

Les cours de la Topographies Niveau 2eme année GC et TP

1. Introduction générale

La détermination des coordonnées et de diverses caractéristiques de points dans l'espace occupe une place importante dans la plupart des études à buts environnementaux. L'objectif de ces déterminations est généralement l'étude de l'aspect géographique des inter-relations entre les divers paramètres ou indicateurs relevés.

L'objet de ce cours est de balayer l'ensemble des méthodes et techniques à la disposition des bureaux d'études pour acquérir des informations à la fois géométriques et thématiques sur des objets tridimensionnels, qui composent nos paysages urbains et naturels. Il ne s'agit évidemment pas de former des topographes chevronnés, mais bien de donner une culture technique de base pour permettre d'une part un dialogue avec les professionnels et d'autre part, lorsque c'est nécessaire, la mise en œuvre de protocoles de mesures simples.

Dans une première partie, nous rappellerons les notions géodésiques de base nécessaire à la compréhension de ce cours. Nous nous intéresserons ensuite aux méthodes de détermination directes de la topométrie classique : le nivellement direct et indirect, la triangulation et ses déclinaisons. Nous évoquerons rapidement les notions de précision et d'erreur de mesure. Enfin, nous présenterons les grandes caractéristiques du système GPS, ses capacités et ses modes d'exploitation. Nous terminerons par un aperçu rapide des méthodes de télédétection pour la génération de plans d'information géographique.

1.1. Une carte, un plan pour quoi?

La première question que doit se poser le cartographe ou le topographe est la suivante : quelles sont les informations que l'on souhaite obtenir du terrain ? Ceci doit permettre de définir le plus petit objet qui devra être visible sur la carte ou le plan, conditionnant ainsi l'échelle du document. On en détermine ainsi la teneur en information. Quelques exemples pour illustrer ces propos : nous partirons du principe que le plus petit détail aisément discernable, ainsi que la précision de report manuel, ne peuvent être inférieurs au dixième de millimètre. Ainsi, nous obtenons les relations suivantes entre les échelles classiques des documents et le type de détails représentés :

- Plan de maison → 1/50
- Plan de corps de rue (murs, égouts, trottoirs...) → 1/200 à 1/500
- Plan de lotissement, d'occupation des sols, cadastre → 1/1000 à 1/2000

L'échelle $1/m_b$ d'un document est souvent qualifiée de deux façons différentes et contradictoires : l'une qualifie le coefficient d'échelle m_b , et l'autre, le rapport d'échelle. Dans la suite, on se limitera à la seconde qui a le plus souvent cours dans les administrations et les fournisseurs de données.

1.2. Un panel de techniques et méthodes

Afin de décrire le terrain, on dispose de tout un panel de techniques et méthodes qu'il s'agit maintenant d'étudier, dans les grandes lignes. Le propos est, comme précisé plus haut d'en connaître les principes, le moyen de les mettre en œuvre efficacement pour des travaux restreints, de savoir quand faire appel à un professionnel et d'avoir avec lui un langage commun. Nous verrons comment choisir l'appareil et la technique adaptés au problème qui se pose, aux contraintes de précision de l'étude.

2. Notions géodésiques de base

Sans entrer excessivement dans les détails, nous rappelons ici les grandes notions de géodésie sur les systèmes, les surfaces de référence, les grandes familles de projection cartographique...

2.1. Quelques définitions

Les définitions qui suivent sont principalement tirées et inspirées de la notice technique de l'Institut Géographique National, intitulée : Notions géodésiques nécessaires au positionnement géographique (IGN, 2000).

2.1.1. Les paramètres essentiels

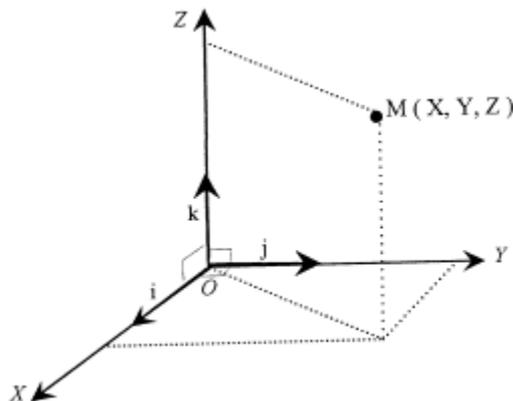
La mise en oeuvre de la géodésie et des techniques qui en sont dérivées nécessitent l'existence d'un jeu de paramètres essentiels :

- un système géodésique de référence
- un réseau géodésique de points matérialisés

2.1.1.1. Le système géodésique

Un système géodésique (ou datum géodésique) est un repère affine possédant les caractéristiques suivantes :

- le centre O est proche du centre des masses de la Terre
- l'axe OZ est proche de l'axe de rotation terrestre
- le plan OXZ est proche du plan méridien origine



Les coordonnées géodésiques du point M ne sont pas des valeurs objectives mais bien dépendantes d'un modèle théorique. Un point de la croûte terrestre est considéré fixe par rapport au système géodésique, malgré les petits déplacements qu'il peut subir (marée terrestre, surcharge océanique, mouvements tectoniques). Ainsi, il apparaît la nécessité de disposer d'une surface de référence : l'ellipsoïde.

2.1.1.2. Le réseau géodésique

Un réseau géodésique est un ensemble de points de la croûte terrestre (tels que des piliers, des bornes...) dont les coordonnées sont définies, estimées par rapport à un système géodésique. Plusieurs types de réseaux sont distingués :

- les réseaux planimétriques
- les réseaux de nivellement
- les réseaux tridimensionnels géocentriques

Pour résumer :

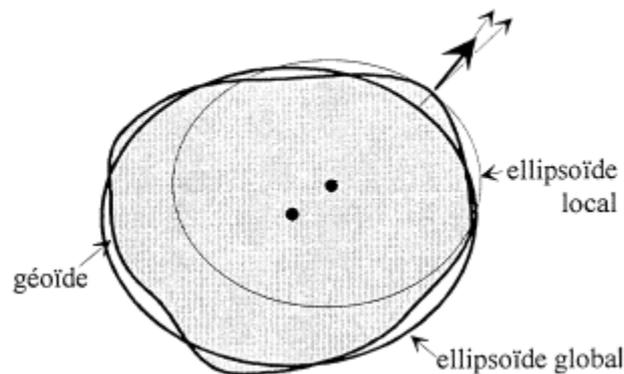
Avec le réseau, une réalisation géodésique nécessite donc la mise en oeuvre d'un système géodésique qui peut être résumé par l'ensemble des constantes et algorithmes qui doivent intervenir dans le processus d'estimation des coordonnées. (IGN, 2000)

2.1.2. Les surfaces

Plusieurs surfaces sont à considérer lorsque l'on s'intéresse au positionnement géodésique.

La première est bien évidemment la **surface topographique**. C'est elle qui joue le rôle d'interface entre partie solide et partie liquide ou gazeuse de la Terre. C'est elle que nous connaissons le mieux, d'un point de vue sensoriel et physique, elle est l'objet de nombreuses sciences et techniques.

Le **géοïde** est la seconde surface à considérer. Elle se définit comme la surface équipotentielle du champ de pesanteur. L'accélération de pesanteur (g) lui est donc normale en tout point. Une excellente réalisation physique de cet équipotentiel est la surface moyenne des mers et océans. Mais sous les continents, l'accès à cette surface ne peut être qu'indirect. On retiendra donc la réalité physique indéniable de cette surface tout en gardant à l'esprit les difficultés que nécessite sa détermination.



Enfin, l'**ellipsoïde** de révolution représente la dernière surface. Modèle mathématique défini pour faciliter les calculs et pour qu'il soit le plus près possible du géοïde, il peut être local ou global, selon le champ d'application souhaité du système géodésique auquel il est associé (couverture mondiale ou d'un territoire seulement).

2.1.3. Différents types de coordonnées

Les coordonnées d'un point peuvent être exprimées de différentes façons :

- Géographiques : latitude et longitude (valeurs angulaires)
- Cartésiennes : exprimées dans un référentiel géocentrique (valeurs métriques)
- En projection : représentation cartographique plane (valeurs métriques)

Généralement, les coordonnées géocentriques ne servent que d'étape de calcul pour les changements de système géodésique.

Pour résumer :

Plusieurs surfaces sont accessibles au topographe pour déterminer les coordonnées d'un point, qui peuvent être exprimées de façon différentes selon le type d'application. Le lien entre le type de coordonnées et la surface de référence est primordial. Connaître ces deux éléments constitue une obligation pour exploiter la localisation des points.

2.2. Le changement de système géodésique

Le problème est suffisamment courant pour mériter qu'on lui attache un peu d'importance. Même si la quasi-totalité des logiciels de SIG, de traitement d'images ou d'import de données GPS sont capables d'effectuer des transformations de système, il semble utile d'en préciser les principes et les méthodes.

Au paragraphe précédent, nous évoquions la notion de champ d'application du système géodésique. Celle-ci prend une grande importance lorsqu'il s'agit de changer de système géodésique. En effet, selon les natures des systèmes de départ et d'arrivée, les méthodes employées diffèrent.

De façon générale, le processus de changement de système de coordonnées peut être représenté par la figure suivante :

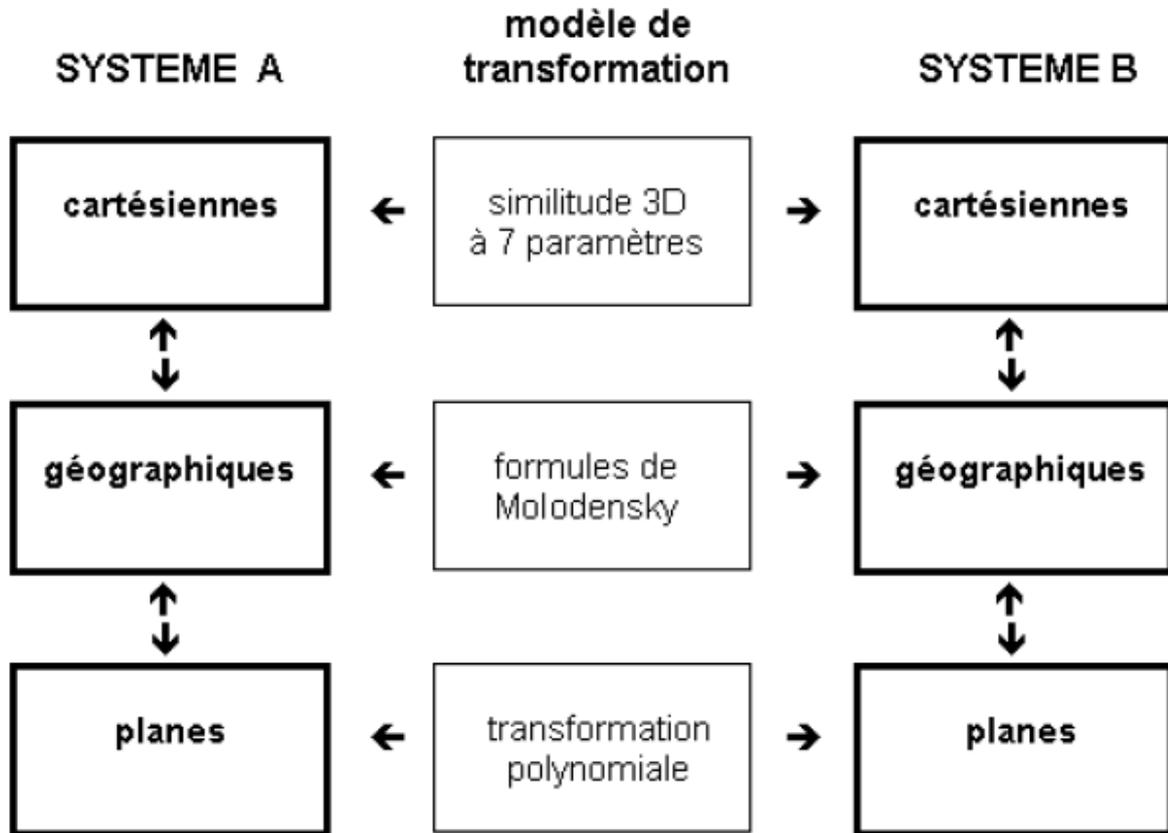


Figure 1. Le changement de système géodésique

La plus utilisée est la similitude 3D car elle présente l'avantage de pouvoir être appliquée "dans les 2 sens" avec les mêmes relations. Par contre, le passage inverse nécessite, pour les formules de Molodensky et les transformations polynomiales, des formules différentes.

Les formules de Molodensky sont des développements limités dont l'ordre influe évidemment sur la précision finale. La transformation polynomiale ne s'applique que sur des zones restreintes (pour conserver une précision comparable à celle par l'emploi d'une similitude).

2.3. Les projections planes

L'objectif des projections cartographiques est d'obtenir une représentation plane du modèle ellipsoïdal de la surface de la Terre. L'intérêt majeur réside alors dans les valeurs métriques, beaucoup plus facilement exploitables, en particulier pour les mesures de distance.

Mais une projection ne peut jamais se faire sans qu'il y ait de déformations. Pour s'en convaincre, il suffit d'essayer d'aplatir la peau d'une orange ! Néanmoins, par calcul, il est possible de définir le type et les paramètres d'une projection dans le but de minimiser certaines déformations. On choisit alors :

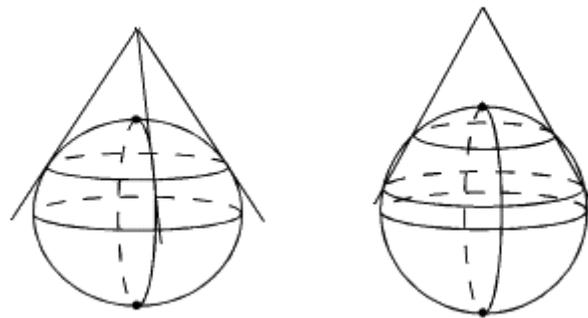
- soit de **conserver les surfaces** (projections équivalentes)
- soit de **conserver localement les angles** (projections conformes)
- soit de **conserver les distances à partir d'un point donné** (projections équidistantes)

- soit d'opter pour une représentation ne conservant ni les angles ni les surfaces (projections dites aphyllactiques).

Dans tous les cas, **aucune projection ne peut conserver toutes les distances**. On introduit alors les notions de module linéaire et d'altération linéaire. Aujourd'hui, la plupart des projections utilisées en géodésie et topographie sont conformes. La cartographie à petite échelle utilise souvent des projections équivalentes. Une autre façon de classer les projections planes est de s'intéresser à leur canevas, c'est-à-dire l'image des méridiens et des parallèles. C'est selon cette approche que nous allons aborder les grandes familles de projection.

2.3.1. Projections coniques

Dans ce type de représentation, les images des méridiens sont des demi-droites qui concourent en un point image du pôle et les parallèles des arcs de cercles concentriques autour de ce point. Elles peuvent être réalisées de deux façons :



Tangente

Sécante

Figure 2. Les projections coniques

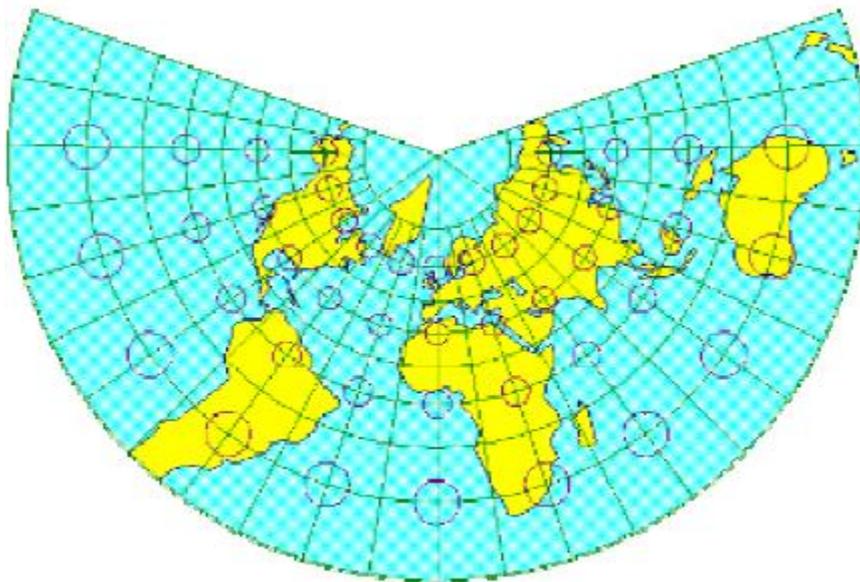


Figure 3. Projection conique conforme de Lambert

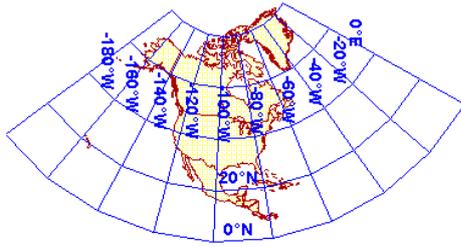


Figure 4. Projection conique équidistante

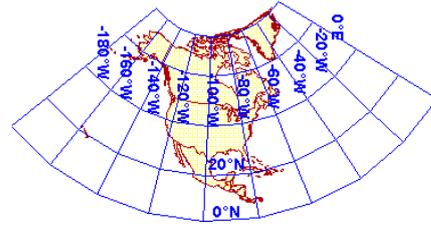


Figure 5. Projection conique équivalente d'Albers

Chapitre 2

Méthodes topométriques

L'objet de cette partie est de présenter les méthodes d'acquisition d'informations géométriques sur des objets par levé direct sur le terrain. L'ensemble des méthodes présentées ont chacune des spécificités, des conditions d'application et d'exécution précises.

3.1. Eléments de base sur les appareils topographiques

Présents dans tous les appareils professionnels qui seront évoqués dans la suite de ce cours, les nivelles et les lunettes sont des pièces majeures. Par conséquent, il convient d'en préciser la constitution et le principe de fonctionnement. Le réglage et la vérification de ces éléments très sensibles ne sera pas abordé ici, et il est conseillé de faire appel à un professionnel pour effectuer ces opérations.

3.1.1. Un point sur le vocabulaire

Ces précisions sémantiques concernent autant les appareils que les méthodes topographiques. Elles se concrétiseront au fil de l'avancée du cours.

Axe de visée, axe de collimation : ligne passant par les foyers de l'objectifs d'une lunette et le point de mesure en correspondance avec le réticule.

Basculement : la lunette du théodolite est tournée de 200 gr autour de l'axe horizontal pour éliminer les erreurs instrumentales.

Calage et mise en station : opération effectuée par l'opérateur pour amener l'axe vertical de l'appareil à l'aplomb d'un repère sur le sol.

Correction : valeur algébrique à ajouter à une valeur observée ou calculée pour éliminer les erreurs systématiques connues.

Croisée du réticule : croix dessinée sur le réticule représentant un point de l'axe de visée.

Erreur de fermeture : écart entre la valeur d'une grandeur mesurée en topométrie et la valeur fixée ou théorique.

Fils stadimétriques : lignes horizontales marquées symétriquement sur la croisée du réticule. Elles sont utilisées pour déterminer les distances à partir d'une échelle graduée placée sur la station.

Hauteur de l'appareil : distance verticale entre l'axe horizontal de l'appareil et celle de la station.

Implantation : établissement de repères et de lignes définissant la position et le niveau des éléments de l'ouvrage à construire.

Levé : relevé de la position d'un point existant.

Lunette : instrument optique muni d'une croisée de réticule ou d'un réticule, utilisé pour établir un axe de visée par l'observation d'un objet de mesure.

Mesurage : opérations déterminant la valeur d'une grandeur.

Nivelle : tube en verre scellé, presque entièrement rempli d'un liquide (alcool) dont la surface intérieure a une forme bombée obtenue par moulage, de sorte que l'air enfermé forme une bulle qui prend différentes positions suivant l'inclinaison du tube.

Nivellement : opération consistant à mettre une ligne ou une surface dans la position horizontale, ou mesurage de différences de niveaux.

Repères : points dont on connaît les coordonnées.

Réticule : disque transparent portant des traits ou des échelles. Il permet d'effectuer correctement des lectures.

Signal, balise : dispositif auxiliaire pour indiquer l'emplacement d'une station (par un jalon).

Station : tout point à partir duquel ou vers lequel on effectue une mesure. Cela peut être un point spécifié sur un bâtiment ou un point marqué dans la zone d'étude.

Tolérance : variation admissible pour une dimension.

3.1.2. Les nivelles

La nivelle se décline essentiellement en deux types : la section de tore et la section de sphère. Le but de cet instrument est de contrôler le calage d'un point, d'un plan, d'un axe de visée... On parle généralement de sensibilité de la nivelle pour qualifier la "vitesse" à laquelle va réagir la bulle. La valeur indiquée dans les documentations constructrices se réfère généralement à l'angle d'inclinaison nécessaire au déplacement de la bulle d'une division (couramment 2 mm). De façon générale, les nivelles toriques sont beaucoup plus sensibles, et précises que les nivelles sphériques. Ces dernières sont d'ailleurs généralement utilisées pour effectuer des calages rapides, avant l'emploi de nivelles électroniques et/ou la mise en action de dispositifs de compensation.

3.1.3. Les lunettes

Les lunettes sont des systèmes optiques comprenant un réticule et plusieurs lentilles, dont un dispositif de mise au point. Le système optique est caractérisé par les grandeurs classiques de l'optique géométrique : champ, grossissement...

Le réticule est le dispositif de lecture et de visée. Ce jeu de lignes (Figure 1) est actuellement gravé sur une lame à faces parallèles, mais en d'autres temps, on utilisait des toiles d'araignée d'Afrique !!

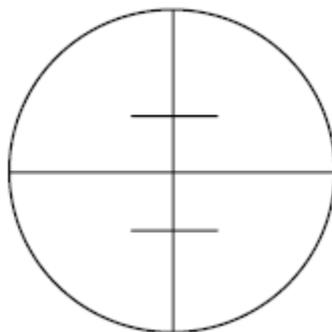


Figure 1. Exemple de réticule, avec fils stadimétriques

NB : la différence des lectures sur mire sur chacun des fils stadimétriques est une évaluation de la distance entre l'appareil et la mire, à une constante près. Cette constante, dite stadimétrique, est souvent de 100, et est précisée dans la documentation des appareils.

3.2. Détermination des altitudes

Les méthodes de détermination des altitudes ont connu un grand essor pendant les grandes périodes d'urbanisation et de viabilisation des espaces habités. L'objectif de ces mesures est de connaître précisément l'altitude de points, généralement pour assurer les écoulements. Par conséquent, la surface de référence la plus souvent considérée est le géoïde, par la connaissance de la verticale du lieu.

3.2.1. Les techniques

Les techniques de détermination des altitudes qui sont présentées ici diffèrent entre elles d'une part par le type d'instrument utilisé et la méthodologie, mais aussi par la précision que l'on peut en attendre. Bien évidemment, plus la précision recherchée est grande, plus les protocoles sont lourds à mettre en œuvre et les instruments coûteux à acquérir.

3.2.1.1. Nivellement direct ou géométrique

Les méthodes de nivellement direct constituent l'arsenal le plus efficace pour déterminer l'altitude de points particuliers. La précision des déterminations dépend du matériel employé (cf. § 3.2.2) mais aussi et surtout, des méthodes, ce que nous allons aborder maintenant :

- Nivellement par rayonnement : la première mesure est effectuée sur un point d'altitude connue, de façon à déterminer l'altitude du plan de visée. A partir de là, toutes les altitudes sont déterminées par différence par rapport à ce plan. Cette méthode permet de lever rapidement un semis de points matérialisés (sondages, points de berges, de fonds...). Elle présente néanmoins l'inconvénient de n'offrir aucun contrôle sur les déterminations : toute erreur de lecture est indétectable et fatale.
- Nivellement d'itinéraires par cheminement : c'est la méthode la plus couramment employée pour déterminer les altitudes de points matérialisés, non situés à une même distance d'une seule station d'appareil. Elle est également plus sûre, quant aux éventuelles erreurs de lecture, et plus intéressante du point de vue de la précision des déterminations : on dispose de méthodes de compensation des erreurs très efficaces. Plusieurs règles sont appliquées pour minimiser l'influence des erreurs systématiques et accidentelles : les portées équidistantes, les contrôles de marche, le contrôle sur fermeture...
- Nivellement de franchissement s'applique dans le cas de franchissement de vallées, où le principe des portées équidistantes est inapplicable. On travaille dans ce cas simultanément avec deux appareils, de part et d'autre de l'obstacle (le cas idéal étant de pouvoir les aligner avec les mires), afin de minimiser les erreurs instrumentales et atmosphériques.
- Nivellement d'auscultation : cette repère et ses variations dans le temps (barrage, pont, bâtiment). Elle nécessite l'application de tous les principes énoncés précédemment, et plus encore : équidistance, réglage optimal du niveau, mires en invar, contrôles, problèmes de réfraction accidentelle (intérieur/extérieur d'un bâtiment), sûreté des repères.

De manière générale la relation est donnée par l'équation :

$$Z_{R2} = Z_{R1} + \sum (AR - AV) \quad \text{Eq. 1}$$

où AR représente les lectures Arrière (en rapport à la direction de l'itinéraire), et AV les lectures Avant. Lorsque les altitudes des points de départ et d'arrivée sont connus, on peut alors calculer la fermeture du cheminement :

$$f = \Delta H_{obs} - \Delta H_{th} \quad \text{Eq. 2}$$

Cette erreur de fermeture, normalement due aux erreurs accidentelles, doit être répartie sur l'ensemble du cheminement et de ses mesures. Les différentes méthodes disponibles seront abordées au paragraphe 3.4.2.

3.2.1.2. Nivellement indirect ou trigonométrique

A la différence, le nivellement trigonométrique est réalisé par calcul de la dénivelée à partir de la distance oblique entre les points, et l'angle (également appelé distance) zénithal. Le principe général est explicité par la figure ci-dessous.

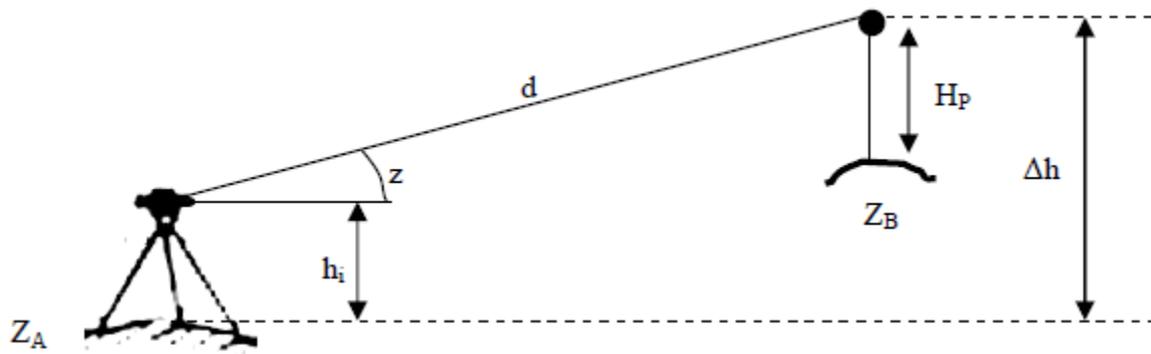


Figure 2. Principe du nivellement trigonométrique

Selon ce schéma, l'altitude du point B peut être reliée à celle du point A par la relation :

$$Z_B = Z_A + h_i + d \sin(z) - H_p \quad \text{Eq. 3}$$

Nous avons précédemment affirmé que la méthode du nivellement direct ou géométrique était beaucoup plus précise que celle-ci. Cela vient essentiellement du mode de détermination des différentes variables : h_i est mesuré au ruban (au centimètre, voire au demi-centimètre près) comme la hauteur de prisme H_p , puis, interviennent les précisions de mesure sur la distance oblique et l'angle vertical. Il est néanmoins très utile pour déterminer la hauteur de point inaccessible (cf. fiches techniques).

Le nivellement trigonométrique peut être employé selon la méthodologie du cheminement. Ainsi, il n'est pas nécessaire de déterminer ni la hauteur d'appareil h_i , ni la hauteur de prisme (qui doit cependant rester constante pour une même station). On n'exploite alors que la distance oblique et la distance zénithale.

3.2.1.3. D'autres techniques

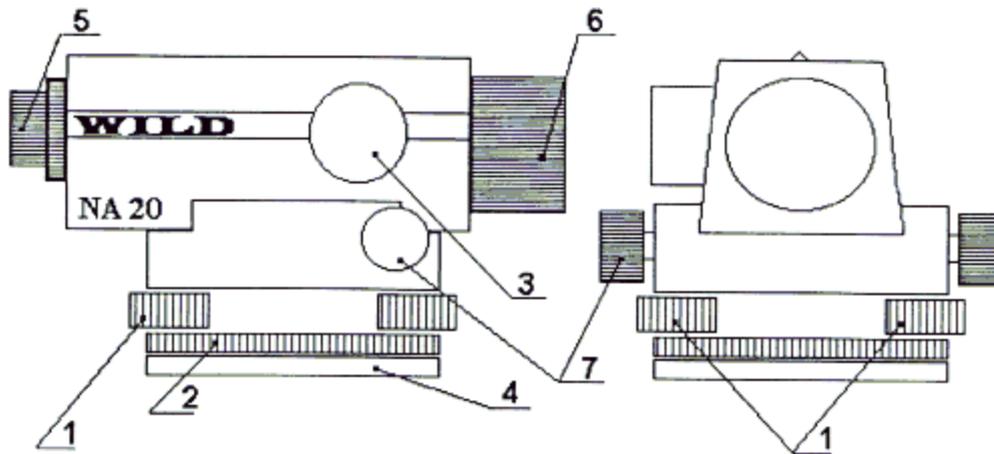
Les autres techniques de nivellement pourront peut-être paraître marginales, mais elles méritent cependant d'être citées. La première est le nivellement barométrique, qui exploite la chute de pression atmosphérique avec l'augmentation de l'altitude. Ce principe est utilisé dans la majorité des altimètres de sport, appareils qui doivent être recalés régulièrement pour leur assurer une efficacité maximale. Une seconde est constitué par les méthodes de nivellement hydrostatique. Il permet, par le principe des vases communicants, de réaliser un nivellement de haute précision, en permanence opérationnel sur un ouvrage.

3.2.2. Les appareils



Le niveau est l'appareil employé pour le nivellement direct. L'indirect quant à lui, utilise le théodolite, que nous détaillerons dans la partie suivante (cf. § 3.3.3).

- Le niveau de chantier : constitue le matériel le plus simple et le moins onéreux. Il offre généralement une précision très moyenne et est d'une mise en œuvre simple. Le calage est assuré par une nivelle torique.
- Le niveau automatique : constitue actuellement l'entrée de gamme de la plupart des constructeurs (les niveaux de chantiers sont de plus en plus souvent automatiques). Il est doté d'un système qui permet de compenser le défaut de calage de l'appareil à la mise en station (prisme suspendu, réticule suspendu, systèmes pendulaires...). Le dispositif de calage est alors une nivelle sphérique.

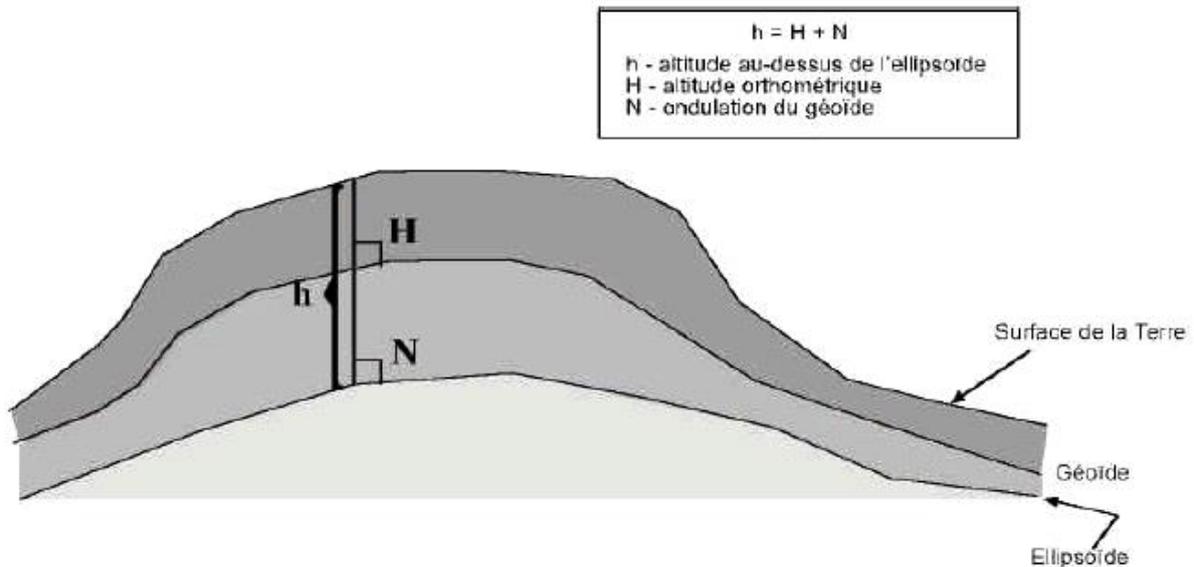


1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	

3.2.3. Les réseaux de référence

Il existe plusieurs définitions de l'altitude, d'où plusieurs systèmes d'altimétrie. Le système en vigueur en France est appelé IGN69. Il est matérialisé sur le territoire par un maillage de points de différents ordres, exprimés en altitude normale. Cependant, à Strasbourg par exemple, trois systèmes coexistent :

- le système IGN 69, normal,
- le NGF (Nivellement Général de la France), orthométrique,
- et le NN (Normal Null) allemand, orthométrique.



Nous avons vu plus haut qu'il existait plusieurs surfaces de référence. Pour l'altimétrie, la surface physique de référence est le géoïde, normale en tout point à la verticale du lieu. Il est cependant possible de réaliser différentes mesures de hauteur au-dessus du géoïde. Lorsque cette mesure est effectuée selon cette verticale, on parle alors de hauteur orthométrique. Par contre, lorsque des mesures de gravimétrie sont réalisées, on accède à la valeur moyenne de la pesanteur normale, définissant ainsi la hauteur normale. L'IGN préconise pour ceci des mesures gravimétriques tous les kilomètres en terrain accidenté, et tout les 10 km en terrain plat.

Les repères de nivellement des réseaux de troisième et quatrième ordre sont généralement des troncs de cône, scellés dans un mur de maison, d'église, de cimetière... Il faut cependant être vigilant lors de l'utilisation de ce type de matérialisation. En effet, l'expérience montre que lorsque des maisons sont rénovées, ravalées, les repères sont enlevés puis remplacés. Bien évidemment, la valeur indiquée par la fiche signalétique correspondante est alors obsolète. Méfiance !!

Il est actuellement possible d'obtenir la fiche signalétique des repères de nivellement, mesurés dans le système IGN 69, gratuitement auprès de l'IGN, via son site Internet (<http://www.ign.fr> ; <ftp://ign.fr>). Ce point est abordé en fin du chapitre suivant.

3.3. Détermination des coordonnées

Nous sommes à présent capables de déterminer, plus ou moins précisément, l'altitude de points particuliers du terrain. Il s'agit maintenant de les localiser en planimétrie.

3.3.1. Calcul d'orientation et de distances

Nous abordons ici quelques rappels sur le calcul d'angles et de distances à partir des coordonnées de points.

3.3.1.1. Les distances

Le calcul de la distance, horizontale ou non, entre deux points de coordonnées connues est extrêmement simple puisqu'il résulte de l'application stricte du théorème de Pythagore. On rappelle ici la formule générale de calcul de la distance à partir des coordonnées tridimensionnelles des points A et B :

$$d_A^B = \sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2 + (Z_B - Z_A)^2} \quad \text{Eq. 4}$$

Cette distance oblique peut être "rabaissée" à la verticale, comme nous l'avons vu au paragraphe 3.2.1.2, et mesurer une dénivellation partielle. De la même façon, la distance horizontale peut être obtenue (Figure 2) :

$$d_H = d \cdot \cos(z) \quad \text{Eq. 5}$$

3.3.1.2. Le gisement

On définit le gisement comme l'angle, dans le plan horizontal, entre un vecteur, défini par deux points connus en coordonnées, et la direction du nord cartographique. Il est compté dans le sens horaire.

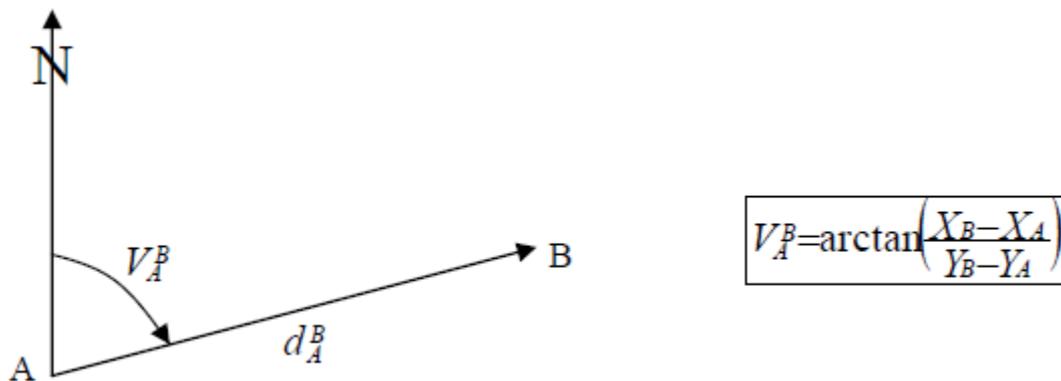


Figure 4. Définition du gisement

3.3.1.3. La transmission de gisement

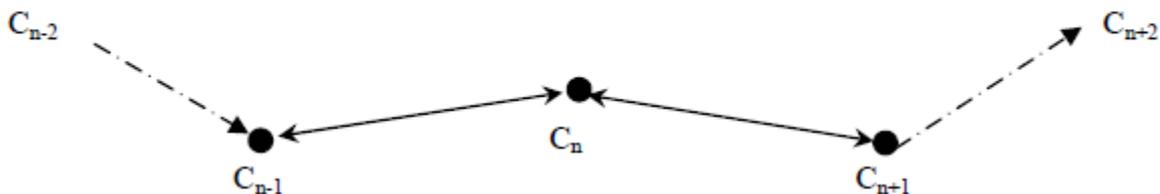


Figure 5. Cheminement polygonal

On suppose que le gisement du premier segment, entre les deux premiers points C_{n-2} et C_{n-1} du cheminement est connu. Ainsi, le gisement du segment suivant est donné par la relation :

$$V_{C_n}^{C_{n+1}} = V_{C_{n-1}}^{C_n} + (L_{C_n}^{C_{n+1}} - L_{C_n}^{C_{n-1}}) \pm 200 \text{ gon} \quad \text{Eq. 6}$$

Par conséquent, tout cheminement angulaire est calculé de proche en proche à partir des lectures L sur le cercle horizontal, et toujours à 200 grades près.

3.3.3. Les appareils

3.3.3.1. Le théodolite

L'appareil de base pour les mesures d'angles. Il est essentiellement constitué, en plus de la lunette de visée, de deux cercles : un horizontal et un vertical. Nous allons ici en étudier brièvement la constitution (Figure 7).

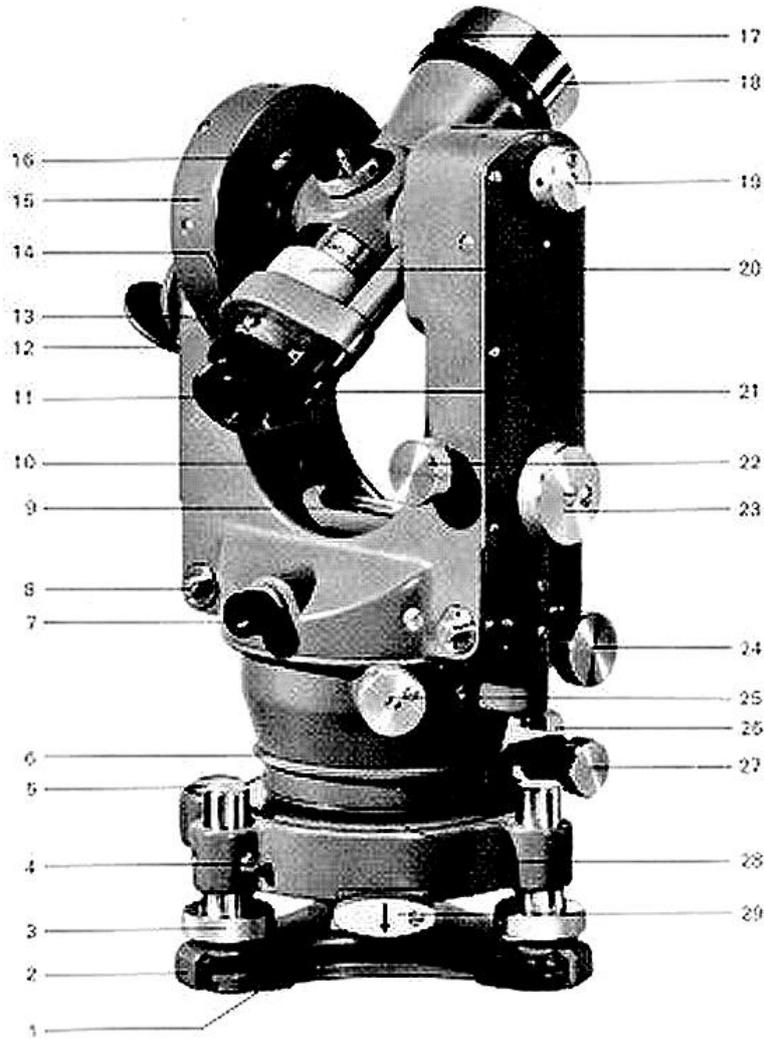


Figure 7. Théodolite ZEISS T1

No	Nom de l'élément	15	
1		16	
2		17	
3		18	
4		19	
5		20	
6		21	
7		22	
8		23	
9		24	
10		25	
11		26	
12		27	
13		28	
14		29	

3.3.3.2. Le tachéomètre

Le tachéomètre combine un théodolite et un dispositif de mesure de distance. Celui-ci peut être intégré à la lunette, ou indépendant et fixé au-dessus de la lunette. Dans ce second cas, les systèmes de visée et de mesure de distance sont placés sur des axes parallèles : il est alors nécessaire de prendre en compte le déport entre les deux, extrêmement important sur les visées courtes. Les principes de la tachéométrie électronique sont relativement simples, et nous nous y limiterons (informations issues du Lexique Topographique de l'AFT).

Le dispositif de mesure électronique des longueurs est appelé distancemètre. L'émetteur produit un train d'ondes électromagnétiques et le récepteur analyse l'écho renvoyé par un réflecteur. L'onde émise est appelée onde porteuse, et fait l'objet d'une modulation. Le procédé de mesure consiste à comparer la phase de modulation de l'onde reçue à celle de l'onde émise après le trajet aller-retour.

Plus concrètement, la mesure est réalisée par une émission successive de plusieurs fréquences distinctes, permettant ainsi de lever l'ambiguïté sur le nombre de cycles entre l'émetteur et le réflecteur. Les réflecteurs les plus souvent utilisés sont des coins de cubes, ou prismes rhomboédriques.



3.4. Détermination de l'incertitude de mesure

Une mesure est entachée d'une certaine erreur, d'une incertitude. Elle provient de divers facteurs : la méthode utilisée, l'instrument employé, l'expérience de l'opérateur, la grandeur mesurée... Différentes notions sont utilisées pour qualifier la qualité de la mesure, et divers moyens existent pour répartir les résidus d'une série de mesure.

3.4.1. Erreurs et fautes

Nous avons jusqu'ici parlé de fautes, d'erreurs accidentelles et systématiques sans en donner une définition précise. Tous ces termes, bien que faisant partie du même champ sémantique, couvrent des notions différentes.

- La faute : manquement à une norme, aux règles d'une science, d'une technique (Petit Larousse). On parle de faute généralement à propos de l'opérateur, et peut être due à un manque de soin, le non respect des règles de base, le manque d'expérience...
- L'erreur systématique : se répète et se cumule à chaque mesure. Elle est le plus souvent due aux imprécisions de l'instrument (qualité des composants, défauts de réglages...) et aux contraintes de sa mise oeuvre. L'influence de ces erreurs peut souvent être évaluée par calcul, et prise en compte dans la détermination finale.
- L'erreur accidentelle : de valeur et de signe aléatoires, elle peut avoir diverses origines : défaut de calage de l'appareil à la mise en station, erreur de pointé, de lecture, des paramètres extérieurs non maîtrisables (température, hygrométrie...), erreur de réfraction accidentelle...

Sur une série de mesures (cheminement altimétrique, polygonal), l'influence des erreurs systématiques doit être minimisée par la méthode employée. Par contre, il reste les erreurs accidentelles qui sont généralement considérées comme les seules participant aux fermetures.

3.4.2. Méthodes de compensation

Tout protocole de mesure génère des erreurs. Il est capital d'identifier, quantifier et réduire les erreurs systématiques, mais les erreurs accidentelles doivent être réparties sur l'ensemble. Plusieurs méthodes sont possibles, mais partent toutes globalement de l'hypothèse de l'équiprobabilité de chaque source d'erreur accidentelle lors de chaque mesure. Par exemple, sur un cheminement altimétrique, la probabilité de faire une erreur de lecture sur mire est identique qu'il s'agisse de la première ou de la nième dénivelée.

3.4.2.1. Compensation proportionnelle

C'est le mode de compensation le plus simple. Il exploite l'hypothèse d'équiprobabilité au mot : l'erreur globale constatée sur la série de mesures est la résultante des erreurs sur chaque mesure de la série. Par conséquent, la fermeture est répartie sur chaque mesure individuelle. Pour une fermeture f obtenue sur n mesures, la correction à appliquer aux observations est alors donnée par :

$$c = -\frac{f}{n} \quad [Eq. 13]$$

Elle peut s'avérer tout à fait suffisante pour la répartition de la fermeture d'un nivellement géométrique à portées strictement équidistantes et équivalentes.

3.4.2.2. Compensation pondérée

La compensation pondérée est une amélioration de la compensation proportionnelle. Elle prend en compte, par la pondération des observations, une certaine appréciation de la qualité des mesures. Tout le problème est alors de

déterminer le facteur significatif agissant sur cette qualité. De même que précédemment, la correction à appliquer à la j^{ième} observation sur n, de facteur de pondération p, est donnée par :

$$c^j = -f \frac{p^j}{\sum_{i=1}^n p_i^j} \quad [Eq. 14]$$

en triangulation, le pointé sur des cibles lointaines est souvent bien plus précis que sur des cibles proches.

3.4.2.3. Compensation par les moindres carrés

Les méthodes précédentes s'appliquent dans les cas simples, où les mesures redondantes ne sont que peu ou pas présentes. Dès lors que l'on s'intéresse à un réseau de mesures, engendrant des déterminations multiples d'une même grandeur, il est impératif de pouvoir tirer parti de l'ensemble des observations sans créer de discordances entre elles.

Le principe des moindres carrés a pour objectif de minimiser les carrés des écarts entre les observations et la valeur vraie de la grandeur observée. Elle se base exclusivement sur la redondance de mesures. Un calcul abouti par moindres carrés donne accès à la valeur la plus probable de la grandeur mesurée, avec un indicateur de qualité primordial : l'erreur moyenne quadratique (souvent notée emq ; en anglais, rmse, *root mean square error*).

La complexité de la méthode ne nous permet pas de la présenter dans le détail. Nous nous limiterons par conséquent à une expression simplifiée, matricielle. La première étape est de définir des valeurs approchées des inconnues, pour pouvoir écrire la matrice V des écarts avec chaque mesure. Ensuite, l'équation suivante donne les appoints à apporter aux valeurs approchées pour obtenir les valeurs les plus probables, compte tenu des observations réalisées.

$$A = V.P.V \quad [Eq. 15]$$

Ainsi, l'erreur moyenne quadratique du calcul (mq_0), également dite réduite à l'unité de poids, est donné par la relation :

$$mq_0 = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i \cdot v_i^2)}{n-q}} \quad [Eq. 16]$$

avec p le poids de l'observation, v l'écart entre valeurs approchée et observée, n le nombre total d'observations, q le nombre d'observations strictement nécessaires au calcul de l'inconnue.