



Co-funded by
the European Union

MODULE 06

PROGRAMME DE FORMATION

GEOLOCALISATION



Dirección General de Formación
CONSEJERÍA DE ECONOMÍA,
HACIENDA Y EMPLEO



Desarrollo de Estrategias Educativas



CAMPUS
DES METIERS
ET DES
QUALIFICATIONS
D'EXCELLENCE
Habitat, énergie renouvelables
et éco-construction
Société



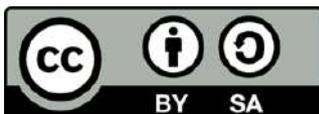
MTU
Öfficeil Teicnoleicéita na Munhan
Munster Technological University



BZB
Bildungszentren des
Baugewerbes e.V.



fh
KufsteinTirol
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.

Table des matieres

1. Objectifs du module	6
2. Modélisation du globe terrestre	7
2.1 L'ellipsoïde : modéliser la terre par une surface géométrique parfaite	7
2.2 Ellipsoïde de référence international : WGS84.....	8
2.3 Nord géographique et nord magnétique.....	9
3. Positionnement sur l'ellipsoïde	11
3.1 Coordonnées géographiques internationales: longitude, latitude, hauteur ellipsoïdale.....	11
Exemples de coordonnées de partenaires européens (de l'ouest à l'est).....	12
3.2 Approximation locale de la sphère.....	13
3.3 Système de référence géodésique	14
3.4 Coordonnées cartésiennes : ITRS89 (monde) et ETRS89 (Europe).....	15
4. Positionner des points sur une carte, un plan	17
4.1 Double projection pour une carte	17
Les projections cylindriques.....	18
Les projections coniques.....	19
Les projections azimutales	19
4.2 Projection et système géodésique	20
4.3 La projection de Mercator.....	21
4.4 La projection et le système UTM : UNIVERSAL TRANSVERSE MERCATOR.....	22
Projection UTM : Mercator transverse.....	22
Système de coordonnées UTM.....	23
Altération linéaire en UTM.....	25
4.5 Projection conique de Lambert : en France, en Belgique, au Texas.....	28
Projection de Lambert sur un cône	28
Distorsion de la distance dans la projection de Lambert.....	29
Convergence des méridiens dans la représentation Lambert.....	30
Système géodésique RGF93, projection Lambert 93. Code EPSG:2154	31
Altération linéaire en Lambert 93	32
Projection conique conforme 9 zones Codes EPSG:3942 (zone 1/CC42) à EPSG:3949 (zone 8/CC49)	34
Altération linéaire en Lambert 9 zones.....	36

4.6 Repères géodésiques.....	37
5. Mesures d'altitude : le géoïde	38
5.1 Le géoïde terrestre : différent de l'ellipsoïde	38
5.2 Le géoïde : déterminer l'altitude d'un point.....	40
5.3 Système altimétrique légal.....	41
6. Système de navigation par satellite gnss	42
6.1 Systèmes actuels	42
6.2 Calcul de la position.....	44
Multilatération 3D : intersection de sphères 3D.....	44
Positionnement : exclusivement sur l'ellipsoïde WGS84.....	45
6.3 Précision métrique native du GNSS, concept GDOP, indice Kp.....	46
Précision instantanée	46
GDOP : Geometric Dilution of precision : diminution de la précision par mauvaise répartition satellitaire.....	47
Variation au cours de la journée	48
Indice Kp	49
6.4 Précision centimétrique en mode de mesure PPP	50
6.5 Précision centimétrique obtenue avec un système différentiel	51
Méthode différentielle : Liaison de deux antennes GNSS, pivot et mobile	51
RTK : corrections en temps réel via Internet et abonnement.....	52
6.6 Perturbations locales sur la précision d'un GNSS.....	54
6.7 Système légal et GNSS.....	56
7. Cibles de géolocalisation sur le site : géoréférencement.....	57
7.1 Principe (voir aussi le module "photogrammétrie").....	57
7.2 Types de cibles.....	57
7.3 Géolocalisation des cibles.....	58

DRONES4VET : participants et auteurs du projet Erasmus+

Equipe du CMQE HEREC Occitanie. France:

Régis Lequeux – professeur et ingénieur en génie civil, Lycée Dhuoda, Nîmes – coordinateur des 10 modules

Nicolas Privat - professeur et ingénieur en génie civil, Lycée Dhuoda, Nîmes

Eric Remola – professeur de génie civil, Lycée Dhuoda, Nîmes

Nicolas Vassart - professeur et docteur en génie civil, Lycée Dhuoda, Nîmes

Valerie Poplin - Directrice exécutive du CMQE

Equipe du MTU Ireland :

Sean Carroll, Maître de conférence, ingénieur en génie civil

Michal Otreba Inz, Maître de conférence, ingénieur en génie civil
coordinateurs des “Levelling & Follow-up sessions for educators”

University of Applied Sciences Kufstein Tirol, Autriche

Emanuel Stocker, Enseignant-chercheur en gestion des infrastructures et de l'immobilier. Manuel coordinateur.

Sarah Plank, Contrôleur de la Recherche et Développement

Equipe CRN Paracuellos. (DG Formación. Comunidad de Madrid) Espagne :

José Manuel García del Cid Summers, Directeur

Daniel Sanz, directeur de Dron-Arena

Santos Vera, technicien

Jorge Gómez Sal, chef de l'unité technique

Fernando Gutierrez Justo. Erasmus coordinateur

Promoteurs du projet

Equipe BZB Düsseldorf. Allemagne :

Frank Bertelmann-Angenendt, chef de projet

Markus schilaski, chef de projet

Equipe DEX. Espagne – Gestion Erasmus+ :

Ainhoa Perez

Ignacio Gomez Arguelles

Diego Diaz Mori

Yvan Corbat

1. Objectifs du module

Ce module vous permet de comprendre les systèmes de coordonnées utilisés pour localiser des points sur la terre. Il explique comment une carte est réalisée dans un système de projection. Il permet de géolocaliser, géoréférencer, des observations terrestres.

Afin de localiser des informations sur la surface de la terre, il est nécessaire d'utiliser un système de positionnement et de cartographie. Pour cela, des notions de géodésie sont nécessaires, telles que

- la définition d'un cadre de référence géodésique (ellipsoïde, méridien d'origine)
- le choix d'un système de projections et de coordonnées (géographique ou planaire)
- le choix d'un système de référence altimétrique (géoïde).

Le module explique également le fonctionnement du système mondial de navigation par satellite ("GPS") et la manière d'obtenir une précision centimétrique.

A la fin, vous verrez comment positionner des cibles sur le terrain pour géoréférencer les observations de votre drone et donc le nuage de points obtenu.

2. Modélisation du globe terrestre

2.1 L'ellipsoïde : modéliser la terre par une surface géométrique parfaite

Vue de l'espace, la terre a la forme d'une sphère, mais en fait, elle est légèrement déformée par la force centrifuge induite par sa rotation autour de l'axe des pôles. Le modèle topographique de la terre est proche (à quelques mètres près hors du relief) d'un volume mathématique connu : l'ellipsoïde de révolution (rotation d'une ellipse autour de l'axe des pôles (le petit axe)).

- Rayon moyen de : 6 367 km
- Aplatissement aux pôles : -11 km par rapport à la sphère
- Elargissement à l'équateur : +11 km par rapport à la sphère

Rouge : un cercle (2D), une sphère (3D)

Bleu : une ellipse, un ellipsoïde (3D) = la forme générale de la terre

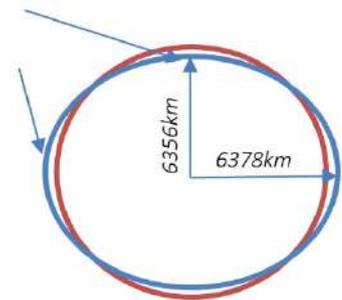


Figure 2-1 Ellipsoïde WGS84

Ordre de grandeur d'un ellipsoïde de révolution de la terre :

- $a = 6\,378\,137\text{ m}$ = rayon équatorial de la terre
- $b = 6\,356\,752\text{ m}$ = rayon polaire de la terre
- Circonférence équatoriale = 40 074 km
- Longueur d'une ellipse méridienne = 40 007 km (calcul intégral)

Pour faire de la topographie, on projette d'abord sur l'ellipsoïde les contours des éléments à cartographier.

2.2 Ellipsoïde de référence international : WGS84

Système de référence international : **WGS 84, World Geodetic System 1984**

Le WGS 84 est le système géodésique défini par les scientifiques comme l'ellipsoïde IAG GRS 80 (avec une modification de 0,1 mm) et le géoïde (voir ci-dessous) EGM96. Il est devenu incontournable aujourd'hui car c'est la référence utilisée par le système de positionnement par satellite GPS (américain) et tous les autres systèmes (européen Galileo, russe Glonass, chinois Beidou, japonais KZSS et indien IRNSS). Elle est rapidement devenue la référence universelle pour la cartographie (marine et terrestre).

Les ellipsoïdes locaux définis en général pour chaque pays, tendent à disparaître au profit du WGS84. Ils datent de l'époque où les scientifiques n'étaient pas tous d'accord au niveau mondial, certains pays les ont conservés et ils peuvent différer du WGS84 au point de fausser les coordonnées. Par exemple les anciennes cartes françaises d'avant 1999 qui étaient en ellipsoïde Clarke 1880 ne sont pas "compatibles GPS".

- Il est donc toujours nécessaire de vérifier si l'ellipsoïde de projection est WGS84 (ou IAG GRS80). Tout autre ellipsoïde de référence entraînerait une erreur de positionnement.

2.3 Nord géographique et nord magnétique

Nord géographique = axe de rotation de la terre =

Attachement des méridiens = « NORD VRAI » = Nord des cartes

C'EST LE SEUL NORD QUE NOUS UTILISONS EN TOPOGRAPHIE

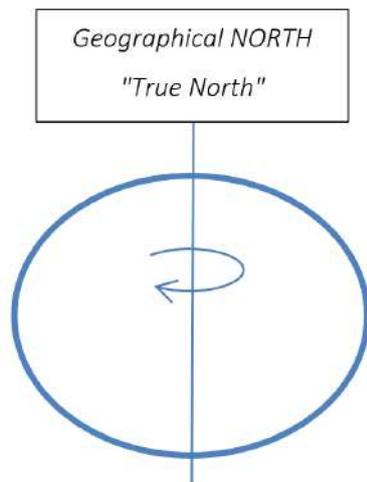


Figure 2-2 axe de rotation = Nord géographique

Nord magnétique = point où le champ magnétique terrestre "entre" dans la terre : les lignes de champ se rencontrent. Il est proche du Nord géographique, mais ne coïncide pas et est variable, il ne peut donc pas être utilisé comme référence.

*La boussole indique le Nord magnétique, cette direction est **différente** du Nord géographique par la déclinaison : angle entre la direction du Nord indiquée sur une boussole et la direction du Nord vrai, géographique.*

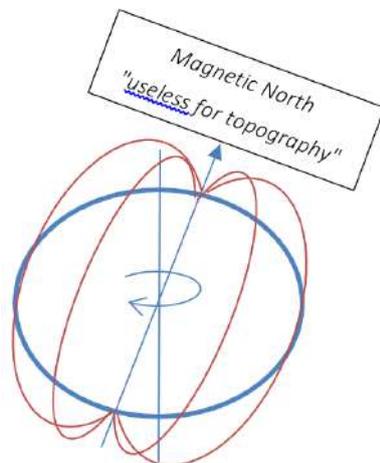


Figure 2-3 déclinaison du champ magnétique en 2015 (nceinoaa.gov)

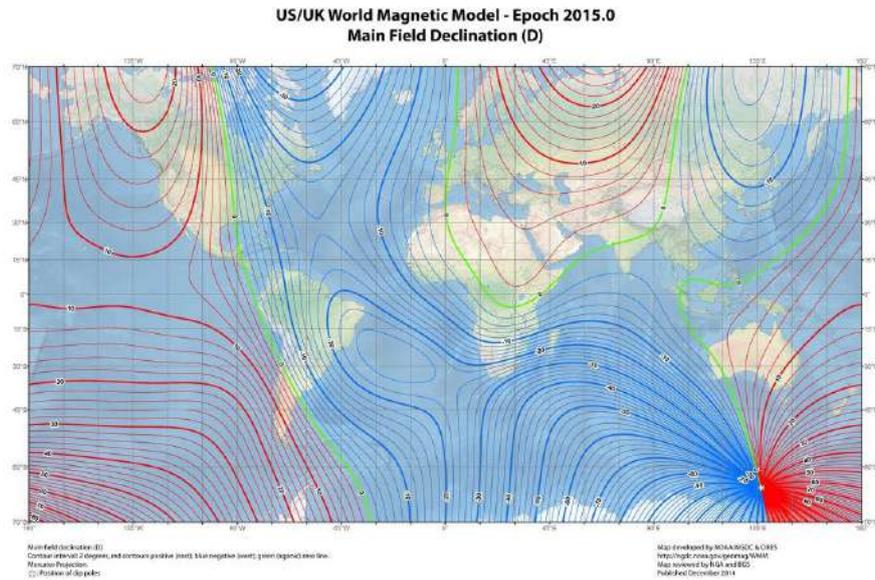


Figure 2-4 déclinaison des lignes de champ magnétique de la terre

En France, la déclinaison est faible (1 à 3°), mais en Pologne, elle atteint 6° !

La boussole n'est pas un instrument de positionnement donnant le Nord des cartes, mais la déclinaison locale est indiquée sur les cartes pour permettre l'utilisation d'une boussole pour la randonnée ou la navigation approximative.

3. Positionnement sur l'ellipsoïde

3.1 Coordonnées géographiques internationales: longitude, latitude, hauteur ellipsoïdale

Les coordonnées géographiques tridimensionnelles (λ , ϕ , h) d'un point quelconque permettent de positionner ce point sur l'ellipsoïde et de donner son altitude par rapport à cet ellipsoïde.

Elles sont basées sur deux références :

La **longitude** λ (lambda) qui est l'angle formé par le **méridien** passant par le point considéré avec le méridien d'origine.

Le méridien d'origine international est celui de Greenwich (observatoire de Londres).

Le méridien international de référence passe par l'observatoire de Greenwich à Londres, et en France autour de Tarbes, à 60 km à l'ouest de Toulouse, autour d'Angoulême et autour de Caen.

La **longitude** est comprise entre 0° et 180° . Vers l'Est, on dit "longitude Est" ou entre 0° et 180° vers l'Ouest, on dit "longitude Ouest".



Figure 3-1 Méridiens (brainly.in)

La **latitude** ϕ (phi) qui est l'angle que fait la normale à l'ellipsoïde avec le plan de l'équateur (= plan équatorial) déterminant les **parallèles**.

La **latitude** est comprise entre 0° et 90° vers le Nord, on dit "latitude Nord" ou entre 0° et 90° vers le Sud, on dit "latitude Sud".

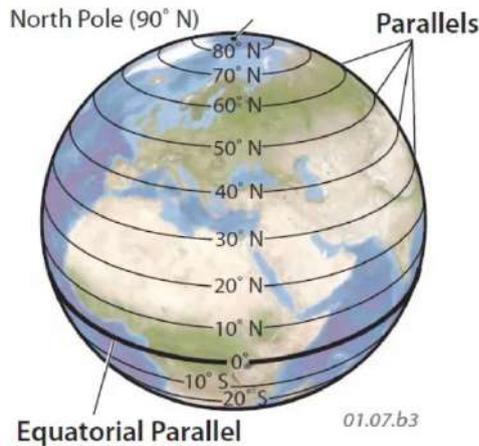


Figure 3-2 Parallèles (brainly.in) (<https://geography.name/>)

Exemples de coordonnées de partenaires européens (de l'ouest à l'est)

Cork, Université technologique de Munster : 51.885808N ; 8.533495W

Madrid, CRN Paracuellos : 40.494217N ; 3.535192W

Nîmes, Campus Herec : 43.827286N ; 4.356369E

Fukstein, FHS kufstein Tirol Bildungs : 47.583670N ; 12.173542E

La **hauteur ellipsoïdale** h est la distance entre le point considéré et la projection de ce point sur l'ellipsoïde.

C'est cette hauteur ellipsoïdale que les systèmes satellitaires déterminent, et non l'altitude habituelle (au-dessus du niveau de la mer) qu'ils ne connaissent pas...

NB : la mesure de "h" est orthogonale à l'ellipsoïde : elle n'atteint donc pas le centre de masse de la terre voir l'écart ici

Ainsi, l'angle de latitude n'atteint pas le centre de masse...

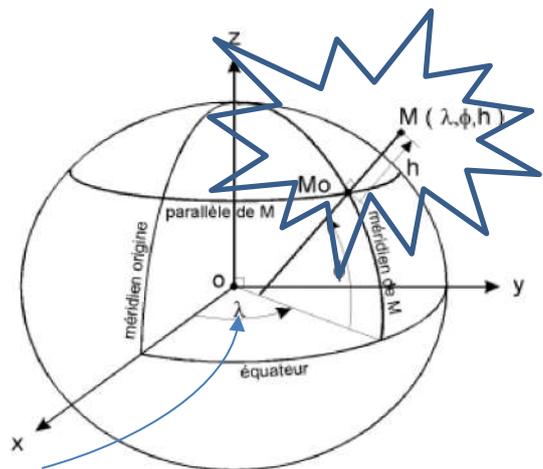


Figure 3-3 Hauteur ellipsoïdale orthogonale à l'ellipsoïde

Sur l'illustration le point M_o est la projection de M perpendiculaire sur l'ellipsoïde, qui permet son repérage en latitude et longitude.

Tous les pays du monde utilisent le même système de coordonnées géographiques (même la Corée du Nord !).

3.2 Approximation locale de la sphère

Pour certains calculs, il est utile de remplacer l'ellipsoïde par une sphère dont le rayon est localement adapté à l'ellipsoïde.

En France, la sphère a un rayon de 6380 km.

3.3 Système de référence géodésique

Les caractéristiques de l'ellipsoïde et les paramètres de positionnement constituent un référentiel géodésique.

Un point de référence géodésique est donc défini par :

- Un ellipsoïde → WGS84 (ou IAG GRS 80)
- La position du centre de l'ellipsoïde selon la position de l'équateur terrestre connue à quelques mètres.
- L'orientation des axes de l'ellipsoïde → grand axe le long de l'équateur, petit axe vers l'axe de rotation de la terre
- Une origine méridienne des longitudes → le méridien passant par l'observatoire de Greenwich à Londres
- Un plan d'origine des latitudes → le plan de l'équateur

3.4 Coordonnées cartésiennes : ITRS89 (monde) et ETRS89 (Europe)

Au lieu des coordonnées géographiques, un cadre de référence cartésien fixe centré sur le centre de masse de la terre est défini à l'échelle mondiale : le système de référence terrestre international (ITRS International Terrestrial Reference System) depuis 1989.

Il s'agit des coordonnées X, Y et Z

- Le plan X,Y est l'équateur
- L'axe Z est l'axe de rotation de la terre.
- Le point O,O,O est le centre de masse de la terre.
- L'axe des X passe par le méridien de Greenwich

Chaque point de la terre peut avoir des coordonnées (X,Y,Z)

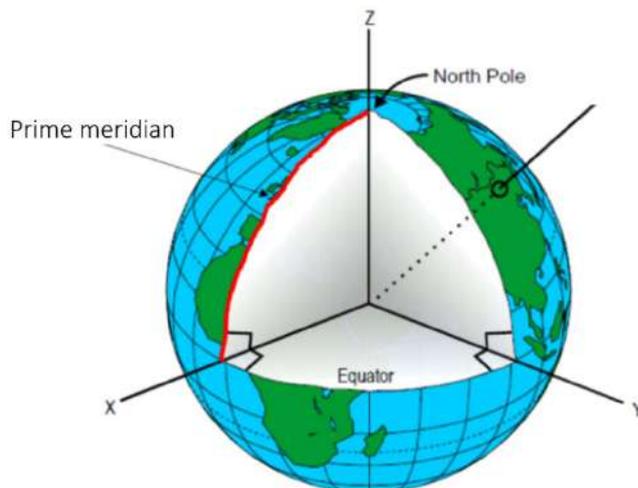


Figure 3-4 Axe des coordonnées cartésiennes (researchgate)

Problème : la dérive des continents...

Les systèmes géodésiques spatiaux (c'est-à-dire modernes) sont très précis, et permettent d'exprimer dans le même système les coordonnées de points situés sur différentes plaques tectoniques : les mouvements relatifs de ces plaques (jusqu'à plusieurs cm/an) ne peuvent plus être négligés... L'ITRS, qui est le système géodésique le plus précis au monde (précision centimétrique), est en constante évolution ; chacune de ses réalisations (ITR**F**, pour International Terrestrial Reference **FRAME**), constituée d'un réseau de stations terrestres dont les coordonnées et les vitesses de déplacement sont fixes, est datée : l'ITRF90 correspond à la valeur de ces éléments pour l'année 1990. Actuellement, le dernier calcul est l'ITRS2020 (<https://itrf.ign.fr/en/solutions/itrf2020>). L'IGN en est responsable au niveau international, avec l'Observatoire de Paris).

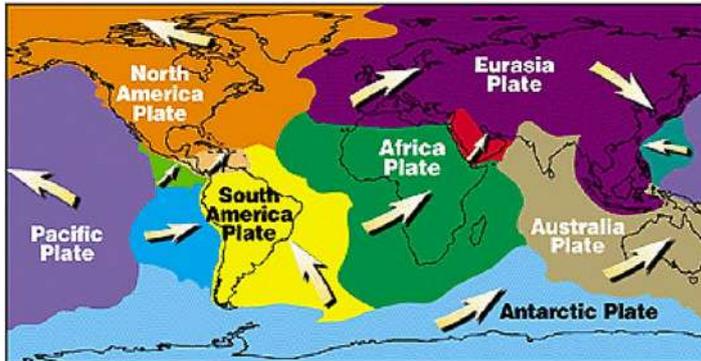


Figure 3-5 Dérive des continents (*importantinnovations.com*)

Ce système international est décliné en Europe sous le nom d'ETRS 89 (European terrestrial reference system), avec un réseau dont la dernière version est ETRF2020. En Europe, il a été décidé de rattacher notre système de référence à la plaque eurasiennne en 1989 : à partir de cette année, l'ETRS diffère de l'ITRS en raison du déplacement de la plaque continentale à laquelle il est rattaché. Les paramètres de transformation doivent être mis à jour en permanence ETRS ITRS → https://epncb.oma.be/_productservices/coord_trans/

L'ETRS sert de base à tous les systèmes de projection plane des pays européens, son ellipsoïde est le GRS80 (=WGS84 à 0,1 mm) et il existe plus de 300 stations de mesure en Europe (EUREF).

Nous n'utilisons pas ces coordonnées pour l'instant avec les drones, mais ce serait possible.

4. Positionner des points sur une carte, un plan

4.1 Double projection pour une carte

Un plan ou une carte est la représentation d'une partie de l'ellipsoïde sur une surface développable, sur une surface qui peut être étalée à plat : essentiellement le cylindre, le cône et le plan.

Pour réaliser une carte ou tout autre plan de terrain, il est nécessaire d'effectuer **deux** projections :

- **Le terrain** réel, les mesures, sont projetés **sur l'ellipsoïde**
- La forme, les mesures, obtenues sur l'**ellipsoïde** sont ensuite projetées sur une **surface développable** pour obtenir une représentation plane.

Ainsi, les angles, les distances, les surfaces mesurées sur les cartes peuvent être très différents de ceux mesurés sur le terrain...

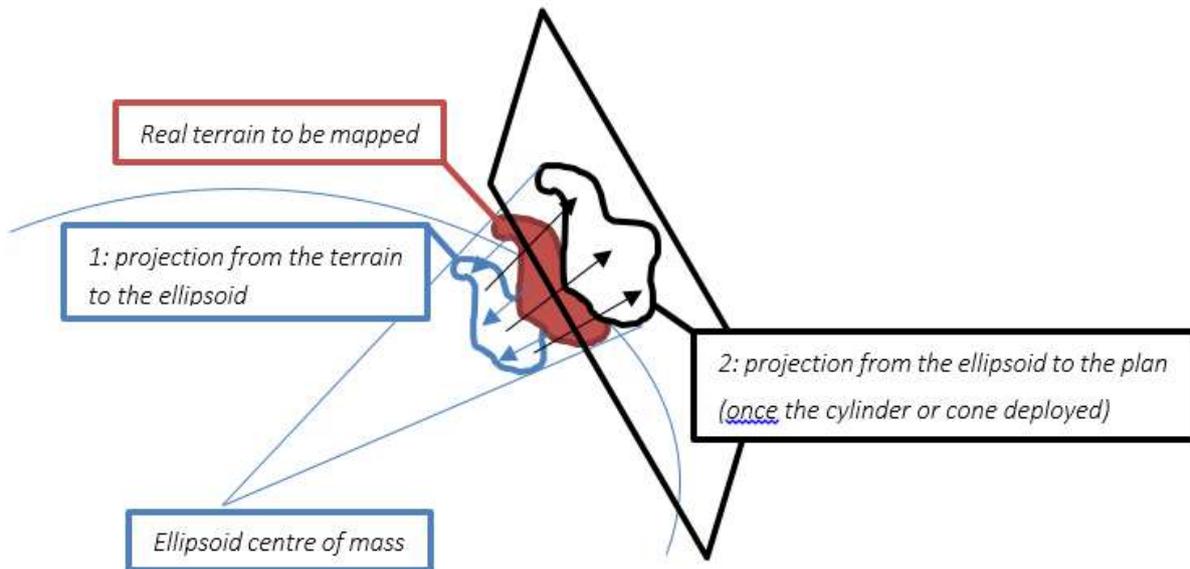


Figure 4-1 Les deux projections successives pour obtenir une carte

- Les projections utilisées pour la topographie sont **conformes** : elles conservent localement les angles. Un angle mesuré sur le terrain est le même que sur le plan.
- Les projections **altèrent les distances** (modifient les distances). Une distance mesurée sur le terrain n'est pas la même que celle mesurée sur la carte, même si l'échelle de la carte est appliquée.
- Dans ces projections, nous définissons un **repère de référence orthonormé**, orienté positivement vers l'Est et le Nord, spécifique à chaque système de projection, qui remplace les coordonnées Longitude, Latitude par X, Y ou E, N.

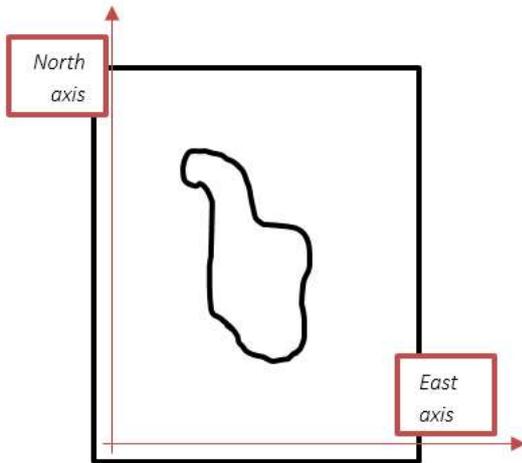


Figure 4-2 Repère de référence orthonormé sur une carte plane

Les projections cylindriques

La surface de projection est un cylindre circonscrit le long de l'équateur (dit "direct") ou d'un méridien (dit "transverse") de l'ellipsoïde (exemple : UTM, Gauss, ...). La transverse est utilisée dans de nombreux systèmes légaux de coordonnées, on positionne le cylindre le long du méridien qui passe au milieu de la zone à cartographier, projection UTM (Universal Transverse Mercator). Il n'y a que le long du méridien de contact qu'il n'y a aucune déformation.

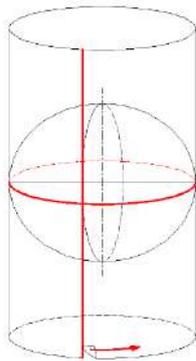
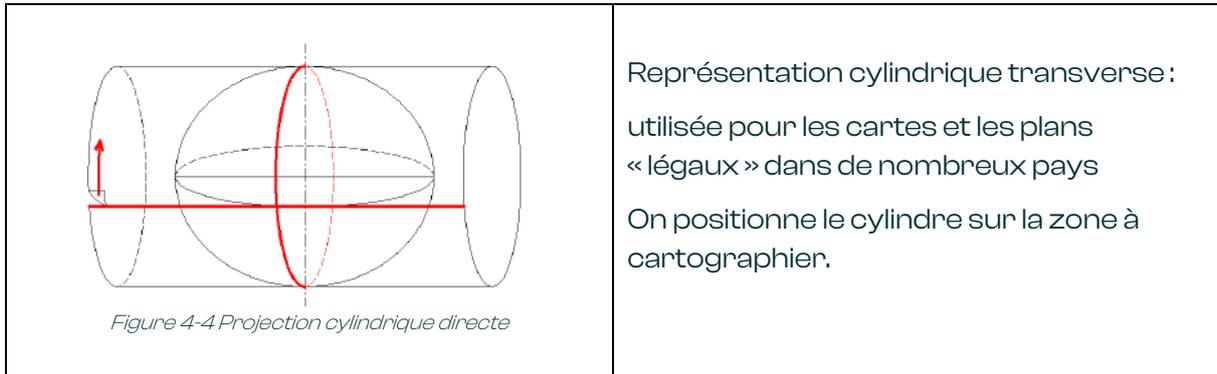


Figure 4-3 Projection cylindrique transversale

Représentation cylindrique directe :
utilisée pour les grandes cartes montrant
plusieurs pays

Importantes déformations en
s'approchant des pôles



Les projections coniques

Introduit par le mathématicien Johann Heinrich Lambert (France) en 1772.

La surface de projection est un cône tangent à un cercle ou sécant à deux cercles (exemple : Lambert 93 en France, ...). Moins de déformations pour représenter un pays, on positionne le cône juste sur la zone à cartographier. La projection avec cône sécant est encore meilleure, car il existe deux parallèles de contact le long desquels il n'y a aucune déformation.

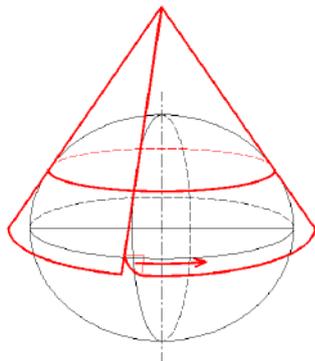


Figure 4-5 Cone tangent

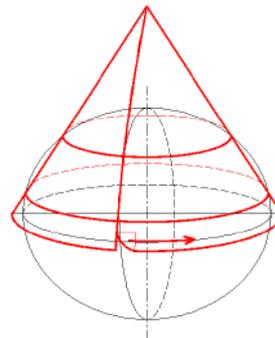


Figure 4-6 Cone sécant : moins de déformations

Les projections azimutales

La surface de projection est un plan tangent à un point ou sécant à un cercle.

Une projection qui ne peut être classée dans l'un de ces types est dite individuelle ou unique.

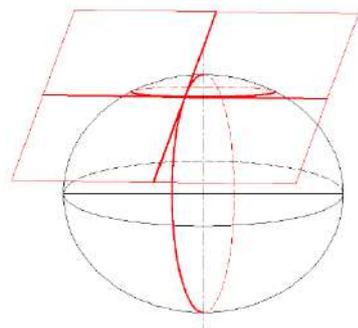


Figure 4-7 Représentation de la tangente azimutale

4.2 Projection et système géodésique

Ne pas confondre une projection avec un système géodésique (permettant de localiser un point à la surface de la terre).

- La projection est la forme et la position de la surface développable : cylindre ou cône, contact avec l'ellipsoïde.
- Le système géodésique est la manière d'exprimer les coordonnées cartésiennes sur la projection : origine et orientation des axes X et Y (ou E et N).

Théoriquement, n'importe quelle projection pourrait être associée à n'importe quel système géodésique, mais pour éviter les ambiguïtés, nous associons généralement un système géodésique à une projection donnée (par exemple : ED 50 ou WGS 84 avec la projection UTM, RGF 93 avec la projection Lambert 93, ...).

Ainsi, lorsque l'on donne les coordonnées planes d'un point (une même projection pouvant être utilisée par plusieurs systèmes géodésiques), il est nécessaire (sauf cas évident) d'indiquer à la fois la projection et le système géodésique utilisés (par exemple : « coordonnées en UTM ED 50 »).

4.3 La projection de Mercator

L'ellipsoïde est projeté sur un cylindre vertical

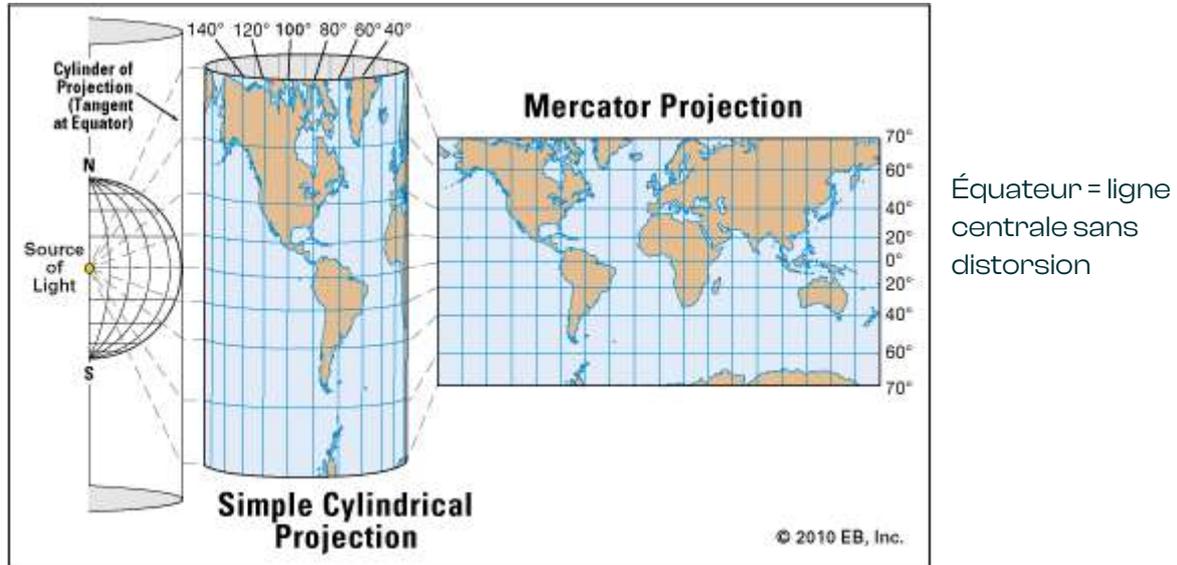


Figure 4-8 projection directe de Mercator (Britanica.com)

Il en résulte une forte déformation lorsque l'on s'éloigne de l'équateur. L'équateur est l'isomètre central: ce n'est que le long de l'équateur que les distances mesurées sur la carte correspondent à celles sur le terrain.

C'est la distorsion des distances : les distances mesurées sur la carte, même multipliées par l'échelle, ne sont pas égales à celles mesurées sur le terrain... sauf le long de l'équateur.

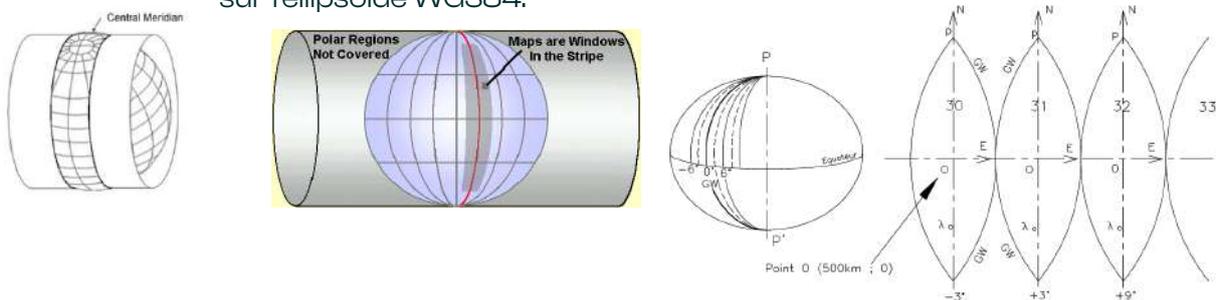
Largement utilisé pour représenter la terre dans son ensemble, ou un pays entier, dans les atlas.

Jamais utilisé pour des applications de génie civil.

4.4 La projection et le système UTM: UNIVERSAL TRANSVERSE MERCATOR

Projection UTM: Mercator transverse

La projection UTM (Universal Transverse Mercator définie vers 1950 par l'armée américaine pour représenter la Terre entière) est une projection cylindrique transverse sécante conforme couvrant le monde entier en 60 zones de 6 degrés d'amplitude en longitude (pour limiter la distorsion des distances au bord des fuseaux) désormais basée sur l'ellipsoïde WGS84.



e-education.psu.edu

oc.nps.edu

unstats.un.org

Figure 4-9 Projection universelle transverse de Mercator UTM

Les méridiens ont pour image, sur le plan, des courbes dépendant de leur distance au méridien central. Le méridien de Greenwich (= 0°) sépare les zones 30 et 31. Les 2 méridiens sécants sont appelés "méridiens standard": le long de ceux-ci, pas de déformation des distances.

Les parallèles ont pour image, sur le plan, des courbes parallèles équidistantes les unes des autres.

Projection conforme : mêmes angles sur le sol et sur la carte, mais distorsion de la distance quand on s'éloigne du méridien central.

Les zones sont numérotées pour les identifier : la numérotation des zones commence au méridien 180° et augmente d'ouest en est.

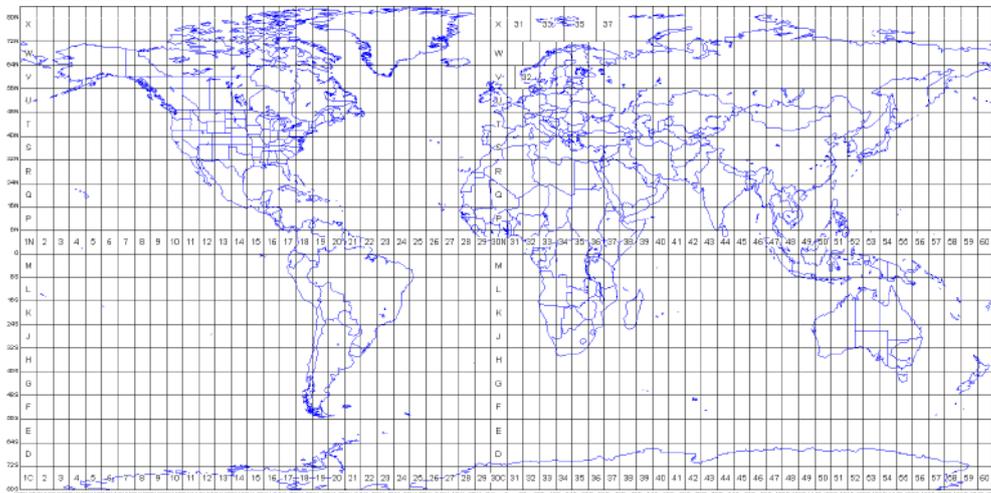


Figure 4-10 les 60 zones de l'UTM (researchgate)

Système de coordonnées UTM

Sur la carte, le méridien central est représenté par une ligne droite et définit l'axe Nord décalé de 500km.

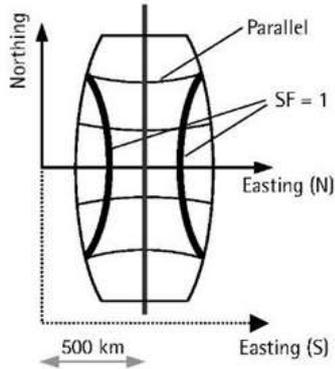


Figure 4-11 axe dans une bande UTM quoi-quand-comment.com

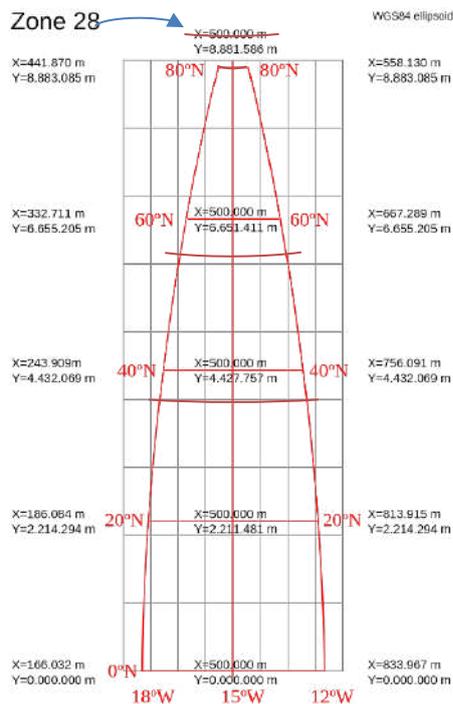


Figure 4-12 coordonnées dans une bande UTM

Toutes les zones sont identiques.

Pour éviter les abscisses négatives, le point O de chaque zone a pour coordonnée E0 = 500 km.

L'origine des axes E et N a pour coordonnées :

- Y = 0 km dans l'hémisphère Nord
- Y = 10 000 km dans l'hémisphère sud

La largeur d'une zone est d'environ 600 km.

← ici les coordonnées des extrémités de la zone sont plus élevées en Y que le long de la ligne centrale en raison de la courbe des parallèles.

Pour toute coordonnée ponctuelle, vous devez spécifier la zone à laquelle vous vous référez :

Exemple : UTM30 (56.012 , 125.236)

Le territoire français est situé sur 3 zones :

- UTM Nord zone 30 : entre 6 degrés Ouest et 0 degré (= Greenwich). EPSG :32630
- UTM Nord zone 31 : entre 0 degré et 6 degrés Est. EPSG :32631
- UTM Nord zone 32 : entre 6 degrés Est et 12 degrés Est. EPSG :32632

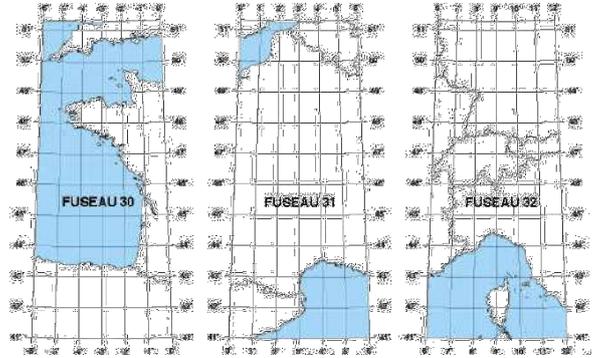


Figure 4-13 les 3 zones UTM de la France ("fuseau" en français) (IGN)

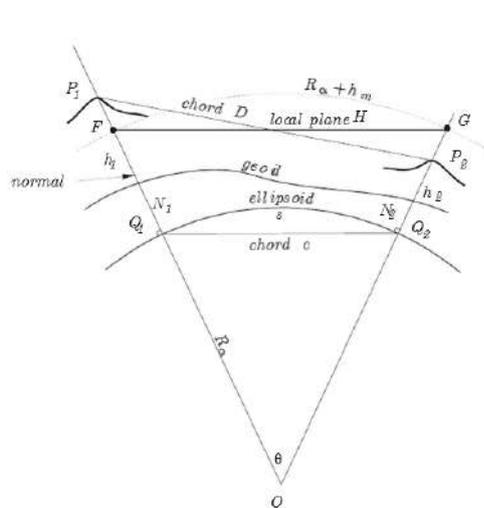
Codes EPSG : 326xx où xx est le numéro de la zone. Exemple : zone34 = EPSG :32634

Altération linéaire en UTM

Aucune représentation ne peut conserver toutes les longueurs sur l'ensemble du domaine représenté : la sphère (ou l'ellipsoïde) ne peut être "aplatie" sans déformations sur un plan, chaque longueur subira une altération qui dépendra de sa position sur la terre.

Étape 1 : réduction à l'ellipsoïde : facteur de correction de l'élévation

Comme tous les systèmes de coordonnées proviennent de l'ellipsoïde, la première étape consiste à projeter les mesures de terrain sur l'ellipsoïde. On part de deux points sur terre, P1 et P2 :



Distance mesurée entre P1 et P2 = D

Angle vertical entre P1 et P2 = V

Hauteur ellipsoïdale du plan local P1P2 = h (moyenne h1 h2, voir "mesure de l'altitude" ci-dessous pour la définition de la hauteur ellipsoïdale)

Rayon de la sphère locale Rn (en France Rn=6380km)

Distance horizontale sur le plan local : H = D.sin V

Facteur de correction de l'élévation EF = Rn/(Rn+h)

Distance réduite à la corde d'ellipsoïde : c = D.Rn/(Rn+h)

Figure 4-14 projection de la distance entre le champ et l'ellipsoïde

Habituellement, pour la topographie, nous assimilons la distance de la corde à la distance de l'arc (théoriquement, la distance de l'arc doit être utilisée...). donc $s = c$

Exemple : A Nîmes, France, la hauteur ellipsoïdale est d'environ 95m, les distances sont donc modifiées par

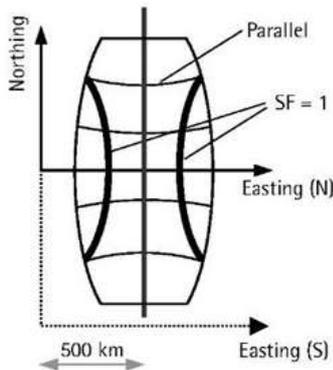
$$6380000/(6380000+95) = 0.99998510994$$

150m mesurés à l'horizontale devient 149,9978 m soit une perte de 2,2 mm

Cette projection sur l'ellipsoïde est obligatoire avant toute autre projection pour TOUS les systèmes.

Étape 2 : appliquer le facteur d'échelle de la projection UTM

La variation relative des longueurs dans la représentation est appelée altération linéaire, un facteur d'échelle sur les distances devant être appliqué entre la projection sur l'ellipsoïde et la projection sur la bande UTM, donc le plan final.



Ici, le SF=1 indique les méridiens standard :
Pas de distorsion le long de celles-ci

Figure 4-15 facteur d'échelle=1 le long des méridiens standard (what-when-how.com)

Dans les projections conformes comme l'UTM, la distorsion de la distance est indépendante de la direction.

En UTM, un facteur d'échelle est appliqué : La formule pour calculer le facteur d'échelle à n'importe quel point de coordonnées géographiques (λ , φ) longitude latitude par rapport à la longitude du méridien central λ_0 est :

$$k \approx 0.9996 \left(1 + \frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{2} \cos^2(\varphi)(1 + \varepsilon^2) + \frac{(\lambda - \lambda_0)^4}{24} \cos^4(\varphi)(5 - 4 \cdot \tan^2(\varphi)) \right)$$

$$\varepsilon^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2} \cos^2(\varphi) \quad \text{Avec (rappel WGS84 } a = 6\,378\,137 \text{ m et } b = 6\,356\,752 \text{ m)}$$

Sur le méridien central, $\lambda = \lambda_0$ $k = 0,9996 = -40\text{cm/km}$ toute distance mesurée entre deux points le long du méridien (ou très proches) est multipliée par 0,9996 (ou réduite de 40cm par km)

Exemple : 150m sur l'ellipsoïde et sur le méridien central correspondent à $150 \times 0,9996 = 149,94$ m sur le plan UTM (ou $150 - 0,40 \times 0,150$),

Il est plus court de 6 cm !

Sur les bords de la zone UTM le long du méridien limite, le facteur d'échelle est $k = 1,00097 = +97\text{cm/km}$.

Exemple : 150 m sur l'ellipsoïde et sur le méridien limite correspondent à $150 \times 1,00097 = 150,146$ m sur le plan UTM.

(ou $150 + 0,97 \times 0,150$), il est plus long de 14,6 cm !

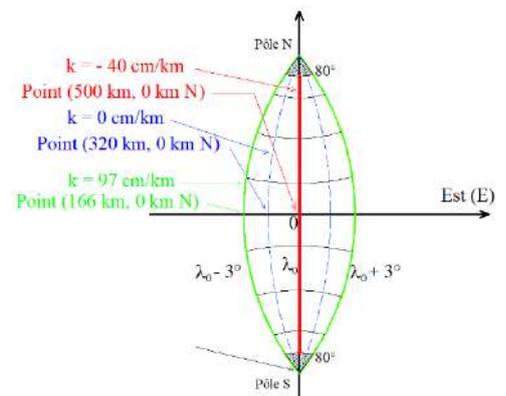


Figure 4-16 facteurs d'échelle remarquables en UTM

En UTM, à latitude constante, le module linéaire de la projection augmente en s'éloignant du méridien central, atteint 1, puis devient supérieur à 1. Le long d'un méridien, le module linéaire diminue à mesure que la latitude augmente.

IL FAUT FAIRE LES DEUX PROJECTIONS, deux réductions pour avoir l'altération linéaire totale.

Altération linéaire globale : réduction à l'ellipsoïde + réduction à la projection

4.5 Projection conique de Lambert : en France, en Belgique, au Texas...

Projection de Lambert sur un cône

La projection de Lambert est une projection directe conique sécante : la projection est effectuée sur un cône sécant à l'ellipsoïde le long de deux parallèles.

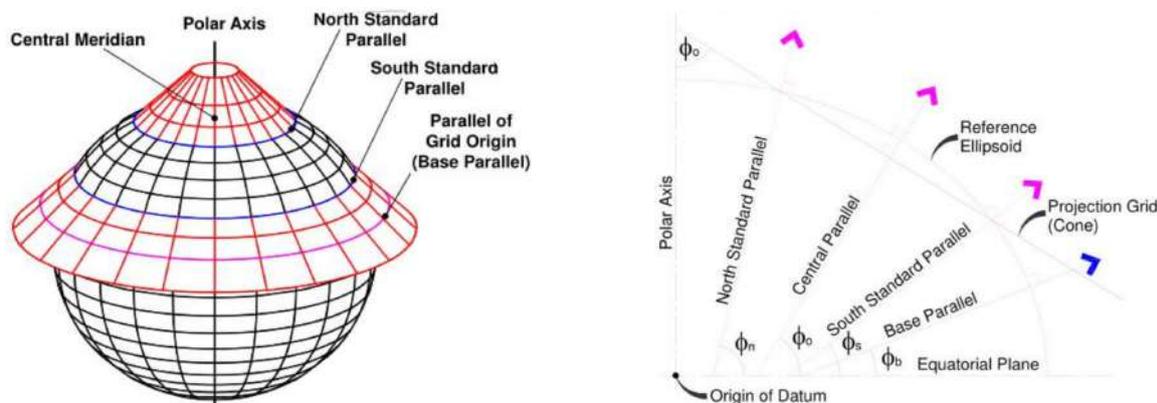


Figure 4-17 Projection sécante de Lambert (researchgate.com)

Projection conforme : préservation des angles, les angles mesurés sur le terrain sont les mêmes sur la carte Lambert. En revanche il y a toujours altération linéaire, modification des distances entre la mesure sur le terrain et le plan de projection final.

Sur la carte, les parallèles sont représentés par un arc de cercle. L'espacement irrégulier des parallèles assure la conformité de la représentation (les angles sur le terrain sont les mêmes que sur le plan).

Le méridien d'origine a pour image sur la carte : l'axe Nord (N).

Les méridiens ont pour image des droites se coupant à l'image du pôle Nord P. Ils sont donc perpendiculaires aux cercles concentriques, et on observe sur les cartes une convergence des méridiens.

Ellipsoïde de référence : IAG GRS 80 (= WGS84)

Distorsion de la distance dans la projection de Lambert

Afin de réduire les altérations linéaires, le cône coupe l'ellipsoïde à deux reprises : projection sécante directe et projection conique conforme. Le long des parallèles de la sécante (contact cône/ellipsoïde), il n'y a pas de distorsion de distance ($k=1$).

Pour réduire les distorsions dues à la distance, la France, par exemple, utilise deux systèmes Lambert :

- Le GRF93-Lambert 93 qui couvre l'ensemble du territoire et présente de grandes altérations linéaires
- Le RGF93-9 zones dans lequel le territoire est divisé en 9 zones, soit autant de projections de Lambert avec des valeurs différentes et moins d'altérations linéaires. Chacune a son propre cône.

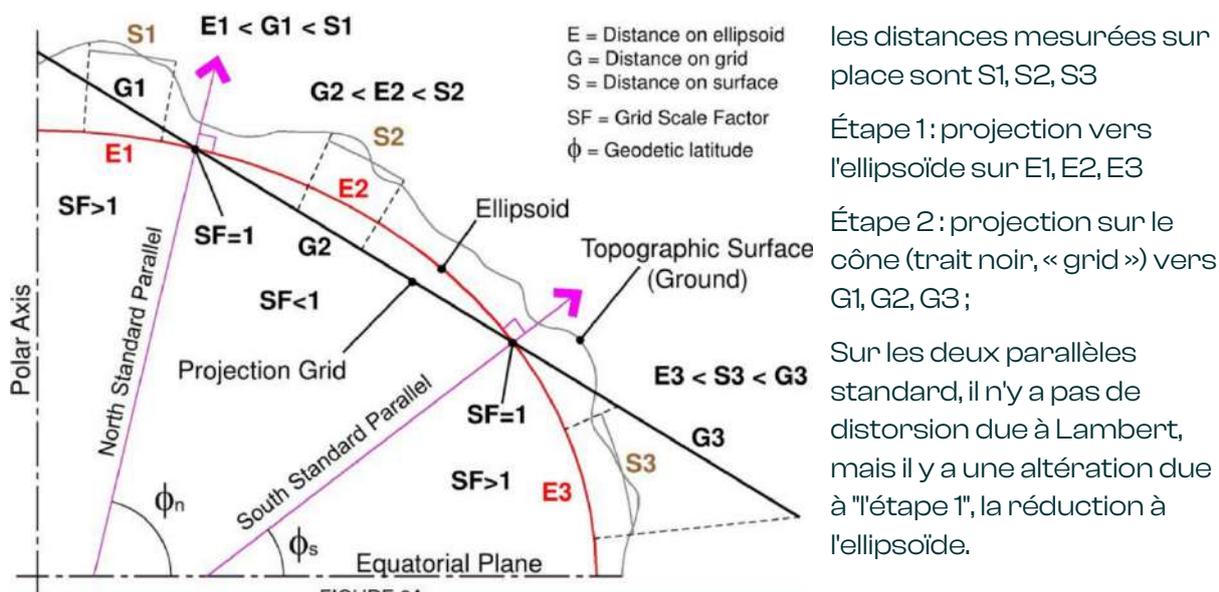


Figure 4-18 différents facteurs d'échelle en fonction de la position par rapport aux parallèles standards (Bryan W. Bunch)

Au nord du parallèle standard nord et au sud du parallèle standard sud, l'altération augmente les distances sur le plan, ou $k > 1$, les distances sont plus grandes sur la carte que sur le terrain.

Entre le parallèle standard sud et le parallèle standard nord, l'altération diminue les distances sur le plan, soit $k < 1$, le plan Lambert est "à l'intérieur" de l'ellipsoïde, les distances sur la carte sont plus petites que sur le terrain.

Convergence des méridiens dans la représentation Lambert

Dans la plupart des projections, le Nord de la carte n'indique pas la direction du pôle Nord géographique. On parle alors de convergence des méridiens "c" qui est, en un point, le relèvement ($c > 0$ ou $c < 0$) de l'image du méridien (au moment de la projection) qui passe par ce point.

En projection Lambert, la convergence "c" d'un méridien en un point A varie en fonction de la longitude λ de ce point (par rapport au méridien d'origine de longitude λ_0 mais elle est constante pour tous les points de la projection appartenant au même méridien (c'est-à-dire pour $\lambda = \text{cte}$ et $\forall \varphi$)

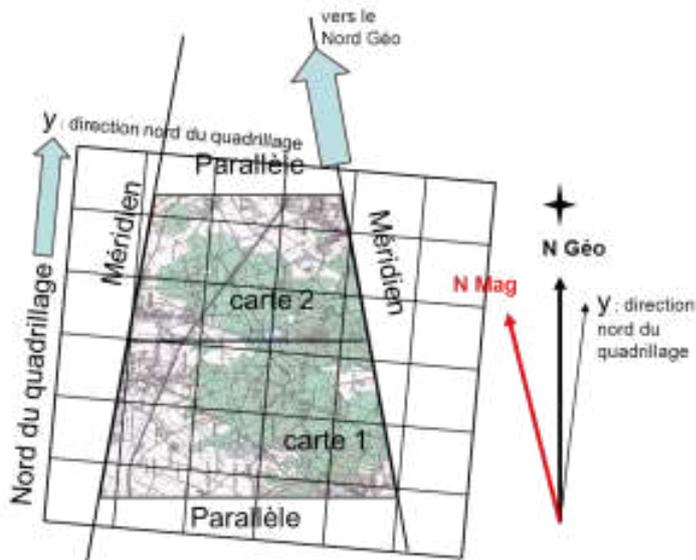


Figure 4-19 convergence des méridiens en Lambert (IGN)

- Note :
- la convergence "c" est négative à l'est du méridien d'origine.
 - la convergence "c" est positive à l'ouest du méridien d'origine.

Bien entendu, si la carte est centrée sur le méridien d'origine, le nord de la carte est le nord géographique, « Nord vrai ».

Système géodésique RGF93, projection Lambert 93. Code EPSG:2154

La projection dite Lambert 93 associée au système géodésique RGF 93 est la projection officielle pour la France métropolitaine et la Corse depuis 2000, compatible avec le WGS 84 (GNSS) et le système européen ETRS89.

L'ellipsoïde de référence de la projection Lambert 93 est l'ellipsoïde GRS 80 de l'AIG (=WGS84) et le méridien d'origine est le méridien situé à 3°E du méridien de Greenwich.

La projection Lambert 93 couvre toute la France et la Corse, elle est sécante en deux parallèles.

Pour localiser des points et dessiner des plans ou des cartes, on a placé sur le cône aplati un repère orthonormé en mètres, dont le point d'origine a pour coordonnées

EO Lambert 93 = 700 km, NO Lambert 93 = 6 600 km

Les principales caractéristiques de la projection Lambert 93 sont :

- **Axe nord ou méridien d'origine:** $\lambda_0 = 3^\circ$ Est /Greenwich
- **Coordonnées de l'origine:** $E_0 = 700$ km et $N_0 = 6\,600$ km
- **Premier parallèle:** $\varphi_0 = 46^\circ 30'$ N (tangent à l'axe Est en EO, NO)
- Latitude des parallèles standards: $\varphi_1 = 44^\circ$ N et $\varphi_2 = 49^\circ$ N
- Altération linéaire centrale: $k=0,999\,051\,03 = -94,9$ cm/km
- code: EPSG:2154 ou EPSG 5698 (avec grille altimétrique IGN69)

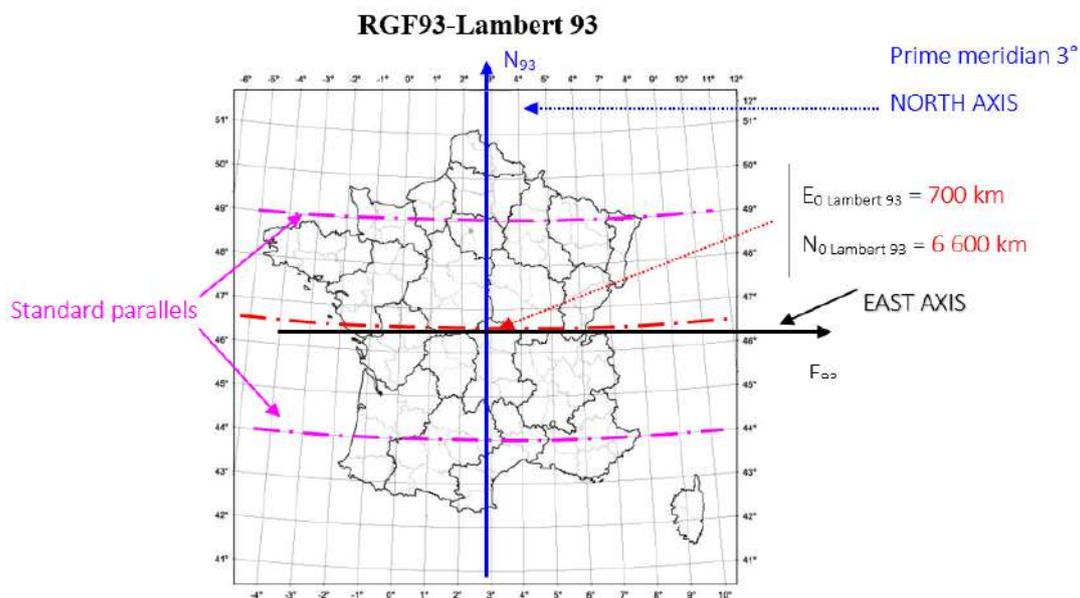


Figure 4-20 axes du système de projection RGF93-Lambert93

Pour reconnaître facilement un point dans Lambert93, ses coordonnées sont dans les valeurs suivantes

100 000 m < Est (X) < 1 090 000 m ; 6 000 000 m < Nord (Y) < 7 100 000 m

Pas de confusion possible avec les coordonnées des zones du RGF93-9 zones dont les X sont supérieurs à 1 100 000 m (voir ci-dessous).

Altération linéaire en Lambert 93

La carte ci-dessous donne la valeur de l'altération en fonction de la latitude, il n'y a pas de variation en longitude, contrairement à l'UTM.

On constate que dans le Nord, l'altération va jusqu'à 2m à ajouter sur la carte aux mesures de terrain par kilomètre mesuré pour dessiner le plan !

Au centre, il faut retrancher jusqu'à près d'un mètre aux mesures de terrain par kilomètre mesuré afin de dessiner la carte !

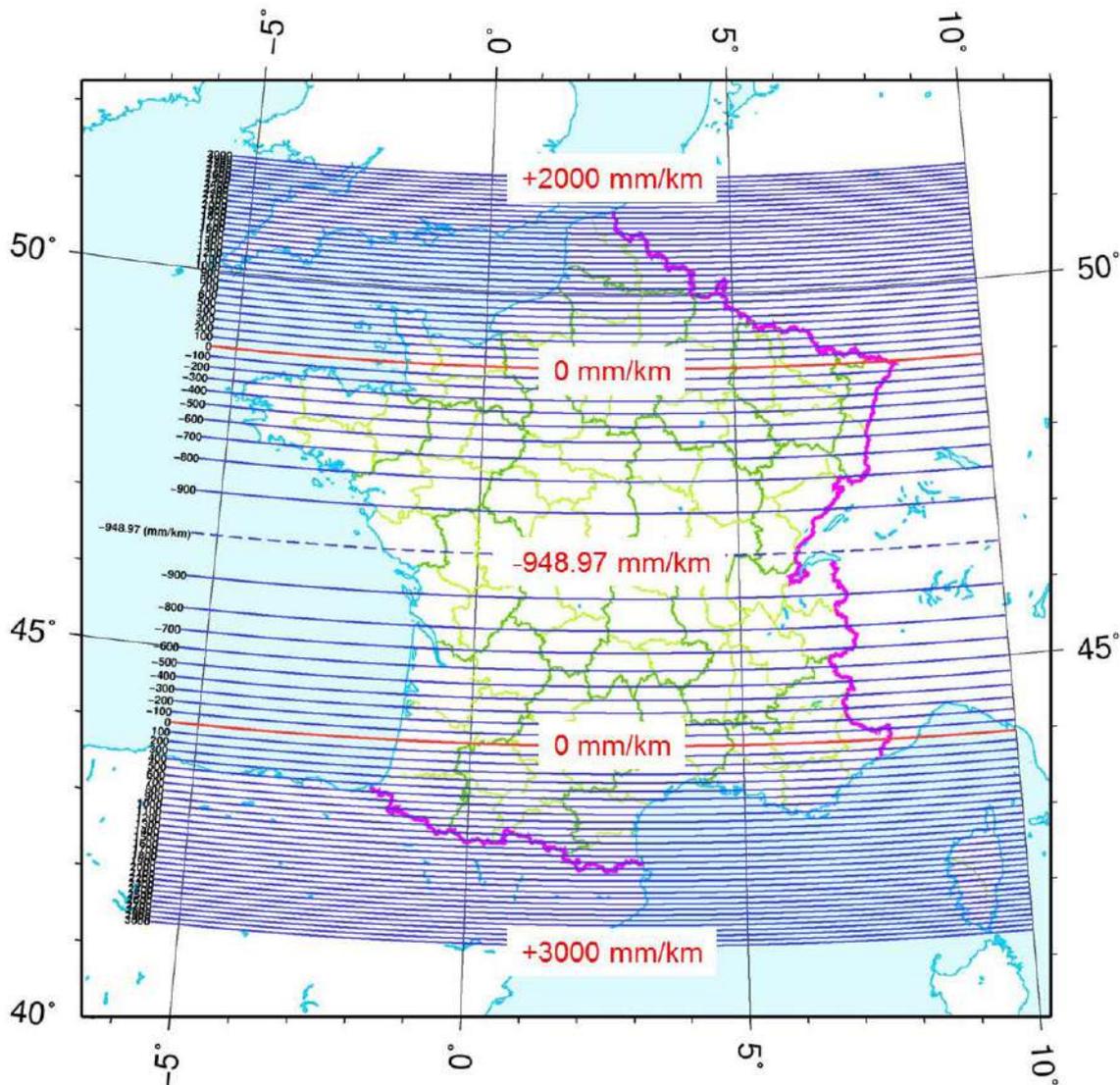


Figure 4-21 Altération linéaire en Lambert 93 (IGN)

Calcul du facteur d'échelle Lambert 93 à partir de la distance au parallèle central (46,500°)

Sur le parallèle central : $k = -949 \text{ mm/km}$

Sur tout autre parallèle, en fonction de la distance "d" en km par rapport au parallèle central (46,500°) on obtient $k \approx 1 + \frac{d^2}{(2.R_n)} - 94.9 \cdot 10^{-5}$

Avec $R_n = 6380 \text{ km}$ rayon de la sphère locale en France

Exemple pour Dunkerque, 500 km au nord du 46,500°.

$$k \approx 1 + \frac{d^2}{2R^2} - 94,9 \text{ cm/km} = 1 + \frac{500^2}{2 \times 6380^2} - 94,9 \cdot 10^{-5} = 1,002121 = 212 \text{ cm/km}$$

Point à la latitude de	Coordonnées N en Lambert 93 (en km)	Altération linéaire k
Dunkerque	$N = 7\,100 = N_0 + 500$	$k = 1,00212 = +212 \text{ cm/km}$
Meaux	$N = 6\,878 = N_0 + 278$	$k = 0 \text{ car } \varphi = \varphi_0 + 2,78 \text{ gon} = \varphi_2$
Poitiers	$N = 6\,600 = N_0$	$k = 0,999051 = -94,9 \text{ cm/km}$
Bonifacio	$N = 6\,000 = N_0 - 600$	$k = 1,00347 = +347 \text{ cm/km}$

Le graphique ci-dessous peut également être utilisé pour déterminer l'altération linéaire k d'un lieu lorsque sa latitude φ est connue.

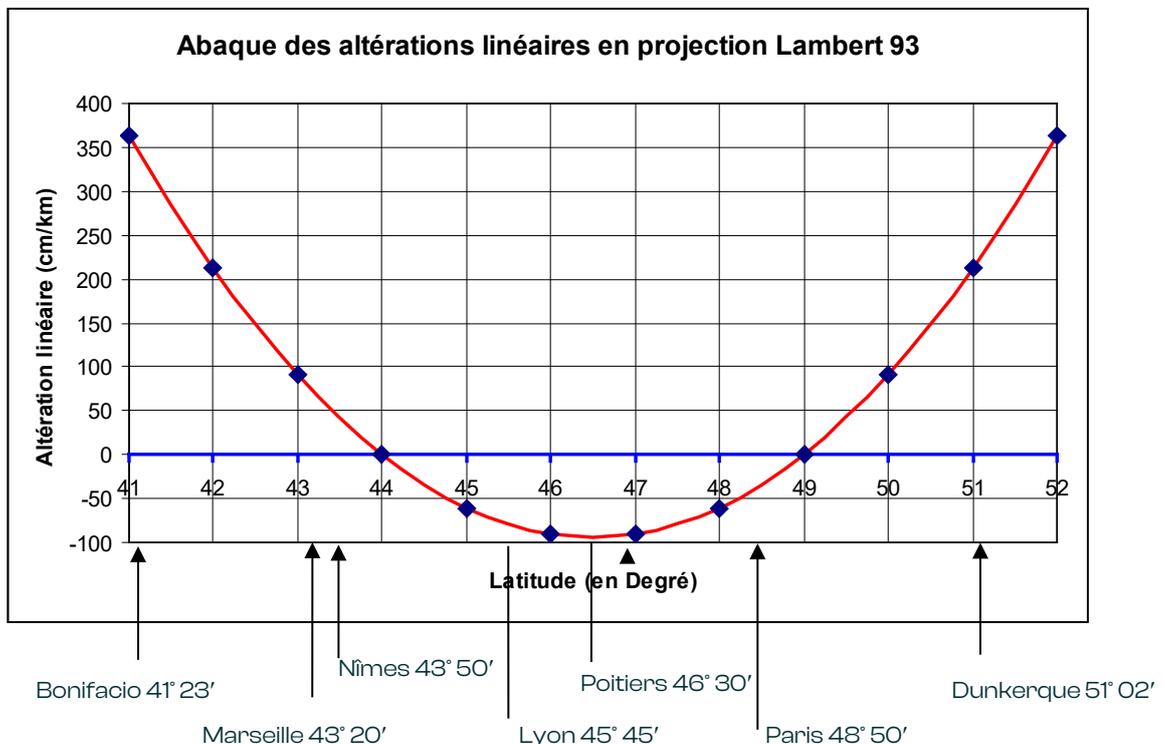


Figure 4-22 Altération linéaire en Lambert 93 (IGN)

En France, les cartes officielles de l'IGN utilisent uniquement le système RGF93-Lambert 93, c'est obligatoire.

Exemple d'altération linéaire LAMBERT 93 pour la zone " Bourg-en-Bresse à Troyes "

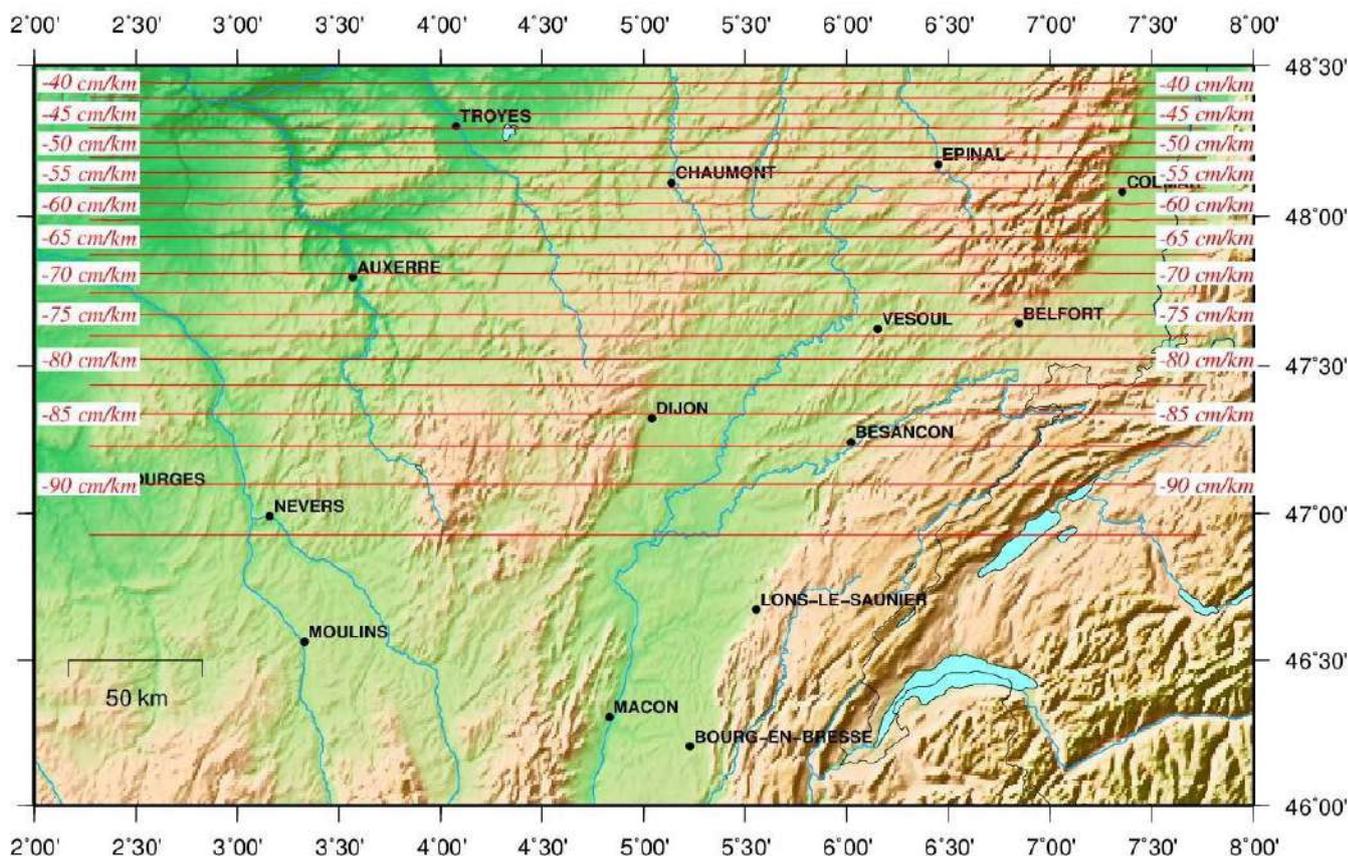


Figure 4-23 gros plan autour de Dijon pour l'altération linéaire de distance dans Lambert93 (IGN)

Projection conique conforme 9 zones Codes EPSG:3942 (zone 1/CC42) à EPSG:3949 (zone 8/CC49)

Pour compenser la faible utilisation de la projection Lambert 93 par les géomètres professionnels, due en grande partie à une altération linéaire jugée trop forte, il a été décidé de créer, en 2006, 9 projections supplémentaires à la seule projection Lambert 93.

L'altération linéaire dans chacune de ces 9 zones est toujours inférieure à 10 cm/km.

Cela représente moins de 1 cm à enlever sur les mesures de terrain de l'ordre de 100 m maximum que nous rencontrons habituellement.

- Les principales caractéristiques des projections CC 9 zones sont les suivantes :
- Ces 9 projections sont des projections conformes sécantes de Lambert portant la dénomination CCxx (où xx est la latitude en degrés du parallèle d'origine).
- Chacune des 9 zones s'étend sur 2 degrés de latitude et a pour parallèle central un parallèle dont la latitude est un nombre entier de degrés.

- La "bande" couverte a une largeur d'environ 222 km (+111 km au nord du parallèle central, -111 km au sud).
- Les 9 zones couvrent l'ensemble du territoire national avec un recouvrement de 50% entre elles (chaque département peut ainsi être associé à une seule projection).
- Le numéro de zone correspond à l'unité de latitude -1 (CC44 → 4-1=3 → zone 3)

PROJECTIONS CONIQUES CONFORMES 9 ZONES (DEPARTEMENT)

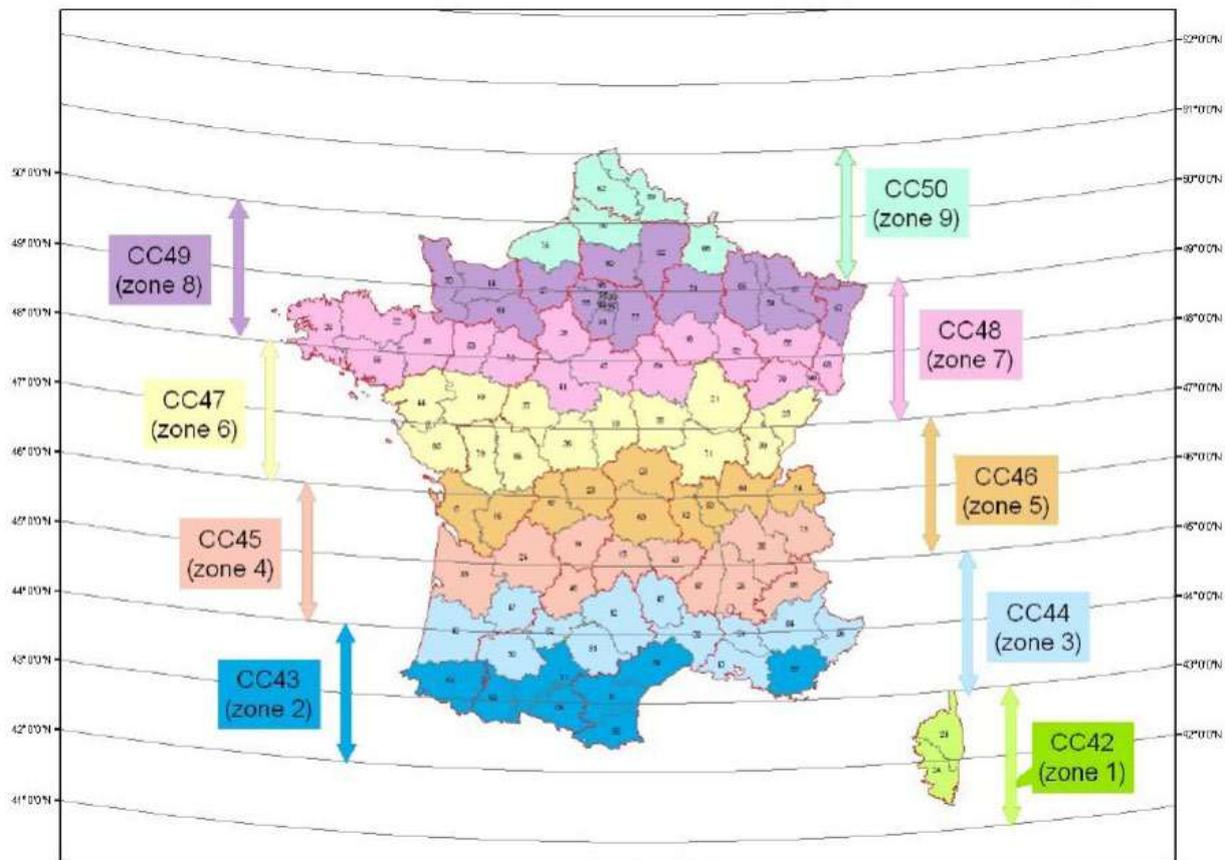


Figure 4-24 les 9 zones de RGF93-CC 9 zones de projections (IGN)

Nous pouvons donc résumer les caractéristiques des neuf zones (NZ est le numéro de la zone) comme suit

- Méridien central : $\lambda_0 = 3^\circ$ Est Greenwich,
- Latitude du parallèle central : $\varphi_0 = (41 + NZ)^\circ$ Nord
- Latitude des parallèles standards (contact cône/ellipsoïde) : $\varphi_1 = \varphi_0 - 0,75^\circ$ N et $\varphi_2 = \varphi_0 + 0,75^\circ$ N,
- Zone de validité : $\varphi_0 \pm 1^\circ = \varphi_0 \pm 111$ km,
- Coordonnées du point d'origine des X : $E_0 = 1700\ 000$ m (toutes les coordonnées X sont supérieures à 1100 000 (ce qui le différencie facilement du L93 qui est toujours inférieur à 1100 000)
- Coordonnées du point d'origine des Y : $N_0 = (NZ \times 1000 \text{ km}) + 200 \text{ km}$ (toutes les coordonnées Y commencent par NZ million de mètres)

Exemple: projection **CC44** (où se trouve Nîmes) : le **CC44** désigne la zone 3, projection conique conforme du parallèle central situé à 44 degrés nord, avec une validité s'étendant du parallèle 43° au sud au parallèle 45° au nord.

Latitude des parallèles standards : $\varphi_1 = 44 - 0,75^\circ = 43,25^\circ \text{ N}$; $\varphi_2 = 44 + 0,75^\circ = 44,75^\circ \text{ N}$

point d'origine : $E_0 = 1700 \text{ km}$; $N_0 = 3 \times 1000 \text{ km} + 200 \text{ km} = 3\,200 \text{ km}$.

Les coordonnées d'un point de la zone CC44 seront donc du type suivant, en mètres :

$X = E_{CC44} \ 1\,200\,000 \text{ à } 2\,300\,000 \text{ m}$ (donc toujours supérieur à 1.2 million comme pour toutes les zones)

$Y = N_{CC44} \ 3\,100\,000 \text{ à } 3\,300\,000 \text{ m}$ (donc commençant toujours par 3 millions, spécifique à la zone 3)

Altération linéaire en Lambert 9 zones

L'altération linéaire de chaque zone est inférieure à 10 cm par km, soit 30 fois moins dans le cas extrême de Lambert 93.

L'altération linéaire se situe entre les valeurs : $-9 \text{ cm/km} < k < +7 \text{ cm/km}$

Les projections à 9 zones sont intéressantes pour les travaux sur cartes et plans papier pour lesquels une grande précision est souhaitée, leur utilisation n'est pas justifiée pour les plans dont la précision est inférieure à l'altération linéaire.

Exemple d'altération linéaire en LAMBERT 93 CC47 pour la même zone qu'en Lambert 93 "Bourg-en-Bresse à Troyes".

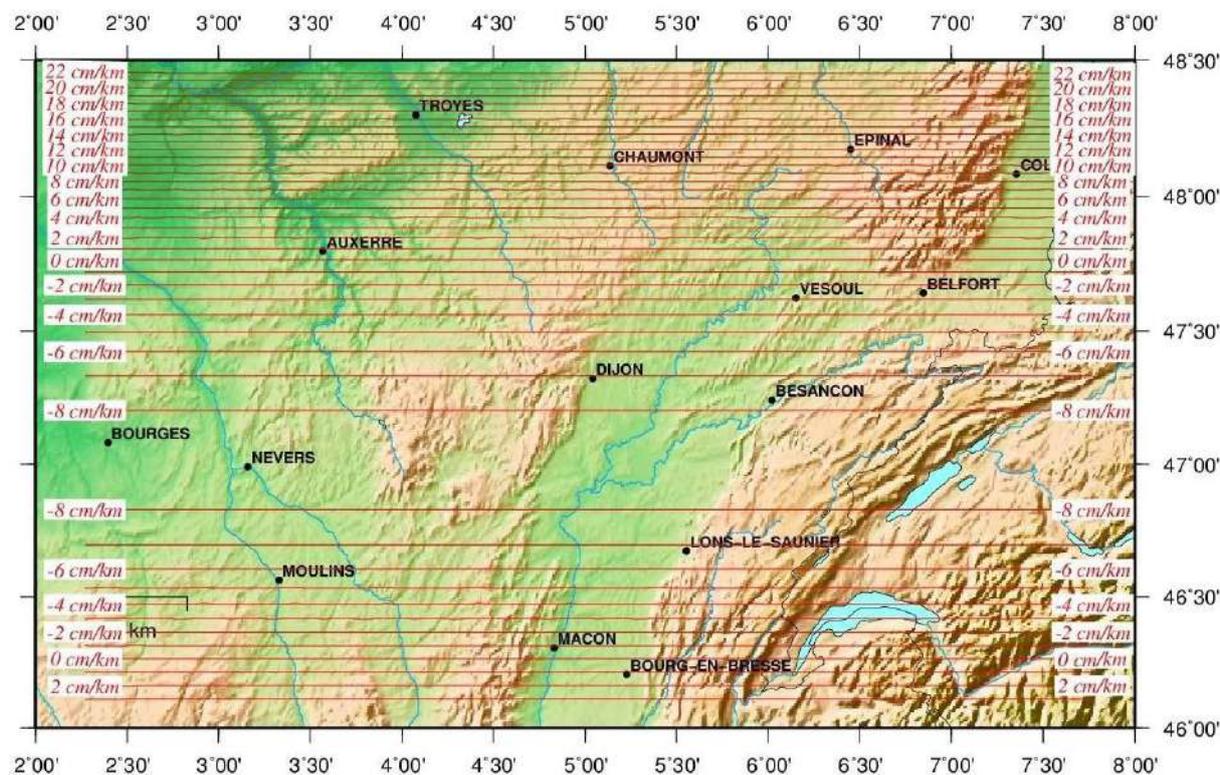


Figure 4-25 gros plan autour de Dijon de l'altération linéaire dans la projection RGF93-CC47 (IGN)

4.6 Repères géodésiques

Il existe sur le territoire différentes formes de points de référence, qui peuvent être consultés sur le site web

<https://geodesie.ign.fr/fiches/index.php?module=e&action=visugeod>

Il est possible de placer une canne à prisme ou un trépied sur certains d'entre eux pour vérifier un instrument par exemple.



Figure 4-26 repère géodésique en béton et en bronze en France (IGN)

5. Mesures d'altitude : le géoïde

Dans tous les pays, les altitudes sont mesurées par rapport au niveau moyen de la mer dans le pays.

L'ellipsoïde n'est PAS le niveau moyen des mers (MSL: mean sea level en anglais, appellation internationale aéronautique), car ce niveau dépend de la gravité. Nous avons besoin d'une autre référence pour les altitudes : le géoïde.

5.1 Le géoïde terrestre : différent de l'ellipsoïde

Le géoïde est le niveau moyen des mers (MSL), qui se prolonge sous les continents par une équipotentielle de gravité permettant de déterminer partout une altitude. Il diffère de l'ellipsoïde, qui n'est utilisé que pour le positionnement planimétrique. Le géoïde passe au-dessus ou au-dessous de l'ellipsoïde, jusqu'à 100m, cela dépend de la force de gravité !

Le géoïde n'a PAS d'équation pour le déterminer, il n'est que le résultat de milliers de mesures et d'observations dont il fait l'objet en permanence. (Alors que l'ellipsoïde est facile à calculer et possède une équation mathématique).

Ci-dessous le géoïde mondial EGM 2008 et son détail en Europe et en France (Earth Gravitational Model 2008)

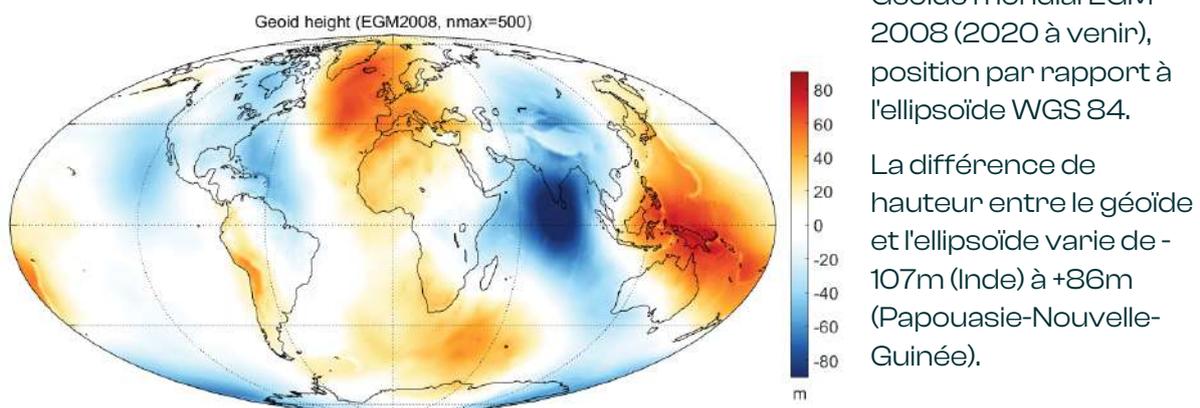


Figure 5- 1 élévations du géoïde mondial par rapport à l'ellipsoïde WGS84 (Ales Bezdec)

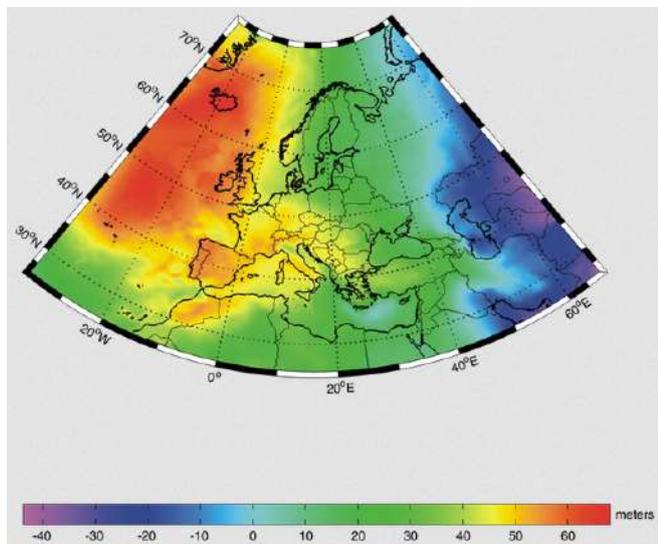


Figure 5- 2 Géoïde européen (H. Denken, W. Torge)

En Europe, le géoïde se situe entre +10m et +60m au-dessus de l'ellipsoïde.

En France le géoïde est entre +42 et +66m au-dessus de l'ellipsoïde

France RAF18
géoïde

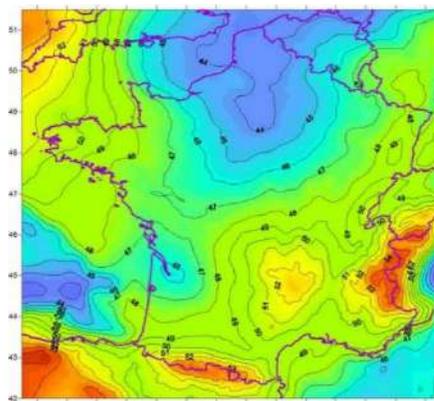


Figure 5- 3 Géoïde français (IGN)

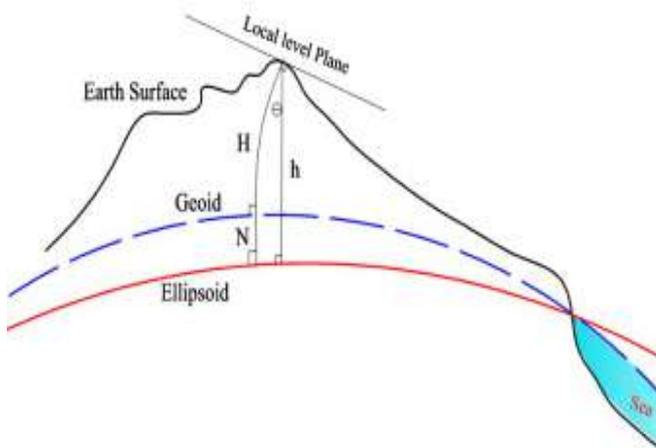
5.2 Le géoïde : déterminer l'altitude d'un point

Si l'on mesure les altitudes par rapport à l'ellipsoïde, on commet une erreur de plusieurs dizaines de mètres !

L'altitude d'un point est la distance entre ce point et la surface de niveau zéro (géoïde) le long de la verticale physique (direction de la pesanteur) passant par ce point.

Le géoïde de chaque pays passe par son point de référence altimétrique "zéro", le niveau moyen de la mer pour l'ensemble du pays.

Selon la référence que l'on prend, on peut mesurer l'altitude soit par rapport à l'ellipsoïde, soit par rapport au géoïde. Seule la référence au géoïde est la "vraie" altitude.



h = hauteur de l'ellipsoïde, (mesurée par le GPS) perpendiculaire à l'ellipsoïde

H = hauteur normale ou hauteur orthométrique (celle des plans et cartes topographiques) suivant la direction locale de la gravité, perturbée par la géologie du sol, perpendiculaire au géoïde et à son équipotentielle. C'est l'"altitude vraie" ou l'altitude légale. $H = h - N$

N = ondulation du géoïde, distance géoïde-ellipsoïde, donnée dans la grille EGM2008 ou RAF 18, perpendiculaire à l'ellipsoïde au point de projection du point terrestre le long de la

trajectoire de la gravité (voir ci-dessous).

Figure 5- 4 mesures d'altitude (USGS)

5.3 Système altimétrique légal

Chaque pays a un système légal qui se réfère au géoïde de son pays, passant par un point de référence où se trouve un marégraphe définissant l'altitude zéro pour le pays. (pour les pays en bord de mer... pour les pays sans façade maritime, ils se réfèrent à un point d'un autre pays en bord de mer).

En France, il s'agit du système NGF IGN 69. NGF = Nivellement Général de la France, le point fondamental est à Marseille, au Marégraphe. L'altitude normale : altitude définie par l'IGN (Institut Géographique National) depuis 1969



Figure 5- 5 Repère de nivellement en France (IGN)

Des repères géodésiques, ou "repères de nivellement", sont situés dans tout le pays. Ils peuvent être consultés sur le site web

<https://geodesie.ign.fr/fiches/index.php?module=e&action=visugeod>.

Tous les repères indiquent l'altitude par rapport au géoïde, avec une précision qui dépend de leur ordre, il y a 4 ordres.

Les repères de premier ordre, reconnaissables à leur numérotation composée de seulement 2 lettres et d'un chiffre, sont les plus précis. Par exemple, U'M-39 à Lunel donne 6,549 m (comme il n'y avait pas assez de 26 lettres pour les repères, il a été ajouté "prime").

Les repères de premier ordre sont précis les uns par rapport aux autres à $2 \text{ mm/km}^{1/2}$

Les repères de 4e ordre sont précis à $3,6 \text{ mm/km}^{1/2}$.

6. Système de navigation par satellite gnss

6.1 Systèmes actuels

Le GNSS " global navigation satellite system " est composé de 3 éléments :

- Le segment spatial, qui est composé de satellites tournant à environ 20 000 km de la terre
- Le segment de contrôle composé de stations terrestres qui régulent le fonctionnement du système
- Le segment utilisateur, qui est un récepteur qui calcule sa position

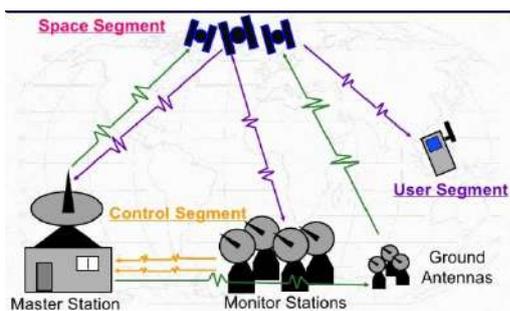


Figure 6- 1 les 3 segments du GNSS (F.Burks)

Jusqu'en 2007, seul le GPS (Global Positioning System) - conçu, développé et entretenu par le ministère américain de la défense - était un GNSS opérationnel pour les civils. Depuis, Glonass (URSS puis Russie) est arrivé, suivi par deux autres systèmes : le Compass/Beidou chinois et Galileo de l'Union européenne. Le Japon (QZSS) et l'Inde (IRNSS) sont les derniers.



Figure 6- 2 les 6 différents GNSS (origine inconnue)

Le GNSS est en orbite à environ 20 000 km et compte une trentaine de satellites disponibles.

GNSS	GPS	GLONASS	GALILEO	COMPASS (Beidou2)
Country	 	 	 	
Satellites + Spare (Plan)	27 + 3 (1993)	21 + 3 (2012)	26 + 4 (201x)	30 + 5 GEO (2015)
Satellites in Constellation	31 (2009)	19 (2009) 24 (2012) 3Y	2 (2009) 4 (2011) 2Y 18 (2013) 4Y	2(2009) 12 (2011) 2Y 30 (2015) 6Y
Orbital height	20180 km	19100 km	23222 km	21500 km
Orbital period	11:58 h	11:15 h	14.05 h	12:35 h
System Control	Military	Military	Civil	Military
Timing Services	Yes	Yes	Yes	Yes
Clocks	Cs, Rb	Cs	PHM, Rb	Rb
TimeScale	TAI-19	UTC-3 hours	TAI	
Time Offset transmission	GGTO GPS/Galileo Time Offset		GGTO GPS/Galileo Time Offset	
Open service / 95%	100 ns	100 ns	30ns	50ns
Open service / 95%	28m		35m	50m

Tableau 1 Caractéristiques du GNSS

6.2 Calcul de la position

Multilatération 3D : intersection de sphères 3D

Le fonctionnement du GNSS repose sur la mesure du temps de propagation du signal émis par un satellite jusqu'à sa réception par l'utilisateur. En multipliant ce temps par la vitesse de propagation de l'onde, on obtient la distance entre le satellite et l'antenne. La mesure du temps de propagation du signal de plusieurs satellites permet par multilatération sphérique de déterminer la position du récepteur.

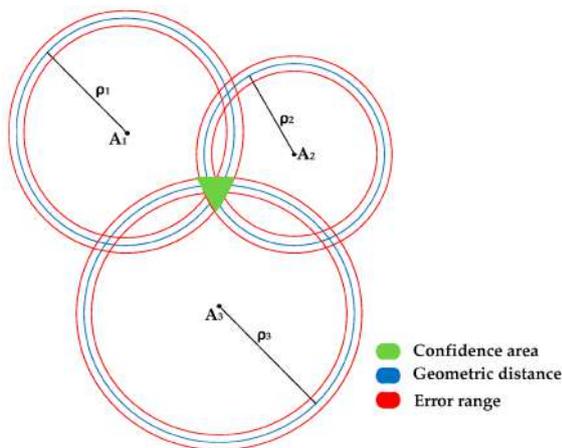


Figure 6-3 Multilatération dans un plan (topomaths)

Si nous connaissons la position A_1 , A_2 , et A_3 (les satellites)

Et si nous connaissons la distance entre chaque A_i et le récepteur, avec sa confiance, alors le récepteur (l'utilisateur avec son antenne GNSS) se trouve dans le triangle central de confiance, le seul endroit respectant les 3 conditions de distance.

Multilatération spatiale : 4 satellites sont nécessaires pour déterminer les intersections de sphères et non de cercles, mais aussi pour obtenir une synchronisation des horloges entre récepteur et satellites. →



Figure 6-4 calcul d'une position à partir de 4 satellites (genecors)

La position déterminée ne peut être un point unique en raison de la confiance dans la position des satellites et des mesures de distance : plusieurs calculs sont effectués et une moyenne est prise.

Positionnement : exclusivement sur l'ellipsoïde WGS84

L'ellipsoïde de référence est le WGS84, le GNSS ne peut se positionner que sur cet ellipsoïde.

La longitude, la latitude et la hauteur ellipsoïdale sont les seules informations fournies par le récepteur.

Nous ne disposons pas directement de l'altitude légale (NGF-IGN69 en France), ni des coordonnées dans le système légal du pays (RGF93 en France), il est nécessaire d'ajouter un logiciel qui calculera ces valeurs en utilisant les données de projection et la grille de conversion altimétrique.

6.3 Précision métrique native du GNSS, concept GDOP, indice Kp

Précision instantanée

Les satellites émettent donc des ondes électromagnétiques (micro-ondes) vers la Terre, qui se propagent à la vitesse de la lumière (300 000 km/s dans le vide). Le récepteur sur Terre mesure le temps mis par l'onde pour atteindre son antenne (par décalage de code, environ 70 ns). Il peut alors estimer la distance qui le sépare du satellite. Avec les distances à plusieurs satellites dont la position est connue, le récepteur peut calculer une multilatération sphérique et obtenir la position de l'antenne.

La mesure précise de ce temps de propagation est cruciale puisqu'une erreur de 10^{-6} seconde génère une erreur de 300 m sur la distance...

Ainsi, une précision de 1 nanoseconde (10^{-9}) est nécessaire pour obtenir une précision de positionnement de l'ordre du mètre ! On a donc recours à des horloges atomiques.

Les erreurs de positionnement sont dues à la confiance sur

- l'orbite des satellites (connue avec une précision de 5 à 30 cm) obtenue par l'"éphéméride" codée dans le récepteur et mise à jour par le signal du satellite et du segment de contrôle sur terre
- la synchronisation des horloges entre le récepteur et les satellites (nécessite la nanoseconde) obtenue par décodage du signal reçu et des horloges atomiques des satellites
- la propagation du signal dans l'atmosphère terrestre (ionosphère avec sa température, ses champs magnétiques et électromagnétiques, puis troposphère avec son humidité, sa pression, sa température et ses particules) qui retarde et altère le signal
- les réflexions parasites et les masques dans l'environnement de réception (bâtiments élevés, couvert végétal...) qui retardent et altèrent le signal
- les caractéristiques de l'antenne réceptrice (position variable du centre de réception, centre de phase, qualité de l'électronique et nombre de fréquences reçues)

En positionnement instantané, précision maximale dans de très bonnes conditions :

- **10m avec un récepteur monofréquence** (téléphone portable, GPS de voiture, GPS de randonnée ... GNSS de base pour drone)
- **1m avec un récepteur bi-fréquence** (antenne professionnelle qui traite 2 ondes par satellite, certains appareils grand public le font aussi, rares et très chers... drones haut de gamme)
- ... Galileo propose la réception de 4 fréquences pour avoir, avec un logiciel supplémentaire, une précision centimétrique, mais cela nécessite une antenne quadri-fréquence très coûteuse...

- Cette précision s'améliore en restant statique sur le même point pendant une longue période, le GNSS fait la moyenne des mesures.

GDOP : Geometric Dilution of precision : diminution de la précision par mauvaise répartition satellitaire

Ce paramètre, connu à l'avance dans les éphémérides des constellations GNSS, caractérise la précision du positionnement par les facteurs de dilution de la précision, nDOP : Dilution Of Precision :

"n" représente les différentes possibilités de DOP, σ_0 est la précision de la mesure

- n = V : solution verticale :
$$VDOP = \frac{\sigma_h}{\sigma_0}$$
- n = H : solution horizontale :
$$HDOP = \frac{\sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_n^2}}{\sigma_0}$$
- n = P : solution de positionnement :
$$PDOP = \frac{\sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_n^2 + \sigma_h^2}}{\sigma_0}$$
- n = T : Solution temporelle :
$$TDOP = c \frac{\sigma_t}{\sigma_0}$$
- **n = G : solution géométrique et temporelle :**
$$GDOP = \frac{\sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_n^2 + \sigma_h^2 + c^2 \sigma_t^2}}{\sigma_0}$$

En général, seul le GDOP est vérifié, car il s'agit des données les plus complètes. Plus le nDOP est grand, moins le résultat est précis : par exemple, avec une précision de mesure de 10 mètres et un GDOP de 7, la précision théorique attendue pour un positionnement instantané sera de 70 m !

- ✓ **très bon DOP** < 3
- ✓ bon 4-5
- ⊕ limite de confiance 6
- ✗ à éviter > 6

↓ des satellites bien répartis sur le site de mesure donneront un bon DOP (nDOP < 3)



Figure 6- 5 DOP en fonction de la position des satellites (K.Ansari)

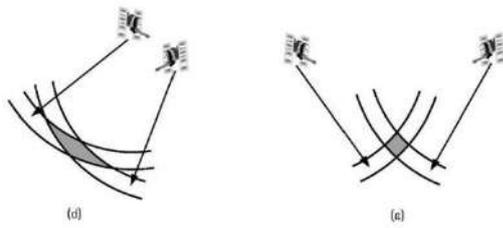


Figure 6- 6 Intersections de distance avec leur zone de confiance (marinegyaan.com)

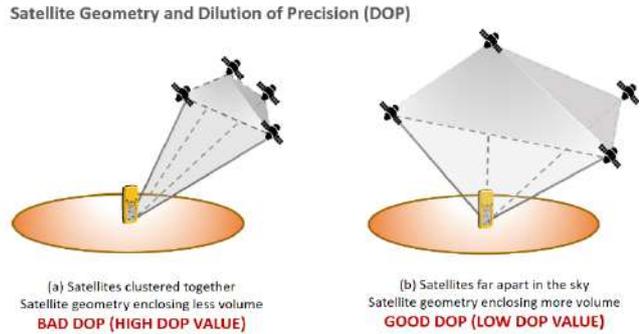


Figure 6- 7 Plus les satellites sont proches les uns des autres, plus l'intervalle de confiance est grand (Graticule).

Variation au cours de la journée

Pour 1 système GNSS et pour 1 emplacement, le DOP varie au cours de la journée, on peut obtenir un graphique des variations du GDOP au cours de la journée, avec un logiciel GNSS professionnel.

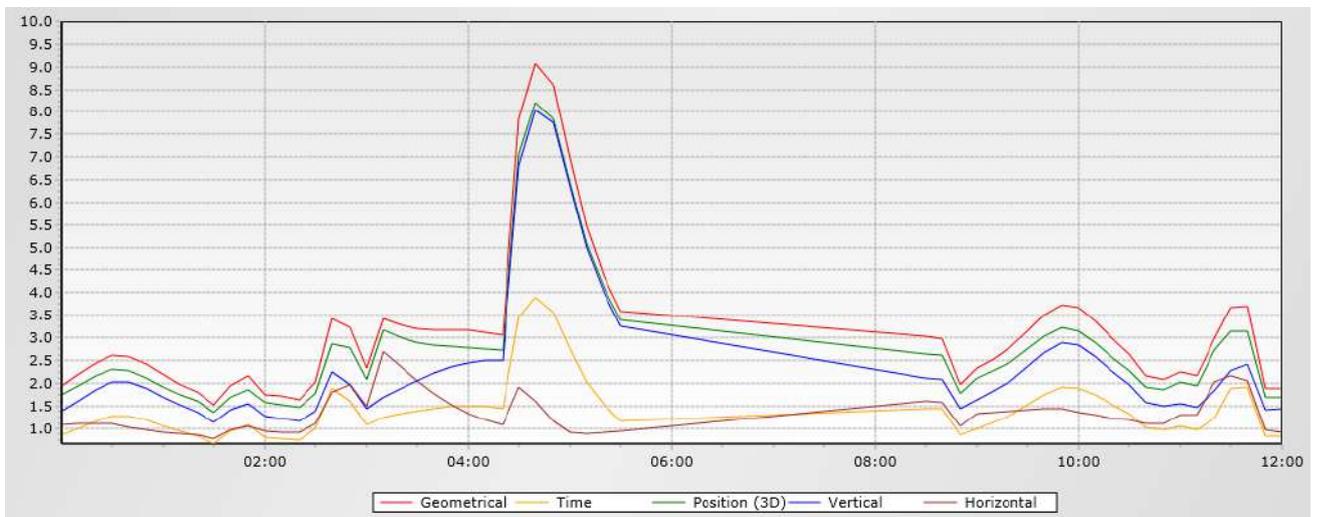


Figure 6- 8 Variation du DOP pendant 12 heures (Trimble)

Ci-dessus on voit que les meilleurs moments d'observation sont entre 8h30 et 9h30 puis 10h30 à 11h15 enfin vers 11h45 . ATTENTION : le pic vers 5h00 du matin est le PLUS MAUVAIS MOMENT (gros DOP).

Indice Kp

Cet indice varie de 0 à 9, et mesure l'activité géomagnétique mondiale. Il indique l'état de perturbation de la propagation des ondes électromagnétiques par les éruptions solaires. **Jusqu'à 3 l'activité est peu perturbatrice**, à 4 elle est significative, à partir de 5 les signaux de satellites GNSS peuvent subir une forte variation diminuant nettement la précision de positionnement.

Les applications et sites internet météorologiques donnent la valeur du Kp pour la zone de vol.

Il faut voler si la précision est indispensable avec un **Kp < 4**.

6.4 Précision centimétrique en mode de mesure PPP

→ **PPP : precise point positioning** : une antenne GNSS bi-fréquence est laissée statique pendant plusieurs heures, voire plusieurs jours. Elle calcule sa position des centaines de fois et par moyennes successives, la précision atteint le centimètre.

Non applicable à un levé par drone : trop long !

Mais convient à une station de base en mode post-traitement différentiel (voir ci-dessous).

6.5 Précision centimétrique obtenue avec un système différentiel

Méthode différentielle : Liaison de deux antennes GNSS, pivot et mobile

En reliant deux antennes GNSS, l'une fixe dont la position est parfaitement connue (station de base, dit « pivot »), et l'autre qui effectue des mesures sur des points (station mobile, drone), on peut connaître la position des points mesurés au centimètre près.

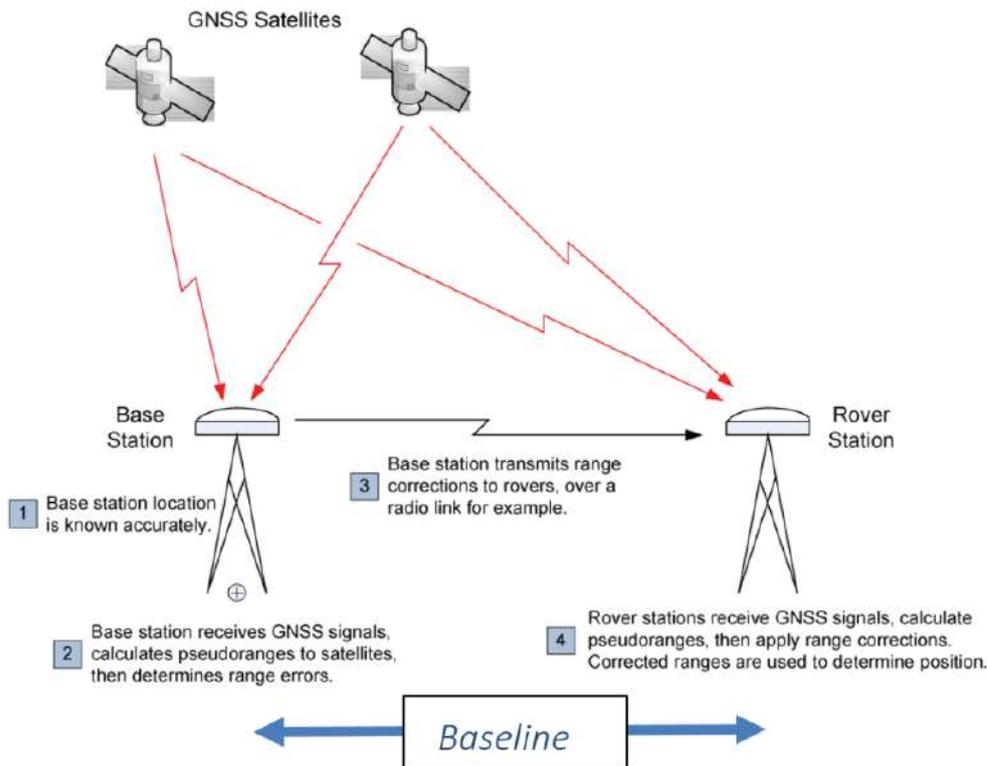


Figure 6- 9 principe du GNSS différentiel (Politecnico di Torino)

Post-traitement pivot-mobile : En installant une antenne fixe sur le terrain, le " pivot " qui sert de référence, sur un trépied, qui acquiert sa position en statique (un PPP de 1 à 2 heures), les points sont relevés avec une autre antenne appelée " le mobile ". Un calcul est effectué a posteriori au bureau pour déterminer la position de l'antenne fixe au centimètre près, et les coordonnées des points du mobile sont alors également ajustées au cm en déterminant les erreurs à corriger.

Ligne de base : distance entre le pivot connu et le mobile. Plus elle est proche, mieux c'est.

- 😊 meilleur : < 10 Km
- ✓ adapté : 10-30 Km
 - ❖ Prudemment acceptable : 30 à 100 km
- ☒ Pas de précision > 100 Km

RTK : corrections en temps réel via Internet et abonnement

RTK : Real Time Kinematic (cinématique en temps réel). Une seule antenne mais reliée à un serveur de correction de position. Ce serveur calcule, grâce à un réseau d'antennes fixes dont la position est connue à 5 mm près, les corrections à apporter sur la réception de tous les satellites des constellations étudiées. Ainsi le mobile GNSS RTK calcule chaque seconde sa position précise au centimètre près.

En France, le RGP (réseau GNSS permanent) et diverses antennes privées servent de pivot à plusieurs services RTK payants : Teria, Orphéon, Sat-info, Centipede.....

Pour accéder au RTK, vous devez

- Avoir un modem 4G ou 5G sur votre décodeur GNSS, en plus de l'antenne GNSS, qui est un dispositif différent.
- Disposer d'un décodeur compatible avec le RTK
- S'abonner (plusieurs centaines d'euros par an) à un service RTK
- Travailler dans une zone couverte par un réseau cellulaire
- Disposer d'une carte SIM (ou d'un lien avec son propre téléphone en wifi) pour recevoir des données

Etapes pour se connecter au RTK avec tout cet équipement (il est supposé que la configuration du RTK a déjà été faite selon les données d'abonnement de l'opérateur RTK) :

- Démarrer le GNSS : antenne et décodeur
- Vérifier que la connexion avec les satellites est établie et qu'une position est obtenue
- Connectez au RTK via le menu dédié
- Pendant que la connexion s'établit, accédez aux réglages et appliquez les paramètres d'enregistrement des mesures ou d'affichage d'alertes sur la précision.
- mesures uniquement si **GDOP \leq 4**
- **précision de la position horizontale est \leq 3 cm** (à adapter au cas par cas, mais en dessous de 1cm la mesure peut prendre plusieurs minutes).
- **précision de la position verticale est \leq 5 cm** (à adapter au cas par cas, mais en dessous de 1,5cm la mesure peut prendre plusieurs minutes).
- Nombre de mesures avant enregistrement (20 à 30)
- **angle de coupure** : les satellites trop bas sur l'horizon ne sont pas pris en compte, leur signal traverse "trop" d'atmosphère : réglez l'angle à **15°** (ou plus en ville à cause des bâtiments qui masquent les satellites bas).
- Revenez à l'écran principal pour vérifier si la qualité du positionnement en centimètres est atteinte : **CQ3D $<$ 10cm**

NB1: sur l'écran de visualisation des points, le point dont le nom commence par RTCM est l'antenne utilisée comme référence, souvent à plusieurs kilomètres, cochez l'option "ne pas afficher RTCM" pour avoir un zoom facile sur tous les points levés si nécessaire.

NB2: l'utilisation du RTK sur un drone comprend moins d'options en général.

Exemple de précision pour un Leica GS16 : écart-type sur une mesure

**Differential phase
in post-processing**

Type	Horizontal	Vertical
Static and rapid static	3 mm + 0.5 ppm	5 mm + 0.5 ppm
Kinematic	8 mm + 1 ppm	15 mm + 1 ppm
Static with long observations	3 mm + 0.1 ppm	3.5 mm + 0.4 ppm

**Differential phase
in real-time**

Type	Horizontal	Vertical
Single Baseline (< 30 km)	8 mm + 1 ppm	15 mm + 1 ppm
Network RTK	8 mm + 0.5 ppm	15 mm + 0.5 ppm

Tableau 2 Caractéristiques de l'antenne Leica GS16 (Leica)

Exemple : si l'on travaille en nRTK, avec une antenne pivot virtuelle RTCM à 20 km (ligne de base = 20 km), l'écart-type des mesures est le suivant

$$\sigma = \sqrt{8^2 + (0.5 \times 20)^2} = 13\text{mm}$$

- La précision de la position verticale est toujours environ 1,5 fois moins bonne que celle de la position horizontale.

6.6 Perturbations locales sur la précision d'un GNSS

Indépendamment de la qualité de l'équipement et de toutes les perturbations atmosphériques, il existe des perturbations locales liées aux relevés GNSS :

Multi trajets par les façades ou les falaises ou le sol : le signal est retardé par une réflexion qui allonge son parcours.

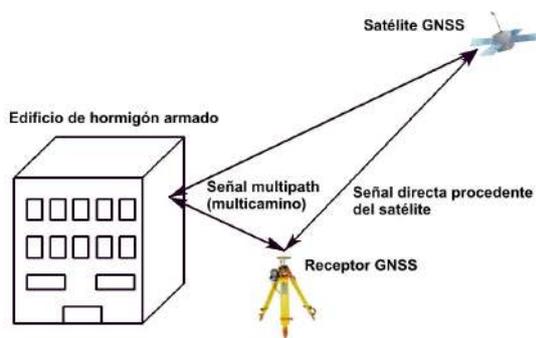


Figure 6-1 réflexions sur les façades (N.Garrido)

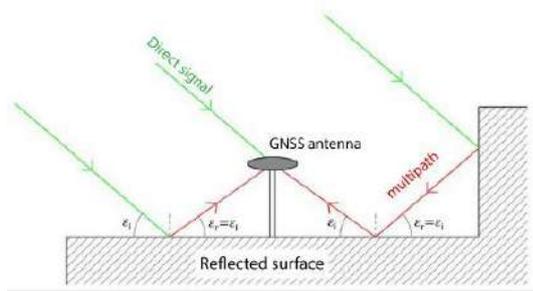


Figure 6-2 Réflexion au sol des ondes émises par les satellites

Annulation des trajets multiples par le sol : utilisation d'antennes avec anneau de garde (shoke-ring)



Figure 6-3 choke ring antenna (Trimble)

Masque : le signal est coupé par un obstacle entre le récepteur et le satellite : arbres, nuages d'orage, bâtiments.

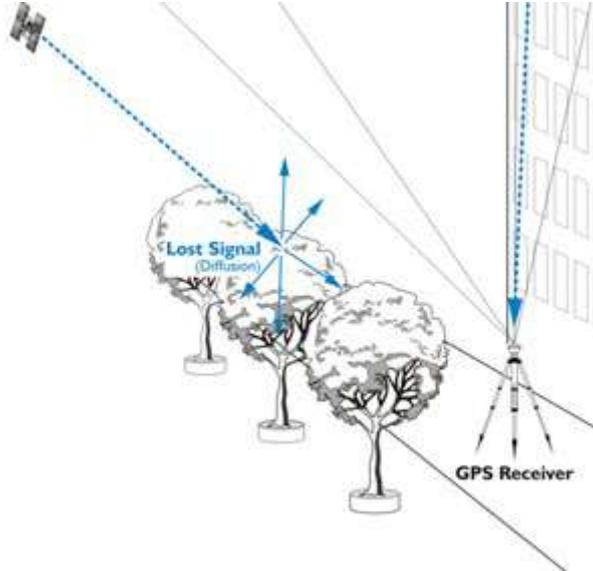


Figure 6-4 arbres et bâtiments masquant le signal (Penn state U.)

6.7 Système légal et GNSS

Pour relier à un système légal nos nuages de points issus de la photogrammétrie par drone ou du lidar, il faut géoréférencer les coordonnées dans le système légal du site. Le GNSS n'étant positionné que sur l'ellipsoïde, il doit pouvoir renvoyer des coordonnées utilisables pour la topographie : coordonnées légales (UTM ou Lambert selon le pays, voir ci-dessus), et altitudes légales, par rapport au niveau moyen des mers du pays, son géoïde.

Il est donc nécessaire de l'avoir préalablement chargé dans le décodeur du GNSS :

- les formules de projection entre l'ellipsoïde et le système légal (RGF93 en France, Lambert93 et CC 9 zones) pour avoir les coordonnées légales E et N. Ces formules sont mathématiques et bien connues, mais un peu compliquées à exprimer ici...
- Une grille de conversion altimétrique (grille RAF20 la plus récente en France, sinon RAF18) pour avoir l'altitude légale, liée aux repères de nivellement du pays. La formule mathématique est très simple :

$H = h - N$. Le GNSS mesure la hauteur ellipsoïdale "h" mais la valeur de l'ondulation du géoïde "N" dépend de la position du point mesuré. Chaque pays établit une grille, aussi fine que possible de son territoire, des points où la hauteur entre l'ellipsoïde WGS84 et le géoïde est déterminée (l'ondulation N). La grille de référence des altitudes est la liste des coordonnées de tous les points où la valeur de la distance verticale entre l'ellipsoïde WGS84 et le géoïde a été calculée. En Europe, cette "ondulation" est positive.

Entre deux points, l'ondulation est interpolée.

La précision des grilles de conversion altimétrique varie de 5 à 30 mm.

NB : si vous oubliez d'enregistrer les points dans le bon système, il est toujours possible de convertir tous les points par la suite à l'aide d'un logiciel.

7. Cibles de géolocalisation sur le site : géoréférencement

7.1 Principe (voir aussi le module "photogrammétrie")

Pour que nos photogrammétries ou nuages de points lidar puissent être géoréférencés, nous devons disposer de points de repère sur les photos dont la position a été relevée à l'aide d'un système GNSS centimétrique (post-traitement ou RTK).

Les cibles sont positionnées le plus écartées possibles sur le terrain, de grands points de repère visibles et numérotés, puis relevées à l'aide d'un système GNSS centimétrique.

Pour un bon géoréférencement, vous avez besoin d'au moins 4 cibles. Le fait de placer plus de cibles améliore la précision.

7.2 Types de cibles

Exemple :



Les cibles doivent être

- grandes (au moins 50 cm)
- numérotées
- très stables (lourdes ou fixées par des poids ou des pierres)
- stables pendant toute la durée de l'étude du drone
- bien espacées et bien réparties sur le lieu de travail

Figure 7-1 cible de géolocalisation au sol (pixwing.fr)

7.3 Géolocalisation des cibles

Le GNSS doit être pointé vers le centre exact de la cible, stabilisé par un trépied.

La précision doit être centimétrique, le GNSS doit être réglé au préalable et connecté en RTK (ou en pivot-mobile avec post-traitement).

Le matricule du point relevé doit correspondre au numéro de la cible.

Le système de coordonnées GNSS doit avoir été choisi avant le levé, ainsi que la grille de conversion altimétrique.



Figure 7-2 Mesure GNSS sur une cible (Chivas)

Liste des figures

Figure 2-1 Ellipsoïde WGS84	7
Figure 2-2 axe de rotation = Nord géographique	9
Figure 2-3 déclinaison du champ magnétique en 2015 (ncei.noaa.gov)	9
Figure 2-4 déclinaison des lignes de champ magnétique de la terre	10
Figure 3-1 Méridiens (brainly.in)	11
Figure 3-2 Parallèles (brainly.in) (https://geography.name)	12
Figure 3-3 Hauteur ellipsoïdale orthogonale à l'ellipsoïde	12
Figure 3-4 Axe des coordonnées cartésiennes (researchgate)	15
Figure 3-5 Dérive des continents (importantinnovations.com)	16
Figure 4-1 Les deux projections successives pour obtenir une carte	17
Figure 4-2 Repère de référence orthonormé sur une carte plane	18
Figure 4-3 Projection cylindrique transversale	18
Figure 4-4 Projection cylindrique directe	19
Figure 4-5 Cone tangent Figure 4-6 Cone sécant : moins de déformations	19
Figure 4-7 Représentation de la tangente azimutale	19
Figure 4-8 projection directe de Mercator (Britanica.com)	21
Figure 4-9 Projection universelle transverse de Mercator UTM	22
Figure 4-10 les 60 zones de l'UTM (researchgate)	22
Figure 4-11 axe dans une bande UTM quoi-quand-comment.com	23
Figure 4-12 coordonnées dans une bande UTM	23
Figure 4-13 les 3 zones UTM de la France ("fuseau" en français) (IGN)	24
Figure 4-14 projection de la distance entre le champ et l'ellipsoïde	25
Figure 4-15 facteur d'échelle=1 le long des méridiens standard (what-when-how.com) ...	26
Figure 4-16 facteurs d'échelle remarquables en UTM	26
Figure 4-17 Projection sécante de Lambert (researchgate.com)	28
Figure 4-18 différents facteurs d'échelle en fonction de la position par rapport aux parallèles standards (Bryan W. Bunch)	29
Figure 4-19 convergence des méridiens en Lambert (IGN)	30
Figure 4-20 axes du système de projection RGF93-Lambert93	31
Figure 4-21 Altération linéaire en Lambert 93 (IGN)	32

Figure 4-22 Altération linéaire en Lambert 93 (IGN)	33
Figure 4-23 gros plan autour de Dijon pour l'altération linéaire de distance dans Lambert93 (IGN).....	34
Figure 4-24 les 9 zones de RGF93-CC 9 zones de projections (IGN).....	35
Figure 4-25 gros plan autour de Dijon de l'altération linéaire dans la projection RGF93-CC47 (IGN).....	36
Figure 4-26 repère géodésique en béton et en bronze en France (IGN)	37
Figure 6-1 réflexions sur les façades (N.Garrido).....	54
Figure 6-2 Réflexion au sol des ondes émises par les satellites.....	54
Figure 6-3 shoke ring antenna (Trimble).....	54
Figure 6-4 arbres et bâtiments masquant le signal (Penn state U.).....	55

Liste des tableaux

Tableau 1 Caractéristiques du GNSS.....	43
Tableau 2 Caractéristiques de l'antenne Leica GS16 (Leica).....	53