

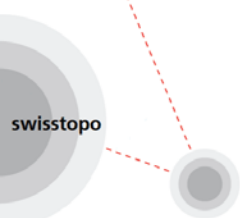


Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral de topographie swisstopo

wissen wohin
savoir où
sapere dove
knowing where

Le système de référence altimétrique global



15 mars 2017

Urs Marti

Laura Sánchez





Sommaire

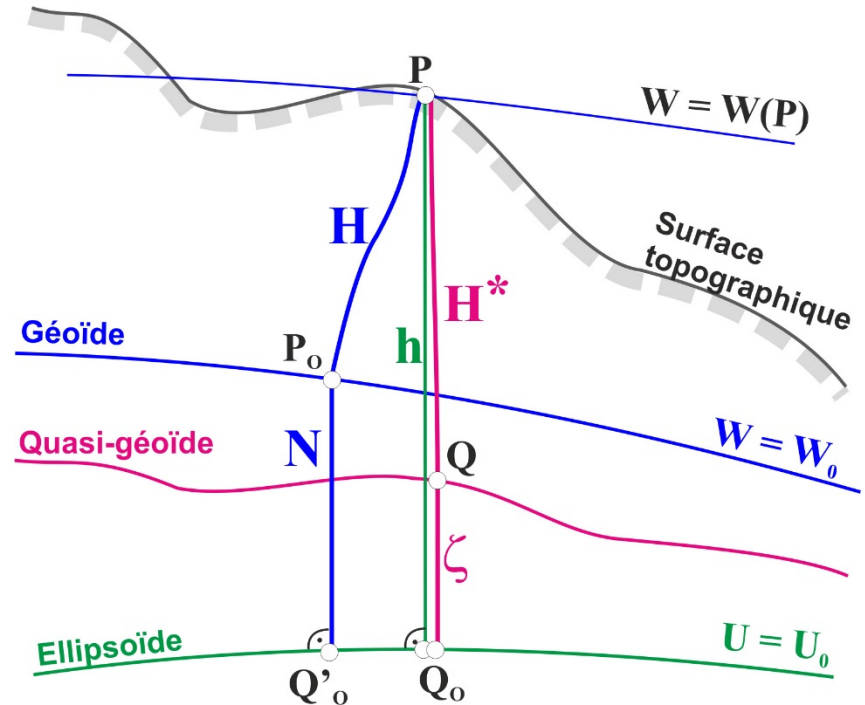
- 1) Motivation: Combinaison consistante de coordonnées verticales
- 2) Définition de l'IHRS (Résolution IAG 1, 2015)
- 3) Réalisation de l'IHRS: le repère de référence international altimétrique (IHRF)
- 4) Les mesures nécessaires pour la réalisation de l'IHRF
- 5) Produits et les plans futures



Motivation

1) Coordonnées verticales utilisées en pratique:

- h → hauteurs ellipsoïdales (GNSS);
- H → Altitudes physiques (nivellement + réductions gravimétriques);
- N → hauteur du (Quasi-) géoïde (modélisation du champ de pesanteur).



2) tout le monde qui utilise le GNSS et qui s'intéresse aux altitudes physiques a besoin de

$$H = h - N$$

avec une précision au niveau de 1 cm consistant globalement



Motivation 2

Vue externe

- Le changement du climat est un thème actuel de la politique et est un développement qui influence les conditions de vie de l'humanité
- L'élévation du niveau de la mer est un risqué majeur pour beaucoup de régions du monde
- Changements de l'altitude ou de gravité sont des indicateurs de changements de notre environnement
- Modélisation d'inondations, érosion
- Atterrissage et sécurité avancée pour l'aviation
- Un système altimétrique global et unifié forme la base pour surveiller des effets relative a des mouvements verticaux (géométrie et gravité)



Motivation 3

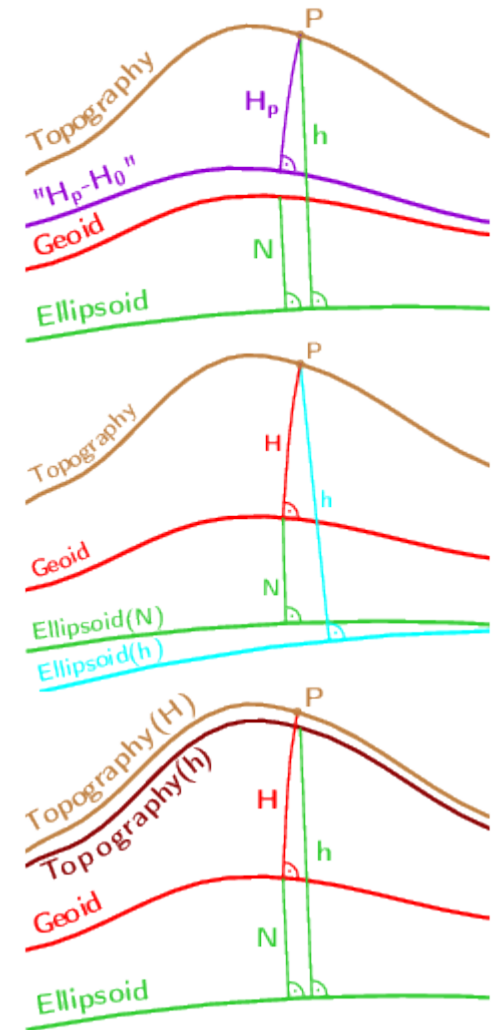
Vue géodésique

- Les standards utilisés dans la référence géométrique et dans les produits gravimétriques ne sont pas compatibles.
- Les inconsistances entre la géométrie et la gravimétrie doivent être éliminées.
- La détermination de changements dans le repère vertical nécessite une référence stable et consistant à long terme.
- Une interaction avec d'autres disciplines (que la géodésie) a besoin d'un système altimétrique global; p.ex. hydrographie, océanographie, etc.



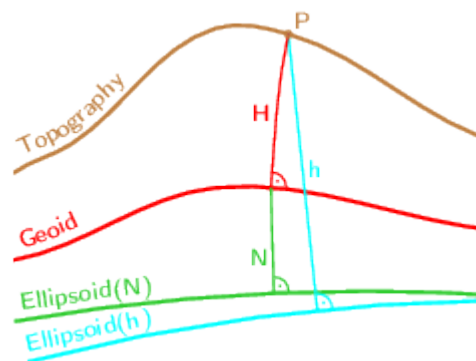
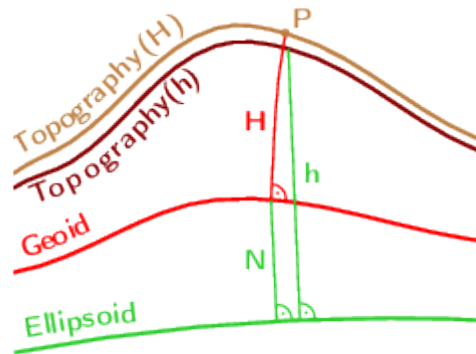
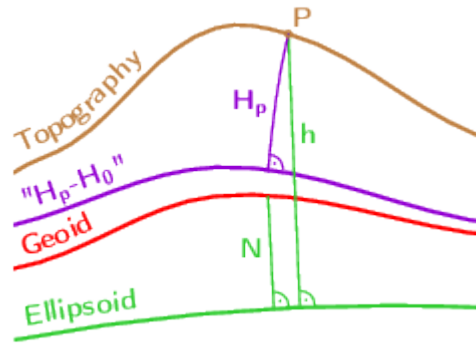
H = h – N en théorie, mais en pratique ?

- Les altitudes physiques H normalement sont référées à des niveaux (datums) de référence différentes (plus que 100 globalement).
- Différents paramètres de l'ellipsoïde (a , GM) sont utilisés en géométrie et en gravimétrie.
- H et h sont données dans des époques différentes (normalement dH/dt n'est pas connu).
- des réductions différentes sont utilisées pour H , h et N (marées, atmosphère, hydrologie, rebond postglaciaire, etc.).
- ...

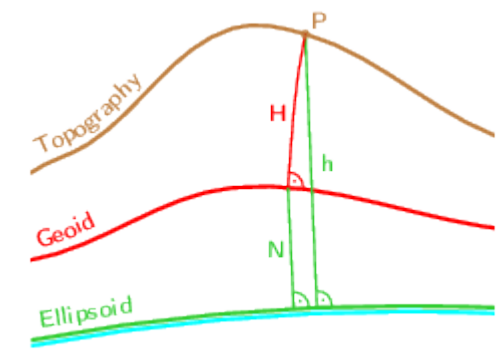
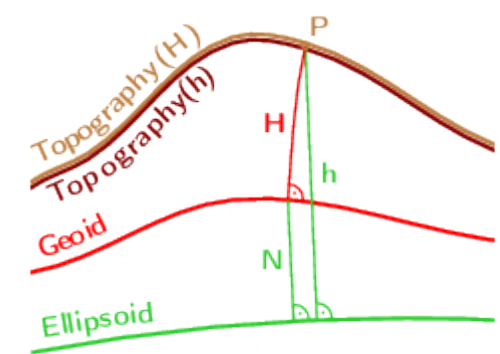
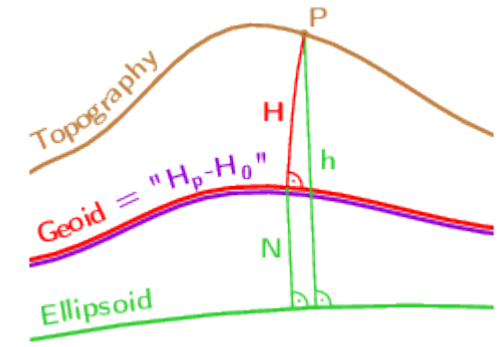




un système altimétrique global et unifié est nécessaire pour assurer la consistance entre h , H , N , globalement et au niveau de 1 cm

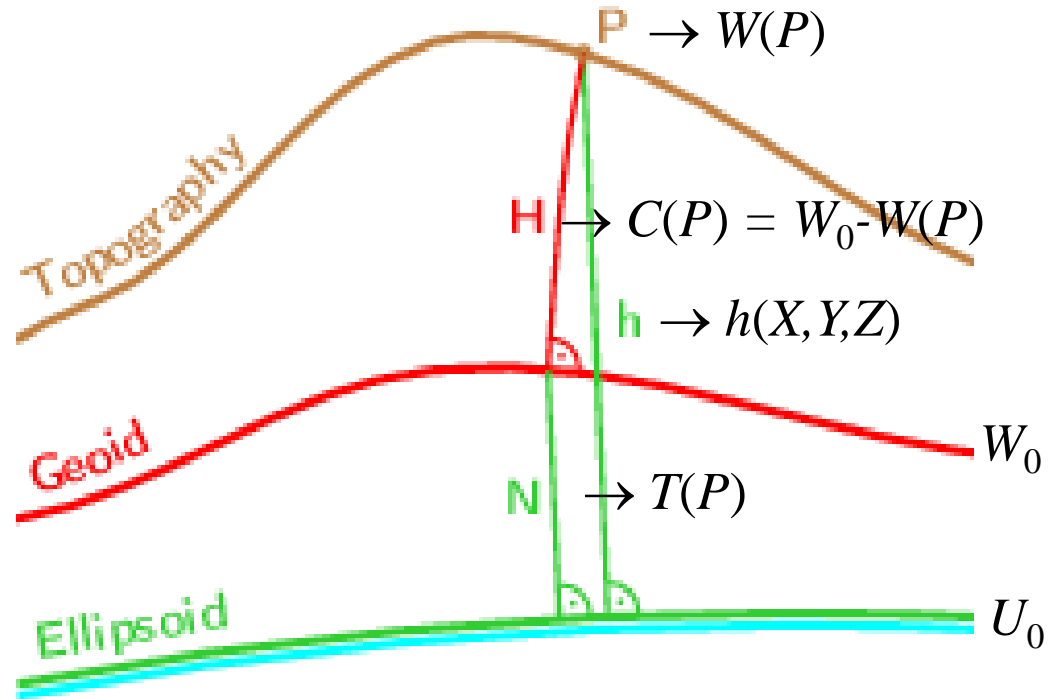


- un niveau de référence unifié pour les altitudes physiques.
- H , h et N dans le même système de marées.
- Même modèles pour la réduction des changements temporelles de H , h , N .
- même époque de référence pour H et h .
- Mêmes paramètres ellipsoïdales en gravimétrie et géométrie
- ...





Coordonnées verticales et potentiel



Nécessités:

- $W_0 = U_0$
- Paramètres additionnels: GM, ω, J_2



Le système de référence international altimétrique (IHRIS). Résolution IAG No. 1, Prague, 2015

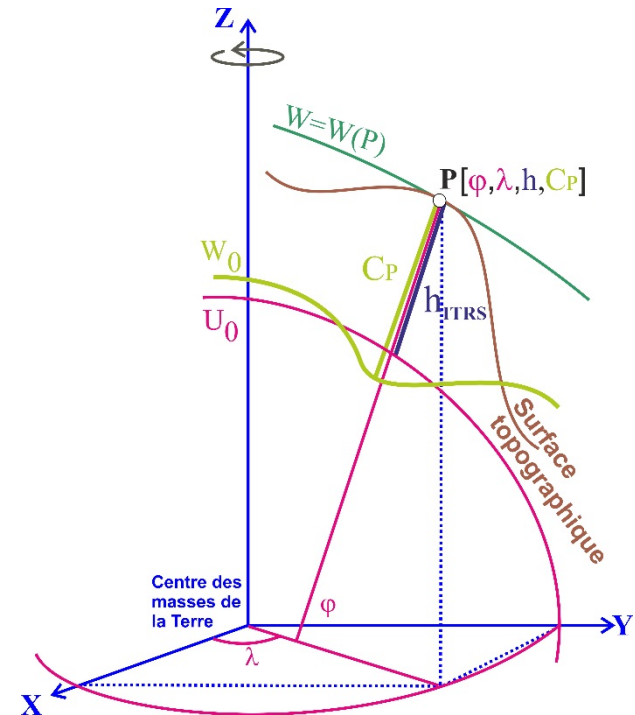
1) Les coordonnées verticales sont des différences du potentiel relative à une valeur conventionnelle W_0 :

- $C_P = C(P) = W_0 - W(P) = -\Delta W(P)$
- Valeur conventionnelle fixée:
 $W_0 = \text{const.} = 62\,636\,853.4 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$

2) La position P est donnée par le vecteur de coordonnées $\mathbf{X}_P (X_P, Y_P, Z_P)$ dans l'ITRF $W(P) = W(\mathbf{X}_P)$

3) La détermination de $\mathbf{X}(P)$, $W(P)$ (ou $C(P)$) inclut la variation temporelle, $\dot{\mathbf{X}}(P)$, $\dot{W}(P)$ (ou $\dot{C}(P)$).

4) La détermination de \mathbf{X} , $\dot{\mathbf{X}}$ suit des standards (et des conventions) adaptés de l'IERS pour ITRS/ITRF. Des standards similaires pour la détermination de W , \dot{W} n'existent pas (encore).





Réalisation du IHRS

Un repère (cadre) de référence réalise un système de référence en deux manières:

- physique, par une **matérialisation solide de points** (ou des instruments d'observations),
- mathématique, par la **détermination de coordonnées** dans ce système de référence.
- Les coordonnées des points sont calculées des observations, mais en suivant la définition du système de référence.

Les buts prochains dans l'IHRS:

- Réalisation d'un **repère de référence international altimétrique** (IHRF) avec des **coordonnées primaires de haute précision** $X_P, \dot{X}_P, W_P, \dot{W}_P$.
- Identification et compilation/synthèse de standards, conventions et procédures nécessaires pour garantir la consistance entre la définition (IHRS) et la réalisation (IHRF); une documentation équivalente aux conventions **IERS est nécessaire pour l'IHRS/l'IHRF**.



Exigences (précision demandée) pour W_P

Le mandat de GGOS n'inclut pas explicitement les altitudes physiques et les nombres géopotentiels mais déclare:

- Précision du géoïde (géométrie d'une surface équipotentielle)
 - Géoïde statique : **1 mm**, résolution spatiale: **10 km**.
 - variation temporelle du géoïde : **1 mm**, résolution spatiale **50 km**, avec une résolution temporelle de **10 jours**

- Précision des coordonnées ITRF:
 - Positions: **1 mm horizontale, 3 mm verticale**.
 - mouvement: **0.1 mm/a horizontale, 0.3 mm/a verticale**.

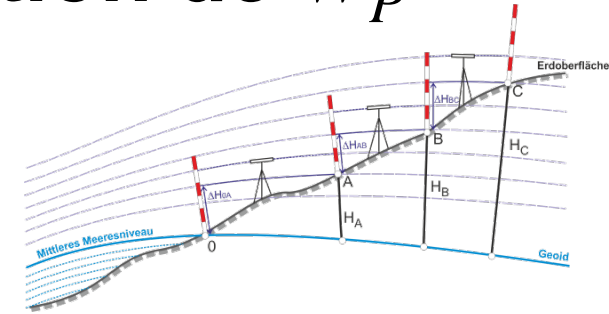
- Précision dérivée (attendue) de W_P :
 - Positions: $\sim 3 \times 10^{-2} \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ (ca. **3 mm**).
 - Mouvements: $\sim 3 \times 10^{-3} \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ (ca. **0.3 mm/a**).



Possibilités de détermination de W_P

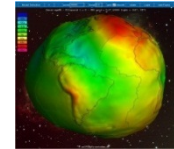
1) Nivellement + Gravimétrie:

$$W_P = W_0 - C_P; \quad C_P = \int_0^P g \, dn$$



2) Modèle globale de gravité (GGM) combiné de haute résolution:

$$W_P = f(X_P, GGM)$$



3) Modèle de gravité (géoïde) local de haute résolution:

$$W_P = W_{P,satellite} + W_{P,haute\ résolution}$$

Modélisation purement satellitaire:

analyse des orbites satellitaires

observations satellitaires du sol (SLR)

observations entre satellites (CHAMP, GRACE)

gradiométrie satellitaire (GOCE)

Altimétrie (sur les océans)



Modélisation local de haute résolution:

Méthodes de Stokes ou Molodensky

Altimétrie (sur les océans)

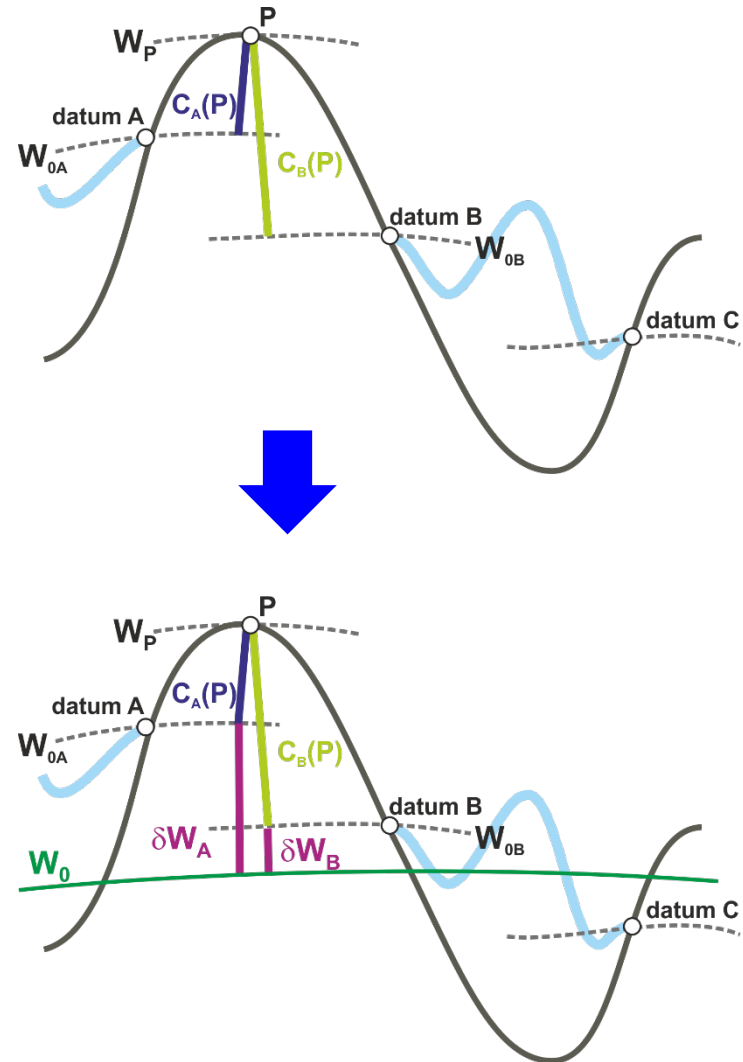
Gravimétrie, méthodes astro-géodésiques, nivellement, etc.

Effet du terrain (MNT)



1) W_P de nivellement + gravimétrie

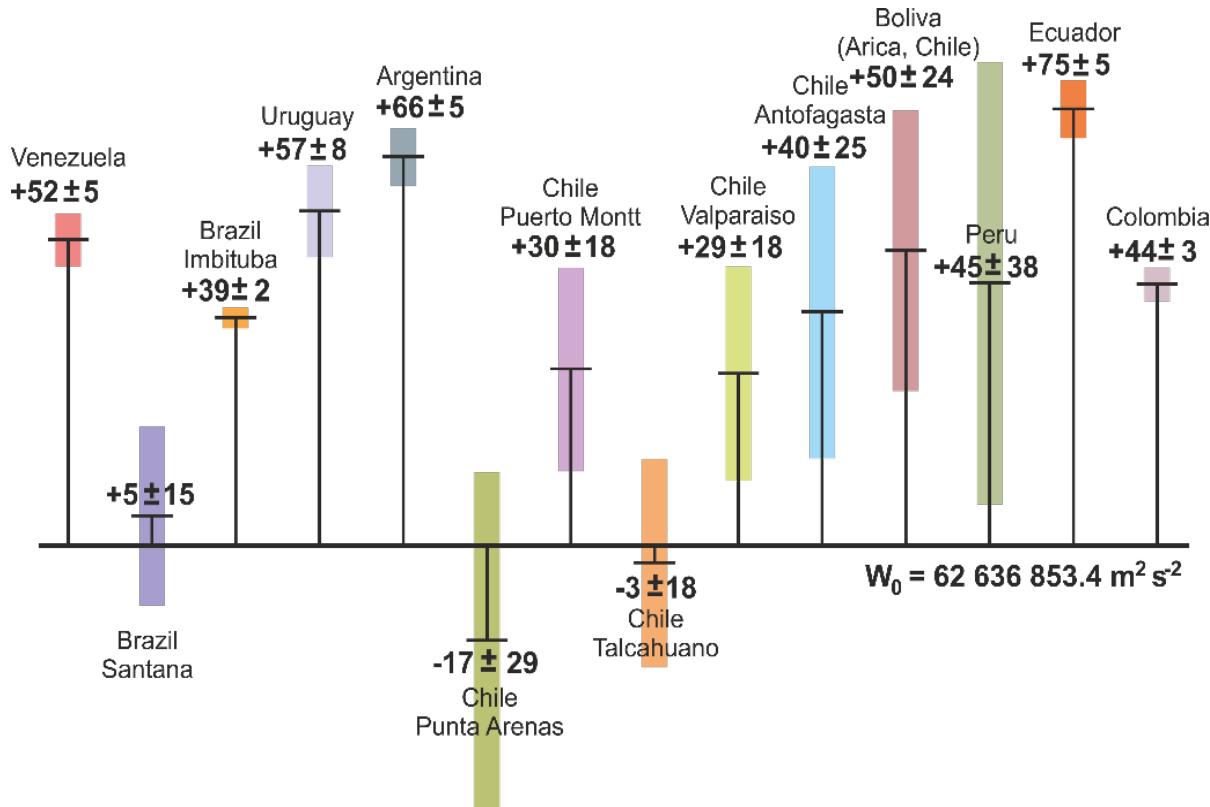
- Sont référés à des **datums verticaux locaux** avec valeur du potentiel inconnu $W_{0,local} = ?$
- Pour déterminer W_P , il est nécessaire d'estimer la **différence du niveau** entre le W_0 global et local
$$W_{0,local} \rightarrow \delta W = W_0 - W_{0i}$$
$$W_P = (W_{0,local} + \delta W) - C_P ;$$
- Précision attendue δW : **cm dans des régions bien-observées, dm dans les autres régions, cas extrêmes jusqu'à 1 m.**





1) W_P de nivellement + gravimétrie

Exemple: δW (en cm!) pour les systèmes altimétriques de l'Amérique du Sud relative à la valeur W_0 de l'IHRS

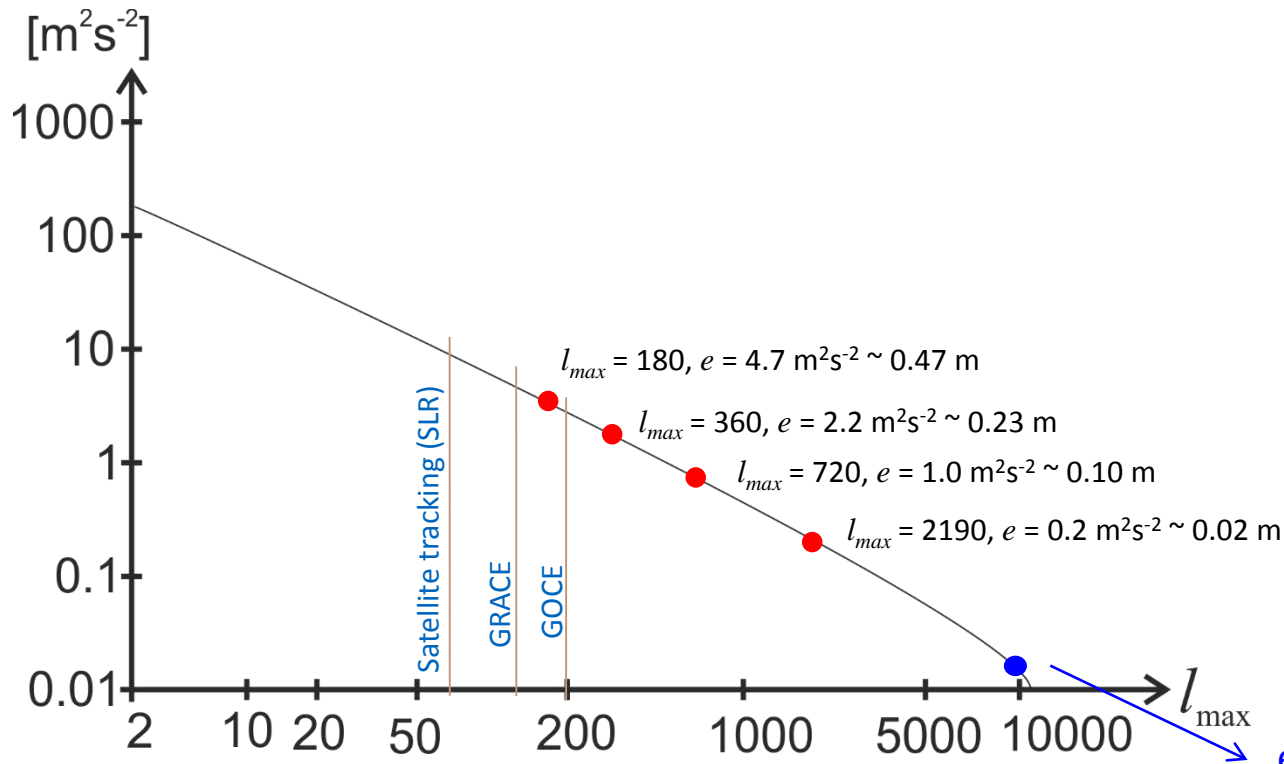


➤ Cette stratégie est nécessaire pour l'intégration des systèmes altimétriques existants dans l'IHRS, mais la précision n'est pas suffisante pour établir le réseau de base de l'IHRF.

2) W_P de GGMs combinés de haute résolution

Erreur d'omission (e) of the GGM in [m^2s^{-2}] en accord avec Tscherning et Rapp (1974)

(l_{max} ne contient pas tout le signal du champ gravimétrique de la Terre)



L'erreur de commission doit être ajoutée à l'erreur d'omission

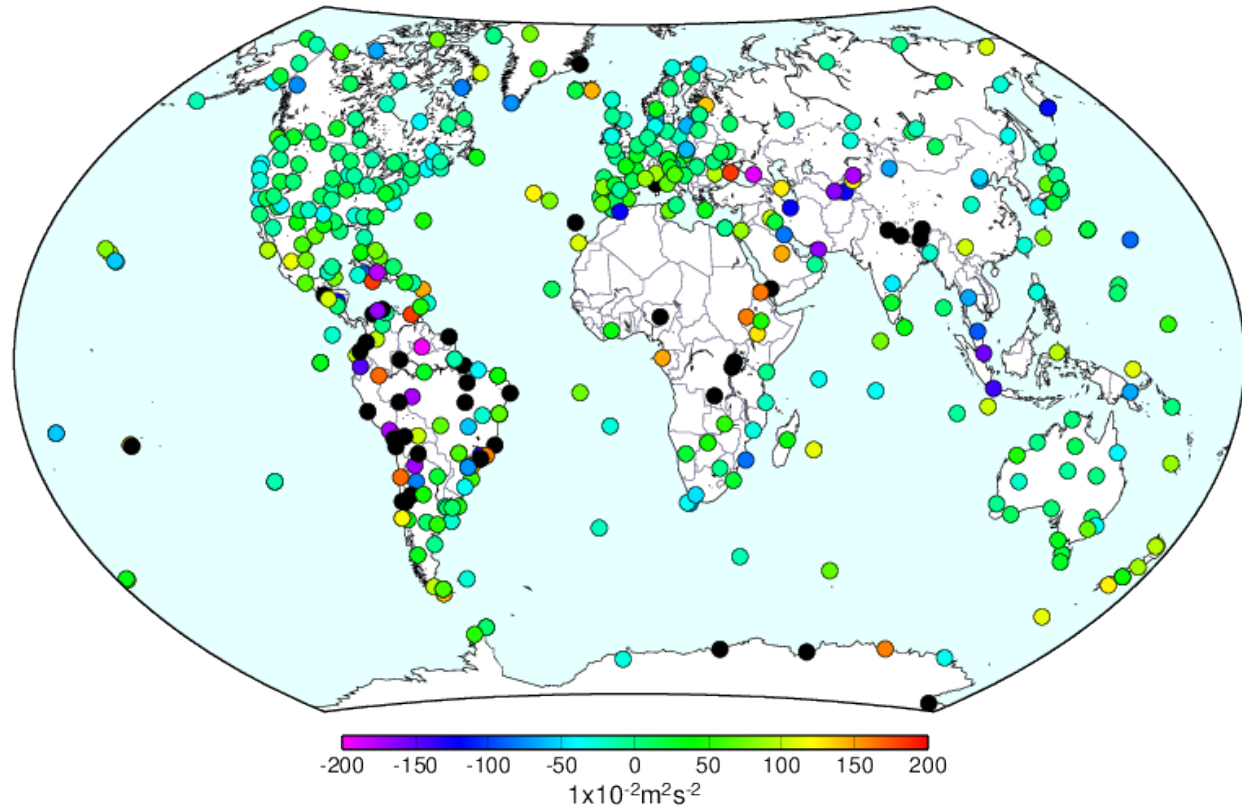
et la somme devrait être moins que $\sigma_{(W(P))} = 0.03 m^2s^{-2}$

exigence de l'IHRM
 $\sigma_{(W(P))} = 0.01 m^2s^{-2}$
 $l_{max} \sim 10800$

2) W_P de GGMs combinés de haute résolution

Exemple pour les incertitudes des GGMs:

- Différences entre les W_P calculées avec EGM2008 (Pavlis et al. 2008) et EIGEN6C4 (Förste et al. 2014), les deux jusqu'au degré $n=2190$
- Différences plus grandes que $\pm 200 \times 10^{-2} \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ ($\sim \pm 2 \text{ m}$)
- Précision désirée pour W_P : $\pm 0.03 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$



➤ Cette stratégie ne suffit pas (encore) complètement pour la réalisation de l'IHRS

3) W_P d'une détermination du géoïde local (de haute résolution)

A présent, la seule possibilité de s'approcher à la précision demandée pour la réalisation de l'IHRS

$$W_P = W_{P,satellite\ pure} + W_{P,haute\ résolution}$$

Modélisation purement satellitaire:

analyse des orbites satellitaires

observations satellitaires du sol (SLR)

observations entre satellites (CHAMP, GRACE)

gradiométrie satellitaire (GOCE)

Altimétrie (sur les océans)

+

Modélisation local de haute résolution:

Méthodes de Stokes ou Molodensky

Altimétrie (sur les océans)

Gravimétrie, méthodes astro-géodésiques, nivellement, etc.

Effet du terrain (MNT)

$$W_P = U_P + T_P$$



$$T_P = T_{P,satellite-pure} + T_{P,residuel} + T_{P,terrain}$$

Un GGM unique

données
gravimétriques
terrestres

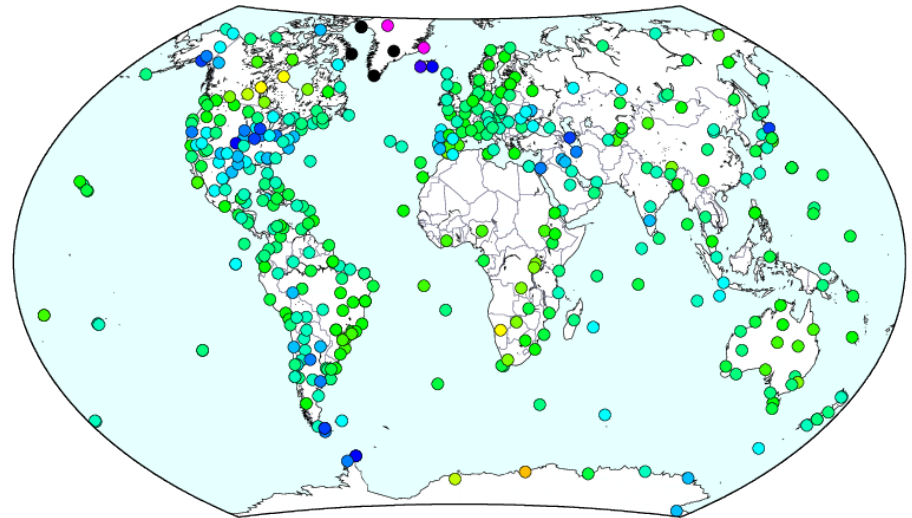
Un MNT (unique)

3) W_P d'une détermination du géoïde local (de haute résolution)

- Précision: quelques mm à dm.
- Avantages:
 - GGMs purement satellitaires de haute précision (SLR+GRACE+GOCE).
 - En quelques cas, les données gravimétriques sont seulement disponibles pour une modélisation du géoïde local (à l'agence nationale).
- Désavantages:
 - Manque de données gravimétriques dans quelques régions.
 - Standards différents appliqués pour le calcul du géoïde.
 - Contradictions entre des GGMs purement satellitaires.

Exemple:

- Différences entre les potentiels W_P dérivés de EIGEN-6S4 (Förste et al. 2016) et GO_CONS DIR_R5 (Bruinsma et al. 2013)
- Différences -21×10^{-2} à $7 \times 10^{-2} \text{ m}^2\text{s}^{-2}$
- Précision désiré pour W_P : $\pm 10 \times 10^{-2} \text{ m}^2\text{s}^{-2}$





Exigence des données gravimétriques terrestres

- Distribution homogène des points gravimétriques autour de la station de référence de l'IHRS jusqu'à 210 km ($\sim 2^\circ$).
- Précision minimale des données gravimétriques: $\pm 20 \mu\text{Gal}$.
- Positions des points gravimétriques par GNSS.
- Dans les régions montagneuses $\sim 50\%$ plus de points gravimétriques.
- Incertitudes du GGM et MNT doivent être ajoutées.

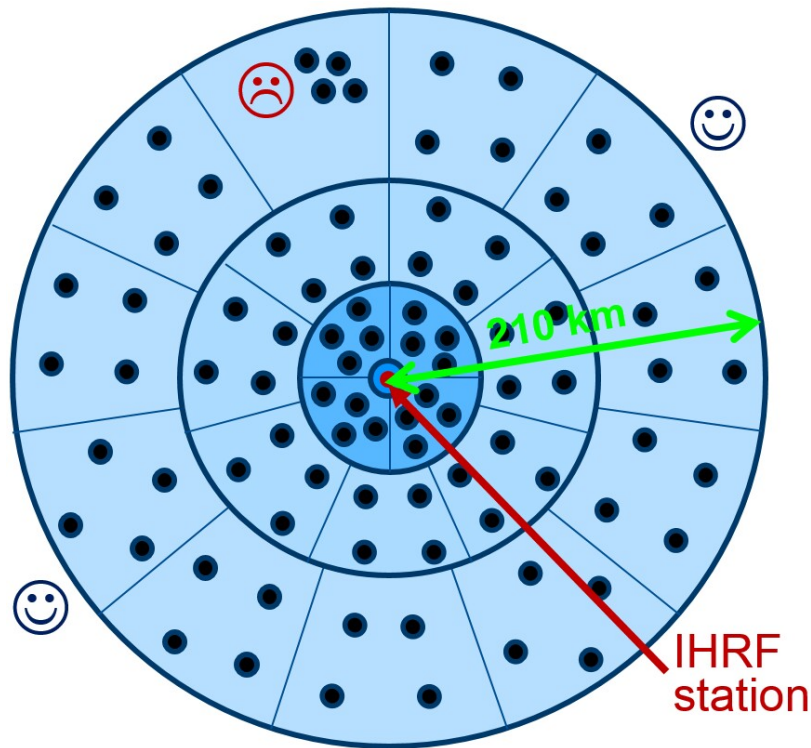







Schéma selon l'effet gravimétrique sur le géoïde
($\Delta g = 1 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-2} \rightarrow 1 \text{ mm}$)

Distance	Compartiments	Nombre de points plaine/montagne
10 km	1	4/8
50 km	4	20/30
110 km	7	30/45
210 km	11	50/75
total	23	100/150

Comment obtenir les données terrestres?

-  **Plan A:** Rassembler les données gravimétriques (existants ou à observer) autour des stations de l'IHRF par
 - le bureau des réseaux et observations de GGOS
 - le Bureau Gravimétrique International (BGI)
 - les personnes responsables de chaque station (avec l'aide des sous-commissions régionales de l'IAIG (EUREF)) .
-  **Plan B:** Demander les agences nationales/régionales responsables pour le calcul du géoïde de délivrer directement la composante T_{res} du potentiel perturbateur. Pour assurer la consistance, quelques standards doivent être suivis.
-  **Plan C:** Utiliser des grilles existants d'anomalies gravimétriques moyennes de NGA ou BGI (pas des GGM).
-  **Plan D:** Utiliser un géoïde local existant.
-  **Plan E:** Utiliser un GGM de haute résolution.



Etat actuel:

- Un nouveau GGM combiné à haute résolution est sous développement (EGM2020).
- Résolution des versions préliminaires est de $n = 720$.
- Erreurs de commission sont entre $0.1 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ (Amérique du Nord, Europe, Australie) et $1.0 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ (reste du monde), plus erreur d'omission $1.0 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$.
- Donc, on a encore besoin de données gravimétriques terrestres, au moins autour des stations IHRF.
- Contributeurs de: Amérique du Nord, Europe, Australie, Russie, Amérique du Sud.
- Manquant: Afrique, Asie, Océanie.



Réseau de référence de l'IHRF

1) Hiérarchie:

- Réseau global → distribution globale, inclus
- Un **réseau noyau** → assurer la durabilité et la stabilité à long terme
- Des **densifications régionales et nationales** → accès local

2) Colocalisés avec:

- des **observatoires géodésiques fondamentaux** → connexion entre \mathbf{X} , W , \mathbf{g} et les horloges de référence → **support du GGRF (global geodetic reference frame)**;
- des **stations de référence en opération permanente** → détection d'une déformation du repère de référence;
- des **marégraphes de référence et des réseaux altimétriques nationaux** → unification des systèmes verticaux;
- des **stations de référence gravimétriques** du nouveau réseau IGRS (International Gravity Reference System).

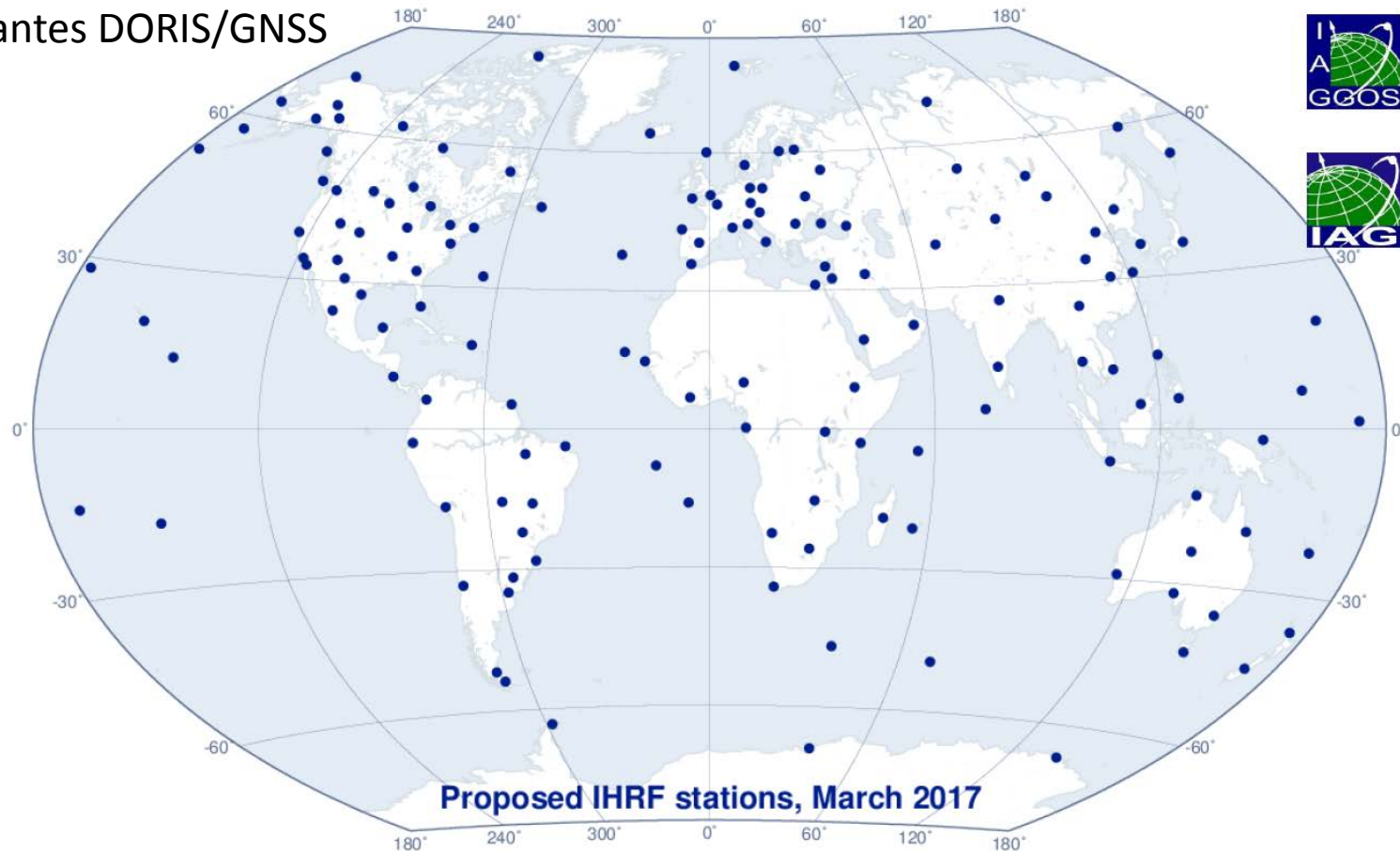
L'IHRF est supposé d'être une composante du GGRF (résolution ONU GGRF, 2015).



Sélection des stations noyaux de l'IHRF

- 1) Observatoires géodésiques (stations noyaux de GGOS)
- 2) Stations existantes VLBI/GNSS
- 3) Stations existantes SLR/GNSS
- 4) Stations existantes DORIS/GNSS
- 5) Marégraphes

~150 stations





Sélection des stations noyaux de l'IHRF

- 1) Observatoires géodésiques (stations noyaux de GGOS)
- 2) Stations existantes VLBI/GNSS
- 3) Stations existantes SLR/GNSS
- 4) Stations existantes DORIS/GNSS

actuel (version de mars 2017):

- 1) marégraphes reliés aux réseaux altimétriques nationaux (coordination avec TIGA).
- 2) stations de référence du réseau international de gravimétrie absolue
- 3) Densification avec des stations GNSS en coopération avec les sous-commissions régionaux (p.ex. EUREF)

ouvert:

- 1) Colocalisation avec les laboratoires de temps (accès aux valeurs du potentiel de haute précision des horloges de référence). (aujourd'hui 2: Paris, La Plata)

Après la sélection des stations de référence, on doit calculer les potentiels de ces stations.



Les produits IHRS attendus

- 1) Un repère de référence (IHRF): un réseau de référence avec des coordonnées connues de haute précision \mathbf{X} , $\dot{\mathbf{X}}$, W , \dot{W} , C , \dot{C} .
- 2) Des mises-à-jour réguliers $IHRF_{yy}$ pour tenir compte de:
 - Nouvelles stations;
 - Changement de coordonnées avec le temps $\dot{\mathbf{X}}$, \dot{W} ;
 - Amélioration de l'estimation de \mathbf{X} et W (plus d'observations, autres standards, meilleures modèles, meilleures algorithmes de calcul, etc.).
- 3) Paramètres de transformation δW pour l'intégration des systèmes altimétriques existants dans l'IHRS/ITRF.
- 4) Pour la transformation des altitudes on a besoin de deux GGM de référence différentes:
 - Un GGM purement satellitaire, si les agences locales veulent calculer eux-mêmes un T_{res} régional
 - Un GGM de haute résolution (combiné) pour des applications de précision réduite (> 10 cm).



Inspiration

Le premier ITRF... (ITRF89)

- 1) seulement des positions (mouvements négligés),
- 2) coordonnées dans système de marées zéro (moyen),
- 3) conversion aux coordonnées ellipsoïdales avec valeurs arbitraires pour a et f (le GRS80 n'était pas utilisé),
- 4) précision de stations de 11 à 60 mm.

L'ITRF2014 est toute-à-fait d'autre qualité...

Il est important de commencer avec une première approximation du IHRF. Une fois que celle-ci sera réalisé, on pourra améliorer en prenant en considération de plus en plus de détails, qui au début semblaient être des obstacles insolubles.

TABLE OF CONTENTS

IERS Standards

November 1989

Introduction	1
1. Numerical Standards	3
2. IERS Celestial Reference Frame (ICRF)	11
3. IERS Terrestrial Reference Frame (ITRF)	12
4. Nutation	14
5. Procedure for Computing Apparent Places	18
6. Solid Earth Tides	22
7. Ocean Tide Model	32
8. Site Displacement Due to Ocean and Atmospheric Loading	37
9. Plate Motion Model	45
10. Tropospheric Model	49
11. Tidal Variations in UT1	53
12. Lunar and Planetary Ephemerides	56
13. Geopotential	58
14. Radiation Pressure Reflectance Model	65
15. General Relativistic Dynamical Model	66
16. General Relativistic Terms for Propagation, Time, and Coordinates	69