

JOURNEE GEODESIE

14 Octobre 2010

Evolution des références verticales

Françoise Duquenne

Sommaire

- Introduction
- Référence verticale : définitions
- Les références verticales nationales
- Le nivellement par GNSS
- Participation à la référence verticale européenne
- Participation au niveau international
- Perspectives

Introduction

L'altitude est la hauteur par rapport au niveau moyen des mers
notion commune et simpliste qu'il faut préciser

Qu'est-ce que le niveau moyen des mers?

- surface d'eau en équilibre : équipotentielle particulière du champ de pesanteur
- définie comment, où et quand ?

Comment y accéder quand on est sur les continents?

Pourquoi a-t-on toujours besoin de l'altitude alors que l'on sait déterminer avec précision la hauteur au dessus d'un ellipsoïde

- faire couler les égouts dans le bon sens
- éviter les flaques d'eau sur les autoroutes
- bien identifier les zones inondables

-

Référence verticale : définition

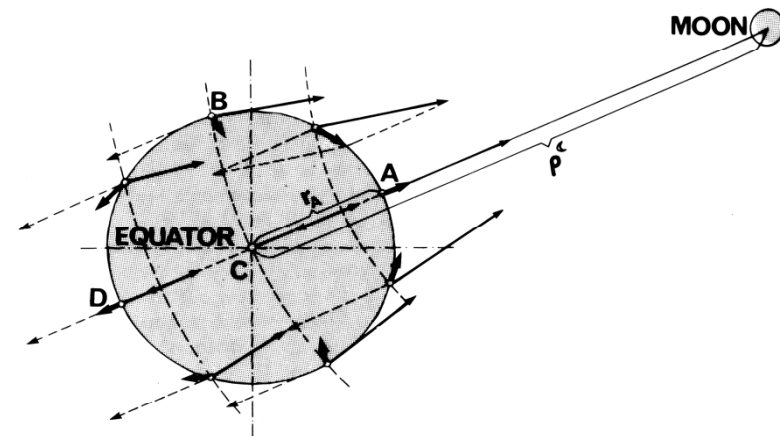
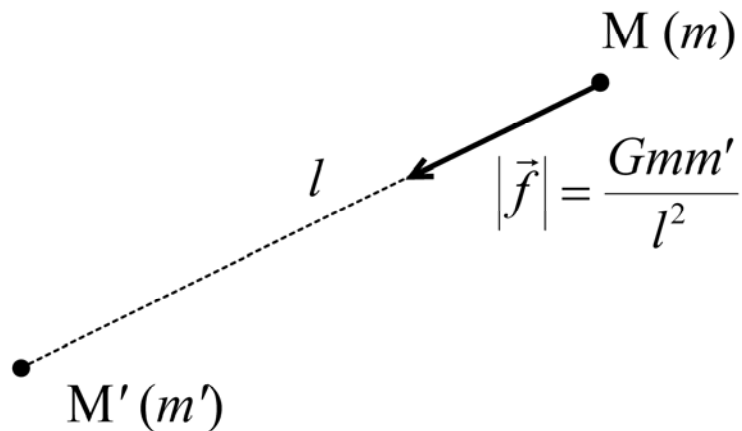
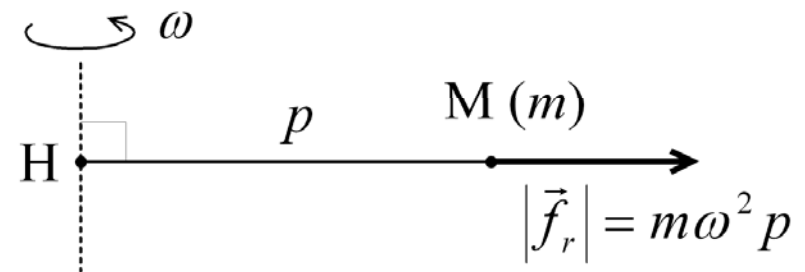
- La gravité
- La marée
- Equipotentielle, ligne de force, géoïde
- Champ de pesanteur normal
- Altitude
- Mesure des différences de potentiel
- Définition générale rigoureuse de l'altitude
- Les types d'altitude
- Système de référence vertical (SRV)
- Critère de qualité d'une référence verticale

La gravité (rappel)

Synonymie : gravité = pesanteur

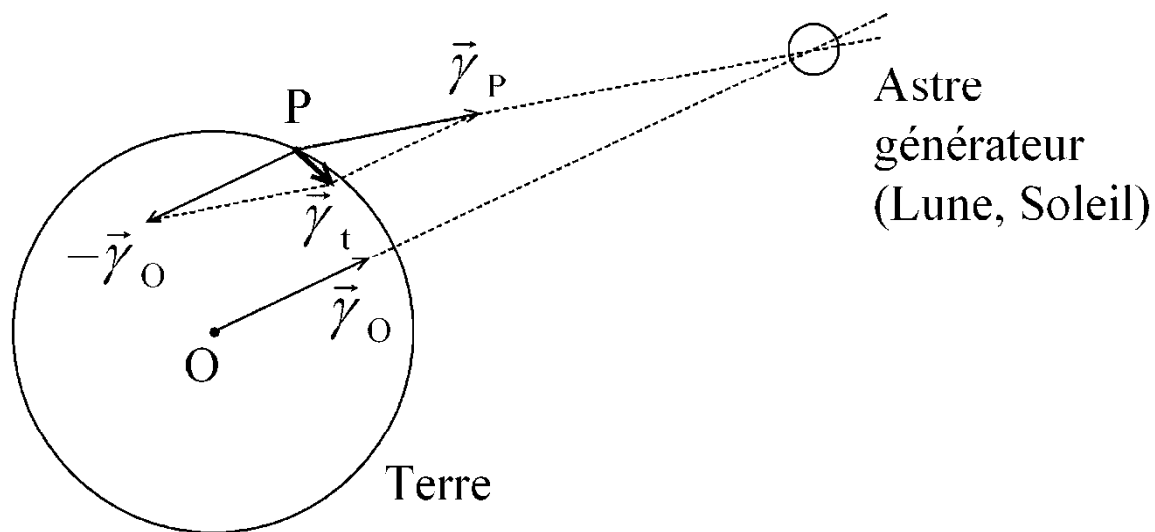
Les trois composantes de la force de pesanteur :

- Gravitation exercée par la Terre
- Force centrifuge
- Marée



Ref[13]: Duquenne H. 2008

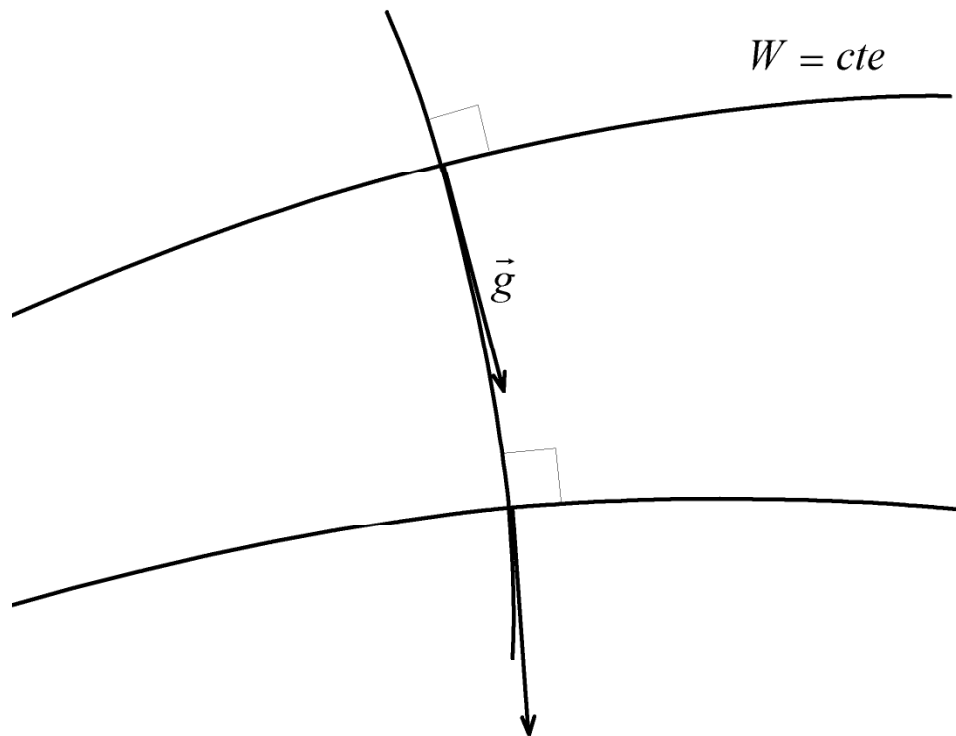
- Accélération de marée :
Différence entre les accélérations d'attraction exercées par l'astre générateur en P et en O
- Terme “constant” (indépendant du temps), dépendant de la latitude
- Termes périodiques



Valeur maximale de
la partie périodique :
 $2,8 \mu\text{ms}^{-2}$

Ref [13]: Duquenne H. 2008

Champ de pesanteur Terrestre



. Verticale

- Direction du vecteur pesanteur
- Orthogonale à l'équipotentielle, tangente à la ligne de force
- Matérialisation: pendule, nivelle

. Géoïde

- Surface équipotentielle du champ de pesanteur coïncidant « au mieux » avec le niveau moyen des océans (marégraphie, altimétrie satellitaire)
- Potentiel sur le géoïde :

$$W = W_0$$

Ref [13]: Duquenne H. 2008

- **Définition**

Modèle du potentiel terrestre tel que :

- une de ses surfaces équipotentielles est un ellipsoïde géodésique géocentrique E_b
- potentiel normal sur E_b = potentiel réel sur le géoïde
- E_b tourne à la même vitesse que la Terre
- masse de l'ellipsoïde = masse Terre + atmosphère

- **Notation :**

Potentiel normal en M :

- **Propriété :** $U(M)$

- **Utilisation :** $M \in E_b \Rightarrow U(M) = W_0$

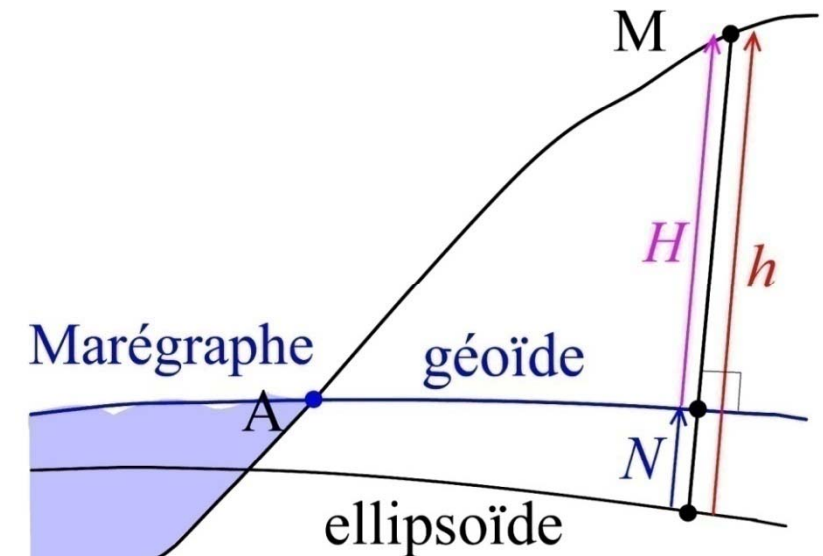
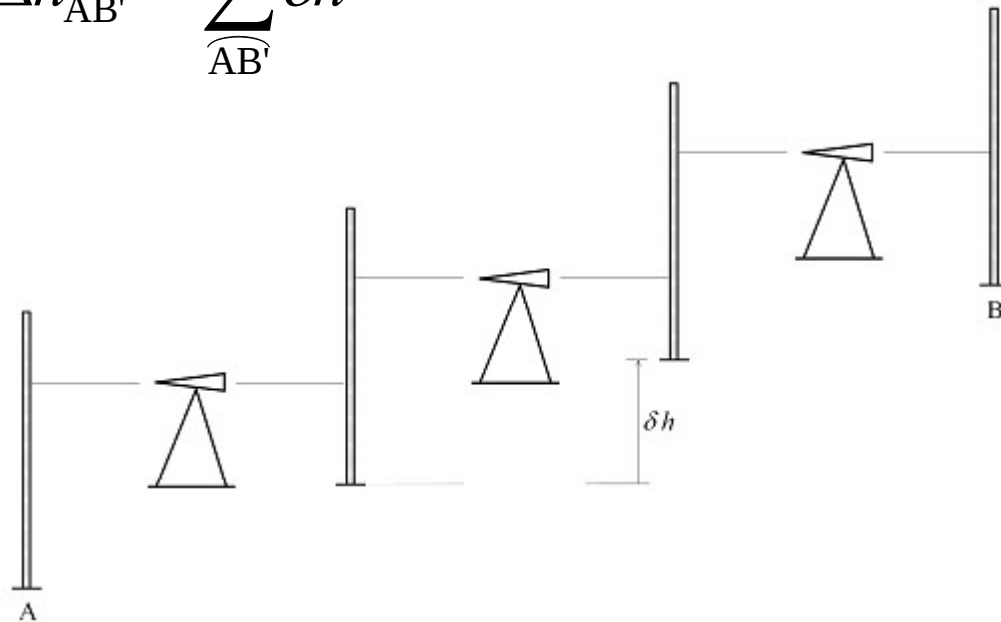
- approximation du potentiel réel
- solution approchée aux problèmes de géodésie physique
- définition de certains types d'altitudes
- Exemples d'ellipsoïdes : Hayford , GRS80

Ref[13]: Duquenne H. 2008

Altitude

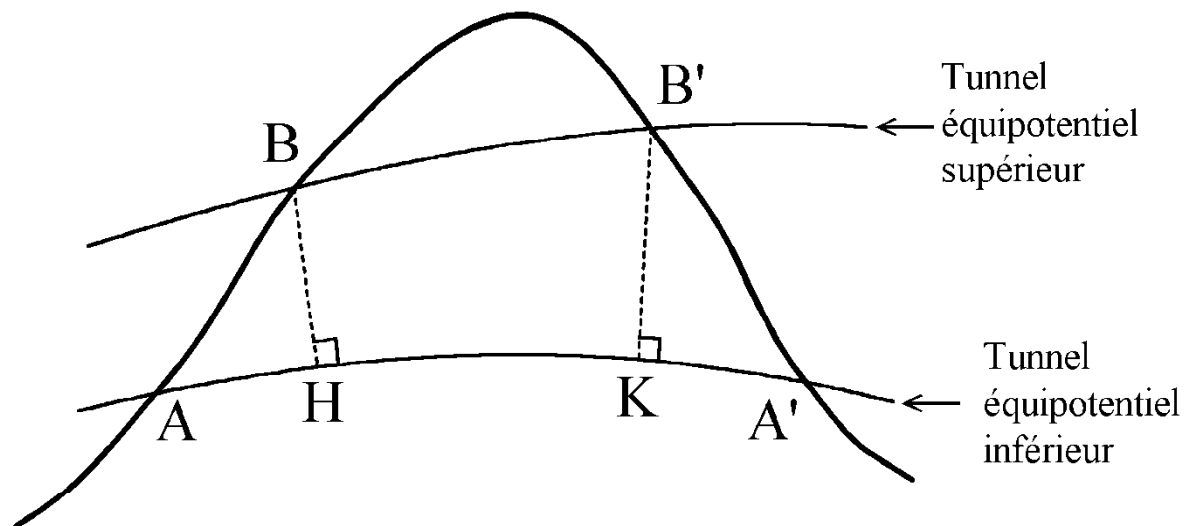
- Sens commun :
 - hauteur au dessus du niveau de la mer
- Détermination par nivellement:
 - cumul de dénivelées géométriques :

$$\Delta h_{AB'} = \sum_{\overline{AB'}} \delta h$$



Ref [13]: Duquenne H. 2008

- Le paradoxe des tunnels équipotentiels :



Dénivelées :
 $HB \neq KB'$
(dépendent du chemin suivi)

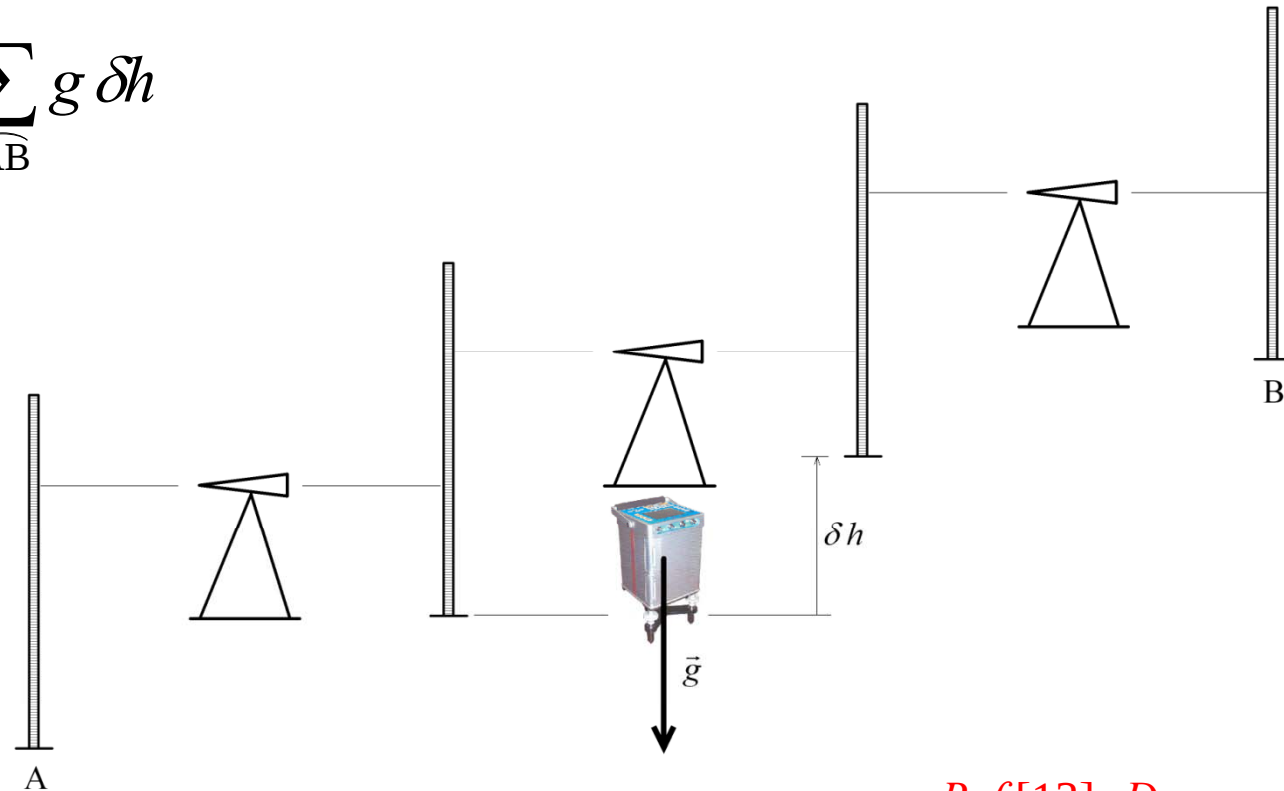
Ref[13]: Duquenne H. 2008

Mesure des différences de potentiel

- **Combinaison du nivellement et de la gravimétrie :**

$$W_B - W_A = \int_{AB} \vec{g} \cdot d\vec{s} \quad (\text{indépendant du chemin suivi})$$

$$W_{\text{B}} - W_{\text{A}} = - \sum_{\overline{\text{AB}}} g \, \delta h$$



Ref[13]: Duquenne H. 2008

Définition générale rigoureuse de l'altitude

$$H_{(M)}^{(*)} = - \frac{W(M) - W(A)}{\gamma^{(*)}(M)}$$

(*) = type d'altitude

A = point fondamental (marégraphe) $W(A) \approx W_0$

M = point quelconque

$W(M) - W(A)$ = différence de potentiel / point fondamental

$\gamma_{(M)}^{(*)}$ = pesanteur théorique, ou modèle, ou moyenne

- Cette définition rend l'altitude indépendante du chemin suivi lors des opérations de nivellement
- En choisissant judicieusement $\gamma^{(*)}$, l'altitude peut être très proche de la « hauteur au dessus du niveau de la mer »

Ref[13]: Duquenne H. 2008

Les différents types d'altitude

- La côte géopotentielle

$$\gamma^{(G)}(M) = 1 \quad C(M) = -(W(M) - W(A))$$

- L'altitude dynamique

$$\gamma^{(D)}(M) = \gamma(\varphi = 45^\circ, h = 0) \quad H^{(D)}(M) = \frac{C(M)}{\gamma^{(D)}(M)}$$

- L'altitude orthométrique

$$H^{(o)}(M) = \frac{C(M)}{\gamma^{(o)}(M)} \quad \gamma^{(o)}(M) = \tilde{g} = g\left(\frac{H}{2}\right) = g(M) - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial g}{\partial H} \right)_{\text{moy}} \cdot H^{(o)}(M)$$

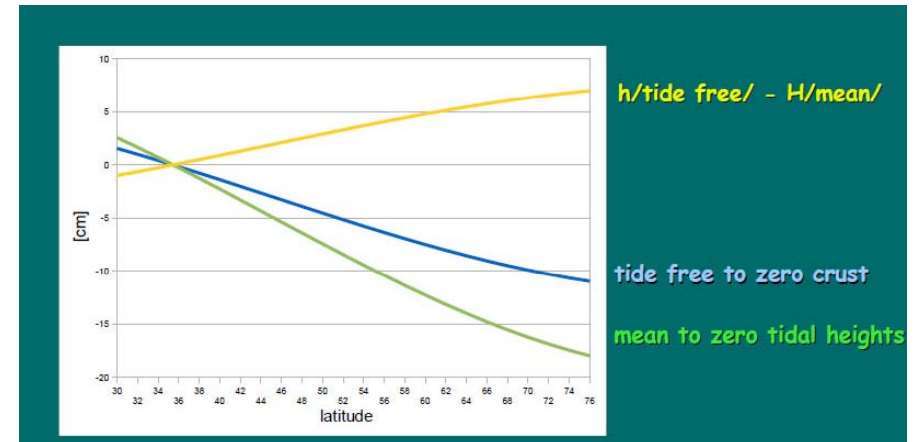
- L'altitude Normale

$$H^{(N)}(M) = \frac{C(M)}{\gamma^{(N)}(M)} \quad \gamma^{(N)}(M) = \tilde{\gamma} = \gamma\left(\frac{H}{2}\right)$$

Ref [13]: Duquenne H. 2008

Système de référence vertical (SRV)

- Système de référence d'altitude idéal
 - Type d'altitude
 - Constantes relatives au type d'altitude ($\gamma^{(D)}$ pour le type dynamique, constantes d'ellipsoïde pour le type normal, etc.)
 - Point fondamental et son altitude conventionnelle
 - Unité des altitudes (m^2s^{-2} , GPU, m, foot)
 - Correction de marée (zéro, moyenne,...)
 - Système de référence de gravimétrie



- Réalisation de la référence

- Par un réseau
 - un réseau de repères de nivellement et un ensemble d'observations de nivellement de précision (dénivelées et gravimétrie)
 - un processus de calcul des altitudes des repères (incluant un ajustement).
- Réalisation possible par un réseau géodésique tridimensionnel et un modèle de géoïde

Ref [13]: Duquenne H. 2008

Critères de qualité d'une référence verticale

- Extension géographique
- Exactitude (systématismes éventuels faibles)
- Précision (erreurs accidentelles faibles)
- Fiabilité du réseau (absence de fautes d'observation et de calcul)
- Stabilité des repères ou connaissance de leur vitesse verticale
- Facilité d'accès à l'information

Ref [13]: Duquenne H. 2008

Les références verticales nationales

- Le NGF Lallemant
- L'IGN69
- Du NGF Lallemant à l'IGN69
- La structure du réseau
- La matérialisation
- Les méthodes d'observations
- La traversée Marseille-Dunkerque
- L'entretien du réseau

le Nivellement Général de la France (NGF- Lallemand)

NGF (Lallemand)

- 1^o ordre établi principalement entre 1884 et 1892
- 32 polygones, 12400 km
- Origine : d'après observations du marégraphe de Marseille (1885-1897)
- Altitudes « orthométriques normales »
- Erreur probable kilométrique : $1,7 \text{ mm}/\sqrt{\text{km}}$

$$E_{pk} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{f^2}{L}}$$



Ref[3]: J.J Levallois (1988)

L' IGN69

- 1° ordre observé entre 1962 et 1969
- Gravimétrie sur 1er ordre et 2ème ordre en montagne (Potsdam)
- 39 polygones, 13700 km
- Réseau entier: 256000 km (350000 RN)
- Origine : identique à celle du NGF-Lallemand
- Altitudes normales (ellipsoïde Hayford)
- Erreur probable kilométrique : $1,3 \text{ mm}/\sqrt{\text{km}}$



Photo Alain Coulomb

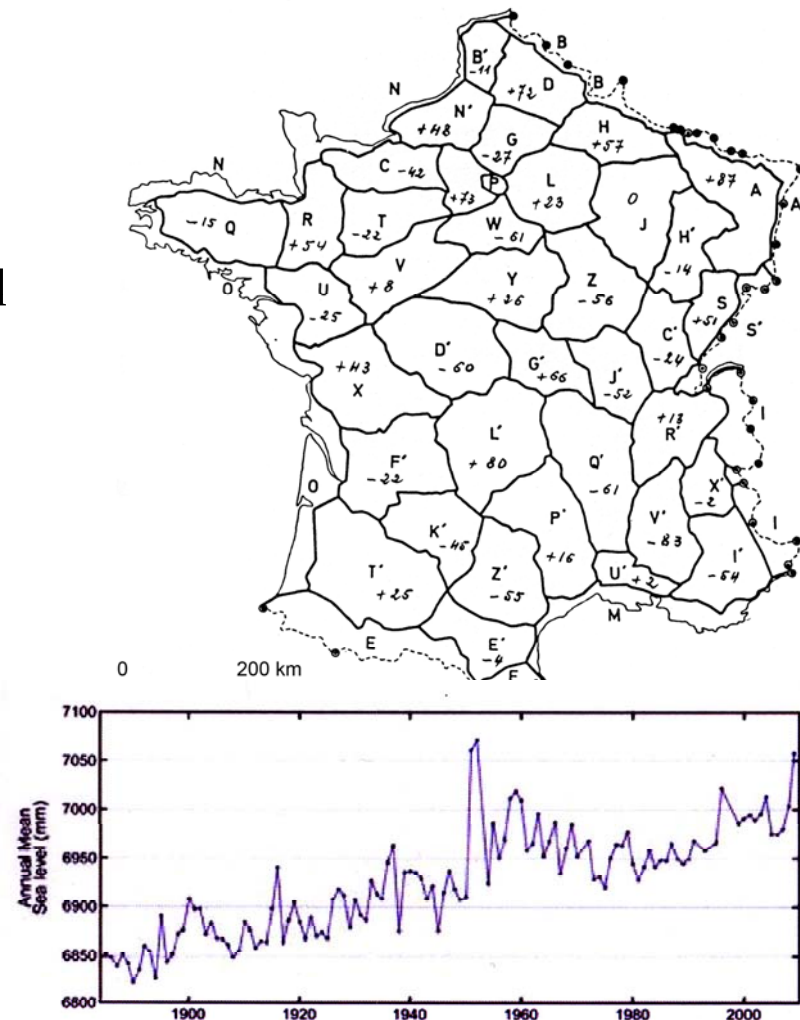


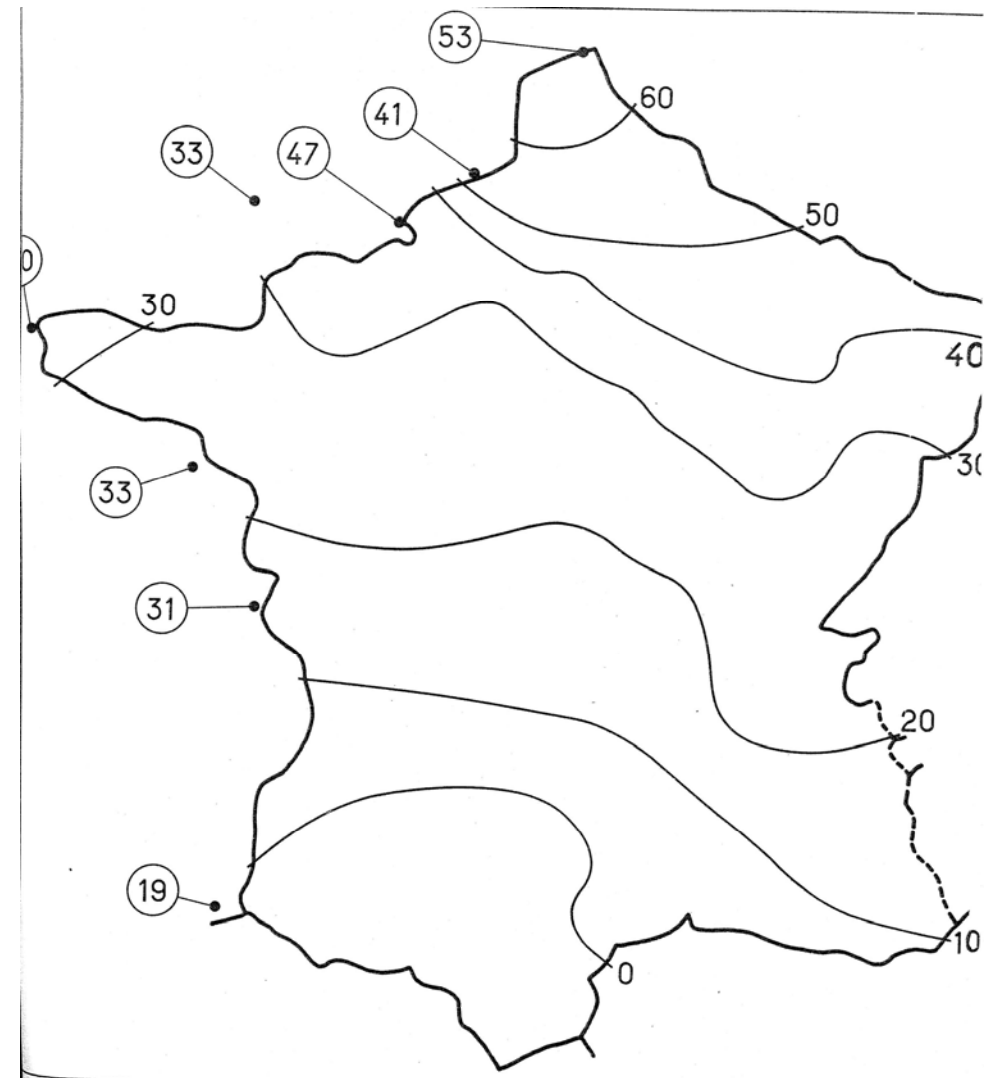
Figure 6 : Hausse du niveau de la mer à Marseille depuis 1885 (courbe PSMSL)

Ref[16][19]: Coulomb A.

Du NGF Lallemand à l'IGN69

- Ajustement par moindres carrées en altitudes dynamiques
- Discordances entre IGN69-Lallemand
- Pente Nord-Sud par rapport à l'Atlantique et la Manche
- Publication des altitudes normales pour le 1^{er} et en partie le 2nd ordre, corrections interpolées pour le reste du réseau
- Le changement de système, mettra plusieurs dizaines d'années à être accepté et appliqué par tous les utilisateurs

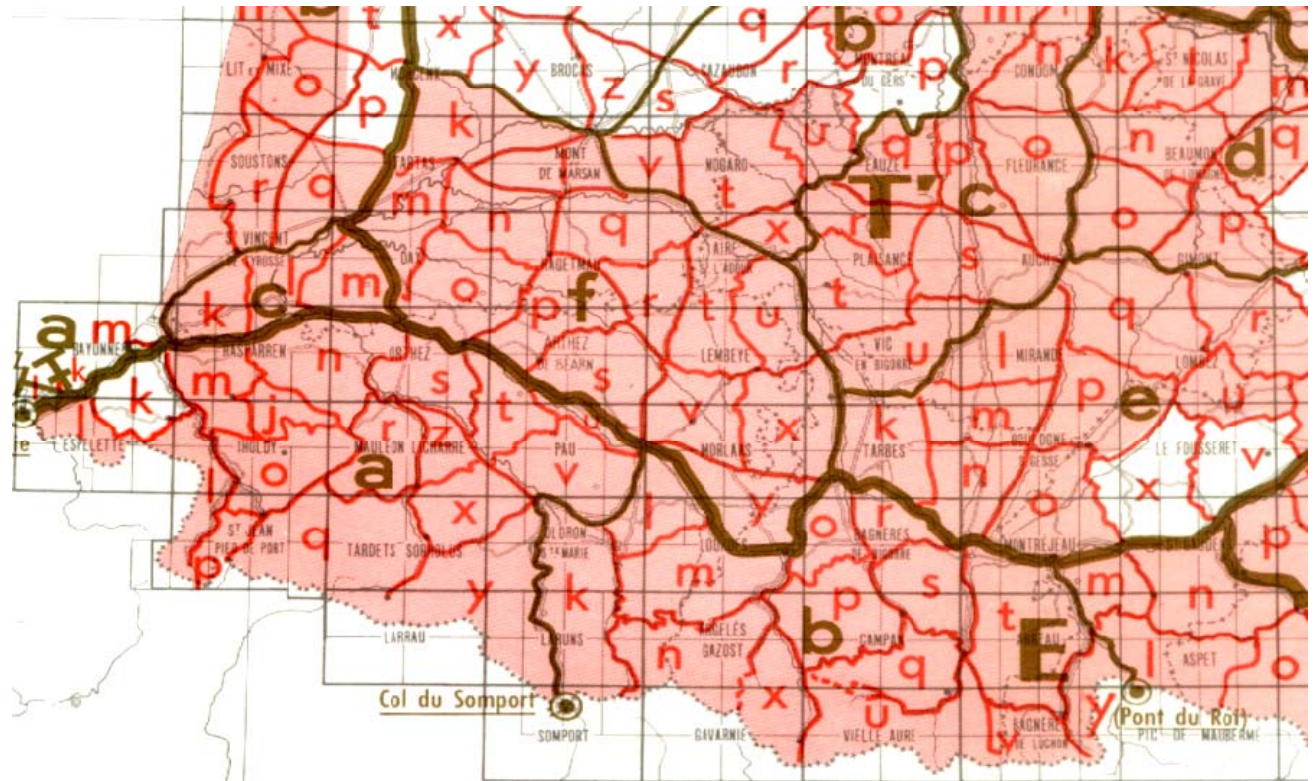
Ref[1] : J.J.Levallois et J.Maillard



Discordance en cm et comparaison aux marégraphes

La structue du réseau

- 4 ordres de densité croissante
- 256000 km le long des voies de communication
- 450000 repères
- (0,8 RN / km²)

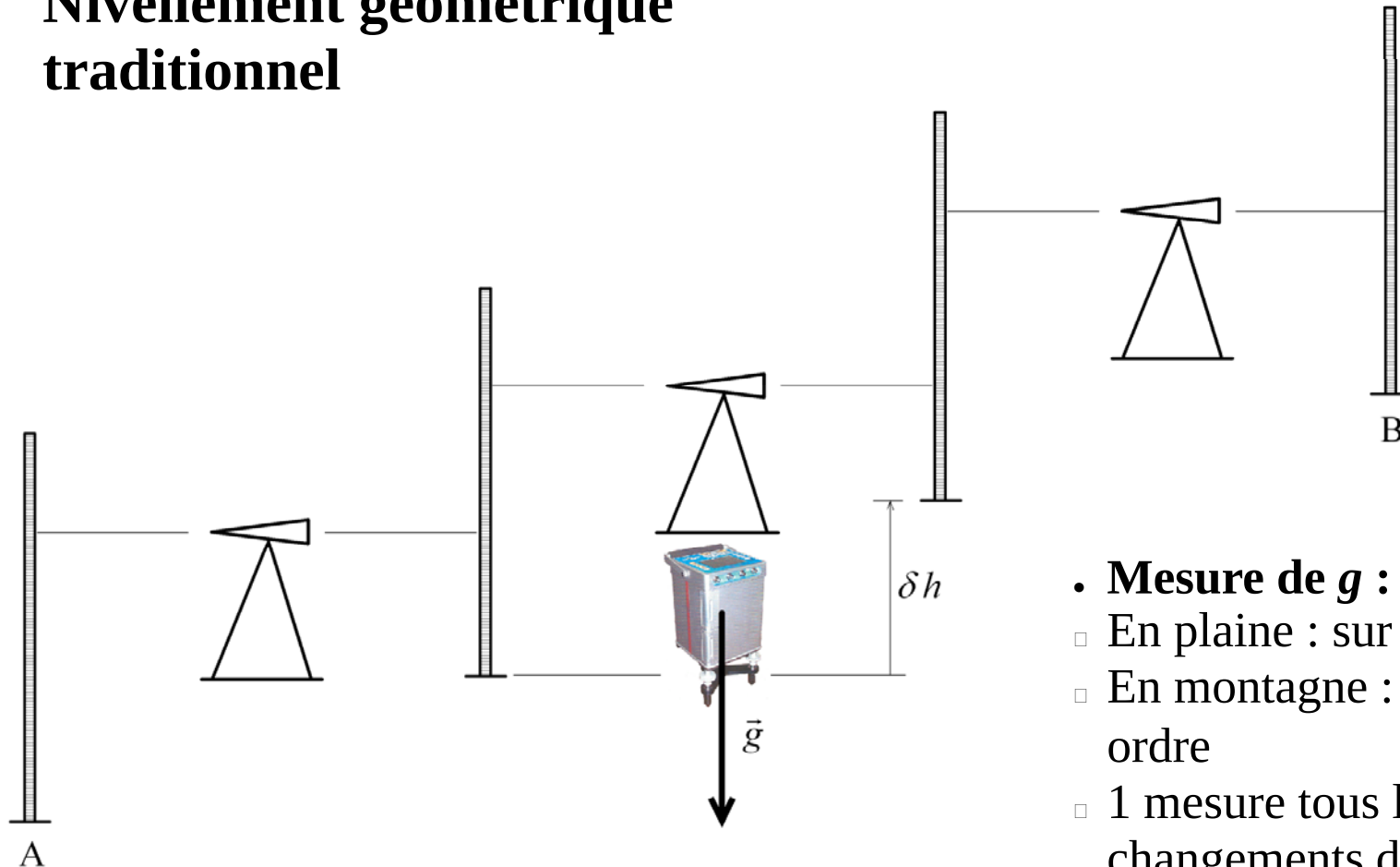




(Documents IGN / SGN)

Les méthodes d'observation

- **Nivellement géométrique traditionnel**



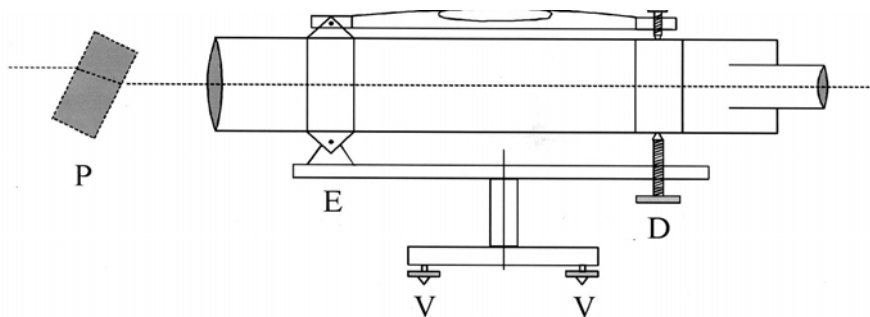
- **Mesure de g :**

- En plaine : sur le 1^o ordre
- En montagne : jusqu'au 3^o ordre
- 1 mesure tous les 2 à 5 km + changements de pente et de direction

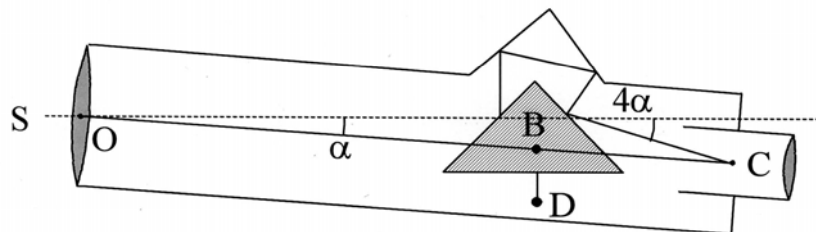
Ref [13]: Duquenne H. 2008

Les méthodes d'observation

- Évolution des instruments : les niveaux
 - à nivelle / automatiques
 - Analogiques / numériques

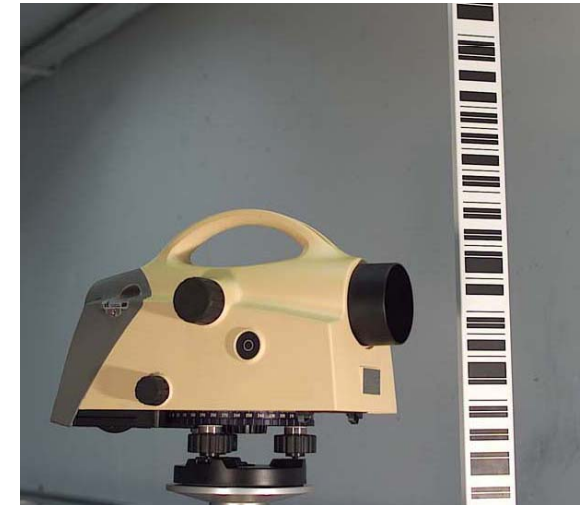


Niveau nivelle torique et dispositif d'interpolation optique



Niveau automatique compensateur optique

Dessins Duquenne H. (1997)



Niveau numérique Trimble DINI

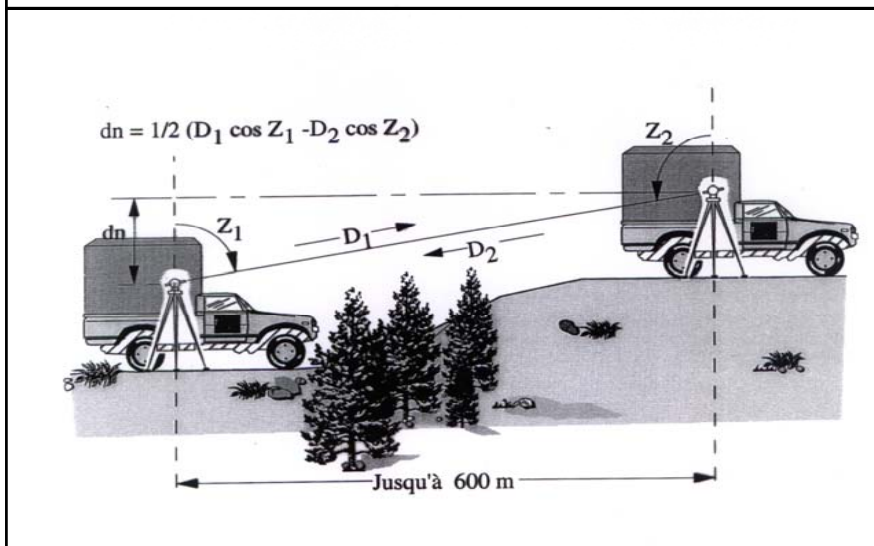
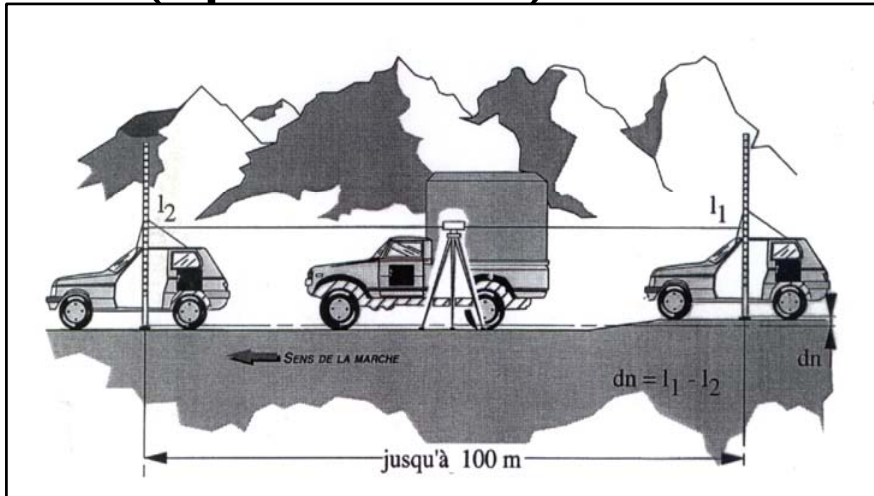


Niveau numérique Leica DNA03

Les méthodes d'observations

LE NIVELLEMENT MOTORISE

(à partir de 1983)



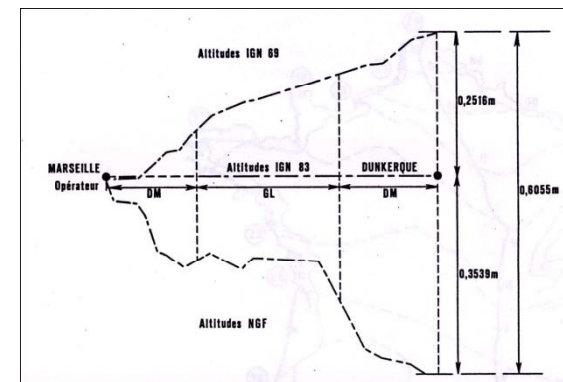
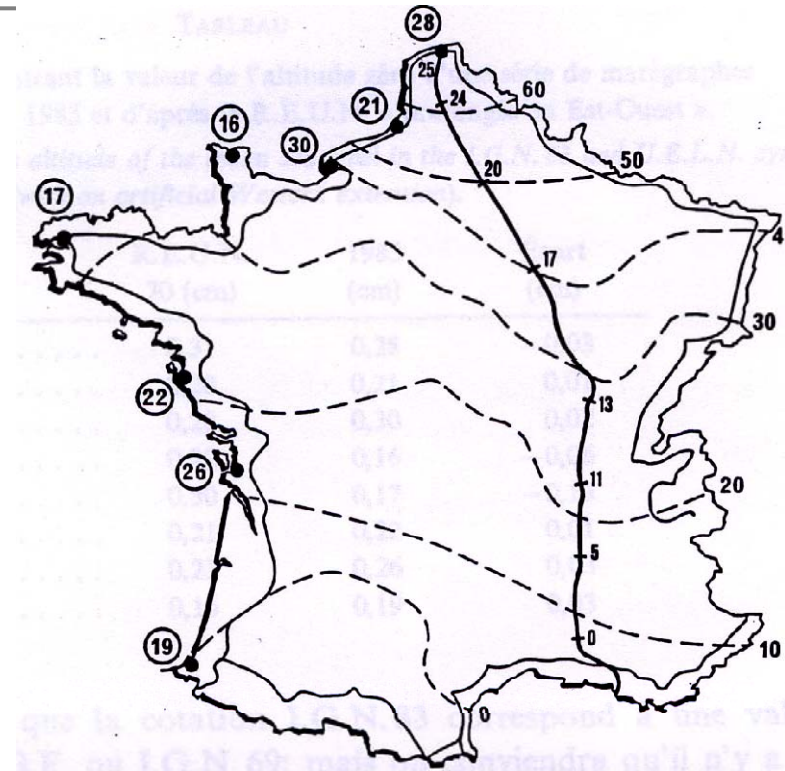
Dessins et photos IGN/SGN



Ref[2] M.KASSER 1985

La traversée Marseille-Dunkerque (1983)

- 1 235 km aller et retour
- Epk entre l'aller et le retour $0,27 \text{ mm}/\sqrt{\text{km}}$
- Nivellement motorisé
 - axe optique plus haut
 - Exécution plus rapide
- résultat entre le NGF Lallemand et IGN69
- Comparaison avec les marégraphes:
 - pente par rapport à l'Atlantique et la Manche quasi-nulle
 - méditerranéenne en-dessous de l'Atlantique (20 cm environ)



Ref[4] : Kasser M. (1989)

L'entretien du réseau

- 1980-2000 : l'IGN a du mal à entretenir le réseau de nivellement : plus de destruction que de nouveaux repères posés
- 1995 : un groupe de travail du CNIG préconise l'entretien du 1^{er} ordre
- 1992-1999: reprise d'une partie du 1^{er} ordre : 3 537 km
- 1998: enquête utilisateur : réseau mal réparti, mal entretenu
- En 2000 : l'état du réseau est mal connu et l'âge selon l'ordre est

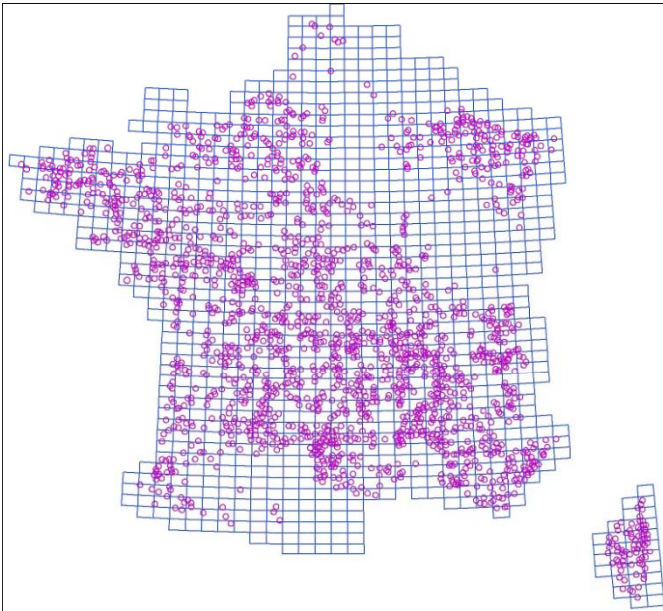
Ordre	Age moyen (ans)
1	20
2	22
3	21
4	37
Profils de rivières	75

- 2000-2007 : contrôle terrain de l'état de 95% du réseau
- A partir de 2001 : nouvelle stratégie : les triplets

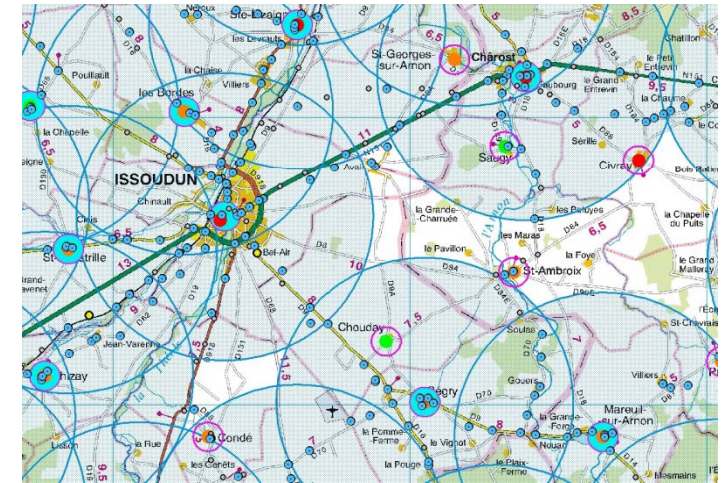
L'Entretien du réseau de nivellement

Triplet:

- Groupe d'au moins 3 RN
- Distance < 1 km
- Dénivelée < 30 m
- Tout point habité à moins de 5 km d'un triplet
- Localisé dans bourgs de plus de 200 habitants



Répartition des triplets nouveaux (IGN/SGN)



Identification des zones à compléter (IGN/SGN)

1^{ère} phase 2001-2009 :

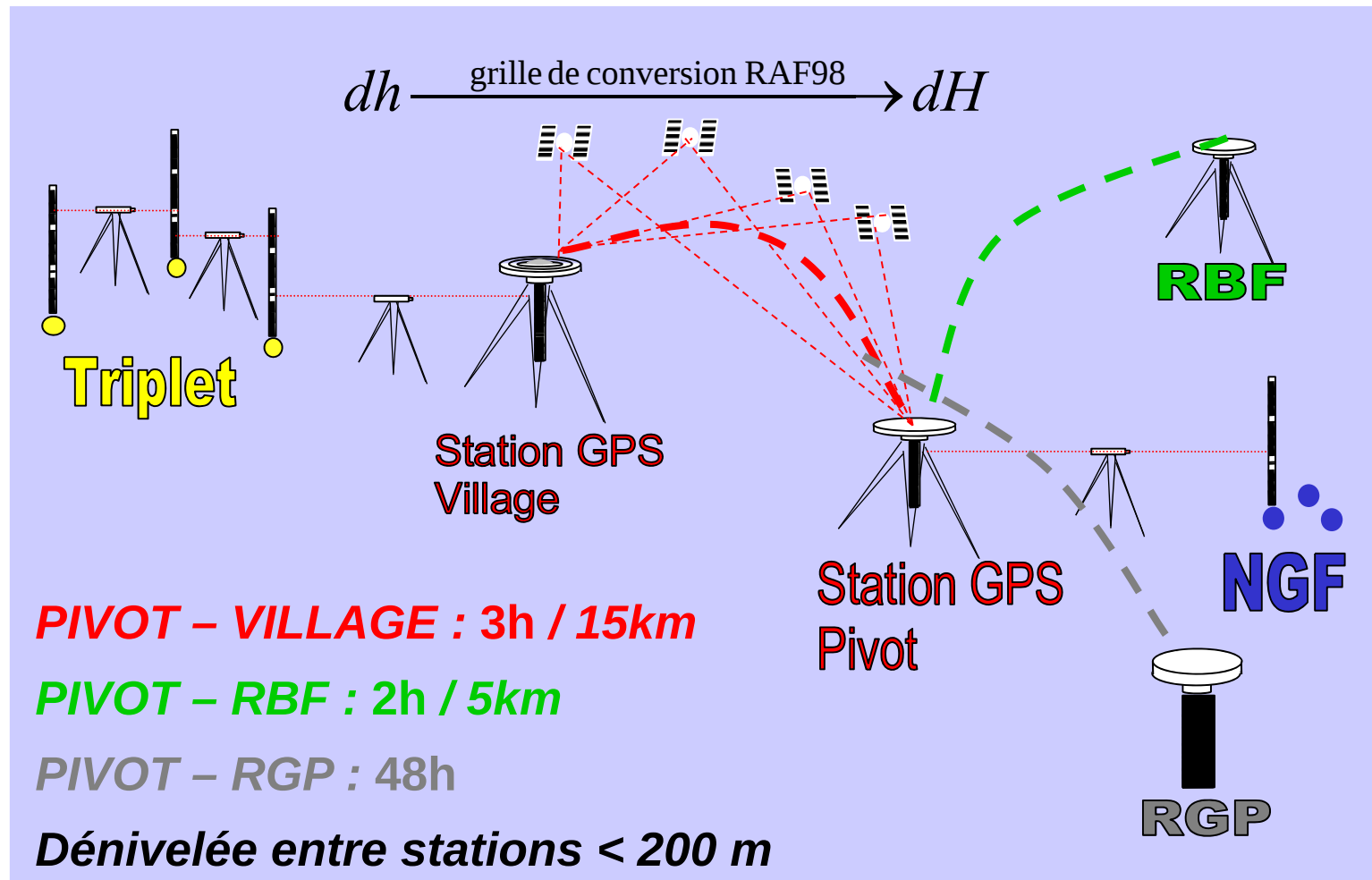
compléter par 1985 triplets nouveaux les zones non-couvertes (NIVAG)

2^{ème} phase à partir de 2008 :

entretien des 13200 triplets (ERNIT)

Ref [17]: Coulomb A. (2009)

L'Entretien du réseau de nivellement



NIVAG : nivellement aidé par GPS (IGN/SGN)

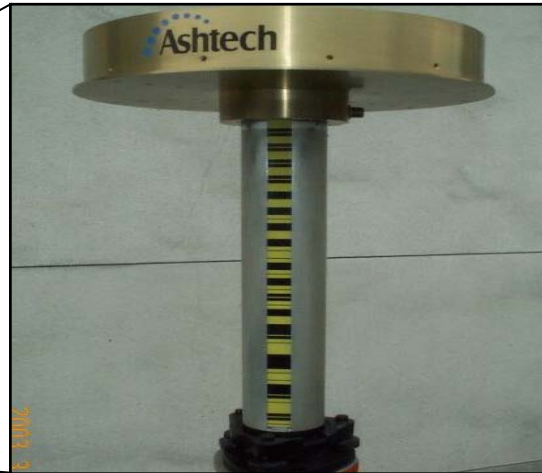
Ref [17]: Coulomb A. (2009)

L'Entretien du réseau de nivellement



Pick-up équipé

Photos IGN/SGN



Antenne GPS et ruban à code barre

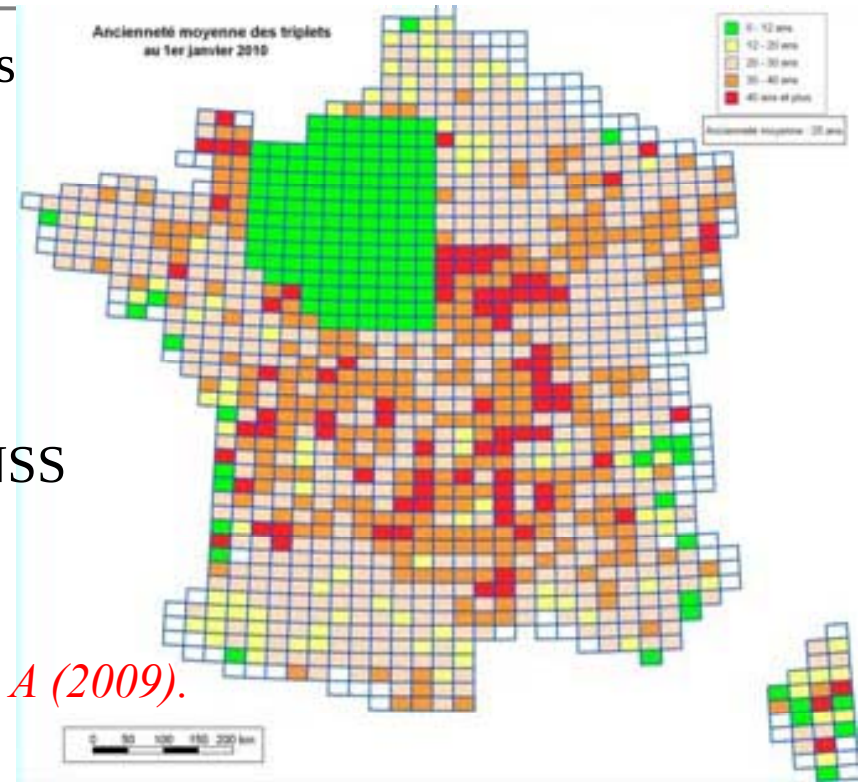


Nivellement de l'antenne

L'Entretien du réseau de nivellement

ERNIT : entretien du réseau de nivellement par les triplets

- 1/01/2008 ancienneté moyenne 28 ans
- Périodicité d'entretien: 12 ans
- 2020 ancienneté moyenne: 6 ans
- Contrôle de stabilité des RN par nivellement
- Attribution d'une hauteur ellipsoïdale au triplet par GNSS



Ref[17]: Coulomb A (2009).



Station GPS calculée avec le RGP (IGN/SGN)



Niveau Zeiss NI2 et Trimble DINI(IGN/SGN)



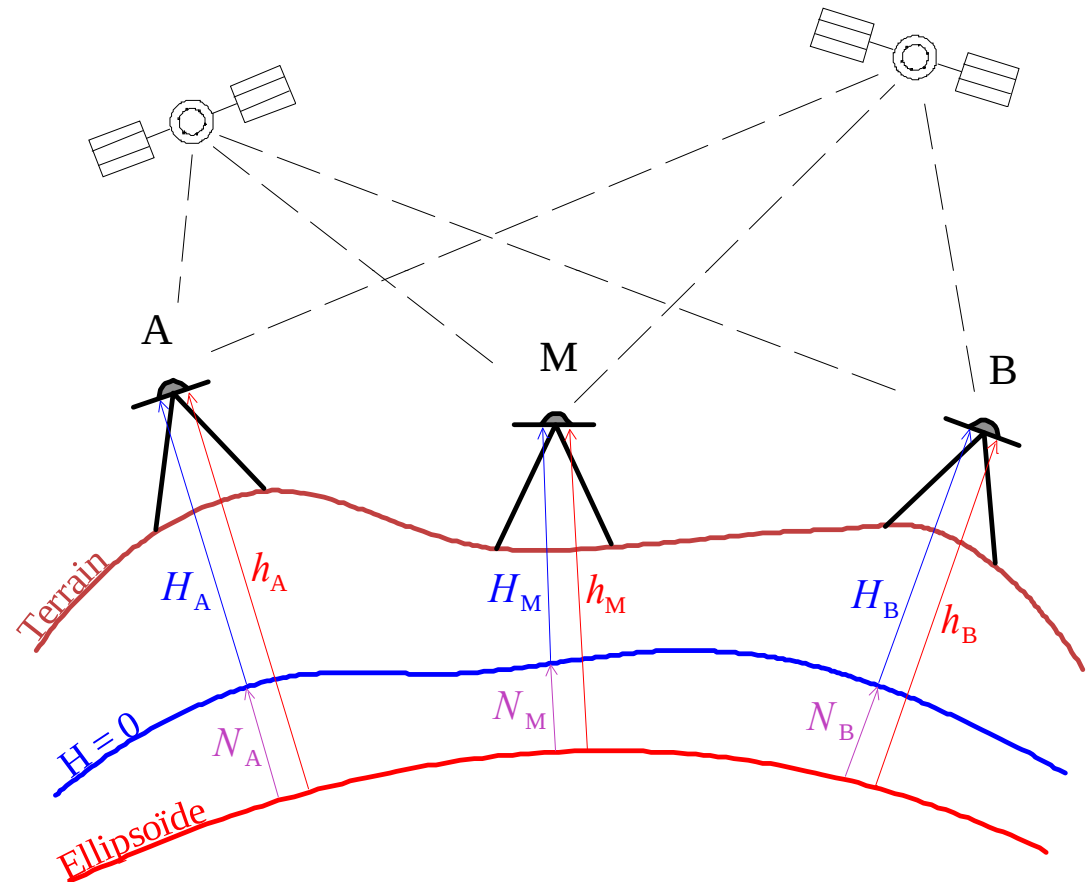
Le nivellement par GNSS

- Les objectifs
- La compatibilité
- Les étapes de réalisation d'une grille de conversion altimétrique
- La réalisation du quasigéoïde QGF98
- La comparaison à 978 points GPS nivelés
- La grille de conversion RAF98
- L'amélioration du quasi-géoïde dans le sud-est de la France (QGC02)
- La grille de conversion RAC09
- Test de la grille RAC09
- La grille de conversion RAF09
- L'Évaluation de la grille RAF09
- Un réseau Géodésique Combiné

Les objectifs

- Déterminer des altitudes par GPS
- Convertir des hauteurs ellipsoïdales (exprimées dans un SRT donné) en altitudes (exprimées dans un SRV spécifié)

Nécessité de connaître la position de la surface de référence des altitudes dans un système de référence géodésique compatible avec le GPS



Ref [14]: Duquenne H. 2008

La compatibilité

$$h_{SRT,ellipsoïde} = N + H_{SRV}^{(0)}$$

$$h_{SRT,ellipsoïde} = \zeta + H_{SRV}^{(N)}$$

Modèle de géoïde au quasigéoïde compatible avec les références SRV, SRT

N : hauteur du géoïde au dessus de l'ellipsoïde

ζ : anomalie d'altitude

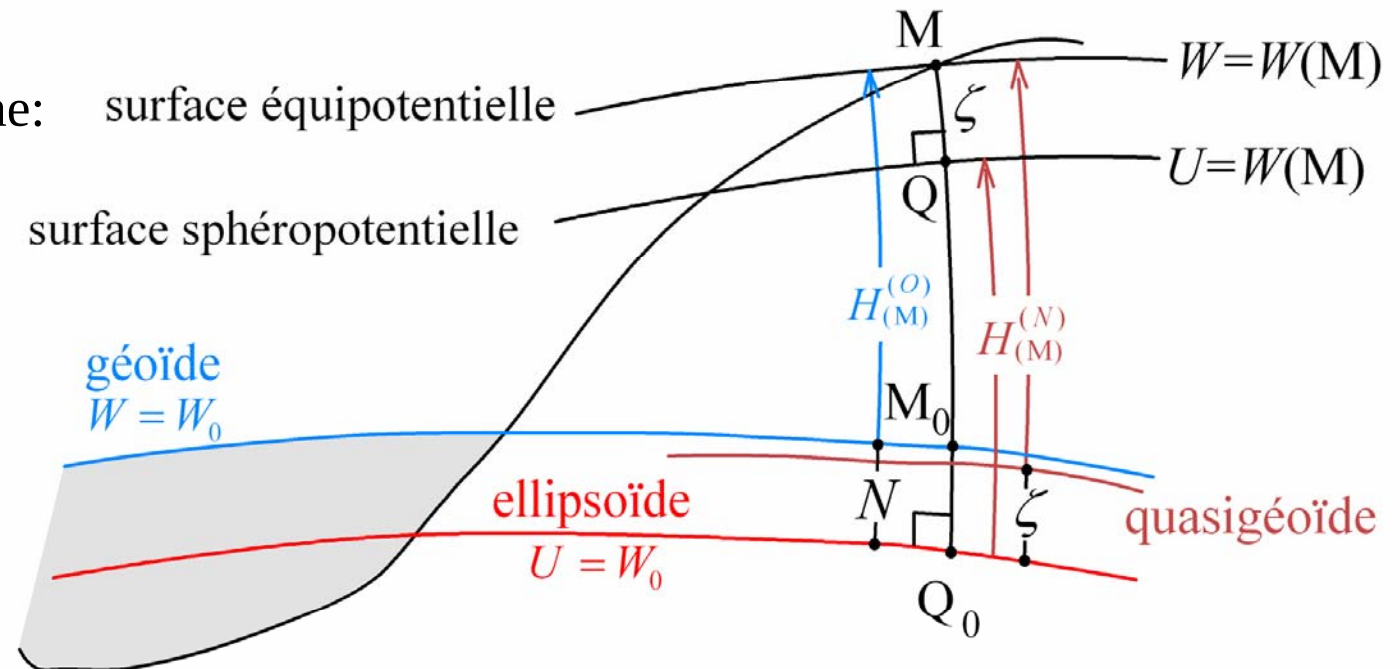
Pour la France métropolitaine: surface équipotentielle

SRT : RGF93

SRV : IGN69

Altitude normale

quasigéoïde

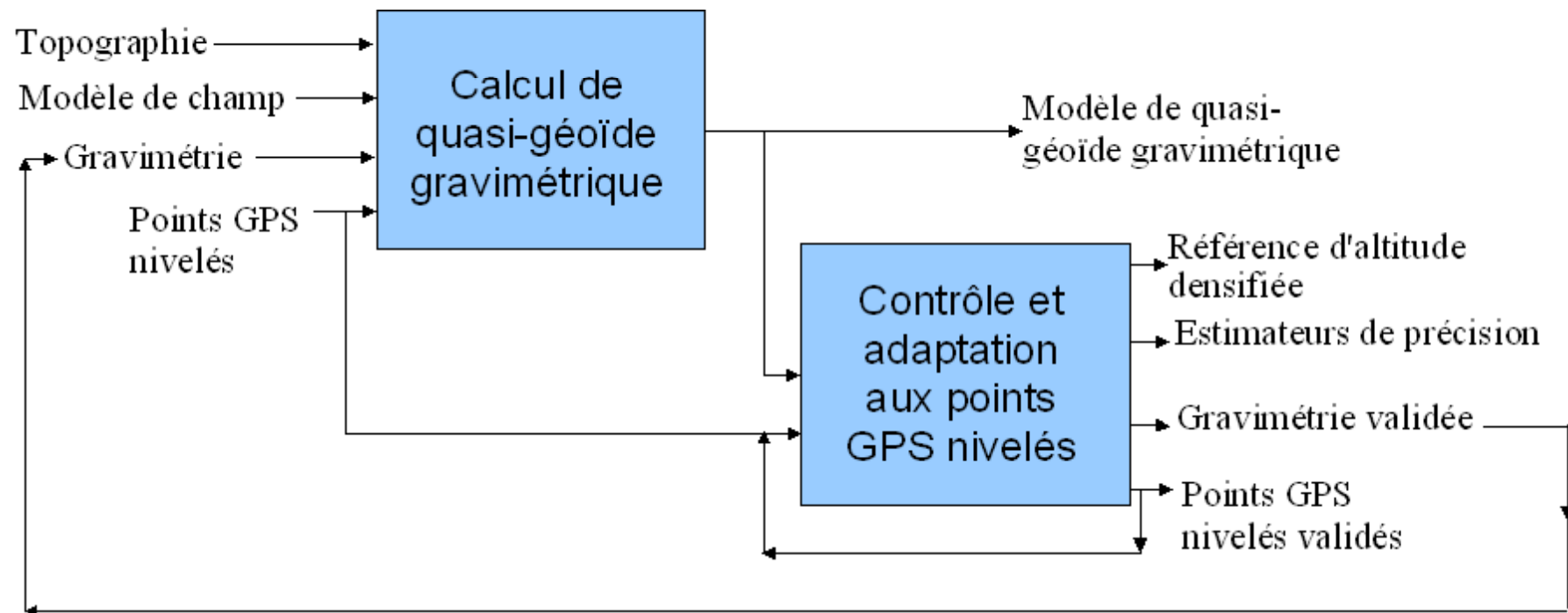


Ref[13]: Duquenne H. 2008

Les étapes de réalisation d'une grille de conversion altimétrique

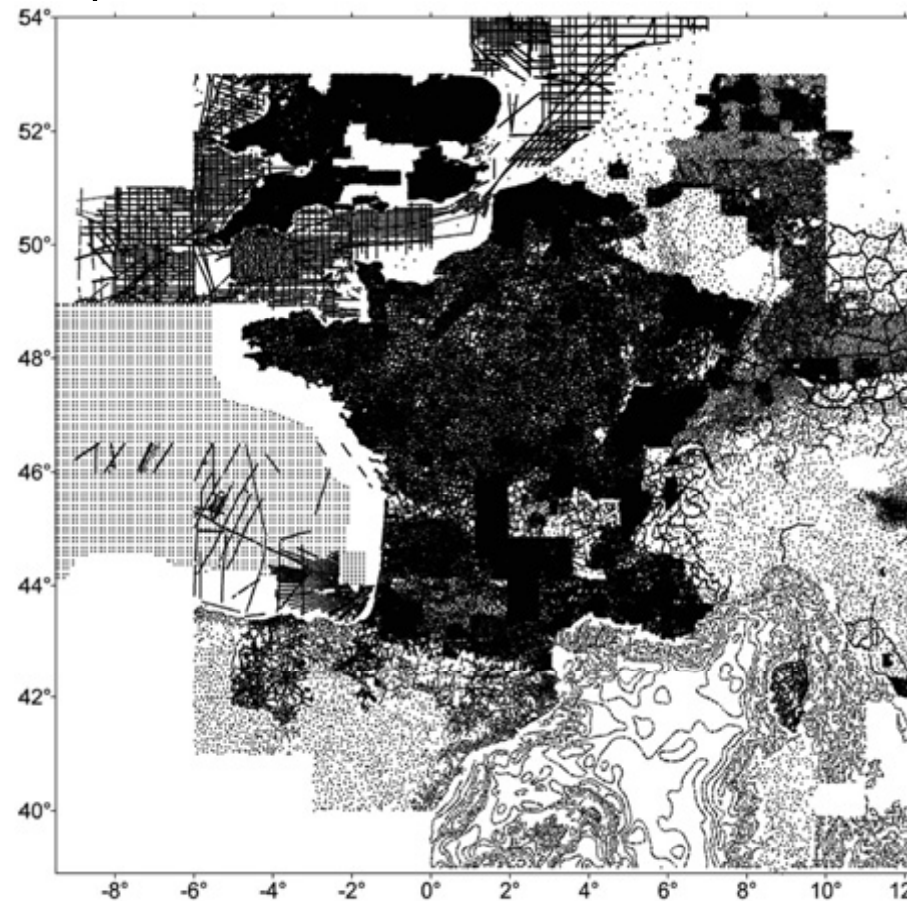
Ref [6][7][8]: Duquenne H.

- Calcul d'un modèle de géoïde précis, à haute résolution, à partir de gravimétrie, déviations de la verticale, DHS, MNT, etc.
- Mise en référence et adaptation au réseau de référence géodésique



La réalisation du quasi-géoïde Français QGF98

- Réalisation entre 1996 et 1998 (H.Duquenne IGN/ESGT)
- Quasi-géoïde gravimétrique à haute résolution



Gravimétrie dense : 550 000 points

Ref [6][7][8]: Duquenne H.

La réalisation du quasi-géoïde Français QGF98

Ref [6][7][8]: Duquenne H.

Le modèle de quasigéoïde QGF98

Données:

Données gravimétriques:
BGI terrestre + Morelli
+ Sandwell (converties)

Modèle mondial:
OSU91A

Modèle numérique de terrain:
resolution 140 * 140 m

Méthode de calcul:

Retrait restauration,
méthode du terrain résiduel,
intégrations classiques

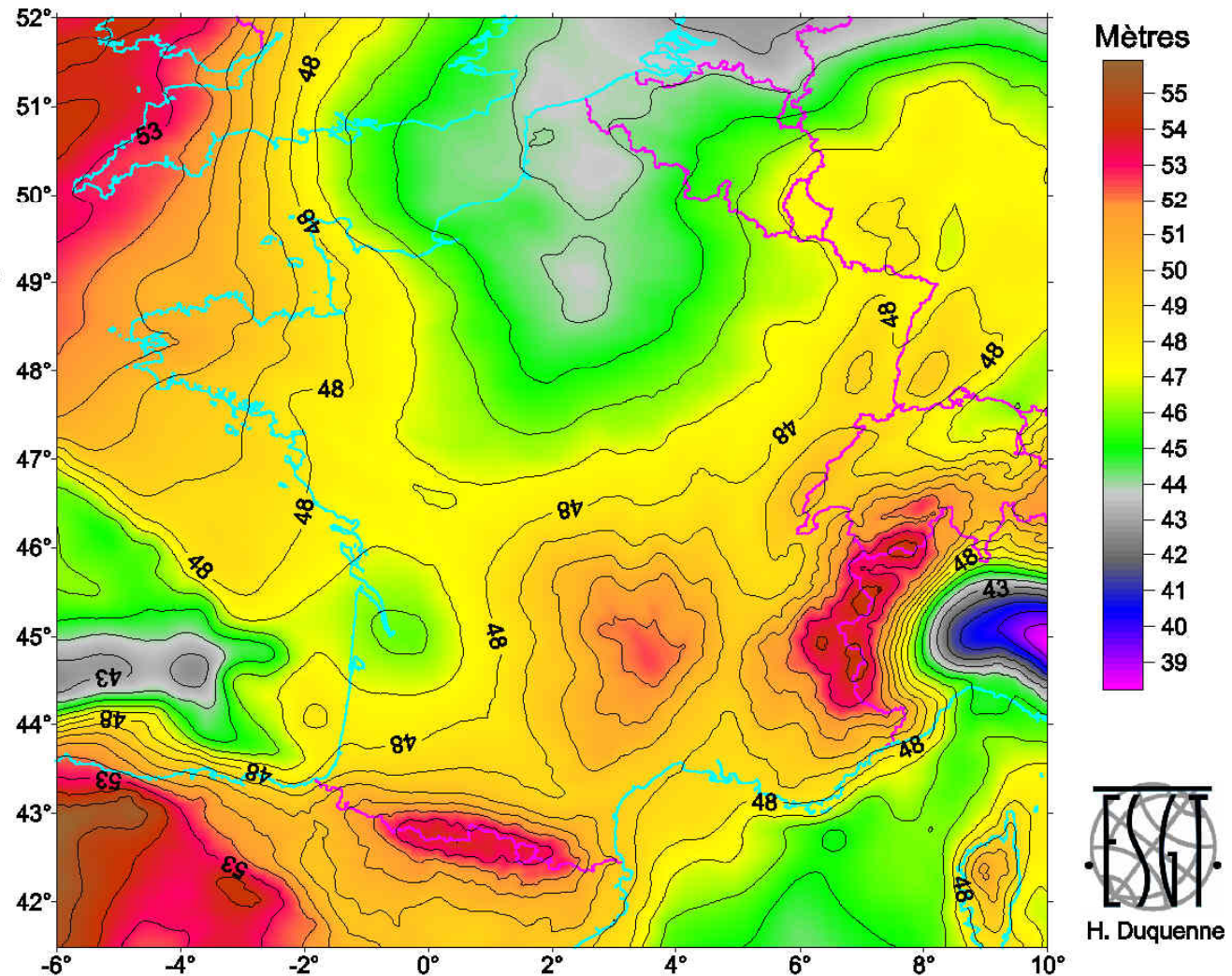
Rayon des corrections
de terrain: 110 km

Rayon d'intégration
de Stokes: 2°

Logiciels:

Gravsoft
(Forsberg and Tscherning)

Logiciels de l'auteur



Comparaison QGF98 à 978 points GPS nivelés

-Retrait d'une tendance sur les écarts:

$$\zeta_{GPS - NIV, i} - \zeta_{QGF 98, i} = a + b(\varphi_i - \varphi_o) + c(\lambda_i - \lambda_o) + v_i$$

	Paramètre	Unité	Valeur
a	biais constant	m	0,060
b	pente vers le nord	m/1000 km	-0,5258
c	pente vers l'est	m/1000 km	0,7852
v min	résidu minimal	m	-0,379
v max	résidu maximal	m	0,676
σ_v	écart-type des résidus	m	0,109
σ_s	écart-type du signal	m	0,104
σ_n	écart-type du bruit	m	0,034

Les paramètres a, b, c proviennent des Wo différents entre le modèle de champs et le Nivellement, du biais nord-sud du nivellement, et des erreurs à grandes longueurs d'ondes du modèle

Ref [6][7][8]: Duquenne H.

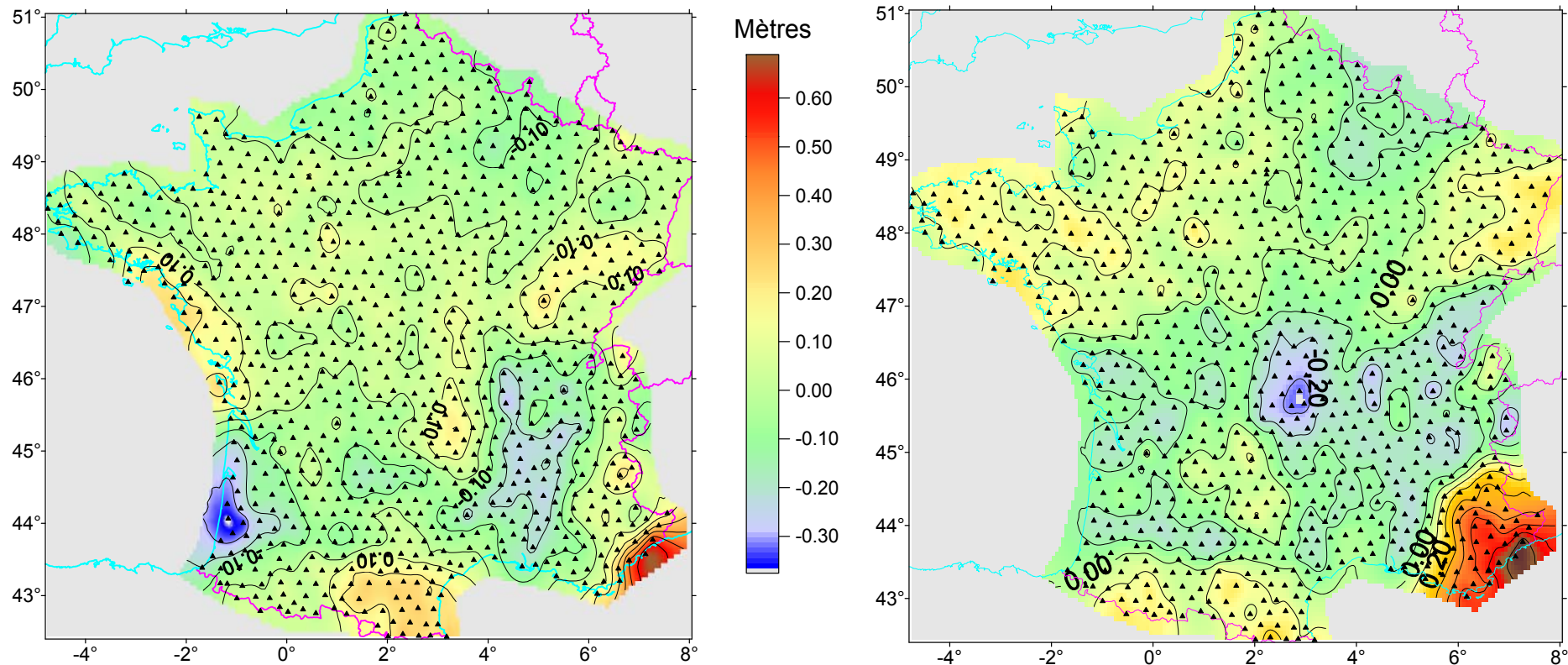
Comparaison QGF98 à 978 points GPS nivelés

Ref [10][11]: Duquenne H.

Rayon d'intégration de Stokes :

220 km

330 km



Résidus après le retrait de la tendance (Duquenne H)

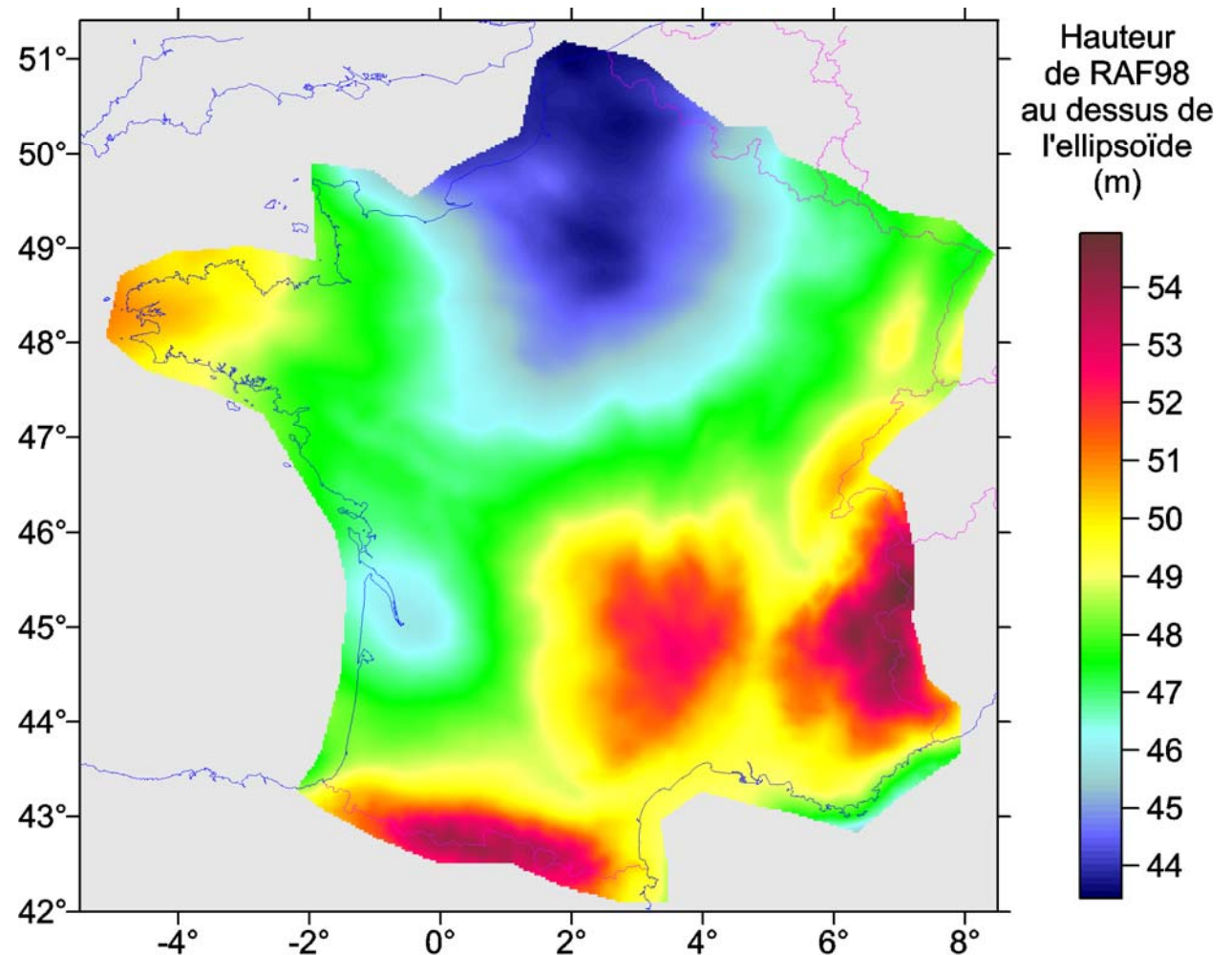
Conclusion: gros problèmes de gravimétrie en méditerranée
pas de problème sur l'Atlantique à condition de prendre la gravimétrie lointaine

La grille de conversion RAF98

- Hauteur de la surface de référence IGN69 au dessus de l'ellipsoïde GRS80 associé à RGF93
- Réalisée par adaptation du quasi-géoïde QGF98 à 978 points GPS nivelés RBF
- Validé par un groupe de travail du CNIG

Ref [8] Willis P. Et al(1998)

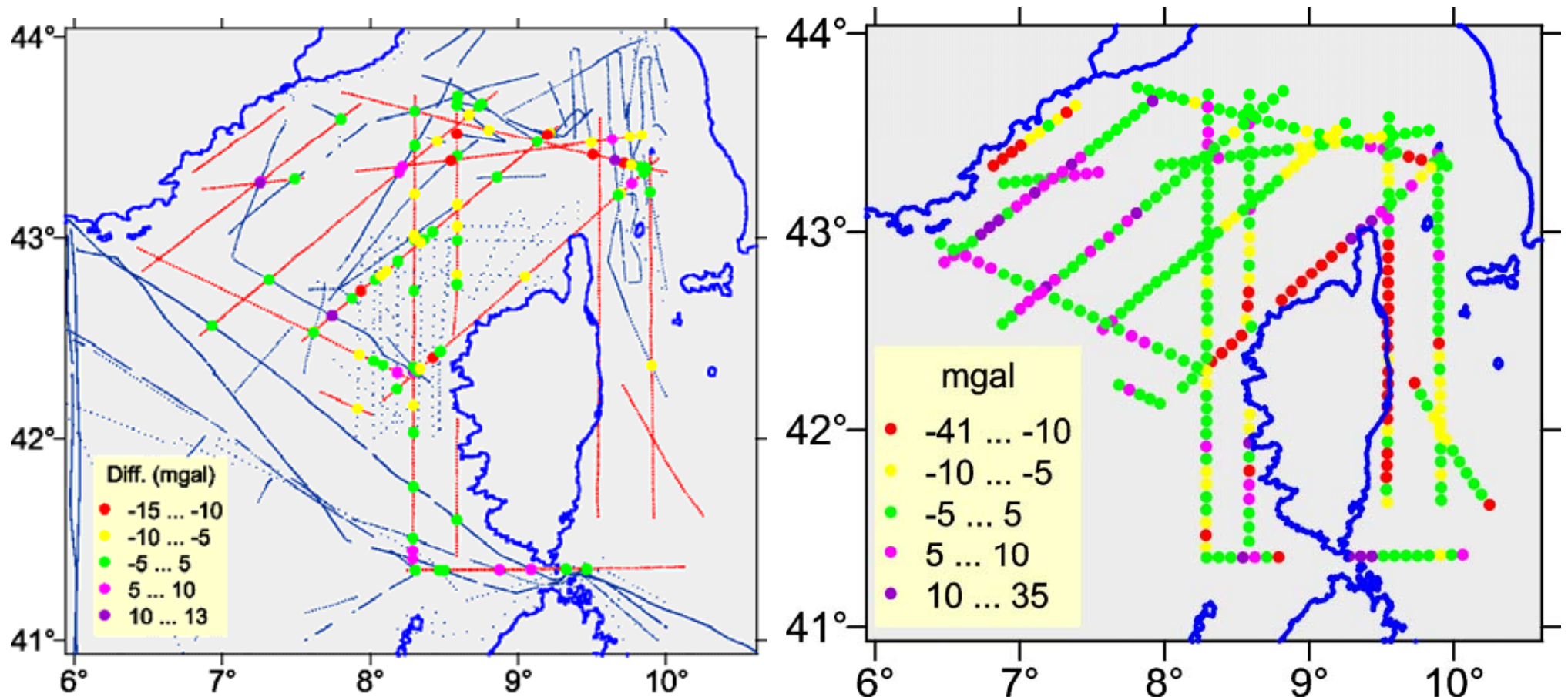
- Disponible sous forme de grille au pas de 2,75 km environ
- Incorporée dans de nombreux logiciels GPS
- Précision : 2 à 3 cm en plaine, 3 à 4 cm en montagne



Ref [6][7][9]: Duquenne H.

L'amélioration du quasi-géoïde au sud-est de la France

2001 : campagne de gravimétrie aéroportée (2510 km) en collaboration ESGT, IGN, KMS (Danemark), université de Bergen (Norvège)



Comparaison de la gravimétrie aéroportée avec les croisières en bateaux et la grille KMS (altimétrie)

Ref [10][11]: Duquenne H.

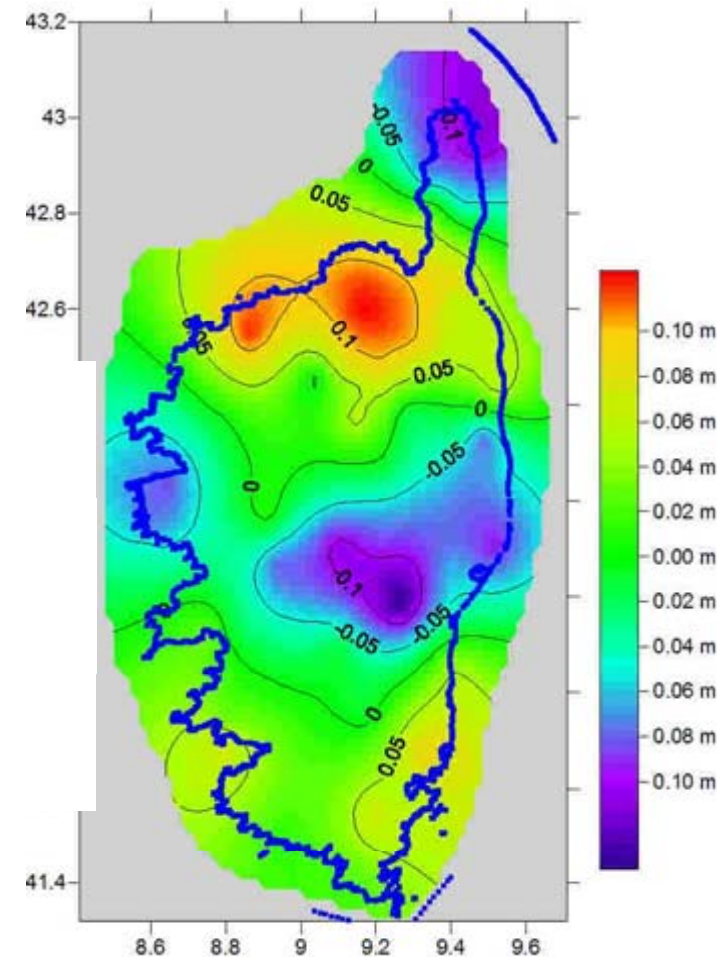
La grille de conversion RAC09

RAC09 a été obtenue par adaptation de QGC02
à 40 points GPS nivelés

SRT : RGF93

SRV: IGN78

	Paramètre	Unité	Valeur
a	biais constant	m	-0,9
b	pente vers le nord	m/100 km	-0,29
c	pente vers l'est	m/100 km	0,96
v min	résidu minimal	m	0,144
v max	résidu maximal	m	0,128
σ_v	écart-type des résidus	m	0,07



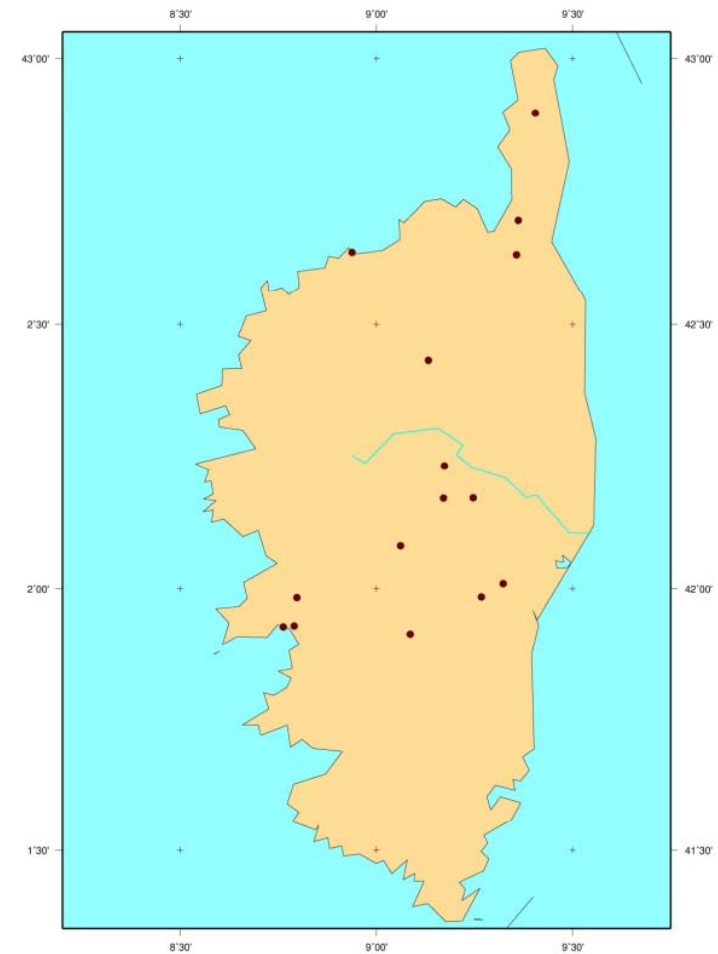
Ref[18] l'Ecu François (2009)

QGC02 : Résidus de la régression linéaire à 40 points GPS nivelés.

Test de la grille RAC09

Jeu test IGN

numéro	Latitude (°dec)	Longitude (° dec)	Hauteur géoïde (m)	Ecart (m)
1124	41.92892	8.79085	47.914	0.031
1101	41.98351	8.79717	48.159	0.054
1120	42.98754	9.40500	48.487	-0.010
1146	42.17215	9.17113	49.763	0.006
1108	42.08165	9.06175	49.714	-0.009
1145	42.17271	9.24689	49.444	0.077
1131	42.43188	9.13216	49.993	0.051
1123	42.63266	9.35697	48.916	-0.020
1126	42.69678	9.36185	48.732	-0.021
1132	42.00971	9.32349	48.404	0.016
1137	41.98462	9.26763	48.943	0.049
1119	42.63708	8.93780	48.351	-0.009
1141	42.23325	9.17315	49.824	0.004
1117	41.91346	9.08593	49.201	0.031
5555	41.92747	8.76245	47.740	-0.011



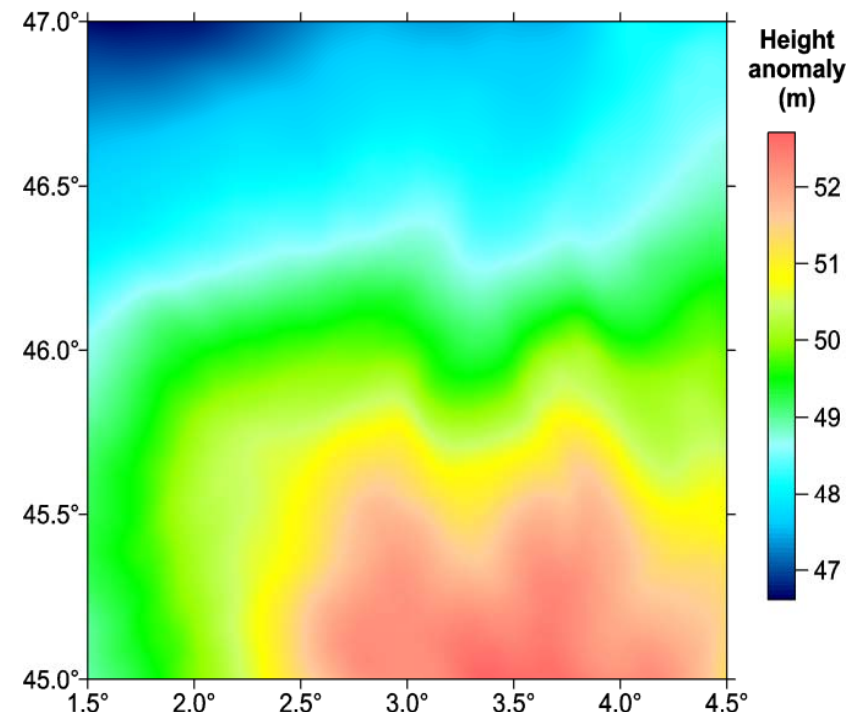
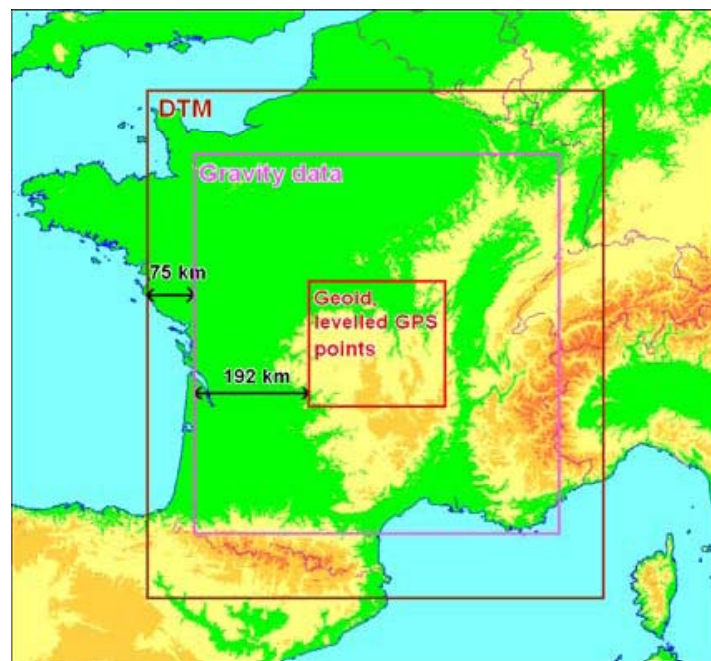
Ref[18]L'Ecu F. (2009)

*Répartition des points GPS-nivelés
(L'ECU F. /IGN/SGN2010)*

La grille de conversion RAF09

Cette grille tient compte des améliorations

- de la composante hauteur ellipsoïdale du RGF93
- du quasi géoïde sur la cote d'azur (QGC02)
- du quasi géoïde calculé sur l'Auvergne pour un jeu test européen (2006)



Jeu test européen : quasi-géoïde sur l'Auvergne

Ref [12]: Duquenne H. 2007

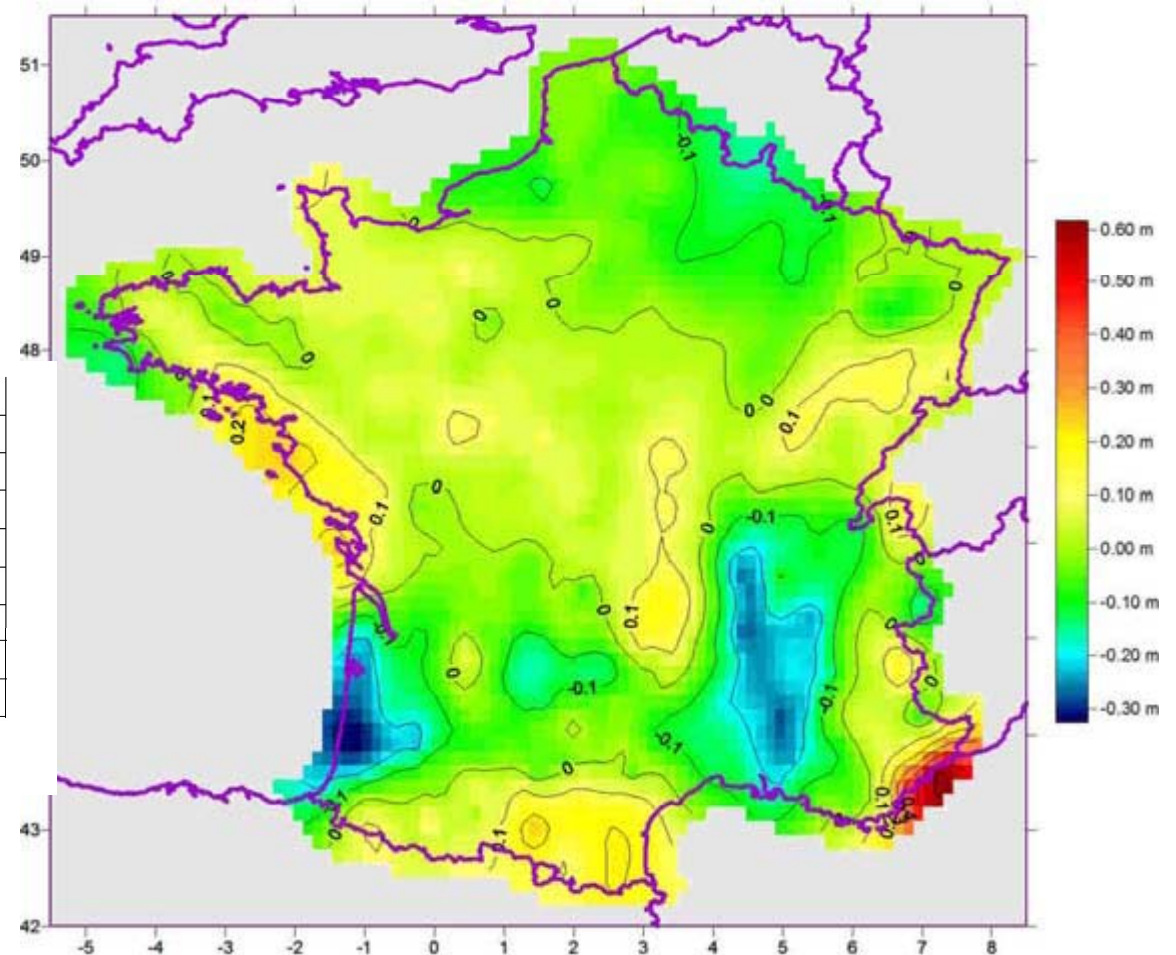
La grille de conversion RAF09

Adaptation sur 941 point GPS nivelés

-RBF réobservés (Niv et GPS)

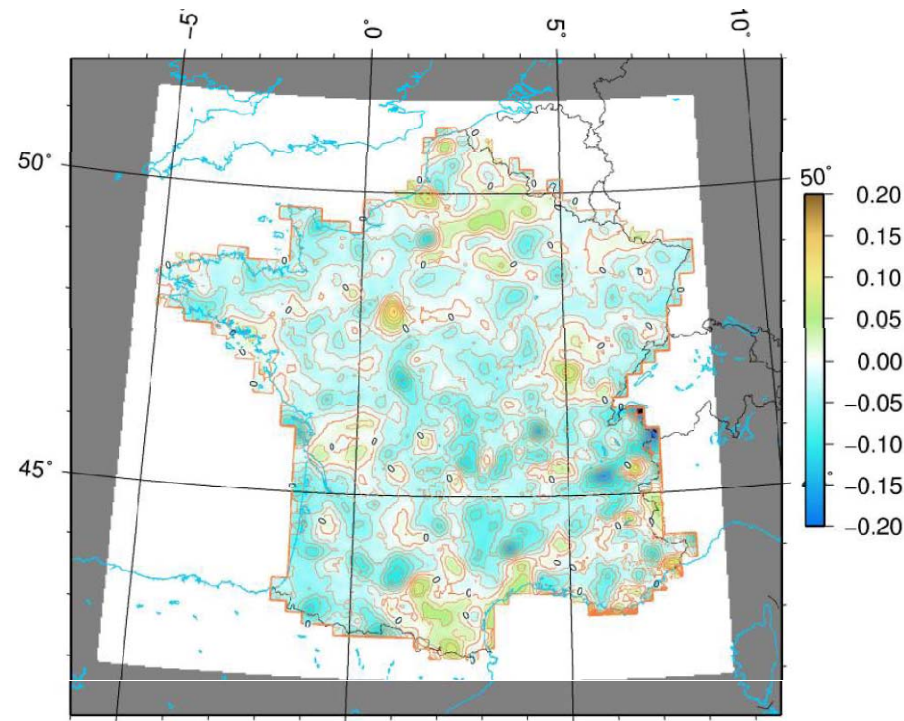
-Pivots NIVAG

	Paramètre	Unité	Valeur
a	biais constant	m	0,030
b	pente vers le nord	m/1000 km	-0,5524
c	pente vers l'est	m/1000 km	0,7911
$v_{\min}$	résidu minimal	m	0,326
$v_{\max}$	résidu maximal	m	0,584
σ_v	écart-type des résidus	m	0,119
σ_s	écart-type du signal	m	0,094
σ_n	écart-type du bruit	m	0,030



Résidus après adaptation (L'Ecu F. 2009)

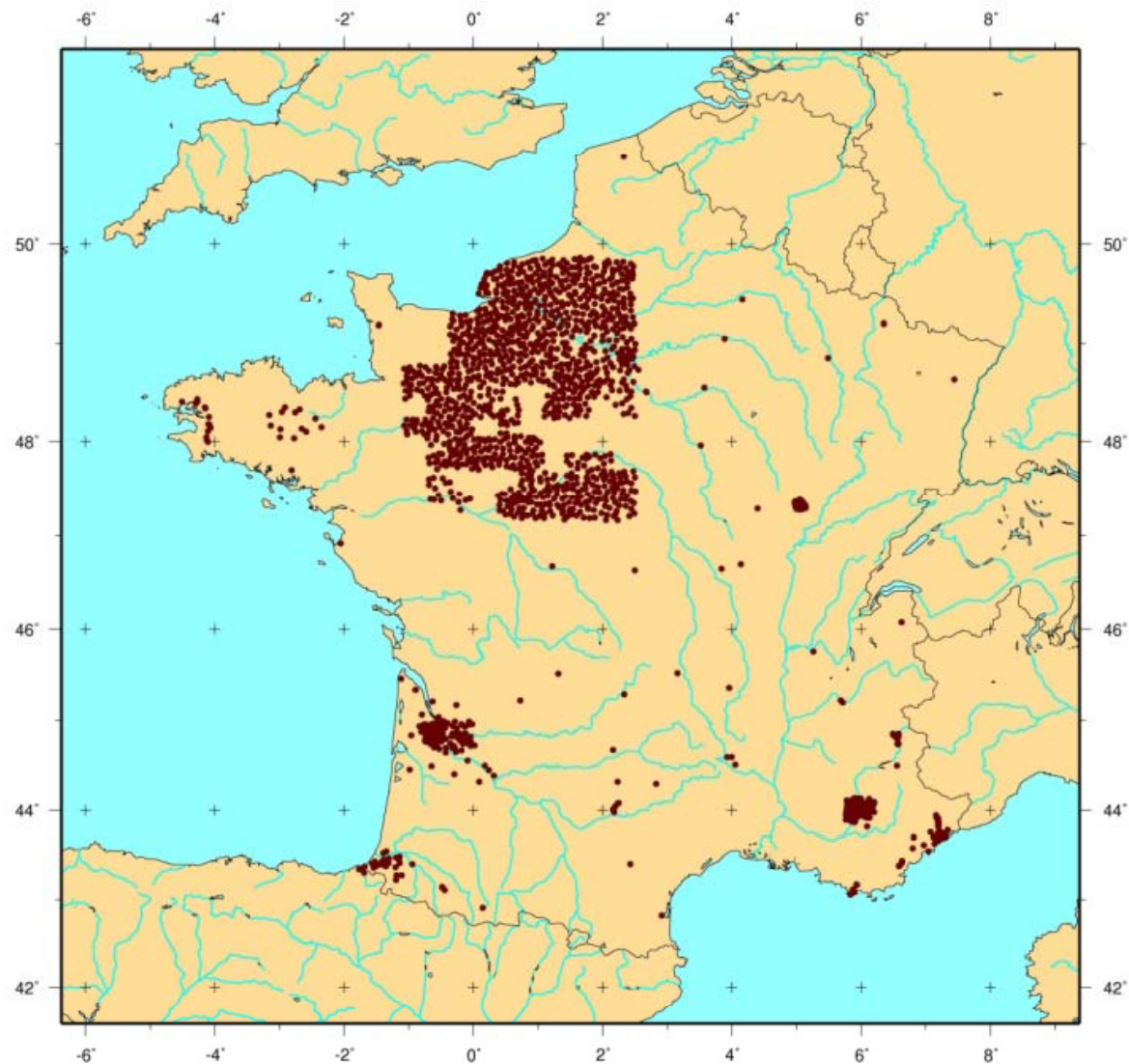
Comparaison RAF98, RAF09



Écarts en mètres entre RAF98 et RAF09 (L'Ecu F. 2010)

- Les écarts sont principalement dus à la variation en hauteur ellipsoïdale
- Si on utilise les anciennes coordonnées RGF93 avec la grille RAF98, et les nouvelles coordonnées avec la grille RAF09 on obtient des altitudes qui diffèrent de peu de cm
- si on utilise RAF98 avec les nouvelles coordonnées, ou RAF09 avec les anciennes coordonnées l'erreur sur l'altitude sera de l'ordre de grandeur du graphique

Evaluation de RAF09



Répartition des jeu test (L'ECU F. 2010)

Evaluation de RAF09

Fournisseur	long.	lat.	alti.	pts	pd	biais	éc. min	éc. Max	EMQ	ec. type
SARL Nicolas	-2.808	48.201	171	12	0	0.002	-0.042	0.034	0.018	0.019
ENSG	5.968	44.026	586	76	2	-0.001	-0.042	0.054	0.020	0.020
ESGT	0.171	48.012	85	7	0	0.011	-0.000	0.023	0.013	0.008
ESGT	0.149	48.014	81	6	0	0.012	0.002	0.022	0.013	0.007
TOPOLIGER	-0.420	47.461	40	18	0	0.013	-0.006	0.037	0.018	0.013
IGN	-0.263	44.799	52	41	2	-0.003	-0.054	0.038	0.018	0.018
EDF	6.556	44.810	1140	18	0	0.032	-0.017	0.073	0.043	0.029
IGN	2.192	44.023	283	8	0	-0.039	-0.048	-0.024	0.039	0.009
IPGP	3.994	44.564	972	3	0	0.076	-0.021	0.174	0.103	0.085
IGN	5.051	47.319	256	95	2	0.009	-0.026	0.036	0.015	0.012
IGN	6.617	43.413	164	6	0	0.011	-0.020	0.040	0.021	0.021
SNCF	2.478	48.773	74	3	0	-0.042	-0.093	-0.016	0.055	0.044
EDF	-0.464	43.131	360	3	0	-0.002	-0.013	0.017	0.013	0.016
IGN	-1.365	43.403	90	26	2	0.001	-0.046	0.053	0.020	0.020
IGN	5.909	43.143	147	6	0	-0.005	-0.025	0.015	0.016	0.016
CNRS	7.184	43.876	162	4	0	-0.002	-0.019	0.010	0.011	0.012
EDF	7.191	43.877	184	12	0	0.001	-0.025	0.029	0.017	0.018
SNCF-MIRE	0.247	44.443	32	3	0	-0.006	-0.015	-0.002	0.009	0.009
SNCF-MIRE	2.457	48.931	46	2	0	-0.015	-0.022	-0.007	0.016	0.011
SNCF-RATP	2.341	48.827	54	9	0	-0.010	-0.030	0.012	0.018	0.016
SNCF	-4.154	48.231	74	15	1	0.008	-0.025	0.038	0.020	0.019
SNCF	2.678	48.511	55	2	0	-0.018	-0.019	-0.017	0.018	0.001
Ville de NIC	7.240	43.717	100	28	0	-0.008	-0.048	0.015	0.017	0.015
SNCF	3.519	47.951	85	3	0	-0.004	-0.005	-0.003	0.004	0.001
RBF nouv niv	NR	NR	NR	28	0	0.004	-0.013	0.025	0.009	0.008
RBF anc niv	NR	NR	NR	4	0	0.005	-0.001	0.017	0.009	0.008
RRF	NR	NR	NR	2	0	-0.004	-0.009	0.006	0.006	0.007
MAURES	6.624	43.452	174	22	2	-0.006	-0.057	0.040	0.028	0.028
VILLE DE NIC	7.230	43.721	126	30	1	-0.006	-0.032	0.015	0.012	0.011
BORDEAUX	-0.611	44.872	30	138	0	0.005	-0.030	0.040	0.015	0.014
ENSG	5.846	43.958	500	65	2	-0.010	-0.045	0.043	0.024	0.022
GRENOBLE	5.701	45.208	209	3	0	-0.019	-0.041	-0.001	0.026	0.022
ERNIT	0.928	48.583	123	1160	8	-0.008	-0.057	0.043	0.018	0.016

Précision entre 1 et 2 cm

L'Ecu F.(2010)

Un réseau Géodésique Combiné

RBF : réseau de base Français:

- λ, φ, h : par GNSS
- H : par nivellement de précision
- g : par gravimétrie

2000-2009 : Observations gravimétriques

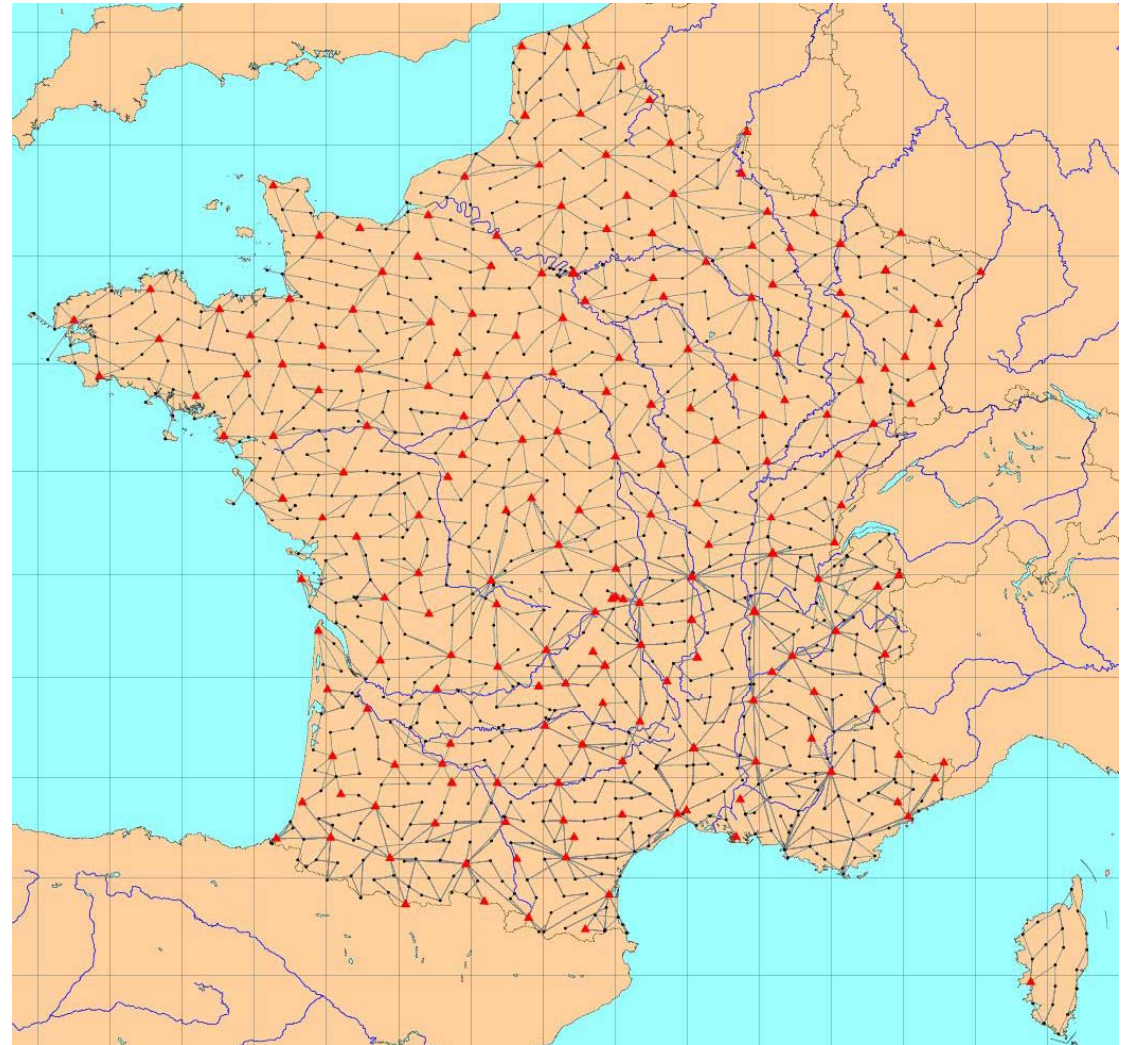
- 3279 observations relatives
- 244 observations absolues

En partenariat avec les Instituts

- de Physique du Globe de Paris
- de Recherche pour le Développement



Gravimètres CG5 et A10 (IGN/SGN)



*Schéma des observations gravimétriques
(Gattacceca T. 2008)*

- UELN et EVRS
- EVRS2007
- Evaluation du géoïde Européen
- NIREF : Le nivellement de référence français
- Comparaison NIREF avec UELN et EGG

UEN : Unified European Levelling Network

- composé des réseaux de 1er ordre des pays européens

Intégration du 1^{er} ordre français dans UELN70

UEN 95/98

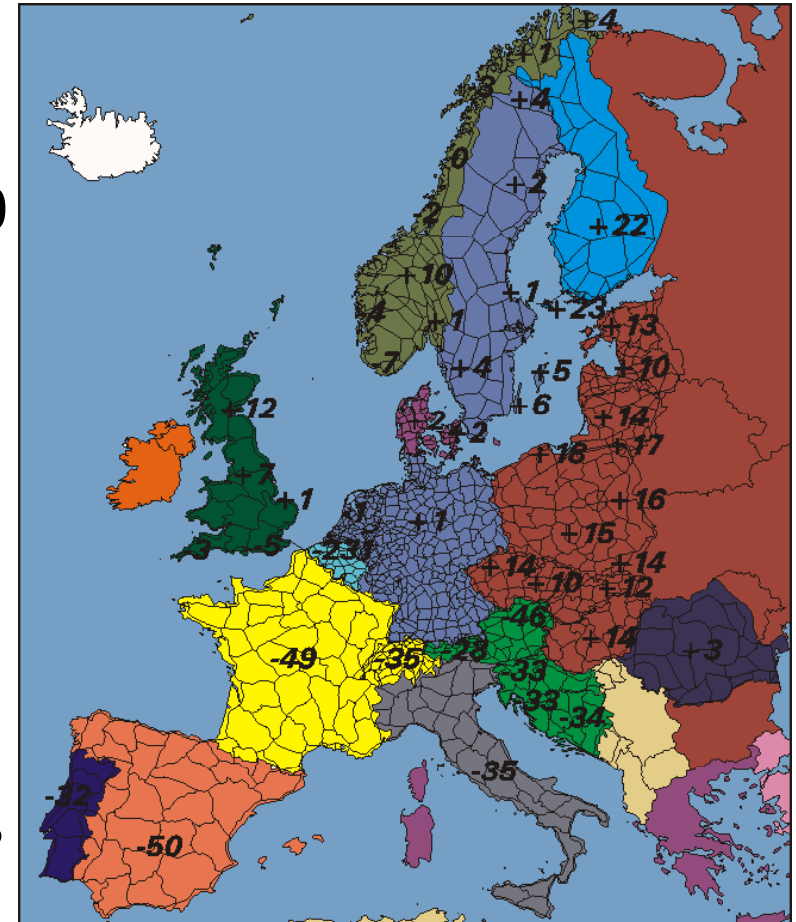
EVRS : European Vertical Reference System

- marégraphe : Amsterdam (NAP)(W_{OE})
- côte géopotentielle, altitude normale
- Ellipsoïde GRS80
- Marée nulle (Tide Free)
- Compensation de dénivellées géopotentielles

Les différences entre UELN et les SRV

Nationaux

origines différentes (Wo) (date et mer)



Transformation parameters from national heights to UELN heights in Europe (in cm)

September 2000

EVRS (European Vertical Reference System)

2 réalisations : EVRS2000 et EVRS2007

EVRF2007:

- prise en compte du rebond postglaciaire (pays nordiques)

- 10347 observations (dénivellées géopotentielles)
- Nombre d'inconnues 7939
- 13 points fixés

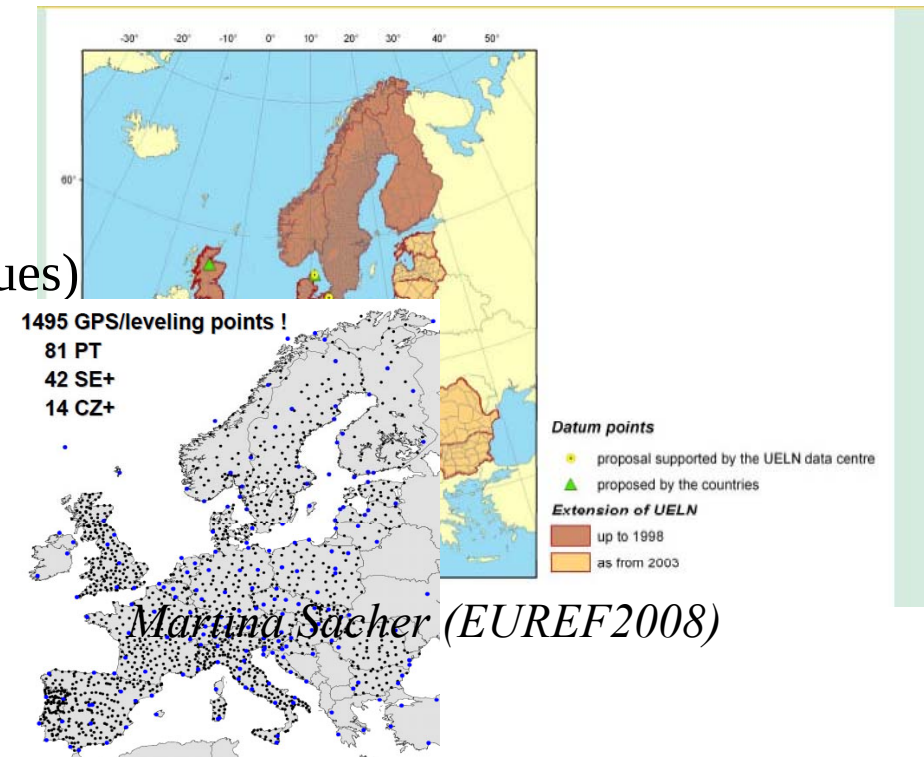
- Quasi-Géoïde associé: géoïde européen EGG2008

- Connexion avec ETRS89 (points GPS nivelés :
EUVN, EUVN_DA (1500 points))

- Participation Française :

1995 : 23 points EUVN (nœuds du réseau 1^{er} ordre)

2007: 180 points EUVN_DA (RBF nivelés)



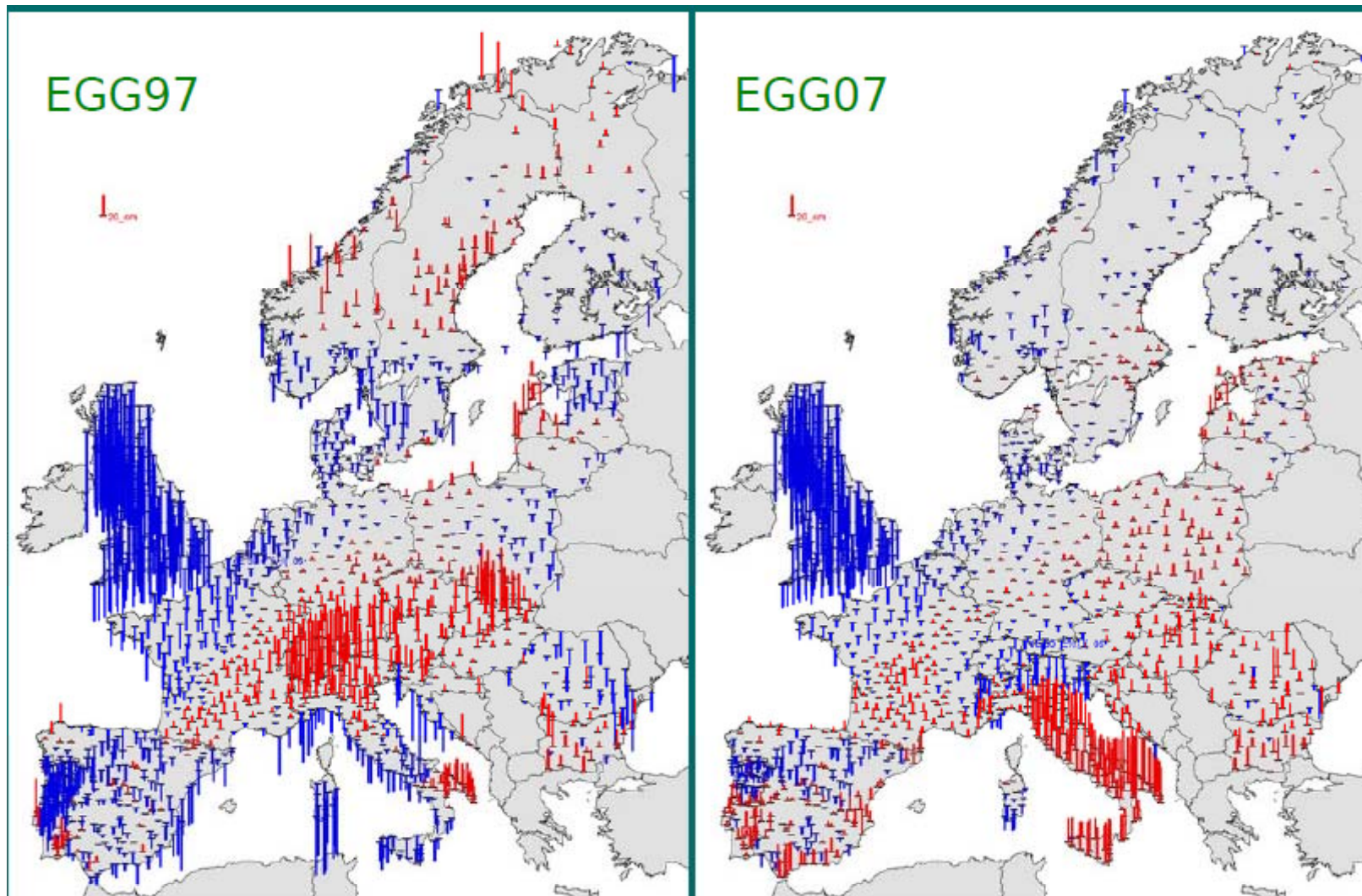
EUVN_DA: Ambrous Keyneres (EUREF2008)

Evaluation du Géoïde Européen

	# of pts	RMS [cm]		MAX-MIN range	
		EGG97	EGG07	EGG97	EGG07
Austria	17	11	6	33	20
Croatia	20	20	6	80	27
France	180	12	8	70	36
Germany	75	10	4	46	14
Great Br.	189	19	14	74	54
Hungary	20	9	3	40	11
Netherland	15	6	2	20	7
Norway	63	16	4	77	18
Poland	62	9	3	44	12
Slovakia	28	17	3	57	16
Slovenia	12	14	4	46	14
Spain	177	12	7	58	23
Sweden	84	12	3	85	15
Switzerland	20	10	5	31	16

Évaluation du géoïde Européen à partir des points EULN/DA (A.Keyneres, EUREF2008)

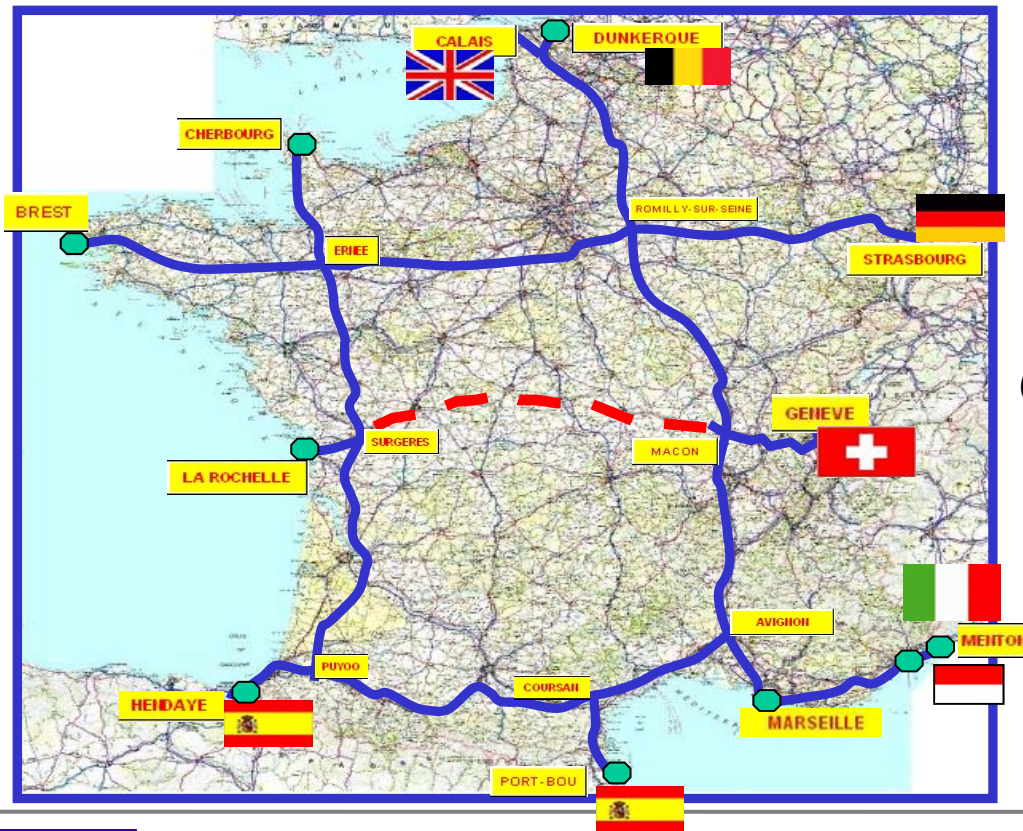
Evaluations du modèle de géoïde européen



Évaluation du géoïde Européen à partir des points ULN/DA (H.Denker 2008)

NIREF: le nivellement de référence français

- En 1983 : Traverse Marseille-Dunkerque
- 1996 : spécifications (*Ref[5] Duquenne H.(1996)*)
- Nivellement motorisé très précis
- Rattachement de marégraphes
- Jonctions avec les pays voisins
- Avec Angleterre par le tunnel sous la Manche (1994)



(photos et dessins
IGN/SGN 2009)



NIREF: le nivellement de référence français

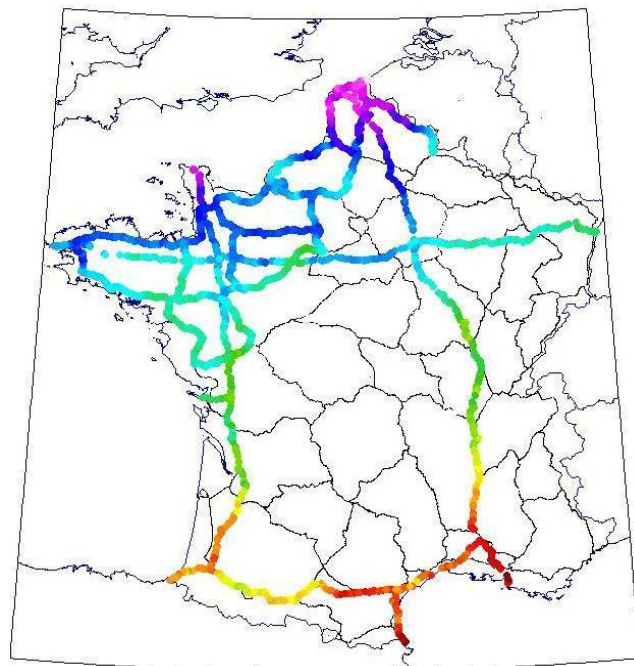
Confirme un biais Nord-Sud de IGN69 (20 cm entre Marseille et Dunkerque)

Pas de pente avec l'Atlantique

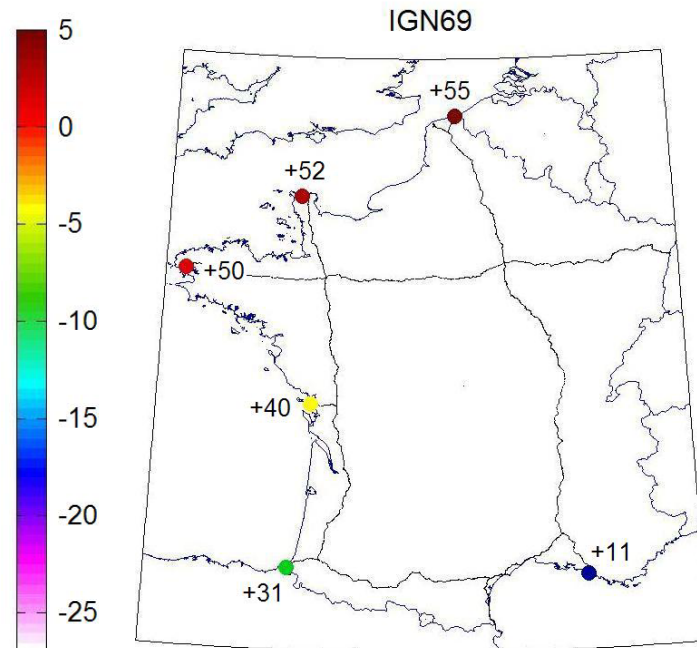
Atlantique et Manche 20 cm au dessus de la Méditerranée

Recalcul du 1er ordre

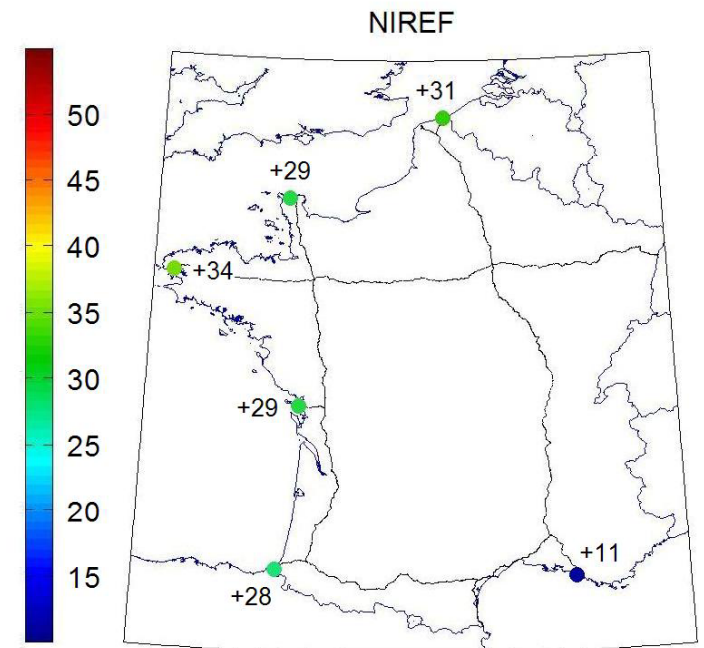
Nouvelles dénivelées géopotentielles proposées pour la référence verticale européenne (EVRF..)



Comparaison NIREF_IGN69

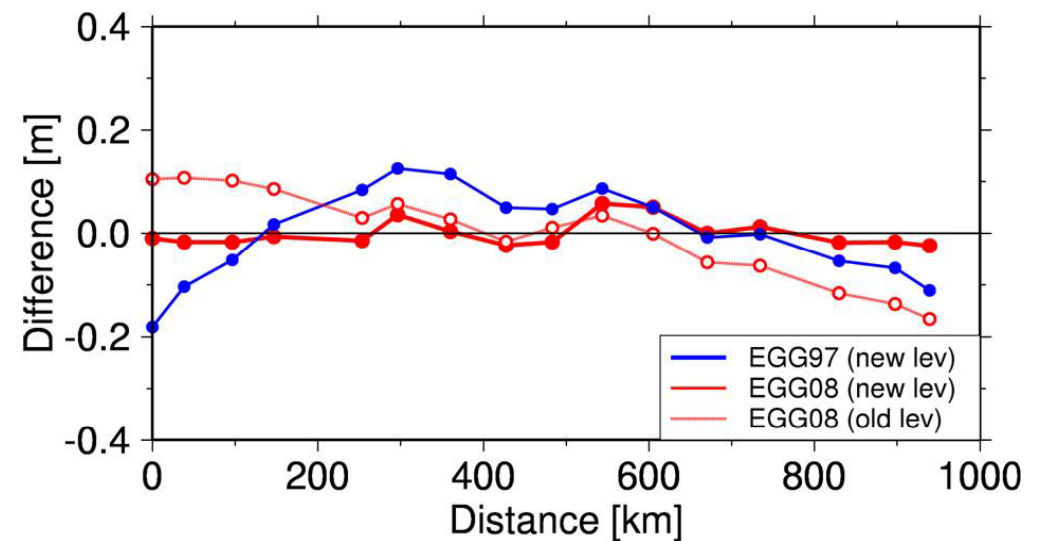
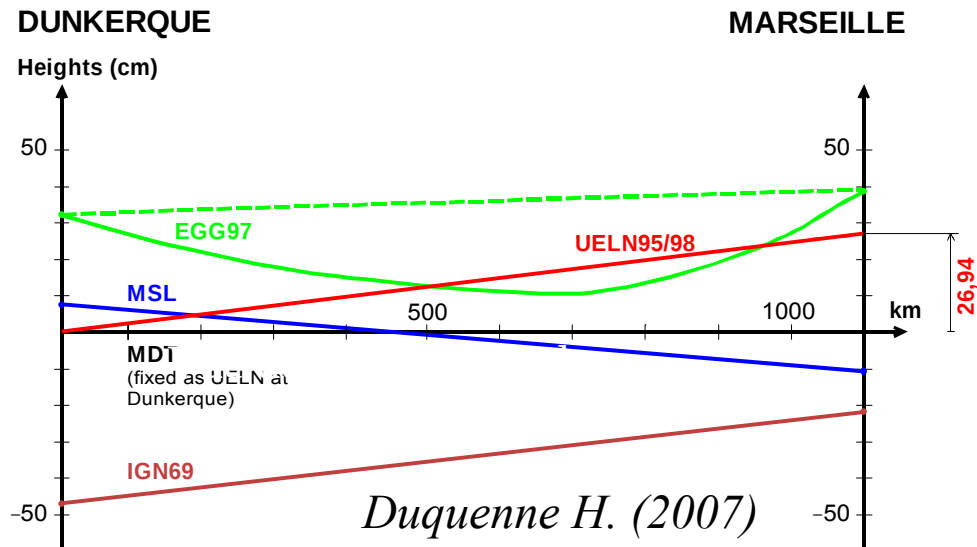


Comparaison avec les marégraphes (Rebischung P. 2008)



Ref[15]: Rebischung P. et Duquenne H. 2008)

Comparaison NIREF avec UELN et EGG



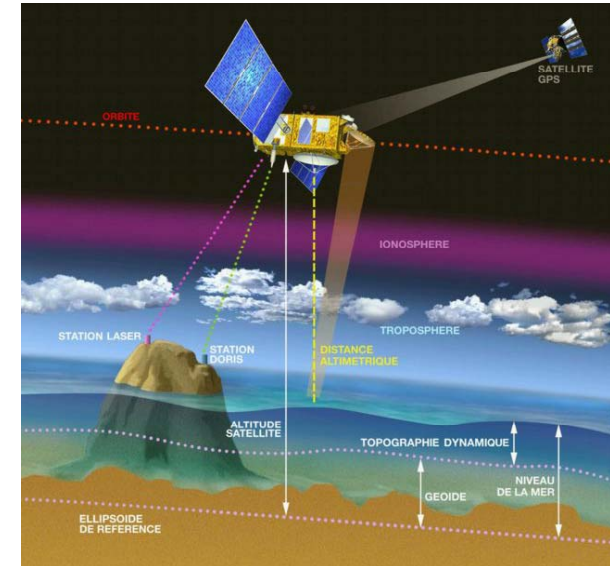
Comparaison NIREF (MD) avec géoïde européen
Denker H. (2008)

- Modèles de géoïdes globaux
- Evaluation de géoïdes globaux
- Evaluation de EIGEN-GL04S1
- Evaluation de GOCE

Modèles de géoïdes globaux

Les observations qui peuvent rentrer dans la détermination d'un modèle

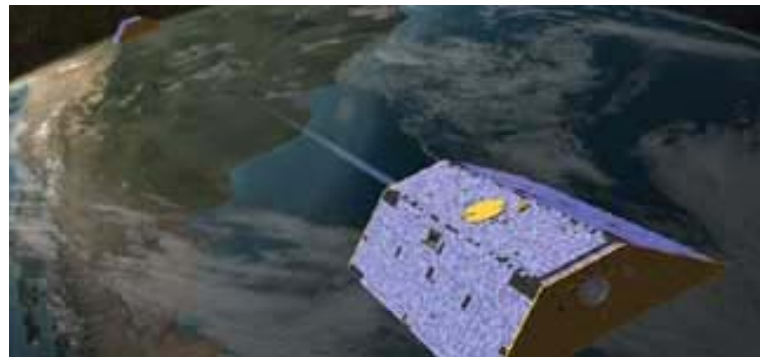
- Déviations de la verticale (astronomie)
- Gravimétrie terrestre, marine, aéroportée
- Perturbations d'orbites de satellite
- Altimétrie par satellite (Δg)
- Gravimétrie spatiale



JASON



CHAMP



GRACE



GOCE

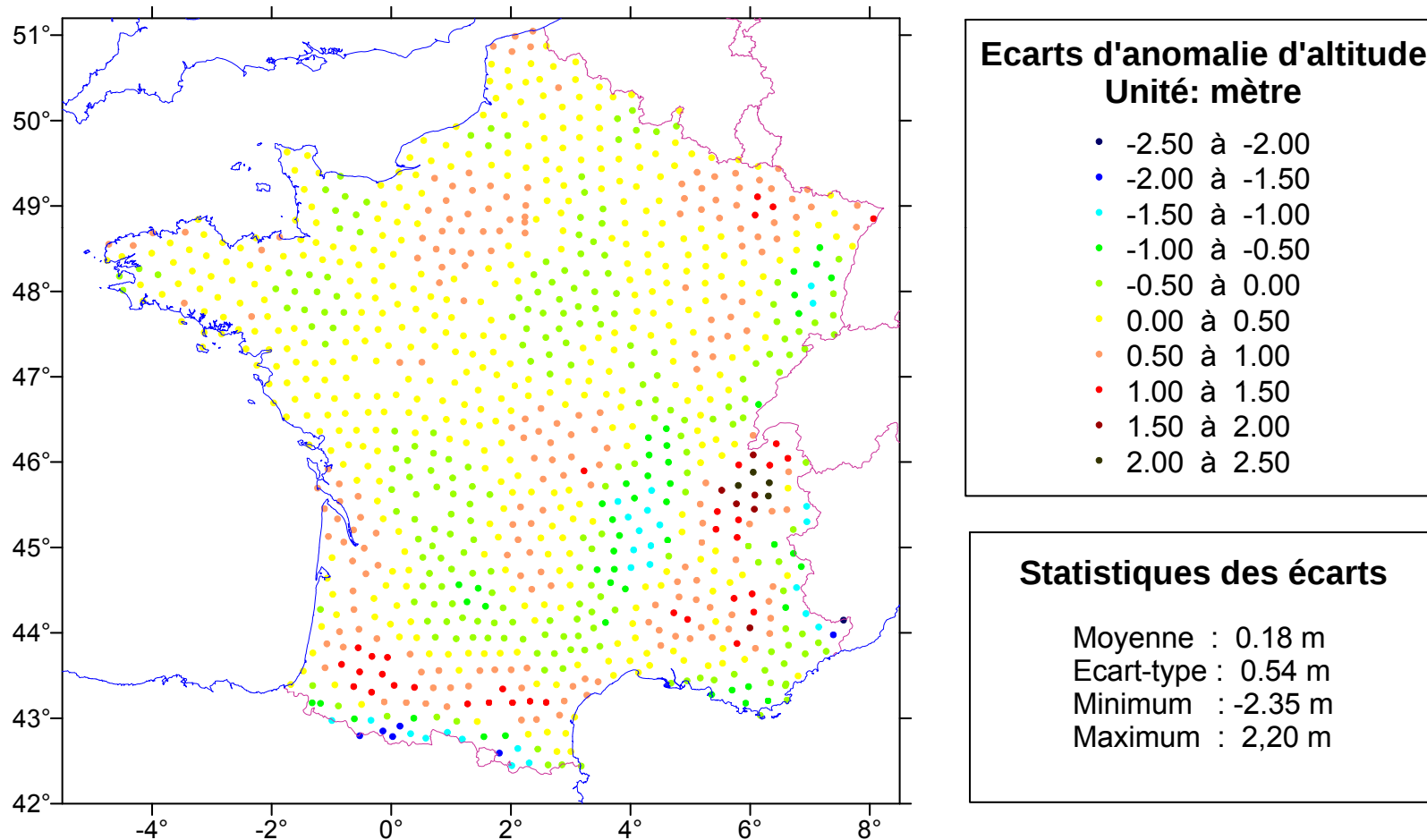
Evaluation de géoïdes globaux

Evaluation par l'ICGEM (International Center for global Gravity field Model)

Model	Nmax	USA 1930 points	Canada 1930 points	Europe 1235 points	Australie 201 points
GGM03-UPTO150	150	0,641 m	0,521 m	0,710 m	0,494 m
EIGEN-05S	150	0,630 m	0,547 m	0,737 m	0,475 m
EIGEN-GL04S1	150	0,630 m	0,576 m	0,748 m	0,464 m
EIGEN-05C	360	0,341 m	0,251 m	0,303 m	0,244 m
EGM2008	2190	0,248 m	0,126 m	0,208 m	0,217 m
EGM2006	360	0,379 m	0,357 m	0,478 m	0,403

Extrait: écart moyen quadratique GPS/niv_model

Evaluation de EIGEN-GL04S1 par points GPS nivelés



Comparaison EIGEN-GL04S1 ($n_{\max}=150$) – RBF (H.DUQUENNE 2007)

Diapositive 60

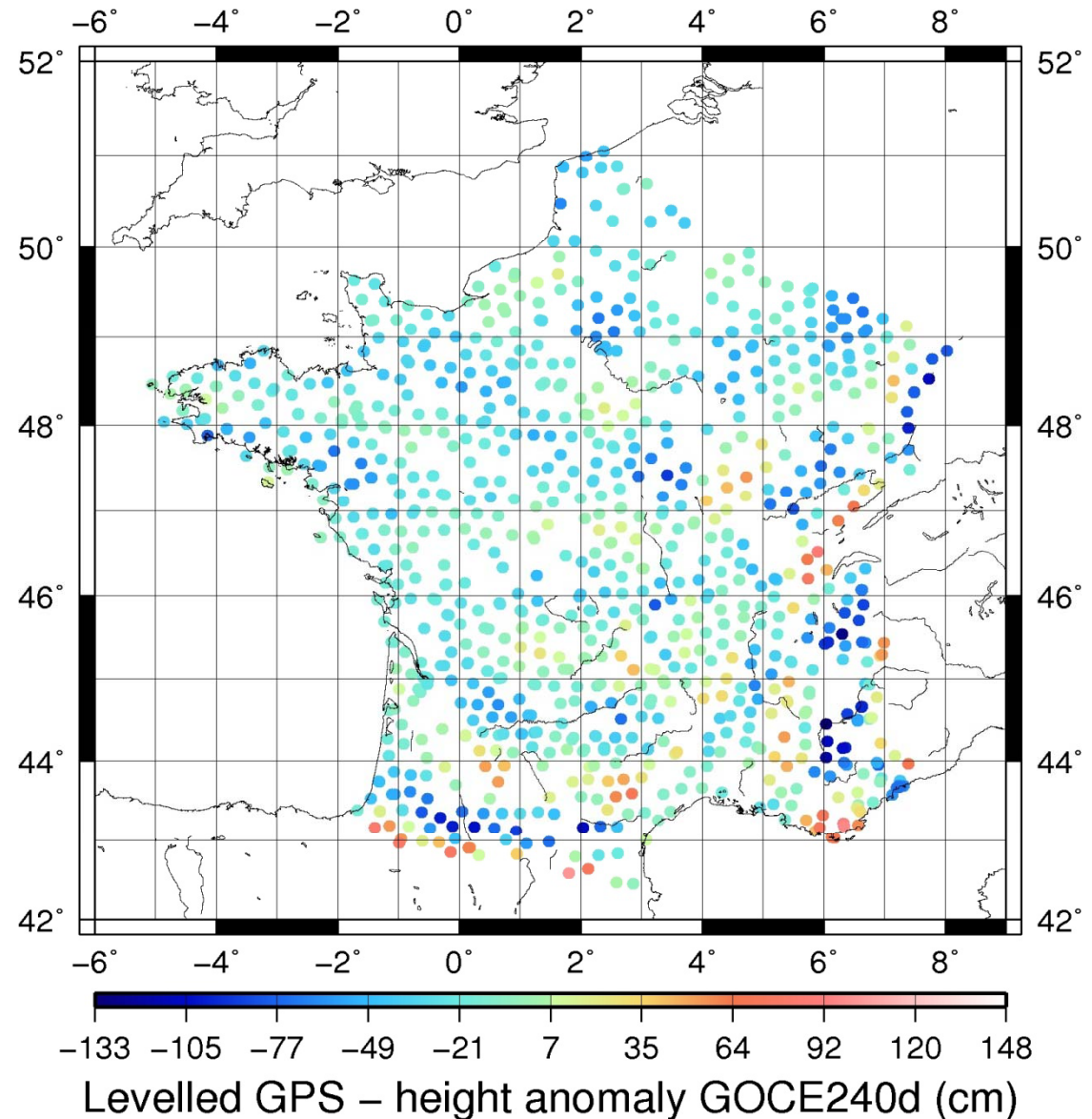
f1

franduq; 16/11/2008

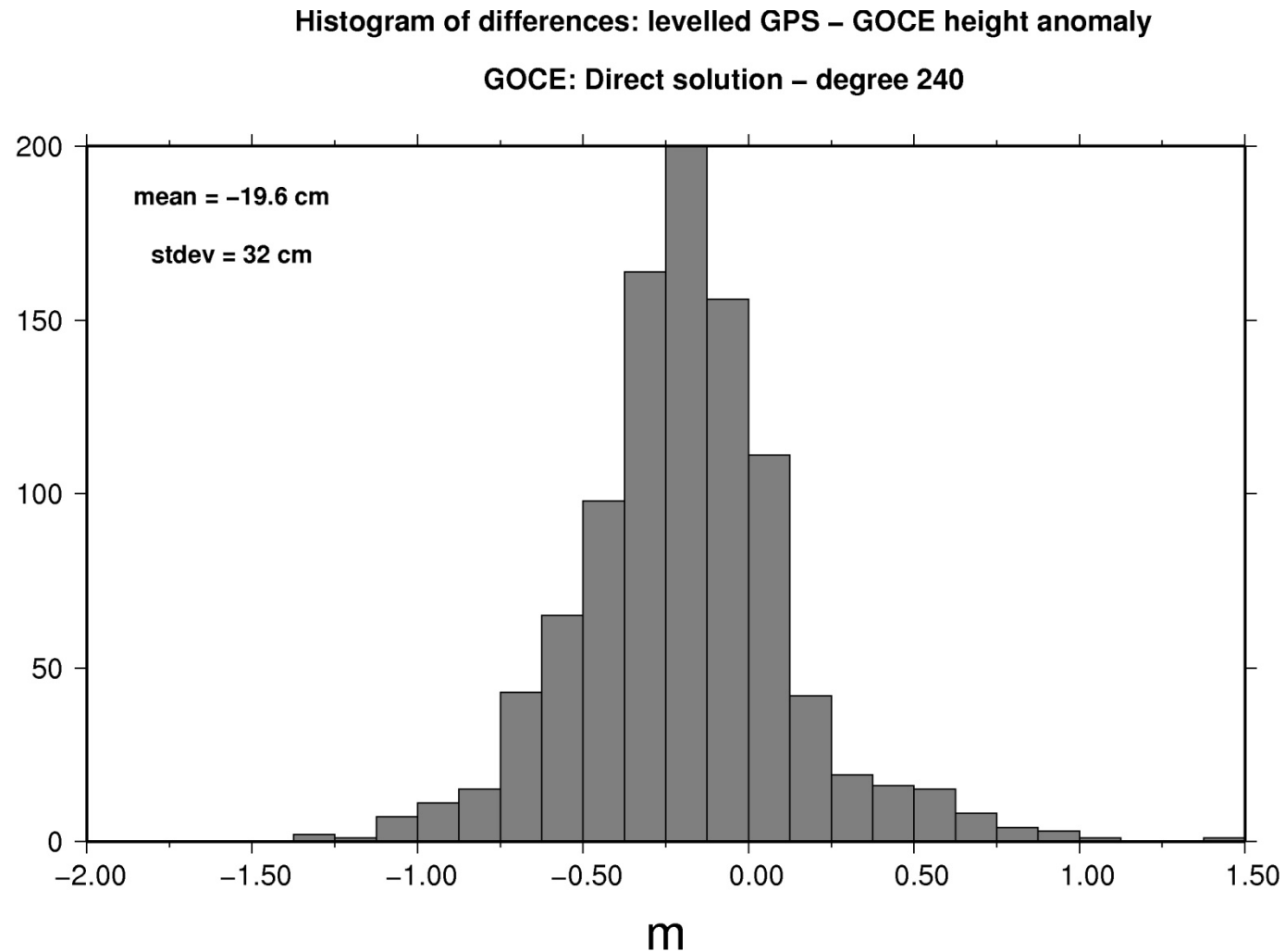
Evaluation de GOCE par des points/nivelés

- Géoïde GOCE :
- approximation sphérique
- modèle GOCE du GRGS (Bruisma et al., 2010, direct approach)
- Modèle en H.S. Jusqu'au degré 240 (résolution 83 km)
- Ellipsoïde GRS80
- 941 Points GPS nivelés :
- RGF93 v2 (ellipsoïde GRS80)
- nivellement IGN69

Ref[20]Panet I. IGN/LAREG (2010)



Evaluation de GOCE par des points/nivelés



Ref[20]Panet I. IGN/LAREG (2010)

Evaluation de GOCE par des points/nivelés

Calcul de la tendance

$$a + b(\varphi_i - \varphi_o) + c(\lambda_i - \lambda_o) + v_i$$

$$\varphi_o = 47^\circ$$

$$\lambda_o = 2^\circ$$

$$a = -20.6 \text{ cm}$$

$$b = -2.7 \text{ cm/deg.}$$

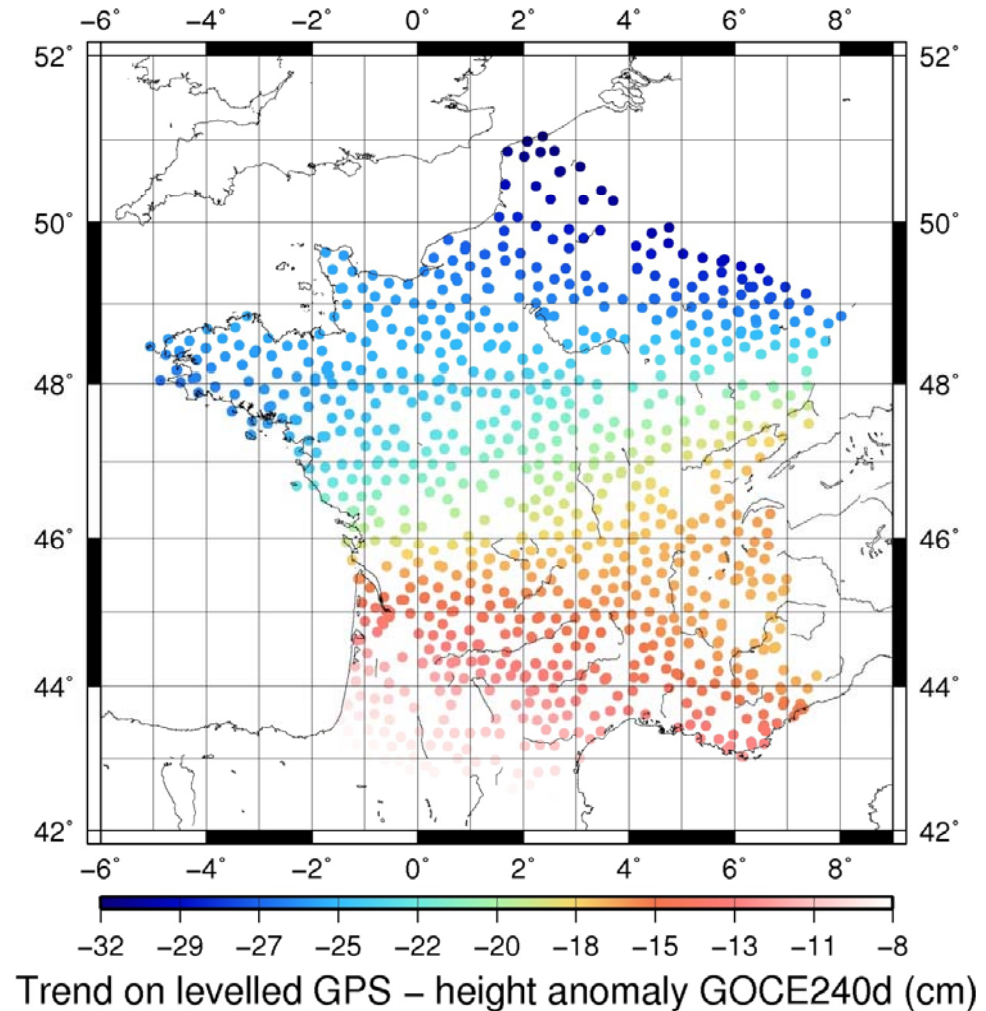
$$c = -0.8 \text{ cm/deg.}$$

a compatible avec le niveau zéro à
Marseille

b compatible avec la pente Nord-Sud
IGN69 (20 cm)

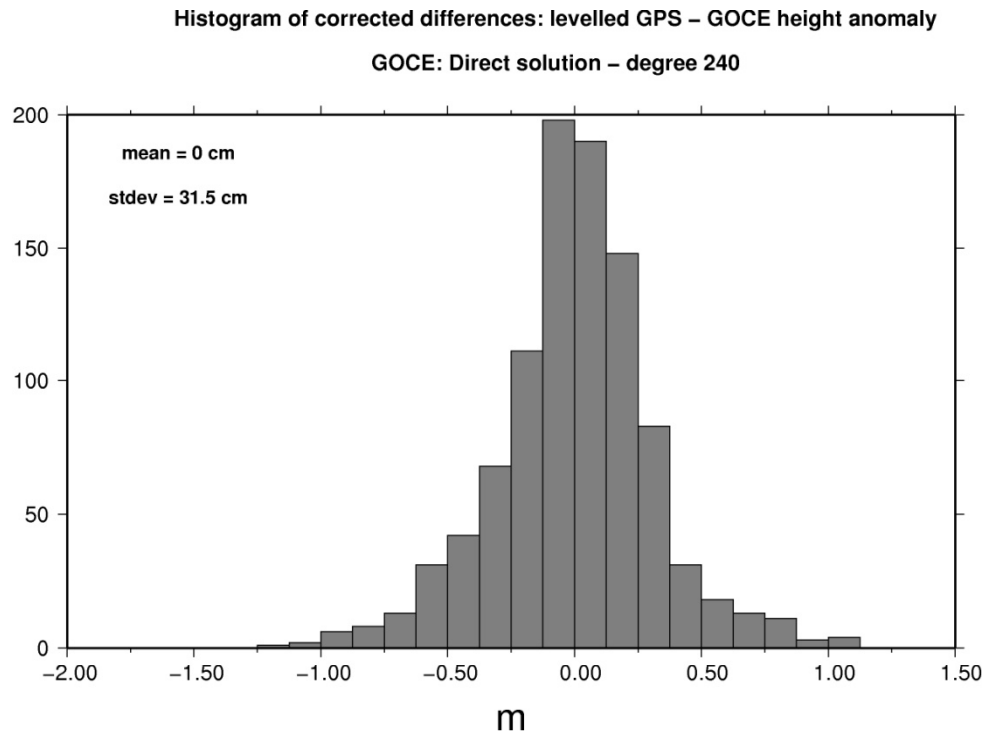
c pente Est-Ouest non justifié (10 cm)

Ref[20]Panet I. IGN/LAREG (2010)

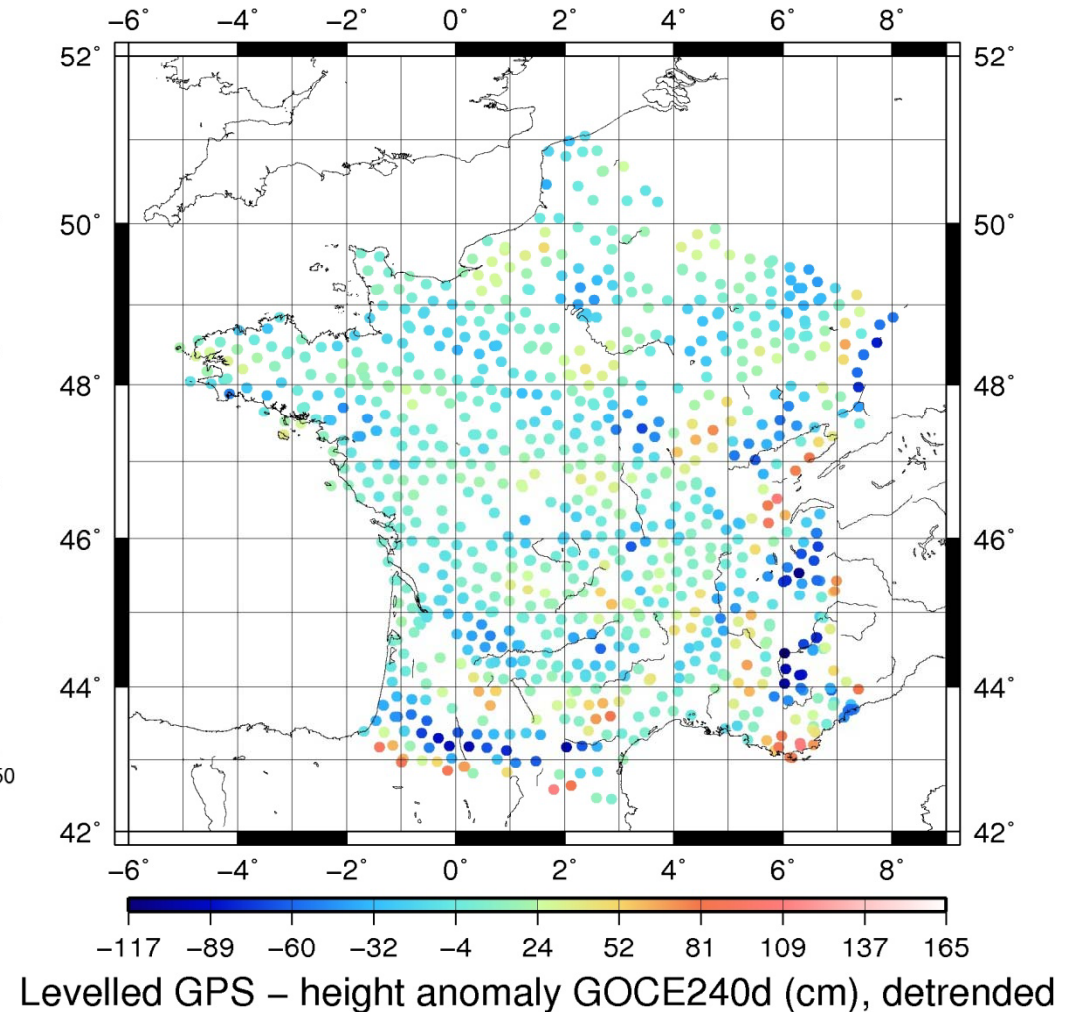


Evaluation de GOCE par des points/nivelés

Tendance retirée



Ref[20]Panet I. IGN/LAREG (2010)

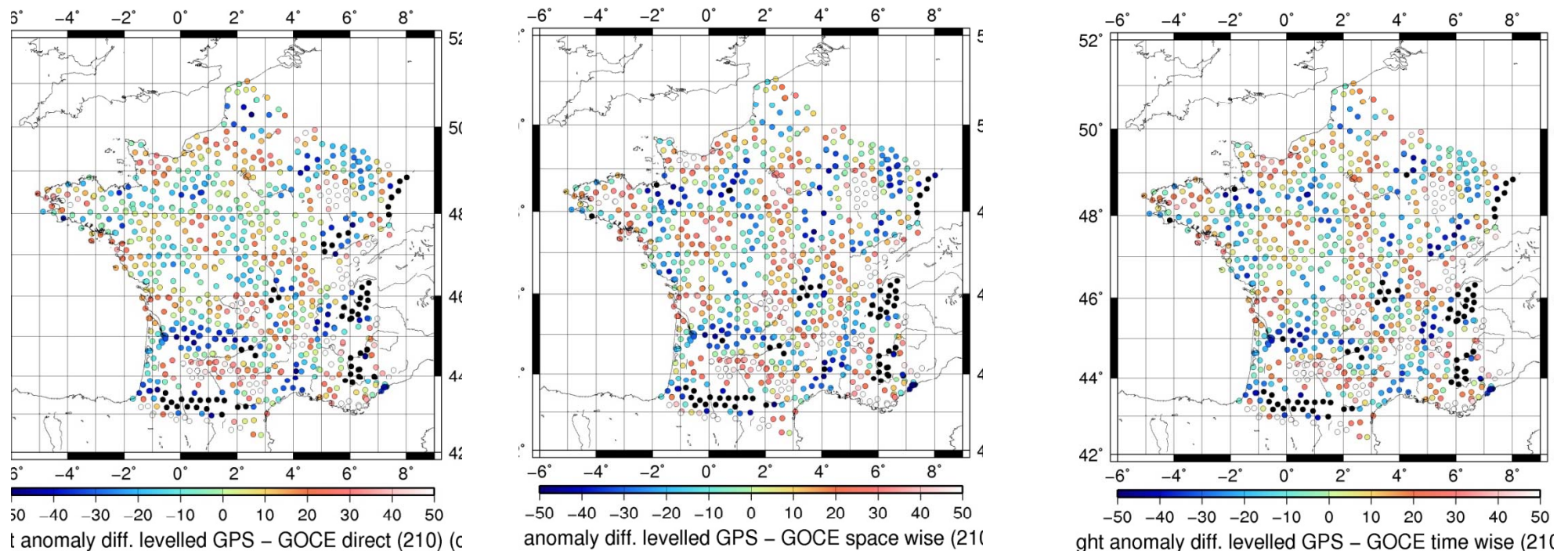


Evaluation de GOCE par des points/nivelés

Comparaison de trois modèles:

- GRGS : développement en harmoniques sphérique jusqu'au degré 240
- Migliaccio et al.: développement en harmoniques sphérique jusqu'au degré 210
- Pail et al.: développement en harmoniques sphérique jusqu'au degré 224

Comparaison avec la solution directe, pour les harmoniques 2 à 210



ref[20]Panet I. IGN/LAREG (2010)

Les perspectives

- 2020 : fin du premier cycle d'entretien des triplets
- Un semis de points GPS nivelés très dense (12600)
- Un recalcul du quasi-géoïde national avec :
 - La nouvelle gravimétrie (RBF)
 - La gravimétrie dense réadaptée
 - nouveau modèle global (Grace+Goce)
 - combinaison par ondelettes (I.Panet)
- Des calculs de géoïdes haute résolution pour l'étranger
- Intégration du NIREF dans le réseau européen
- Suivre l'évolution de la référence verticale mondiale
- Migrer de la référence Nationale vers la référence Européenne ou Mondiale ?

Références

- [1] Levallois J.J., Maillard J. (1970) – Le nouveau réseau de Nivellement de 1^{er} ordre du territoire français – Conséquences pratiques et scientifiques – Symposium sur la géodésie côtière (Munich) – IGN/2 26848
- [2] Kasser M. (1985) - Recent advances in high precision trigonometric levelling (Nipremo) in I.G.N. France - Proceedings of the third North American Vertical Datum Symposium, Rockville, Maryland, 21-26 Avril 1985, pp 57-64
- [3] Levallois J.J. (1988) – mesurer la Terre : 300 ans de géodésie en France-, Presse de l'école des Ponts et Chaussées, 1988
- [4] Kasser M. (1989) – Un nivellement de très haute précision : la traversée Marseille Dunkerque 1983 – C.R. Acad.Sci, Paris, t.309, série II, P.695-700, 1989
- [5] Duquenne H. (1996) – Spécifications produit du nivellement de référence français – publications IGN/LAREG, SP6, juillet 1996
- [6] Duquenne H. (1998) – QGF98, a new solution for the quasigeoid in France. – Finnish Geodetic Institute Report 98:4, pp. 251-255. Proceedings of the 2nd Continental Workshop on the Geoid in Europe, Budapest, March 10-14th, 1998.
- [7] Duquenne H. (1998) – Grille de correction pour effectuer du nivellement par GPS – revue Géomètre n°6 juin 1998
- [8] WILLIS P. and Al, – rapport du sous groupe “conversion altimétrique RGF93-IGN69 – CNIG , 1999

Références

- [9] Duquenne H. (2000) – Processus de conversions altimétriques applicables en France. – *In* : Le GPS et les métiers du génie civil. – Journées GPS 2000 du réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Nantes, juin 2000.
- [10] Duquenne H., Olesen A.V., Forsberg R., Gidskehaug A. (2002) – Improvement of the gravity field and geoid around Corsica by aerial gravimetry. – Third Meeting of the International Gravity and Geoid Commission (GG2002), Tessaloniki H., August 28-30th, 2002.
- [11] Duquenne H., Olesen A.V., Forsberg R., Gidskehaug A. (2004) – Amélioration du champ de pesanteur et du géoïde autour de la Corse par gravimétrie aéroportée – revue XYZ n°101 pp 67-74
- [12] Duquenne H. (2006) – a data set to test geoid computation methods – in proceedings of the 1st International Symposium of the International Gravity Field Service, Istambul, pp 61-65, ISS 1300 – 5790, 2006
- [13] Duquenne H. (2008) – Altitudes, nivellement, système de référence verticale – Cours au Mastère Photogrammétrie, Positionnement, Mesures de Déformation , IGN, ENSG, Janvier 2008
- [14] Duquenne H. (2008) – La modélisation du géoïde haute résolution – Cours au Mastère Photogrammétrie, Positionnement, Mesures de Déformation , IGN, ENSG, Février 2008
- [15] Rebischung P., Duquenne H. (2008) – The French zero-order levelling network - first global results and possible consequences for UELN – Proceedings of the Symposium of IAG subcommission for Europe (EUREF), Brussels, Belgium, 18-21 Juin 2008
- [16] Coulomb A.(2009) – Le marégraphe de Marseille : patrimoine et modernité – revue XYZ n°118, pp 17-24, mars 2009

Références

- [17] Coulomb A.(2009) – Entretien du réseau de nivellement par les triplets – revue XYZ n°119, pp 39-42, Juin 2009
- [18] L'Ecu F.(2009) – *Corse – rapport de constitution de la grille de conversion altimétrique RAC09* IGN/SGN RT/G 81, 2009
- [19] Coulomb A. 2010 – A Marseille, l'IGN gère un observatoire marégraphique moderne, performant et évolutif – poster, journée de la géodésie, Saint-Mandé, 14 octobre 2010
- [20] Panet I. and al (2010) – towards a regional model combining GOCE and ground data over France – poster , REFAG symposium, IAG commission1, Marne-la-Vallée, France, 4-8 october 2010
- [21] Descriptifs quasi-géoïdes et grilles de conversion altimétriques – IGN/SGN et IGN/LAREG, septembre 2010