

GPS: NOUVEAU SYSTEME DE REFERENCE GEODESIQUE FRANCAIS NOUVEAUX PROCESSUS DE CALCULS

Françoise. DUQUENNE

Ingénieur Géographe IGN¹, Maître de conférences à l'ESGT²

Ecole Supérieure des Géomètres Topographes 1 boulevard Pythagore 72000 Le Mans
francoise.duquenne@esgt.cnam.fr

ملخص

في فرنسا، يطالب قرار، وشيك الصدور، باستعمال نظام مرجعي جيوديزي جديد RFG93، مقترن بإهليج نظام سطح المقارنة الجيوديزي 80 (GRS 80)، وبالتمثيل المستوي لامبرت 93. في بادئ الأمر، يقترح المقال استنكار مفهوم هذا النظام الجديد وكيفية الارتباط به.

لقد تم التطرق أيضا إلى مشكلة اختلاط التقنيات التقليدية للتموقع وأجهزة تحديد المواقع (GPS). لقد تم غالبا اعتماد حل يتمثل في الرجوع إلى التمثيل المستوي لإجراء الحسابات التقليدية (منجم معادن، مسافة). إلا أن بعض الحسابات يمكن إجراءها بثلاثة أبعاد بسهولة أكثر أو بدقة أكثر. سيتم معالجة عدة أمثلة في هذا المقال، كحساب إحداثية أفقية منحنية الخطوط، توجيه التسديد، حساب الارتباط، مع مقارنة الطرق.

RESUME

En France, un arrêté dont la publication est imminente préconise l'utilisation du nouveau système de référence géodésique RGF93 associé à l'ellipsoïde GRS80 et à la représentation plane LAMBERT 93. Dans un premier temps l'article propose de rappeler la signification de ce nouveau système et comment on peut s'y rattacher.

Le problème du mélange des techniques traditionnelles de positionnement et du GPS est également abordé. Une solution fréquemment adoptée consiste à revenir en représentation plane pour faire des calculs classiques (gisement, distance). Pourtant certains calculs peuvent se faire en tridimensionnel plus facilement ou plus exactement. Dans cet article on traitera plusieurs exemples comme le calcul d'une abscisse curviligne, l'orientation d'une visée, le calcul de rattachement, en comparant les méthodes. Les précautions d'utilisation du Lambert 93 sont à l'occasion évoquées.

ABSTRACT

In France, there is a decision, in the way to be published, which recommends the use of RGF93, a new geodetic reference system, associated to GRS80 ellipsoid and to the plane representation Lambert93. In the first time, the article suggests to remind the significance of this new system and how we can join it.

The problem of traditional techniques mixture of positioning and GPS is also tackled. A solution frequently adopted consists of returning to the plane representation in order to make classical calculations (deposit, distance). Nevertheless, some calculations can be done with three dimensions, more easily or more exactly. In this article we will treat several examples such as the curvilinear abscissa calculation, the sight orientation and the joining calculation, with methods comparison. On the occasion, usage precautions of Lambert93 are evoked.

1. Pourquoi L'IGN a-t-il, sur la recommandation du CNIG³, mis en place le réseau géodésique RGF ?

Le système géodésique « ancien » nommé NTF (Nouvelle Triangulation française) qui est encore utilisé lorsque l'on fait des calculs en coordonnées Lambert zone a été réalisé entre 1889 et 1992. Les techniques d'observations utilisées sont principalement des mesures d'angles avec environ tous les 300 km des mesures astronomiques et des mesures de distance au fil invar qui ont permis une réorientation et une mise à l'échelle du réseau.

Les moyens de calculs étaient à ce moment là assez rudimentaires même si dans les années cinquante est apparu le premier ordinateur. Les calculs d'ajustement ont été exécutés par petits blocs de quelques points s'appuyant les uns sur les autres.

¹ IGN: Institut Géographique National

² ESGT: Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes

³ CNIG: Conseil National de l'Information Géographique

Vers les années 1980 ont été introduites de manière plus systématique des mesures de distances obtenues avec des distancemètres électroniques. Dans le même temps l'évolution de l'informatique a permis de traiter des blocs de plus en plus grand, jusqu'à plusieurs milliers de points dans les dernières années.

Dès les années 70 apparaissaient les premières mesures de géodésie spatiale avec le système Transit qui permettait des positionnements relatifs à 0,5 mètres près. Ces mesures, tout autant que les mesures de distances ont montré que le système NTF n'était pas si homogène qu'on le prétendait et qu'il y avait dans certaines régions des problèmes d'échelle.

La géodésie spatiale faisant des progrès rapides il est apparu dans le milieu des années 80, grâce au GPS (Global Positioning System) que l'on pouvait mettre en évidence de manière assez précise les déformations de la NTF que l'on ne percevait pas en faisant des mesures d'angles même à des distances de 30 kilomètres, d'autant plus que le GPS permettait de faire des mesures de plusieurs centaines de kilomètres. Très vite il est apparu qu'il fallait mettre à dispositions des utilisateurs GPS un système géodésique compatible avec les nouvelles techniques de mesures c'est à dire de précision centimétrique. A l'heure actuelle le GPS est devenu l'outil quotidien pour l'arpentage et c'est pour cela qu'il devient important que l'utilisation du système géodésique national associé au GPS soit appuyé au niveau national par un arrêté.

Ce nouveau système est le RGF93. Il a été développé conjointement au système géodésique mondial (ITRF) et au système géodésique Européen (ETRS). Le système mondial est réalisé par des points répartis à la surface de la Terre dont les coordonnées ont été déterminés par plusieurs techniques de géodésie spatiale (Very Long Base Interferometry, Laser vers la Lune ou vers satellite, GPS ultra précis, DORIS). Actuellement le réseau contient environ 200 points. Tout les ans l'IGN recalcule les coordonnées des points du réseau mondial en intégrant les nouvelles stations et les nouvelles observations : on dit alors que l'on crée une réalisation annuelle du système mondial, celui qui est utilisé maintenant est l'ITRF97.

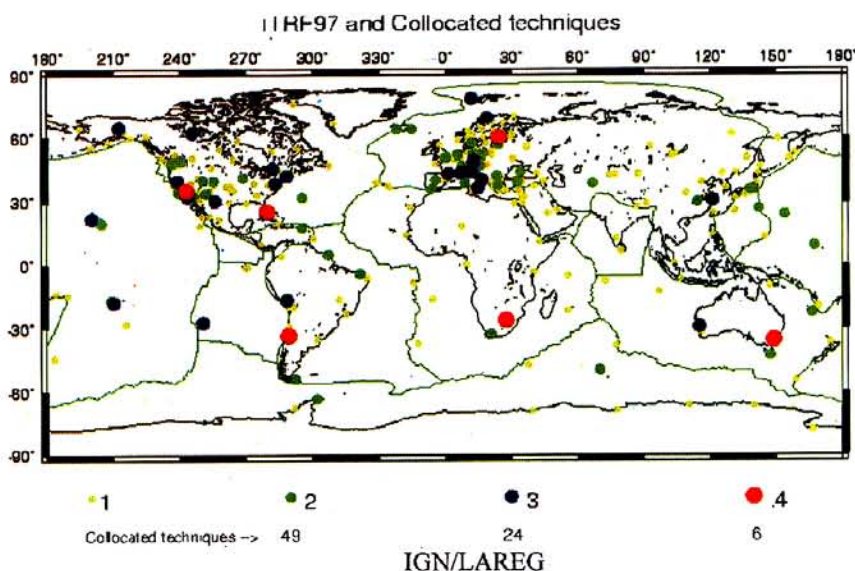


Figure 1: système de référence mondial ITRF97.

Dans ce repère toutes les plaques tectoniques ont un mouvement. Il se pose donc des problèmes de variations de coordonnées pour tout point sur ces plaques. Par exemple en France nous sommes sur la plaque Eurasie dont le déplacement annuel est entre 2 et 3 cm. Pour avoir un système géodésique facilement utilisable en Europe on a décidé de créer un système qui suivrait le mouvement de la plaque Eurasie et qui serait confondu au système ITRF à l'époque 1989,0. Le réseau qui matérialise le système ETRS comporte des points européens du réseau mondial densifiés par GPS.

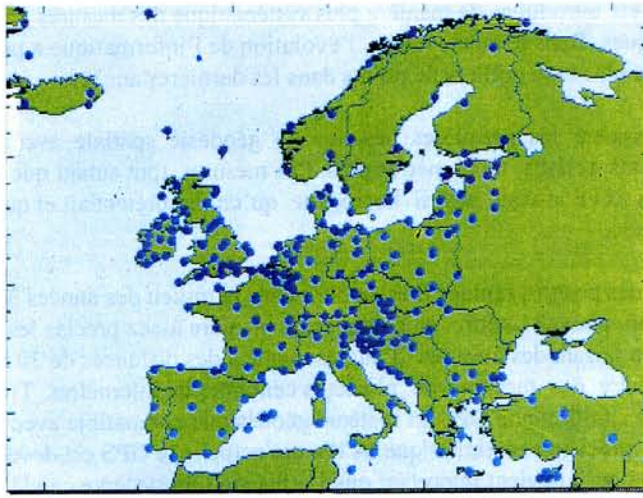


Figure 2: réseau géodésique Européen: ETRS

En France il y a 23 points du réseau européen dont 3 points du réseau mondial. On appelle RRF (Réseau de Référence Français) cette partie du RGF qui est la réalisation du RGF93.

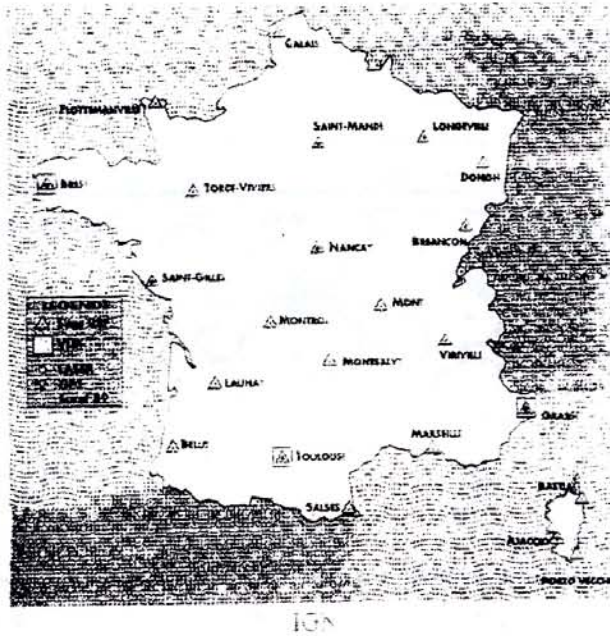
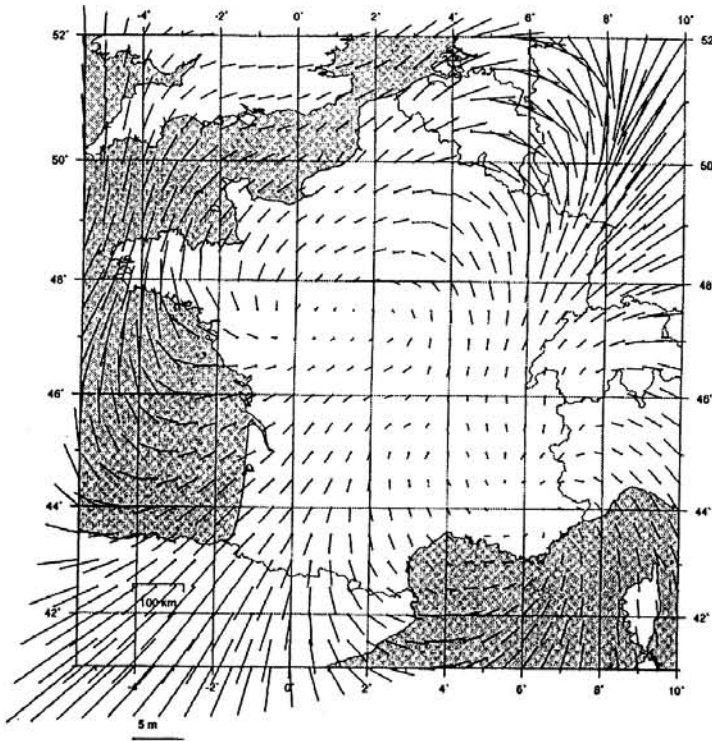


Figure 3: Le Réseau de Référence Français

Une densification du réseau de plus de 1000 points observés en GPS entre 1993 et 1996 constitue le RBF (Réseau de Base Français).

Certains de ces points ont été rattachés au système NTF, ce qui a permis de calculer une transformation générale sur la France entre les deux systèmes géodésiques. La carte ci-dessous montre les résidus de cette transformation et nous permet de visualiser les déformations du système NTF.



IGN

Figure 4: Déformations du système géodésique NTF

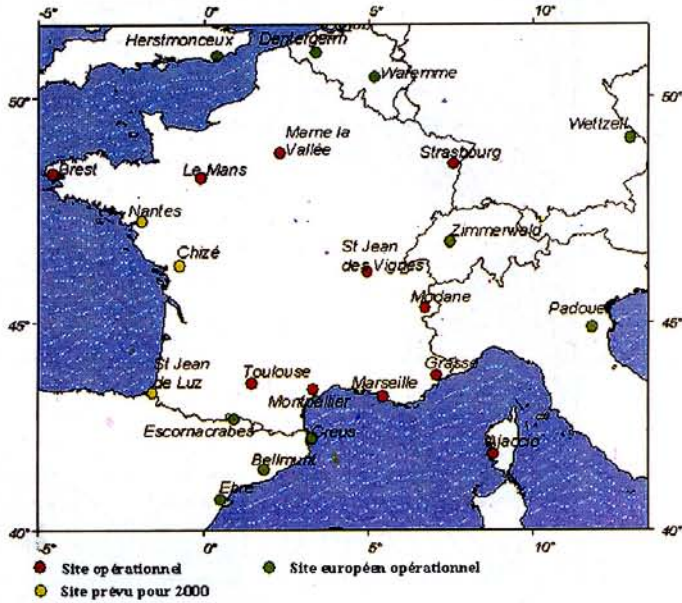
Supposons que l'on observe une base GPS précise entre Marseille et Brest, la distance entre Marseille et Brest présente plusieurs mètres de différence de celle déduite des coordonnées NTF. Par ailleurs, si on rattache précisément le point de Brest à un point RBF proche, que l'on applique la transformation générale sur la France pour calculer des coordonnées NTF et que l'on compare au coordonnées NTF issues de la géodésie classique on trouve un écart de 1,7 mètres en longitude et 3,7 mètres en latitude.

Pour faire des transformations de coordonnées plus précises (quelques centimètres) entre les deux systèmes l'IGN a élaboré une grille de conversion. Avec cette grille toutes les coordonnées des points du réseau NTF ont été transformées en coordonnées RGF93 ce qui définit le Réseau de Détail Français (RDF)

2. Comment rattacher un chantier GPS au réseau RGF et obtenir ainsi des coordonnées RGF93 ?

Le RBF est constitué de plus de 1000 points, et donc quelque soit l'endroit où se trouve un chantier il y a toujours 3 ou 4 points du RBF distants de 10 à 25 km. On peut alors rattacher un point du chantier, en général le pivot, en observant en statique sur chacun des points RBF pendant une à deux heures. Il est souhaitable que ces observations soient faites avec des récepteurs bifréquences, mais cela peut aussi se faire avec des récepteurs monofréquences en augmentant le temps d'observation et en ne dépassant pas 20km. Le calcul se fait avec les logiciels standards vendus avec le matériel et il n'est pas nécessaire d'utiliser des éphémérides précises.

Une autre solution consiste à utiliser les stations GPS permanentes du Réseau Géodésique Permanent (RGP). Actuellement 11 stations observent en permanence et mettent leur observations à disposition sur Internet.



IGN/LAREG
 Fig 5: le réseau géodésique permanent

Ces données sont mises à disposition sur le serveur www.lareg.ensg.ign.fr sous la forme d'un fichier pour 24 heures avec une cadence d'observation de 30 secondes. Certaines stations mettent aussi les données à disposition avec un délai plus court, et une cadence plus élevée, comme la station du Mans, serveur : www.esgt.cnam.fr, qui fournit sur Internet un fichier toutes les heures avec une cadence de 1 seconde. Les fichiers d'observations sont formatés en format RINEX qui est un format standard en GPS, et qui peut être lu par n'importe quel logiciel. En considérant la densité actuelle on voit que les bases de rattachements sont en général de l'ordre de 100 km, et le calcul doit être fait prudemment avec les éphémérides précises de l'IGS⁴ qui peuvent être utilisées avec la plupart des logiciels standards. Le problème est qu'il faut attendre au moins trois jours pour obtenir sur INTERNET les orbites rapides. Des tests récents ont montré que, depuis la fin de la SA⁵, même à des distances de plus de deux cents kilomètres on pouvait obtenir avec des orbites radiodiffusées des positions à 2 ou 3 cm dans le RGF93.

3. La représentation plane LAMBERT 93:

L'ellipsoïde GRS80 a été associé au système géodésique RGF93. La représentation plane choisie de cet ellipsoïde est le Lambert 93 défini de la façon suivante:

C'est une représentation conique conforme sécante. Les parallèles standards (d'altération linéaire nulle) sont les parallèles 44° et 49°. Le point origine est donné en coordonnées géographiques par sa latitude égale à 46°30' et

sa longitude égale à 3° est de Greenwich. Les coordonnées planes de cette origine sont $\begin{bmatrix} X_o = 700000 \text{ m} \\ Y_o = 6600000 \text{ m} \end{bmatrix}$

La France et la Corse sont représentées en une seule zone, ce qui provoque de fortes altérations linéaires au nord de la France et en Corse (environ 3 m/km au sud de la Corse).

4. La grille de conversion de hauteur au dessus de GRS80, dans le RGF93 en altitude IGN69:

Le positionnement GPS détermine la hauteur du point au dessus de l'ellipsoïde. Pour calculer l'altitude (hauteur au dessus du géoïde) il faut connaître la hauteur du géoïde au dessus de l'ellipsoïde. La grille RAF98 (H.DUQUENNE, ESGT), qui a été validée par le groupe de travail permanent "Positionnement Statique et Dynamique" du CNIG permet de convertir des hauteurs au dessus de GRS80 dans le système RGF93 en altitudes dans le système altimétrique IGN69. Cette grille a été fabriquée par adaptation du géoïde gravimétrique QGF98

⁴ IGS: International GPS Service
⁵ SA: Selective Availability n'est plus active depuis le 1/05/2000

(H.DUQUENNE) sur environ 1000 points GPS nivelés. La précision globale sur la France entière est de 2,5 cm, la précision étant meilleure en plaine qu'en montagne. Des tests récents montrent que sur des points proches la précision relative serait de l'ordre de quelques millimètres. L'interpolation dans la grille se fait obligatoirement à partir des coordonnées longitude, latitude et hauteur RGF93/GRS80. Elle permet d'avoir une altitude absolue dans le système altimétrique IGN69 à quelques centimètres sans stationner de repères de nivellement.

5. Calculs des coordonnées planes Lambert I (II,III,IV) dans le système NTF

Contrairement à la transformation en coordonnées Lambert 93 le calcul en Lambert zone ne peut se faire directement, il faut faire un changement de système géodésique entre RGF93 et NTF.

$$(X, Y, Z)_{RGF93} \xrightarrow{T_x, T_y, T_z} (X, Y, Z)_{NTF} \longrightarrow (\lambda, \varphi)_{NTF, \text{Clarke80/IGN}} \xrightarrow{n^\circ \text{ zone}} (E, N)_{\text{lambert}}$$

La grille IGN/ GR3DF97A de conversion RGF93 à NTF permet de calculer les paramètres T_x, T_y, T_z en chaque point avec une précision globale sur la France d'environ 5 cm. On peut remarquer ici que si cette transformation est utile pour assurer une cohérence avec les travaux anciens, elle ne peut être conseillé pour des calculs nouveaux puisqu'elle déforme les coordonnées issues du GPS.

6. Utilisation des coordonnées RGF93 pour des calculs standards:

6.1. Calculs de distance et d'abscisse curviligne:

En utilisant les coordonnées cartésiennes tridimensionnelles $(X, Y, Z)_{RGF93}$ on obtient directement des distances dans l'espace (distance oblique):.

$$D = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}$$

On peut aussi calculer l'abscisse curviligne tridimensionnelle par :

$$s = \sqrt{\sum_1^n ((X_{i+1} - X_i)^2 + (Y_{i+1} - Y_i)^2 + (Z_{i+1} - Z_i)^2)}$$

On rappelle qu'en méthodes traditionnelles (c.a.d. non GPS) D et s sont mesurées directement.

Souvent on a besoin de passer à la distance en représentation plane. Avec les coordonnées RGF93, ceci est très facile il suffit de transformer les coordonnées $(X, Y, Z)_{RGF93}$ en coordonnées géographiques puis planes E(easting), N(northing) et par calcul on obtient la distance ou l'abscisse curviligne sur la représentation plane par:

$$D_p = \sqrt{\Delta E^2 + \Delta N^2}$$

$$s_p = \sqrt{\sum_1^n (E_{i+1} - E_i)^2 + (N_{i+1} - N_i)^2}$$

On remarque que par cette méthode on a directement le tracé de la trajectoire sur la carte.

Par méthode traditionnelle la réduction d'une distance à la représentation plane se fait par géométrie:

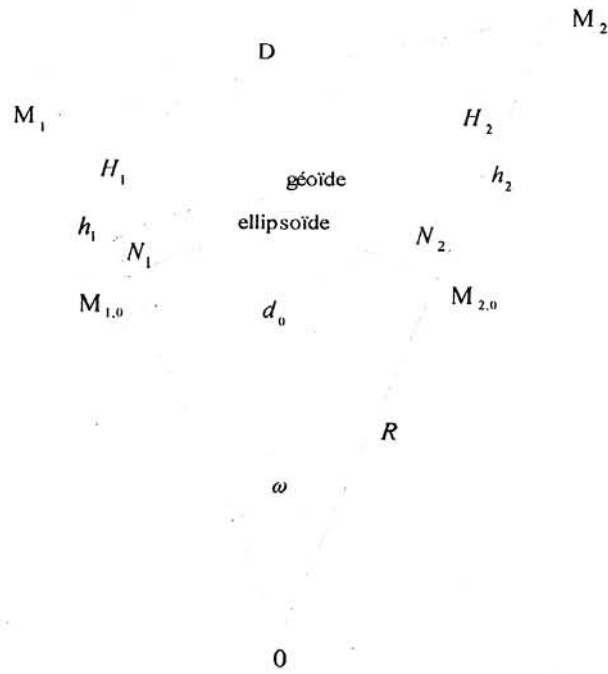


Figure 6: réduction d'une distance à l'ellipsoïde

On passe de la distance oblique D à la distance d_0 selon la corde par:

$$d_0 = D \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{h_2 - h_1}{D}\right)^2}{\left(1 + \frac{h_1}{R}\right)\left(1 + \frac{h_2}{R}\right)}}$$

puis, pour des distances supérieures à 20 km, on passe de la corde à l'arc $\widehat{M_{1,0}M_{2,0}}$ par:

$$d = d_0 \left(1 + \frac{d_0^2}{24R^2}\right)$$

On assimile l'ellipsoïde à une sphère de rayon R . h_1, h_2 sont les hauteurs au dessus de l'ellipsoïde. En méthode classique cette donnée est inconnue et donc on assimile à l'altitude. En système NTF, la hauteur du géoïde étant au plus 20 mètres cela peut donner une erreur de $3 \cdot 10^{-6} D$. Si on faisait la même approximation en RGF93, la hauteur du géoïde au dessus de l'ellipsoïde étant aux alentours de 50 mètres on aurait une erreur de l'ordre de $8.5 \cdot 10^{-6} D$. En fait le problème ne se pose pas puisqu'avec GPS on dispose de la hauteur des points au dessus de l'ellipsoïde.

Réduction de la distance sur l'ellipsoïde à la représentation plane:

Pour faire cette réduction on utilise le module linéaire de la représentation plane: c'est le rapport entre un élément différentiel de distance sur le plan, et l'élément correspondant sur l'ellipsoïde:

$$\mu = \frac{dS}{ds}$$

Pour réduire la distance d , on doit calculer l'intégrale:

$$Dp = \int_{M_1}^{M_2} dS = \int_{m_1}^{m_2} \mu ds$$

Pour une représentation Lambert conforme le module linéaire est une fonction de la latitude dont l'intégration est impossible. Donc on fait des approximations de l'intégrale en fonction de la distance en posant μ constant et égal à:

$$\mu = \mu_1$$

$$\mu = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2}$$

$$\mu = \frac{\mu_1 + \mu_2 + 4\mu_{1/2}}{6}$$

En Lambert93, on est amené à utiliser la troisième formule plus souvent qu'en Lambert zone puisque les déformations linéaires au nord et au sud sont plus grandes:

Prenons un exemple dans le sud de la Corse:

En une station de coordonnées géographiques RGF93/GRS80 : $\left[\begin{array}{l} \lambda_1 = 9^\circ \\ \varphi_1 = 41^\circ 30' \end{array} \right]$ on a mesuré une distance réduite à l'ellipsoïde de 10 000.00 m dans le direction plein nord. On peut calculer sur cette visée une valeur approximative de la latitude du point final, et du point milieu de la visée, soit: $\varphi_2 = 41^\circ 35' 22''$ et $\varphi_{1/2} = 41^\circ 32' 41''$.

Les altérations linéaires correspondantes sont:

$$\varepsilon = \mu - 1$$

$$\varepsilon_1 = 2.772 \text{ m / km}$$

$$\varepsilon_2 = 2,642 \text{ m / km}$$

$$\varepsilon_{1/2} = 2,707 \text{ m / km}$$

Comparaison des distances réduites à la projection:

$$D_p = d + \varepsilon_1 d = 10027,72m$$

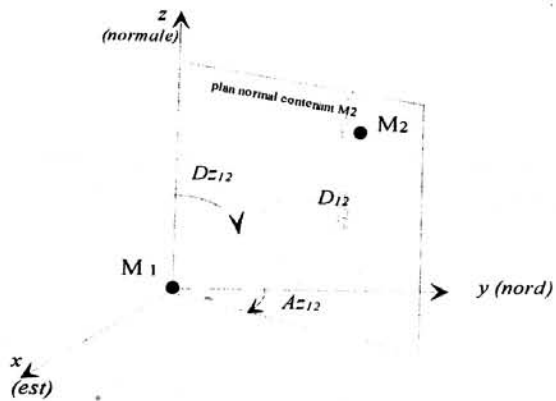
$$D_p = d + \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} d = 10027,07m$$

$$D_p = d + \frac{\varepsilon_1 + 4\varepsilon_{1/2} + \varepsilon_2}{6} d = 10027,07m$$

En conclusion on voit qu'il est plus facile et moins risqué pour transformer une distance spatiale en distance en représentation plane de transformer des coordonnées tridimensionnelles en coordonnées planes.

6.2. Orientation d'une direction:

De nombreuses applications requièrent le calcul d'une orientation par rapport au nord, comme par exemple matérialiser la direction du Nord ou une autre direction par l'implantation d'un repère. Quand on parle d'orientation par rapport au nord, on se place dans le repère local défini comme suit :



M1 est l'origine du repère
 M1z est la normale à l'ellipsoïde
 M1xy : plan parallèle au plan tangent à l'ellipsoïde
 M1y : direction du nord
 Dz : distance zénithale angle vertical entre la normale et la direction M1M2
 Az : azimut : angle horizontal entre la direction du nord et la direction M1M2
 D : distance dans l'espace

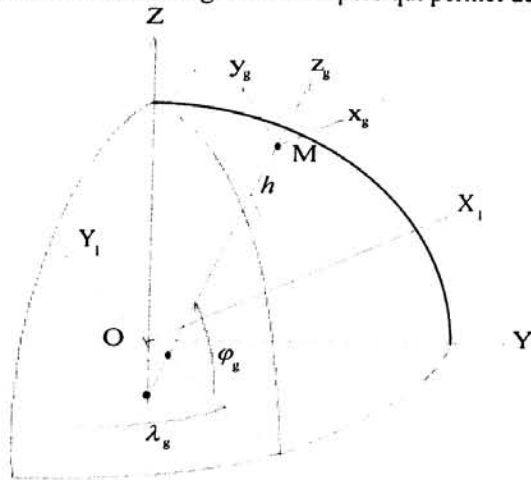
Figure 7: repère local géodésique : RLGM1

L'orientation d'une direction est donnée par l'azimut de cette direction.

On peut écrire les coordonnées tridimensionnelles de M2 dans ce repère de la manière suivante :

$$\begin{aligned}
 x_2 &= D_{12} \sin Dz_{12} \sin Az_{12} \\
 y_2 &= D_{12} \sin Dz_{12} \cos Az_{12} \\
 z_2 &= D_{12} \cos Dz_{12}
 \end{aligned}$$

Voyons maintenant comment passer des coordonnées (X,Y,Z) RGF93 aux coordonnées locales (x,y,z). Pour cela nous effectuons le changement de repère qui permet de passer du repère RGF93 au repère local de M1.



Le résultat GPS est la ligne de base :

$$\overline{M_1 M_2} = \begin{bmatrix} X_2 - X_1 \\ Y_2 - Y_1 \\ Z_2 - Z_1 \end{bmatrix}_{RGF93}$$

Pour écrire ce vecteur dans le repère local on doit faire une rotation autour de OZ de $\lambda_1 + \frac{\pi}{2}$, puis de

$\frac{\pi}{2} - \varphi$ autour de OX1.

λ_1, φ_1 sont respectivement les longitude et latitude RGF93/GRS80

Figure 8: repère géocentrique et repère local

On a donc :

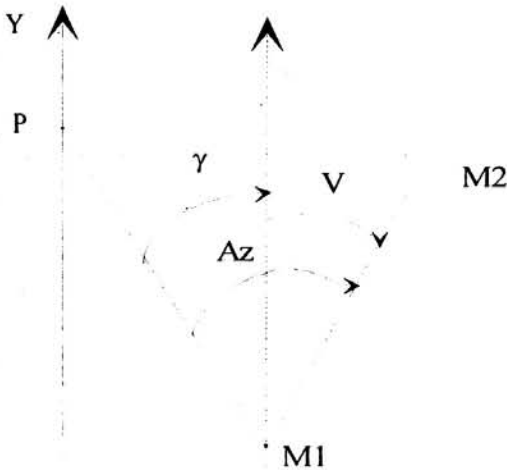
$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix}_{RLGM1} = R_g \begin{bmatrix} X_2 - X_1 \\ Y_2 - Y_1 \\ Z_2 - Z_1 \end{bmatrix}_{RGF93}$$

$$\text{avec } \mathbf{R}_g = \mathbf{R}\left(OX_2 \frac{\pi}{2} - \varphi_1\right) \times \mathbf{R}\left(OZ_2 \lambda_1 + \frac{\pi}{2}\right) = \begin{pmatrix} -\sin\lambda_1 & \cos\lambda_1 & 0 \\ -\sin\varphi_1 \cos\lambda_1 & -\sin\varphi_1 \sin\lambda_1 & \cos\varphi_1 \\ \cos\varphi_1 \cos\lambda_1 & \cos\varphi_1 \sin\lambda_1 & \sin\varphi_1 \end{pmatrix}$$

On calcule alors l'azimut par :

$$\tan Az_{12} = \frac{x_2}{y_2}$$

Par méthode traditionnelle on passe par l'intermédiaire du gisement en Lambert. Comme précédemment à partir des coordonnées RGF93 on calcule les coordonnées Lambert, puis le gisement comme suit:



Comme la représentation plane est conforme l'angle Az (azimut) est conservé et en projection c'est l'angle entre l'image du méridien de M1 et la direction M1 et M2. Approximation la courbe M1M2 est assimilée à une droite (on néglige la correction de courbure de l'image de la géodésique)

$$Az = V + \gamma$$

V est le gisement

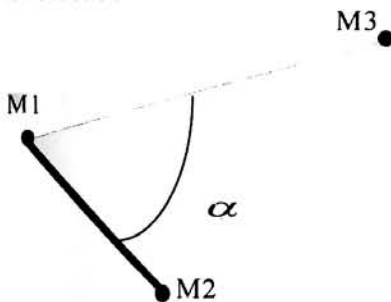
γ est la convergence du méridien, elle dépend des paramètres de la Lambert et de la longitude

figure 9: les angles d'orientation

Ces deux méthodes sont expliquées dans le cadre d'orientation proche (quelques kilomètres), pour des distances plus longues les calculs deviennent plus compliqués et font en particulier intervenir des calculs de géodésiques sur l'ellipsoïde.

6.4. Calcul d'un rattachement:

Il s'agit ici de mélanger des observations GPS et des observations traditionnelles afin d'attribuer des coordonnées RGF93 à un point non observable en GPS situé à quelques centaines de mètres. Ainsi les observations minimales pourront être :



Les coordonnées RGF93 des points M1 et M3, déterminées par GPS.

Avec un théodolite on mesure l'angle α , la distance oblique D12 et la distance zénithale Dz12.

Figure 10: rattachement

L'azimut Az_{13} est déterminé par la méthode vue ci-dessus et on en déduit l' Az_{12} en ajoutant l'angle α .

On calcule les coordonnées (x_2, y_2, z_2) dans le repère local de M1.

Puis on calcule le vecteur $\overrightarrow{M_1 M_2}$ par :

$$\begin{bmatrix} X_2 - X_1 \\ Y_2 - Y_1 \\ Z_2 - Z_1 \end{bmatrix}_{RGF93} = R_g^{-1} \begin{bmatrix} X_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix}_{RLG_{M1}}$$

Il s'agit ici d'un exemple simple de rayonnement, qui se généralise pour faire des calculs de compensations de schéma d'observations plus compliqués. Des logiciels comme GEOLAB permettent de faire ce genre de compensation en tridimensionnel.

Pour calculer en méthode traditionnelle :

On transforme les coordonnées de M1 et M3 en Lambert.

On calcule le gisement M1M3 puis M1M2.

On réduit la distance à la représentation (comme ci-dessus)

Puis on calcule les coordonnées Lambert de M2.

On transforme en coordonnées géographiques, longitude, latitude

On calcule h avec la distance zénithale, la distance et éventuellement la grille de géoïde selon la distance.

7. CONCLUSION :

La sortie imminente de l'arrêté préconisant l'utilisation du nouveau système géodésique RGF93 inquiète certains utilisateurs parce que les habitudes vont changer. Pourtant ce nouveau système va permettre de simplifier certains problèmes et de faciliter l'utilisation du GPS.