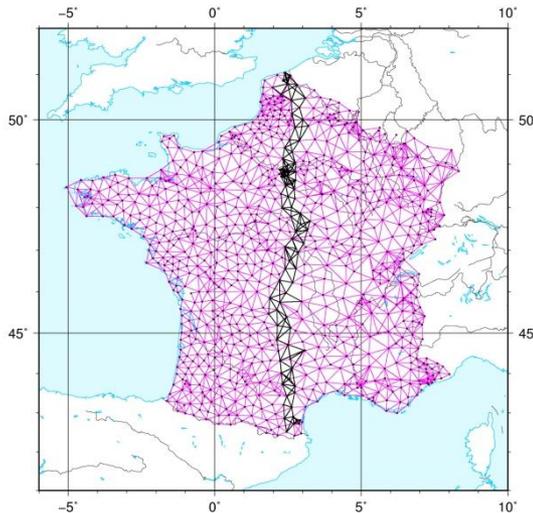
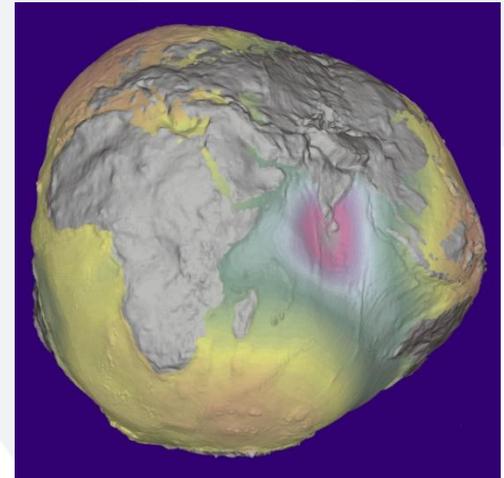


# Les référentiels géodésiques de Cassini au XXI<sup>ème</sup> siècle



**Alain HARMEL**  
**IGN**  
**Service de géodésie et nivellement**  
[alain.harmel@ign.fr](mailto:alain.harmel@ign.fr)



# Les grandes étapes de la géodésie française

- 1669-1671 la méridienne Paris Amiens (Picard)
- 1672 Observatoire de Paris
- 1683-1701 méridienne de Cassini
- 1736 arc de Laponie
- 1736 – 1744 arc du Pérou
- 1792 -1798 méridienne de France (Delambre et Méchain)
- 1795 Bureau des longitudes
- 1818-1830 triangulation des Ingénieurs Géographes
- 1870-1991 la Nouvelle Triangulation de la France
- 1957 Spoutnik. Naissance de la géodésie spatiale
- 1980 GPS
- 1988 IERS (Service international de la rotation de la Terre)
- 2000 adoption du RGF93. Le réseau GPS permanent

# Une chronologie

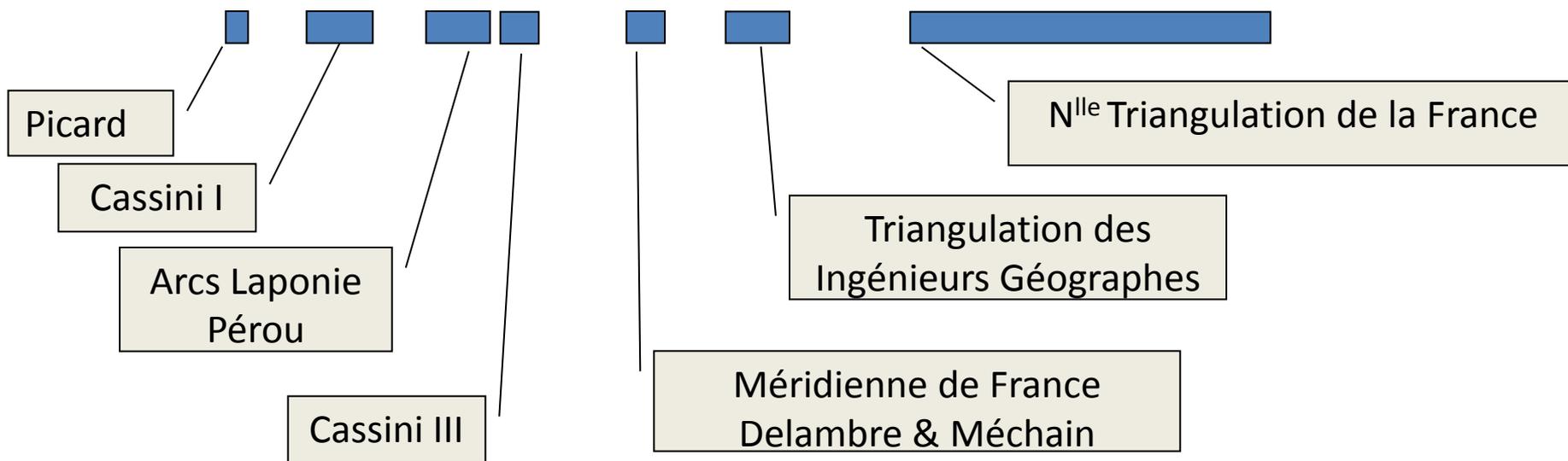
1600 1700 1800 1900 2000

Académie des sciences

Observatoire de Paris

Bureau des Longitudes

IERS

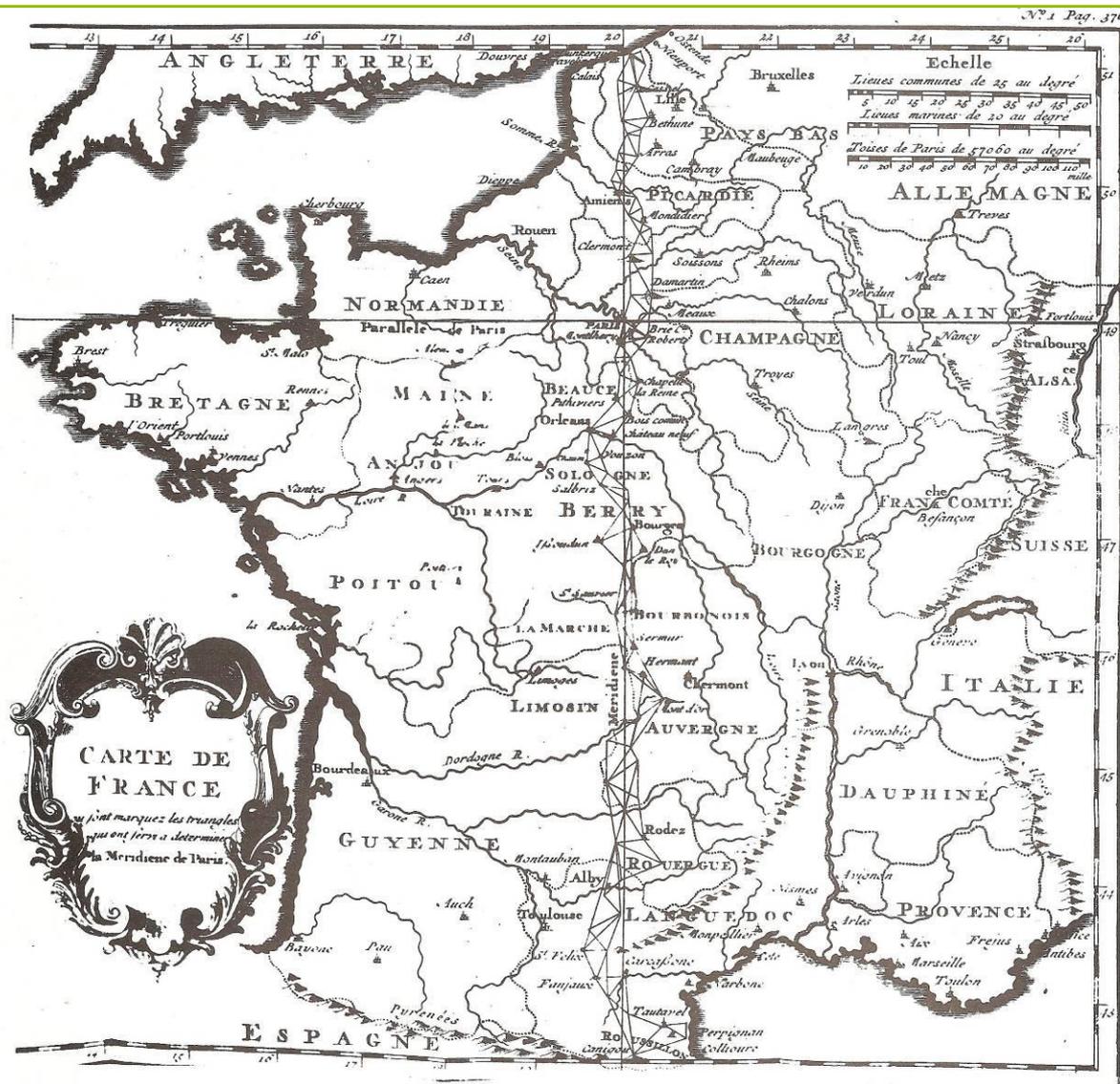


Ere spatiale

# Les Cassini

- **Jean-Dominique (Giovanni Domenico) Cassini :**  
Perinaldo (Italie) 1625, Paris 1712
- **Jacques « Cassini II » :** Paris 1677 Thury-sous-Clermont 1756
- **César-François « Cassini III » ou Cassini de Thury :**  
Thury-sous-Clermont 1714, Paris 1784
- **Jean-Dominique « Cassini IV » , comte de Cassini :**  
Paris (Observatoire) 1748, Thury-sous-Clermont 1845

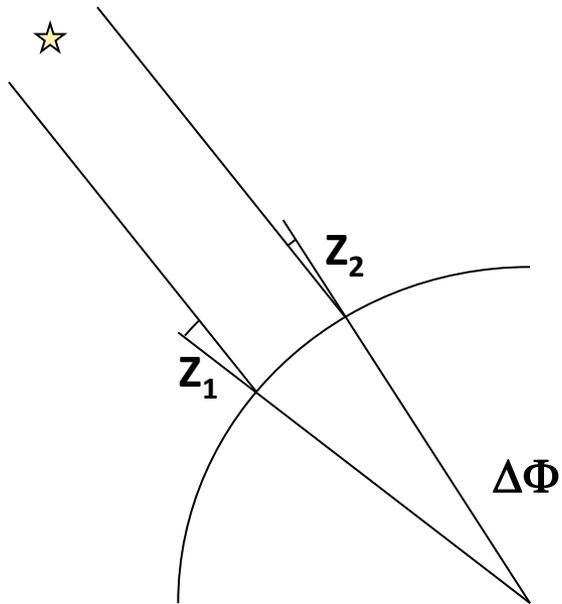
# La méridienne de Cassini



Paris – Dunkerque  
1 = 56960 toises

Paris – Collioure  
1 = 57097 toises

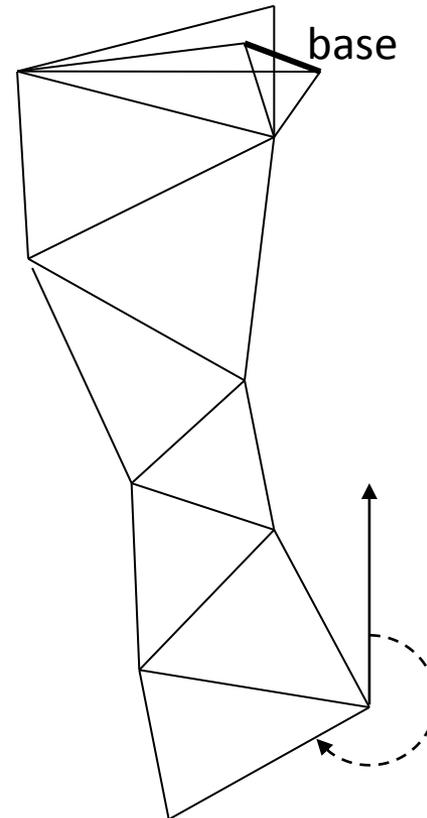
# Mesure de l'arc de méridien



## Astronomie

Mais quelques biais :

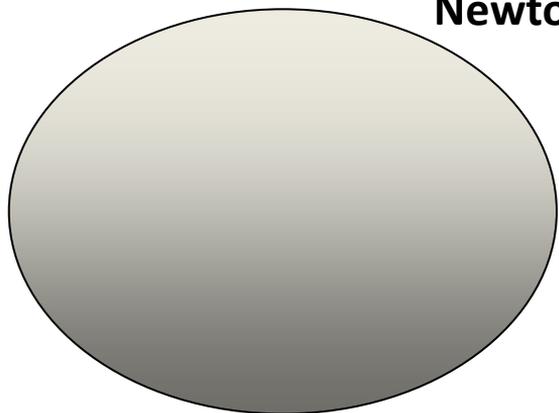
- aberration annuelle (Bradley 1727)  $\sim 20$  arcsec
- Nutation (Bradley 1740)  $\sim 9$  arcsec



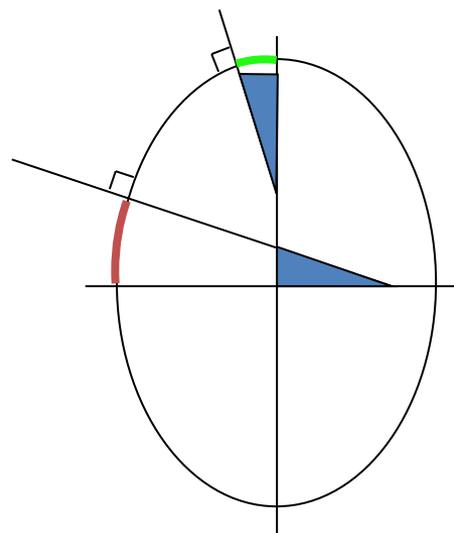
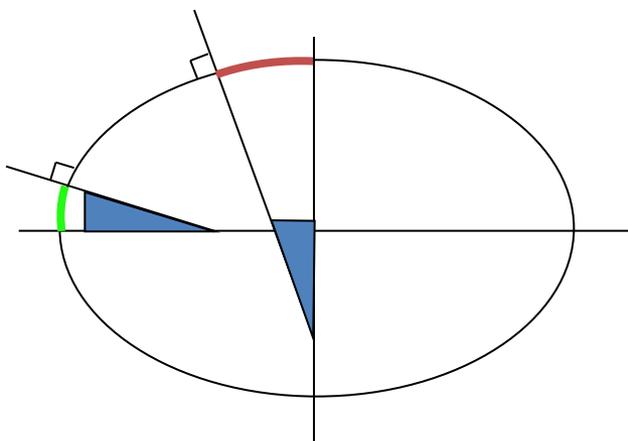
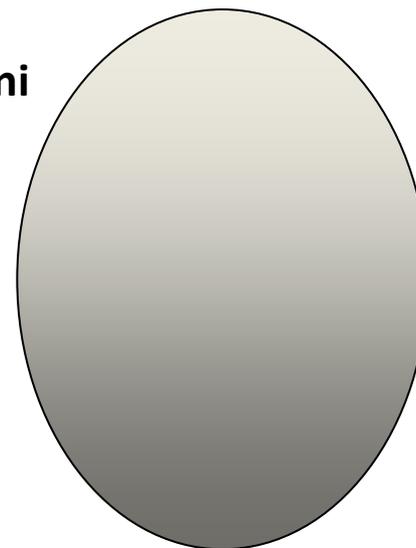
## Triangulation

# La querelle de l'aplatissement

Newton



Cassini



# Les arcs de Laponie et du Pérou

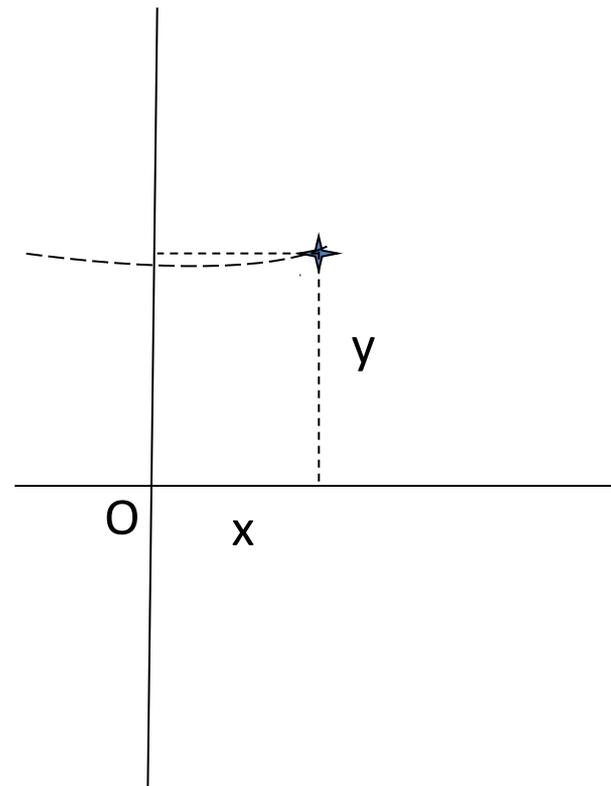
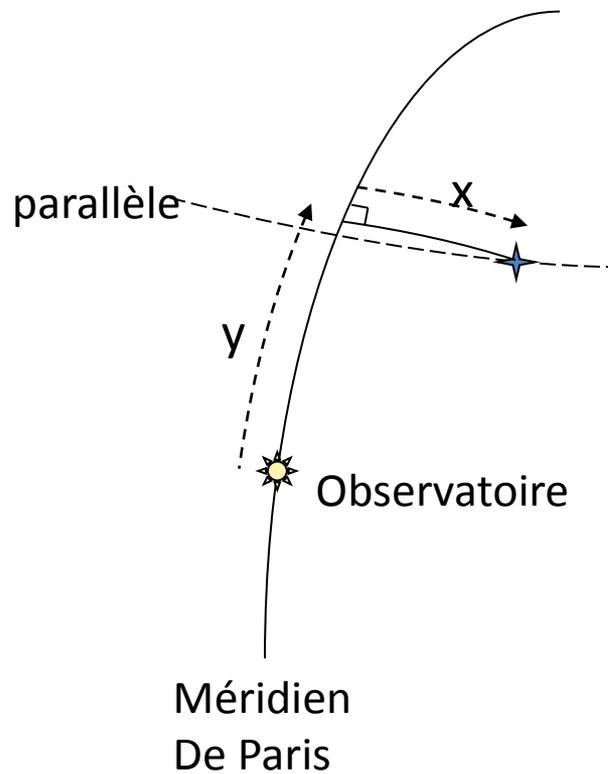
Pérou 1735 - 1744  
Bouguer La Condamine  
3 degrés

Laponie 1736 1737  
Maupertuis Clairaut  
1 degré



France: poursuite de la triangulation  
(Cassini de Thury) jusq'en 1744

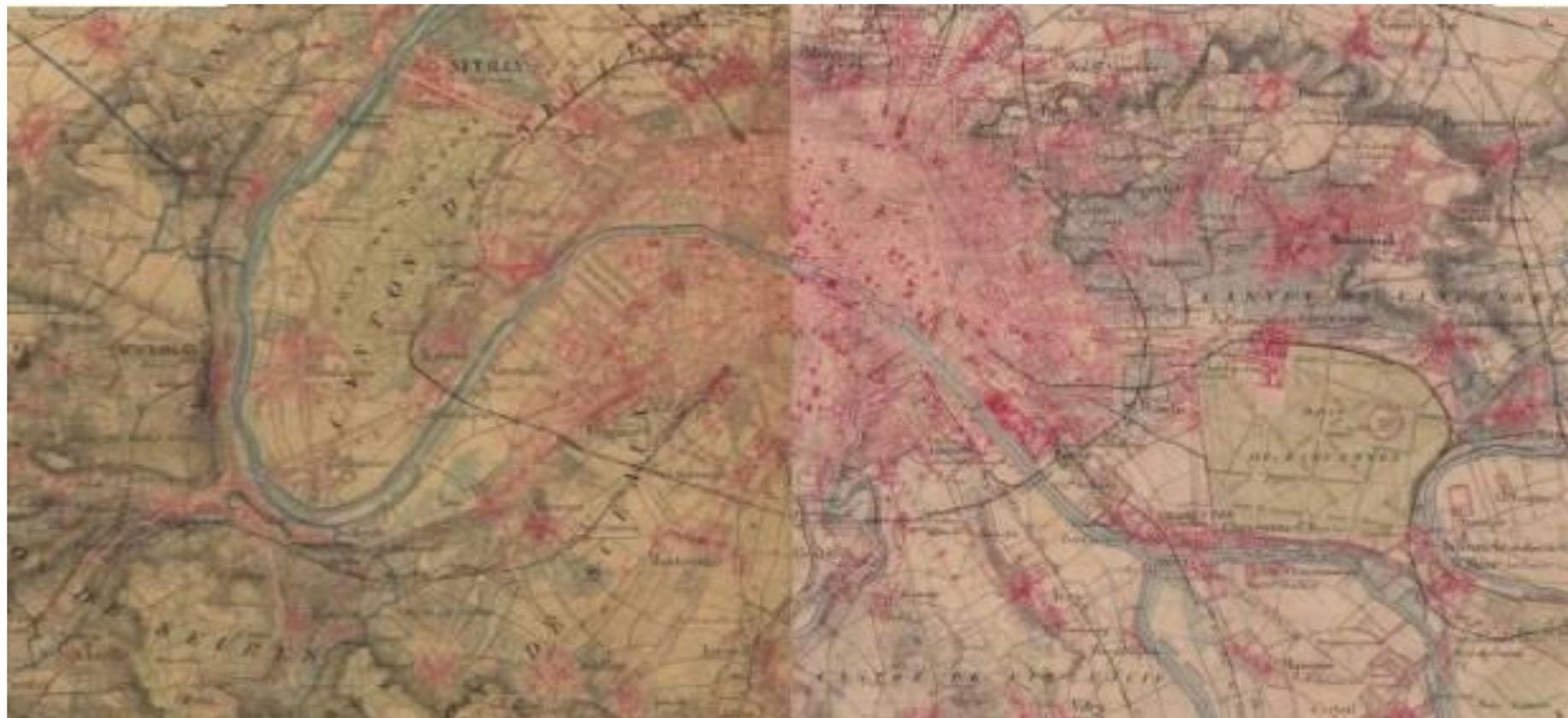
# Projection de Cassini



# Cassini de Thury : la carte de Cassini



# La Triangulation des Ingénieurs géographes la carte de l'Etat-Major



# BD-Ortho IGN 2011 (ETRS89/RGF93) Observatoire de Paris. Vue du Géoportail

Couches

Outils



géoportail

Conditions générales d'utilisation

IGN  
Institut National de l'Information Géographique et Cadastre  
17050 Saint-Mandé Cedex  
01 30 30 30 00

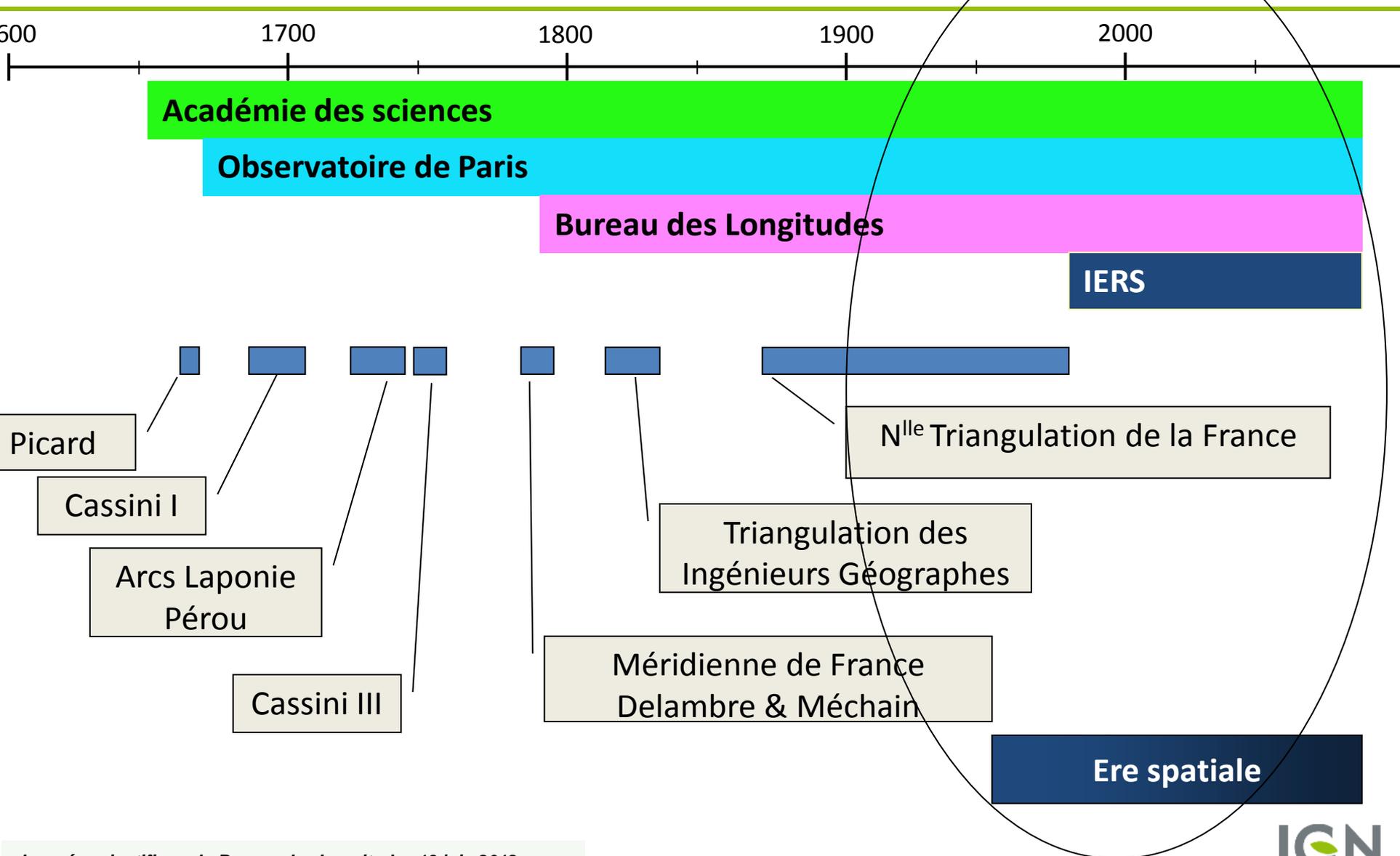
© IGN

0 50 m

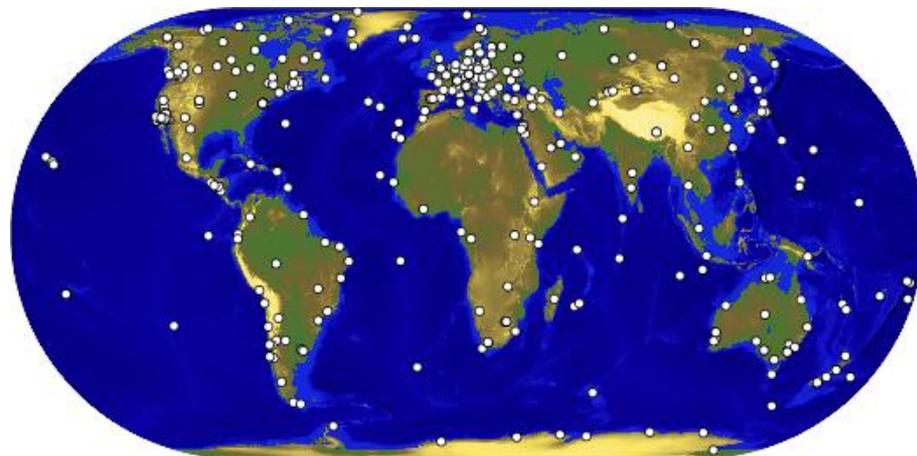
Reseau geodesique francais 1993

Longitude : 2° 20' 11.4" E Latitude : 48° 50' 11.1" N degrés sexagésimaux

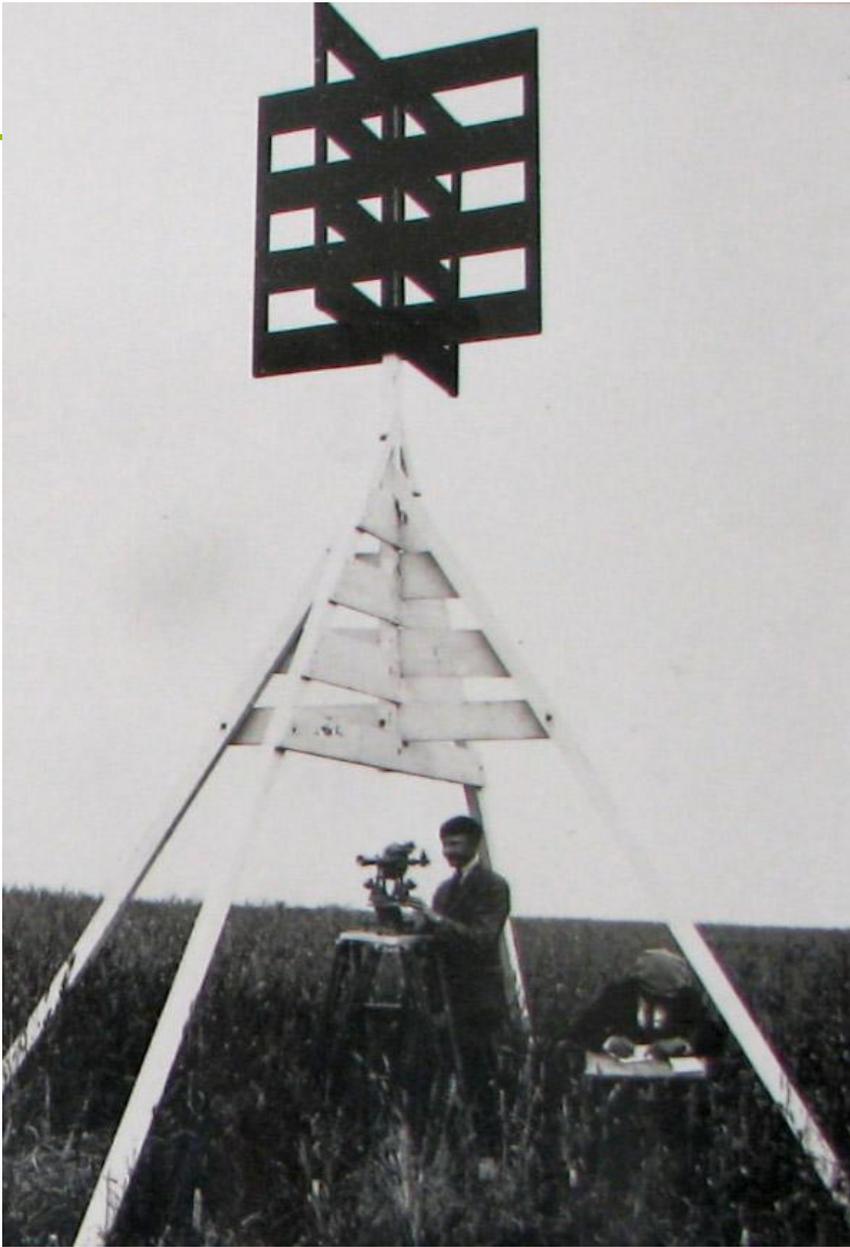
# L'évolution des références géodésiques ...



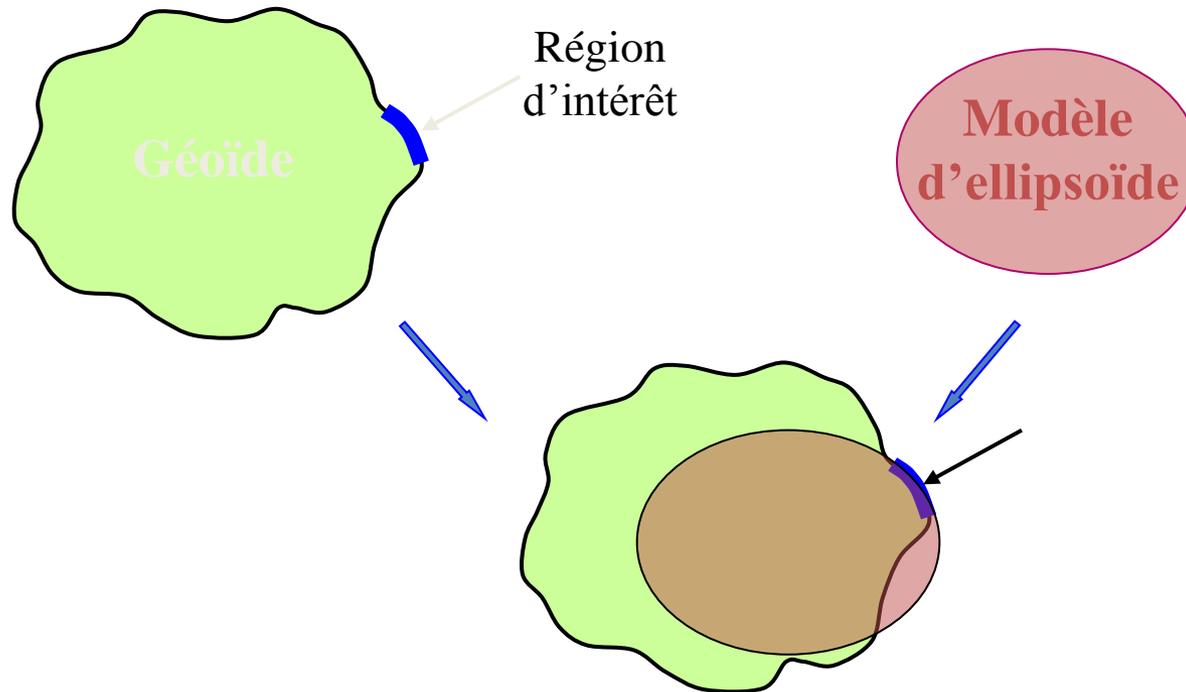
# L'évolution des références géodésiques



de la NTF au RGF...

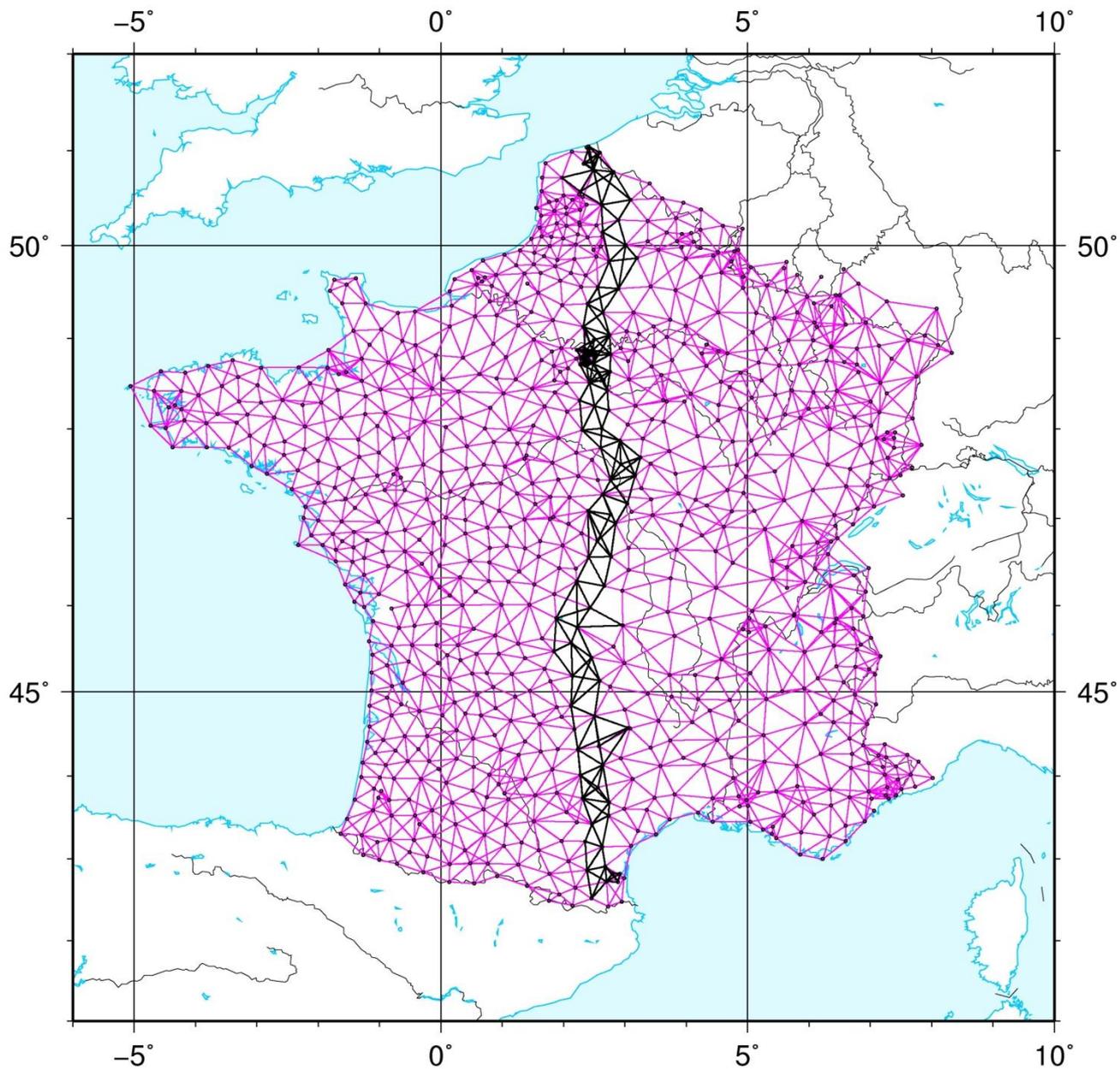


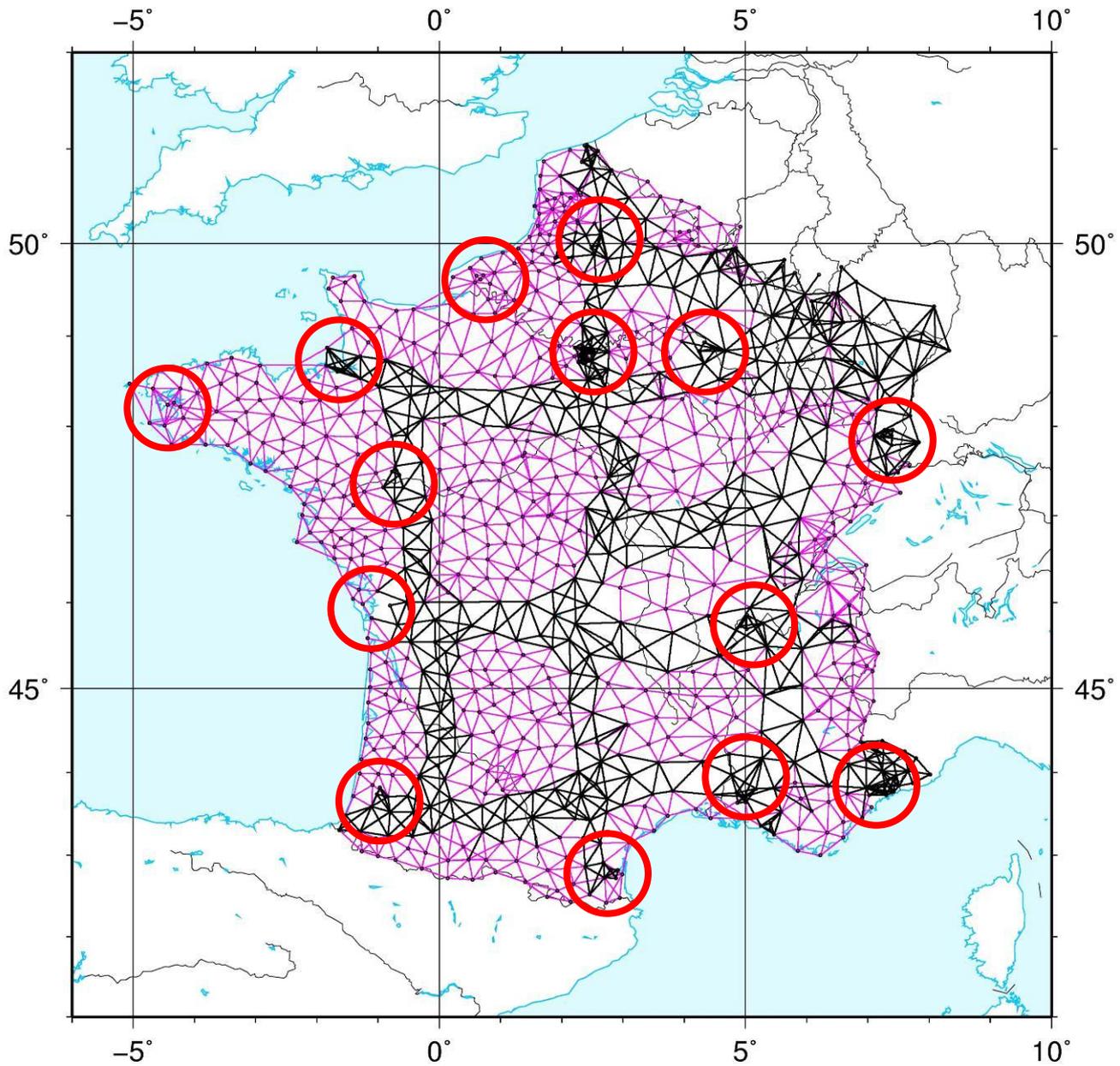
# SYSTEME GEODESIQUE « LOCAL »



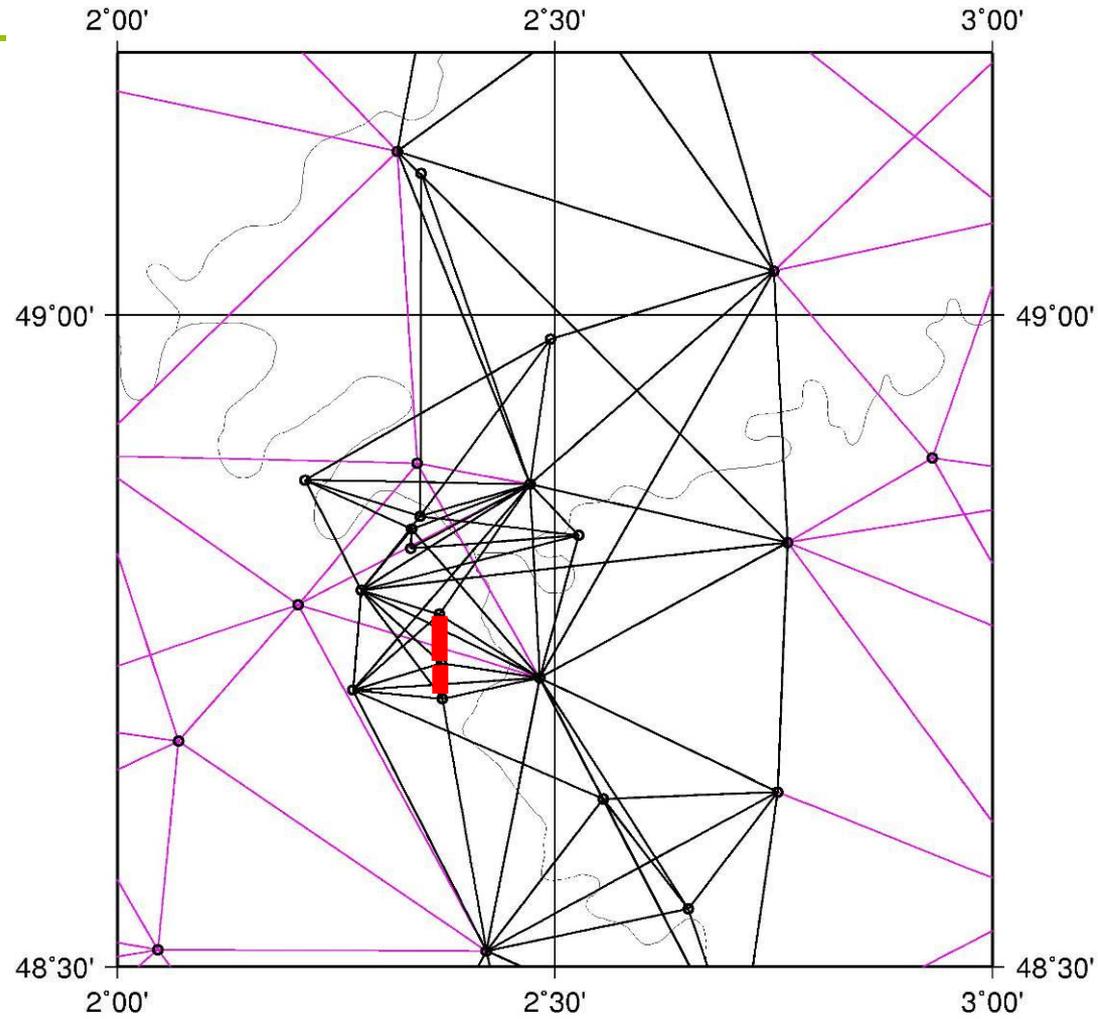
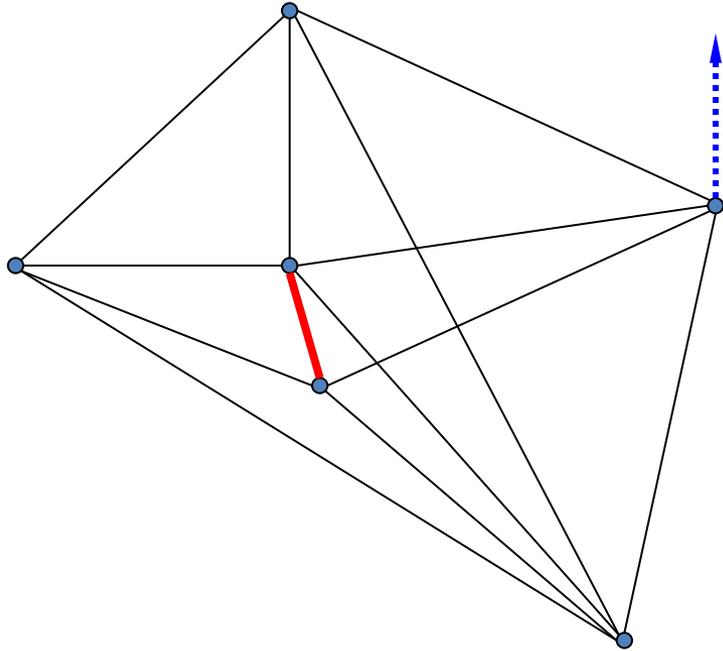


## *La Nouvelle Triangulation de la France*





# La triangulation



*PARIS Panthéon*

## BASE DE PARIS TERME SUD



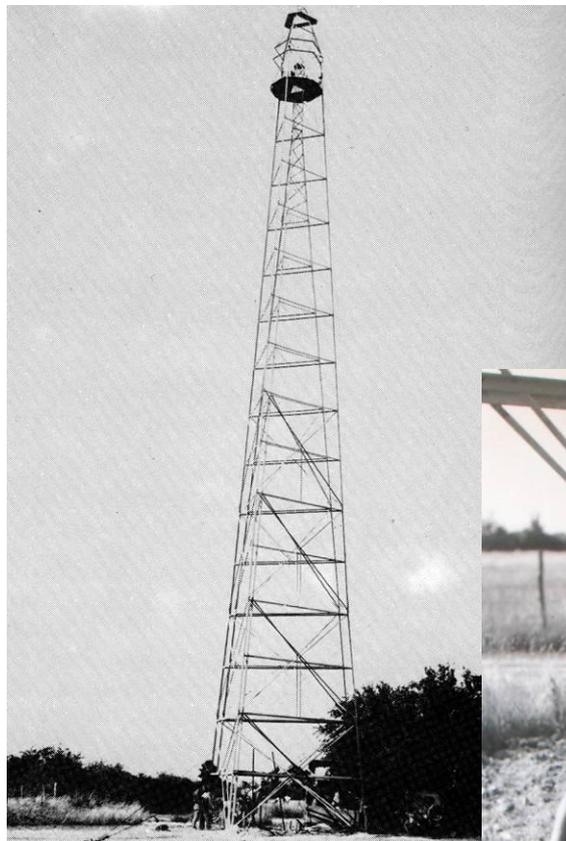
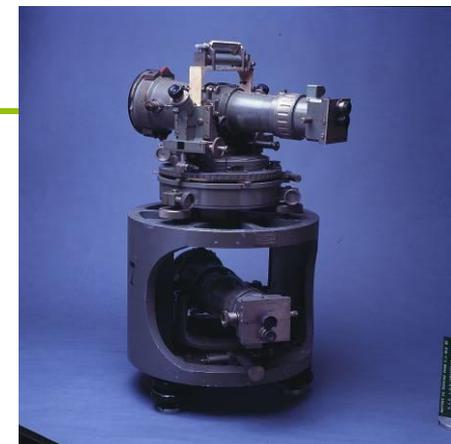
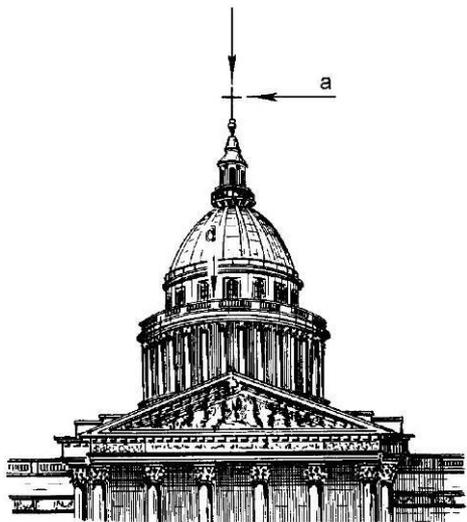


**6000701 (CLERMONT)**

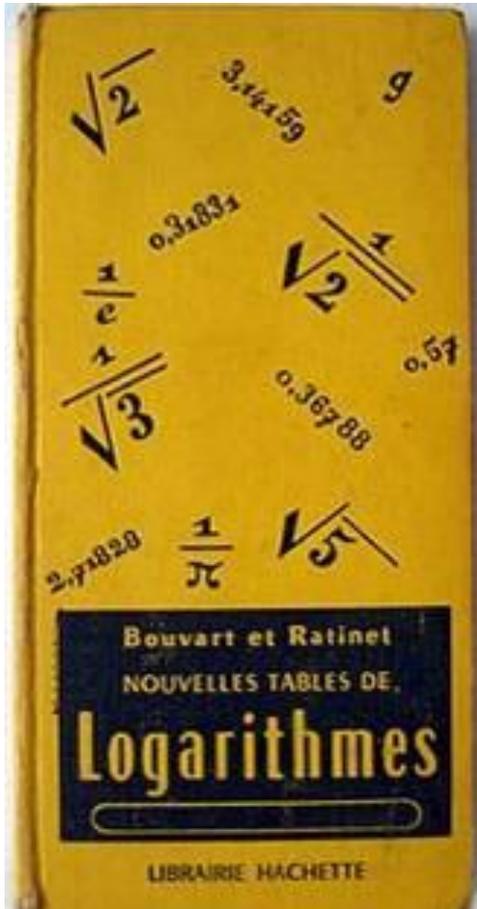
## VEDDUN I (CULAN)



# Des observations



# Et des calculs...



(après 1970)

# Systeme en usage en France : la NTF

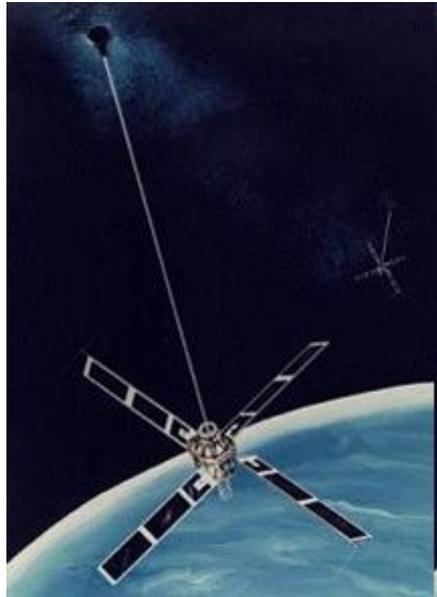
Jusqu'en 2000, le système géodésique utilisé en France métropolitaine est le système NTF (« Nouvelle Triangulation de la France »)

**Systeme de référence** : - bidimensionnel  
- Point fondamental : Paris-Panthéon  
- Ellipsoïde : CLARKE 1880 IGN  
    a = 6 378 249.2 m  
    b = 6 356 515.0 m  
- Méridien origine Paris-Observatoire(2 20'14.025" E de Greenwich)

**Systeme de coordonnées** : - longitudes, latitudes en grades  
- Projection : X, Y Lambert I, II, III et IV

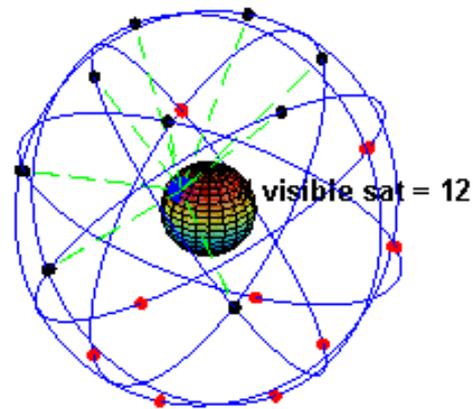
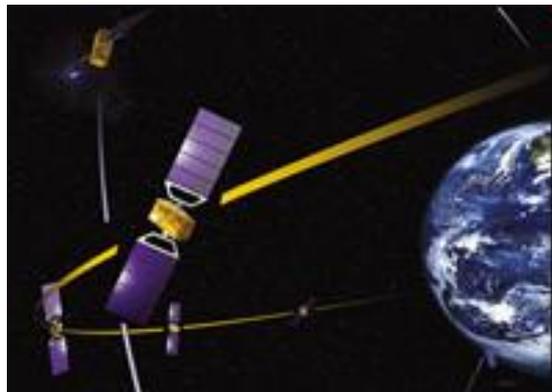
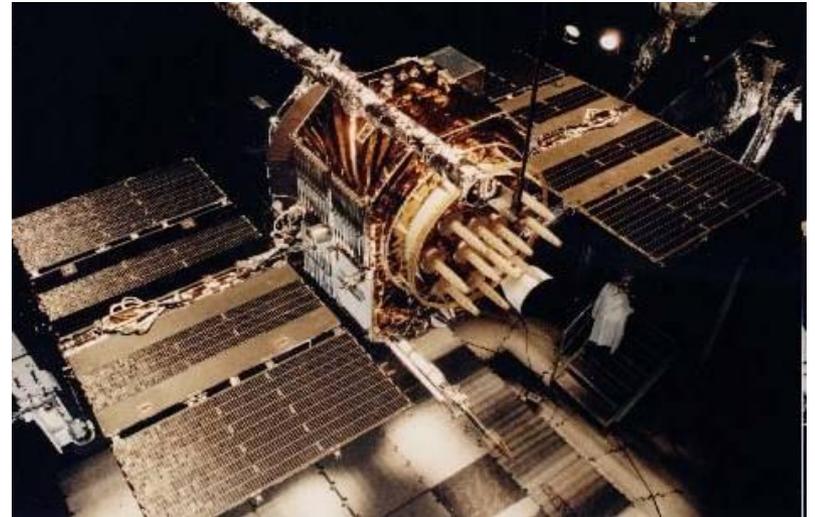
**Accès** : - Réseau de 80 000 points (en quatre ordres de précision équivalente)  
- **Précision :  $10^{-5}$  (soit 1cm par km)**

# 1970's 2000's ... l'ère spatiale

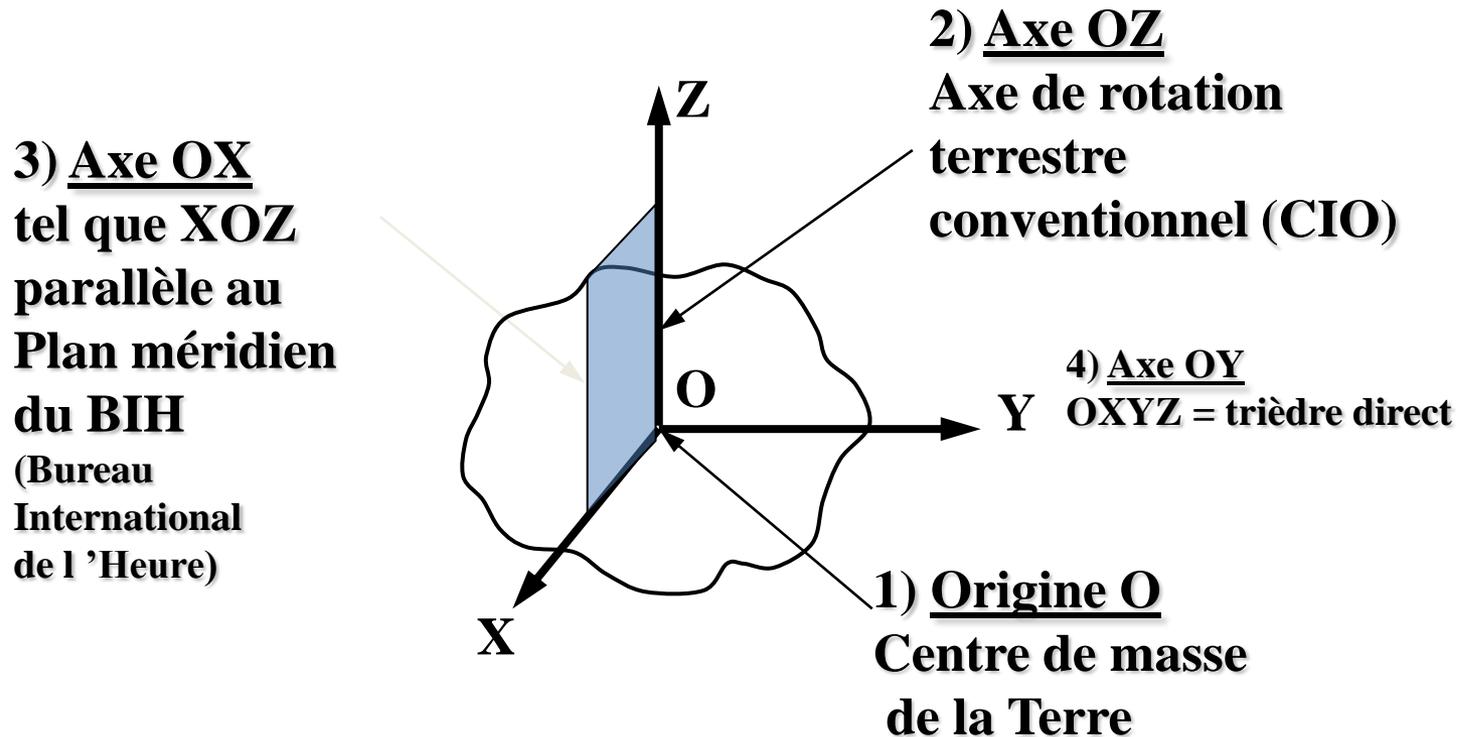


1970's 2000's ...

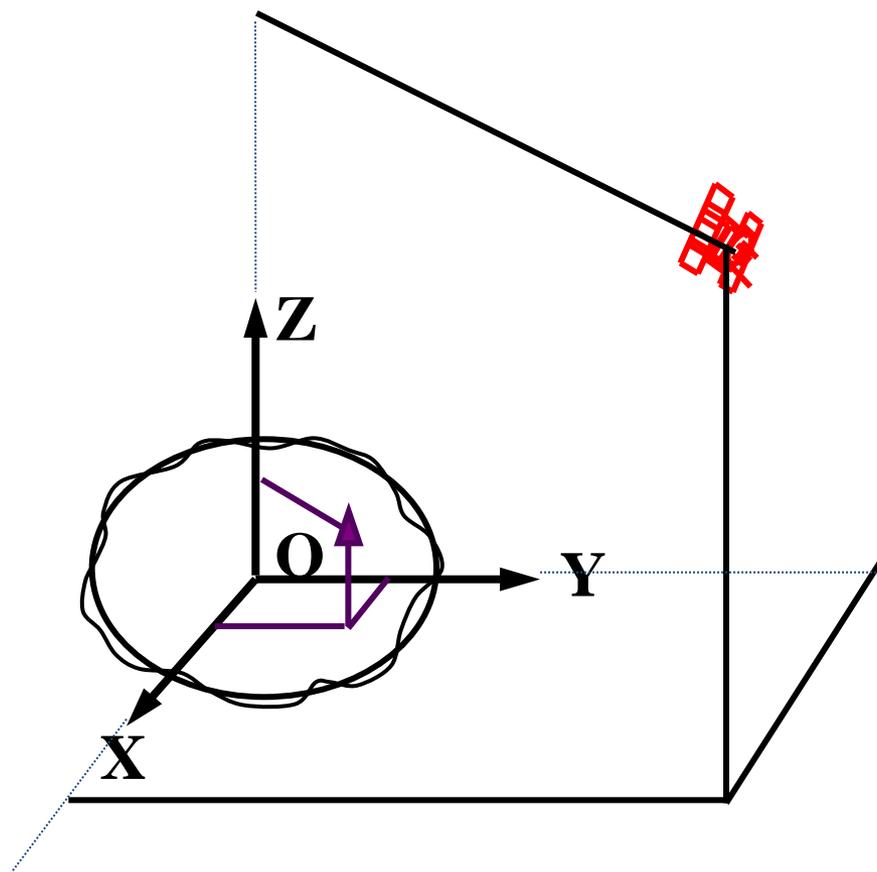
L'ère spatiale



# Systeme de référence géocentrique



# Système de référence géocentrique : réalisation



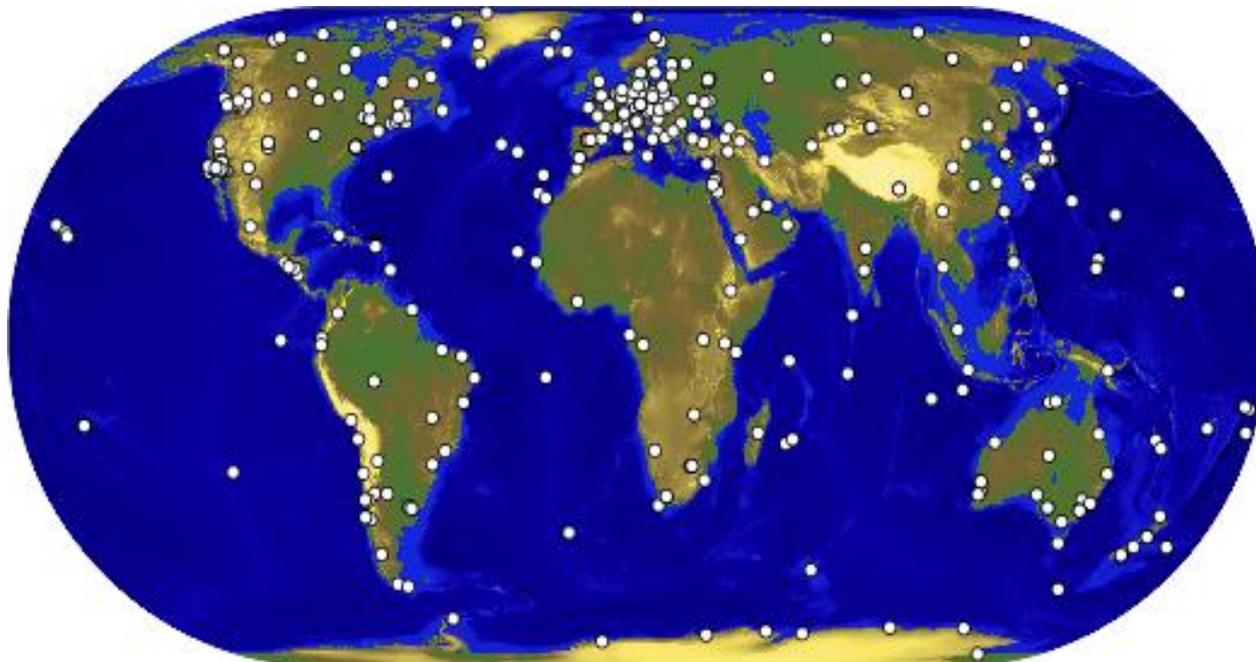
Une réalisation est obtenue par la connaissance de coordonnées de points matériels

- *points géodésiques (réseaux)*
- *satellites GPS*

Le réseau scientifique ITRF est une réalisation de haute précision (1 cm)

Le couplage avec des stations GPS permanentes (IGS) rend son accès commode et fiable.

# RESEAU IGS (International GNSS Service)

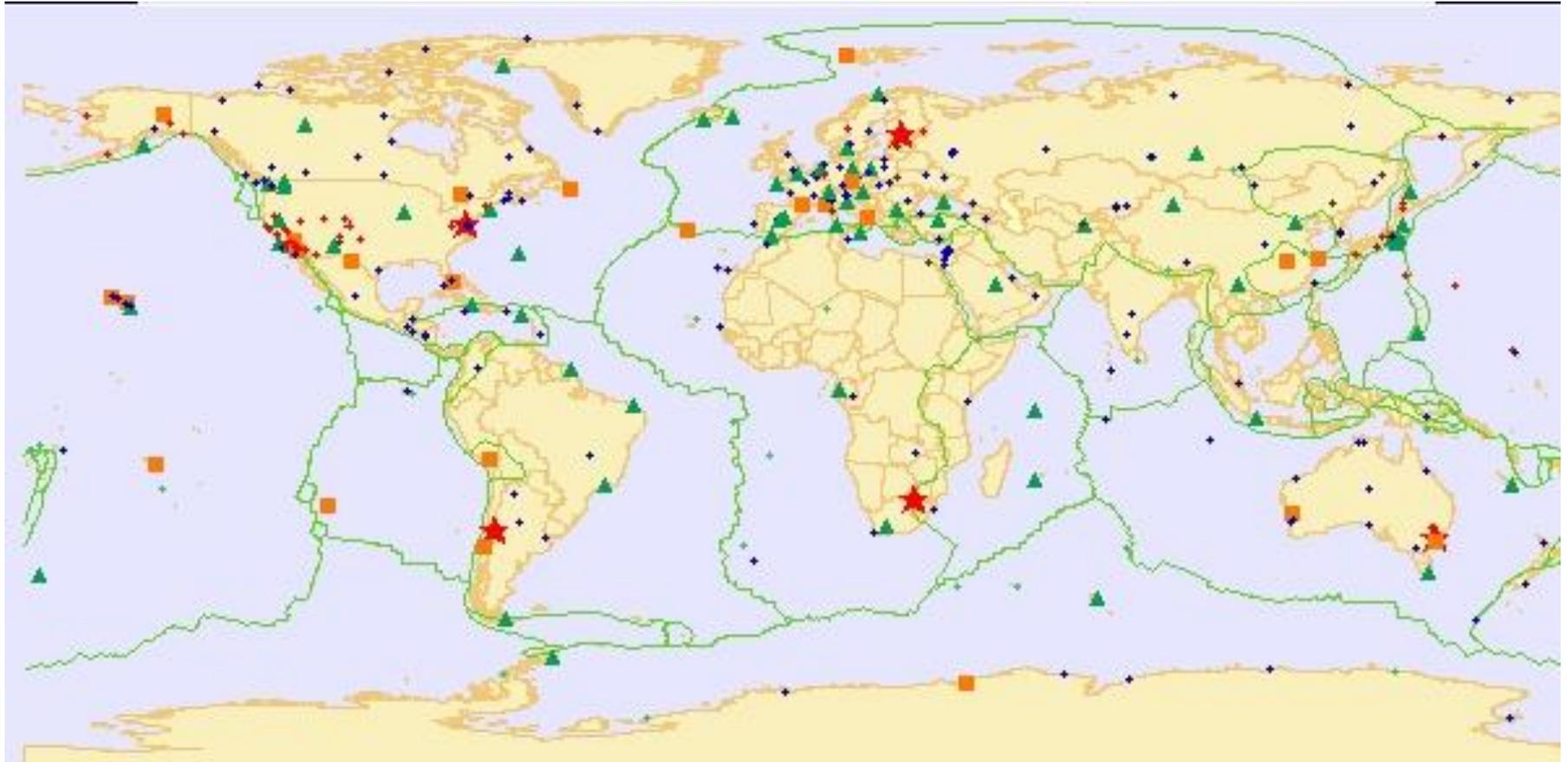


IGS 2009 Jan 31 16:47:09

- Réseau mondial de stations GNSS permanentes
- solution hebdomadaire
- participation aux solutions annuelles ITRF

Éphémérides précises des satellites GNSS  
(position en fonction du temps  
à quelques centimètres)

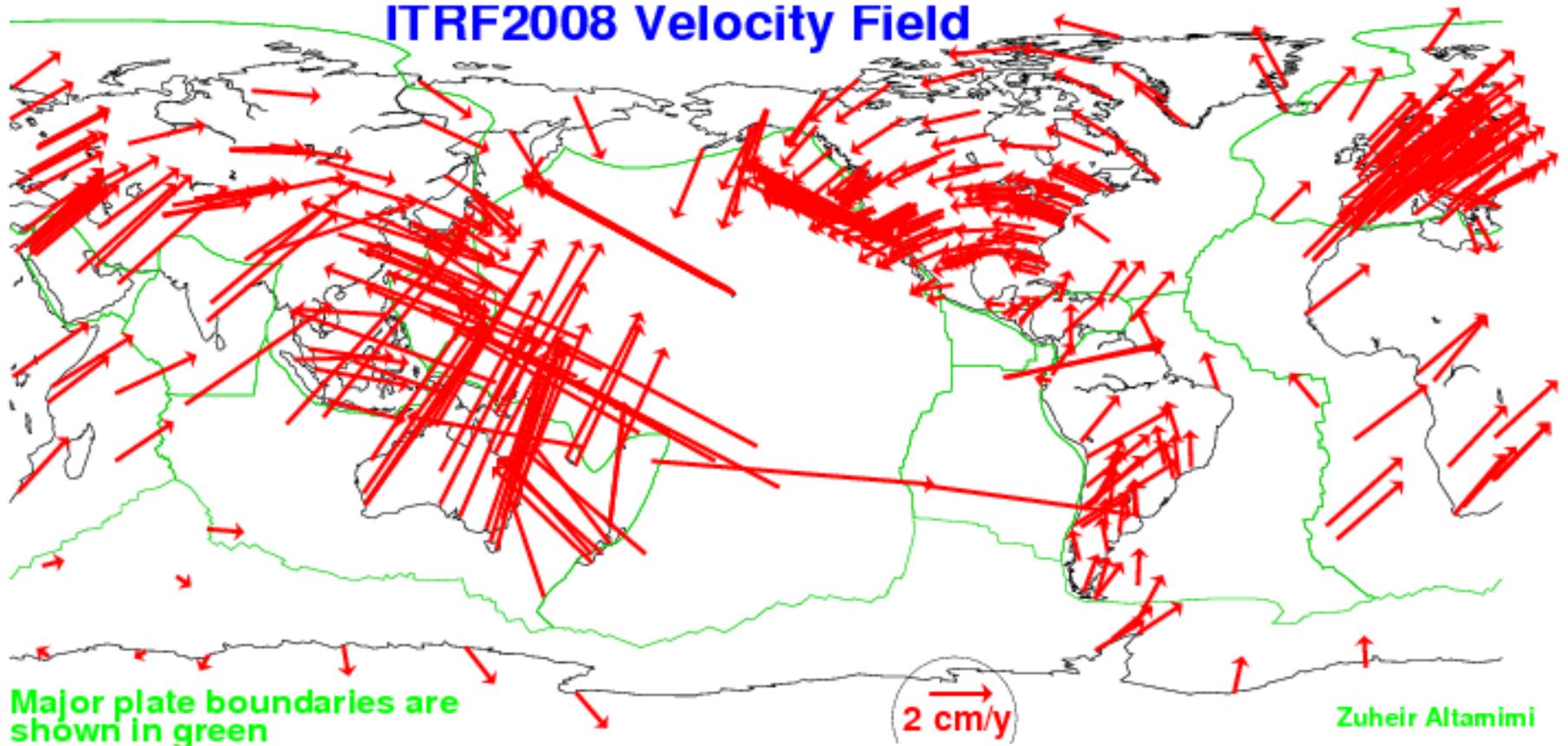
# International Terrestrial Reference System ITRF2008 / plaques tectoniques



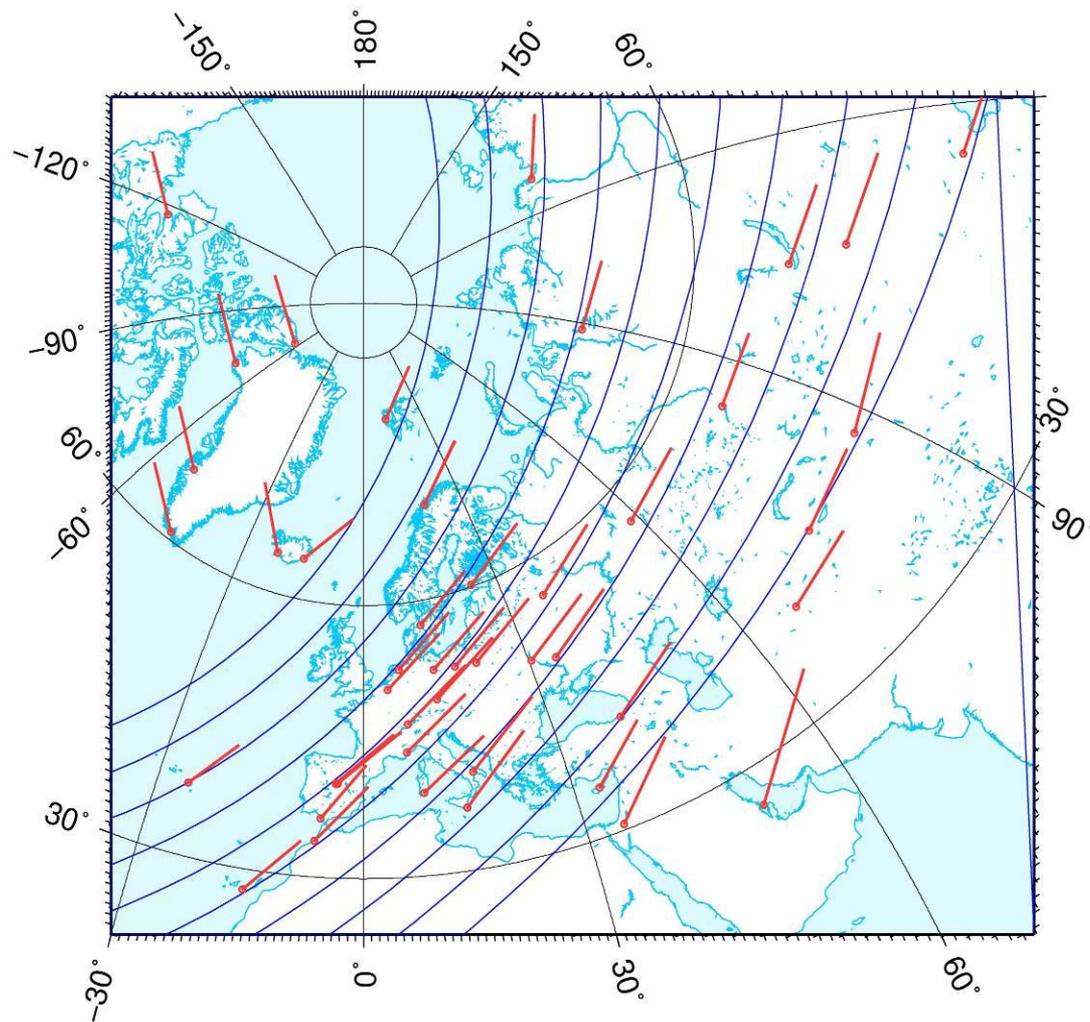
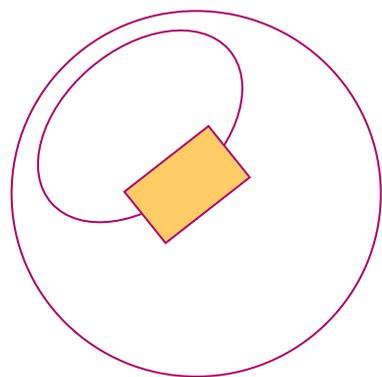
4 techniques : VLBI / Laser satellite / GPS / DORIS



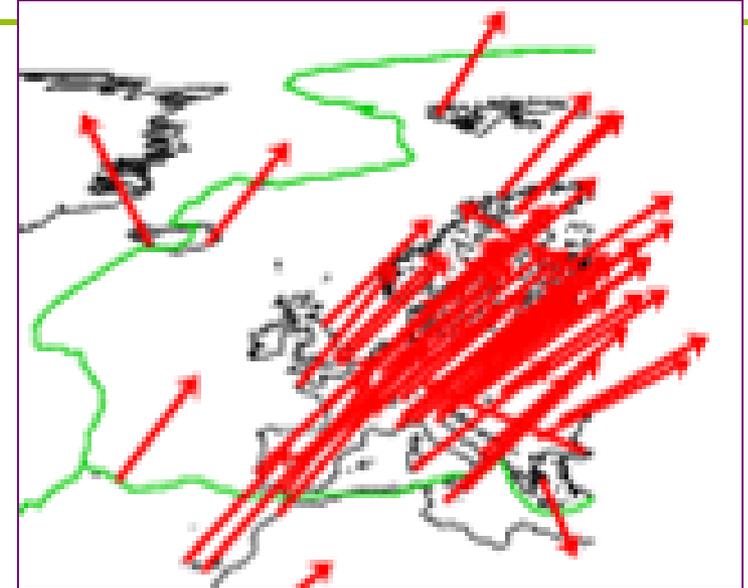
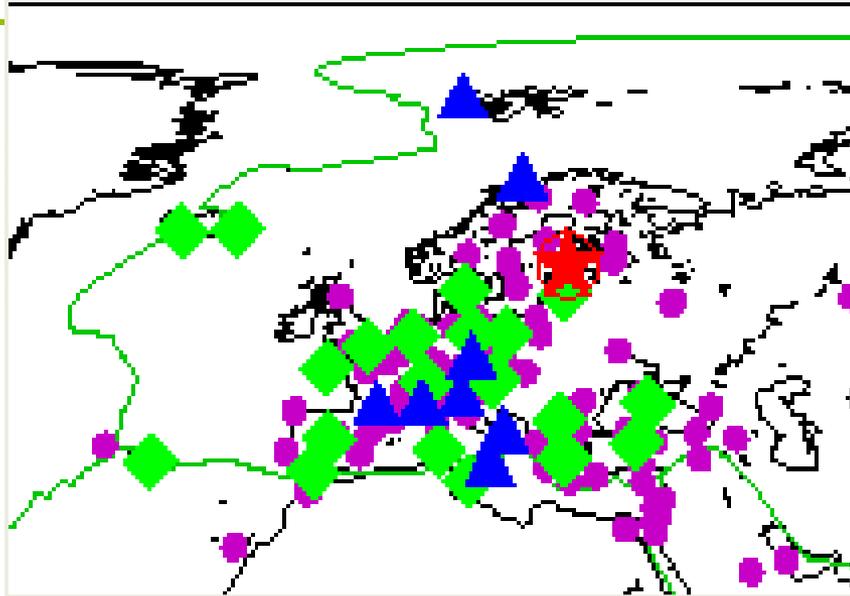
## ITRF2008 Velocity Field



# Mouvement des plaques : pôle de rotation



# Le système de référence européen ETRS89



**ETRS89 = ITRS époque 1989.0  
pour la plaque européenne (env. 3 cm / an NE)**

# ETRS89 France : RGF93

**RGF93**

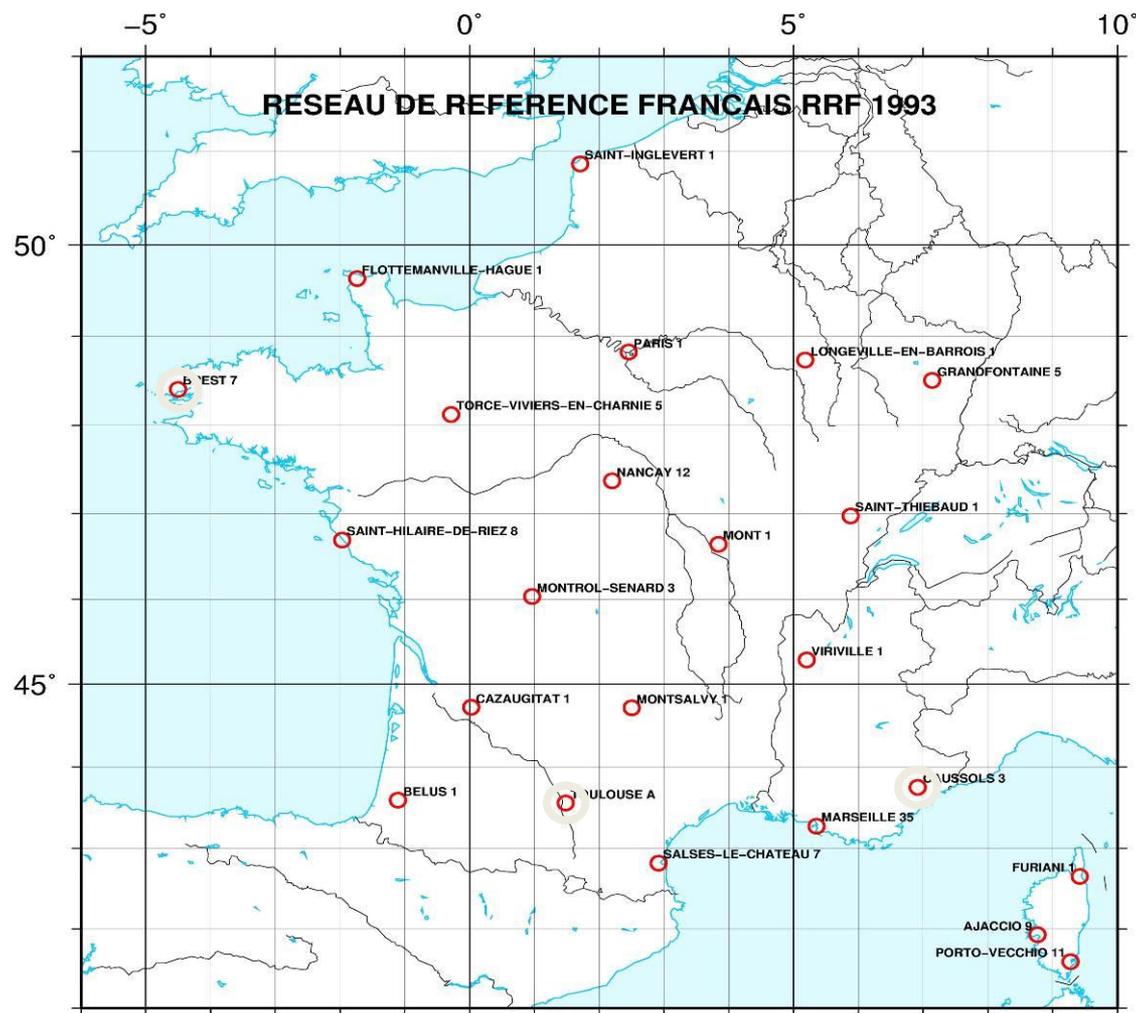
**1<sup>ère</sup> réalisation**

**Réseau de Référence  
Français (RRF) 1993**

**Solution RRF93.1  
(ETRF93)**

 GPS

 VLBI



# ETRS89 France : RGF93 (2)

**RGF93**

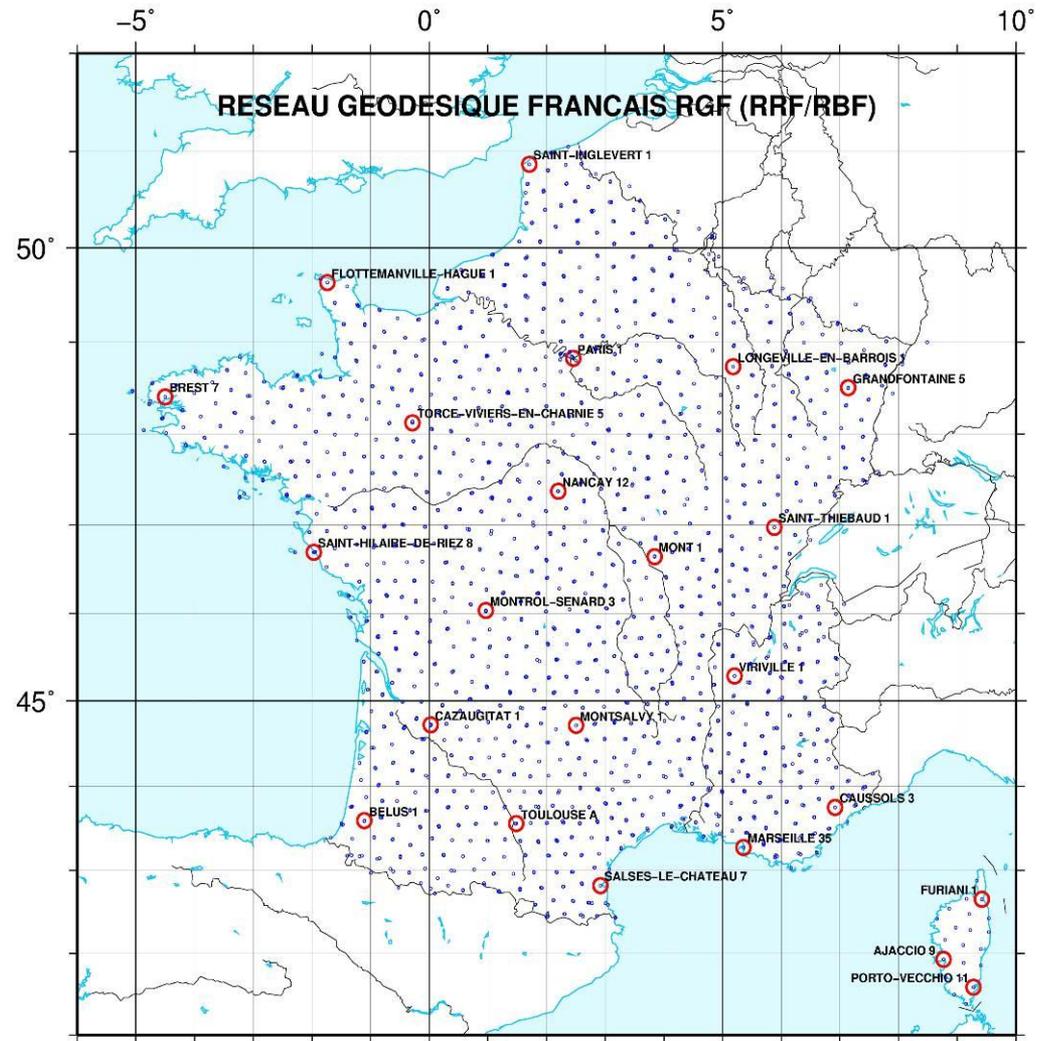
**densification**

**Réseau de Base  
Français (RBF)**

**~1000 sites**

**Observations : 1994-1996**

**PUBLICATION RGF93 : 1997**

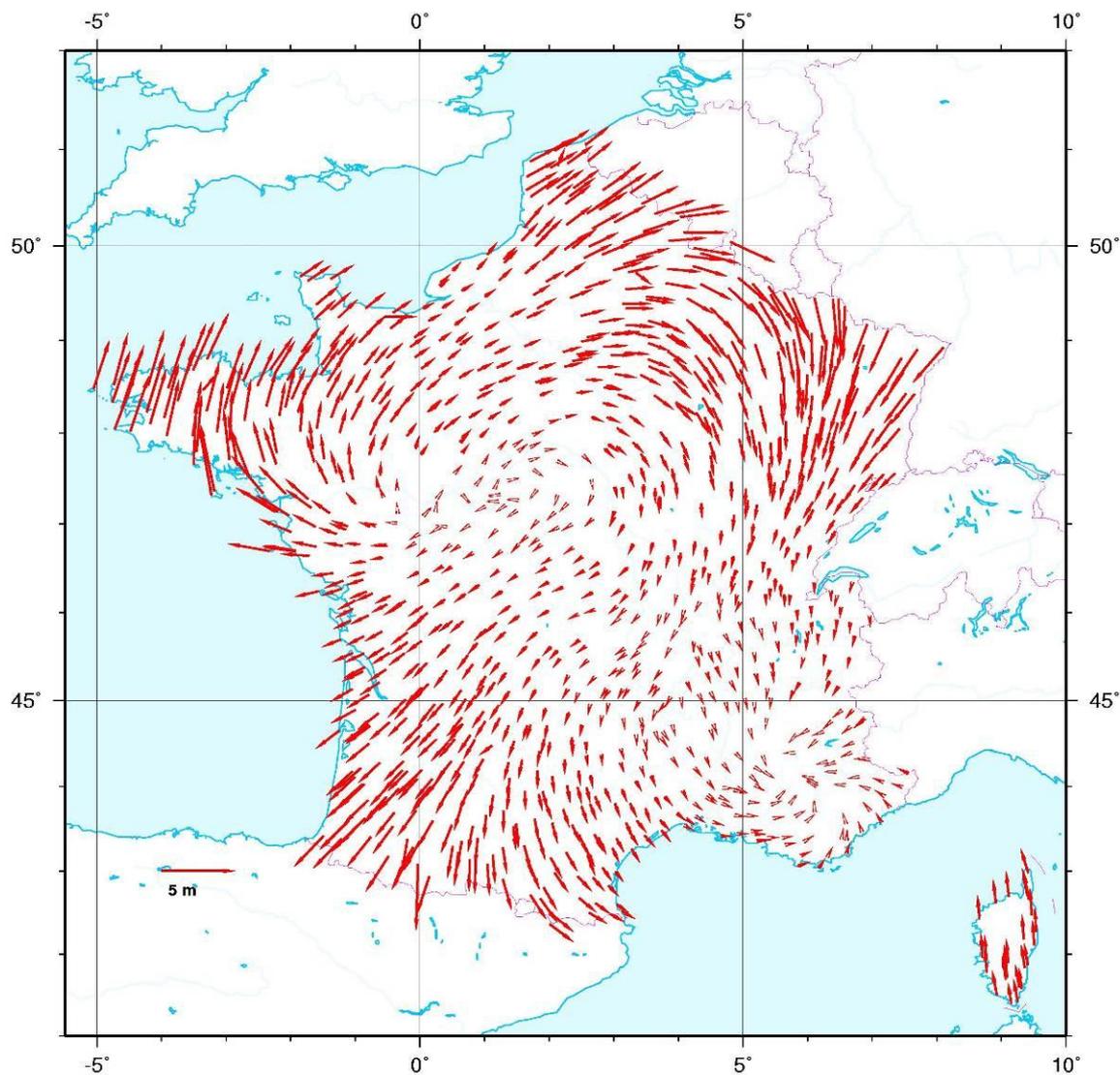




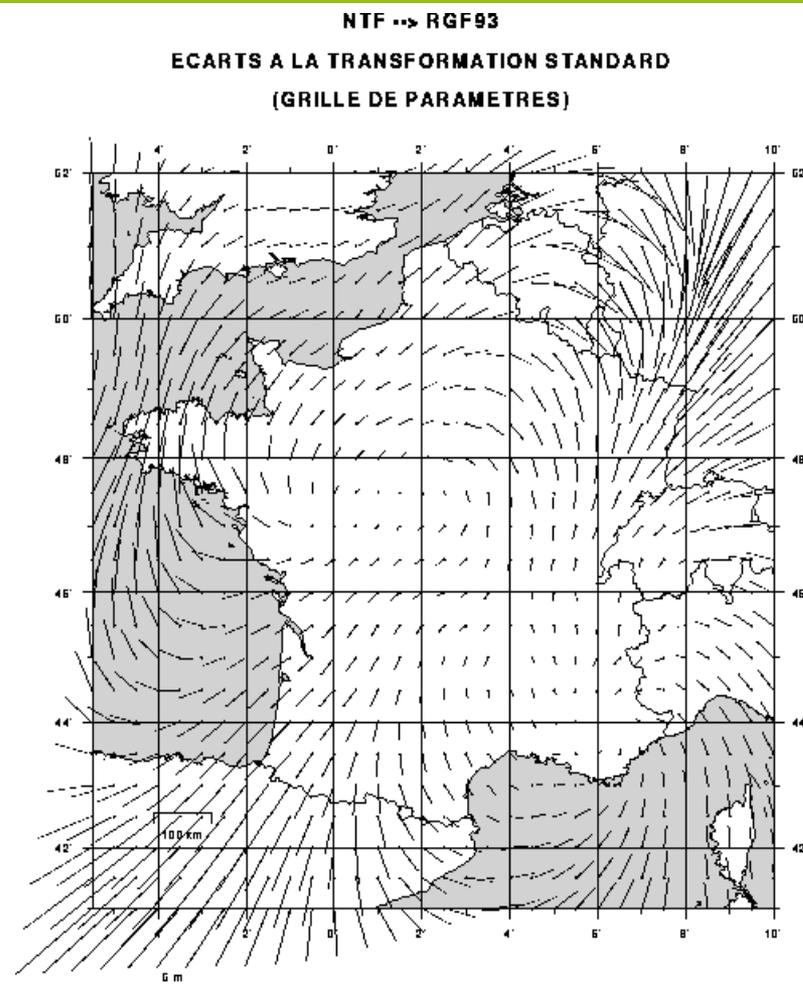
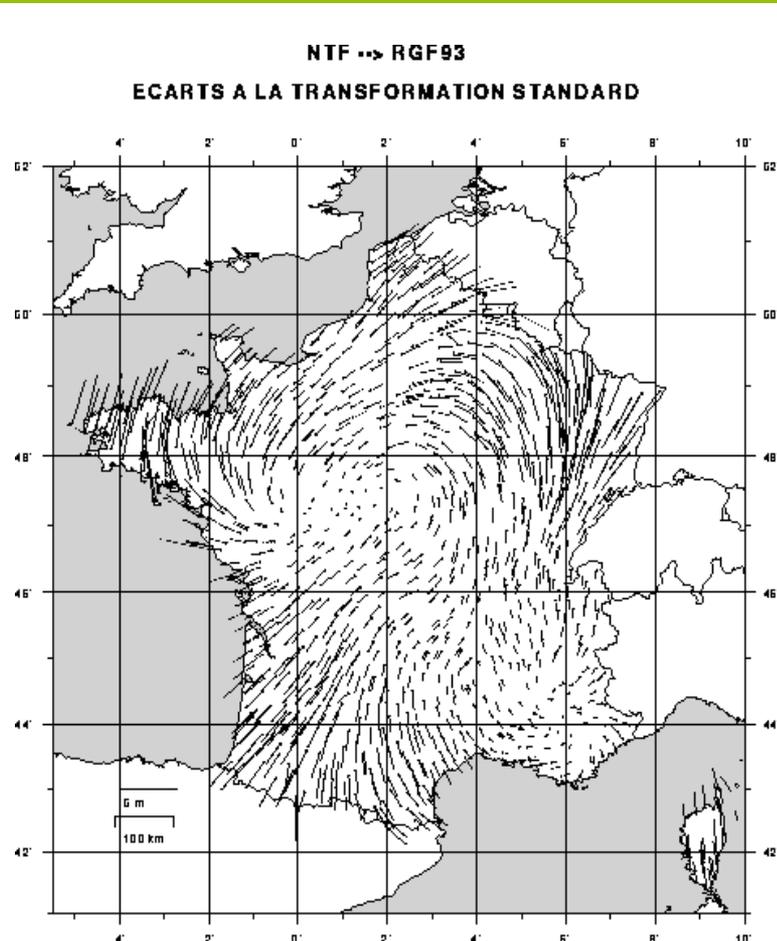
# Co-localisation NTF – RGF93



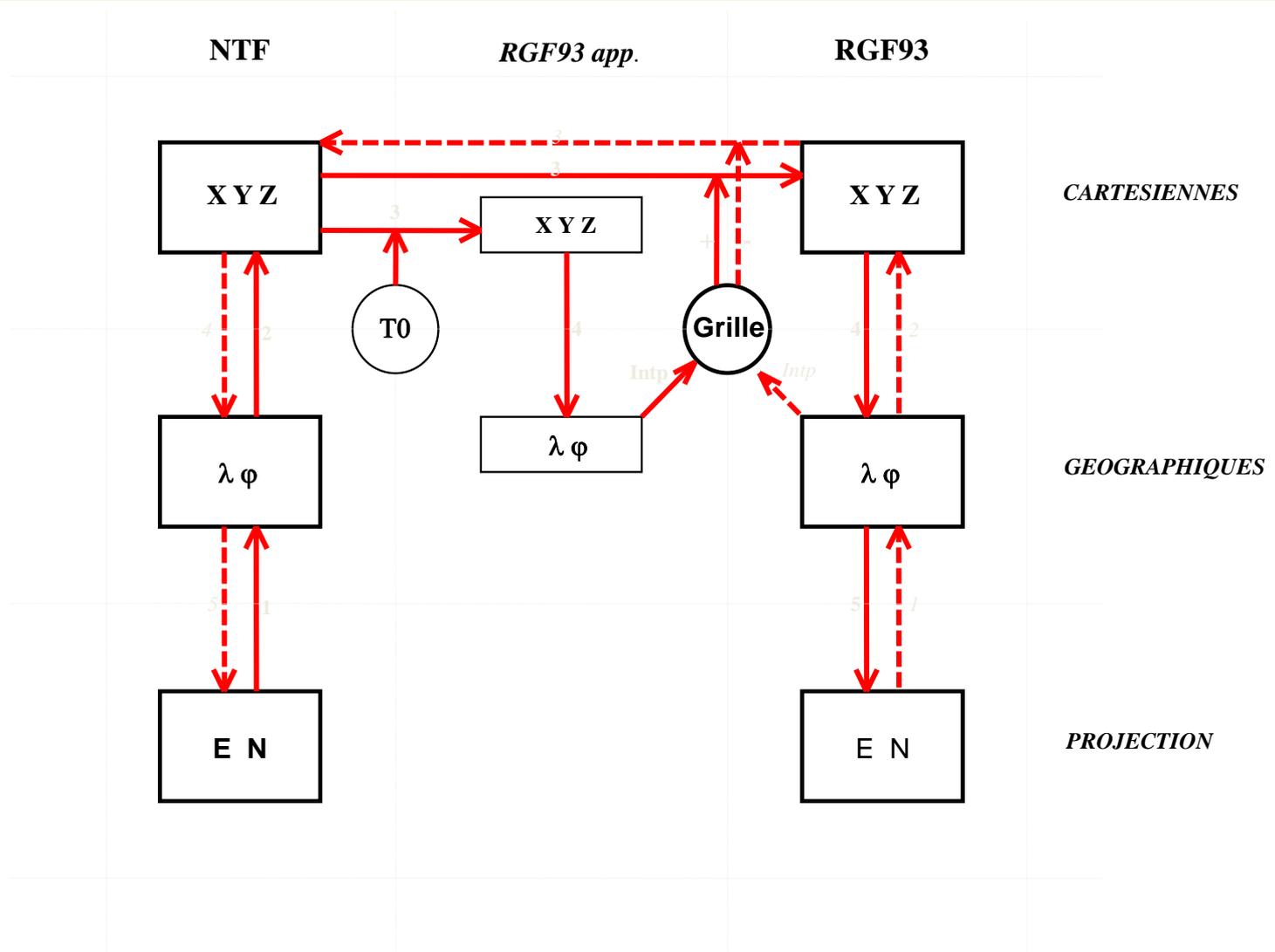
# NTF → RGF93 : écarts à une transformation standard



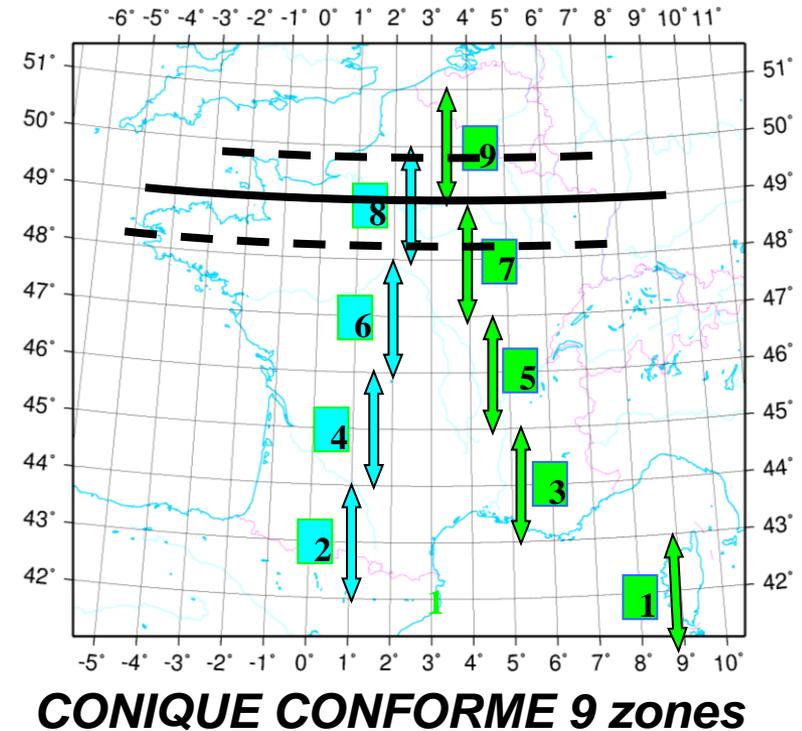
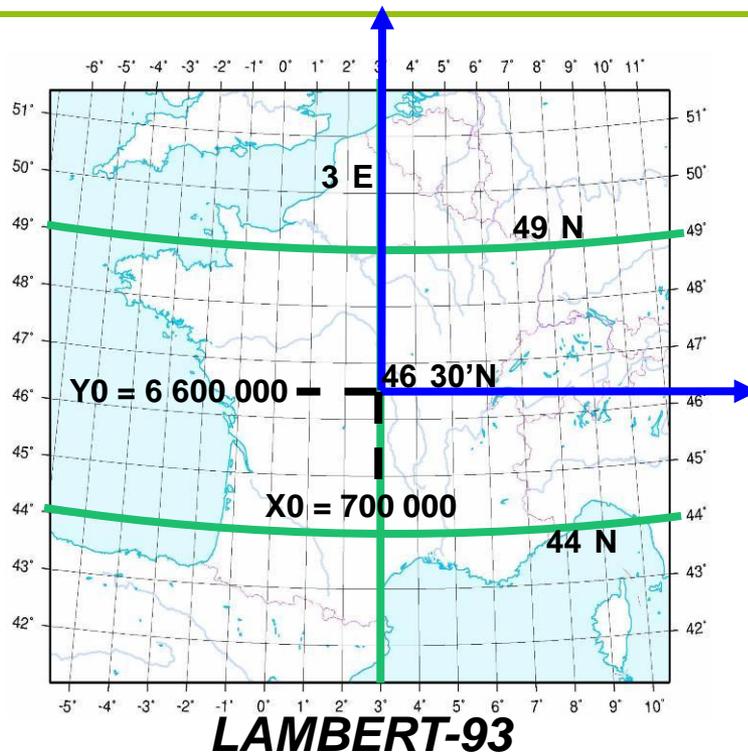
# Transformation NTF RGF93 : modélisation



# NTF ↔ RGF93 : schéma de transformation



# Avec le RGF93, de nouvelles projections



$$\gamma = n (\lambda - \lambda_0)$$

$$R = R_0 \exp \{ -n (\xi - \xi_0) \} = C \exp \{ -n \xi \}$$

$$\xi = \text{Ln} [(1 + \sin \varphi)/(1 - \sin \varphi)]^{1/2} - e \text{Ln} [(1 + e \sin \varphi)/(1 - e \sin \varphi)]^{1/2}$$

$$E = E_s + R \sin \gamma$$

$$N = N_s - R \cos \gamma$$

**Circé France**

A propos de Circé | Transformation standard | Transformation grille

Nom du point

Mode

Système de départ

NTF (Paris) Type Planes Projection Lambert 2 étendu

E(m) 600000 Unité Grades

N(m) 2166660.594

Hauteur Ellipsoïdale 0 Altitude 0 Méridien Origine Paris

Composante Verticale (mètres)

Système altimétrique IGN69

Système d'arrivée

RGF93 Type Planes Projection LAMBERT-93

E(m) 649119.122 Unité Degrés Minutes Secondes

N(m) 6600213.761

Hauteur Ellipsoïdale(m) 47.956 Altitude 0.000 Méridien Origine Greenwich

Convergence des méridiens 0.28531 Altération linéaire -948.9 mm/km

La précision de la transformation est : de 1 à 5cm en plani et de 1 à 5cm en alti

# Le nouveau système : RGF93

A partir du 1er février 2001, le système géodésique légal en France métropolitaine est le RGF93

Système de référence :           - tridimensionnel  
- Liaison au système de référence mondial (ITRS) :  
ETRS89  
- Ellipsoïde : GRS80  
     $a = 6\,378\,137\text{ m}$   
     $f = 1 / 298.257\,222\,101$   
- Méridien origine International (Greenwich)

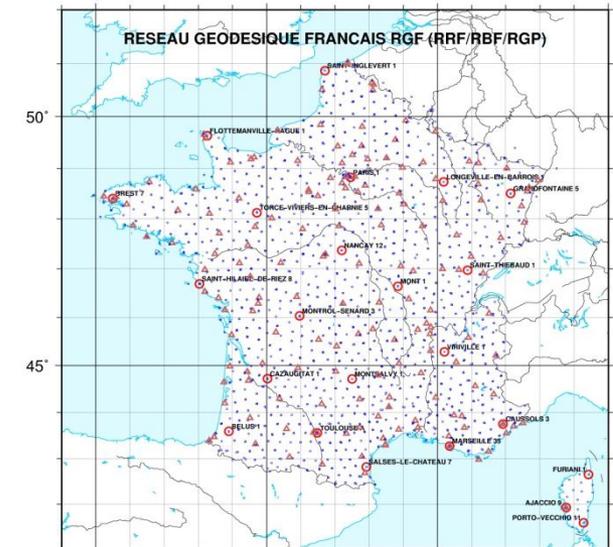
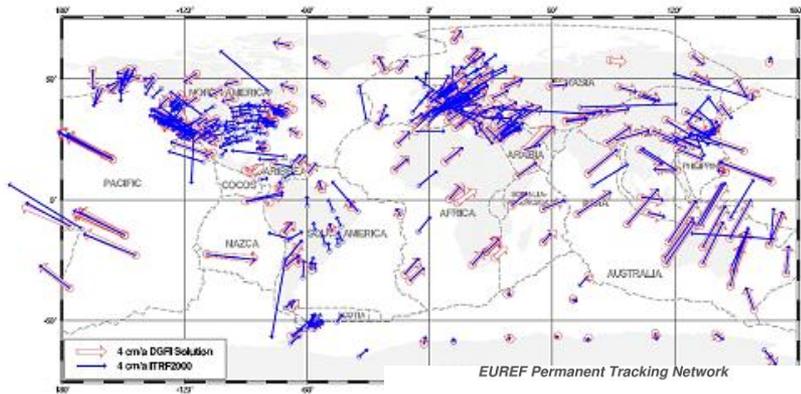
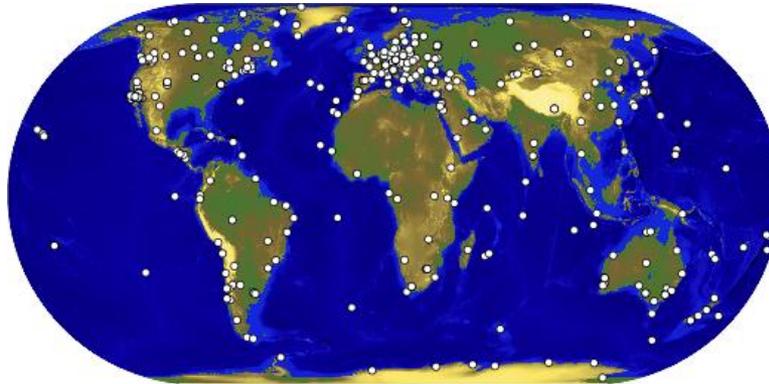
Système de coordonnées :           - longitudes, latitudes en degrés  
sexagésimaux  
- hauteurs ellipsoïdales en mètres  
- Projection : E, N Lambert-93 (m), unique pour la France  
    Conique conforme 9 zones

Accès :           - Réseau de Base Français (RBF) : 1032 sites  
- Réseau GPS permanent (RGP)  
- **Exactitude : 1 à 2 cm (horizontale), 2 à 5 cm (verticale)**

# Réseaux spatiaux actifs

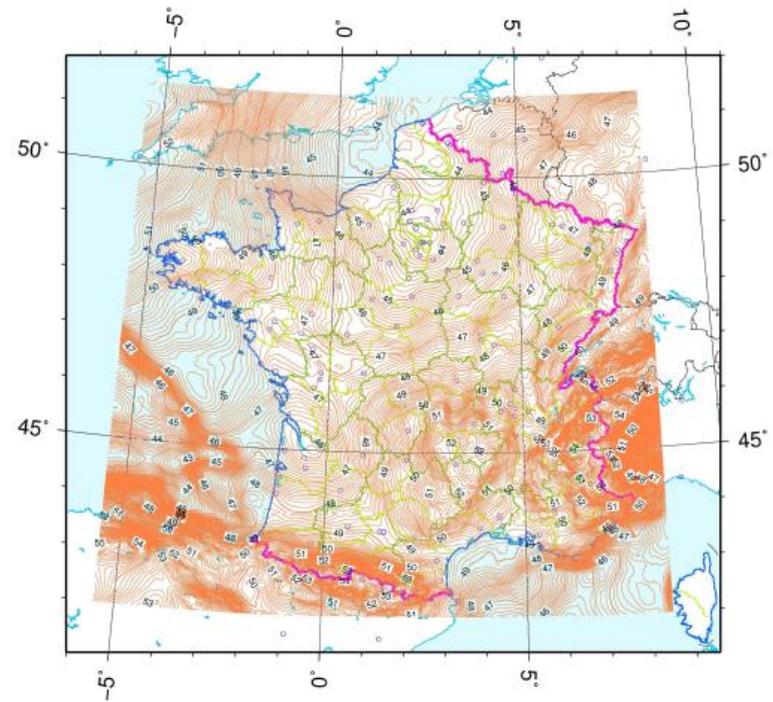
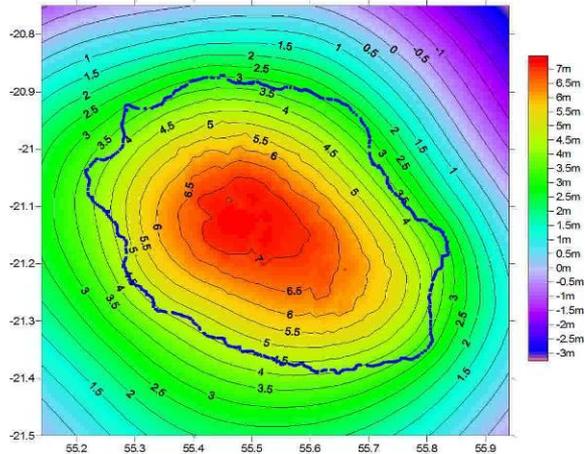
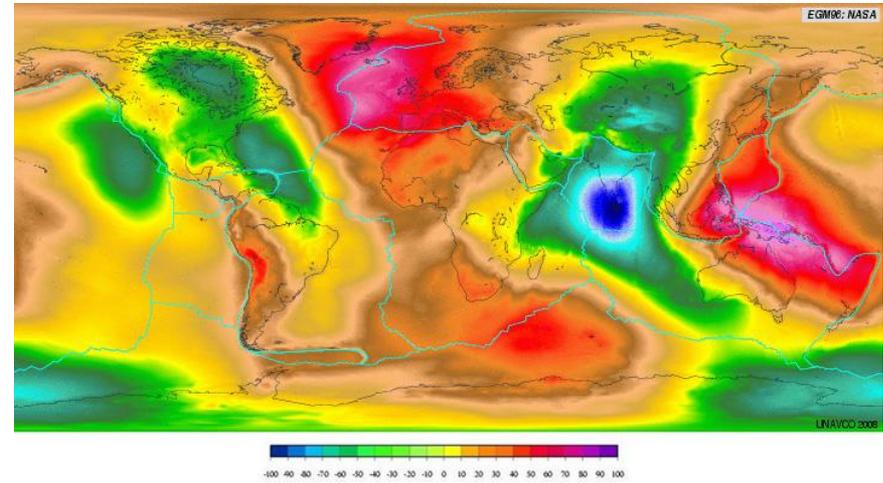
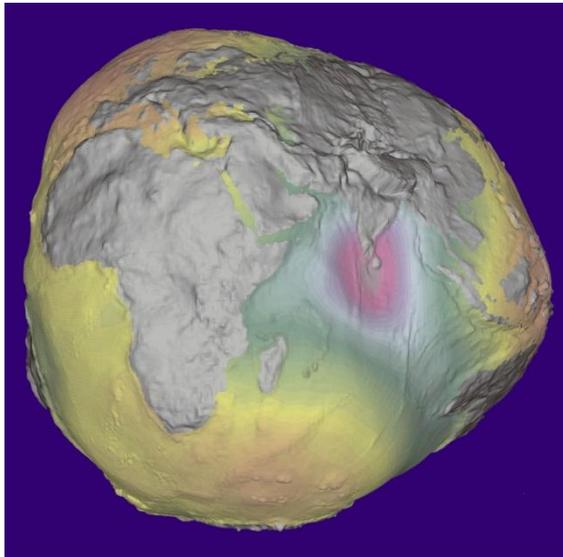


# Du global ... à l'européen ... et au national (1)

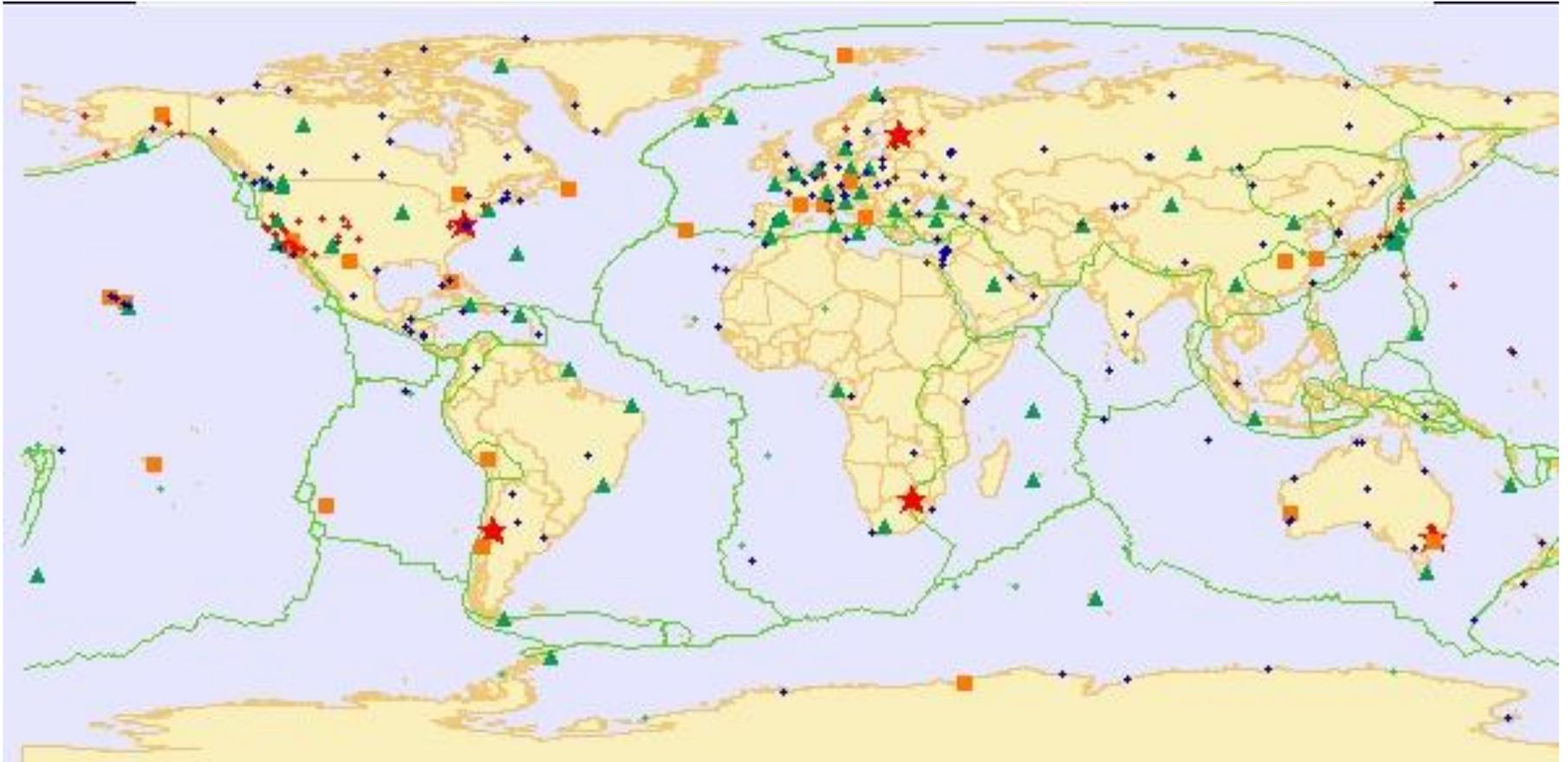


IGN 2012 Feb 9 12:17:41 <http://www.epcb.oma.be/>

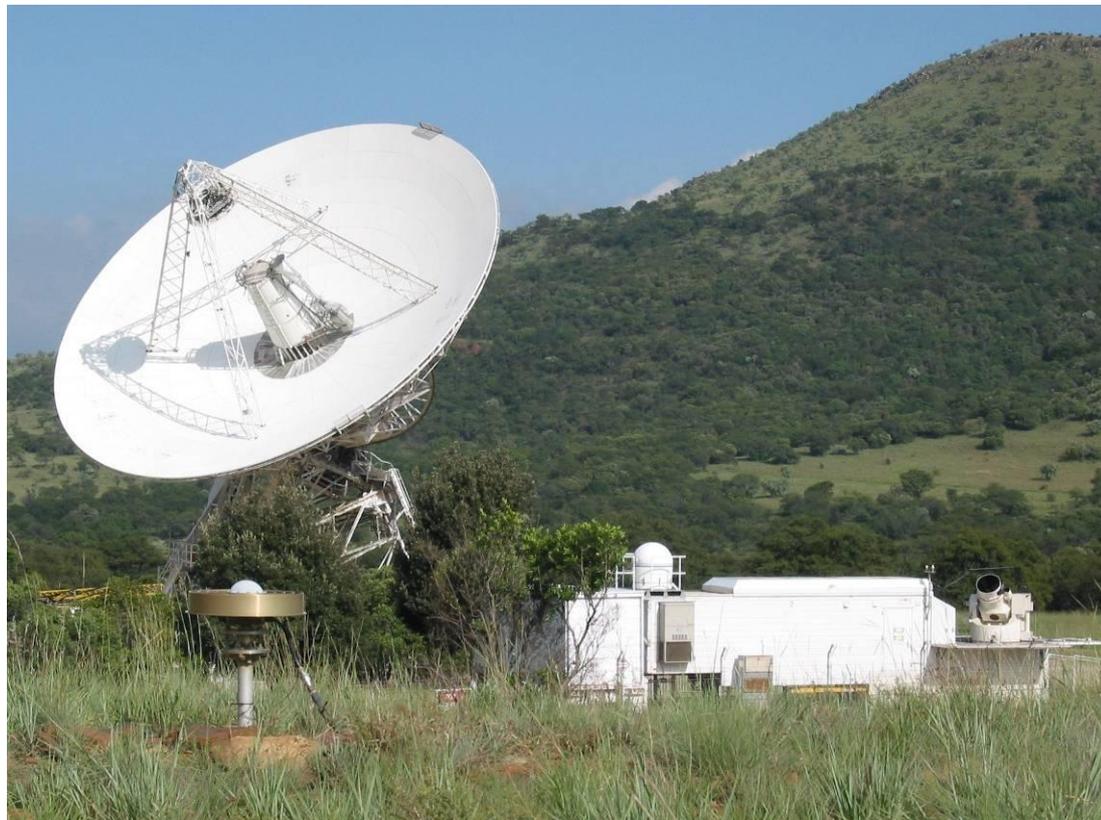
# Du global ... à l'européen ... et au national (2)



# International Terrestrial Reference System ITRF2008



# ITRF : co-localisation des techniques

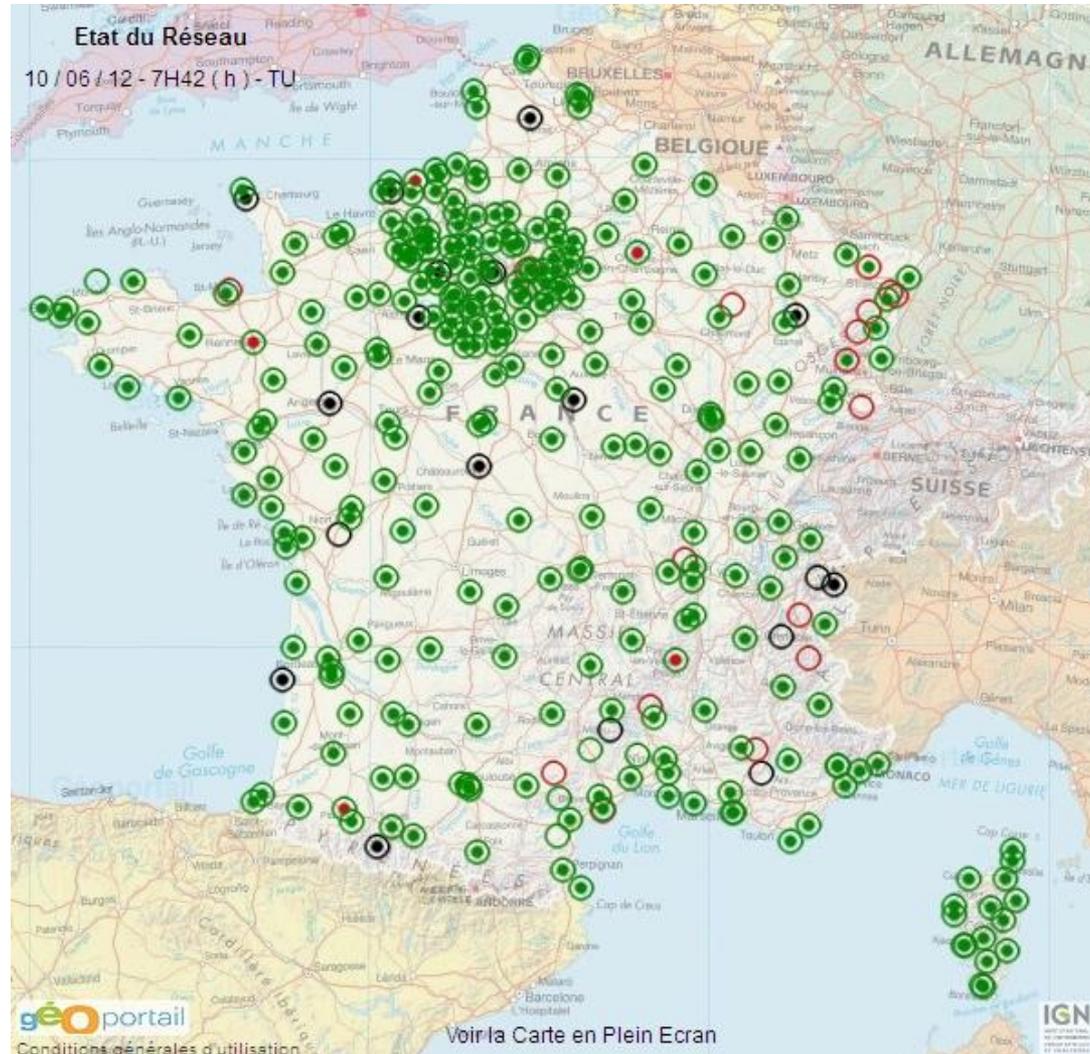


# Réseau GNSS permanent

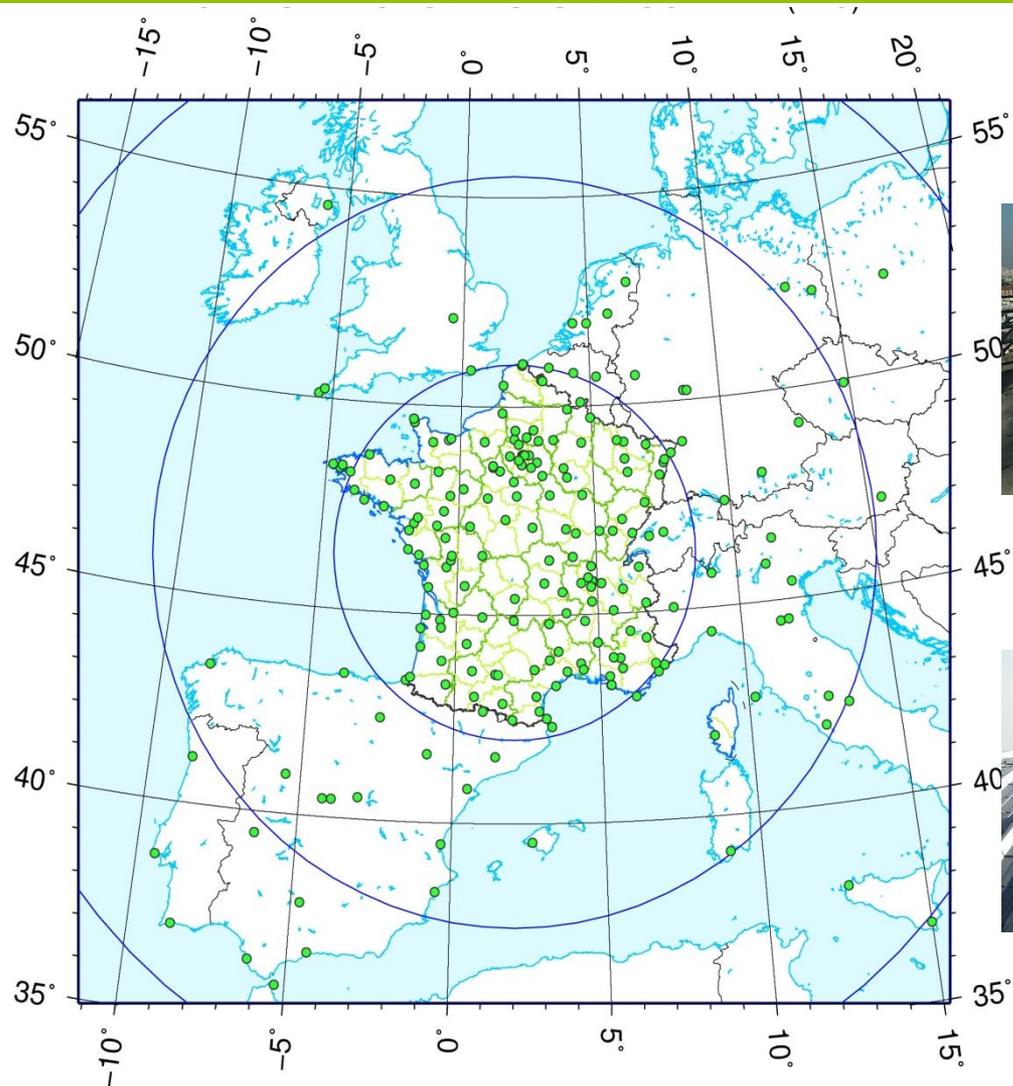
Réseau  
GNSS  
Permanent

01/01/2001 15 st.

13/06/2012 332 st.



# RESEAU GNSS PERMANENT (RGP)

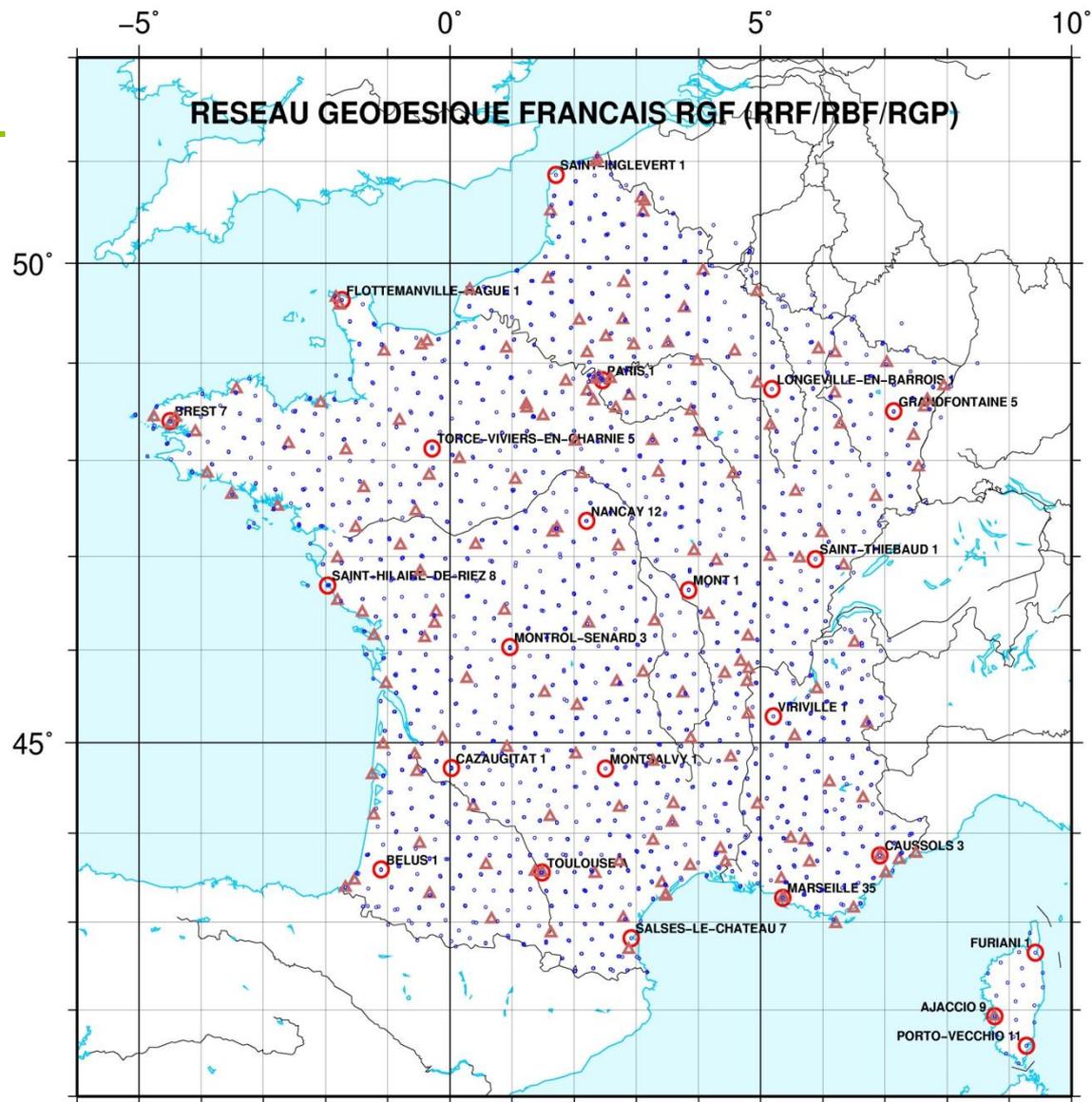


- **Améliorations spectaculaires des techniques et traitements GPS**
- **longues séries temporelles (>10ans pour le RGP)**
- **du centimétrique ( $\leq 5\text{cm}$ ) à l'infra-centimétrique ( $< 1\text{cm}$ )**
- **cohérence RGP et réseaux interpolés**
- **accès + précis aux altitudes (RAF09 post NIVAG)**
- **INSPIRE**
- **interopérabilité transfrontalière**
- **...**

**RGF93**  
**Accès 2009 :**

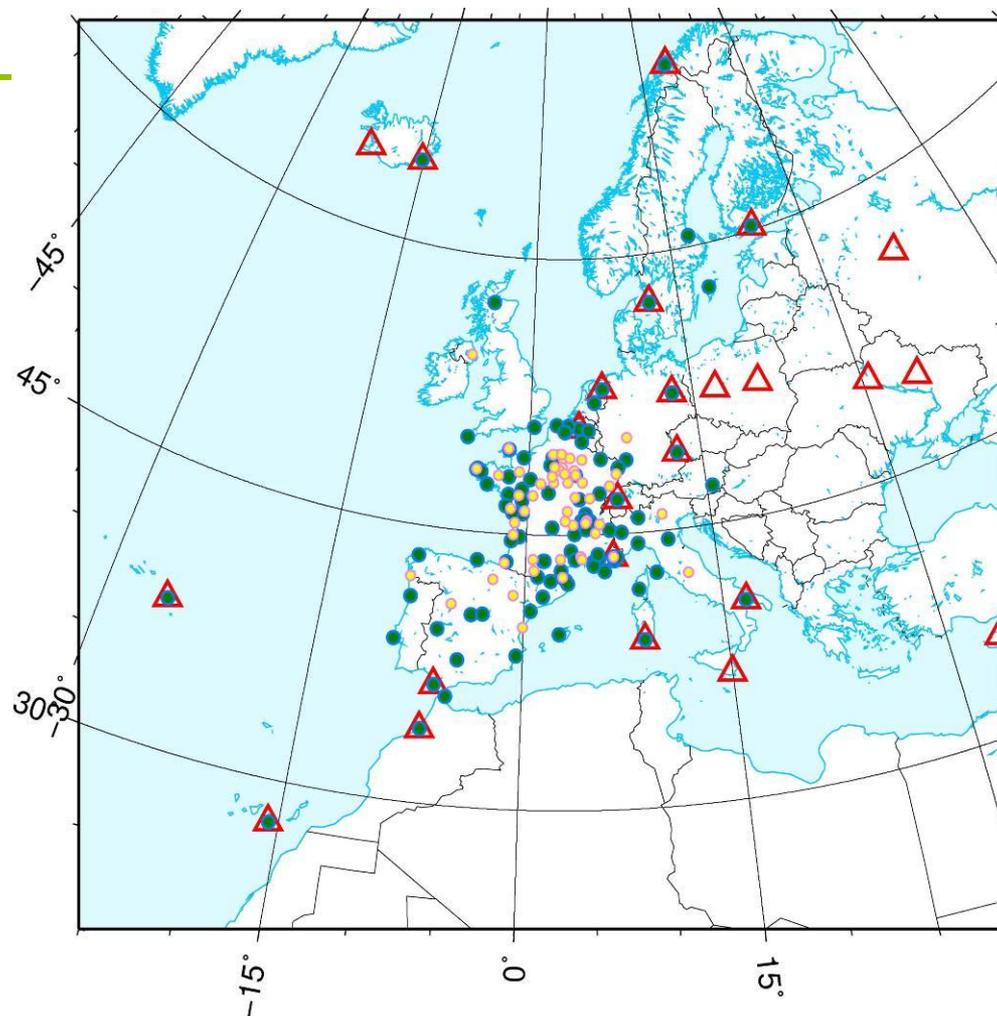
- RBF (dont RRF)
- RGP

**Exactitude  
centimétrique  
< 5 cm**

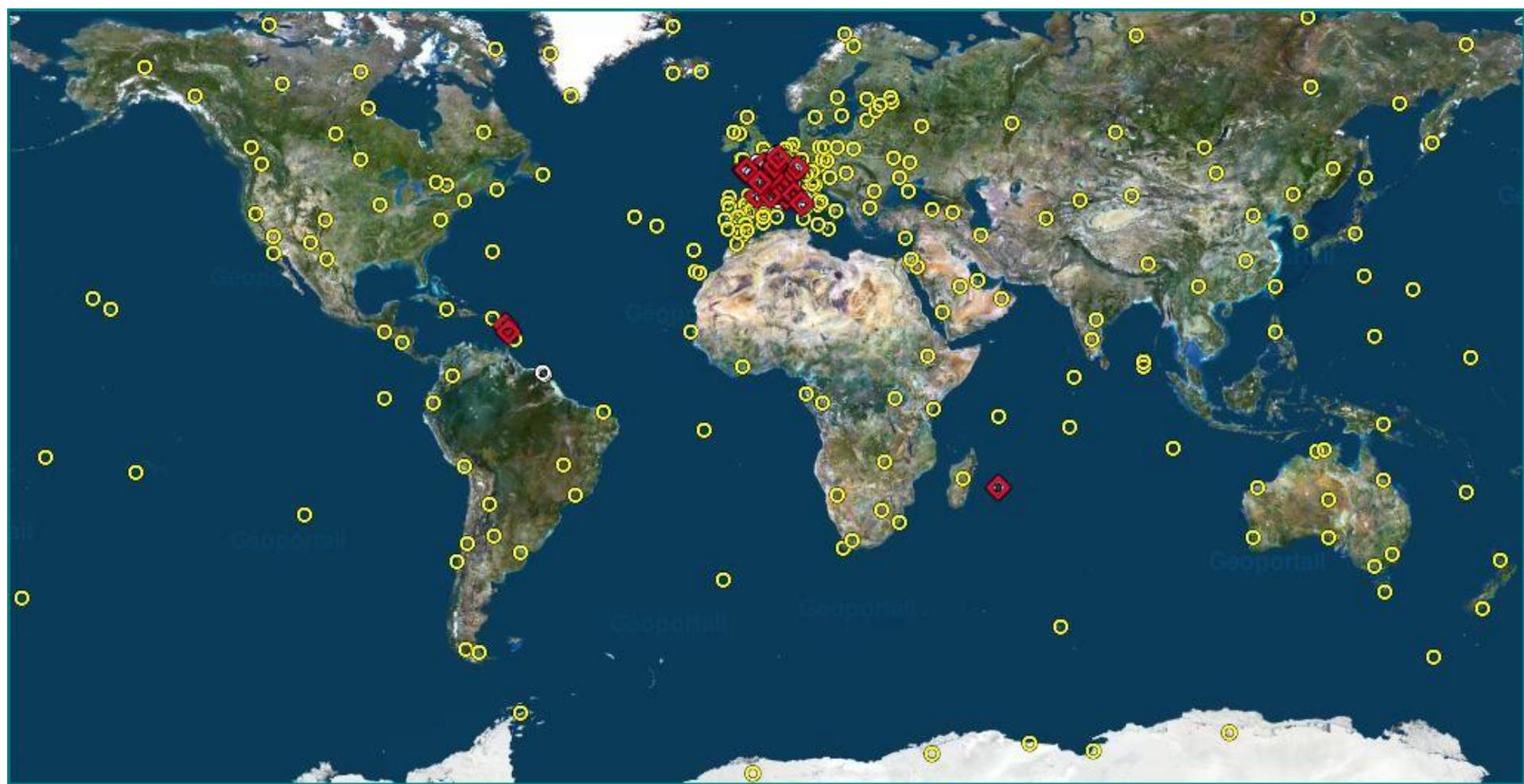


# Re-calcul du RGP 1998-2009

- Bernese 5.0
- Solutions journalières
- Antennes absolues
- Troposhère a priori
- Marées terrestres OK
- Surcharges océan. FES2004
- Contraintes lâches IGS05 (1m)
- ...



# Des solutions journalières continues ...



# Re-calcul du RGP 1998-2009

Coordonnées et vitesses

=> ETRS89 (2009.0)

ITRF2005  
IGS05



ETRS89 (etrf2000)

$$\begin{pmatrix} X_E \\ Y_E \\ Z_E \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{2005} \\ Y_{2005} \\ Z_{2005} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} +0.0531 - 0.0002\Delta t \\ +0.0507 + 0.0001\Delta t \\ -0.0628 - 0.0018\Delta t \end{pmatrix} + (0.8 + 0.08\Delta t)10^{-9} \begin{pmatrix} X_{2005} \\ Y_{2005} \\ Z_{2005} \end{pmatrix} \\ + \mathbf{k} \begin{pmatrix} 0 & 12.672 + 0.792\Delta t & 7.840 + 0.490\Delta t \\ -12.672 - 0.792\Delta t & 0 & -1.296 - 0.081\Delta t \\ -7.840 - 0.490\Delta t & 1.296 + 0.081\Delta t & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{2005} \\ Y_{2005} \\ Z_{2005} \end{pmatrix}$$

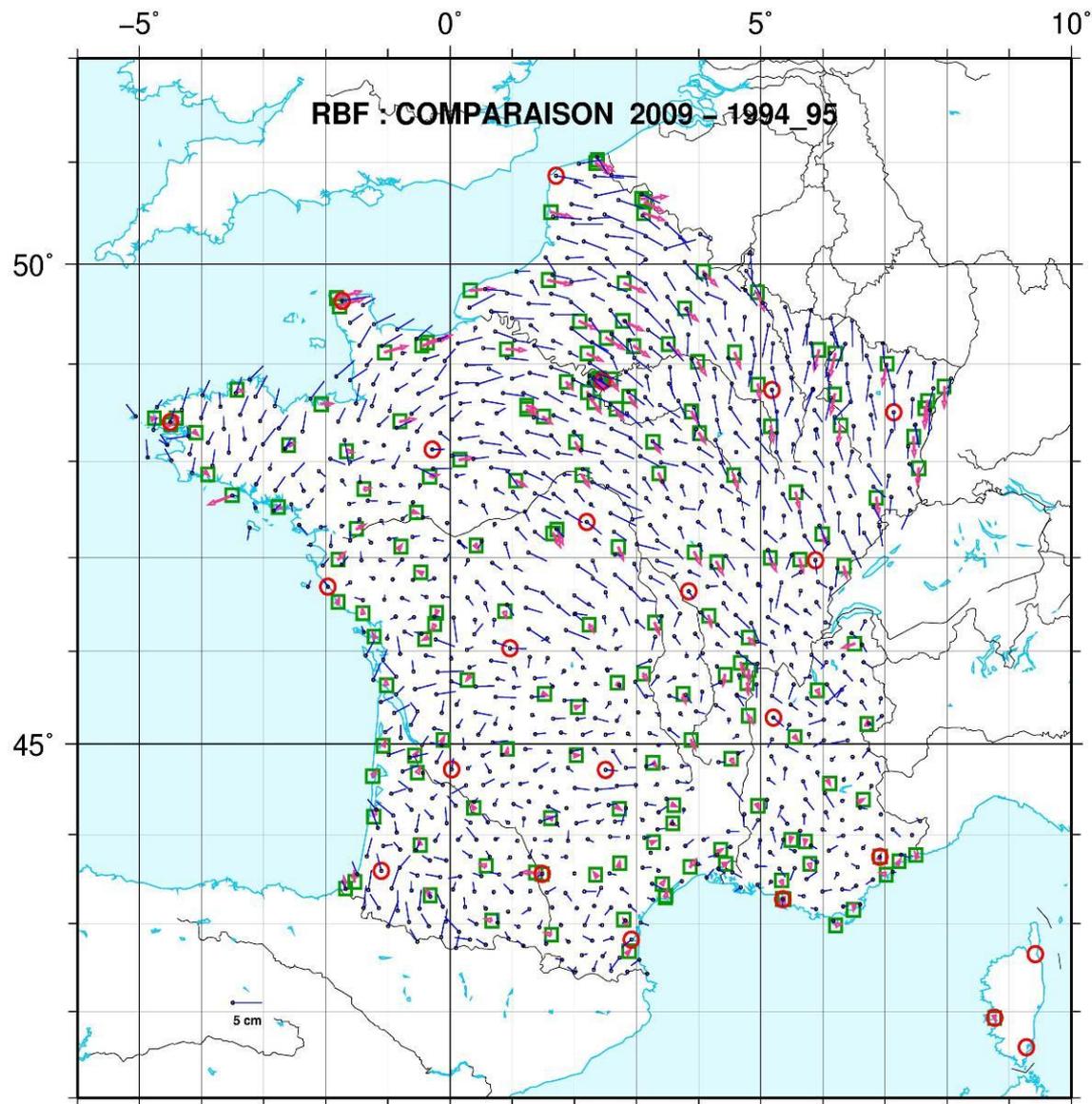
$$(\Delta t = t - 2005 \quad \mathbf{k} = \pi/180/3600000)$$

t = 2009.0

# réfection RBF (2000-2009)

Calcul 2009 (BSW5.0)  
Alignement RGP2009

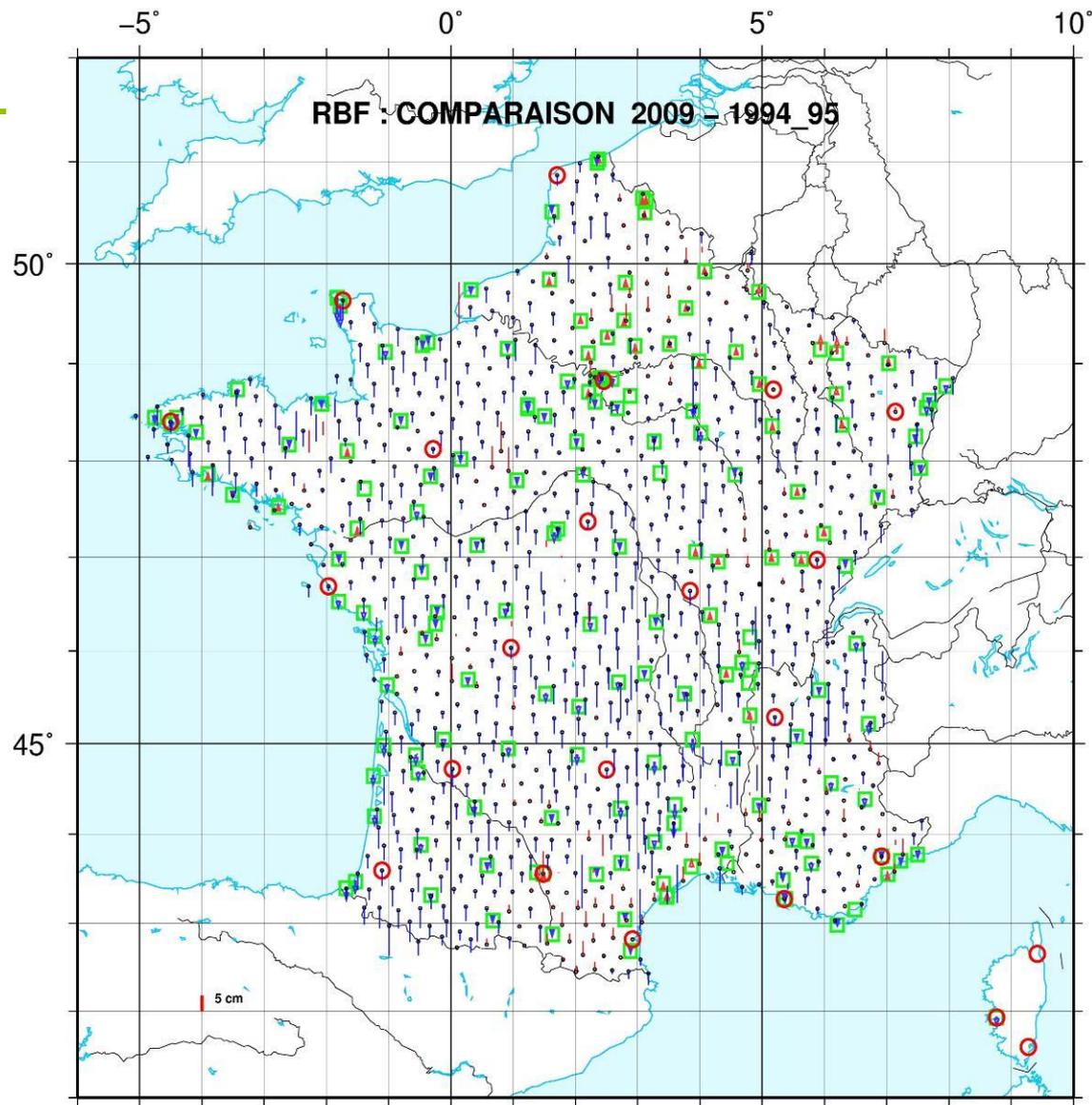
Écart horizontal



# réfection RBF (2000-2009)

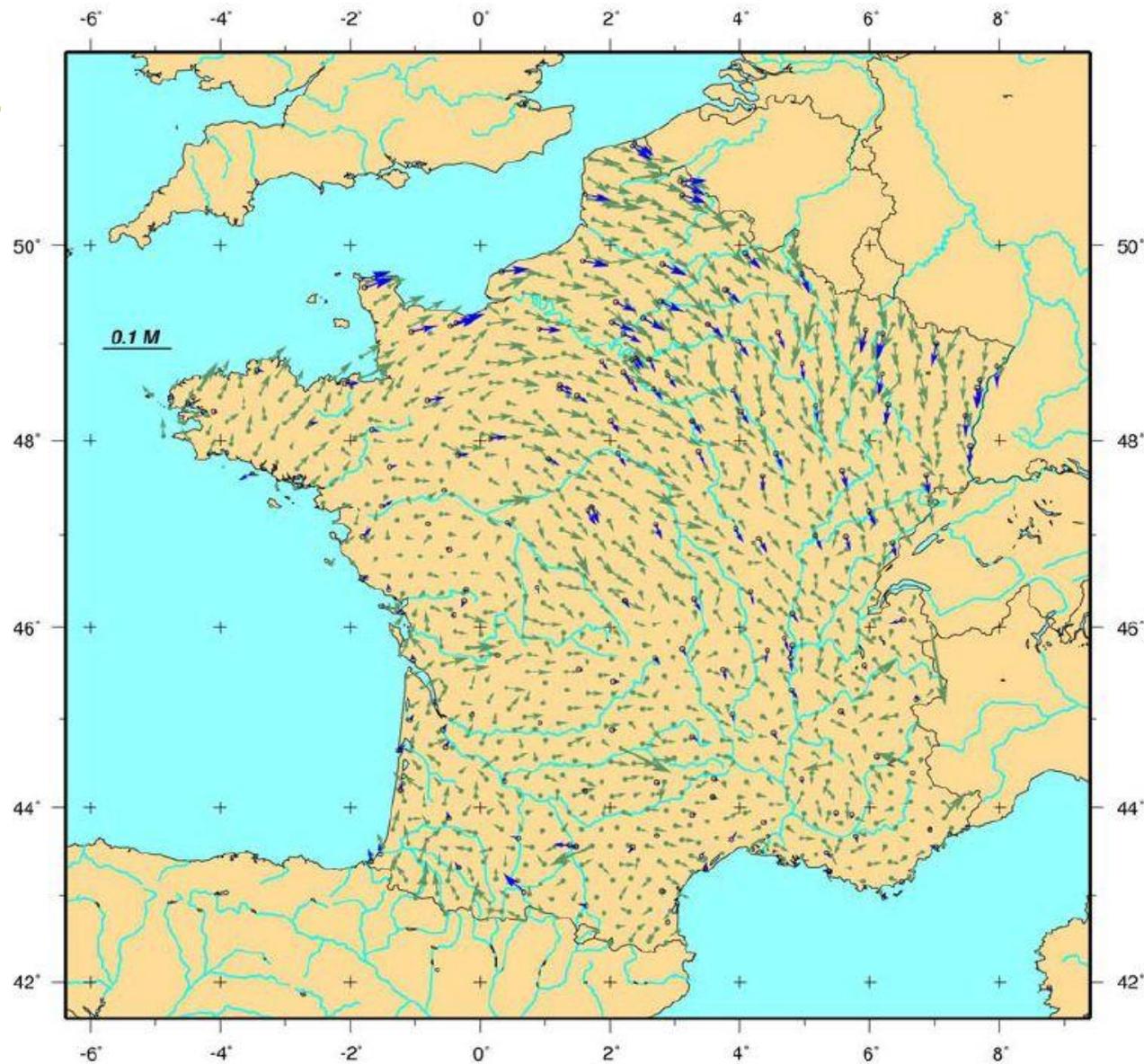
Calcul 2009 (BSW5.0)  
Alignement RGP2009

Écart vertical



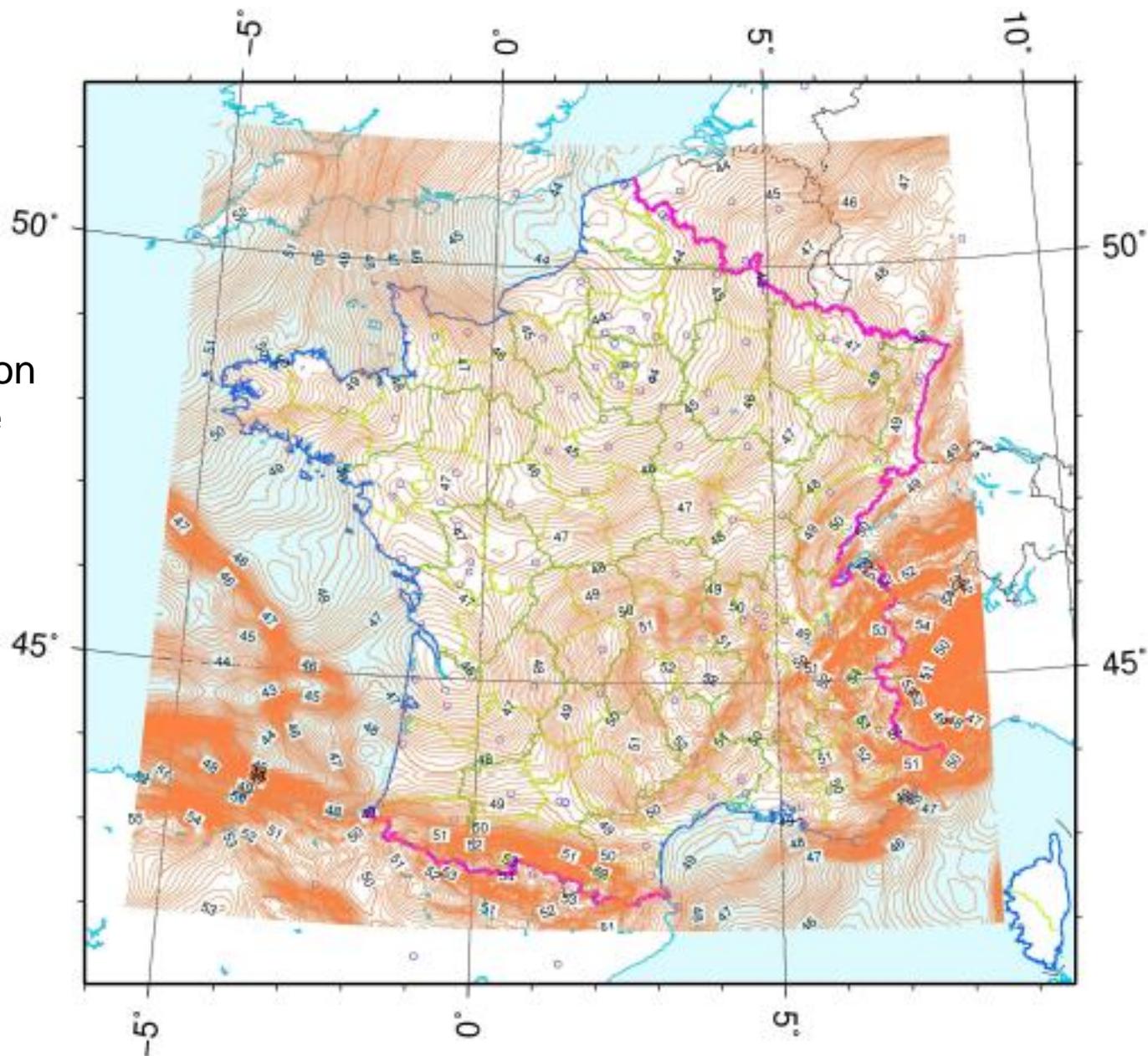
# Rénovation RGF93 18/08/2010

Écarts planimétriques

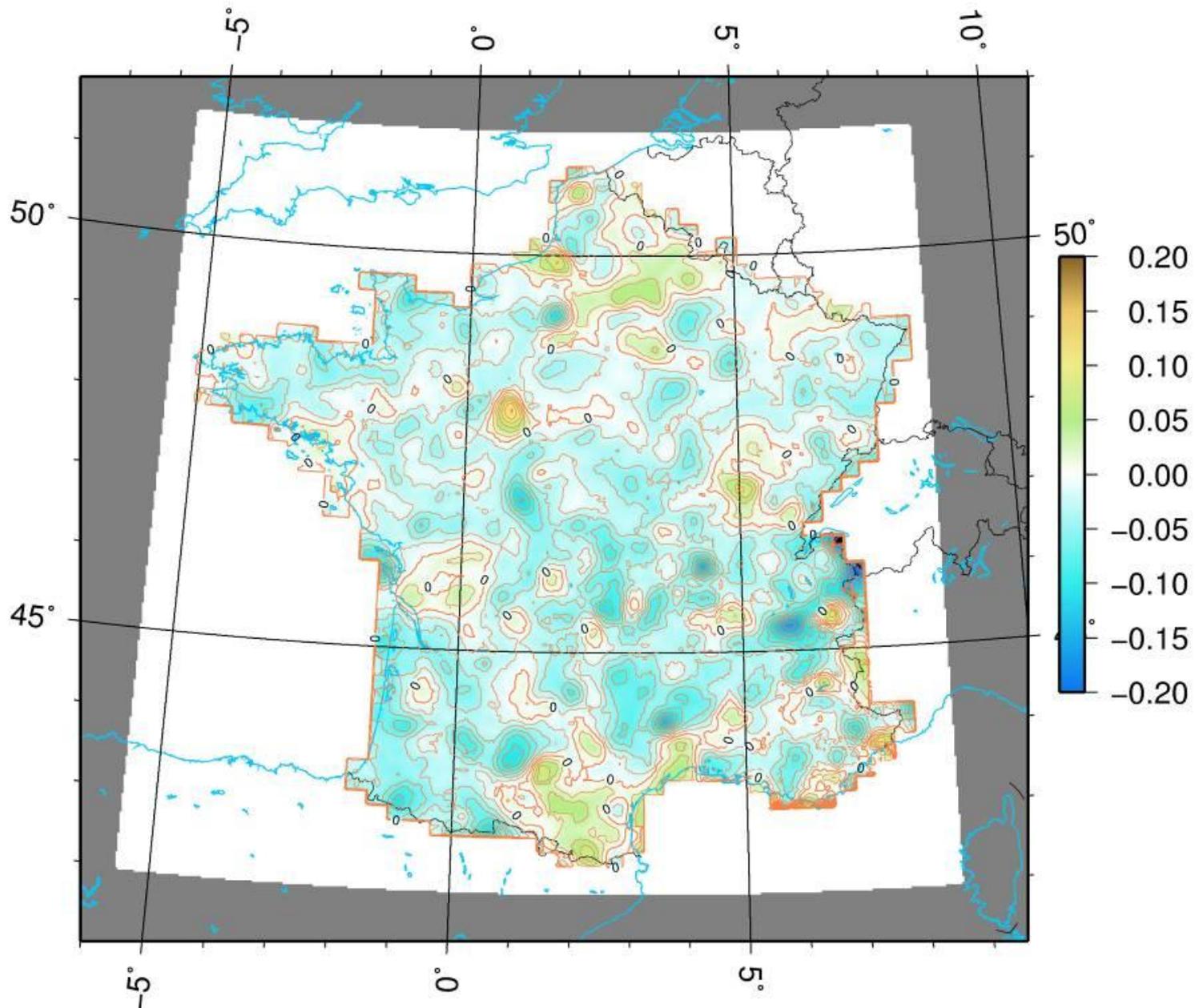


Grille de  
conversion  
d'altitude

RAF09



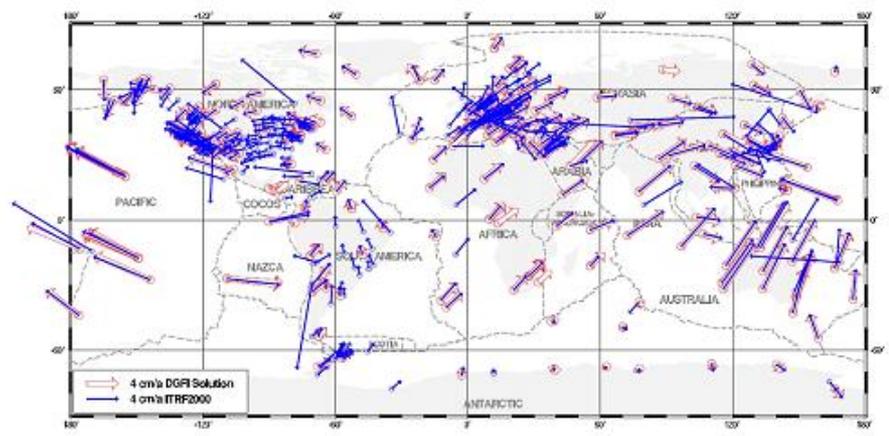
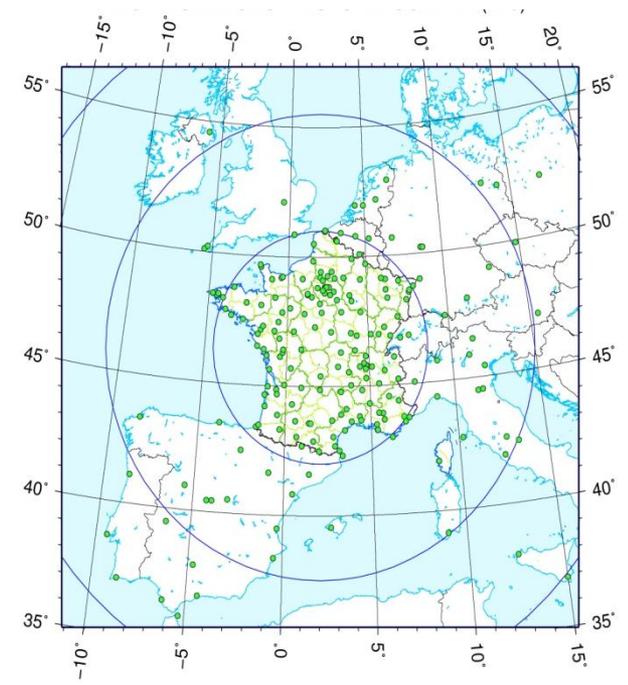
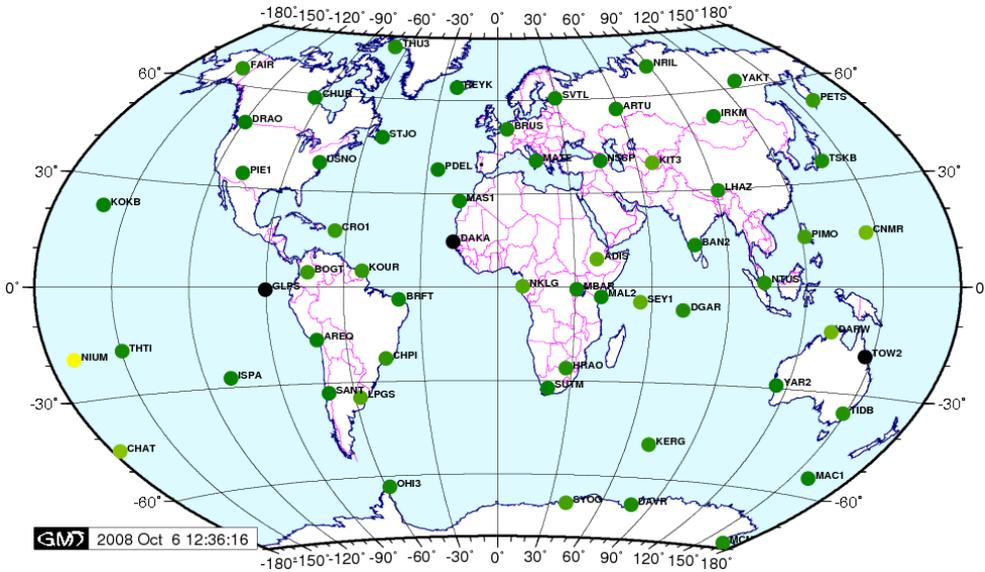
Ecart  
RAF98  
RAF09



*Et demain ...*

**PPP  
GALILEO**

...





## REGINA : REseau Gnss pour l'IGS et la Navigation (CNES / IGN)



MERCI

