



Cours de Géométrie

2. LES RÉFÉRENTIELS GÉODÉSIQUES

[Prof. C. Debouche](#)

Les références bibliographiques citées dans ce texte sont consultables en suivant le lien
<https://hdl.handle.net/2268/293535>

Sommaire

Sommaire	2
2. LES RÉFÉRENTIELS GÉODÉSQUES	3
2.1. Introduction.....	3
2.2. Le référentiel physique	4
2.2.1. Définition.....	4
2.2.2. Techniques de détermination du champ de gravité	8
2.2.3. Exemples de géoïdes	9
2.2.4. Quelques utilisations du géoïde en pratique.....	11
2.3. Les référentiels géométriques	11
2.3.1. La notion d'ellipsoïde.....	11
2.3.2. Quelques définitions.....	13
2.3.3. Les paramètres de l'ellipsoïde	16
2.3.4. Repérage d'un point	19
2.3.5. Les ellipsoïdes utilisés en Belgique.....	20
2.3.6. Les ellipsoïdes utilisés pour les systèmes géodésiques de référence globaux	21
2.4. Les systèmes géodésiques de référence et les « datum ».....	22
2.4.1. Le système de coordonnées global et la notion de système géodésique de référence.....	22
2.4.2. Les systèmes géodésiques de référence globaux géocentriques	27
2.4.3. Quelques systèmes géodésiques de référence locaux.....	33
2.5. Les points géodésiques	35
2.5.1. Levé et identification des points géodésiques belges.....	35
2.5.2. Mise à disposition des points géodésiques en Belgique.....	35
Index des matières.....	37

2. LES RÉFÉRENTIELS GÉODÉSQUES

2.1. Introduction

Toute intervention sur un territoire implique d'y effectuer des observations qui devront être localisées. Il peut s'agir de points ou de lignes ou de surfaces. Les lignes sont définies par des points et les surfaces sont identifiées par un périmètre, lui-même constitué de points.

Un point est généralement localisé dans l'espace par des coordonnées cartésiennes (trois distances mesurées sur des axes orthogonaux x , y et z) ou géodésiques (deux angles : la longitude λ et la latitude ϕ et une distance : l'altitude h). Ces coordonnées sont définies par rapport à un système de référence ou **référentiel**.

Le référentiel est choisi en fonction de la nature et des objectifs poursuivis lors des observations. Il peut être local, national ou mondial, suivant la portée dans l'espace de l'étude envisagée.

Les référentiels utilisés dans le monde sont très nombreux, variables d'un pays à l'autre et même d'une partie à l'autre des grands pays.

Pour la plupart des études, le référentiel sera constitué à partir de considérations physiques et géométriques, issues de la géodésie.

La **géodésie** est la science du mesurage sur le sol ou à sa proximité pour déterminer la forme, les dimensions et la distribution de la masse et des champs de pesanteur sur la terre ou sur des parties de celle-ci (ISO, 1985). Elle étudie aussi le suivi de la rotation de la Terre dans l'espace.

Le champ de la pesanteur va servir de base à la définition du système universel de référence physique (paragraphe 2.2), basé sur la force de la pesanteur.

Les résultats issus de la géodésie sont utilisés dans de nombreux domaines comme les sciences de la terre, le génie civil, l'exploration, le cadastre ou toutes les applications utilisant les systèmes d'information géographiques (SIG).

En vue de pouvoir opérationnaliser ce système de référence physique, il va être approché par des systèmes de référence géométriques (paragraphe 2.3) qui seront constitués de formes géométriques régulières, dépendant de peu de paramètres.

Ces systèmes de référence géométriques seront tous définis à partir d'un système d'axe trirectangle global et dont l'origine est pratiquement confondue avec le centre de masse de la Terre. Ils se distingueront entre eux par la forme géométrique choisie, sphère ou ellipsoïde, ainsi que par la position de cette forme dans le système global trirectangle. Ils peuvent être définis pour l'ensemble de la Terre. Ce sont alors les systèmes dit « globaux ». Ils peuvent aussi être définis pour une partie de la Terre. Il s'agit alors de systèmes géodésiques « locaux ».

2. Les référentiels géodésiques

Tous ces systèmes de référence géométriques contribueront à la définition des systèmes géodésiques de référence. Ils sont appelés « **datum** ». Ils sont décrits dans le paragraphe 2.4.

Dans un certain nombre d'opérations topographiques, il est nécessaire de "rattacher" les mesures réalisées sur le terrain au référentiel établi au niveau du pays. Cette opération est réalisable à partir de points "géodésiques" matérialisés sur le terrain et dont les coordonnées ont été mesurées et calculées avec soin et sont mises à disposition des utilisateurs selon des procédures particulières (paragraphe 2.5).

2.2. Le référentiel physique

Une façon de décrire la forme de la Terre est de déterminer une surface sur laquelle la force de la pesanteur est constante. Cette surface s'appelle le géoïde.

Vue de l'espace, la Terre ressemble à une sphère légèrement aplatie aux pôles. Cette forme est la forme d'équilibre d'un corps fluide en rotation autour d'un axe. À cause des variations de densité à l'intérieur de la Terre, le géoïde n'est pas exactement une sphère aplatie.

Des informations complémentaires sur le référentiel physique pourront être trouvées chez **GERVAISE (1993), IGN (1989) ET ILIFFE J.C. (2000)**, ainsi que sur le site internet :

Services géodésiques de l'IGN (2004) (<http://www.ign.be/FR/FR2-1-2.shtm>);

2.2.1. Définition

Le **géoïde** est une surface équipotentielle des forces de la **pesanteur** conventionnellement confondue avec la surface en équilibre des océans, prolongée virtuellement sous les continents.

Pour rappel, la pesanteur est la résultante de 2 accélérations :

une accélération gravitationnelle (newtonienne – la gravité est une force universelle qui a pour conséquence l'attraction de tous les corps matériels de l'univers entre eux) exercée sur les diverses parties d'un corps par l'attraction de la masse terrestre (l'attraction exercée par un corps est proportionnelle à la masse de ce dernier)

et une accélération centrifuge due à la rotation de la terre.

2. Les référentiels géodésiques

Deux corps ponctuels de masse m et m' exercent l'un sur l'autre des forces \vec{F} et \vec{F}' attractives (force de gravitation) de même valeur :

$$F_g = G \frac{mm'}{d^2},$$

- où d la distance séparant les 2 corps (m),
 G la constante de **gravitation** universelle (mesurée expérimentalement) et dont la valeur admise est $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$ ou $\text{m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$,
 F_g Force attractive, en N ou kg m s^{-2} .

Appliquée à un corps quelconque situé sur la surface de la Terre, cette force attractive en détermine le poids, par multiplication de sa masse par l'accélération de la pesanteur :

$$P = mg \text{ et } g = \frac{Gm_T}{d_T^2},$$

- où P est le poids du corps en question en N,
 m la masse du corps en question en kg,
 m_T est la masse de la terre fixée à $5,98 \cdot 10^{24} \text{ kg}$,
 d_T est la distance au centre de masse de la Terre en m,
 g est l'accélération due à la pesanteur en ms^{-2} .

Dans la pratique courante, la valeur de l'accélération due à la pesanteur est fixée à $9,81 \text{ ms}^{-2}$. En toute rigueur, cette valeur varie en fonction du lieu où elle est calculée. Elle dépend en effet de la distance au centre de masse de la Terre et donc de l'altitude du point à laquelle se trouve le corps dont le poids est calculé. A noter également que cette accélération due à la pesanteur s'exprime également dans une unité spécifique qui est le **gal** (un gal vaut 1 cms^{-2}).

Le champ de pesanteur de notre planète varie en plus à cause d'anomalies présentes dans la Terre (composée de divers matériaux de masse et densité variables – croûte et manteau terrestre) et de la répartition des masses terrestres (proximité des montagnes, densité des roches avoisinantes, répartition des masses en fonction de la latitude, etc.). Là où se trouve un excès de masse, la force de pesanteur augmente (un satellite survolant une zone montagneuse perd de l'altitude). D'autres facteurs interviennent aussi dans les fluctuations du champ de pesanteur : champ magnétique variable, attraction de la lune, calottes glaciaires, bouleversements géologiques, etc.

Le géoïde est donc une surface gauche, normale en chaque point à la verticale physique, c'est-à-dire à la direction de la force de pesanteur, matérialisée par exemple par le fil à plomb. La forme de cette surface n'est pas connue avec précision en raison des déviations des verticales locales liées à la variation de la pesanteur. Sa forme suit les irrégularités de la Terre tout en les amoindrissant. De plus, le géoïde peut varier avec le temps en raison des fluctuations du champ de pesanteur de la Terre.

2. Les référentiels géodésiques

La figure 2.2.1 donne une indication schématique de la forme de ce géoïde. Les figures 2.2.2 et 2.2.3 renseignent sur les écarts qui existent entre ce géoïde et une surface de référence géométrique régulière qui sera présentée ultérieurement (ellipsoïde GRS80 § 2.3.6).

Les différences dans le champ de la pesanteur influent sur la surface correspondant au niveau moyen de la mer. La différence de pesanteur entre 2 points détermine le sens d'écoulement de l'eau et l'eau reste donc en équilibre sur une surface d'égale pesanteur, d'où le fait que les mers seraient en équilibre sur la surface du géoïde.

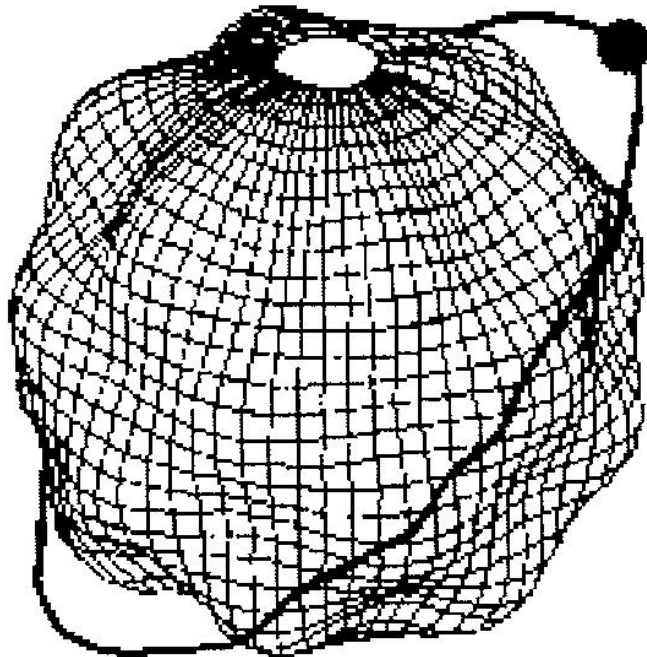


Figure 2.2.1. Vue schématique de la forme du géoïde (Source : IGN, Belgique)

2. Les référentiels géodésiques

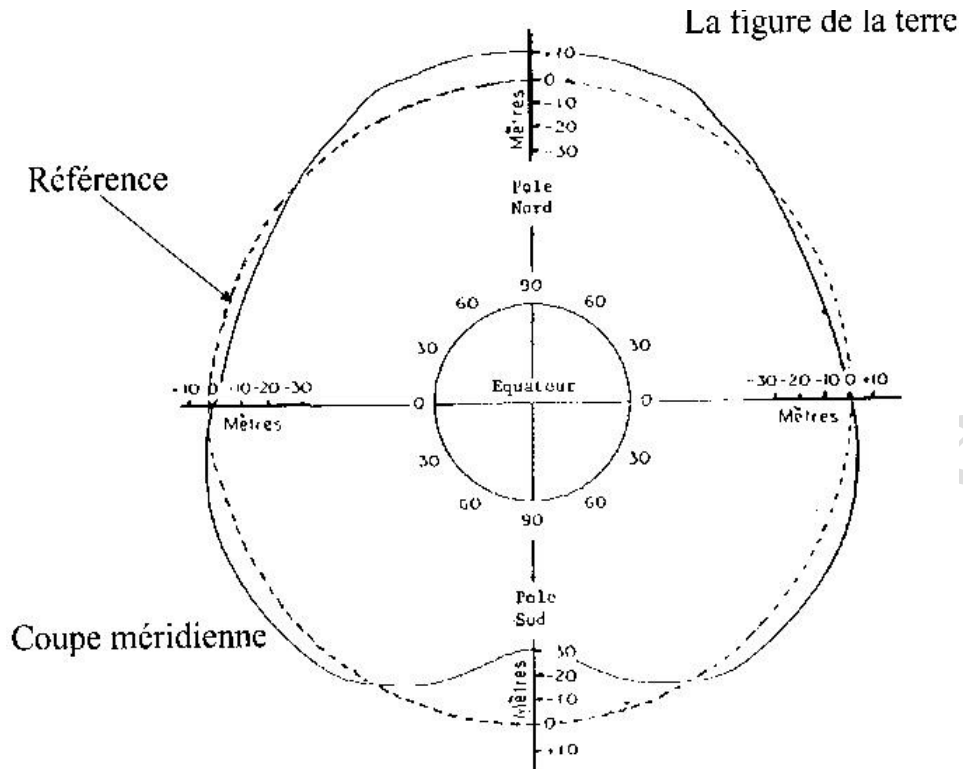


Figure 2.2.2. Coupe méridienne présentant le géoïde et l'ellipsoïde de référence GRS80 (Source : CDGA, 2004)

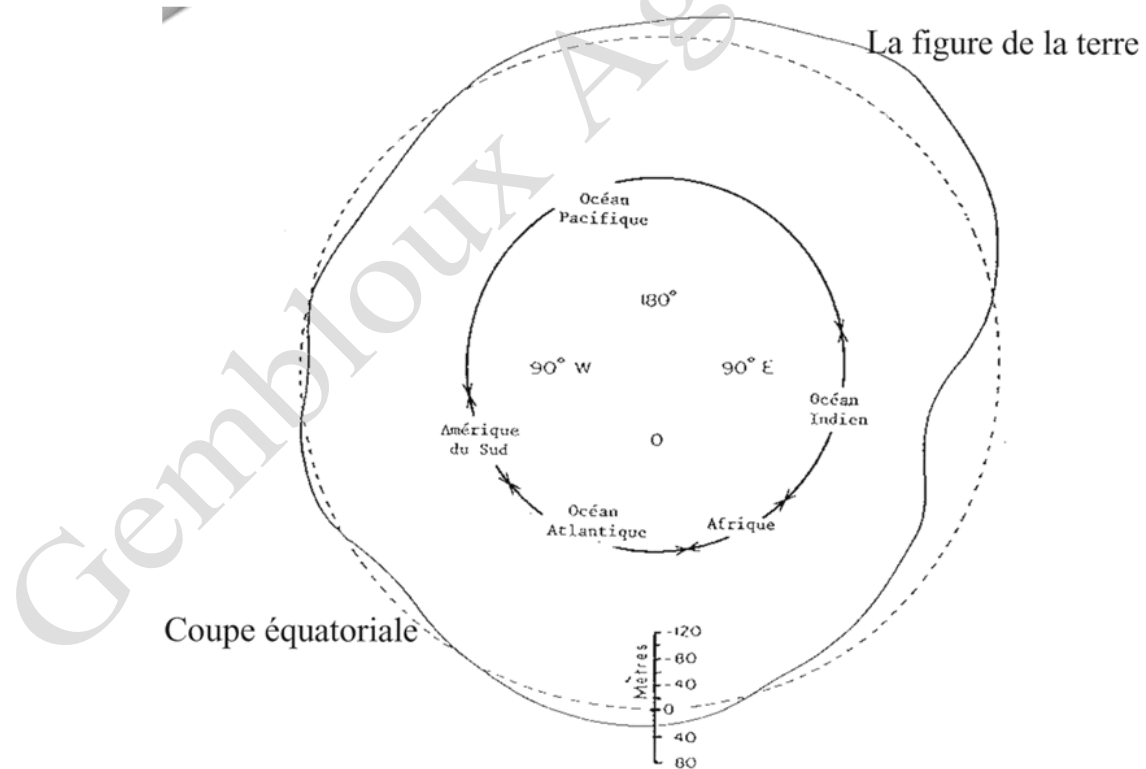


Figure 2.2.3. Coupe équatoriale présentant le géoïde et l'ellipsoïde de référence GRS80 (Source : CDGA, 2004)

2. Les référentiels géodésiques

Lorsqu'on effectue des mesures topographiques, les instruments utilisés se mettent en place par rapport à la verticale physique du lieu (instruments soumis à la pesanteur), c'est-à-dire par rapport au géoïde.

Le géoïde constitue également par convention la surface de référence altimétrique ou la surface d'altitude zéro (chapitre 10).

2.2.2. Techniques de détermination du champ de gravité

Dans le passé, le géoïde ne pouvait être déterminé que localement par des observations sur terre : astronomiques (détermination des déviations de la verticale), gravimétriques (détermination des anomalies de la pesanteur).

Il en résulte un grand nombre d'approximations locales du géoïde (et donc de systèmes de référence géodésiques locaux – voir 2.4.). Actuellement, le progrès dans les méthodes de mesure (utilisation de satellites artificiels dans la géodésie spatiale) permet de définir une approximation globale du géoïde (et donc des systèmes de référence géodésiques globaux).

Les techniques classiques actuelles sont :

- les mesures de pesanteur à l'aide de gravimètres au sol, en bateau, en fond de mer ou aéroportés ;
- les mesures d'altimétrie par satellites qui permettent de déterminer la topographie des océans ;
- l'analyse des perturbations des orbites de satellites. En étudiant les perturbations d'orbites de satellites (dues à des variations de gravité, reflet des différences de masses) par rapport à des modèles existants du champ de gravité, on peut construire d'autres modèles plus précis. Les principales techniques de mesure de position des satellites sont : le SLR (Satellite Laser Ranging) où l'on mesure la distance entre le satellite et des stations au sol par télémétrie laser, DORIS (Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégrés par Satellite) et le GPS (IGN France, 2004).

Le système DORIS est une technique géodésique spatiale. Il s'agit d'un système français d'orbitographie (détermination d'orbite) de satellites bas conçu et réalisé par le CNES (Centre National d'Études Spatiales) en collaboration avec l'IGN français et le GRGS (Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale). Ce système a été embarqué à ce jour sur 3 satellites (SPOT-2, SPOT-3 et TOPEX/POSEÏDON). Système de positionnement, il fournit également des données quant à la rotation terrestre et quant à l'étude de la gravité de la Terre grâce à l'analyse précise des orbites des satellites. À l'inverse du système GPS, le signal émis l'est par les stations au sol, le récepteur étant dans les satellites.

Le niveau de performance de DORIS dans le positionnement ainsi que sa meilleure couverture de l'hémisphère Sud que le GPS ont en outre permis à ce système d'être accepté, depuis 1994, comme technique de l'IERS (Service International de la Rotation Terrestre).

2. Les référentiels géodésiques

Les principales limitations de ces techniques viennent essentiellement :

- de la couverture observationnelle des satellites qui n'est pas homogène. Par exemple, il y a beaucoup moins de stations de poursuite laser dans l'hémisphère sud qu'au nord ;
- de l'atténuation du champ de pesanteur avec l'altitude et de la mauvaise connaissance des forces qui ne sont pas dues à la gravité comme le frottement dans l'atmosphère. En effet, le champ de pesanteur décroissant rapidement avec l'altitude, il serait intéressant de pouvoir étudier les orbites de satellites évoluant à basse altitude. Mais plus on se rapproche du sol, plus l'atmosphère est dense et actuellement les modèles de forces qui ne sont pas dues à la pesanteur ne sont pas encore suffisamment fiables.

Des organismes utilisent ces 3 sources pour produire des modèles du champ de gravité ou des modèles de géoïde. Un exemple est le modèle OSU 89 B du département de Géodésie et de Géométrie de l'Université d'État de l'Ohio (voir 2.2.3.).

2.2.3. Exemples de géoïdes

1° Voici quelques exemples de géoïdes locaux.

En Belgique un nouveau quasi-géoïde local (**BG03**) vient d'être calculé à partir de quelques 30.000 points gravimétriques répartis sur tout le territoire. La figure 2.2.4 présente l'allure de ce quasi-géoïde. Il constitue une amélioration par rapport au précédent quasi-géoïde BG96 de par l'augmentation de la couverture des données gravitationnelles (1 station par 2,5 km² à 1 station par 5 km² selon l'endroit en Belgique, le Sud-Est étant moins bien couvert). Le géoïde sera calculé sur base de ce quasi-géoïde. (**BARZAGHI, BORGHI, DUCARME ET EVERAERTS, 2003 ET DUQENNE H, EVERAERTS M ET LAMBOT P. 2005**).

A noter que pour le géoïde belge, le niveau d'altitude zéro n'est pas le niveau moyen de la mer mais le niveau de la marée basse moyenne à Ostende. Celui-ci est inférieur de 2,012 mètres au niveau moyen de la mer à Ostende.

2. Les référentiels géodésiques

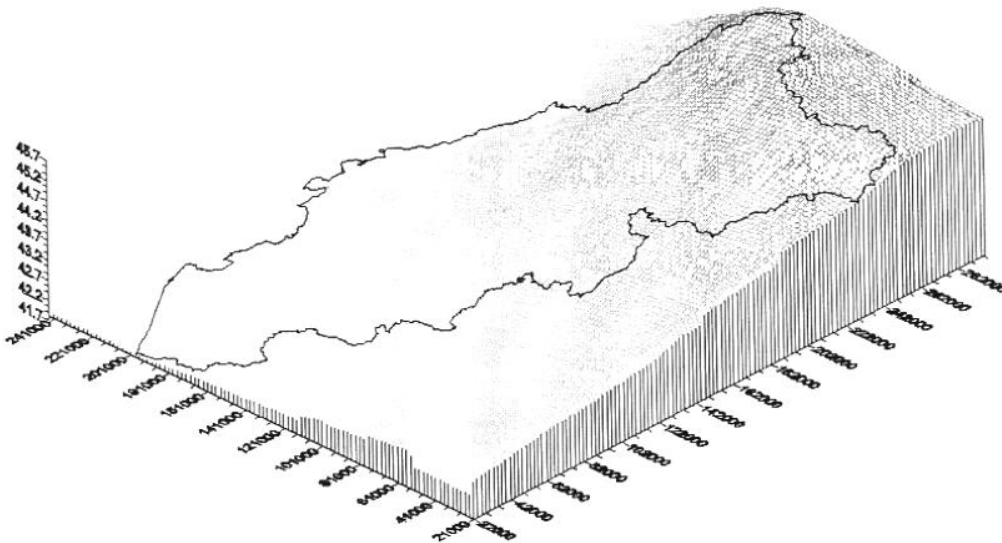


Figure 2.2.4. Écarts entre le géoïde et l'ellipsoïde WGS84 (Source **IGN BELGIQUE**)

Un nouveau géoïde local a également été calculé pour l'Europe (**EGG97** European Gravimetric Geoid 1997) sur base du géoïde global EGM96 (Eart Geopotential Model 1996) en y ajoutant des observations locales sur le territoire européen, à savoir une adaptation sur des points GPS-nivelés (dont l'altitude a été déterminée par GPS, chapitre 13). Ceci implique que la précision ne sera pas identique en tout endroit (là où les points GPS-nivelés ont été déterminés avec plus de difficultés, la précision sera moindre). (Groupe de Travail Permanent « Positionnement Statique et Dynamique, 1998)

2° Les modèles globaux de géoïdes, valables pour l'ensemble du globe, sont actuellement déterminés avec une précision de quelques mètres.

OSU89B (Ohio State University, Columbus, Ohio) du département de Géodésie et de Géométrie de l'Université d'État de l'Ohio se présente sous la forme d'un modèle très compliqué. Il constitue une base pour le calcul de géoïdes locaux.

OSU91 (RAPP ET PAVLIS, 1990), obtenu à partir d'OSU89B, est encore très utilisé aux USA. La précision (de l'ondulation du géoïde) est de 1 à 2 m.

Le modèle **EGM96** a été développé par le NIMA (National Imaging and Mapping Authority) et la NASA (National Aeronautics and Space Administration). Il est plus précis que l'OSU91 en raison de données supplémentaires (observations de la gravité et nouvelles données satellites). Sa précision est d'environ 1 m.

Pour des précisions plus grandes, il est nécessaire de modéliser localement un géoïde (données gravimétriques de terrain supplémentaires).

Pour plus de renseignements sur les géoïdes utilisés de par le monde, consulter le site web de l'IGeS (International Geoid Services), « Available Geoids » <http://www.iges.polimi.it>.

2.2.4. Quelques utilisations du géoïde en pratique

Déterminer des altitudes est l'utilisation la plus évidente.

Les scientifiques utilisent aussi le géoïde pour leurs recherches, notamment pour étudier le « relèvement post-glaciaire ». Par exemple, pendant le dernier grand âge glaciaire, une immense couche de glace, appelée inlandsis Laurentien, a « enfoncé » la baie d'Hudson dans la croûte terrestre, vers le manteau. Depuis la fonte de l'inlandsis, le manteau a « rebondi », se soulevant au fil du temps. Ce long relèvement du manteau, vers sa forme originale, se poursuit encore à raison de 1 cm par an. Cela signifie que les régimes hydrographiques autour de la baie d'Hudson, comme le sens d'écoulement des rivières et des cours d'eau, peuvent être modifiés et le sont (Gouvernement du Canada (GC) et Ressources naturelles Canada (RNCan), Division des Levés Géodésiques, en ligne, 2003).

2.3. Les référentiels géométriques

Le géoïde étant un référentiel irrégulier, il s'est avéré utile de l'approcher, autant que possible, par une forme géométrique simple. Cela a conduit à la définition de référentiels géométriques dont la fonction est de donner une approximation acceptable du géoïde, aussi bien à un niveau local (partie du globe terrestre – pays ou continent) que globalement, pour l'ensemble de la planète Terre.

Des informations complémentaires sur les référentiels géométriques pourront être trouvées chez **ILIFFE J.C. (2000)** et Services Géodésiques de l'IGN (2002), ainsi que sur le site Internet de l'IGN-France (2004).

2.3.1. La notion d'ellipsoïde

Pour se positionner sur la Terre, on a utilisé des modèles géométriques permettant de représenter la forme de la Terre de façon simplifiée : des ellipsoïdes. Sur ces surfaces, il est plus aisé de fixer des positions, de calculer des distances ou des orientations.

On a pu montrer que le géoïde était très voisin d'un **ellipsoïde de révolution**¹ qui est considéré comme l'ellipsoïde de référence. Les dimensions de cet ellipsoïde ainsi que sa localisation et son orientation (Voir 2.4.) dans l'espace sont déterminées de manière à minimiser les écarts entre la verticale physique d'un point et la normale à cet ellipsoïde passant par ce point. Sur des surfaces correspondant à des parties de la planète, ces écarts sont très faibles, inférieurs à 0,0015 grades (un **grade** est une unité d'angle plan plus utilisée en topographie que le degré ou le radian : une révolution complète comprend 400 grades, 360 degrés ou 2π radians).

Il existe de nombreux ellipsoïdes différents correspondant à différentes parties de la planète, certains locaux, d'autres globaux (figure 2.3.1). Le centre des ellipsoïdes locaux une fois positionnés (paragraphe 2.4.1.) ne coïncide pas avec le centre de masse de la Terre puisque la minimalisation de l'écart géoïde/ellipsoïde ne se fait que localement.

¹ Solide engendré par une ellipse tournant autour d'un de ses axes (*allongé*, autour du grand axe; *aplatis*, autour du petit)

2. Les référentiels géodésiques

En effet, avec le progrès, les géoïdes locaux ont fait place à un géoïde global (en évolution lui aussi au fur et à mesure que des méthodes plus précises sont développées, paragraphe 2.2.2.). De la même manière et pour certaines applications, les ellipsoïdes locaux peuvent être remplacés par un ellipsoïde global. Mais en pratique, les ellipsoïdes locaux auront encore un grand rôle à jouer en raison de leur meilleure précision et aussi par le fait qu'il est pratiquement impossible de remplacer toutes les cartes "anciennes", établies sur les ellipsoïdes locaux.

Pour une plus grande simplification et lorsque les exigences de précision le permettent, la Terre est traitée comme une sphère ayant 6.371 km de rayon (plus précisément paragraphe 2.3.3). Et dans le cas d'étendues portant sur des surfaces restreintes, la simplification va jusqu'à considérer la Terre comme plane.

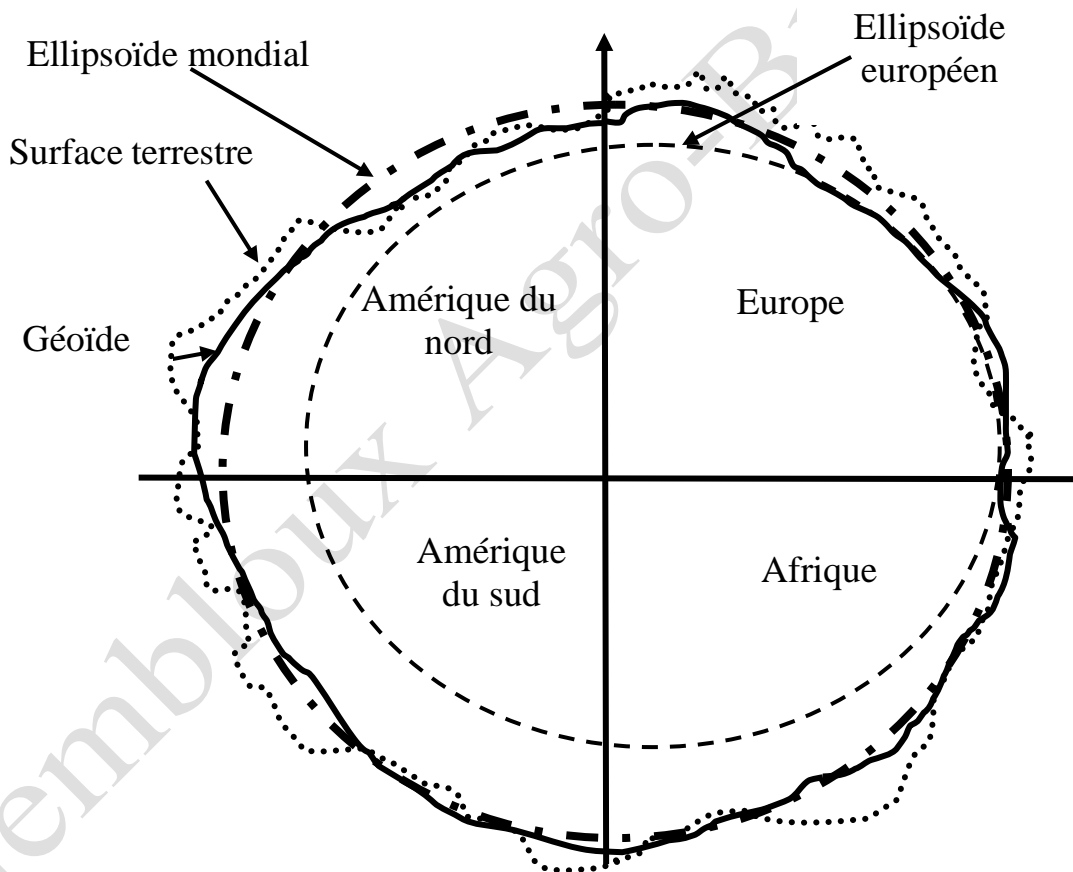


Figure 2.3.1. Géoïde, surface terrestre et ellipsoïdes local (européen) et mondial.

2.3.2. Quelques définitions

Il convient de rappeler ici les notions suivantes illustrées par la figure 2.3.2.

Les **pôles** de la terre P et P' sont situés à l'intersection de l'axe de rotation de la Terre avec la surface de celle-ci. Les pôles Nord et Sud sont situés respectivement au nord et au sud de l'équateur. En raison de l'instabilité de l'axe de rotation de la Terre, la position des pôles varie dans le temps. Il existe deux stations fixes, considérées conventionnellement comme pôles Nord et Sud.

Le **plan méridien** d'un point est un plan contenant ce point et passant, soit par l'axe de révolution de l'ellipsoïde de référence (**plan méridien géodésique**), soit par l'axe de rotation de la Terre (**plan méridien astronomique**). L'intersection du plan méridien géodésique avec l'ellipsoïde de référence est un arc (P d C P') qui porte le nom de **méridien** ou plus précisément **méridien géodésique**. Tous les méridiens sont des ellipses passant par les deux pôles.

Les plans perpendiculaires à l'axe b coupent la surface de l'ellipsoïde suivant des circonférences appelées **parallèles**. Chaque point d'une ellipse méridienne décrit en tournant un parallèle : le point d décrit ainsi le parallèle p.

Le parallèle passant par le centre de la Terre est l'**équateur** e. Remarquons que le parallèle et le méridien d'un lieu se coupent sous un angle droit.

Le point d (figure 2.3.2.) est la **projection** sur la surface de référence du point D situé sur la surface terrestre. Cette projection est effectuée en suivant une direction DN, normale à la surface de référence. Cette direction est située dans le plan méridien passant par D et est perpendiculaire à la tangente à l'ellipse méridienne en d.

Le **nord géographique** est la direction du méridien du point vers le pôle nord.

Le **nord magnétique** est la direction de la pointe bleue de l'aiguille aimantée, c'est-à-dire du champ magnétique terrestre du moment et du lieu.

2. Les référentiels géodésiques

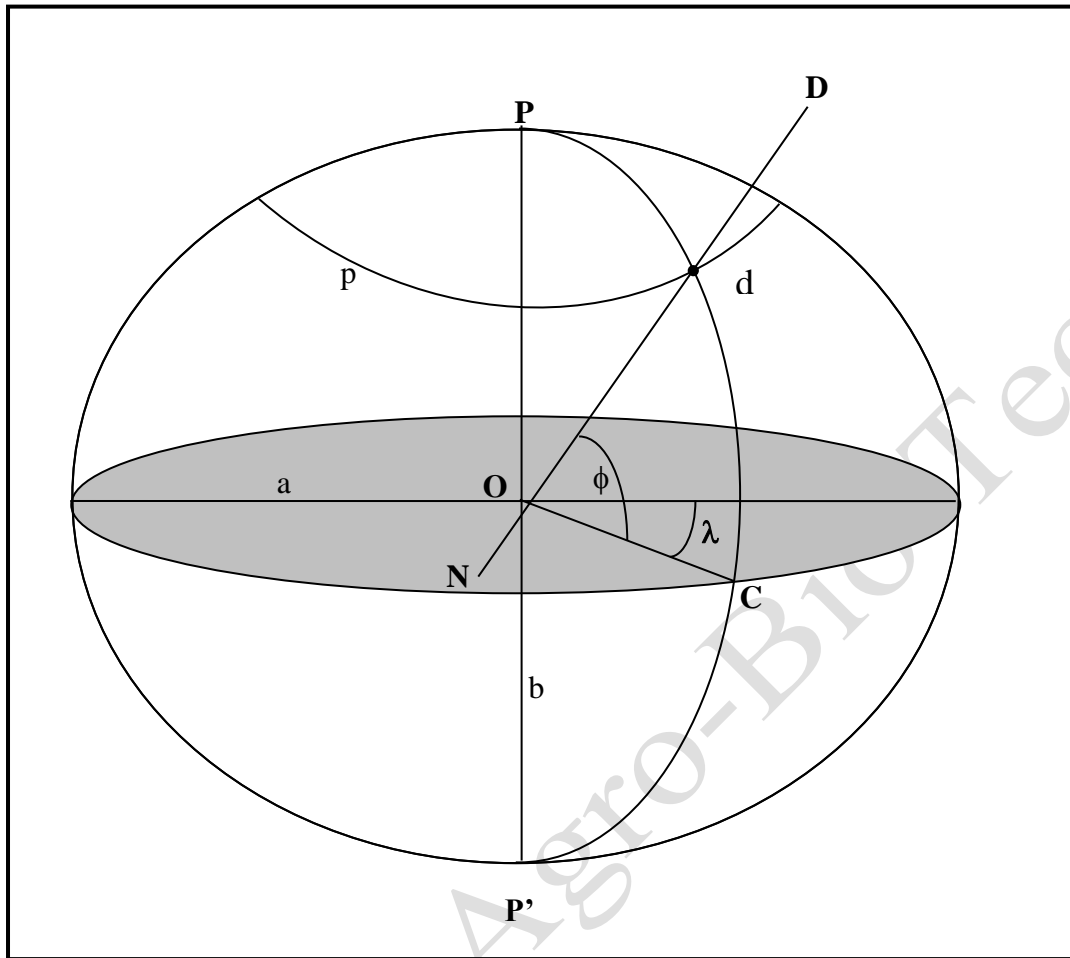


Figure 2.3.2. Pôles, méridien et parallèle.

La déclinaison magnétique est l'angle du nord géographique et du nord magnétique; elle varie dans le temps et dans l'espace. Les variations dans le temps sont d'environ 0,16 gon d'amplitude par jour avec une tendance annuelle de 0,08 gon. Ces variations sont fortement perturbées par des orages magnétiques souvent liés à l'activité solaire. Les variations dans l'espace s'expriment sur les cartes **isogoniques**. En 1965 la déclinaison magnétique variait en Belgique de 6° à 4° 30' ouest. En 1943 les limites de variation étaient de 8° 30' à 6° 50' ouest.

Le nord du quadrillage en un point est la direction de l'axe des ordonnées positives en ce point (généralement notées y ou n). L'angle du nord géographique et du nord du quadrillage est appelé **convergence des méridiens**.

L'azimut d'une direction est l'angle que fait cette direction avec le nord géographique en tournant dans le sens des aiguilles d'une montre (sens direct ou dextrogyre).

Les définitions suivantes font intervenir les mots '**géodésique**' et '**astronomique**'. Le premier est lié aux normales par rapport à un ellipsoïde, le deuxième aux normales par rapport au géoïde (c'est-à-dire à la verticale physique).

2. Les référentiels géodésiques

La latitude géodésique du point D est l'angle φ entre la normale DN à l'ellipsoïde (ne passant pas forcément par le centre de l'ellipsoïde!) de référence et le plan de l'équateur. Pour des ellipsoïdes différents, la latitude est donc différente. D'où la nécessité de mentionner le système de référence pour lequel la latitude est annoncée. La **latitude astronomique** du point D est l'angle que fait la verticale physique avec le plan de l'équateur.

La longitude géodésique (angle visualisé sur un plan circulaire parallèle à l'équateur) du même point est l'angle dièdre λ que fait le plan méridien géodésique du point D avec un plan méridien choisi comme origine passant par un point bien déterminé de la terre.

Longitude astronomique : angle dièdre que fait le plan méridien astronomique d'un lieu avec un plan méridien origine.

Coordonnées géographiques latitude, longitude et hauteur données par rapport à un modèle sphérique de la Terre.

Coordonnées géodésiques latitude, longitude et hauteur données par rapport à un modèle ellipsoïdal (figure 2.3.3). Elles sont la base du système de cartographie.

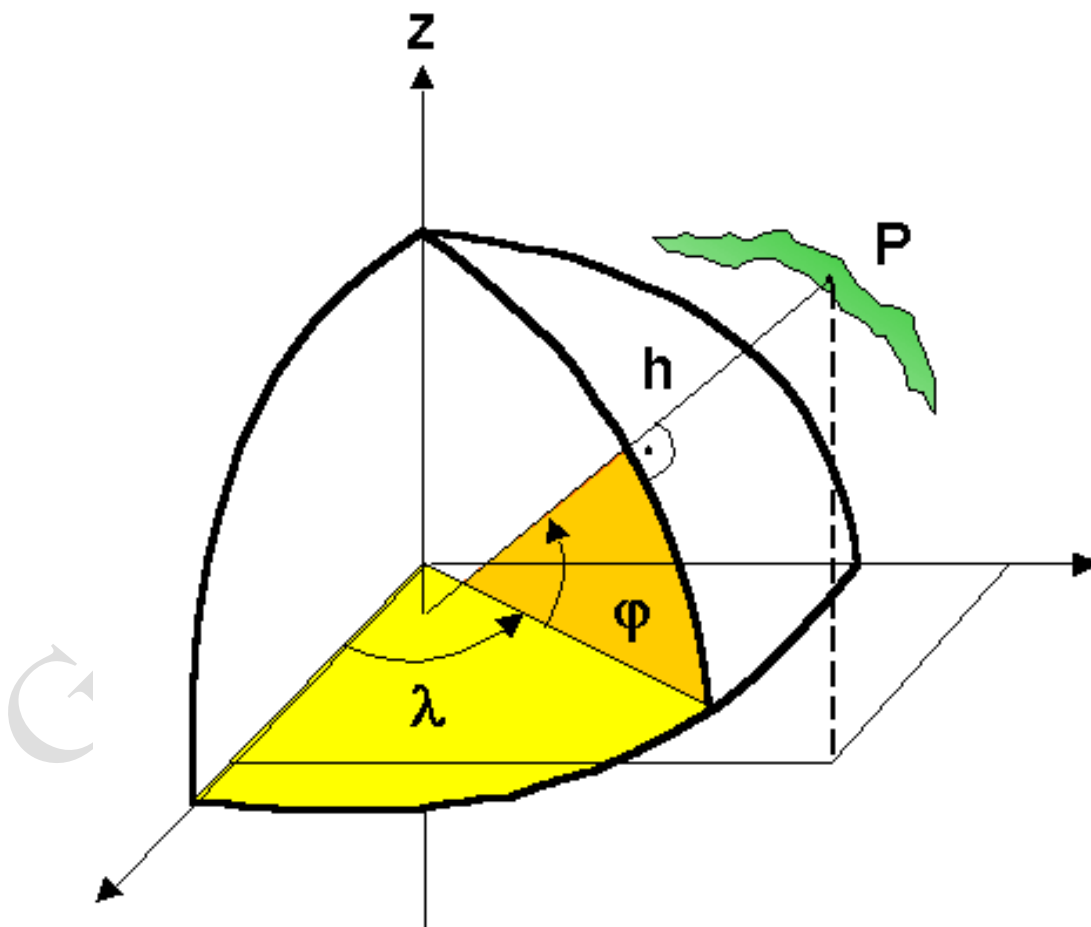


Figure 2.3.3. Longitude (λ), latitude (φ) et hauteur ellipsoïdale (h).

2. Les référentiels géodésiques

Mais dans un abus de langage, les coordonnées géographiques sont souvent assimilées à des coordonnées géodésiques.

L'altitude du point D est la distance qui le sépare de sa projection d sur la surface de référence qui est dans ce cas le géoïde.

Déviaton de la verticale est l'angle entre la normale à l'ellipsoïde et la normale au géoïde en un lieu donné. Cet angle contient 2 composantes : Nord/Sud et Est/Ouest.

Ondulation du géoïde : hauteur du géoïde au-dessus de l'ellipsoïde (positive ou négative selon le lieu). Un autre nom plus parlant et plus juste pourrait être "séparation géoïde/ellipsoïde". Cette notion est très importante pour la réduction des observations GPS. Les systèmes de positionnement couramment utilisés s'appuient donc sur un ellipsoïde de référence et sur un système d'axes repère qui permet de trouver sa position sur l'ellipsoïde en latitude, longitude et hauteur ou altitude selon la référence. L'écart entre le point à positionner et l'ellipsoïde définit la **hauteur ellipsoïdale**.

Ne pas confondre altitude et hauteur ellipsoïdale : elles sont données par rapport à des références différentes (§ 10.1²).

2.3.3. Les paramètres de l'ellipsoïde

1° Pour déterminer les paramètres de l'ellipsoïde, c'est-à-dire pour déterminer la valeur du demi grand axe³ a et du demi petit axe⁴ b, il faut faire un certain nombre d'observations astronomiques et des opérations de triangulation.

On mesure, le long d'un méridien, la longueur de l'arc de méridien séparant deux points et la latitude de ces deux points. On répète cette opération en un autre endroit de la terre. Des calculs relativement simples permettent alors la détermination des demi axes de l'ellipse qui définit l'ellipsoïde.

En général, au lieu de donner la valeur des 2 axes, on définit l'ellipse méridienne au moyen du demi grand axe et d'un coefficient appelé **aplatissement p** :

$$p = \frac{a - b}{a} = 1 - \frac{b}{a},$$

où a est le demi grand axe de l'ellipse,
b est le demi petit axe de l'ellipse.

On définit également la première excentricité de l'ellipse méridienne par la relation :

² <https://hdl.handle.net/2268/293929>

³ *Equatorial radius, semi-major*

³ *Polar radius, semi-minor*

2. Les référentiels géodésiques

$$e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}} = \sqrt{2p - p^2}.$$

L'aplatissement est très faible ce qui montre que la forme de la terre se rapproche beaucoup d'une sphère. Aussi, dans les applications où l'on ne recherche pas une grande précision, on admet que c'est une sphère de rayon moyen :

$$R = \frac{a + b}{2},$$

ce qui vaut, pour l'ellipsoïde global WGS84 (paragraphe 2.3.6.) 6.367.444,5 m, souvent arrondi à 6.367 km.

Si on veut conserver à la sphère qui se substitue à l'ellipsoïde le même volume que celui-ci, on retiendra plutôt comme rayon moyen (**MARCHAND, 1961**) :

$$R = \frac{2a + b}{3},$$

ce qui vaut pour le même ellipsoïde 6.371.008,6 m, arrondi à 6.371 km.

Le tableau 2.3.1 présente les dimensions de quelques ellipsoïdes utilisés pour approcher le géoïde localement.

Tableau 2.3.1. Dimensions de quelques ellipsoïdes de référence.

Nom de l'ellipsoïde	Demi-grand axe et demi-petit axe	Aplatissement (p^{-1})
Bessel (1841)	a = 6.377.397 m	299
Delambre (1860)	a = 6.376.189 m	308,64
Clarke (1866)	a = 6.378.206,4 m et b = 6.356.583,8 m	294,98
Clarke (1880)	a = 6.378.249,1 m et b = 6.356.514,9 m	
Hayford (1909)	a = 6.378.388,0 m et b = 6.356.912 m	297
GRS80	a = 6.378.137 m	298,257222101
WGS84	a = 6 378 137 m	298,257223563

D'autres ellipsoïdes sont présentés en annexe n°7⁵.

L'ellipsoïde de **BESSEL** est employé en Allemagne et par plusieurs pays d'Europe centrale; celui de

⁵ Les annexes sont consultables et téléchargeables en suivant le lien <https://hdl.handle.net/2268/293542>

2. Les référentiels géodésiques

CLARKE en Angleterre et aux États-Unis; celui de **HAYFORD** définit l'ellipsoïde international choisi lors du Congrès de Géodésie tenu à Madrid, en 1924, par l'Union Géodésique et Géophysique Internationale. Celui de **DELAMBRE** a servi à déterminer la longueur du mètre, il a aussi été employé comme surface de référence pour les cartes éditées par l'Institut Cartographique Militaire Belge (actuellement Institut Géographique National). Depuis 1927, la Belgique a adopté l'ellipsoïde international pour ses travaux géodésiques (paragraphe 2.4.3.).

Quand on connaît les dimensions de l'ellipse méridienne, on peut calculer la longueur des arcs de méridiens et des arcs de parallèles pour les diverses valeurs de la latitude, on obtient ainsi les tables dites "**tables de l'ellipsoïde**".

A titre documentaire on trouvera ci-dessous quelques longueurs d'arcs de méridien de 1° de l'ellipsoïde de Hayford.

A l'équateur on trouve qu'un arc de méridien de 1° mesure :	110.564 m,
aux environs de Paris (latitude de 49°)	111.210 m,
aux environs d'Oslo (latitude de 60°)	111.416 m,
aux environs de Mourmansk (latitude de 70°)	111.568 m,
aux environs de 80°	111.667 m,
au Pôle	111.702 m.

On remarque que la longueur de l'arc va en croissant de l'équateur jusqu'au pôle. C'est un des motifs pour lequel on avait émis l'hypothèse que le méridien devait être une sorte de circonférence aplatie.

Des mesures d'arc effectuées à la même latitude sur des méridiens différents, montrent que la longueur de l'arc de 1° est sensiblement la même (aux erreurs d'observation près). Ceci confirme l'hypothèse que tous les méridiens sont identiques et que la surface est de révolution.

Pour un grand nombre d'applications géodésiques et notamment pour les besoins de la cartographie (chapitre 3), on considère que le géoïde a la forme d'une sphère, ce qui permet de simplifier le calcul de la longueur de l'arc de méridien par la formule suivante :

$$dm \approx R(\varphi_2 - \varphi_1) ,$$

où dm est la longueur, exprimées en m, de l'arc de méridien comprises entre les latitudes φ_1 et φ_2 exprimées en radian,

R est le rayon moyen de la terre exprimé en m.

En appliquant cette simplification, et pour un rayon moyen de la terre de 6367 km, un arc de méridien de 1° a une longueur moyenne de 111 Km 125. La longueur d'une minute d'angle ou la $60^{\text{ème}}$ partie de la longueur précédente est égale à 1.852 mètres, c'est le **mille marin** qui est une unité adoptée en navigation; la seconde d'arc vaut un peu plus de 30 mètres.

2. Les référentiels géodésiques

Dans le système centésimal, l'arc de méridien moyen correspondant au grade vaut en moyenne 100 km; la minute centésimale d'arc 1 Km et la seconde centésimale d'arc 10 mètres environ.

Plus exactement, la longueur d'un arc de méridien entre les latitudes φ_1 et φ_2 se calcule par la formule :

$$dm = a(1 - e^2) \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} (1 - e^2 \sin \varphi)^{-3/2} d\varphi.$$

Quant à la longueur d'un arc de parallèle, en raison du fait que le géoïde est approché par un ellipsoïde de révolution, il se calcule par l'expression :

$$dp = r_p (\lambda_2 - \lambda_1)$$

où dp est la longueur, exprimées en m, de l'arc de parallèle comprises entre les longitudes λ_1 et λ_2 exprimées en radian,

r_p est le rayon du parallèle p, exprimé en m.

En adoptant la forme approximativement sphérique pour le géoïde, on peut calculer le rayon d'un parallèle, en fonction de sa latitude, par la formule :

$$r_p \approx R \cos \varphi.$$

A titre d'exemple, un arc de parallèle de 1° , à la latitude de Gembloux (environ $50^\circ 33' 41''$) aura une longueur approximative de:

$$dp = 6.367.000 \cos(50^\circ 33' 41'') 0,017453 = 70.592 \text{ m.}$$

Plus exactement le rayon d'un parallèle de l'ellipsoïde se calcule par la formule :

$$r_p = \frac{a \cos \varphi}{\sqrt{1 - (e \sin \varphi)^2}}.$$

2.3.4. Repérage d'un point

Le repérage d'un point se fait au moyen de ses **coordonnées géodésiques** ou **géographiques** : latitude ϕ , longitude λ et altitude ou hauteur h définies ci-dessus.

ϕ et λ sont des angles exprimés en degrés, minutes et secondes. Il est possible de transformer ces coordonnées en coordonnées cartésiennes si les paramètres du référentiel sont connus (chapitre 4).

Les latitudes se comptent de 0° à 90° sur le méridien et de part et d'autre de l'équateur. Il y a des

2. Les référentiels géodésiques

latitudes nord ou boréales (positives) et des latitudes sud ou australes (négatives).

Le méridien origine des longitudes est généralement le méridien passant par l'observatoire de Greenwich (situé dans les faubourgs de Londres, Grande Bretagne). Toutefois pour les anciennes cartes de Belgique c'est le méridien passant par l'ancien observatoire de Bruxelles qui a été choisi. Au lieu de compter la longitude de 0 à 360°, on divise l'équateur de 0 à 180° de part et d'autre du méridien d'origine. Il y a des longitudes ouest ou occidentales (positives) et des longitudes est ou orientales (négatives).

Il est intéressant de remarquer que la révolution de la terre se faisant en 24 heures, 1 heure équivaut ainsi à un angle de 15°, 1 minute à un angle de 15 minutes sexagésimales et 1 seconde de temps à un angle de 15 secondes sexagésimales.

2.3.5. Les ellipsoïdes utilisés en Belgique

Depuis 1860 et jusqu'en 1949 y compris, l'ellipsoïde de Delambre (1860) était d'usage en Belgique (GEVAERTS P., 1953). Ses paramètres sont les suivants :

$$a = 6.376.189 \text{ m,}$$

$$p = 1/308,64.$$

Y était associée la projection de Bonne (paragraphe 3.4.2). Les paramètres de cette projection appliquée à la Belgique étaient les suivants :

Méridien central de l'Observatoire de Bruxelles, déterminé sur l'ellipsoïde de Delambre:
04°22'04,71'' de longitude Est ;

Le parallèle d'origine choisi pour le pays a été placé à 50°25' de latitude Nord (Ellipsoïde de Delambre). Le point central de la projection est situé sur le méridien de l'ancien observatoire de Bruxelles, mais à une latitude égale à celle de Charleroi.

De 1950 à nos jours c'est l'ellipsoïde international de Hayford (1924) qui est utilisé en Belgique. Ses paramètres sont les suivants :

$$a = 6\,378\,388 \text{ m,}$$

$$p = 1/297$$

Des précisions complémentaires quant à son orientation sont fournies au paragraphe 2.4.3.

Il est également utilisé pour l'Europe Occidentale notamment dans le système géodésique de référence ED50 (paragraphe 2.4.3.) que la Belgique utilise encore largement.

Depuis 2007, l'Institut Géographique National (IGN) de Belgique propose un nouveau système de projection cartographique, dénommé Lambert 2008, qui utilise l'ellipsoïde GRS80 décrit au paragraphe suivant (§2.3.6).

2.3.6. Les ellipsoïdes utilisés pour les systèmes géodésiques de référence globaux

L'ellipsoïde GRS80 est celui sur lequel sont basés les systèmes de référence géodésiques (paragraphe 2.4.) globaux ITRS, WGS84 et européen ETRS89 (paragraphe 2.4.2.).

Les paramètres de l'ellipsoïde GRS80 (Geodetic Reference System of 1980) sont :

$$a = 6.378.137 \text{ m,}$$

$$1/p = 298,257222101 \text{ (WÖPPELMANN, 1998)}$$

Il est à noter que l'ellipsoïde GRS80 est parfois appelé ellipsoïde WGS 84 (paragraphe 2.4.3.).

L'ellipsoïde WGS84 est très proche du GRS80. Ils ne diffèrent que par une différence d'aplatissement de 16×10^{-12} (ILIFFE 2000, P 23). C'est pourquoi, pour la plupart des applications pratiques, ils sont considérés identiques. Selon les publications, le système géodésique de référence WGS84 peut être dit basé sur l'ellipsoïde WGS84 ou GRS80, quoique plus souvent sur GRS80.

$$a = 6\ 378\ 137 \text{ m}$$

$$1/p = 298,257223563 \text{ (NAISMITH J.M., JEFFRESS G.A., PROUTY D., EN LIGNE, 1999)}$$

L'ellipsoïde SGS90 (Soviet Geodetic System) ou PZ90 (Parametry Zemli 1990) ou PE-90 pour le système russe de positionnement par satellites GLONASS. Il est très proche de WGS84. Ses paramètres sont :

$$a = 6\ 378\ 136 \text{ m,}$$

$$1/p = 298,257839303 \text{ (NAISMITH J.M., JEFFRESS G.A., PROUTY D., EN LIGNE, 1999)}$$

2.4. Les systèmes géodésiques de référence et les « datum »

La fixation des paramètres de l'ellipsoïde ne suffit évidemment pas à en faire un référentiel. Il faut encore situer cet ellipsoïde dans l'espace, par rapport à la planète Terre. C'est précisément ce qu'apporte la notion de « datum », présentée dans ce paragraphe.

Des informations complémentaires sur les référentiels géométriques pourront être trouvées chez **ILIFFE J.C. (2000) ET IGN (1989)**, ainsi que sur les sites internet de:

l'Observatoire Royal de Belgique (2004)

l'IGN - Services Géodésiques (2004)

2.4.1. Le système de coordonnées global et la notion de système géodésique de référence

1° Toute coordonnée doit être donnée par rapport à un système géodésique de référence. Il peut être uni-, di-, ou tri-dimensionnel. Il faut donc en définir l'origine et s'il comporte plus d'une dimension, l'orientation des axes. Le système de coordonnées bi- ou tridimensionnel se verra associé en outre un ellipsoïde donné (voire une sphère).

S'il s'agit par exemple de ne connaître que les hauteurs (unidimensionnel) par rapport à un certain point A (sur un chantier de construction par exemple), ce point A muni de sa hauteur peut être le système géodésique de référence (référence). Le bidimensionnel, associé à un ellipsoïde, ne s'intéresse par exemple qu'aux longitude et latitude. Le tridimensionnel quant à lui comprendra une hauteur ou altitude, en plus des longitude et latitude.

Il est donc nécessaire d'associer à toutes coordonnées le système géodésique de référence dans lequel elles ont été calculées. En effet, les coordonnées données par rapport à un système géodésique de référence ne seront pas identiques à celles données pour les mêmes points physiques dans un autre système géodésique de référence!

Un **système géodésique de référence** tridimensionnel (celui qui sera le plus souvent pris en compte dans ce cours) est donc basé sur un ellipsoïde donné, voire un géoïde (p.ex. pour l'altitude). Tout ellipsoïde sert de base à la constitution d'un système géodésique de référence. Simplement, le **datum** représente un ellipsoïde positionné (translation et rotation) d'une certaine manière par rapport à la Terre. Il existe donc des systèmes géodésiques de référence différents basés sur le même ellipsoïde : seule sa position change. C'est le cas pour les systèmes géodésiques de référence ED50 (European Datum 1950) et BD72 (Belgium Datum 1972) (paragraphe 2.4.3.). Quand on parle de système géodésique de référence, il est donc important d'en spécifier les paramètres de position de l'ellipsoïde. Il convient ici de faire la différence entre datum global et datum local.

2. Les référentiels géodésiques

Pour rappel, précédemment les géoïdes étaient déterminés par des observations qui ne pouvaient être exécutées que sur la terre ferme. Il en résulte un grand nombre de "**modèles de géoïdes locaux**" et par conséquent un grand nombre de "**datum locaux**".

Aujourd'hui, en observant les variations de certains paramètres orbitaux de satellites artificiels, il est possible de déterminer un "géoïde global" et par conséquent un "**ellipsoïde global**". Ainsi des "**datum globaux**" ont été créés.

On différencie **système géodésique de référence global** et **local** essentiellement par la manière dont on positionne l'ellipsoïde :

dans un système de coordonnées cartésien global (tridimensionnel), l'origine est le centre de masse de la Terre ce qui qualifie l'ellipsoïde de "géocentrique" (**ILIFFE, 2000, P 23**). Il est basé sur le CTRS (paragraphe 2.4.2.) et les coordonnées y sont cartésiennes (X, Y et Z) et tridimensionnelles. Ce système est la plupart du temps **dynamique** (sauf l'ETRS89) : il prend en compte tous les mouvements de l'écorce terrestre (tectonique des plaques), et les coordonnées varient avec le temps (1 à 3 cm par an). Cela rend ce genre de système peu pratique pour des applications géodésiques. Ils sont par contre utilisés dans les systèmes satellites comme le GPS (paragraphe 2.4.2.),

pour un système de référence **local**, la position de l'ellipsoïde est déterminée par son **point fondamental**⁶ (ellipsoïde non géocentrique). Celui-ci est le point où l'ellipsoïde est parfaitement tangent au géoïde c'est-à-dire que l'ondulation du géoïde et la déviation de la verticale (paragraphe 2.3.2.) valent zéro à cet endroit précis. Les axes tridimensionnels de l'ellipsoïde n'ont pas le centre de la Terre comme origine et ne sont pas orientés par référence à la Terre. A ce système géodésique de référence local est toujours associé un certain type de projection plane (chapitre 3).

Il est évidemment possible de transformer les coordonnées d'un système à l'autre (chapitre 4).

Pour un système géodésique de référence global, les valeurs numériques des trois paramètres de translation peuvent cependant être de quelques mètres (le centre de l'ellipsoïde n'est pas exactement confondu avec le centre de la Terre). Pour un système géodésique de référence local, ces valeurs peuvent atteindre quelques centaines de mètres. (**ILIFFE, 2000, P 26**)

⁶ En anglais : point fondamental = anchor point, origin point

2. Les référentiels géodésiques

2° Lors de la définition générale⁷ d'un système géodésique de référence (IGN, 1989 – p 4 et 5), la position et l'orientation de l'ellipsoïde par rapport au centre de masse de la terre sont définies par 7 paramètres (les 6 premiers, présentés dans la figure 2.4.1, sont déterminés par la géodésie spatiale), outre ceux de l'ellipsoïde :

la position du centre de l'ellipsoïde par rapport au centre de masse de la Terre (trois paramètres de translation ΔX , ΔY et ΔZ) ;

l'orientation des axes principaux de l'ellipsoïde par rapport à un système de référence tridimensionnel, lié à la Terre (trois paramètres de rotations) dont l'axe Z est l'axe de rotation de la terre, l'axe X est l'intersection entre le plan équatorial et le plan du méridien de Greenwich (défini par le Bureau International de l'Heure BIH) et Y est l'axe perpendiculaire aux 2 précédents de façon à former un trièdre droit orthogonal avec les axes X et Z (figure 2.4.2.) ;

un facteur d'échelle S ;

⁷ En anglais : geocentric positioning (Vanicek et Krakiwsky, 1992)

2. Les référentiels géodésiques

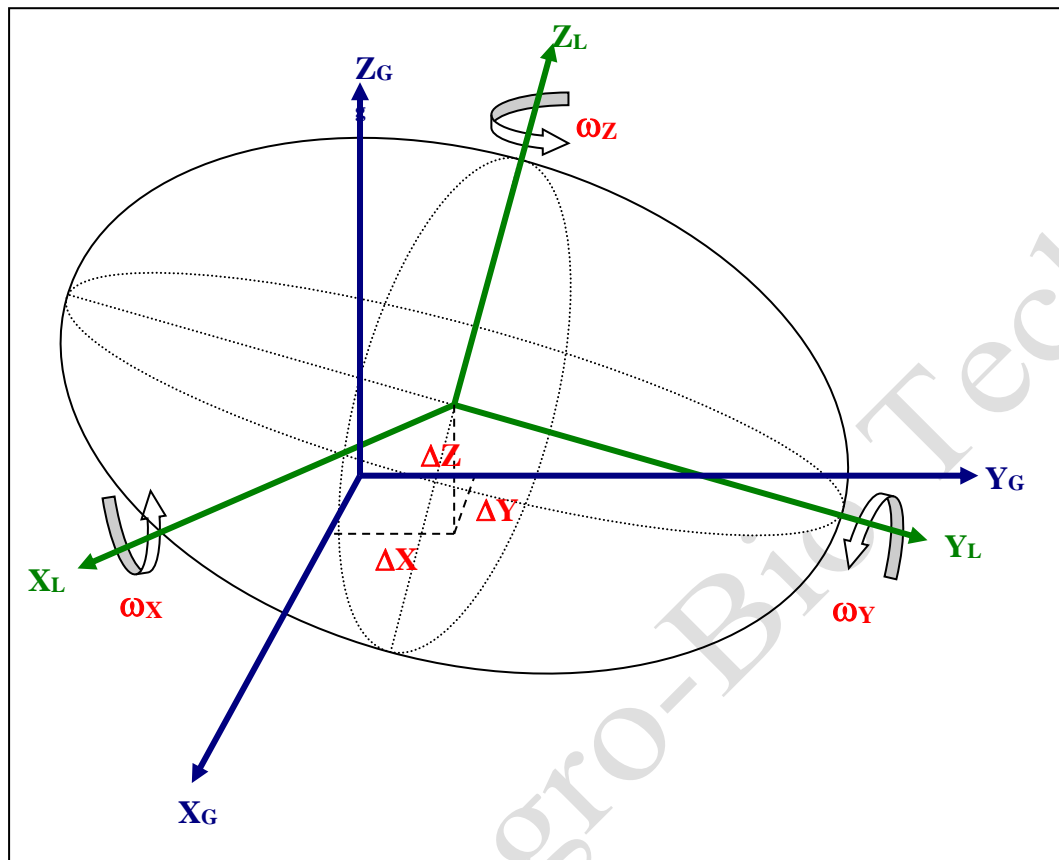


Figure 2.4.1. Système géodésique de référence local (XL, YL et ZL) positionné en fonction du système géodésique de référence global (XG, YG et ZG).

Pour passer des coordonnées cartésiennes d'un système géodésique de référence aux coordonnées cartésiennes d'un autre système géodésique de référence (chapitre 4), il faudra donc disposer de 7 paramètres qui donnent la position de l'un par rapport à l'autre. Pour déterminer ces 7 inconnues, il faut au moins 3 points dont les coordonnées sont connues dans les deux systèmes de référence.

3° Lors de la définition locale⁸ du système géodésique de référence, d'autres paramètres sont également utilisés pour positionner et orienter l'ellipsoïde (GODARD, 2004 ET VANICEK ET KRAKIWSKY, 1992) :

la position du point fondamental à savoir les 3 coordonnées géodésiques, la hauteur donnant la distance géoïde/ellipsoïde peut être fixée à zéro (VANICEK ET KRAKIWSKY, 1992, P 396-397),

2 paramètres de déflexion géoïdale (VANICEK ET KRAKIWSKY, 1992, P 396) déterminant la déviation de la verticale au point fondamental c'est-à-dire 2 angles entre la verticale physique et la normale à l'ellipsoïde passant par le point origine (paragraphe 2.3.2.) ; Ces deux angles peuvent évidemment être nuls,

⁸ Anglais : topocentric positioning (VANICEK ET KRAKIWSKY, 1992, P 396)

2. Les référentiels géodésiques

l'azimut géodésique d'une ligne joignant le point fondamental et un autre point donné (direction de référence pour définir le Nord),
le méridien origine.

L'avantage de ces paramètres de définition locaux (par rapport aux 7 paramètres de la définition globale 2.4.1. 2°) est d'avoir une relation directe aux quantités mesurées sur la surface de la terre (VANICEK ET KRAKIWSKY, 1992, P 397).

Ce système de référence est associé à un type de projection selon le pays (par exemple projection conique à 2 parallèles sécants pour la Belgique – chapitre 3).

Ce sont toutes ces observations qui permettent d'orienter le système géodésique de référence et de rendre, en général, l'ellipsoïde tangent au géoïde au point fondamental c'est-à-dire que la verticale (physique) et la normale à l'ellipsoïde y sont parallèles ou encore que les latitudes (et longitude) astronomique et géodésique sont identiques. L'ellipsoïde ne sera donc pas géocentrique.

Un système géodésique de référence local approchera mieux le géoïde localement qu'un système géodésique de référence global étant donné la manière dont l'ellipsoïde local est positionné.

Les coordonnées géodésiques telles la longitude et la latitude sont exprimées sur un système géodésique de référence.

S'il est fait référence à un système géodésique de référence pour situer les satellites, il faut savoir que chaque système de satellites (TRANSIT, GPS, SLR) a son système géodésique de référence propre.

4° Une dernière précision doit être également donnée à propos de **datum horizontal** et **datum vertical** :

le premier est la surface de référence (ellipsoïde) pour le positionnement planimétrique de points donc bidimensionnel ;

le deuxième est la surface de référence (ellipsoïde ou géoïde s'il est nécessaire de parler en altitude) pour un positionnement vertical donc unidimensionnel. Ils peuvent par exemple être utilisés pour détecter les variations du niveau de la mer. Il en existe de nombreux modèles dont certains sont basés sur un niveau moyen de la mer à une époque donnée, d'autres sur le niveau des marées les plus basses ou les plus hautes. (École Nationale des Sciences Géographiques – France, en ligne, 2004).

En Belgique, le référentiel pris en considération par l'IGN pour les hauteurs est le DNG (Deuxième Nivellement Général ou en néerlandais TAW Tweede Algemene Waterpassing) effectué de 1947 à 1968, revu de 1981 à 2000 : le niveau de référence est le niveau moyen des basses mers. L'écart entre le géoïde et le DNG est de l'ordre de 2,30 m (IGN, 2004).

2. Les référentiels géodésiques

De plus, la référence verticale est rarement l'ellipsoïde mais plutôt le géoïde, d'où la distinction entre des référentiels horizontaux et verticaux. Mais évidemment, un seul système peut être utilisé. Il est alors tridimensionnel.

5° Pour être complet, ajoutons que la notion de système géodésique de référence comprend d'une part le datum tel qu'explicité ci-dessus, qui en est la partie physique, et d'autre part le système de coordonnées qui définit les différents types de coordonnées qui peuvent être utilisées : rectangulaires géocentriques, géodésiques et cartographiques (exposées au chapitre 3), ainsi que les relations qui permettent de passer d'un type à l'autre et qui seront exposées au chapitre 4.

2.4.2. Les systèmes géodésiques de référence globaux géocentriques

Les ellipsoïdes se positionnent par rapport à un système d'axes. Seront donc abordés pour commencer les systèmes d'axes CCRS et CTRS.

1° Dans un système céleste, toute observation de corps céleste (naturel ou artificiel) sera transformable en mouvement seulement s'il est référencé à un système d'axes bien défini. Ces axes sont fixés dans l'espace ou bien ont un mouvement connu par rapport à quelque chose qui est fixe. Cette série d'axes constitue un système de référence céleste (Celestial Reference System - **CRS**). Pour une raison pratique, il convient de s'accorder sur un système d'axes particulier : c'est le Système de Référence Conventionnel Céleste (Conventional Celestial Reference System - **CCRS**).

Tout système de référence est défini par 2 ensembles précis : l'un concerne les paramètres théoriques (système⁹) et l'autre la réalisation matérielle constituée de stations sur le terrain auxquels il est possible de se référer (maillage¹⁰).

Ces stations sont des points matériels (qu'ils soient sur terre ou dans l'univers selon qu'il s'agit d'un système terrestre – voir CTRS – ou céleste CCRS), auxquels sont reliés ces systèmes de référence, sont utilisés pour définir la position des axes : c'est le maillage de référence (**Frame**).

Le CCRS est basé sur l'équateur moyen et l'équinoxe du 1/1/2000 comme la figure 2.4.2 le montre. L'axe Z est confondu avec l'axe de rotation de la Terre, tel que positionné par rapport aux étoiles le 1 janvier 2000 à 12 h. L'axe des X est positionné à l'intersection entre le plan de l'équateur et le plan de l'écliptique (Plan de l'orbite de la Terre). L'axe Y est perpendiculaire aux axes X et Z.

Le maillage du CCRS aussi appelé International Celestial Reference Frame ou ICRF est composé d'objets galactiques (étoiles, corps du système solaire) et est maintenu par le Service International de Rotation de la Terre (International Earth Rotation Service - IERS).

Il s'agit donc d'un système de référence pour le positionnement des satellites (et autres objets célestes) : Conventional Celestial Reference System (CCRS).

⁹ System

¹⁰ Frame

2. Les référentiels géodésiques

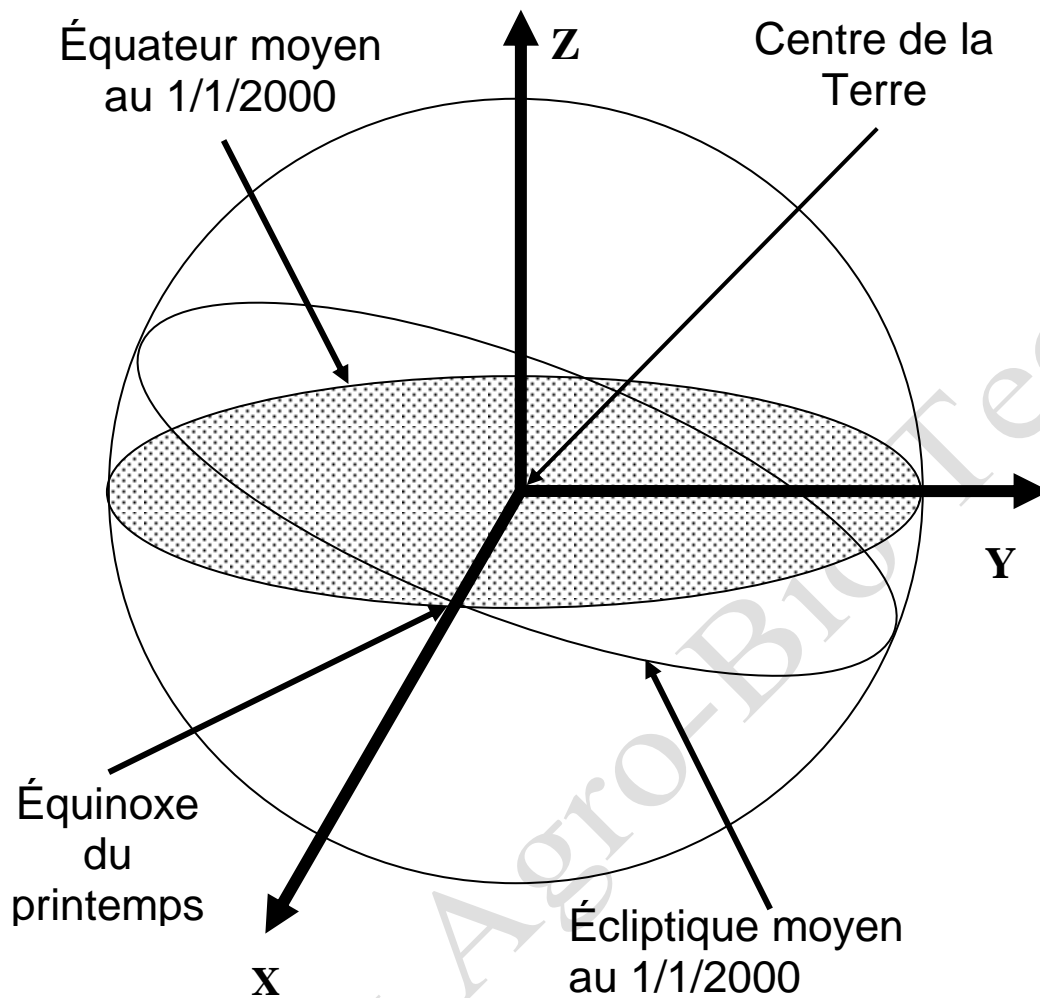


Figure 2.4.2. Le CCRS

2° Les systèmes de référence terrestres **TRS** (Terrestrial Reference Systems) sont fixés à la terre (donc entraînés dans le mouvement de rotation) afin de faciliter les observations terrestres (différence par rapport au CCRS). Il s'agit ici aussi de s'accorder sur un système bien défini pour une question pratique : il est donc nécessaire de positionner les axes et origine du système. Le **CTRS** (Conventional Terrestrial Reference System) a été adopté à ces fins.

Le maillage ou 'frame' (sur terre) appelé ITRF est un réseau de points de contrôle (stations, bornes, repères, etc.) dont les coordonnées et vitesses (la terre bouge !) sont calculées de différentes façons dont une est le GPS (similairement à la maintenance des points géodésiques). **L'IERS** (International Earth Rotation Service) fournit les paramètres **EOP** (Earth Orientation Parameters) qui permettent de relier ICRF et ITRF. (BRUYNINX C., EN LIGNE, 2003).

2. Les référentiels géodésiques

Les systèmes de positionnement par satellites nécessitent un système géodésique de référence global basé sur le CTRS sur lequel se positionneront à leur tour les ellipsoïdes globaux pour obtenir des systèmes géodésiques de référence globaux. Les paramètres positionnant le CTRS sont (figure 2.4.3):

géocentrique (ECEF – Earth Centered Earth Forced),

Nord référencé au pôle moyen 1900-1905 (puisque la direction de l'axe de rotation de la terre change avec le temps, il faut prendre une référence à un instant donné),

longitude 0° à l'Observatoire de Greenwich (l'axe X est l'intersection du méridien de Greenwich et de l'équateur).

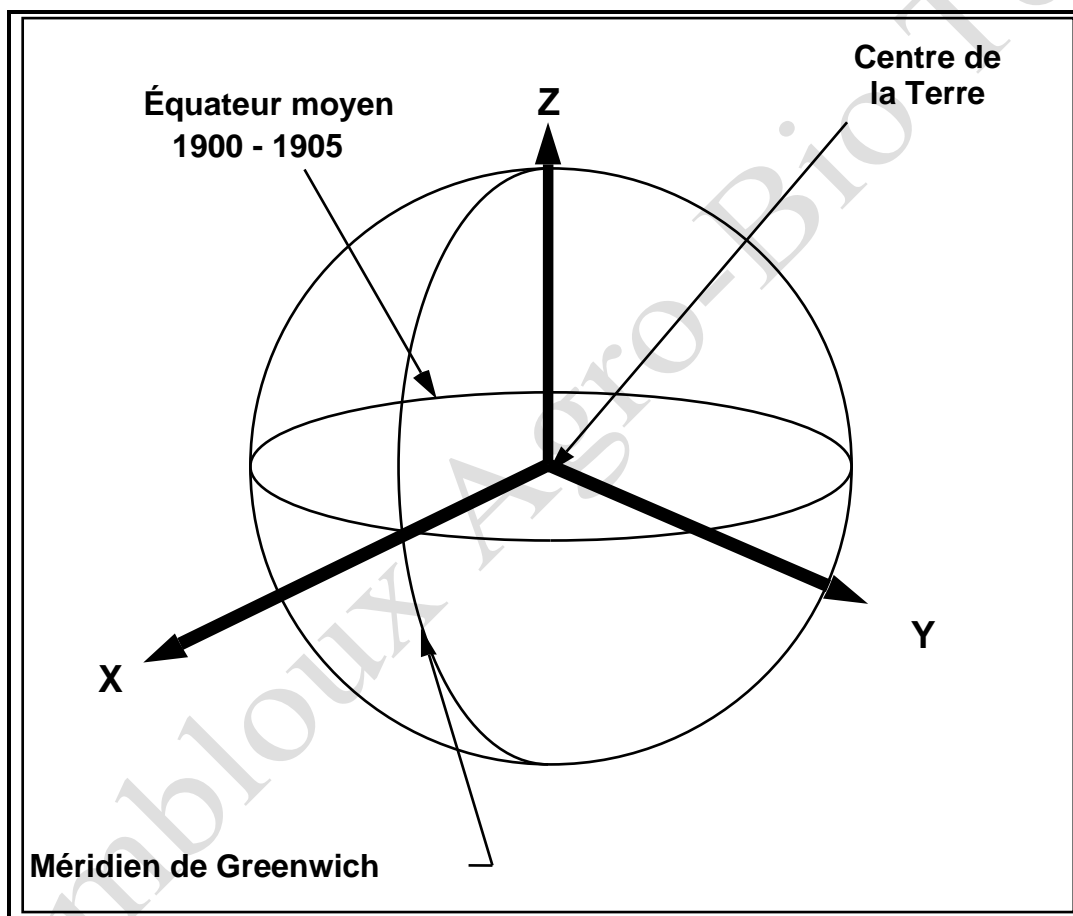


Figure 2.4.3. Système de référence pour le positionnement des points terrestres. (World Geodetic System WGS-84).

2. Les référentiels géodésiques

Trois systèmes géodésiques de référence globaux importants sont basés sur le CTRS:

ITRS (International Terrestrial Reference System),

WGS84 (utilisé pour le GPS),

PZ90 ou SGS90, Soviet Geodetic System 1990 (utilisé pour le système de satellites GLONASS).

Les 2 derniers sont établis et maintenus par des organisations militaires. Ceci est réalisé au moyen d'un réseau ou maillage de points matériels sur terre comme il a été dit précédemment. Le premier est maintenu par l'institution scientifique IERS (International Earth Rotation Service). Les deux premiers systèmes sont explicités ci-dessous.

3° L'ITRS (International Terrestrial Reference System) est donc basé sur le CTRS et sur l'ellipsoïde GRS80 (Geodetic Reference System of 1980) (avec $a = 6.378.137$ m et $1/p = 298,257222101$) (**BRUYNINX C.**, en ligne, **2002**).

Le maillage sur lequel est basé le système ITRS est l'ITRF (International Terrestrial Reference Frame). Il est mis en place par l'IERS (International Earth Rotation Service). Par conséquent, de par l'amélioration constante de ce maillage, il est nécessaire de savoir de quel maillage il est fait mention : ITRF88, ITRF89 etc. rappellent l'année pendant laquelle a eu lieu une meilleure définition de la vitesse et des coordonnées d'une ou plusieurs stations ou l'ajout de stations. Le passage de l'un à l'autre s'effectue via des modèles basés sur 7 paramètres disponibles sur le site web <http://itrf.ensg.ign.fr/>. La réalisation la plus récente est le ITRF2005. Il a été établi à partir d'environ 500 stations réparties à travers le monde, dont quatre situées en Belgique.

Tout point localisé dans ce système ITRS aura ainsi **les coordonnées rectangulaires géocentrées** X_{ITRS} , Y_{ITRS} et Z_{ITRS} . Il aura aussi les **coordonnées géodésiques** λ_{ITRS} , φ_{ITRS} et h_{ITRS} qui se rapportent à l'ellipsoïde de référence GRS80. Ces coordonnées sont illustrées dans la figure 2.4.4.

2. Les référentiels géodésiques

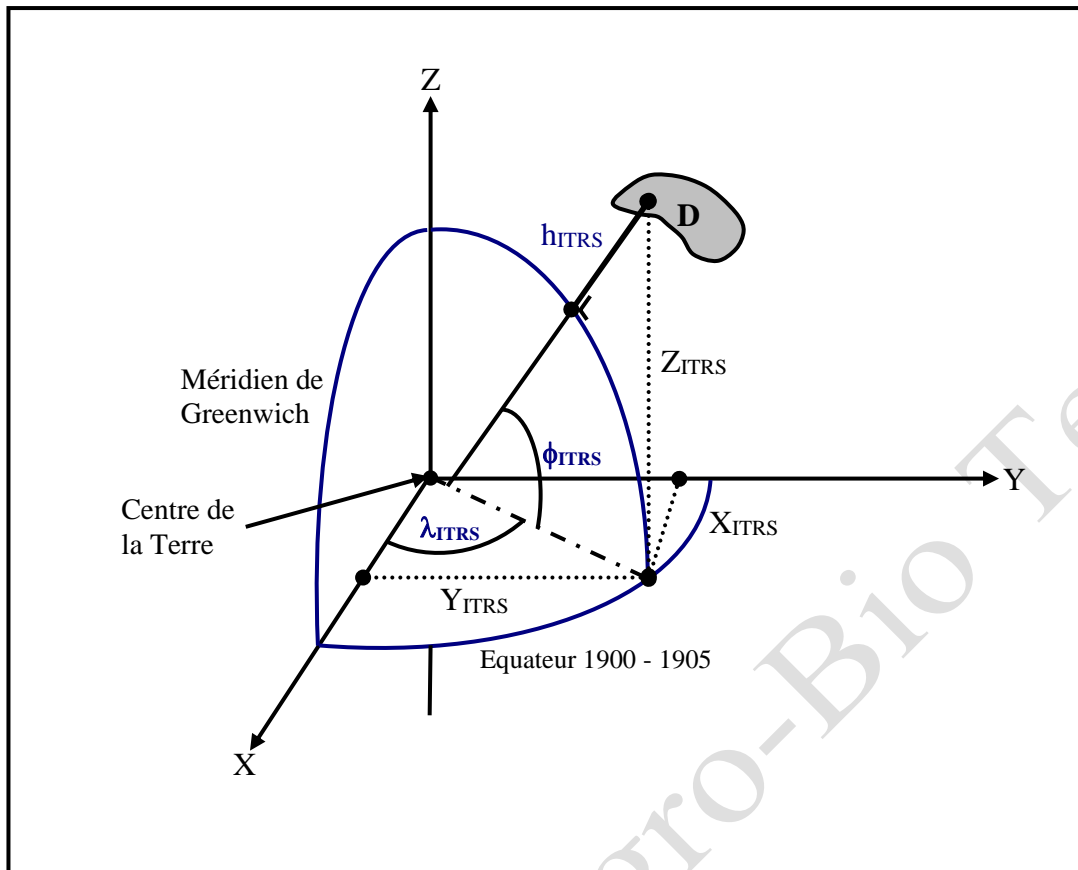


Figure 2.4.4. Coordonnées rectangulaires géocentriques (X_{ITRS} , Y_{ITRS} et Z_{ITRS}) et coordonnées géodésiques (λ_{ITRS} , ϕ_{ITRS} et h_{ITRS}) dans le système de référence international terrestre

4° Le système géodésique de référence WGS84 (World Geodetic System 84) a été établi par l'Agence Nationale d'Images et de Cartes Américaine (US National Imagery and Mapping Agency - NIMA) et le Département de la Défense Américain (US Department of Defense - DoD) en 1984. Le précédent était le WGS72.

Le WGS84 est basé sur l'ellipsoïde GRS80. Comme les ellipsoïdes WGS84 et GRS80 sont très proches, les 2 ellipsoïdes peuvent être indifféremment cités (selon la source) comme associés au système géodésique de référence WGS84, GRS80 étant cependant le plus souvent cité! Dorénavant la différence (actuellement pratiquement nulle) entre ITRS et WGS84 vient de l'historique du développement de WGS84 développé brièvement ci-dessous.

Sa représentation cartographique courante associée est l'UTM (paragraphe 3.3.4).

C'est le système géodésique de référence utilisé pour les données satellites (positions des satellites et positions de points sur la terre dérivées de signaux satellitaires) (BRUYNINX, EN LIGNE, 2003).

2. Les référentiels géodésiques

Tout point localisé dans ce système WGS84 le sera ainsi **par ses coordonnées rectangulaires** géocentrées X_{WGS84} , Y_{WGS84} et Z_{WGS84} . Il le sera aussi par ses **coordonnées géodésiques** λ_{WGS84} , φ_{WGS84} et h_{WGS84} qui se rapportent à l'ellipsoïde de référence GRS80.

Au départ le WGS84 a été basé sur les positions connues par mesure Doppler dans un système de satellites. Sachant que la précision sur les positions dans ce système était de l'ordre de 1 m, les points dans le WGS84 ne pouvaient être connus avec une meilleure précision.

Durant les 15 dernières années, la compatibilité des systèmes ITRS et WGS84 a été nettement améliorée par l'ajout dans le maillage (frame) du WGS84 de stations du maillage de l'ITRS (à savoir ITRF92 puis 94) : en 1993 pour la première fois, le réseau complet WGS84 a été recalculé par rapport à 8 stations GPS dont les positions étaient fixées dans le ITRF91. Le nouveau datum qui en résulte est appelé WGS84 (G730). Il est entré en application le 2 janvier 1994. En 1996, ce processus a encore été reproduit et une nouvelle réalisation appelée **WGS84 (G873)** a été effectuée, qui entre en application le 29 septembre 1996. Cette réalisation peut être considérée comme identique à l'ITRF94, à 2 cm près.

WGS84 (G873) est le système géodésique de référence amélioré de la 873^{ème} semaine (du 29 septembre 1996) où le "G" précise le fait que le calcul est basé sur des stations GPS.

Finalement la réalisation la plus récente, WGS84 (G1150) est entrée en application le 20 janvier 2002. Elle coïncide à l'ITRF2000 à un centimètre près.

Toutes ces améliorations au niveau de la compatibilité entre les 2 systèmes a pour conséquence qu'en pratique pour la plupart des applications, il n'y a pas de différence entre les coordonnées WGS84 et ITRS.

5° Le système ETRS89 (European Terrestrial Reference System 89) a été élaboré en vue de pallier un inconvénient majeur des systèmes globaux. En raison des mouvements relatifs des continents, le référentiel se modifie dans le temps, provoquant ainsi la variation des coordonnées d'une année à l'autre. La plaque continentale européenne se déplace d'environ 3 cm par an, par rapport à l'ensemble du système ITRS (MEGRIN, 2000).

En 1987, il a donc été décidé par EUREF (European Reference Frame) et CERCO (Comité Européen des responsables de la cartographie officielle) de développer un nouveau système européen géodésique **ETRS89**, basé sur l'ITRS et attaché à la partie stable du continent européen par 37 sites situés sur ce continent et appartenant au réseau ITRF. Il en résulte une meilleure stabilité des coordonnées mesurées sur le continent européen d'année en année. Ce réseau est mis à jour régulièrement, en fonction de l'évolution du réseau ITRF (VAN DEN HERREWEGEN, 2004).

A noter que c'est ce système de référence ETRS89 qui est maintenant utilisé dans la nouvelle projection cartographique Lambert 2008 utilisée en Belgique depuis 2007 (paragraphe 3.4.5).

2. Les référentiels géodésiques

6° D'autres transformations sont nécessaires pour passer des systèmes géodésiques de référence nationaux au système géodésique de référence européen.

L'une de ces transformations est la transformation D'HELMERT qui se sert de 7 paramètres pour convertir les coordonnées en Lambert belge 1972 (paragraphe 3.4.4) vers ETRS89 (avec une précision de 30 cm). Les transformations seront étudiées au chapitre 4.

7° Pour la région des États-Unis, Canada, Alaska, le NAD83 (North American Datum 1983 - système de référence planimétrique public) a été défini sur base du système local NAD27 (voir 0) grâce à des observations satellites. Il est basé sur l'ellipsoïde GRS80 et est géocentrique. Cet ellipsoïde est plus avantageux que le NAD27 pour les utilisateurs GPS.

2.4.3. Quelques systèmes géodésiques de référence locaux

1° Les caractéristiques principales du système géodésique de référence belge BD72 (Belgium Datum 1972) appliqué jusqu'en 2007 sont, outre le système d'axes CTRS par rapport auquel est positionné l'ellipsoïde :

ellipsoïde associé : Hayford ($a = 6\,378\,388$, $1/p = 297$),

point fondamental : Observatoire Royal de Belgique de coordonnées ($\phi_0 = 50^\circ 47' 57''$, $704N$, $\lambda_0 = 4^\circ 21' 24''$, $983E$),

méridien origine : Bruxelles $\lambda_0 = 4^\circ 21' 24,983''$,

représentation cartographique associée : projection conique Lambert sur cône sécant (Lambert belge72).

Sur les cartes au 1/10 000 et 1/20 000 de l'IGN, les coordonnées planes (x et y ou e et n) sont données par rapport au BD72. Ce dernier est progressivement remplacé par la nouvelle projection Lambert 2008.

En Belgique, les systèmes géodésiques de référence européens ED50 (vois ci-après) et ETRS89 (paragraphe 2.4.2.) sont également largement utilisés.

Il existe une formule de transformation (translation, rotation, échelle, voir chapitre 4) pour passer du système géodésique de référence belge au système géodésique de référence global (WGS84 ou ETRS89) (§ 4.5).

A noter que la projection cartographique belge issue du BD72 et dénommée Lambert72 est remplacée depuis 2007 par une nouvelle projection dénommée Lambert 2008 (paragraphe 3.4.5), fondée sur le système global ETRS89 présenté ci-dessus (paragraphe 2.4.2 5°).

2° Les systèmes géodésiques de référence s'appuyant sur un maillage de stations sur le terrain, il est intéressant de noter une dernière évolution du réseau belge.

2. Les référentiels géodésiques

En 1994, une densification du réseau européen a été réalisée à l'aide de GPS. Ce réseau (une trentaine de points en Belgique) a été baptisé **BEREF** et les points ont pu être déterminés dans le système de référence européen ETRS89 de façon très précise puisqu'ils étaient reliés au réseau EUREF : BEREf a en effet été établi en utilisant les 4 stations GPS permanentes mises en place par l'ORB et liées au réseau EUREF, le réseau permanent GPS européen (IGN, 2004).

En 2002-2003, le réseau BEREf a été complètement remesuré afin d'intégrer les réseaux régionaux (FLEPOS et WALCORS : réseau de stations de base pour GPS mises à disposition par la Flandre et la Wallonie) dans la référence européenne.

3° Avant 1950, il n'y avait que des réseaux géodésiques nationaux sans liens les uns avec les autres. En 1950 la volonté de les réunir a abouti à la création d'un réseau européen l'**ED50** (European Datum de 1950) dont les paramètres sont :

ellipsoïde associé : Hayford 1909 ($a = 6\,378\,388$; $1/p = 297$),

point fondamental : Potsdam,

représentation cartographique courante associée : UTM.

Puisque les systèmes belge et européen ont des points fondamentaux différents, il y a une autre orientation pour l'ellipsoïde et la différence entre les coordonnées géodésiques du réseau national et du réseau européen est assez importante. Pour la Belgique, ces différences valent en moyenne

$$\Delta\varphi \sim 1,1'' \sim 30 \text{ m}$$

$$\Delta\lambda \sim 9,2'' \sim 180 \text{ m}$$

4° NAD27 (North American Datum) est un système géodésique de référence horizontal (ou géodésique) non géocentrique utilisé aux États-Unis, Hawaï, Canada, Alaska et Mexique. Ses paramètres sont :

ellipsoïde associé : Clarke 1866 ($a = 6.378.206$; $1/p = 294,98$),

point fondamental : Meades Ranch, Kansas,

représentation courante associée : UTM.

NAVD29 (National geodetic vertical Datum USA) est le système géodésique de référence vertical dont la surface est le niveau moyen de la mer en 1929.

Le NAVD88, incluant plus d'observations que NAVD29, n'est cependant pas un système géodésique de référence avec comme surface de référence le niveau moyen des mers : il a été défini suite à une contrainte donnant un niveau fixe à une borne repère de marée à "Pointe au Père" (Father Point) située au Québec.

5° Des informations détaillées sur tous les systèmes de référence géodésiques utilisés sur le continent européen pourront être trouvées sur le site < <http://crs.bkg.bund.de/crs-eu> >

2.5. Les points géodésiques

2.5.1. Levé et identification des points géodésiques belges

Un point géodésique est un point matérialisé de manière durable et entretenue et dont la position a été déterminée avec précision par application des lois de la géodésie. L'ensemble des points géodésiques constitue le réseau géodésique. Sur le territoire belge, c'est l'Institut Géographique National qui procède à ces déterminations et maintient le réseau en état.

Lorsque la technique du GPS n'était pas utilisée comme actuellement, les levés se faisaient par triangulation sur le terrain au théodolite.

En 2003, l'IGN a terminé la densification du réseau géodésique national (1 point GPS stationnable tous les 8 km²). Ce programme, entamé en 1988, a entièrement été réalisé par des levés GPS (technique différentielle). Au cours de la dernière décennie quelque 18000 lignes de bases¹¹ GPS ont été calculées. Leur longueur moyenne est de 3 à 4 km, de telle sorte que les erreurs sur la mesure de la distance des satellites aux points mesurés sont négligeables (chapitre 13). Les techniques dites classiques (stations totales) n'ont été utilisées que pour rattacher les anciens points qui n'étaient pas directement « stationnables » en GPS, notamment en raison de leur disposition à proximité d'obstacles à la réception des émissions des satellites (arbres, bâtiments, etc.).

Une densification du réseau européen a également été réalisée à l'aide de GPS. Ce réseau a été baptisé **BEREF** et les points ont été déterminés dans le système de référence européen ETRS89 de façon très précise (IGN, en ligne, 2004 - Système de référence planimétrique).

2.5.2. Mise à disposition des points géodésiques en Belgique

Chaque point géodésique est décrit dans une fiche. Ces fiches sont disponibles gratuitement sur le site de l'IGN « <http://www.ign.be/FR/FR1-7.shtm> », (Points planimétriques et altimétriques). Elles peuvent aussi être commandées par courrier ou téléphone à l'IGN (Institut géographique national, Abbaye de la Cambre 13 à 1000 Bruxelles ou au numéro de téléphone 02/629.84.42.). Deux fiches de points géodésiques situés à Sauvenière (Commune de Gembloux) sont reproduites ci-dessous à titre d'exemple (figure 2.5.1).

1° L'IGN développe le réseau planimétrique de façon à obtenir une densité moyenne de 1 point pour 8 km². Une fiche technique est établie pour chaque point planimétrique. Au recto on trouve une description technique et au verso un croquis de situation du point. Les coordonnées de chaque point sont données dans différents systèmes de référence (Lambert belge, UTM, ED50, ETRS89). L'écart type caractérisant la précision des coordonnées cartographiques Lambert 72 (§ 3.4.3) ainsi fournies est

¹¹ Une ligne de base, dans le système GPS topographique (technique précise au cm près grâce à une mesure sur la phase – chapitre 13), est la distance séparant la station de base de coordonnées connues de la station mobile dont les coordonnées sont à mesurer.

2. Les référentiels géodésiques

compris entre 8 et 17 mm (**LAMBOT 2005**).

2° Le long des lignes du réseau altimétrique, on trouve un repère de nivellement environ tous les kilomètres. Le réseau altimétrique comprend quelque 22.000 repères de nivellement. Pour chaque repère, une fiche technique est établie.

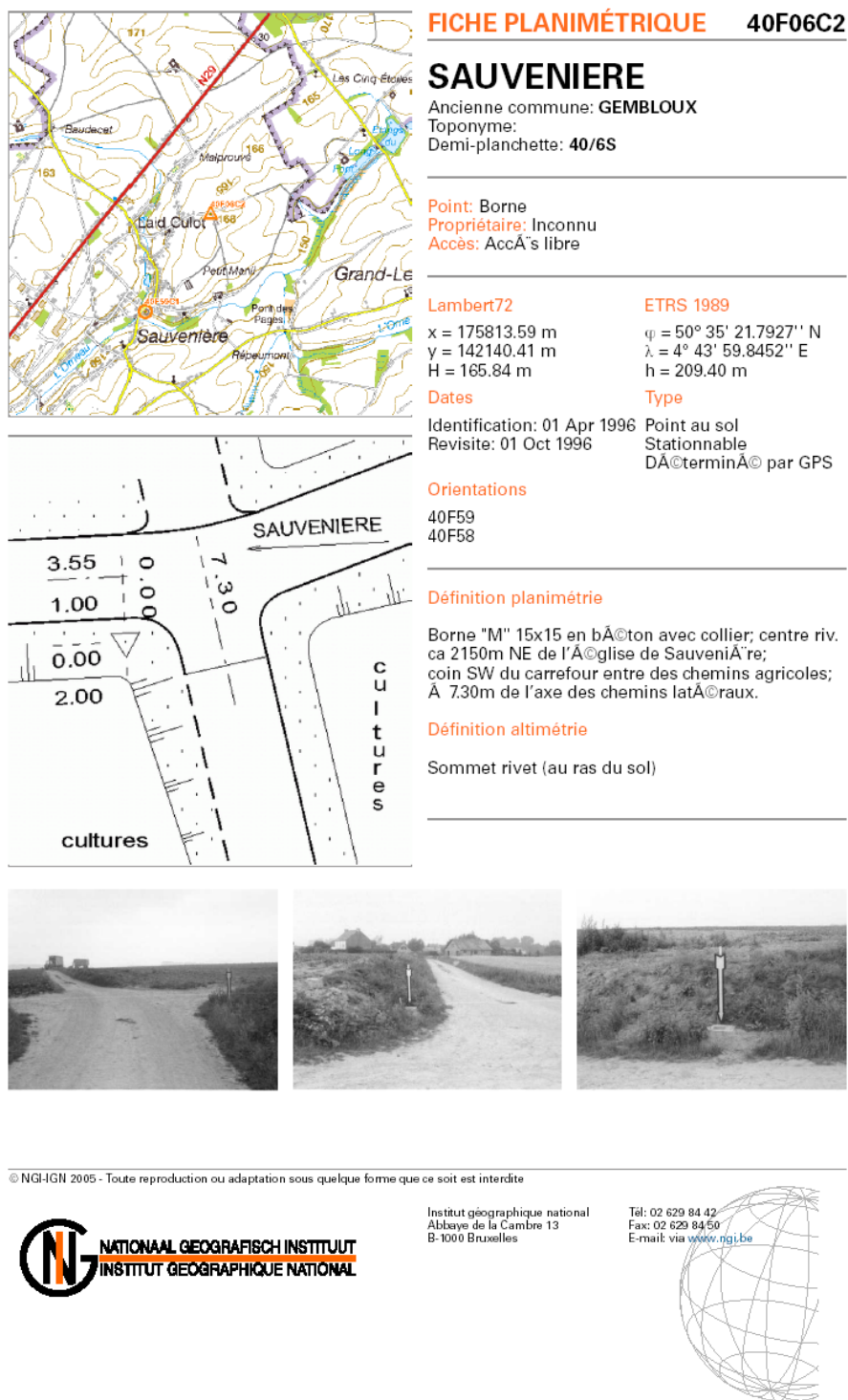


Figure 2.5.1. Fiche descriptive d'un point géodésique (IGN, 2004)

Index des matières

- altitude, 16
- aplatissement, 17
- astronomique, 14
- azimut**, 14
- BEREF, 35, 36
- BESSEL, 18
- BG03, 9
- BG96, 9
- CERCO, 33
- CLARKE, 18
- constante** de gravitation, 5
- convergence des méridiens**, 14
- coordonnées**
 - géodésiques, 15, 20, 31, 33
 - géographiques, 15, 20
 - rectangulaires, 33
 - rectangulaires géocentrées, 31
- CRS, 28
- CTRS, 29
- datum, 4, 23
 - horizontal, 27
 - vertical, 27
- déclinaison magnétique**, 14
- DELAMBRE, 18
- déviations de la verticale, 16
- dynamique, 24
- ECEF, 30
- ED50, 35
- EGG97, 10
- ellipsoïde de révolution, 11
- EOP, 29
- ETRS89, 33
- EUREF, 33
- excentricité** de l'ellipse, 17
- frame, 28
- gal, 5
- géodésie, 3
 - géodésique, 14
 - géoïde, 4
 - grade, 11
 - gravitation**, 5
 - GRS80, 22
 - hauteur ellipsoïdale, 16
 - HAYFORD, 18
 - HELMERT, 34
 - IERS, 29, 31
 - isogoniques**, 14
 - ITRF, 31
 - ITRS, 31
 - latitude
 - astronomique, 15
 - géodésique, 15
 - l'équateur**, 13
 - longitude**
 - astronomique, 15
 - géodésique, 15
 - maillage, 28
 - méridien, 13
 - géodésique, 13
 - mille marin, 19
 - nord
 - du quadrillage, 14
 - géographique, 13
 - magnétique, 13
 - ondulation du géoïde, 16
 - parallèles, 13
 - PE-90**, 22
 - pesanteur, 4
 - plan méridien, 13
 - astronomique, 13
 - géodésique, 13
 - point fondamental**, 24
 - pôles, 13
 - projection**, 13

2. Les référentiels géodésiques

PZ90 , 22	géodésique de référence local, 24
référentiel, 3	système géodésique de référence
<u>SGS90</u> , 22	tables de l'ellipsoïde, 18
système , 28	TRS, 29
de référence	WGS84, 22, 32
global, 24	

Gembloux Agro-Bio Tech