques.....	16
5. Dispositifs de lecture.....	18
6. Dispositifs de lecture : lectures au micromètre.....	18
7. Dispositifs de lecture : lecture numérique.....	19
Partie B. Mires.....	19
1. Les différents types de mires.....	19
Partie C. Autres accessoires.....	21
1. Supports de mires.....	21
2. Trépieds.....	22
3. Repères.....	22

Chapitre III. Erreurs en nivellement direct..... 25

Partie A. Erreurs liées aux niveaux.....	25
1. Erreurs de lecture.....	25
2. Faute de lecture.....	25
3. Erreur de collimation.....	26
4. Erreur de hauteur d'axe.....	27
Partie B. Erreurs liées aux mires.....	28
1. Verticalité.....	28
2. Défaut du talon de mire.....	28
3. Appairage des mires.....	29
4. Etalonnage des mires.....	29
Partie C. Erreurs dues au milieu.....	30
1. Sphéricité.....	30
2. Réfraction.....	30
3. Stabilité du sol.....	30
Partie D. Méthodes d'observation.....	30
1. Cheminement encadré : principe.....	30
2. Cheminement encadré : stabilité.....	31
3. Cheminement en boucle.....	32
4. Nivellement par rayonnement.....	32
5. Exemple de calcul.....	33

Chapitre IV. Préparations et réglages..... 35

Partie A. Réglage des matériels.....	35
1. Nivelles sphériques du niveau.....	35
2. Réglage de la collimation.....	35
3. Réglage du niveau.....	36
4. Nivelles sphériques de la mire.....	36
5. Etalonnage des mires.....	37
Partie B. Procédure de mesures.....	37
1. Mise en place du trépied.....	37
2. Mise en place du niveau.....	37
3. Calage à la verticale.....	37
4. Mise au point du réticule de la lunette.....	39
5. Mise au point de l'image vers la mire.....	40

Définitions

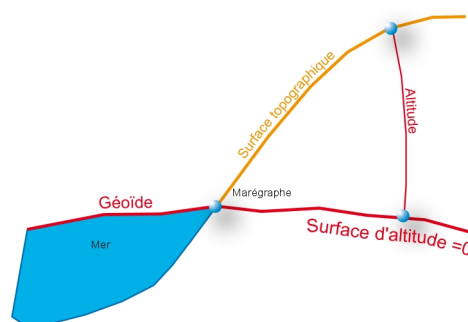
Partie A. Altitudes

1. Altitudes



Altitude

L'altitude, dans le langage commun, exprime l'éloignement d'un objet par rapport au niveau moyen de la mer. Elle exprime également une réalité physique, l'eau s'écoule du point d'altitude le plus élevé vers le point d'altitude le plus faible.



▲ SCH. 1 : ALTITUDES

Cette notion fait appel aux forces qui s'exercent sur les particules d'eau :

- ◆ Forces de gravité
- ◆ Forces centrifuges

A la modélisation de la surface de référence :

- ◆ Géοïde

A la méthode de calcul du trajet entre le point considéré et la surface d'altitude nulle.

- ◆ Altitudes orthométriques
- ◆ Altitudes normales
- ◆ Altitudes dynamiques

Partie B. Nivellement

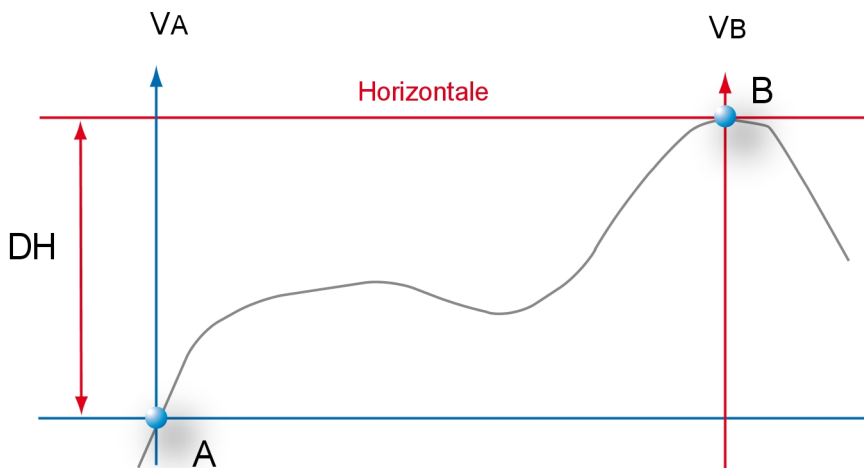
1. Principes



Nivellement

Le nivellement est l'ensemble des opérations qui permettent de déterminer des altitudes et des dénivelées (différences d'altitudes).

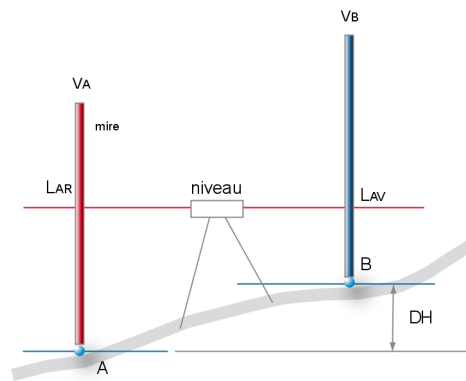
Si deux points A et B sont peu éloignés l'un de l'autre, on peut définir deux plans horizontaux parallèles passant par A et B qui sont perpendiculaires aux verticales V_A et V_B elles-mêmes parallèles entre elles.



▲ SCH. 2 : PRINCIPE DU NIVELLEMENT

Une notion intuitive consiste à adopter ΔH comme différence d'altitudes entre A et B.

2. Nivellement direct ou géométrique



▲ SCH. 3 : NIVELLEMENT DIRECT

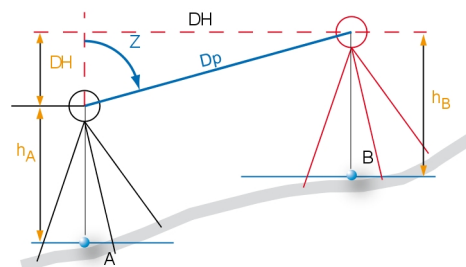
Le nivellement direct, ou nivellement géométrique consiste à mesurer la différence d'altitudes à partir de visées horizontales. Cette opération s'effectue à l'aide d'un niveau permettant de matérialiser une ligne de visée horizontale et d'une règle graduée verticale appelée mire.

Supposons l'altitude du point A connue, en notant L_{AR} et L_{AV} les lectures sur les 2 mires, l'altitude du point B s'obtient comme suit :

$$Alt_B = Alt_A + L_{AR} - L_{AV}$$

3. Nivellement trigonométrique

Le nivellement trigonométrique consiste à déterminer la dénivelée entre deux stations par des mesures de distances spatiales et d'angles zénithaux.



▲ SCH. 4 : NIVELLEMENT TRIGONOMETRIQUE

Le nivellement trigonométrique consiste à déterminer la dénivelée entre deux stations par des mesures de distances spatiales et d'angles zénithaux.

Un calcul simple conduit à la différence d'altitude entre A et B

$$Alt_B = Alt_A + h_A + Dp \cos(Z) - h_B$$

Remarque préalable

- ◆ L'angle zénithal doit être préalablement corrigé de la collimation verticale.
- ◆ La distance spatiale doit être corrigée de la météorologie.

Cette modélisation simplifiée du problème ne tient pas compte :

- ◆ De la sphéricité de la Terre
- ◆ De la réfraction atmosphérique

La combinaison de ces 2 erreurs est dénommée erreur de *niveau apparent*.

4. Nivellement par GPS

La détermination des coordonnées d'un point à l'aide du système GPS est basée sur la mesure du temps de propagation d'une onde électromagnétique entre le satellite et l'antenne réceptrice. Les coordonnées obtenues peuvent être cartésiennes (X, Y, Z) ou géographiques (λ, φ) associées à une hauteur au-dessus de l'ellipsoïde « h ».

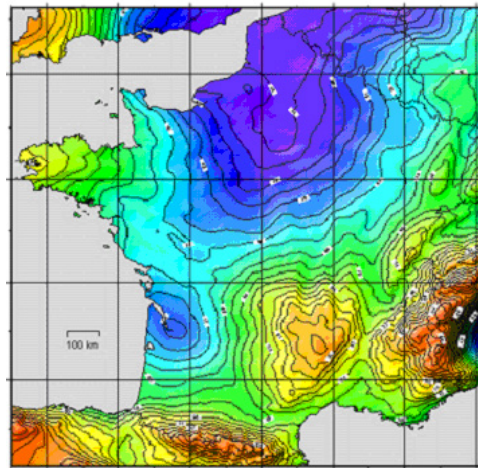


▲ IMG. 1 : NIVELLEMENT PAR GPS

Pour convertir la hauteur ellipsoïdale en altitude plusieurs solutions sont envisageables.

- ◆ La première solution, couramment employée par les utilisateurs du GPS, consiste à interpoler la hauteur du géoïde au-dessus de l'ellipsoïde à partir d'un modèle local obtenu en observant par GPS plusieurs points rattachés au nivellement. Cette solution, simple à mettre en œuvre, est risquée car la densité des points observés ne permet pas toujours de définir précisément la forme du géoïde, ce dernier pouvant présenter localement des écarts de plusieurs centimètres par kilomètre. [Une estimation de ces pentes a été réalisée sur l'ensemble des points nivelés du RGF. Les pentes les plus importantes sont de 9.5 cm/km dans les Pyrénées sur le Pic du Midi de Bigorre et de 9.1 cm/km dans les Alpes près de Bourg d'Oisans]
- ◆ Une seconde solution utilise un modèle global de géoïde convertissant directement la hauteur en altitude. Dans la pratique, deux modèles mondiaux de géoïde (OSU91 ou EGM96) sont utilisés. La précision de cette détermination, testée sur le territoire français, est de l'ordre de 30 cm en plaine et de 2 mètres en montagne.

- ◆ La troisième solution finalement adoptée est une combinaison des deux précédentes : calcul d'un géoïde national et adaptation à un ensemble de points connus à la fois dans les référentiels géodésique et altimétrique. La *grille de correction*, appelée *RAF98*, s'appuie sur le modèle de quasi-géoïde français QGF98 et sur le Réseau de Base Français (RBF), constitué d'environ 1000 points connus à la fois dans les référentiels RGF93 pour les coordonnées géodésiques et NGF-IGN1969 pour l'altitude.



▲ IMG. 2 : RAF 98

Partie C. Réseau de nivellement français

1. Réseau de nivellement

Fondamentaux

Un réseau est constitué d'un ensemble de points matérialisés dont l'altitude est connue et diffusée. Actuellement le réseau français de nivellement de précision se compose d'un réseau établi sur le territoire métropolitain (France) nommé NGF-IGN69, et d'un second en Corse appelé NGF-IGN78. Le réseau général de France est subdivisé en 4 réseaux de plus en plus denses, dits de 1er ordre (réseau composé de points primordiaux), 2ème, 3ème, et 4ème ordre.

IGN69 – France métropolitaine

- ◆ Le territoire National comprend 40 polygones fermés de 1er ordre.
- ◆ Chaque polygone de 1er ordre est divisé en 7 mailles de 2ème ordre.
- ◆ Chaque maille de 2ème ordre est divisée en 10 à 15 mailles de 3ème ordre.

- ◆ A l'intérieur des mailles de 3ème ordre, on nivelle des traverses de 4ème ordre. Les nombreux profils de rivières, nivellements réalisés le long des cours d'eau de 1910 à 1970, en vue de l'aménagement hydroélectrique du territoire, sont considérés comme des traverses de 4ème ordre.

<i>Ordre</i>	<i>Longueur (km)</i>	<i>Nombre de repères</i>	<i>Précision Ecart-Type</i>
1er	13 754	22 440	2,0 mm
2ème	18 510	30 040	2,3 mm
3ème	45 600	76 080	3,0 mm
4ème	169 330	263 310	3,6 mm
Total	247 194	391 870	
Profil de	rivière 50 000 environ	60 000	
Total	300 000 environ	450 000 environ	

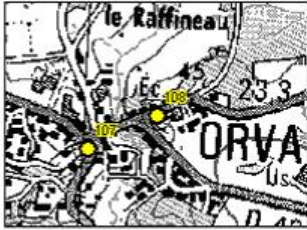
▲ TAB. 1 : RÉSEAU DE NIVELLEMENT

L'altitude du repère fondamental du réseau NGF-IGN69 a été fixée à partir d'observations marégraphiques obtenues à Marseille du 1er février 1885 au 1janvier 1897. Le repère fondamental (altitude 1,661) est un rivet scellé dans le bâtiment abritant le marégraphe totalisateur, à Marseille (Anse Calvo)


2. Exemple de fiche de nivellement

Les repères de nivellement sont actuellement disponibles gratuitement sur le site internet de l'IGN <http://geodesie.ign.fr>(février 2006) via une interface graphique

Matricule :	U.A.M3 - 108	Système d'altitude : NGF - IGN1969 - Altitude normale
		40,812 m
Type :	M REPERE CYLINDRIQUE DU NIVELLEMENT GENERAL	Année de détermination : 1962

Coordonnées du repère				
Système RGF93 - Ellipsoïde : IAG GRS80 - Méridien origine : Greenwich				
Longitude :	1 ° 37 ' 13,3 " O		Latitude :	47 ° 16 ' 19,9 " N
Système RGF93 - Projection LAMBERT - 93				
E (km) :	350,91		N(km) :	6 695,98
Système NTF - Projection LAMBERT - 2				
E(km) :	300,77	N(km) :	260,03	

Département :	LOIRE-ATLANTIQUE	Número INSEE :	44114
Commune :	ORVAULT	Número :	1223
Feuille :	NANTES	Quart :	Nord-Est
Voie suivie :	D.75		
	de SAINT-HERBLAIN à LA CHAPELLE-SUR-ERDRE	Côté :	Droit
Distance :		PK :	6,54 km
Localisation :	AU BOURG		
Support :	ECOLE SAINT-JOSEPH		
	MUR PIGNON NORD-OUEST, FACE ROUTE		
Repèrment :	A 0.88 M DE L'EXTREMITE SUD-OUEST		
	A 0.05 M AU-DESSUS DU SOL		

Remarques :	
- Repère vu en place en 2003.	

le repère est au centre de la photo

▲ IMG. 3 : FICHE DE NIVELLEMENT

Matériels utilisés en nivellement

Partie A. Niveaux

1. Eléments constitutifs d'un niveau

Le niveau consiste à associer une lunette, un système de mise en horizontalité et un dispositif de lecture. Le système de visée rendu horizontal permet d'effectuer des lectures métriques sur des mires graduées. La lunette tourne autour d'un axe vertical appelé axe principal qui lui est perpendiculaire et décrit ainsi un plan horizontal.

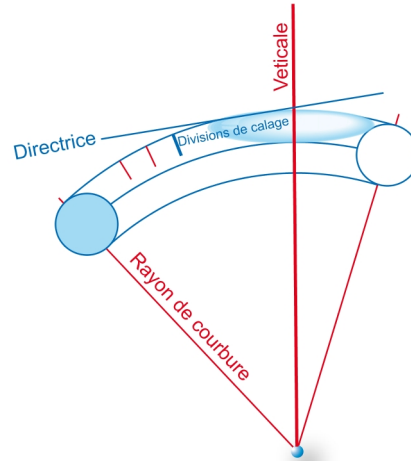
Un niveau comporte entre autre :

- ◆ Une embase à 3 vis calantes
- ◆ Une lunette de visée
- ◆ Un oculaire
- ◆ Une vis de fin pointé
- ◆ Une vis de mise au point de l'objectif
- ◆ Une nivelle sphérique
- ◆ Un système d'horizontalité de la ligne de visée
- ◆ Un dispositif de lecture sur la mire

La précision est fonction du grossissement de la lunette et de la sensibilité du système d'horizontalité.

2. Niveaux à bulles

Dans un niveau à bulle, le système d'horizontalité est obtenu par l'association d'une nivelle torique à la lunette de visée.



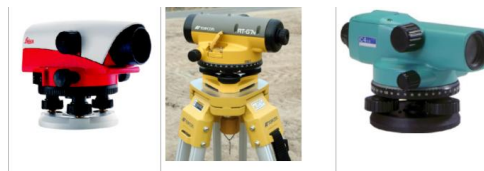
▲ SCH. 5 : NIVELLE TORIQUE

La nivelle torique est constituée d'un tube de verre qui contient de l'alcool, éther ou autre liquide ne pouvant se congeler aux températures courantes. On a rempli le tube en y laissant une bulle d'air qui occupe la partie élevée du tore. Des graduations permettent de définir l'horizontalité.

Le calage de la bulle consiste à faire pivoter la lunette dans un plan vertical pour amener la bulle entre ces repères de réglage. La bulle étant calée, l'axe de visée est théoriquement une ligne horizontale. [ceci sous entend que le niveau a été réglé au-préalable (voir chap 3 sur les erreurs instrumentales).]

La précision d'une nivelle torique est définie par sa sensibilité α qui est l'angle au centre défini pour 2 mm de graduation ou par son rayon de courbure. Plus le rayon de courbure est important plus le dispositif d'horizontalité est précis.

Niveaux de chantier



▲ IMG. 4 : NIVEAU DE CHANTIER

Sensibilité 60 '' ($r = 10$ m). Grossissement = 20 à 24. Pour les appareils à bulle, on estime la précision du calage à 1/5 d'intervalle soit une variation sur la mise en horizontalité de $[60/5] \times 3 \text{ dm}$ soit 4mm à 64m.



▲ IMG. 5 : NIVEAU DE PRÉCISION

Les caractéristiques suivantes sont celles du Leica N3, niveau de haute précision utilisé en métrologie.

Son grossissement est de 40 et sa sensibilité de $10''$ ($r=40m$).

Le bullage se fait par coïncidence avec une précision de $1/20$ d'intervalle soit une précision de 0.15 mm à $64m$ ($[10/20] \times 3\text{dmg}$).

3. Niveaux automatiques

Dans un système automatique, pour de faibles inclinaisons de la lunette, l'horizontale est donnée par un prisme suspendu. Il est alors nécessaire de bien buller l'axe principal du niveau au moyen d'une nivelle sphérique pour éviter l'erreur de hauteur d'axe (voir Erreur de collimation) et pour ne pas bloquer le pendule. Souvent l'opérateur doit donner un léger coup sur le niveau pour vérifier le balancement du prisme.

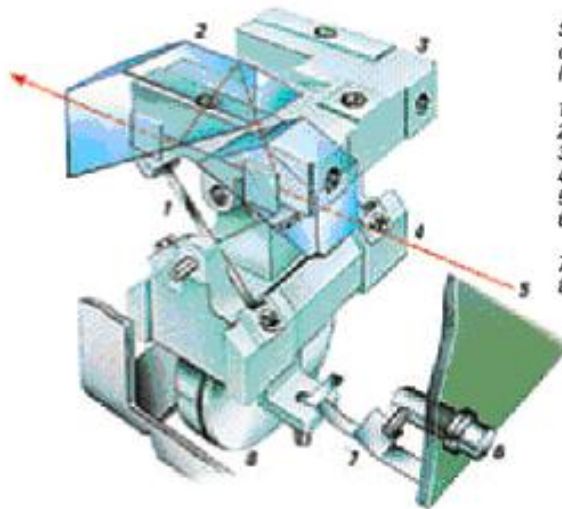


Schéma de fonctionnement
du compensateur du niveau
NA2/NAK2

- 1 Rubans de suspension
- 2 Prisme pentagonal
- 3 Corps du compensateur
- 4 Pendule à prisme
- 5 Ligne de visée
- 6 Bouton-poussoir pour le contrôle du fonctionnement
- 7 Ressort
- 8 Amortissement pneumatique

▲ IMG. 6 : NIVEAU AUTOMATIQUE



▲ IMG. 7 : NIVEAU AUTOMATIQUE



▲ IMG. 8 : NIVEAU AUTOMATIQUE

La sensibilité du pendule qui est voisine de $15''$ donnerait une précision de l'ordre de 0.5mm à 64m. Les constructeurs indiquent de 0.7 à 0.4mm/km de cheminement double. Equipés d'un micromètre de lecture associé à une lame à faces parallèles, ces niveaux automatiques ont une précision de lecture sur des mires en invar proche de 0.1mm.

4. Niveaux numériques électroniques

Exemple de niveaux numériques



▲ IMG. 9 : NIVEAU NUMÉRIQUE



▲ IMG. 10 : NIVEAU NUMÉRIQUE

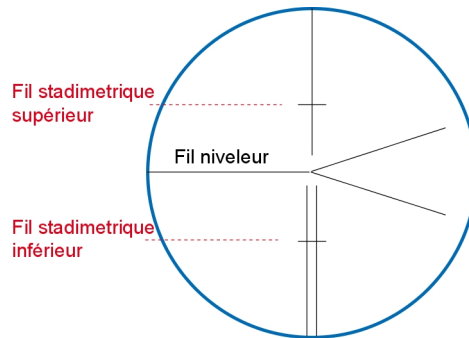
Ce sont des niveaux automatiques et numériques qui nécessitent l'utilisation de mire code-barres spécifiques. Chaque constructeur utilise sa propre codification, les mires code-barres ne sont donc pas interchangeables. Ils peuvent être utilisés en mode direct. L'opérateur ne fait que viser la mire, le temps de lecture est variable en fonction de la luminosité. Ces niveaux, bien qu'ils soient très pratiques n'échappent à aucune des erreurs systématiques des niveaux classiques optiques que nous verrons par la suite et nécessitent les mêmes méthodes d'observations de nivellement.

Par contre la visée et la mise au point, facteurs primordiaux en nivellement classique, ont moins d'influence sur la précision. Une bonne mise au point réduit cependant le temps de mesure. Par contre lors d'un nivellement numérique, un flamboiement de l'air diminue considérablement les contrastes de l'image de mire, ce qui peut produire des distorsions locales. Des effets similaires peuvent être provoqués par des vibrations que subit le compensateur (vents, travaux de construction, passage de véhicules). Comme tout procédé de mesure optique, l'éclairage de la mire revêt une grande importance. Le manque de luminosité agit sur le temps et la qualité de la mesure. En cas de travaux intérieurs, la lumière artificielle doit être puissante et renfermer une composante infrarouge. Il faut éviter les lectures sur les extrémités de la mire, car la corrélation nécessite une plage de code-barres étendues, et il est recommandé d'éviter les visées inférieures à 5m. La résolution de lectures va suivant les modèles de 0.1mm à 0.01mm.

5. Dispositifs de lecture

Lectures directes

La visée est matérialisée par un réticule. Un trait horizontal, appelé fil niveleur, permet d'interpoler une valeur sur une mire graduée en m. La précision de ce dispositif dépend du grossissement de la lunette et de la distance entre le niveau et la mire.



▲ SCH. 6 : RÉTICULE

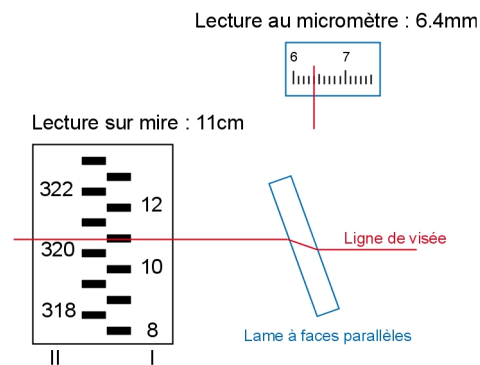


Remarque

2 fils appelés fils stadimétriques à angle constant permettent un calcul de distance par différence de lecture sur les deux fils. Cette possibilité permet également un contrôle de lectures

6. Dispositifs de lecture : lectures au micromètre

Lecture au micromètre



$$\text{Lecture} = 0.11 + 0.0064 = 0.1164\text{m}$$

▲ SCH. 7 : LAMES À FACES PARALLÈLES

Un micromètre de lecture, couplé à une lame à faces parallèles, permet d'encadrer une graduation centimétrique ronde de la mire et de lire le complément de lecture sur un vernier ou un index. L'inclinaison de la lame, commandée par un bouton parcourant une plage de 10mm, est telle que la ligne de visée se déplace horizontalement entre 2

graduations de la mire. Pour éviter des lectures d'appoints négatifs, l'horizontale est donnée par la valeur 50 (5mm) et non 0. La lame est alors verticale et ne provoque pas de déviation de la ligne de visée.



Attention

- ◆ si l'on souhaite implanter l'horizontale, c'est-à-dire à la même altitude que l'axe optique du niveau, il ne faut pas caler le micromètre à 0. Un risque d'erreur de 5mm est toujours possible en implantation.
- ◆ en nivellement de voûtes (mire à l'envers), le zéro de la mire est posé vers le haut ce qui entraîne une erreur de lecture.

7. Dispositifs de lecture : lecture numérique

Principe

Un capteur CCD identifie la division codée de la mire de nivellement et la convertit en un modèle de signal, analysable par le niveau numérique par une méthode de corrélation. Cette procédure d'évaluation détermine non seulement la lecture de la mire mais aussi la distance par rapport au centre d'anallatisme . [Intersection de l'axe principal et de la ligne de visée]L'image code-barres transmise au détecteur est comparée avec un code de référence enregistré dans l'instrument.

Deux facteurs interviennent dans cette comparaison :

- ◆ L'échelle : l'échelle de l'image de code est fonction de la distance entre l'instrument et la mire de nivellement
- ◆ La hauteur : la différence de hauteur entre l'instrument et la mire se traduit par un décalage de l'image code-barres

Partie B. Mires

1. Les différents types de mires

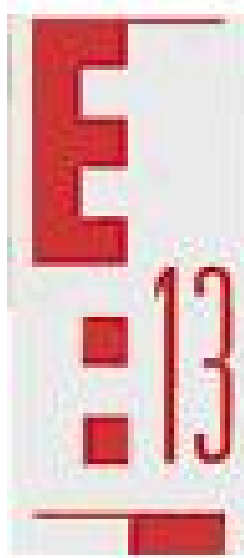
Principe

Principe

Ce sont des règles graduées, tenues verticalement, sur lesquelles sont faites les mesures. Elles sont à manipuler avec grand soin car elles sont aussi garantes de la précision.

Mires en bois ou aluminium

Mires en bois ou aluminium



▲ IMG. 11 : MIRE EN BOIS OU EN ALU

Pour des travaux de chantiers, les graduations sont centimétriques, la lecture s'effectue à l'estime (mm). La qualité géométrique de ces mires évolue en fonction de l'humidité de la température (dilatation du bois), elles sont à proscrire en nivellement de précision.

Mires invar

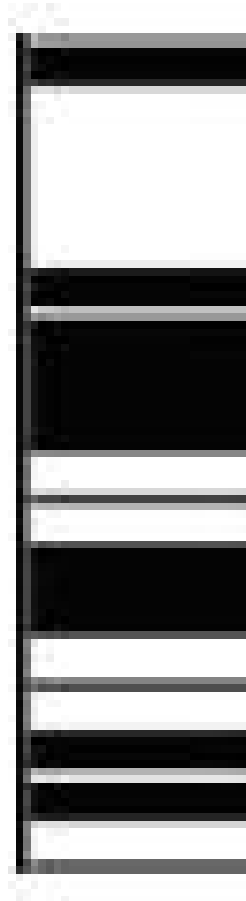
Mires invar

Elles sont constituées d'une lame d'invar tendue à 10 kg entre deux poutrelles en acier et équipées de nivelles sphériques pour la bonne mise en verticalité.

La lame en métal invar (coefficient de dilatation $\alpha = 10^{-6}$) a souvent un double système de graduations qui permet d'éliminer les fautes de lectures. Elles mesurent de 2 à 3 m ; mais on trouve aussi des mires réglets de 0,50 à 1 m de long.

Mires codes barres

Mires codes barres



▲ IMG. 12 : MIRE CODE-BARRE

En fibre de verre ou en invar suivant la précision cherchée, le coefficient de dilatation va de 10 à 1ppm. Les graduations sont remplacées par des éléments de code- barres dont l'élément de base mesure 2mm environ. Le code barre complet comprend 5000 éléments par mètres de mire.

Partie C. Autres accessoires

1. Supports de mires



▲ IMG. 13 : CRAPAUD

Afin d'éviter la pose de trop nombreux points les observations peuvent s'effectuer sur un repère temporaire appelé « crapaud ». Ce sont des plateaux en acier, surmontés d'une tête hémisphérique et équipés de 3 pointes acier pour le maintien au sol. Parfois se sont de longues tiges de fer pour les sols meubles. Ils servent de supports intermédiaires pour poser les mires. Il faut bien les enfoncer (sans taper sur la tête hémisphérique !), et faire attention au serrage (dessoudure) des pointes.

2. Trépieds

Il faut éviter les trépieds coulissants lourds, et utiliser des trépieds spécifiques monoblocs, rigides, légers. Pour un meilleur confort ils existent en différentes longueurs. Il faut vérifier fréquemment le serrage des têtes.

3. Repères

Ils doivent toujours comporter un bossage hémisphérique.

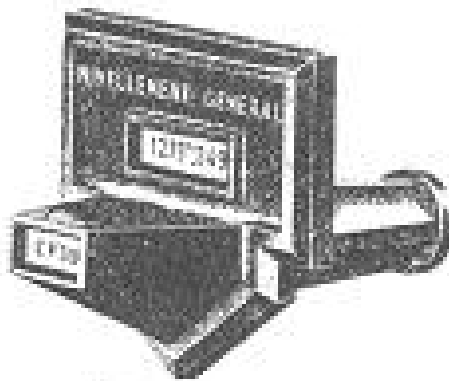
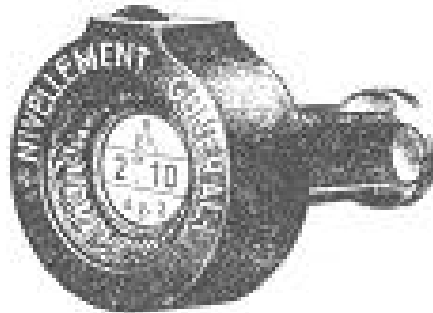


FIGURE 3 : REPERTOIRE (M. AZOUZ)

▲ IMG. 14 : REPÈRE



▲ IMG. 15 : REPÈRE



Repère cylindrique (ex. IMG. 15)

▲ IMG. 16 : REPÈRE

Il faut proscrire les spits, clous, fers à béton etc...qui ne présentent pas de bossage.



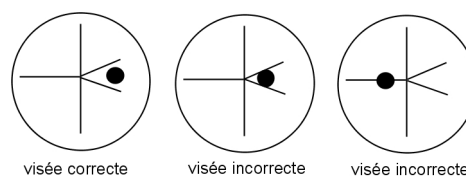
▲ IMG. 17

Erreurs en nivellement direct

Partie A. Erreurs liées aux niveaux

1. Erreurs de lecture

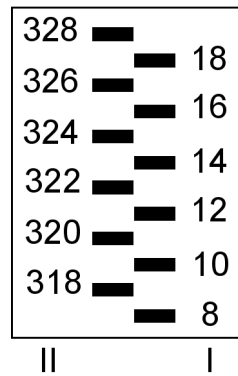
C'est une erreur accidentelle liée à la précision du dispositif de lecture, au grossissement de la lunette, à la qualité de l'opérateur, mais aussi et surtout à la mise au point délicate due aux turbulences de l'atmosphère. Dans ce cas il faudra alors raccourcir les visées, et il est conseillé de faire plusieurs pointés, toujours par encadrement.



▲ SCH. 8 : ERREUR DE LECTURE

2. Faute de lecture

Faute de lecture



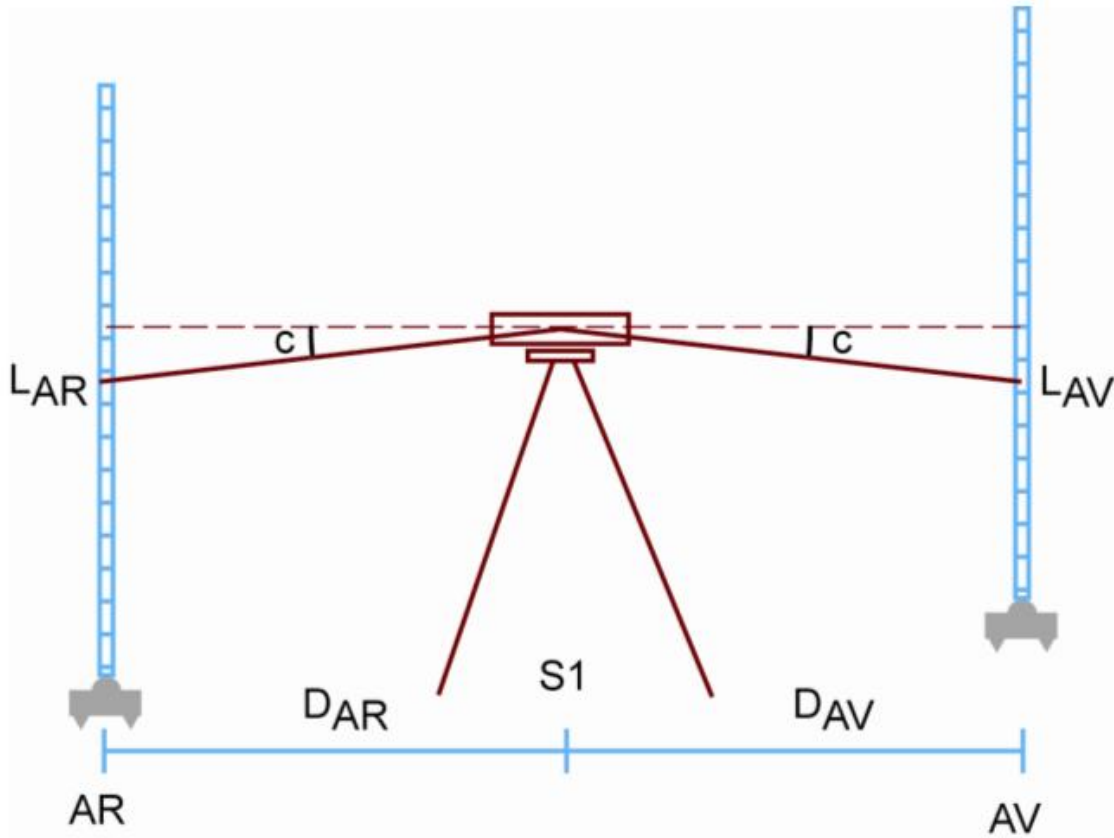
▲ SCH. 9 : FAUTE DE LECTURE

La principale faute en nivellement direct est la faute de lecture. Sur certaines mires, les chiffres n'étant indiqués que tous les 2cm, on craint une faute de 1cm. A cet effet ces mires disposent de deux échelles de graduations décalées, que l'on désignera sous l'appellation Face I et Face II. On effectue une lecture sur les deux faces et la différence II-I égale une constante +/- la précision de lecture.

3. Erreur de collimation

Mécaniquement l'axe optique du niveau n'est jamais parfaitement horizontal même si la bulle est calée ou le compensateur libéré: cette erreur (collimation c) est proportionnelle à la longueur des visées et s'élimine lorsque les portées sont égales.

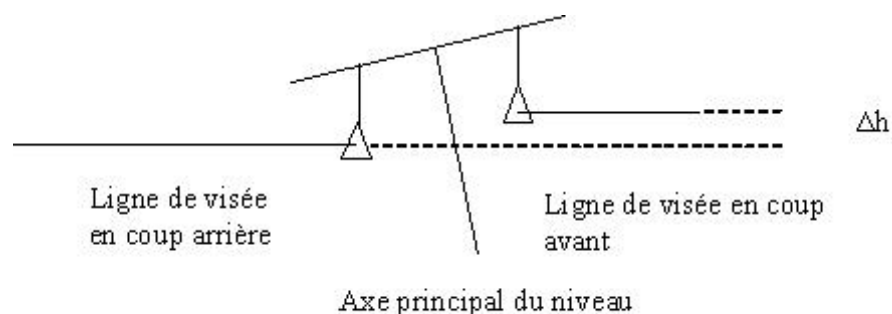
Cette erreur est minime elle a été volontairement exagérée ici afin de pouvoir être observable.



▲ IMG. 18 : SCHÉMA ERREUR DE COLLIMATION

4. Erreur de hauteur d'axe

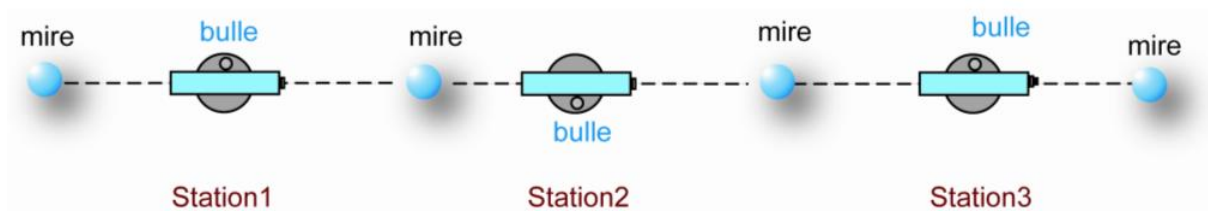
Elle provient du fait que l'axe du basculement de la lunette (pour les niveaux à bulle) ou du point de compensation (niveaux automatiques) n'est pas centré sur l'axe principal de la lunette ; celui-ci est verticalisé avec la bulle sphérique ($r=1m$) qu'il faut contrôler le plus souvent possible. Cela revient à ce que les horizontales de la visée arrière et de la visée avant ne soient pas à la même altitude. Cette différence ΔH est très petite 0,01 à 0,05 mm mais *systématique*, elle risque donc de se cumuler pour les longs cheminements.



▲ IMG. 19 : ERREUR DE HAUTEUR D'AXE

Pour éliminer cette erreur on procède par « mise en station alternée » : pour chaque station on bulle l'appareil la lunette tantôt dirigée dans le sens du cheminement « coup AV » tantôt en sens contraire « coup AR ». Si l'on dispose de 2 portes mire (saute-mouton) on dirige la lunette toujours en direction du même porte mire pour C'est la méthode dite du « pantalon rouge ». Ainsi pour 2 portées, l'erreur ΔH

s'élimine. Il faut en outre s'astreindre à faire un nombre pair de nivelées (ou « fermer » le cheminement avec le porte mire de départ).



▲ IMG. 20 : ERREUR DE HAUTEUR D'AXE

Partie B. Erreurs liées aux mires

1. Verticalité

La verticalité des mires est assurée par le calage d'une bulle sphérique entre ses repères. La mire est alors dite « bullée ». Un défaut de bullage entraîne une erreur sur la lecture :

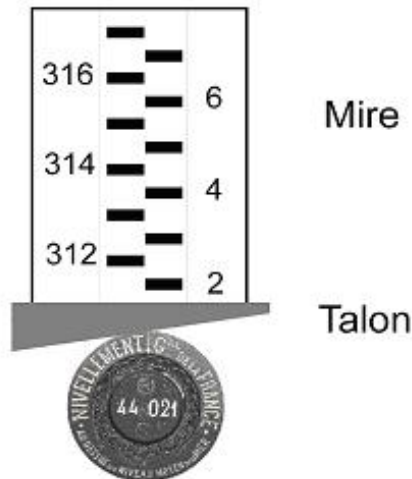
$$e = l - l \cos(\alpha) = l \cdot (1 - \cos(\alpha)) \simeq l \left(1 - \left(1 - \frac{\alpha^2}{2} \right) \right) \simeq \frac{l \alpha^2}{2}$$

Avec l lecture sur la mire et α angle d'inclinaison

Par exemple si la mire mesure $l = 3\text{m}$ et « penche » de 3cm alors $\alpha = 10^{-2}\text{rd}$. Cela entraîne une erreur de $\left(\frac{3}{2}\right) 10^{-4}\text{m} = 0.1\text{mm}$ ce qui avoisine l'écart type de pointé.

2. Défaut du talon de mire

Le talon de la mire est constitué d'une pièce en acier trempée fixée à la partie inférieure de la mire. Les mesures en nivellement de précision sont effectuées avec une résolution de 0.1mm, les défauts du talon doivent donc être du même ordre de grandeur.



▲ IMG. 21 : DÉFAUT DU TALON DE MIRE

Horizontalité du talon

On utilise généralement le centre du talon pour poser une mire mais ceci est parfois impossible. Il faut contrôler au niveau, en posant la mire sur un crapaud stable. En effectuant des lectures successives, le centre du talon puis ses 4 coins étant en contact avec le bossage du crapaud.

Zéro du talon

Le zéro de la mire (origine des graduations) doit être, en théorie, le bas du talon. Si on utilise la même mire pour déterminer une nivelée cela n'a pas d'incidence, l'erreur d'origine s'annule entre la mesure arrière et la mesure avant (coup AV et coup AR) par différence de lecture.

3. Appairage des mires

Si l'on utilise deux mires, il faut vérifier leur appairage (même zéro du talon) en procédant comme en (3) avec les deux mires. Si on utilise la méthode du saut de mouton et si les points intermédiaires sont des crapauds la différence d'origine n'a pas d'incidence sur la dénivelée globale à condition de mesurer le repère initial et le repère final avec la même mire ce qui revient à effectuer un nombre pair de stations. Les altitudes des crapauds intermédiaires sont elles erronées.

4. Etalonnage des mires

Elles peuvent ne pas être conformes au mètre étalon et présenter des défauts de graduations. A l'IGN on procède à leur étalonnage au comparateur à 0,01mm. On obtient une *correction* de la forme $c = \beta + \alpha_{\text{lecture}}$ lecture calculée par méthode des moindres carrés. Si l'on utilise 2 mires, il faut les choisir avec un α identique, en effet la constante β s'élimine comme erreur de talon. Si les deux mires ont même α on corrige la valeur de la dénivelée totale obtenue $DN = \sum dn_i$ de la quantité $\alpha \cdot DN$

En effet :

$c = DN_{\text{vrai}} - DN_{\text{observée}} = \Sigma(L_{AR} + \alpha L_{AR}) - \Sigma(L_{AV} + \alpha L_{AV}) = \alpha(\Sigma(L_{AR} - L_{AV})) = \alpha DN_{\text{observée}}$
 αL_i étant les corrections à apporter aux lectures.

Cette erreur est généralement faible, il faut cependant la prendre en compte lors de cheminement à fortes dénivelées (col en montagne par exemple).

Partie C. Erreurs dues au milieu

1. Sphéricité

Les verticales ne sont pas parallèles, cette erreur est éliminée par égalité des portées.

2. Réfraction

L'incidence de la réfraction est *très importante* au ras du sol. Si celui-ci est horizontal on peut penser que l'égalité des portées minimise son effet, mais ce n'est pas vrai en cas de fortes pentes où elles peuvent être très différentes. Il est conseillé, ne serait-ce que pour minimiser l'erreur de verticalité, d'éviter les fortes pentes, de raccourcir les visées et ne pas travailler par forte chaleur.

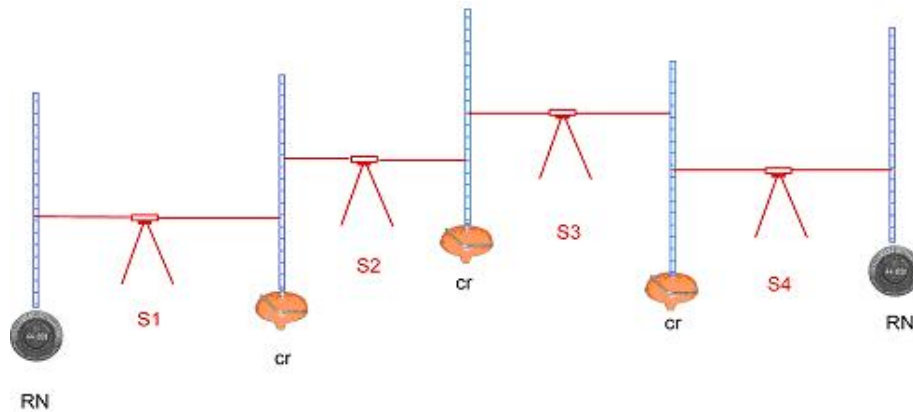
3. Stabilité du sol

Se méfier des réactions du sol sur le trépied et les crapauds, attention au goudron, préférer le terrain naturel. Attention à l'ensoleillement du trépied, à l'éclairage des mires qui sont des causes d'erreurs systématiques mises en évidence sur les grands cheminements (elles sont liées au sens de marche). Si l'on souhaite de la précision, on effectue le cheminement ALLER et RETOUR, seule manière permettant (en théorie du moins) de les éliminer.

Partie D. Méthodes d'observation

1. Cheminement encadré : principe

Principe

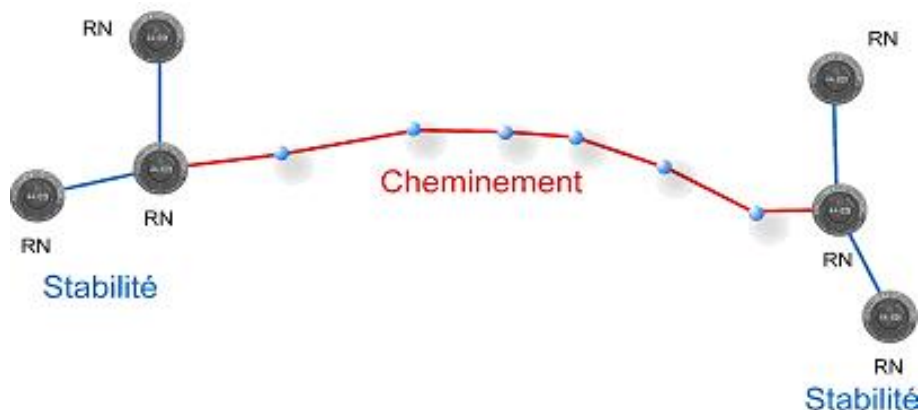


▲ IMG. 22 : PRINCIPE DU NIVELLEMENT

On procède par cheminement composé de n dénivelées élémentaires en général effectuées entre deux repères d'altitudes connues. On rappelle que la dénivelée élémentaire dn est obtenue par la différence de lecture effectuées sur deux mires « ARrière » et « AVant » $dn = (l_{AR} - l_{AV})$

2. Cheminement encadré : stabilité

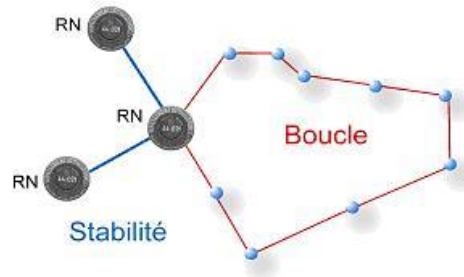
Stabilité



▲ IMG. 23 : STABILITÉ

Lorsque l'on désire transmettre l'altitude connue d'un repère à un autre, il est impératif de s'assurer que celui-ci n'a pas subi de mouvement. On nivelera alors ce repère aux repères voisins (connus) l'encadrant. On comparera alors la différence d'altitude ΔH à la dénivelée nouvellement remesurée ($\sum dn_i$). Dans les zones instables (cela existe) il est parfois nécessaire d'étendre assez loin les opérations de stabilité jusqu'à ce que $(\Delta H - \sum dn_i)$ soit suffisamment petit à une tolérance près en général fonction du nombre de dénivelée du cheminement. On estime cette tolérance à quelques mm/km près.

3. Cheminement en boucle

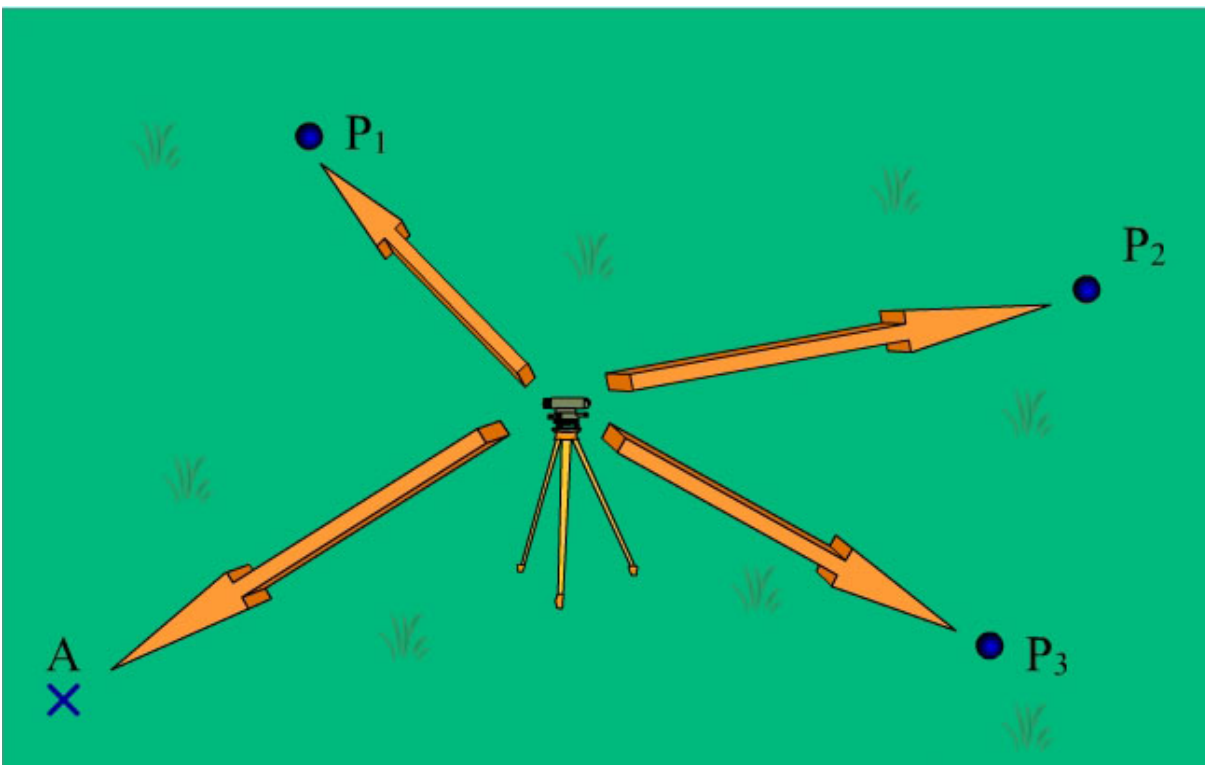


▲ IMG. 24 : CHEMINEMENT EN BOUCLE

La méthode de boucle n'offre aucune garantie quant à l'altitude du repère de départ (qu'il convient donc de stabiliser), mais est la plus sécurisante quant à la qualité du cheminement : en effet $(\sum dn_i)$ devra être proche de 0. Effectuer l'aller puis le retour permet l'élimination d'éventuels systématismes liés au sens de marche. Lors du nivellement de zones instables ou d'ouvrages d'art. A on peut procéder avec 2 opérateurs partant simultanément des deux extrémités.

4. Nivellement par rayonnement

Le nivellement par rayonnement se fait à partir d'une seule station. On détermine les altitudes de différents points intermédiaires par rapport à un repère connu (point A).



▲ IMG. 25 : NIVELLEMENT PAR RAYONNEMENT

A titre de contrôle, on peut vérifier les altitudes des points importants en les prenant de 2 stations différentes.

5. Exemple de calcul

Les mesures et calculs peuvent être consignées dans un carnet de nivellement :

Points nivelés	Lectures		$\Delta H_i = LAR_i - LAV_i$		Altitudes brutes m	Comp		Altitudes compensées m
	AR m	AV m	+	-		C_i	ΣC_i	
A	1,976				1000,000			1000,000
			1,096			-1	-1	
P ₁	0,448	0,880			1001,096			1001,095
				-3,097		-2	-3	
P ₂	1,098	3,545			997,999			997,996
				-2,833		-1	-4	
P ₃	2,614	3,931			995,166			995,162
			0,584			0	-4	
P ₄	1,977	2,030			995,750			995,746
			0,918			0	-4	
P ₅	3,501	1,059			996,668			996,664
			3,338			-2	-6	
A		0,163			1000,006			1000,000
	ΣLAR	ΣLAV	5,936	-5,930			-6 mm	
	11,614	11,608	e = +0,006				fermeture	
	Contrôle +0,006							

▲ IMG. 26 : CARNET DE NIVELLEMENT

On s'aperçoit ici que l'écart de fermeture e vaut 6 mm et il faut le compenser. Dans le cas d'un cheminement simple, on répartit l'écart de fermeture proportionnellement au nombre de cotée.

Préparations et réglages

Partie A. Réglage des matériels

1. Nivelles sphériques du niveau

Le dérèglement de la nivelle sphérique occasionne l'erreur dite de « hauteur d'axe » qui est faible mais systématique. Quelque soit le type d'appareil utilisé, il convient donc de procéder au réglage de cette nivelle. L'opérateur amène la bulle entre ses repères à l'aide des vis calantes de l'appareil. Il fait ensuite pivoter l'appareil de 200 degrés autour de son axe principal. La bulle est réglée si sa position reste invariante. Dans le cas contraire, la position d'équilibre de la bulle est mi-distance des 2 positions précédentes. Pour buller le niveau, il suffit d'amener la bulle dans sa position d'équilibre à l'aide des vis calantes. Le niveau étant horizontal, l'opérateur amène la bulle au centre du repère en actionnant les vis de réglage du support de la nivelle.

L'opérateur amène la bulle entre ses repères à l'aide des vis calantes de l'appareil. Il fait ensuite pivoter l'appareil de 200 degrés autour de son axe principal. La bulle est réglée si sa position reste invariante. Dans le cas contraire, la position d'équilibre de la bulle est mi-distance des 2 positions précédentes. Pour buller le niveau, il suffit d'amener la bulle dans sa position d'équilibre à l'aide des vis calantes. Le niveau étant horizontal, l'opérateur amène la bulle au centre du repère en actionnant les vis de réglage du support de la nivelle.

2. Réglage de la collimation

L'erreur de collimation est due à la non horizontalité de l'axe optique du niveau. Mécaniquement, cette horizontalité n'est jamais parfaitement réalisée et ce, même lorsque la nivelle est calée entre ces repères et que le compensateur est libéré.

La collimation n'a en théorie pas d'incidence lorsque l'on respecte strictement l'égalité de portées mais cela n'est pas toujours possible sur certains chantiers. Il convient donc de vérifier souvent la collimation (idéalement avant chaque séance d'observations) et de procéder au réglage du niveau si nécessaire.

Mise en évidence du dérèglement

- ◆ On mesure la dénivelée entre deux crapauds espacés d'environ 25m en respectant l'égalité de portée, c'est-à-dire en positionnant strictement le niveau à mi-distance des deux mires. On obtient ainsi une dénivelée « vraie », l'erreur de collimation s'éliminant par différence des lectures.
- ◆ Sans changer la position des crapauds et des mires, on positionne le niveau à 5 mètres d'une mire et donc à 45 mètres de l'autre mire. On mesure alors la dénivelée que l'on compare à la dénivelée « vraie ». Si les deux dénivelées sont cohérentes à quelques dixièmes de millimètre près, on considère le niveau comme réglé. Dans le cas contraire, il faut procéder à son réglage.

3. Réglage du niveau

Sur la plupart des niveaux électroniques, l'erreur de collimation une fois quantifiée, est prise en compte et les lectures automatiquement corrigées (se référer à la notice de l'appareil). Sur les niveaux « classiques », l'opérateur doit régler le réticule du niveau. L'erreur due à la collimation étant proportionnelle à la longueur de la visée c'est, lors de seconde mesure de dénivelée, la visée la plus lointaine qui est principalement entachée d'erreur. Connaissant la dénivelée « vraie » et considérant que la lecture proche est exacte, on peut en déduire la lecture théorique de la visée lointaine.

Dans le cas où le niveau est muni d'un système à faces parallèles, l'opérateur affiche la lecture théorique à l'aide du micromètre puis actionne la vis de réglage du réticule pour amener celui-ci à encadrer la graduation de mire. Une fois le réglage effectué, on effectue une nouvelle mesure de contrôle de la dénivelée avec le niveau en position excentrée.

Cette opération de réglage peut-être délicate à réaliser dans de mauvaises conditions d'observations.

4. Nivelles sphérique de la mire

La nivelle sphérique permet de positionner la mire verticalement. Si l'erreur engendrée par un léger dérèglement est faible, c'est une erreur systématique dans son signe et qui est proportionnelle à la lecture. Il est donc important de vérifier la verticalité de la mire avant chaque séance d'observations. On peut noter qu'un dérèglement important peut être mis en évidence en vérifiant que la mire est bien parallèle au trait vertical du réticule du niveau.

De manière générale, pour contrôler une nivelle, il faut comparer la position de la mire lorsque la bulle de la nivelle est calée entre ses repères avec la verticale. Pour un réglage fin on utilise un théodolite, le contrôle étant effectué suivant deux directions perpendiculaires. Pour un réglage expédié, on peut utiliser un fil à plomb.

Lorsqu'on constate un dérèglement, la mire est positionnée verticalement (suivant les

directions définies par les théodolites) et la bulle amenée au centre de la nivelle en utilisant les vis calantes de son support. Le serrage des vis doit être effectué délicatement pour ne pas fausser le support de la nivelle.

5. Etalonnage des mires

C'est une opération qui ne peut pas être réalisée sur le terrain. Elle consiste en laboratoire à comparer l'échelle de graduation de la mire à un mètre étalon et à déterminer la constante α de la mire (voir Erreurs liées aux mires / Etalonnage des mires)

Partie B. Procédure de mesures

1. Mise en place du trépied

Avant les mesures il faut vérifier le bon serrage des éléments constitutifs du trépied (branches, embases....)

Il est important de bien choisir sa station pour que le trépied soit le plus stable possible. Il faut éviter les sols trop meubles ainsi que le goudron par forte chaleur. Il faut ensuite bien enfoncer les pointes du trépied dans le sol pour stabiliser l'instrument pendant la mesure.

En cas de vibration du trépied du au vent par exemple, l'opérateur peut atténuer ce phénomène en tenant avec la main le trépied au deux tiers de sa hauteur.

2. Mise en place du niveau

Introduire la vis centrale du trépied dans l'embase du niveau.

Visser et serrer modérément.

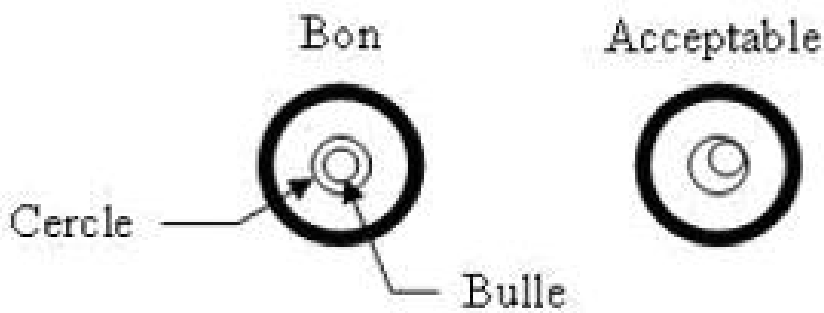
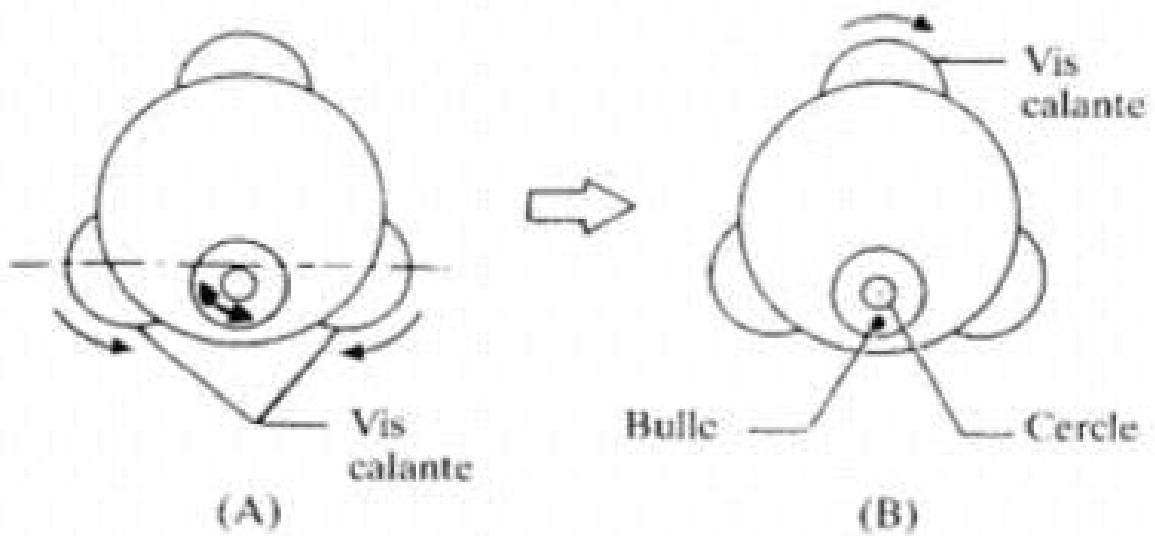
3. Calage à la verticale

Centrer la bulle en actionnant deux vis calantes. Tourner les vis dans des sens opposés. Corriger l'erreur de centrage résiduelle avec la troisième vis (voir B)



▲ IMG. 27 : VIS CALANTES

Les sens de rotation des vis et du déplacement de la bulle sont indiqués sur les figures (A) et (B). La bulle se déplace dans le même sens que le pouce gauche ou dans le sens contraire à celui du pouce droit.



▲ IMG. 31

▲ IMG. 28 : BULLE

4. Mise au point du réticule de la lunette

Diriger la lunette vers un fond bien éclairé et tourner l'oculaire jusqu'à ce que les traits du réticule apparaissent nets et bien noirs.



▲ IMG. 29 : MISE AU POINT DU RÉTICULE

5. Mise au point de l'image vers la mire

Amener l'image de la mire dans le champ de la lunette à l'aide du viseur.

Mettre au point l'image de cette mire à l'aide du bouton latéral de mise au point.
Affiner avec la vis de fin pointée de façon à amener le trait vertical du réticule en coïncidence avec une ligne imaginaire passant par le centre de la mire.



▲ IMG. 30 : MISE AU POINT DE L'IMAGE