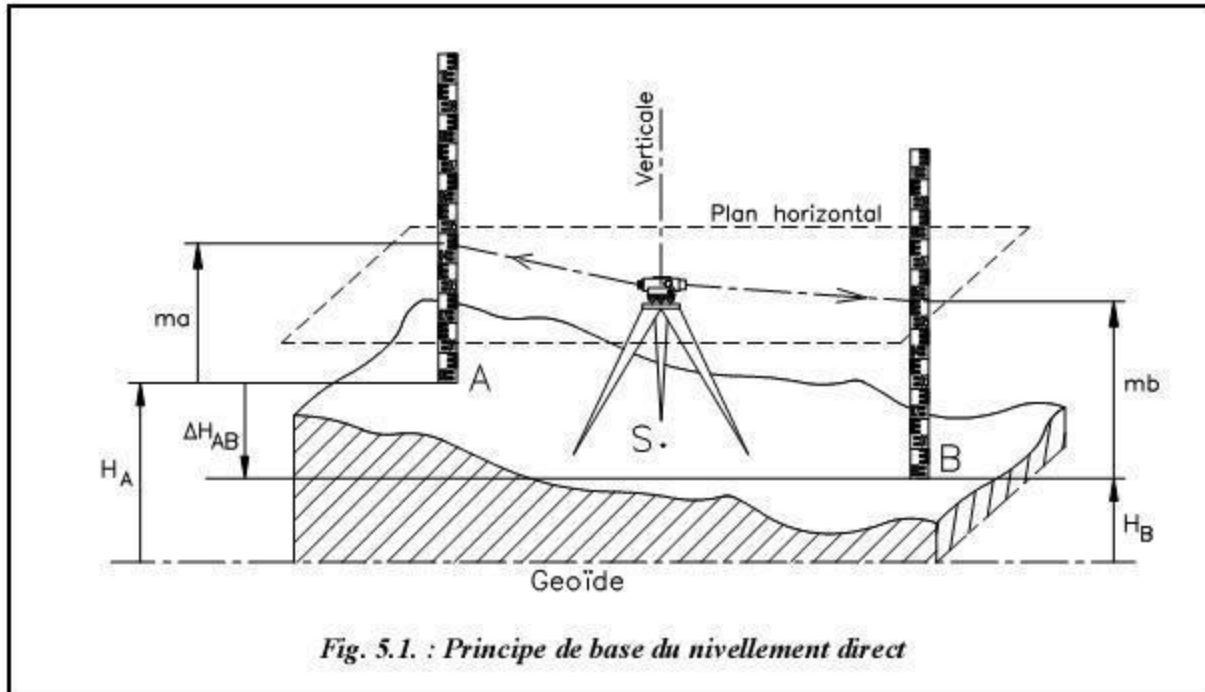


1 – Généralités

1 – 1 Principe



Le **nivellement direct** consiste à déterminer la **dénivelée** ΔH_{AB} entre deux points A et B à l'aide d'un appareil : le **niveau** et d'une échelle verticale appelée **mire**.

Le niveau est constitué d'une optique de visée tournant autour d'un axe vertical : il définit donc un plan de visée horizontal.

La mire est placée successivement sur les deux points A et B. L'opérateur lit la valeur L_A sur la mire posée en A et la valeur L_B sur la mire posée en B.

La différence des lectures sur mire est égale à la dénivelée entre A et B. Cette dénivelée est une valeur algébrique dont le signe indique si B est plus haut ou plus bas que A (si ΔH_{AB} est négative alors B est plus bas que A).

On note :

- la dénivelée de A vers B est :
- la dénivelée de B vers A est :

$$\Delta H_{AB} = m_a - m_b$$

$$\Delta H_{BA} = m_b - m_a$$

L'**altitude** d'un point A notée Alt_A est la distance comptée suivant la verticale qui le sépare du géoïde (surface de niveau 0). Si l'altitude du point A est connue, on peut en déduire celle du point B :

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

1 – 2 Lectures sur la mire

La mire est une échelle linéaire qui doit être tenue verticalement (elle comporte une nivelle sphérique) sur le point intervenant dans la dénivelée à mesurer. La précision de sa graduation et de son maintien en position verticale influent fortement sur la précision de la dénivelée mesurée.

Le réticule d'un niveau est généralement constitué de quatre fils :

- le fil **stadimétrique supérieur** ;
- le fil **stadimétrique inférieur** ;
- le fil **niveleur** ;
- le fil vertical

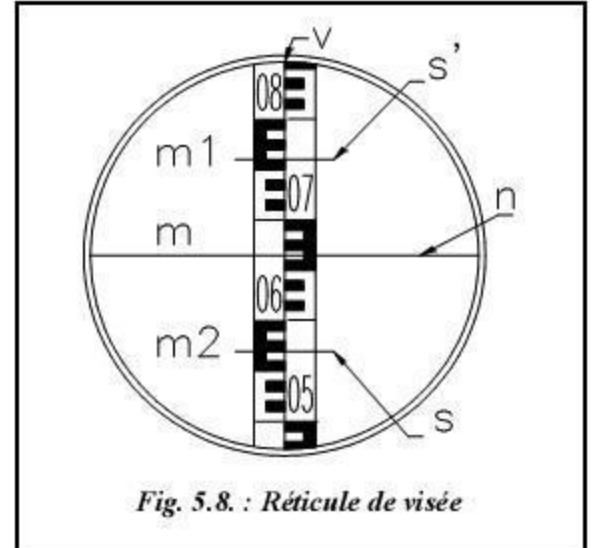


Fig. 5.8. : Réticule de visée

1 – 3 Interprétation des lectures sur la mire

La lecture sur chaque fil est estimée visuellement au millimètre près, par rapport à l'exemple page précédente :

- le fil **stadimétrique supérieur** (s'), qui donne une lecture m_1 sur la mire ;
- le fil **stadimétrique inférieur** (s), qui donne la lecture m_2 sur la mire ;
- le fil **niveleur** (n), qui donne la lecture m sur la mire ;
- le fil vertical (v), qui permet le pointé de la mire ou d'un objet.

Les fils stadimétriques permettent d'obtenir une valeur approchée de la **portée** (distance horizontale entre l'appareil et la mire) à l'aide de la relation :

$$Dh = (m_1 - m_2) \times 100$$

Dans l'exemple :

$$Dh = 100 \cdot (7,60 - 5,69) = 191 \text{ dm donc } Dh = 19,1 \text{ m} \pm 1,4 \text{ dm.}$$

Pour chaque lecture, il est judicieux de lire les trois fils horizontaux de manière à éviter les fautes de lecture: on vérifie en effet, directement sur le terrain, que :

$$m = \frac{m_1 + m_2}{2}$$

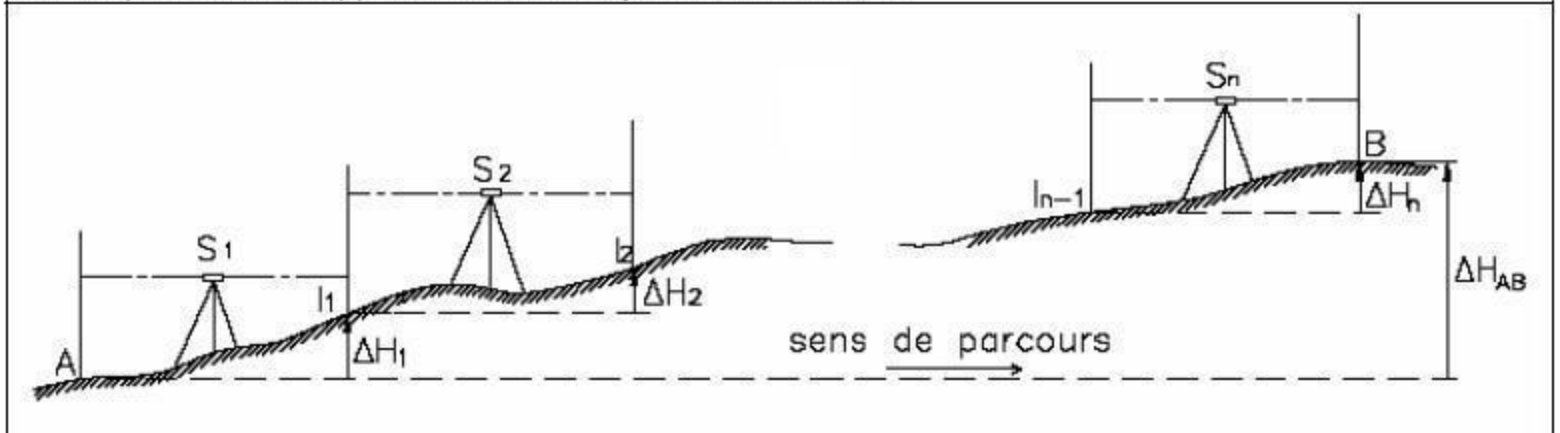
Dans l'exemple :

$$6,64 \text{ dm} \approx (5,69 + 7,60)/2.$$

2 – Le cheminement

2 – 1 Cheminements simples

Lorsque les points A et B sont situés de sorte qu'une seule station du niveau ne suffit pas à déterminer leur dénivelée (éloignement, masque, dénivelée trop importante, etc.), il faut décomposer la dénivelée totale en dénivelées élémentaires à l'aide de points intermédiaires. L'ensemble de ces décompositions est appelé **nivellement par cheminement**.



Un **cheminement encadré** part d'un « point origine » connu en altitude, passe par un certain nombre de points intermédiaires et se referme sur un « point extrémité » différent du point d'origine et également connu en altitude.

Lorsque l'on cherche à déterminer l'altitude d'un point extrémité B à partir de celle connue d'un repère A, on effectue généralement un **cheminement aller-retour** de A vers A en passant par B. Ceci permet de calculer l'altitude de B et de vérifier la validité des mesures en retrouvant l'altitude de A.

Lorsqu'un cheminement constitue une boucle retournant à son point de départ A, on l'appelle **cheminement fermé**.

Dans tous les cas, le principe de calcul est le suivant :

- La mire étant sur le point origine « A », l'opérateur stationne le niveau en « S1 » dont il détermine l'éloignement en comptant le nombre de pas séparant A de S1, de manière à ne pas dépasser la portée maximale de 60 m. L'opérateur fait une **lecture arrière**, c'est-à-dire dans le sens de parcours choisi, sur le point « A », notée $L_{ar}(A)$;
- le porte-mire se déplace pour venir sur le premier point intermédiaire « I1 » le plus stable possible (pierre, socle métallique appelé « crapaud », piquet etc.) et dont il détermine l'éloignement en comptant lui-même le nombre de pas séparant « A » de « S1 » afin de pouvoir reproduire ce nombre de pas de « S1 » à « I1 » ;
- toujours stationné en « S1 », l'opérateur lit sur la mire la **lecture avant** sur « I1 » notée $L_{av}(I1)$; il est alors possible de calculer la dénivelée de « A » à « I1 » de la manière suivante :

$$\Delta H_{AI1} = L_{ar}(A) - L_{av}(I1)$$

- l'opérateur se déplace pour choisir une station « S2 » et ainsi de suite.

2-2 Cheminement mixte

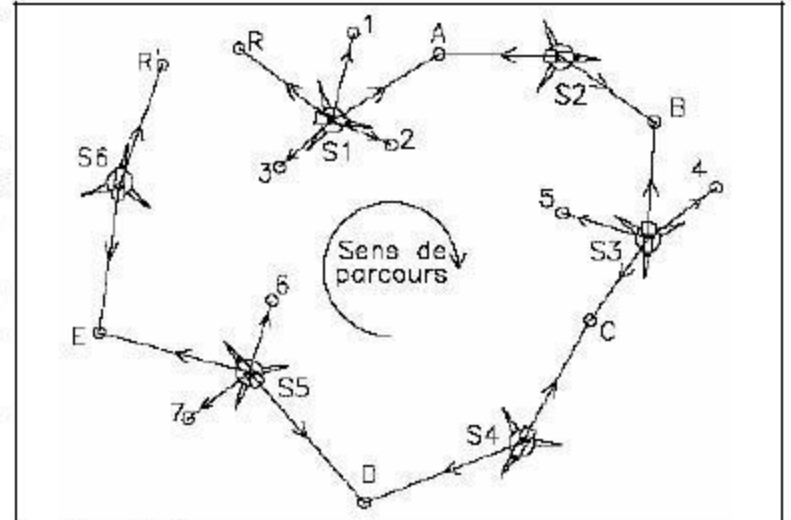
Depuis une station quelconque du niveau dans un cheminement, et après avoir enregistré la lecture arrière sur le point de cheminement précédent, l'opérateur vise plusieurs points de détail et effectue sur chacun d'eux une lecture unique qui est donc une lecture avant.

Ensuite, il termine la station par la lecture avant sur le point de cheminement suivant. Par exemple, sur la figure ci-dessous, les points 1, 2 et 3 sont rayonnés depuis la station S1 dont le point arrière est la référence (R) et le point avant A. L'opération en S1 est appelée **rayonnement**. Lorsqu'un cheminement comprend des points rayonnés et des points cheminés, on dit que c'est un **cheminement mixte**.

Le cheminement de la figure ci-contre passe par les points R, A, B, C, D, E et R'. Les points 1, 2, 3, 4, 5, 6 et 7 sont rayonnés. L'ensemble est un cheminement mixte encadré entre R et R'. Sur le carnet de nivellement, un point rayonné est repérable directement au fait qu'il ne comporte pas de lecture arrière.

Le mesurage terminé, on **calcule d'abord le cheminement sans tenir compte des points de détails rayonnés**.

Puis on calcule les points rayonnés et on les note, par exemple, dans une autre couleur.



Leur calcul est différent de celui des points cheminés. En effet :

- tous les points rayonnés depuis une même station sont calculés à partir de l'altitude du point arrière de la station. Cette différence de calcul entraîne souvent des erreurs qui peuvent être limitées par le respect du calcul en deux étapes : **d'abord le cheminement seul puis les rayonnements et par l'emploi de couleurs différentes** ;
- il n'y a pas de compensation sur la dénivelée d'un point rayonné puisqu'il n'y a pas de contrôle possible de sa valeur.

2-3 Règles sur la compensation

En règle générale sur un cheminement fermé et encadré, l'altitude du point de référence vraie est différente de l'altitude du point calculée, on a un écart de fermeture qu'il faut compenser.

Cet écart est calculé en faisant la **somme des lectures arrières – la somme des lectures avants**.

L'écart de fermeture peut provenir :

- d'une ou plusieurs lectures fausses,
- d'une mauvaise horizontalité de l'appareil,
- d'un dérèglement de l'appareil.

Ne sachant pas la vraie origine de l'écart de fermeture, on a établi la règle suivante :

1. L'écart de fermeture est faible, c'est à dire que l'écart est inférieur à l'écart type, dans ce cas la compensation est proportionnelle au nombre de dénivelées.

$$C = \frac{-e}{S_N} \quad \text{Avec } e \text{ pour l'écart, } S_N \text{ le nombre de stations.}$$

2. L'écart de fermeture est important, c'est à dire compris entre l'écart type et la tolérance, dans ce cas la compensation est proportionnelle à la hauteur des nivelées.

$$C = -\frac{e \times |\Delta_{HI}|}{\sum |\Delta_{HI}|} \quad \text{Avec } e \text{ pour l'écart, } \Delta_{HI} \text{ différence de hauteur entre 2 points.}$$

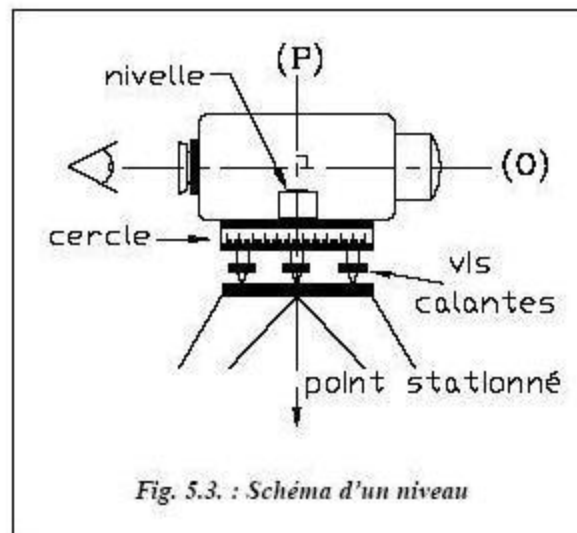
3 - Le niveau

3 - 1 Principe de fonctionnement

Le niveau est schématiquement constitué d'une optique de visée (lunette d'**axe optique (O)**) tournant autour d'un axe vertical (appelé **axe principal (P)**) qui lui est perpendiculaire (fig. 5.3.). Le réglage de la verticalité de l'axe principal est fait au moyen d'une **nivelle sphérique**. L'axe optique tournant autour de l'axe principal décrit donc un plan horizontal passant par le **centre optique** du niveau qui est l'intersection des axes (P) et (O).

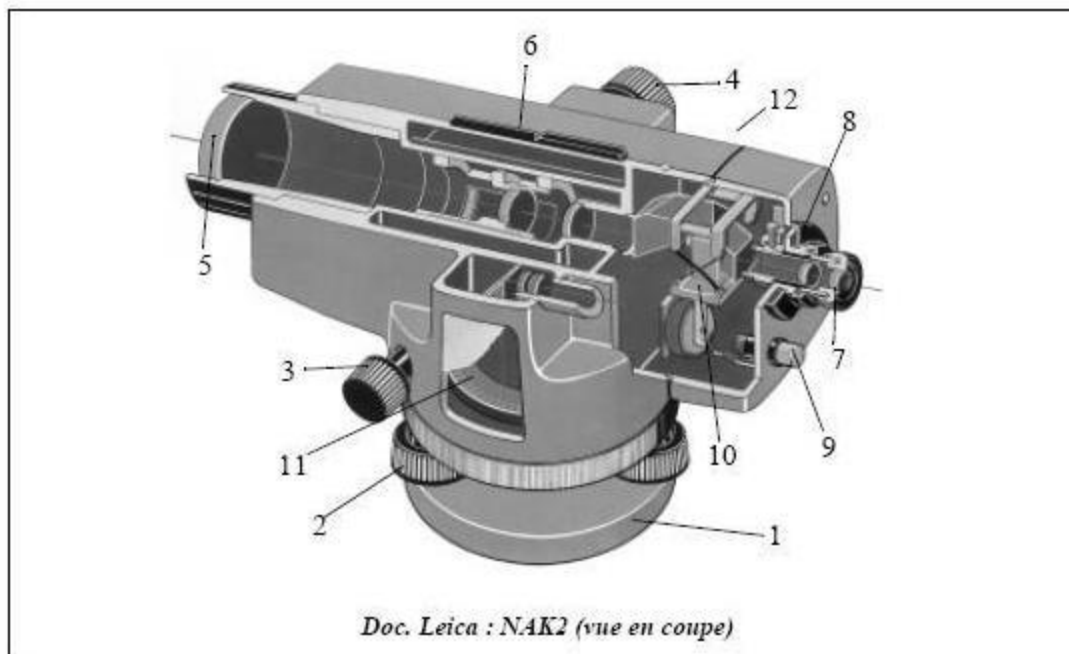
L'axe principal (P) peut être stationné à la verticale d'un point au moyen d'un fil à plomb, mais généralement le niveau est placé à un endroit quelconque entre les points A et B, si possible sur la médiatrice de AB (fig. 5.2.). Un niveau n'est donc pas muni d'un plomb optique comme un théodolite.

Certains appareils possèdent une graduation (ou **cercle horizontal**) qui permet de lire des angles horizontaux avec une précision médiocre, de l'ordre de $\pm 0,25$ gon : ils ne sont utilisés que pour des implantations ou des levés grossiers.



Les **éléments constitutifs d'un niveau** sont les suivants :

- | | |
|--------------------------------|---|
| - 1. Embase | - 7. Oculaire |
| - 2. Vis calantes (3 vis) | - 8. Anneau amovible |
| - 3. Rotation lente | - 9. Contrôle de l'automatisme |
| - 4. Mise au point sur l'objet | - 10. Compensateur à pendule |
| - 5. Objectif | - 11. Cercle horizontal (option sur le NA2) |
| - 6. Viseur d'approche rapide | - 12. Nivelle sphérique (invisible ici) |



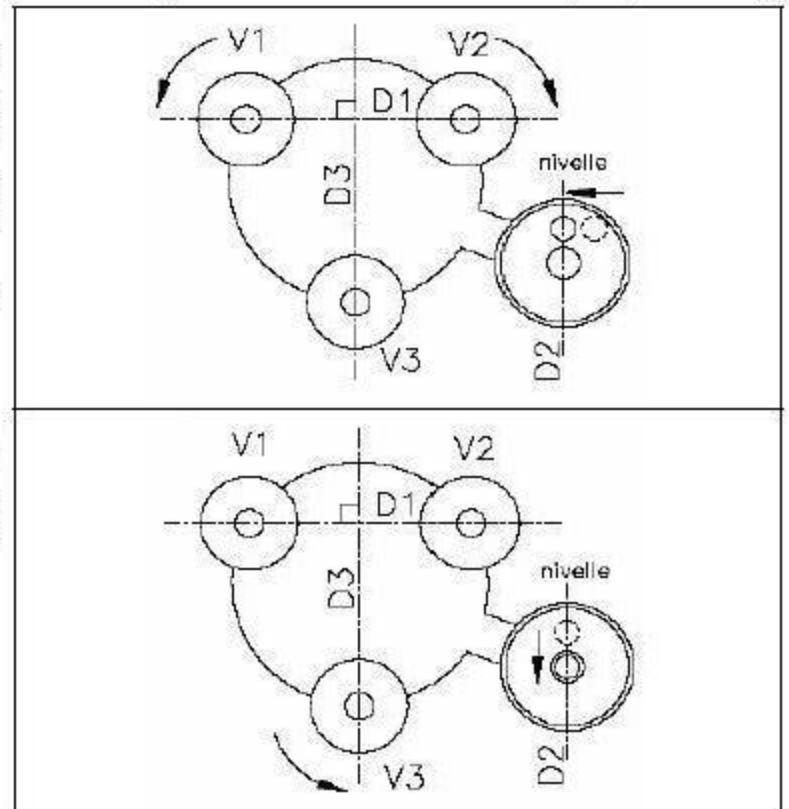


3 -2 Mise en station d'un niveau

Le niveau n'étant pas (ou très rarement) stationné sur un point donné, le trépied est posé sur un point quelconque. L'opérateur doit reculer après avoir positionné le trépied afin de s'assurer de l'horizontalité du plateau supérieur. Lorsque le plateau est approximativement horizontal, l'opérateur y fixe le niveau.

Le calage de la **nivelles sphérique** se fait au moyen des vis calantes, comme indiqué sur la figure ci-contre. : en agissant sur les deux vis calantes V1 et V2 (en les tournant en sens inverse l'une de l'autre), l'opérateur fait pivoter le corps du niveau autour de la droite D3.

Il amène ainsi la bulle de la nivelles sur la droite D2 parallèle à D3.



En agissant ensuite sur la vis calante V3, il fait pivoter le niveau autour de la droite D1 et centre ainsi la bulle dans le cercle de centrage de la nivelles sphérique.

Ce calage n'est pas très précis car la nivelles sphérique est d'une **sensibilité** relativement faible : par exemple, pour un NA20, la sensibilité de la nivelles sphérique est de $8' / 2 \text{ mm}$ soit une rotation angulaire de 15 cgon pour un déplacement de 2 mm

Une erreur de calage de la bulle de $0,2 \text{ mm}$ entraînerait donc une erreur angulaire de $\epsilon = 1,5 \text{ cgon}$.

La visée sur une mire placée à 35 m donne un écart $e = 35 \cdot 10^3 \cdot \tan \epsilon \approx 8 \text{ mm}$ sur la mire (voir fig.). Nous verrons que les lectures sur mire sont appréciées au millimètre près : cette erreur due à l'imprécision de la nivelles est donc inacceptable.

En fait, sur un niveau moderne (dit « automatique »), le calage de la nivelles sphérique ne sert qu'à **approcher** l'axe principal de la verticale. L'horizontalité de la ligne de visée est ensuite calée plus finement par un **automatisme** qui ne fonctionne correctement que lorsque l'axe vertical est proche de la verticale.

Sur un niveau sans automatisme, une **nivelles torique** de directrice parallèle à l'axe optique permet un calage précis de la ligne de visée, mais elle doit être calée avant

chaque pointé sur mire . Son calage et son réglage obéissent aux mêmes principes que les nivelles toriques des théodolites

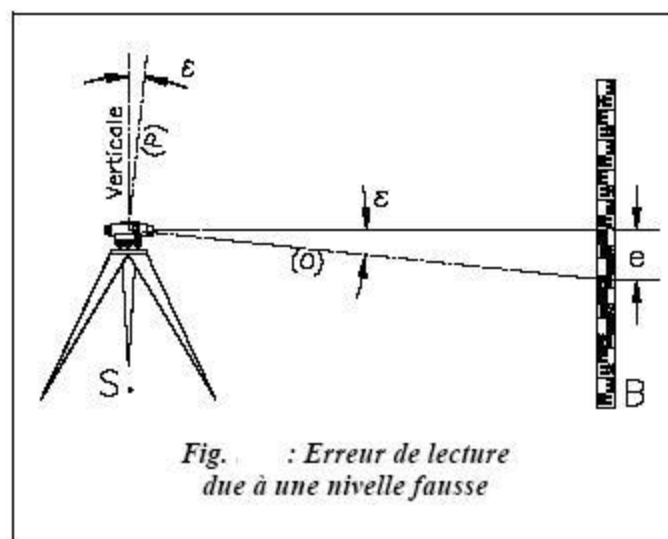


Fig. : Erreur de lecture due à une nivelles fausse

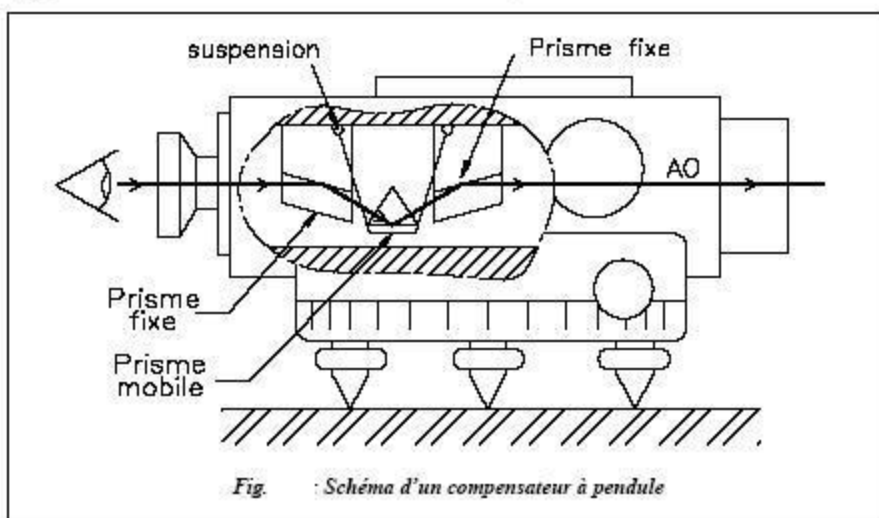


3.3. Le niveau automatique

Comme nous l'avons vu au paragraphe précédent, la nivelle sphérique permet un réglage d'approche de la verticalité de l'axe principal. Lorsque celui-ci est proche de la verticale (dans une certaine plage de débattement), l'axe optique est automatiquement positionné à l'horizontale par un **compensateur** qui, schématiquement, est un système mobile soumis à la pesanteur : sur la figure , le compensateur est composé de deux prismes fixes et d'un prisme mobile, libre d'osciller, suspendu à l'appareil par des fils. Sous l'action de la pesanteur, la rotation du prisme mobile assure l'horizontalité de la ligne de visée. Le compensateur peut aussi être basé sur l'équilibre d'un liquide, par exemple le mercure.

Le compensateur fonctionne dans une **plage de débattement** donnée : en dehors de cette plage, le mécanisme est en butée et ne remplit plus son rôle ; à l'intérieur de cette plage, le compensateur oscille librement. Cette plage est par exemple de $30'$ ($0,6\text{gon}$) pour un NA2, ce qui est supérieur à la sensibilité de la nivelle de manière à être certain que l'automatisme ne soit pas en butée.

La **précision de calage** obtenue par ce type d'appareil est excellente : par exemple $\pm 0,3''$ ($0,9\text{ dmgon}$) pour un NA2 induit un écart de $\pm 0,05\text{ mm}$ sur la mire à 35 m .



Il est à remarquer que, une mauvaise tenue de la mire n'a pas une grande influence sur la précision en nivellement ordinaire.

3.4. Précision et tolérance des lectures

Sont énumérées ci-après les différentes fautes et sources d'erreur possibles.

3.4.1 Fautes

On distingue les fautes de :

- **calage** : oubli de caler la bulle, compensateur bloqué ;
- **lecture** : confusion du trait niveleur avec un trait stadimétrique ; confusion de graduation ou d'unité ;
- **transcription sur carnet** : mauvaise retranscription de la valeur lue.

3.4.2 Erreurs systématiques

Les erreurs systématiques sont :

- l'erreur d'étalonnage de la mire ;
- le défaut de verticalité de la mire: bulle dérégulée ;
- l'erreur d'inclinaison de l'axe optique: axe optique non perpendiculaire à l'axe principal ;
- le défaut de fonctionnement du compensateur.



3.4.3. Erreurs accidentelles

Les erreurs accidentelles sont :

- l'erreur de **parallaxe** qui est une mauvaise mise au point de la lunette ;
- un mauvais **calage** de la bulle ;
- l'**erreur de lecture sur la mire** due à l'estimation du millimètre ;
- un mauvais **choix d'un point intermédiaire** : point non stable ;
- le **flamboisement de l'air** : il faut éviter les visées en bas de mire près du sol lorsqu'il fait chaud ;
- l'**erreur de pointé de l'objet** : elle est due à la forme du réticule (un seul fil pour un pointé ordinaire ou par bissection, deux fils pour un pointé par encadrement, voir chapitre 3, § 2.4.1). Pour une lunette de grossissement G , on peut estimer cette erreur comme suit :
 - pointé ordinaire : $100 \text{ dmgon}/G$, ce qui donne pour un NA 20 ($G = 20$) 5 dmgon , soit $0,3 \text{ mm}$ à 35 m ;
 - pointé par encadrement ou bissection : $\approx 50 \text{ dmgon}/G$ ($2,5 \text{ dmgon}$), soit $0,15 \text{ mm}$ à 35 m .

3.4.4. Compensation des erreurs

Si l'écart de fermeture est inférieur à la tolérance, il faut compenser les dénivelées pour obtenir un écart nul.

- Si les portées sont équivalentes, alors la compensation est répartie également sur l'ensemble du cheminement,
- Si les portées sont différentes, alors la compensation est proportionnelle à chaque portée.

3.4.5. Écarts types

Ils varient suivant les niveaux et les mires utilisées (voir norme DIN 18723), le soin apporté au mesurage, la stabilité des points de mire, la force du vent, etc. En nivellement ordinaire, on cumule les erreurs de lecture sur mire listées ci-après :

- une erreur due au **calage de l'axe principal** (sur un niveau non automatique) de $\pm 0,5 \text{ mm}$ à 30 m . Cette valeur est pessimiste puisqu'avec un niveau automatique du type NA20, la précision du calage est de $\pm 0,8''$ (soit $\pm 2,5 \text{ dmgon}$), ce qui donne une erreur sur la mire de $\pm 0,1 \text{ mm}$ à 30 m ;
- une erreur due à la tenue de la mire (plus ou moins verticale) et à l'appréciation de la lecture de $\pm 1 \text{ mm}$ à 30 m ;

une erreur sur le support de la mire (sol, crapauds éventuels, etc.) de $\pm 0,5 \text{ mm}$.

Soit un écart type de $\sqrt{0,5^2 + 1^2 + 0,5^2} = \pm 1,22 \text{ mm}$ pour une visée.

Pour une dénivelée (deux visées), cela donne : $\pm 1,22 \text{ mm} \cdot \sqrt{2} = \pm 1,73 \text{ mm}$.

Sur un parcours de N dénivelées, l'écart type est donc de : $\sigma = \pm 1,7\sqrt{N}$

Donc la tolérance sur la fermeture du parcours est de $2,7\sigma$ soit : $T_{\Delta H} = \pm 4,6\sqrt{N}$

Si l'on considère 16 dénivelées au kilomètre, on obtient : $\sigma = \pm 7 \text{ mm}$ pour 1 km .

Ces valeurs sont des valeurs usuelles utilisables pour des travaux courants.

3.4.6. Arrêté du 21/01/80 :

L'arrêté du 21 janvier 1980 publié au Journal Officiel du 19 mars 1980 précise les tolérances applicables au nivellement (tableau ci-contre). L est la longueur totale du parcours en kilomètre. « N » est le nombre de dénivelées. « n » est le nombre de dénivelées au kilomètre.

($n = N / L$). La valeur limite $n = 16$

correspond à un cheminement dont la distance moyenne entre points est de $62,50 \text{ m}$ soit une portée moyenne d'environ 30 m . Cette valeur est la limite supérieure autorisée en nivellement de haute précision.

Tolérances $T_{\Delta H}$ en mm	$n \leq 16$	$n \geq 16$
Ordinaire	$4\sqrt{36L + L^2}$	$\sqrt{36N + \frac{N^2}{16}}$
Précision	$4\sqrt{9L + L^2}$	$\sqrt{9N + \frac{N^2}{16}}$
Haute précision	$8\sqrt{L}$	$2\sqrt{N}$