

## Les systèmes de référence terrestre et leurs réalisations

### Cas des territoires français

■ Française DUQUENNE

La Terre est un objet en mouvement dans l'espace, dont la forme est complexe et la surface mobile. L'objectif des géodésiens a été de tout temps de définir des "systèmes de référence" permettant d'exprimer des coordonnées. D'abord dans l'antiquité avec Eratosthène et son image de Terre sphérique, sur laquelle on se positionne par astronomie, puis par Picard, Bouguer, Clairault, Newton, Delambre, Méchain, Cassini qui représentent la Terre par un ellipsoïde et ajoutent à l'astronomie la triangulation (mesures d'angles et distances entre points sur Terre) pour déterminer des positions sur Terre. Enfin la géodésie spatiale permet depuis les années 70 de déterminer des coordonnées dans un repère cartésien à trois dimensions.

#### ■ MOTS-CLÉS

Système de référence terrestre, réalisation, ITRS, ETRS89, RGF93, RGF93, RGP, EPN, IGS, GNSS, coordonnées

- des mouvements périodiques comme les marées terrestres (<30 cm), les surcharges océaniques (<10 cm), atmosphériques, etc.

Certains de ces mouvements peuvent être modélisés et les mesures géodésiques jouent un rôle important dans ces modélisations.

La réalisation d'un tel système n'est pas unique et dépend de la façon de définir son origine, son orientation et son échelle.

#### Qu'est-ce qu'un Système de référence terrestre (SRT) ?

C'est un repère affine euclidien tridimensionnel OXYZ défini par :

- O est proche du centre des masses de la Terre
- OZ est proche de l'axe de rotation de la Terre
- le plan XOY, perpendiculaire à OZ est le plan de l'équateur
- le plan XOZ est le plan méridien origine

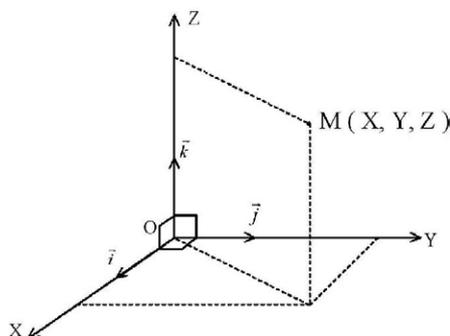


Figure 1. Système de référence terrestre

Cette définition est plus compliquée qu'il n'y paraît pour les raisons suivantes :

- L'axe instantané de rotation de la Terre n'est pas fixe par rapport à la Terre, les pôles se déplacent de plusieurs

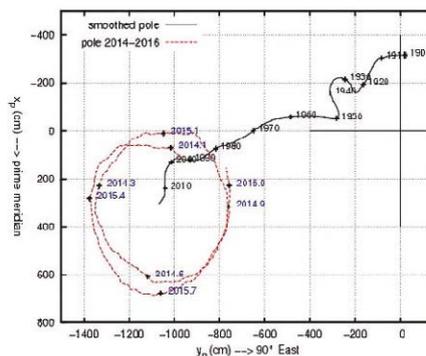


Figure 2. La polhodie (Observatoire de Paris)

mètres par an ; on doit donc choisir un axe des pôles conventionnel.

- Le centre des masses se déplace aussi, du fait en particulier des variations de masses dans l'atmosphère et les océans (phénomène de la mousson, phénomène El Niño, etc.)
- Ce sont des mesures faites sur l'écorce terrestre qui vont permettre de positionner ce repère par rapport à la Terre, or l'écorce terrestre subit divers mouvements :

- des mouvements globaux comme la tectonique des plaques (<10 cm/an) ou le rebond post-glaciaire (qq mm/an),
- des mouvements locaux comme les séismes, glissements de terrains, pompages de nappes phréatiques ou hydrocarbures,

#### Les coordonnées cartésiennes tridimensionnelles géocentriques

Une position dans un tel repère est donnée par un triplet de coordonnées cartésiennes tridimensionnelles géocentriques XYZ à un instant donné complété éventuellement par un modèle de déplacement. L'unité des coordonnées XYZ est une unité linéaire, généralement le mètre.

Ce type de coordonnées est principalement utilisé pour les calculs en géodésie spatiale et particulièrement pour le positionnement GNSS (GPS, GLONASS, GALILEO, BEIDOU...)

#### Les coordonnées géographiques géodésiques

En général, on associe à un SRT un ellipsoïde de révolution et des coordonnées géographiques géodésiques de telle sorte que :

L'ellipsoïde est centré sur l'origine du SRT, son demi-grand axe ( $a$ ) est dans le plan de l'équateur, son demi petit axe ( $b$ ) selon l'axe OZ.



L'ellipsoïde de révolution est entièrement défini par deux paramètres ( $a, b$ ), ( $a, f$ ), ( $a, e$ ), etc. avec :

$$\text{l'aplatissement : } f = \frac{a-b}{a}$$

$$\text{l'excentricité : } e = \left( \frac{a^2 - b^2}{a^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Le méridien du point M est le plan qui contient l'axe OZ et la normale à l'ellipsoïde contenant M.

Il existe de nombreux ellipsoïdes dont les dimensions peuvent diverger de plusieurs centaines de mètres, mais les plus répandus actuellement sont le GRS80 et le WGS 84 dont les dimensions sont identiques à mieux que le millimètre.

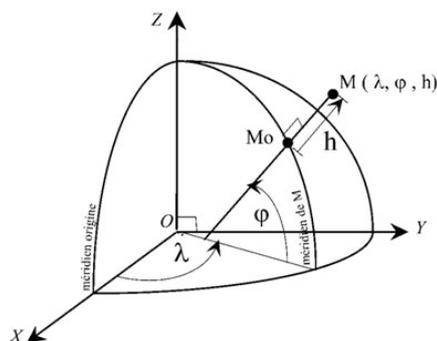


Figure 3. Les coordonnées géographiques géodésiques

Les coordonnées géographiques géodésiques :

$\lambda$  : la longitude est l'angle entre le plan méridien origine (XOZ) et le plan méridien du point.

$\varphi$  : la latitude est l'angle entre la normale à l'ellipsoïde et le plan de l'équateur (XOY).

$h$  : la hauteur au-dessus de l'ellipsoïde est la distance entre M et l'ellipsoïde comptée sur la normale.

La longitude et la latitude sont des angles et diverses unités angulaires sont utilisées (radians, degrés décimaux, degrés sexagésimaux, heures, grades, etc.). L'unité pour  $h$  est une unité linéaire en général le mètre.

La relation entre les coordonnées cartésiennes et les coordonnées géographiques est :

$$X = (v + h) \cos \varphi \cos \lambda$$

$$Y = (v + h) \cos \varphi \sin \lambda$$

$$Z = (v(1 - e^2) + h) \sin \varphi$$

$$v = \frac{a}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{\frac{1}{2}}}$$

Ces coordonnées sont couramment utilisées pour le positionnement, mais aussi pour la cartographie où elles sont transformées en coordonnées planes par une représentation plane de l'ellipsoïde.

## Réalisation d'un SRT ou repère de référence terrestre (RRT)

Un SRT est défini par un ensemble d'informations (hypothèses, modèles, constantes, algorithmes) qui permettent de faire une réalisation numérique à partir de mesures.

La réalisation d'un SRT s'opère par des mesures à la surface de la terre, des traitements qui permettront d'attribuer des coordonnées à des points géodésiques matérialisés au sol, ou à un point particulier d'instrument pour des stations permanentes (ex. : ARP : *Antenna Reference Point*).

Selon les méthodes d'observations employées, leurs précisions, la répartition des points et les modèles physiques introduits dans les traitements on obtiendra des coordonnées différentes, donc des réalisations différentes et par conséquent une position différente du repère cartésien par rapport à la Terre. Avant l'ère spatiale les techniques utilisées étaient l'astronomie de position qui seule permettait une position absolue sur Terre et des mesures d'angles et de distances entre des points proches à la surface de la Terre (triangulation, polygonation, cheminements, etc.). Ces techniques ont permis de placer le centre du repère à des distances de plusieurs centaines de mètres du centre des masses et ils sont dits quasi-géocentriques. Les systèmes de références étaient définis au niveau d'un pays ou d'un continent car les mesures ne permettaient pas de traverser les océans. Les coordonnées obtenues sont bidimensionnelles en général longitude, latitude, et les ellipsoïdes utilisés sont nombreux, de dimensions qui diffèrent de la centaine de mètres, définis pour s'adapter au mieux à la zone terrestre d'application.

Les mesures de géodésie spatiale se font entre des points à la surface de la Terre et un objet dans l'espace (satellites, lune, quasar...). Ce sont des

mesures sur des ondes électromagnétiques, mesure de temps, de délai, de phase, de Doppler, etc.

Les traitements permettent d'attribuer des coordonnées tridimensionnelles XYZ et l'origine du repère est très proche du centre des masses de la terre (de quelques cm à quelques mm).

Le RRT peut s'appliquer à la Terre entière et l'ellipsoïde est global.

C'est en utilisant les coordonnées de ces points géodésiques dans le RRT que l'utilisateur peut lui-même se positionner, soit en allant stationner ces points, soit en utilisant des stations GNSS permanentes. En se positionnant par GNSS, il peut aussi se positionner via les éphémérides des satellites GNSS dans le RRT dans lequel sont exprimées ces éphémérides.

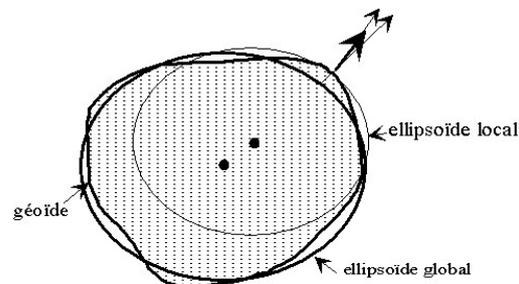


Figure 4. Placement de l'ellipsoïde dans les réalisations pre- et post-géodésie spatiale [9]

**Remarque** : les appellations "Système géodésique" ou "Datum" sont fréquemment utilisées sans différencier le SRT du RRT.

### ■ Changement de RRT

Pour amener le repère RRT1 en coïncidence avec le repère RRT2 il faut effectuer une similitude dans l'espace, c'est-à-dire :

- une translation de l'origine
- une homothétie  $K$  car l'échelle du SRT dépend de la reproduction du mètre par les techniques de mesures

$$K = \frac{\|\vec{r}_2\|}{\|\vec{r}_1\|} = 1 + D \text{ avec } |D| \cong 10^{-6}$$

- une rotation dans l'espace composée de trois rotations autour des axes  $\mathcal{E}_X, \mathcal{E}_Y, \mathcal{E}_Z$  petits angles de rotation ( $< 10^{-5}$  radians).

On calcule les coordonnées d'un point dans le  $RRT_2$  à partir de ses coordonnées dans  $RRT_1$  par (1)





$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{RR2} = \begin{pmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{pmatrix} + KR_{XYZ} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{RR1} \quad (1)$$

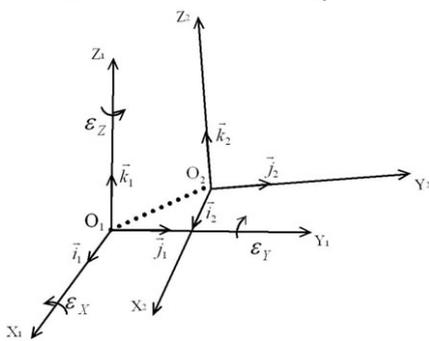


Figure 5. Changement de RRT

$R_{XYZ}$  : matrice de rotation dans l'espace, produit de trois rotations autour des axes  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$

$$R_{XYZ} = R_{OZ} \times R_{OY} \times R_{OX}$$

$$R_{OZ} = \begin{pmatrix} \cos \varepsilon_Z & \sin \varepsilon_Z & 0 \\ -\sin \varepsilon_Z & \cos \varepsilon_Z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$R_{OY} = \begin{pmatrix} \cos \varepsilon_Y & 0 & -\sin \varepsilon_Y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varepsilon_Y & 0 & \cos \varepsilon_Y \end{pmatrix}$$

$$R_{OX} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varepsilon_X & \sin \varepsilon_X \\ 0 & -\sin \varepsilon_X & \cos \varepsilon_X \end{pmatrix}$$

Les angles  $\varepsilon$  sont petits et en développant au premier ordre

$$\cos \varepsilon = 1 + o^2$$

$$\sin \varepsilon = \varepsilon + o^3$$

En négligeant les termes du second ordre la matrice  $R_{XYZ}$  devient alors :

$$R_{XYZ} = \begin{pmatrix} 1 & \varepsilon_Z & 0 \\ -\varepsilon_Z & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\varepsilon_Y \\ 0 & 1 & 0 \\ \varepsilon_Y & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \varepsilon_X \\ 0 & \varepsilon_X & 1 \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} 1 & \varepsilon_Z & -\varepsilon_Y \\ -\varepsilon_Z & 1 & \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y & -\varepsilon_X & 1 \end{pmatrix} + o^2$$

En reportant dans (1) et développant au premier ordre en négligeant les termes  $\varepsilon_i D$  (de l'ordre de  $10^{-11}$ ) on obtient :

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{RR2} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{RR1} + \begin{pmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{pmatrix} + D \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{RR1} \\ + \begin{pmatrix} 0 & \varepsilon_Z & -\varepsilon_Y \\ -\varepsilon_Z & 0 & \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y & -\varepsilon_X & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{RR1} + o^2 \quad (2)$$

**Remarque** : il arrive que dans le cas de traitement de systèmes de référence anciens, les paramètres de rotation et d'échelle étant importants, cette relation ne soit suffisante et qu'un développement à l'ordre supérieur soit nécessaire (cas pour l'île de la Réunion).

En géodésie on a plutôt l'habitude d'utiliser les rotations dans l'autre sens  $R_i = -\varepsilon_i$ , il faut toujours vérifier dans les logiciels quelle convention de signe est utilisée. Dans la suite on utilisera les notations suivantes :

$$X_{RR1} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{RR1}$$

$$T = \begin{pmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{pmatrix}$$

$$R = R_{XYZ} - I \\ = \begin{pmatrix} 0 & -R_Z & R_Y \\ R_Z & 0 & -R_X \\ -R_Y & R_X & 0 \end{pmatrix}$$

L'équation de changement de coordonnées s'écrit alors :

$$X_{RR2} = X_{RR1} + T + DX_{RR1} + RX_{RR1} \quad (3)$$

## L'ITRS (International Terrestrial Reference System)

L'ITRS est système de référence international de référence terrestre recommandé par l'IERS (*International Earth Rotation Service*).

Il est défini comme suit :

- son origine est le centre des masses de la Terre incluant atmosphère et océans,
- son orientation conventionnelle est celle définie par celle du repère du Bureau international de l'heure (BTS84) et une évolution temporelle guidée par une condition de non-rotation de la croûte terrestre,
- son échelle est définie par le mètre SI.

Il existe plusieurs réalisations de l'ITRS et nous évoquerons dans la suite surtout celles de l'IERS, recommandées par l'UGGI (Union géodésique et géophysique Internationale) et l'ONU (GGIM).

## ITRF (International Terrestrial Reference Frame)

Les ITRF sont les réalisations de l'ITRS. Les différentes réalisations ITRF sont basées sur un réseau de stations d'observations de différentes techniques spatiales de géodésie.

Les différentes techniques spatiales permettent de générer des jeux de coordonnées dans des systèmes terrestres proches et on réalise le système de référence terrestre en combinant ces jeux de coordonnées.

Les techniques spatiales qui sont utilisées pour ces réalisations sont :

### La VLBI : Very Long Base Interferometry

Le principe de mesure est la détermination de la différence des temps d'arrivée à deux radiotélescopes éloignés du front d'onde d'un signal aléatoire provenant d'une même source extragalactique (quasar).

$$B \cdot S = C \tau$$

$$B = \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix}$$

$S$  : vecteur coordonnées du quasar, exprimé dans le système terrestre

$C$  : vitesse de la lumière

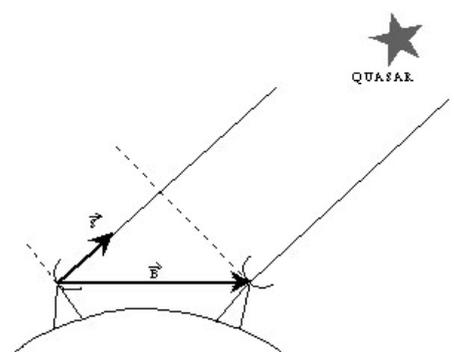


Figure 6. Principe du VLBI et Antenne de WETZELL

### La télémétrie laser sur satellites ou sur la Lune

Mesure de distance par tir laser sur la Lune ou sur satellite en mesurant le temps aller et retour.

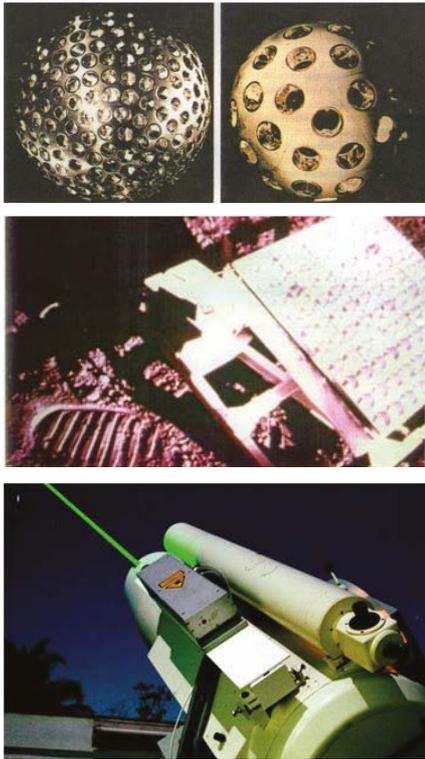


Figure 7. Satellites Lageos et Stella, réflecteur sur la lune, tir au Laser

### ■ Les GNSS (Global Navigation Satellite System)

Mesure de distance entre un récepteur au sol et un émetteur dans le satellite par différence de phase entre l'émission et la réception du signal.

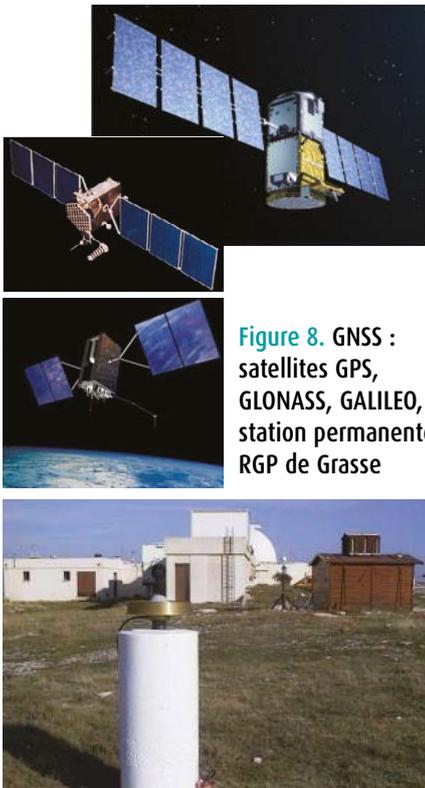


Figure 8. GNSS : satellites GPS, GLONASS, GALILEO, station permanente RGP de Grasse

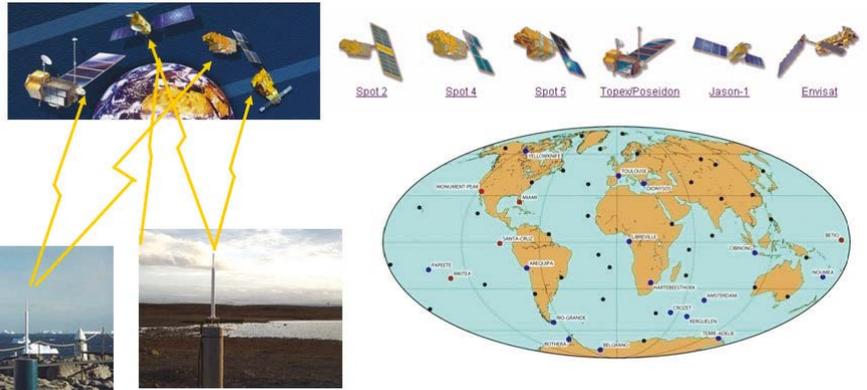


Figure 9. Balises, réseau DORIS

### ■ DORIS : Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégrés sur Satellite)

Des balises au sol émettent des signaux, des mesures Doppler sont faites par des récepteurs embarqués dans différents satellites.

Les réalisations ITRF du système terrestre ITRS sont basées sur un réseau de stations, pour lesquelles on dispose de jeux de coordonnées issues de traitements d'observations sur plusieurs années avec les techniques vues précédemment. Sur certains sites plusieurs techniques sont utilisées, on dit qu'il y a colocalisation, et les différents instruments de mesures sont rattachés les uns aux autres par métrologie. La combinaison de ces jeux de coordonnées permet d'obtenir un jeu de coordonnées qui constitue la réalisation.

La combinaison tient compte du fait que les différentes techniques sont plus ou moins efficaces pour déterminer les paramètres, par exemple le SLR est

plus efficace pour déterminer le centre des masses, le VLBI pour l'échelle. Les stratégies choisies pour chaque réalisation sont précisées sur [http://itrf.ign.fr/ITRF\\_solutions/](http://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/).

En 2017, 13 réalisations sont déjà publiées : ITRF88, ITRF89, ITRF90, ITRF91, ITRF92, ITRF93, ITRF96, ITRF97, ITRF2000, ITRF2005, ITRF2008, ITRF2014. L'année qui figure dans le nom de la réalisation signifie que toutes les observations jusqu'à l'année précisée ont été prises en compte dans les calculs. Les réalisations sont de plus en plus précises, car elles intègrent de plus en plus de stations, le nombre d'observations augmente et les traitements sont de plus en plus performants. Elles ne diffèrent entre elles que de quelques centimètres et les plus récentes que de quelques millimètres.

Du fait la tectonique des plaques, tout point de l'écorce terrestre et donc les points du réseau sont en mouvement

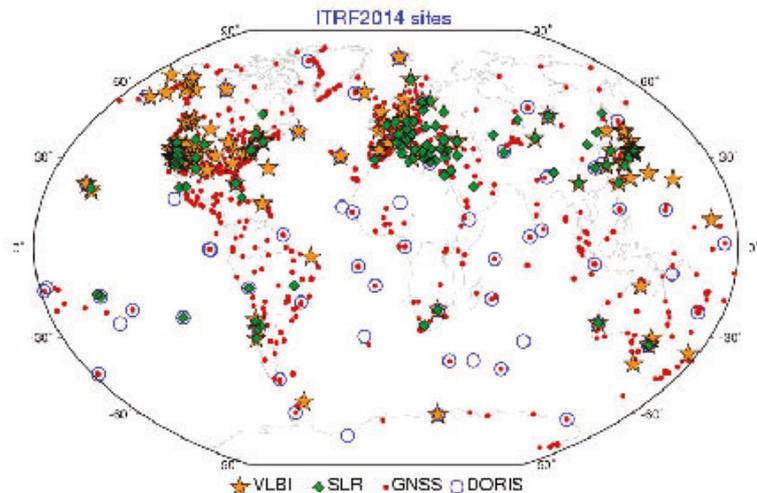


Figure 10. Réseau de l'ITRF2014 ([1]Z.Altamimi)

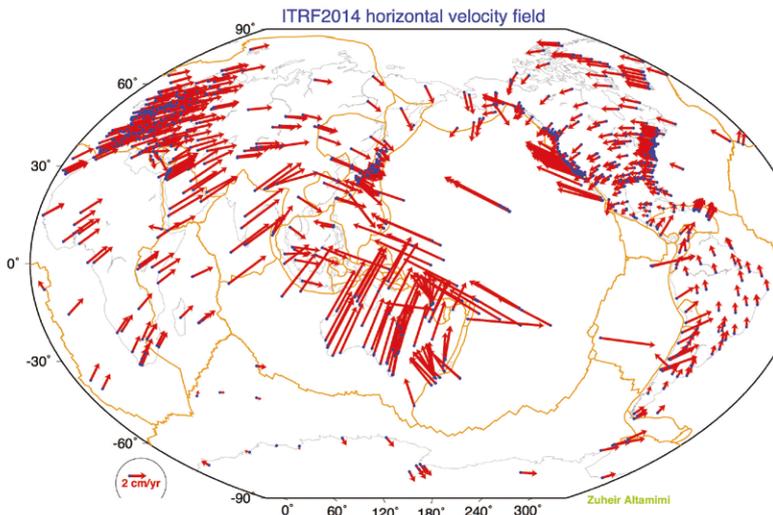


Figure 11. Les vitesses des stations dans l'ITRF2014 ([1] ALTAMIMI Z.)

dans l'ITRF. Quand on donne les coordonnées d'un point dans un ITRF il faut donc toujours préciser la date, c'est ce qu'on appelle l'époque, qui s'exprime par l'année et le jour comme la partie décimale de l'année : 2017.06 pour le 20 janvier 2017. On dira par exemple qu'un jeu de coordonnées est exprimé dans l'ITRF2014, époque 2017.06.

Pour chaque réalisation, les coordonnées et les vitesses des sites sont publiées dans un format texte (SSC) et pour une exploitation scientifique.

On peut ainsi calculer les coordonnées d'un site ITRF à n'importe quelle époque. On remarque dans le *tableau 1* que la variation des coordonnées est de quelques centimètres par an.

Dans le *tableau 1* les vitesses des stations sont constantes, mais à partir de ITRF2014 pour les stations de référence ayant des discontinuités de position liées à des tremblements de terre le déplacement linéaire est complété par des corrections de "post seismic deformation" qui sont fournis

ITRF2014 station positions AT EPOCH 2010.0 and velocities GNSS stations					
DOMES NB.	SITE NAME	TECH. ID.	X/Vx	Y/Vy	Z/Vz
-----m/m/y-----					
10001S006	Paris	GNSS OPMT	4202777.3053	171368.0862	4778660.2517
10001S006			-.01305	0.01758	0.01031
10002M006	Grasse (OCA)	GNSS GRAS	4581690.8306	556114.9301	4389360.8511
10002M006			-.01377	0.01887	0.01142

Tableau 1. Extrait de [http://itrf.ign.fr/ITRF\\_solutions/2014/doc/ITRF2014\\_GNSS.SSC.txt](http://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/2014/doc/ITRF2014_GNSS.SSC.txt)

Transformation parameters from ITRF2014 to past ITRFs.								
SOLUTION	Tx	Ty	Tz	D	Rx	Ry	Rz	EPOCH
UNITS----->	mm	mm	mm	ppb	.001"	.001"	.001"	
RATES	Tx	Ty	Tz	D	Rx	Ry	Rz	
UNITS---->	mm/y	mm/y	mm/y	ppb/	.001"/y	.001"/y	.001"/y	
ITRF2008	1.6	1.9	2.4	-0.02	0.00	0.00	0.00	2010.0
rates	0.0	0.0	-0.1	0.03	0.00	0.00	0.00	
ITRF2005	2.6	1.0	-2.3	0.92	0.00	0.00	0.00	2010.0
rates	0.3	0.0	-0.1	0.03	0.00	0.00	0.00	
ITRF2000	0.7	1.2	-26.1	2.12	0.00	0.00	0.00	2010.0
rates	0.1	0.1	-1.9	0.11	0.00	0.00	0.00	

Tableau 2. Extrait de [http://itrf.ign.fr/doc\\_ITRF/Transfo-ITRF2014\\_ITRFs.txt](http://itrf.ign.fr/doc_ITRF/Transfo-ITRF2014_ITRFs.txt)

sur : [http://itrf.ign.fr/ITRF\\_solutions/2014/doc/ITRF2014-soln-gnss.snx](http://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/2014/doc/ITRF2014-soln-gnss.snx) .

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{X}(t_0) + \dot{\mathbf{X}}(t - t_0) + \mathbf{X}_{PSD}(t)$$

On voit dans le *tableau 2* que les paramètres de transformation d'un ITRF vers tous les autres sont fournis à une époque donnée ainsi que leurs variations dans le temps.

Pour changer de réalisation il faut tenir compte de la dépendance au temps des paramètres de transformations et écrire la différentielle de l'équation (3) par rapport au temps.

$$\dot{\mathbf{X}}_{RRT_2} = \dot{\mathbf{X}}_{RRT_1} + \dot{\mathbf{T}} + \dot{D}\mathbf{X}_{RRT_1} + D\dot{\mathbf{X}}_{RRT_1} + \dot{\mathbf{R}}\mathbf{X}_{RRT_1} + \mathbf{R}\dot{\mathbf{X}}_{RRT_1}$$

$\dot{\mathbf{T}}, \dot{D}, \dot{\mathbf{R}}$  variations dans le temps des paramètres  $\mathbf{T}, D, \mathbf{R}$

$$\dot{\mathbf{X}} = \begin{pmatrix} \dot{V}_x \\ \dot{V}_y \\ \dot{V}_z \end{pmatrix}$$

$$\|\dot{\mathbf{X}}\| < 10 \text{ cm/an}$$

Donc les termes  $D\dot{\mathbf{X}}$  et  $\mathbf{R}\dot{\mathbf{X}}$  sont négligeables

L'équation se réduit alors à :

$$\dot{\mathbf{X}}_{RRT_2} = \dot{\mathbf{X}}_{RRT_1} + \dot{\mathbf{T}} + \dot{D}\mathbf{X}_{RRT_1} + \dot{\mathbf{R}}\mathbf{X}_{RRT_1} \quad (4)$$

Dans les *tableaux 1 et 2* les coordonnées des stations et les paramètres de transformation dans l'ITRF2014 sont données à l'époque  $t_0$ . On calcule donc leurs valeurs à l'instant  $t$  par :

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{X}(t_0) + \dot{\mathbf{X}}(t - t_0)$$

et pour chaque paramètre P de la transformation

$$\mathbf{P}(t) = \mathbf{P}(t_0) + \dot{\mathbf{P}}(t - t_0)$$

À chaque réalisation ITRF correspond un modèle de déplacements horizontaux des plaques tectoniques et on peut calculer la vitesse d'un point sur une plaque :

$$\dot{\mathbf{X}} = \boldsymbol{\Omega}_p \wedge \mathbf{X} + \dot{\mathbf{T}}$$

$$\boldsymbol{\Omega}_p = \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix}$$

$\boldsymbol{\Omega}_p$  : vecteur vitesse de rotation de la plaque, dont la direction est l'axe des pôles de rotation de la plaque, passant par le centre de la Terre et le module la vitesse angulaire.

$\dot{\mathbf{T}}$  : biais d'origine (ORB)

Pour la réalisation 2014 le modèle est publié dans [2] (<https://doi.org/10.1093/gji/ggx136>).

Évidemment ce modèle ne tient pas compte de la vitesse du point sur la plaque. Il n'y a pas de modèle de déplacements verticaux.

## Comment obtenir des coordonnées dans ITRF par les techniques GNSS

### ■ Positionnement absolu en temps réel

Ce positionnement est le mode naturel du système GPS utilisé pour la navigation. Le repère dans lequel le point est positionné est le WGS84, dont les éphémérides sont radiodiffusées en temps réel par les signaux des satellites GPS. Il existe plusieurs réalisations du WGS84 (G730, G873, G1150...) et les plus récentes sont à quelques centimètres de l'ITRF. Il n'existe pas de transformation entre les WGS84 et les ITRF.

Ce type de positionnement étant peu précis ( $\sigma > 1$  mètre) on peut considérer que le point est positionné dans n'importe quel ITRF à l'époque des observations.

En outre on peut remarquer que lorsqu'une position est donnée en WGS84 on précise rarement la réalisation et l'époque.

### ■ Positionnement ponctuel précis (PPP)

Ce positionnement précis est basé sur les mesures de codes et de phases. En post-traitement les éphémérides utilisées et corrections d'horloge sont précises comme par exemple celles de l'*International GNSS Service* (IGS) (éphémérides ultra-rapides, rapides ou finales qui sont les plus précises). Les éphémérides précises sont exprimées dans la réalisation ITRF la plus récente. La position obtenue est de précision centimétrique et est exprimée alors dans cette réalisation à l'époque des observations. Certains logiciels de calculs en PPP, qu'ils soient ou pas en ligne, intègrent un module de calcul qui permet de changer de réalisation ITRF et d'époque.

Le PPP temps réel, utilise des corrections d'horloges et d'orbites diffusées en temps réel par différents services (IGS, EPN, STARFIX, PPP-WIZARD...). Ces corrections sont prédites donc moins précises, et données dans un système de référence terrestre qui n'est pas toujours clairement précisé, cependant en général il s'agit de la réalisation ITRF la plus récente. (voir BOSSER R.[5])



Figure 12. Réseau de l'IGS

### ■ Positionnement différentiel à l'aide des stations permanentes GNSS de l'IGS

Il s'agit d'enregistrer des observations précises par mesures de phases dont la durée dépend de la distance aux stations IGS (International GNSS service) les plus proches. Les coordonnées de ces stations sont données dans les fichiers SINEX, sous la forme coordonnées et vitesses à l'époque  $t_0$ .

Le réseau IGS comprend plus de stations que celles retenues pour l'ITRF et les coordonnées et vitesses de ces stations GNSS sont calculées et publiées en continu sur le site de l'IGS, ce sont les solutions cumulées de l'IGS alignées sur l'IGS14. L'IGS14 est extrait de l'ITRF2014 restreint aux stations GNSS et corrigé des centres de phase.

Pour un calcul précis les coordonnées des stations IGS sont calculées à l'instant des observations et les éphémérides précises de l'IGS sont utilisées.

La position obtenue peut être millimétrique selon les modes d'observations et de calculs (cf [4]) et est exprimée dans le même ITRF que les coordonnées des stations permanentes à l'époque des observations. Certains logiciels de calculs proposent de ramener dans l'ITRF et à l'époque souhaitée car ils utilisent le modèle de mouvement des plaques, compatible avec l'ITRF.

## Les réalisations régionales

Ces réalisations régionales sont basées sur l'ITRF, mais définies de

telle sorte que l'on obtienne des coordonnées qui ne varient quasiment pas dans le temps. Elles suivent la plaque tectonique dans son mouvement.

## L'ETRS89

Ce système de référence terrestre européen a été défini par le groupe EUREF (*European Reference frame*) de l'*International Association of Geodesy*. Par définition l'ETRS89 coïncide avec l'ITRS à l'époque 1989,0 et il suit la plaque tectonique Eurasie dans son mouvement.

Le réseau GNSS permanent EPN est une densification du réseau IGS sur l'Europe.

Il existe plusieurs réalisations ETRF, correspondant aux différentes réalisations de l'ITRF. L'ETRF2000 est actuellement la plus utilisée.



Figure 13. Réseau GNSS permanent EPN (Euref Permanent Network)

CLASS\_A EPN STATION POSITIONS AND VELOCITIES  
 REFERENCE FRAME: ETRF2000 AT EPOCH OF 2010.0  
 CUMULATIVE SOLUTION OF GPSWEEKS [ 0834 - 1950 ]  
 RELEASE NAME: EPN\_A\_ETRF2000\_C1950  
 RELEASED ON 19/12/2017 BY EPN REFERENCE FRAME COORDINATOR  
 (Juliette LEGRAND, ROB, BELGIUM)

DOMES NB.	SITE NAME	TECH. ID.	X/Vx	Y/Vy	Z/Vz.
CLASS		-----m/m/Y--			
10002M006	GRAS	GPS GRAS	4581691.159	556114.578	4389360.563
10002M006		-.0005	-.0002	-.0005	

**Tableau 3.** Coordonnées et vitesses de stations du réseau permanent EPN (Euref Permanent Network) dans la réalisation ETRF2000 de l'ETRS89 [ftp://epncb.oma.be/epncb/station/coord/EPN/EPN\\_A\\_ETRF2000.SSC](ftp://epncb.oma.be/epncb/station/coord/EPN/EPN_A_ETRF2000.SSC) (extrait) [http://www.epncb.oma.be/\\_networkdata/stationlist.php](http://www.epncb.oma.be/_networkdata/stationlist.php)



Dans le *tableau 3* on voit que les vitesses des stations dans ETRF2000 sont inférieures à 1 mm/an et que les coordonnées ETRF2000(R14) diffèrent à l'époque 2010 de celles de l'ITRF2014 à la même époque de plusieurs dizaines de centimètres.

Un outil en ligne de transformation entre ITRF et ETRF est disponible sur le site WEB de l'EPN: [http://www.epncb.oma.be/\\_productsservices/coord\\_trans/](http://www.epncb.oma.be/_productsservices/coord_trans/). En limite de la plaque Eurasie, dans des zones actives géophysiquement, ou dans le nord de l'Europe avec le rebond post-glaciaire, les vitesses de points ne sont plus négligeables.

## Le RGF93

Le RGF93 est la réalisation de l'ETRS89 sur la France continentale et la Corse. La première réalisation du RGF93 a été faite par campagne d'observations GPS sur plus de mille points géodésiques matérialisés (RBF : réseau de base français). Les 23 points du RRF (réseau de référence français) ont servi à la réalisation de l'ETRS89.

En 1998 les premières stations du réseau permanent RGP ont commencé à être installées. Elles ont alors été rattachées aux points du RBF pour leur attribuer des coordonnées RGF93 nouvelles. En 2009, un recalcul de toutes les observations du RGP a été mené, dans le cadre du recalcul de l'ETRF. Les coordonnées ETRF2000, époque 2009,0, ont été attribuées aux stations RGP et les coordonnées du RBF ont été recalculées dans le RGF93

([12]Harmel.A.(2010)). Les points du RBF ont été réobservés plusieurs fois depuis. La vitesse des points dans le RGF93 est nulle.

Il y a plusieurs possibilités pour l'utilisateur d'accéder au RGF93 :

– en utilisant le réseau GNSS permanent :

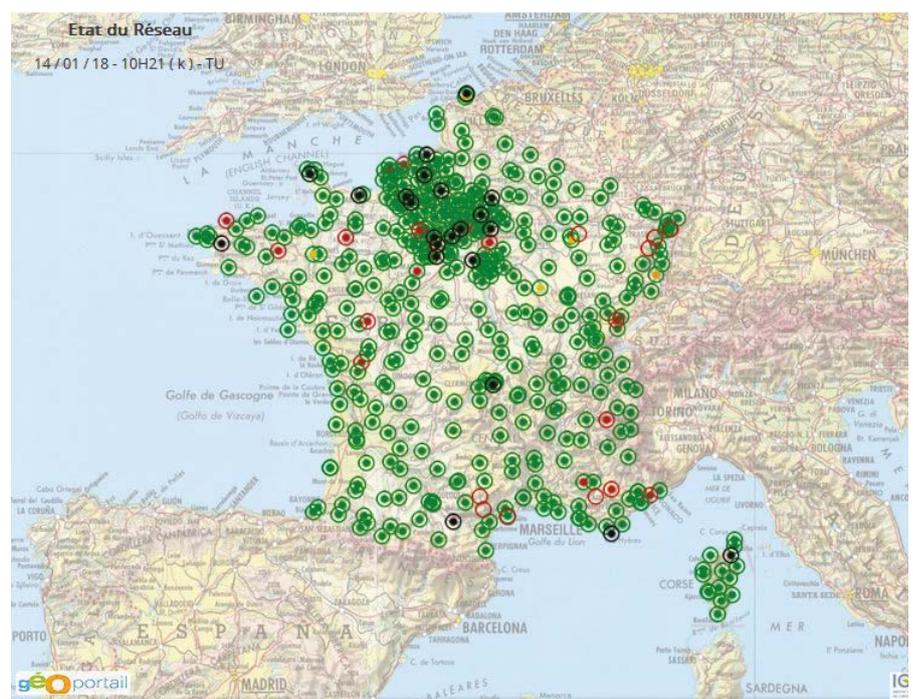
le réseau RGP contient actuellement plus de 400 stations permanentes. Les coordonnées des stations en RGF93 figurent dans les fichiers d'observation RINEX, ce qui permet d'avoir directement dans le calcul de lignes de bases les coordonnées RGF93 du point.

Ce rattachement à la référence nationale peut être millimétrique, à condition que les méthodes d'observations et de calculs GNSS soient appropriées (voir [4]).

- En utilisant certains réseaux GNSS permanents temps réel comme par exemple le réseau TERIA, l'utilisateur obtient des coordonnées directement dans le RGF93 avec une précision centimétrique.
- En stationnant les points du RBF, l'utilisateur peut accéder au RGF93 avec une précision centimétrique.
- Par positionnement PPP en temps réel ou différé avec une précision qui dépend de la précision du calcul PPP mais aussi de la transformation utilisée entre l'ITRF et le RGF93.

## Les réalisations outremer

Des réalisations équivalentes au RGF ont été faites par campagnes de mesures GNSS sur un réseau de points géodésiques matérialisés et rattachés aux stations de l'IGS les plus proches. Chacune de ces réalisations a été fixée à une réalisation ITRF à une époque donnée proche des observations. Il n'y a pas actuellement de réalisations par observations de réseau permanent car les stations permanentes sur ces territoires ne sont pas encore assez



**Figure 14.** Réseau GNSS permanent RGP (<http://rgp.ign.fr/>)



nombreuses. On peut le regretter car contrairement à la France Métropolitaine, ces territoires ont une tectonique régionale souvent mal connue.

Exemple : pour les Antilles la réalisation RGAF09 est issue d'une campagne d'observation GPS sur un réseau de points géodésiques matérialisés, rattachés à l'IGS avec des stations proches. Les coordonnées ont été fixées à celles de l'IGS05 (l'ITRF2005), époque 2009,0. Le détail de chaque réalisation en outremer est disponible sur <http://geodesie.ign.fr/index.php?p=61&page=documentation>

Ces réalisations sont accessibles grâce à quelques stations permanentes et aussi par les réseaux de points géodésiques matérialisés.

Un calcul GNSS en ligne sur le site de l'IGN ([http://rgp.ign.fr/SERVICES/calcul\\_online.php](http://rgp.ign.fr/SERVICES/calcul_online.php)) permet de faire les calculs précis dans tous ces territoires [15].

Pour une détermination PPP, comme les coordonnées obtenues sont en ITRF à l'époque des observations pour obtenir des coordonnées dans le système national légal il faut pratiquer un changement de TRF en tenant compte du mouvement de la plaque tectonique.

Une version en ligne du logiciel CIRCE V5 de l'IGN permettra bientôt de faire des changements de réalisations et d'époques pour obtenir des coordonnées dans les références nationales Françaises (voir [13]).

Dans l'optique de déterminations très précises (PPP statique), si le point stationné a un mouvement connu sur la plaque il faut prendre en compte sa vitesse.

## Quelques exemples numériques

Pour illustrer ce qui vient d'être exposé on s'intéresse à la station GNSS de Grasse (GRAS) qui appartient aux réseaux RGP, EPN, IGS et ITRF.

Le but du *tableau 4* est d'illustrer les changements de réalisations avec ou sans changement d'époque.

La vitesse de la station de GRAS dans l'ITRF et dans l'ETRF est connue, car il s'agit d'une station permanente, pour un point nouveau ces vitesses sont

n°	SRT	Epoque	X(m)	Y(m)	Z(m)
1	ITRF2014	2010.0	4581690,831	556114,930	4389360,851
2	ETRF2014	2010.0	4581691,115	556114,608	4389360,563
3	ETRF2000	2010.0	4581691,159	556114,578	4389360,562
4	ETRF2000	2009.0	4581691,159	556114,578	4389360,563
5	ETRF2000	2009.0	4581691,159	556114,578	4389360,563
6	RGF93		4581691,159	556114,576	4389360,566

**Le jeu n°1** est celui de la réalisation ITRF2014 donné dans *tableau 1*

**Le jeu n°2** est obtenu par transformation du jeu n°1 avec coord\_trans l'outil de transformation de coordonnées de l'EPN ([http://www.epncb.oma.be/\\_productsservices/coord\\_trans/](http://www.epncb.oma.be/_productsservices/coord_trans/)).

**Le jeu n°3** est obtenu par transformation (coord\_trans) du jeu n°1

**Le jeu n°4** est obtenu par transformation du jeu n°3 et la vitesse du point donné dans le *tableau 3* (coord\_trans)

**Le jeu n°5** est obtenu par transformation du jeu n°1 et la vitesse du point donné dans le *tableau 1* (ccord\_trans)

**Le jeu n°6** est le jeu de coordonnées de la réalisation officielle du RGF93

L'écart entre les jeux n°1 et n°2 est de 54 cm, et correspond au mouvement de la plaque tectonique Eurasie entre 1989,0 et 2010,0. L'écart entre les jeux n°3 et n°4 est de 1 mm et correspond au mouvement du point dans l'ETRF.

Les jeux n°4 et n°5 bien que calculés différemment sont identiques.

L'écart entre les jeux n°4 et n°6 est de 3,6 mm et correspond à la différence entre la réalisation ETRF2014 et la réalisation RGF93

**Tableau 4.** Coordonnées d'un point dans plusieurs réalisations et diverses époques

n°	SRT	Epoque	X(m)	Y(m)	Z(m)
1	ITRF2014	2018.02	4581690,713	556115,087	4389360,964
2	ETRF2000	2009.0	4581691,154	556114,583	4389360,589
3	ETRF2000	2009.0	4581691,149	556114,583	4389360,583

**Le jeu n°1** est obtenu par un calcul PPP des observations sur un jour de la station Grasse avec le calcul en ligne CSRS\_PPP de NRCAN (<http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/geodetic-reference-systems/tools-applications/10925#ppp>). La précision donnée par le calcul est à 95 % : nord : 0,003 m, est : 0,006 m, hauteur : 0,013 m)

**Le jeu n°2** est obtenu par transformation de ITRF2014 époque 2018,02 et ETRF2000 époque 2009,0 avec coord\_trans. La vitesse utilisée est celle de *tableau 1*. On constate un écart de 2,5 cm avec les coordonnées RGF93 officielles.

**Le jeu n°3** est obtenu par calcul avec le modèle de plaque tectoniques ITRF2014 (A.Harmel ahgeodev.fr). L'écart avec les coordonnées RGF93 officielles est 2,1 cm.

**Tableau 5.** Exemple avec une détermination PPP(NRCAN)

n°	SRT	Epoque	X(m)	Y(m)	Z(m)
1	IGS08 (ITRF2008)	2018.02	4581690,719	556115,086	4389360,962
2	ITRF2014	2018.02	4581690,716	556115,084	4389360,959
3	ETRF2000	2009.0	4581691,158	556114,583	4389360,582
4	RGF93		4581691,149	556114,581	4389360,577
5	ETRS89	2018.02	458 1691,151	556114,578	4389360,574

**Le jeu n°1** est obtenu par un calcul ligne de base des observations sur un jour de la station Grasse avec le calcul en ligne de l'IGN ([http://rgp.ign.fr/SERVICES/calcul\\_online.php](http://rgp.ign.fr/SERVICES/calcul_online.php)). La précision donnée par le calcul est à 95 % : nord : 0,008 m, est : 0,009 m, hauteur : 0,016 m).

**Le jeu n°2** est obtenu à partir du jeu n°1 et changement de réalisation avec coord-trans

**Le jeu n°3** est obtenue par transformations de ITRF2014 époque 2018,02 et ETRF2000 époque 2009,0 avec coord\_trans. La vitesse utilisée est celle de *tableau 1*. On constate un écart de 1,7 cm avec les coordonnées RGF93 officielles.

**Le jeu n°4** : coordonnées RGF93 en sortie du calcul en ligne IGN. L'écart avec les coordonnées RGF93 officielles est 1,6 cm.

**Le jeu n°5** : coordonnées ETRS89 (sans précision de la réalisation ETRF) donnée par le calcul en ligne IGN et à l'époque des observations. L'écart entre les jeux n°4 et 5 est 4 mm. Si on compare le jeu n°1 du *tableau 5* et n°2 du *tableau n°6*, on voit que les deux calculs du même jeu de donnée d'observations par les deux méthodes différentes sont compatibles à 6 mm près.

**Tableau 6.** Calcul GNSS ligne de base (IGN)



inconnues. Dans le *tableau 4* on est parti des coordonnées publiées dans la réalisation de l'ITRF2014. Dans les *tableaux 5 et 6* les coordonnées de GRAS sont considérées inconnues et on utilise 24 heures observations du 09/01/2018 pour les déterminer soit en PPP (*tableau 5*) soit par calcul lignes de base (différentiel) (*tableau 6*).

## Conclusion

Les techniques de positionnement GNSS sont de plus en plus précises et il devient incontournable pour l'utilisateur de comprendre, dans quel système de référence terrestre on obtient les coordonnées après traitement.

Les concepts de système de référence terrestre et leurs réalisations sont difficiles à comprendre, mais il faut rassurer ici les utilisateurs qui manipulent des données dont le géoréférencement a une précision moindre que le mètre, ils ne sont pas concernés et pour eux WG84, ITRF, ETRF, RGF93, n'importe quelle réalisation ou époque c'est du pareil au même. Le conseil à leur donner cependant, c'est de fournir comme métadonnées à leur produit, les références légales, ainsi que la classe de précision pour faciliter la fusion avec des données localisées plus précises.

On a vu dans les exemples précédents que l'utilisateur averti pouvait accéder au niveau centimétrique aux différentes réalisations et époques. Cependant c'est l'utilisation des réseaux permanents qui lui facilite la mise en référence nationale et cela est même devenu transparent avec l'utilisation des réseaux GNSS temps réel.

De plus en plus d'applications utilisent le PPP dont les performances rejoignent maintenant en précision le positionnement par réseau permanent, mais la position obtenue est exprimée dans une des réalisations ITRF généralement à l'époque des observations qu'il est nécessaire de bien identifier, pour ensuite faire les bonnes transformations. L'utilisateur peut utiliser des outils mis à sa disposition et s'il veut développer ses propres outils, outre qu'il est nécessaire qu'il maîtrise tous les concepts, il est prudent de les

comparer à des outils de référence. Actuellement la précision de ces changements de coordonnées est proche du centimètre.

Quand les médias annoncent que maintenant on va pouvoir positionner une voiture au centimètre, on a envie de leur demander quel est le détail de la voiture qui est positionnée aussi précisément et surtout dans quel système de référence est cette position. Mais ceci est une autre histoire ! ●

## Contact

Françoise DUQUENNE  
Présidente de l'AFT  
contact.fduquenne@gmail.com

## Références

- [1] ALTAMIMI Z., REBISCHUNG P., METIVIER L., COLLILIEUX X. (2016) "ITRF2014 : a new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling non linear station motions" Journal of geophysical Research: Solid Earth, volume 121, issue 8, p 6109-6131  
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2016JB013098/full>
- [2] ALTAMIMI Z., METIVIER L., REBISCHUNG P., ROUBY H., COLLILIEUX X. "ITRF2014 plate motion model" Geophysical Journal International, volume 209, Issue 3, 1<sup>er</sup> juin 2017, pages 1906-1912.  
<https://doi.org/10.1093/gji/ggx136>
- [3] ALTAMIMI Z., REBISCHUNG P., METIVIER L., COLLILIEUX X. "L'ITRF2014 et la modélisation des mouvements non linéaires des stations" Revue XYZ n°153 page 55-57, Décembre 2017.  
<http://www.aftopo.org/FR/xyz-4.html>
- [4] BIROT F., DURAND S., FUND F., LEGROS R., MOREL L., VIGUIER F. "Méthodes GNSS pour la Topographie" numéro spécial XYZ n°138b, p 42, mars 2014  
<http://www.aftopo.org/FR/xyz-4.html>
- [5] BOSSER P. "Evaluation d'une solution de positionnement ponctuel précis temps réel" Revue XYZ n°148, p 33, septembre 2016.  
<http://www.aftopo.org/FR/xyz-4.html>
- [6] BOUCHER C. and al (2017) "Les références de temps et d'espace" BOUCHER C. ed HERMANN  
<http://www.aftopo.org/FR/ouvrages-34.html>
- [7] COLLILIEUX X. (2017) "Introduction aux Systèmes de Référence Terrestres" Cours au master Positionnement et mesures de déformation (PPMD), février 2017
- [8] COLLILIEUX X. "Systèmes et repères

de référence terrestre régionaux" cours ingénieur ENSG, décembre 2016.

[9] DUQUENNE F., BOTTON S., PEYRET F., BBETAÏLE D., WILLIS P. "GPS : localisation et navigation par satellites" Hermes-Lavoisier 2005.

[10] DUQUENNE F. et H. "cours de géodésie" CNAM/ESGT(2003) <http://www.aftopo.org/FR/ouvrages-34.html>

[11] FIG commission 5 "Reference frames in practice Manual" FIG publication n°64, mai 2014, téléchargeable sur [www.FIG.net](http://www.FIG.net)

[12] HARMEL A. (2010) "Rénovation du RGF93" revue XYZ n°124, pages 36 à 40, <http://www.aftopo.org/FR/xyz-4.html>

[13] HARMEL A "Transformations entre ITRF-application aux références nationales" IGN/SGN, NT/G 162, 9 décembre 2013.

[14] LUZET C. "Evolution du canevas géodésique national" revue XYZ n°69, page 55, décembre 1996

<http://www.aftopo.org/FR/xyz-4.html>

[15] MATHIS E.R. "Introduction aux calculs en ligne GNSS" revue XYZ n°152, p 22 à 24, septembre 2017

<http://www.aftopo.org/FR/xyz-4.html>

## ABSTRACT

*What are Terrestrial Reference System and Frame? How were they built yesterday and mostly today? How to convert from one to another? That is the purpose of this paper. International, European and French TRF definitions are explained. Numerical examples give us some ideas of accuracy in conversions. While GNSS positioning is more and more precise, users must know all these concepts to reach a full accuracy.*

## ERRATUM

Dans le XYZ153 de décembre 2017, le lecteur a pu se familiariser avec "L'ITRF2014 et la modélisation des mouvements non linéaires des stations".

Cependant la première colonne de la page 57 comporte l'équation (1) :

$$X_{PSD}(t) = X(t_0) + \dot{X} \cdot (t - t_0) + X_{PSD}(t) \quad (1)$$

qu'il convient de remplacer par :

$$X(t) = X(t_0) + \dot{X}(t - t_0) + X_{PSD}(t)$$