

Le chemin vers un système de référence altimétrique global et unifié

■ Laura SÁNCHEZ - Urs MARTÍ - Johannes IHDE

La majorité des systèmes altimétriques existants ne satisfait pas aux besoins de précision de la géodésie moderne. Ils se réfèrent à des niveaux de mer locaux, sont stationnaires (ne considèrent pas de variations temporelles), réalisent des types différents d'altitudes (orthométrique, normale, orthométrique normale, etc.) et leur combinaison en échelle globale montre des incertitudes de l'ordre de grandeur du mètre. L'Association internationale de géodésie, qui met à disposition une infrastructure précise pour la surveillance de la terre, fait la promotion d'une standardisation globale des systèmes altimétriques. Les buts principaux sont : (1) fournir un repère fiable pour l'analyse et la modélisation des phénomènes et processus globaux qui sont influencés par le champ de gravité (redistribution des masses dans l'atmosphère, l'océan, les continents et l'intérieur de la Terre) et la géométrie de la surface de la Terre (déformations) et (2) supporter une combinaison précise des altitudes physiques et géométriques pour mieux profiter de la géodésie spatiale (combinaison de GNSS avec un modèle de géoïde pour une détermination d'altitudes précises et unifiées globalement). Conformément à cela, les efforts actuels de la communauté géodésique sont concentrés à l'établissement du système de référence altimétrique international (IHRF, International Height Reference System) comme standard global pour la détermination des altitudes. Cet article résume la définition de l'IHRF, les stratégies pour sa réalisation (le repère de référence IHRF) et les activités actuelles pour atteindre une infrastructure de référence altimétrique fiable, durable et utile.

■ MOTS-CLÉS

Système altimétrique global, géoïde, niveau de la mer, modèle global de gravité

Introduction

Un *datum* vertical est une surface de référence à laquelle se réfèrent les coordonnées verticales (altitudes) des points. Au niveau national, les avantages pratiques d'un *datum* vertical régional consistant sont les suivants :

- meilleure navigation près des côtes et dans les ports,
- modèles numériques de terrain exacts pour la modélisation d'inondations et d'autres risques naturels, ainsi que pour une gestion de terrain durable,
- atterrissage et sécurité avancée pour l'aviation,
- modèles d'ondes de tempête et de l'érosion côtière,
- surveillance de déversement de substances chimiques,
- meilleure compréhension de mouvements tectoniques, rebond postglaciaire et subsidences du territoire,
- meilleure gestion des ressources naturelles, etc.

Un *datum* vertical peut être défini globalement ou régionalement, afin qu'il représente toute la surface de la terre ou seulement une partie spécifique. En absence d'une définition d'un *datum* vertical global, la majorité des pays utilise un *datum* régional pour

définir ses systèmes altimétriques locaux. Il en résulte plus de 100 systèmes altimétriques régionaux et locaux à travers le monde. Ils divergent à cause de leurs différents types de définition, différentes méthodes de réalisation et le fait qu'ils sont basés uniquement sur des données locales ou régionales.

Un *datum* vertical global peut être défini comme surface de référence pour toute la terre. Son concept a été le sujet de nombreuses études et discussions le siècle dernier et reste encore à être établi comme standard international. En conséquence, un objectif principal de la communauté géodésique est l'implémentation d'un système de référence altimétrique global, ce qui inclut la réalisation d'une surface de référence globale (*datum* vertical) et des coordonnées verticales (altitudes) standardisées. L'établissement d'un système vertical global exact, consistant et bien défini a plusieurs avantages, comme entre autres :

- fournir une référence consistante et précise pour la connexion des systèmes altimétriques nationaux et régionaux ;
- éliminer des inconsistances dans les anomalies gravimétriques et dans les altitudes qui sont causées

par l'utilisation de systèmes altimétriques différents ;

- combiner les résultats des mesures de nivellement et des produits océanographiques pour déterminer la surface de la mer sur longues distances ;
- supporter des études de surveillance de changement global comme : niveau de la mer, surface instantanée de la mer ; changement du volume de la calotte glaciaire, rebond postglaciaire ou subsidences du territoire,
- supporter la combinaison des altitudes physiques et géométriques pour exploiter au maximum les avantages de la géodésie par satellite (combinaison de positionnement GNSS avec un modèle global du champ de pesanteur pour une détermination altimétrique précise globalement).

Toutes ces applications demandent une vue globale de la terre avec des mesures pas seulement sur terre mais également sur les océans. La combinaison appropriée des observations verticales sur terre et sur les océans doit nécessairement être basée sur un système altimétrique global et unifié. Excepté une définition précise et une réalisation fiable d'un système global, il est aussi important de fournir aux utilisateurs la compétence pratique de pouvoir connecter des systèmes régionaux au



système global et de transformer leurs altitudes. En accord avec ces bases, l'article suivant va résumer les activités actuelles pour avancer dans la définition et l'implémentation d'un système de référence altimétrique global unifié.

Systèmes altimétriques physiques et géométriques

Tous les systèmes altimétriques sont principalement définis par une surface de référence (le niveau "zéro"), une coordonnée verticale (altitude ou élévation), et le *datum* vertical (relation univoque entre le niveau de référence et les altitudes déterminées à la surface de la terre). Si la surface de référence et les altitudes sont dépendantes du champ de gravité, nous parlons d'un système altimétrique physique ; sinon il s'agit d'un système altimétrique géométrique (figure 1). Dans le premier cas, les altitudes physiques typiques sont des altitudes orthométriques ou normales dérivées des mesures de nivellement en combinaison avec des réductions gravimétriques. La surface de référence correspondante est le géoïde ou le quasi-géoïde, et le *datum* vertical est normalement défini par un marégraphe. Dans le deuxième cas, la coordonnée verticale préférée est la hauteur ellipsoïdale, dérivée des mesures GNSS et la surface-zéro est l'ellipsoïde de référence (une surface équipotentielle du champ gravimétrique normal, généré par cet ellipsoïde). Le *datum* est donné en alignant l'origine, le plan équatorial et le plan du méridien origine de l'ellipsoïde du système de référence terrestre conventionnel.

Avant l'époque des satellites en géodésie (jusqu'aux années 1970), le positionnement vertical était basé exclusivement sur des systèmes altimétriques physiques, et, par conséquent, ils sont la référence pour la grande majorité des données géodésiques. Aujourd'hui – grâce à la technique GNSS – la détermination des hauteurs ellipsoïdales est plus facile et montre quelques avantages comparées aux altitudes physiques (nivelées) ; par exemple une précision élevée sur de grandes distances, une détermination rapide et économique, etc. Elles ne peuvent cependant pas

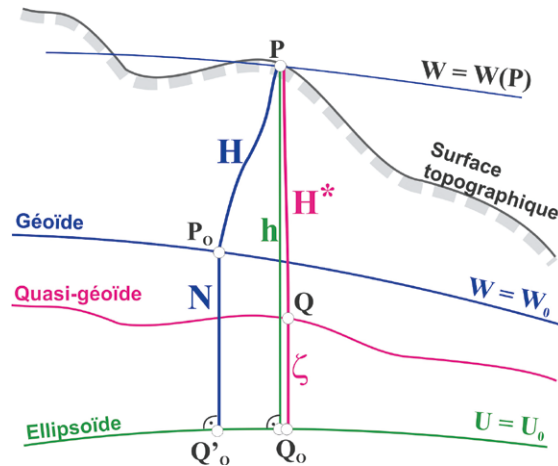


Figure 1. Altitudes physiques et géométriques : altitude orthométrique PP_0 , altitude normale PQ , hauteur ellipsoïdale PQ_0 , hauteur du géoïde $N : P_0Q_0$, anomalie d'altitude $\zeta : QQ_0$.

remplacer les altitudes physiques pour la plupart des applications scientifiques et pratiques à cause de leur nature "géométrique" et surtout du fait qu'elles ne décrivent pas l'écoulement de l'eau. Les systèmes altimétriques physiques vont toujours rester nécessaires.

La définition, la réalisation, la maintenance et l'utilisation du système de référence terrestre international (*International Terrestrial Reference System*, ITRS¹) garantit globalement une référence géométrique unifiée avec une fiabilité au niveau du cm. La détermination des coordonnées géométriques – incluant des hauteurs ellipsoïdales et leurs variations avec le temps – est devenue une procédure standard. Le produit principal est constitué de jeux de coordonnées de référence globalement consistantes et avec une stabilité à long terme. L'ITRS et sa réalisation, l'ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*²) forment la base pour déterminer et suivre des déplacements avec une grande résolution spatiale et temporelle. Quelques exemples sont des déformations de surface associées avec des dangers naturels (comme des effets sismiques, des glissements de terrain, etc.), des phénomènes tectoniques (comme le mouvement des plaques, des déformations de surface, etc.), des mouvements verticaux causés par la formation des montagnes ou l'ajustement isostatique global (GIA), et des petits signaux de déformation causés par des surcharges océaniques, hydrologiques, ou atmos-

phériques. Un système de référence physique de haute précision comparable à l'ITRS n'existe pas encore. Sans doute, les systèmes altimétriques existants ont été établis en suivant les meilleures méthodes de l'époque. Ils étaient cependant réalisés individuellement, en appliquant généralement des procédures non standards. Ils sont référés à des niveaux locaux (normalement un marégraphe arbitraire), sont statiques (ne considèrent pas des variations du niveau de la mer ou un mouvement vertical de la station de référence), et montrent des différences en réalisant les altitudes physiques (réduction gravimétrique des mesures de nivellement). En conséquence, aujourd'hui, quelques cent systèmes altimétriques physiques locaux et régionaux sont utilisés et ils montrent entre eux des différences jusqu'à ± 2 m. Les données géodésiques dépendantes (altitudes physiques, anomalies gravimétriques, modèles de géoïde, modèles numériques de terrain, etc.) sont utilisables seulement dans des régions géographiques limitées ; leur combinaison globale ou leur combinaison avec des mesures par satellites (surtout positionnement GNSS) montrent des contradictions qui sont bien plus grandes que la précision demandée aujourd'hui. La solution pour éliminer cette faiblesse est l'établissement d'un système de référence global lié au champ de gravité, capable de supporter globalement l'unification des systèmes altimétriques existants et la combinaison précise des altitudes physiques et géométriques. Un tel système est indispensable pour une description fiable des changements reliés au champ de gravité comme les

1 <https://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/ITRS/itrs.html>

2 <https://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/ITRF/itrf.html>

variations du niveau de la mer, des redistributions de masses dans les océans, les continents et à l'intérieur de la Terre, la circulation globale des océans, et en général des processus associés avec des liquides géophysiques.

Le système de référence international altimétrique (IHR)

L'Association internationale de géodésie (IAG³), améliore la définition et la réalisation des systèmes de références géodésiques. Ces améliorations sont nécessaires pour tenir compte de la meilleure précision apportée par les techniques modernes d'observations et aussi pour être capables de pourvoir aux besoins de la science et de la société concernant les données géo-référencées de haute précision et résolution. Pendant les décennies précédentes on s'occupait surtout des systèmes de référence géométriques comme l'ICRS (*International Celestial Reference System*⁴) et l'ITRS. A présent, un sujet principal de l'IAG est l'implémentation d'un système de référence géodésique (GGRS) qui supporte simultanément, globalement et avec haute précision la détermination et surveillance consistante de la géométrie, la rotation et le champ de gravité de la terre. Ce but est en accord avec la résolution adoptée par l'Assemblée générale des Nations Unies sur un Repère de référence géodésique mondial (*Global Geodetic Reference Frame*, GGRF) pour le développement durable (A/RES/69/266) du 26 février 2015⁵. L'établissement d'un système de référence géodésique intégral mondial nécessite aussi l'existence d'un système de référence altimétrique physique globalement unifié (standardisé). Un premier pas concret vers ce but est l'adaptation de deux résolutions de l'IAG⁶, une pour la définition et la réalisation d'un système de référence

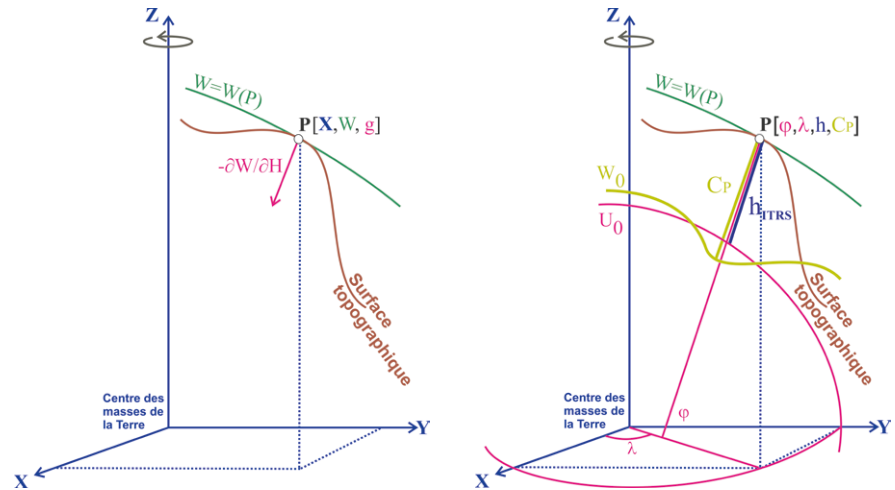


Figure 2. Coordonnées du système de référence altimétrique (IHR) : Les coordonnées des points sur la surface de la Terre sont données par des valeurs du géopotential W et des coordonnées Cartésiennes géocentriques X (gauche). Pour des raisons pratiques, les positions X peuvent être transformées en coordonnées ellipsoïdales pour obtenir des hauteurs géométriques (ou ellipsoïdales) h , et les potentiels $W(P)$ peuvent être transformés en nombres géopotentiels C_P qui sont rapportés au niveau de référence conventionnel $W_0 = 62\,636\,853.4\,m^2s^{-2}$ (droite).

altimétrique international (IHR), et la deuxième pour l'établissement d'un système de référence gravimétrique international (IGRS), basé sur des mesures gravimétriques absolues. Ces résolutions ont été acceptées pendant l'Assemblée Générale de l'IUGG (union internationale de la géodésie et de la géophysique) à Prague en juillet 2015, et les efforts actuels sont concentrés à leur mise en œuvre. La résolution IAG2015 N°1 décrit cinq conventions de base pour la définition de l'IHR :

- Le niveau de référence vertical est une surface équipotentielle du champ gravimétrique de la terre avec une valeur géopotentielle de $W_0 = 62\,636\,853.4\,m^2s^{-2}$. W_0 est le potentiel du géoïde.
- Les paramètres, observations et données sont reliés au système de marées moyen / croûte moyenne.
- L'unité de longueur est le mètre et l'unité du temps est la seconde du système international des unités (SI).
- Les coordonnées verticales sont des différences $-\Delta W(P)$ entre le potentiel $W(P)$ du champ gravimétrique de la terre au point P , et le potentiel W_0 au géoïde ; la différence de potentiel $-\Delta W(P)$ est aussi nommée nombre géopotential $C(P)$: $C(P) = -\Delta W(P) = W_0 - W(P)$
- La position spatiale de P pour le potentiel $W(P) = W(X_p)$ est donnée par

le vecteur de coordonnées $X_p = X(P)$ dans l'ITRF.

L'estimation des coordonnées $X(P)$, $W(P)$ (ou $C(P)$) inclut aussi leurs variations temporelles $dX(P)/dt$, $dW(P)/dt$ (ou $dC(P)/dt$). Pour des raisons pratiques, les positions $X(P)$ peuvent aussi être transformées en coordonnées ellipsoïdales pour obtenir des hauteurs géométriques (ou ellipsoïdales) $h(P)$, et $C(P)$ peut aussi être transformée en une altitude physique (orthométrique H , dynamique H^d ou normale H^*). La détermination des potentiels $W(P)$ et la transformation des nombres géopotentiels $C(P)$ vers des altitudes physiques $H(P)$ nécessitent l'observation du champ gravimétrique terrestre comme élément supplémentaire de l'IHR. En conséquence, un traitement consistant de la gravité, du potentiel et des altitudes physiques est nécessaire. Ou en d'autres mots : la définition et la réalisation de l'ITRS (pour les coordonnées $X(P)$), de l'IHR (pour les nombres géopotentiels $C(P) = W_0 - W(P)$) et de l'IGRS (pour les valeurs gravimétriques g) doivent être harmonisées et consistantes.

Basés sur cette description, l'IHR est défini comme un système géopotential de référence qui tourne avec la Terre et qui suit son mouvement dans l'espace. Les coordonnées des points attachés à la surface solide de la Terre

3 <http://www.iag-aig.org/>

4 <https://www.iers.org/iers/en/DataProducts/ICRS/icrs.html>

5 http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/69/L.53&referer=http://us2.campaign-archive2.com/?u=33cf89da7ade3a85156c5eda4&Lang=E

6 http://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/IAG-docs/IAG_Resolutions_2015.pdf



sont données par (1) des valeurs géopotentiels $W(\mathbf{X})$ (et leur changement avec le temps $dW(\mathbf{X})/dt$) dans le champ de gravité de la Terre et, (2) des coordonnées cartésiennes géocentriques \mathbf{X} (et leurs changements avec le temps $d\mathbf{X}/dt$) référencées à l'ITRS (*figure 2*). Avec une notation très générale on peut écrire : $P(\mathbf{X}, W, g) = P(\mathbf{X}, W, -\partial W/\partial H)$ ou $W(\mathbf{X}) = W(P)$ colocalisé avec $g(\mathbf{X}) = g(P) = -\partial W(P)/\partial H(P)$.

Le repère de référence international altimétrique (IHRF)

Actuellement, un effort spécial est porté sur la réalisation de l'IHRS, c'est-à-dire, l'établissement du repère (ou cadre) de référence altimétrique international (*International Height Reference Frame, IHRF*). Il est proposé que l'IHRF suive la même structure que l'ITRF : un réseau global avec des densifications régionales et nationales, dont on connaît les nombres géopotentiels dans l'IHRS. La précision globale des nombres géopotentiels est supposée être $\pm 1 \times 10^{-2} \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ (autour de $\pm 1 \text{ mm}$ en altitudes physiques). En pratique, la réalisation de ce but est limitée par plusieurs aspects. Par exemple, il n'y a pas de standards unifiés pour la détermination des potentiels $W(P)$, la modélisation du champ gravimétrique et l'estimation des positions \mathbf{X} suivent des méthodes différentes, l'infrastructure géodésique n'est pas homogène globalement, etc. Pendant que les coordonnées \mathbf{X} viennent normalement des techniques spatiales (comme VLBI⁷, SLR⁸, GNSS⁹, DORIS¹⁰) avec une précision du niveau du mm, l'estimation du potentiel $W(P)$ est basée sur différentes stratégies non standardisées. Cela peut limiter la précision attendue de $1 \times 10^{-2} \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ de l'ordre de grandeur (de $10 \times 10^{-2} \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ à $100 \times 10^{-2} \text{ m}^2\text{s}^{-2}$).

De ce point de vue, les activités actuelles pour la réalisation de l'IHRS sont concentrées sur¹¹ :

7 Very Long Baseline Interferometry

8 Satellite Laser Ranging

9 Global Navigation Satellite Systems

10 Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite

11 More details in <http://ihrs.dgfi.tum.de/>

- concevoir un réseau préliminaire de l'IHRF ;
- étudier des stratégies pour la détermination précise du potentiel $W(P)$;
- Identifier/définir les standards et les conventions nécessaires pour l'établissement de l'IHRF consistant avec la définition de l'IHRS.

Concernant le réseau de référence de l'IHRF, il est proposé d'établir un réseau avec une couverture globale, incluant (i) un réseau principal pour garantir la durabilité et la stabilité à long terme, et (ii) des densifications régionales et nationales pour l'accessibilité locale. Ce réseau de référence doit être colocalisé avec (i) des observatoires géodésiques fondamentaux pour permettre la connexion entre \mathbf{X} , W , g et des horloges de référence pour supporter l'implémentation du GGRF ; (ii) des stations de référence en opération permanente pour la détection d'une déformation du repère de référence ; (iii) des stations de référence géométrique aux différents niveaux de densification pour fournir l'accès à l'IHRF au niveau régional et national ; (iv) des marégraphes de référence et des réseaux altimétriques nationaux pour faciliter l'unification des systèmes verticaux avec l'IHRS ; et (v) des stations de référence gravimétriques du nouveau IGRS (*voir IAG2015, résolution N° 2*). La *figure 3* montre les stations sélectionnées à ce jour (décembre 2016) en accord avec les services IVS¹², ILRS¹³, IDS¹⁴, et IGS¹⁵. Il inclut (i) des observatoires géodésiques, (ii) des stations VLBI, SLR et DORIS colocalisées avec GPS/GNSS et (iii) des marégraphes connectés aux réseaux altimétriques locaux et colocalisés avec GPS/GNSS. Cette sélection est basée sur les bases de données du groupe de travail IGS TIGA¹⁶. A présent, il a été demandé aux experts régionaux et nationaux d'évaluer si ces sites

index.php?id=1

12 International VLBI Service for Geodesy and Atometry, <http://ivsc.gsfc.nasa.gov/>

13 International Laser Ranging Service, <https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/>

14 International Doris Service, <http://ids-doris.org/>

15 International GNSS Service, <http://www.igs.org/>

16 IGS GPS Tide Gauge Benchmark Monitoring Working Group, http://adsc.gfz-potsdam.de/tiga/index_TIGA.html

proposés (*figure 3*) sont aptes à être inclus dans l'IHRF. Une condition principale est la disponibilité de données gravimétriques terrestres autour de ces sites. Ces experts sont aussi invités à proposer des sites additionnels pour améliorer la distribution de l'IHRF dans leurs régions ou pays. Les sites proposés doivent être équipés d'une station GPS/GNSS permanente, et de préférence appartenir déjà à un réseau régional (comme SIRGAS¹⁷, EPN¹⁸, etc.). Il est aussi souhaitable d'inclure des stations GNSS colocalisées avec des marégraphes de référence et connectées aux réseaux nationaux de nivellement. En complément à ces stations déjà sélectionnées et celles proposées par les experts régionaux/nationaux, l'ajout des stations du nouveau IGRS et de sites équipés avec des horloges de référence pour la réalisation du temps atomique (laboratoires de temps) doit être considéré.

Vers le calcul des valeurs potentielles aux stations de référence de l'IHRF

Une fois que la sélection préliminaire des stations de référence de l'IHRF sera faite, la prochaine étape sera le calcul des potentiels. En principe, il existe les stratégies suivantes :

- Nivellement avec réduction gravimétrique : $W(P) = W_0 - C(P)$
- Estimation du potentiel perturbateur $T(P)$ par détermination d'un modèle de géoïde ou quasi-géoïde local : $W(P) = U(P) - T(P)$. U est le potentiel (normal) d'un ellipsoïde de référence approprié.
- Combinaison des positions ITRF avec un modèle global de gravité (GGM) en forme de harmoniques sphériques (C_{nm}, S_{nm}) de rang élevé : $W(P) = (\mathbf{Xp}, C_{nm}, S_{nm})$.

Chacune de ces méthodes présente des avantages et des inconvénients. Par exemple, la combinaison du nivellement avec des réductions gravimétriques (stratégie a), fournit une précision relative meilleure que le mm

17 Sistema de Referencia geocéntrico para las Américas, <http://www.sirgas.org>

18 EUREF Permanent GNSS Network, <http://www.epncb.oma.be/>

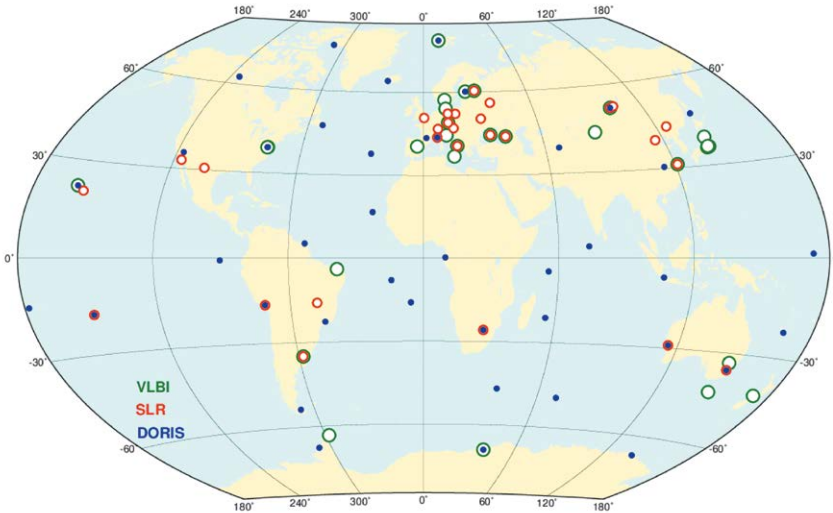


Figure 3. Sélection préliminaire des stations de référence de l'IHRF (décembre 2016) : d'autres stations régionales doivent être considérées pour améliorer la distribution géographique des sites proposés. La sélection finale des stations dépend de la disponibilité de données gravimétriques pour le calcul des potentiels.

entre deux points voisins du nivellement qui sont référés au même système altimétrique i , mais la précision absolue (dans un système altimétrique global) est de ± 2 m (même ordre de grandeur que la topographie dynamique de la surface de la mer). La raison est, que les nombres géopotentiels $C(P)$ basés sur le nivellement se réfèrent normalement à un *datum* vertical local i (avec $C_i(P)$) réalisé par le niveau moyen de la mer à un certain marégraphe, dont le potentiel de référence W_{0i} et sa relation avec un *datum* vertical global W_0 est inconnu. Pour transformer les nombres géopotentiels locaux $C_i(P)$ à l'IHRS, il est nécessaire de déterminer les différences de niveaux entre le *datum* vertical local W_{0i} et le W_0 du système global.

Cette procédure est connue comme unification des *datums* verticaux et peut être réalisée par des méthodes différentes. La plupart sont basées sur une combinaison de positionnement GNSS, des altitudes physiques du nivellement et un modèle de (quasi-) géoïde. Le résultat principal de cette unification des *datums* verticaux est de référer les altitudes physiques existantes au même niveau de référence conventionnel W_0 .

En cas d'utilisation d'un modèle de géoïde (stratégie b), les composantes de grande longueur d'ondes, venant d'un GGM, sont normalement combinées avec des données gravimétriques terrestres pour augmenter la résolu-

tion d'un modèle de géoïde local. L'introduction du même GGM dans la détermination des modèles de géoïde locaux dans des zones de *datums* verticaux différents permet la réalisation d'un niveau de référence commun pour ces zones. En plus, si on suppose que le niveau de référence du GGM représente le *datum* vertical global W_0 , il est possible d'estimer les écarts entre ce système et les *datums* locaux W_{0i} . Cette méthode fournit une précision absolue de quelques cm ou dm, mais la précision relative peut être dégradée d'un ordre de grandeur. L'inconvénient principal de cette méthode est l'utilisation de standards différents (comme les types d'anomalies gravimétriques, les systèmes de marées différents, le GGM utilisé) et la limitation d'accessibilité aux données gravimétriques terrestres qui existe encore en beaucoup de pays.

La disponibilité de GGMs de grande résolution, comme EGM2008¹⁹ ou EIGEN-6C4²⁰, permet de calculer directement les potentiels $W(P)$ en introduisant les coordonnées ITRF X de chaque point dans les équations des harmoniques sphériques qui représentent le GGM. La

19 *Earth Gravitational Model 2008*, <http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/>

20 *European Improved Gravity model of the Earth by New techniques 6C4*, <http://dataservices.gfz-potsdam.de/icgem/showshort.php?id=escidoc:1119897>

précision attendue après l'application d'un de ces modèles est de ± 40 cm^2s^{-2} à ± 60 cm^2s^{-2} (équivalant à ± 4 cm à ± 6 cm) dans des régions bien couvertes d'observations, et de ± 200 cm^2s^{-2} à ± 400 cm^2s^{-2} (± 20 cm à ± 40 cm) avec des cas extrêmes de ± 10 m^2s^{-2} (± 1 m) dans des régions avec seulement peu d'observations. Cette méthode a quand même quelques inconvénients à cause de l'application de standards, conventions et procédures différents dans le calcul des harmoniques sphériques. Ce qui cause d'assez grandes contradictions dans les paramètres du champ de pesanteur dérivés d'un GGM.

En plus, les restrictions d'accessibilité aux données gravimétriques réduisent la fiabilité des GGMs. Dans des régions avec seulement peu de données terrestres, les hauts degrés du GGM ne contiennent pas tout le signal du champ de gravité et l'erreur d'omission augmente rapidement. Par exemple, la *figure 4* montre les différences entre les potentiels $W(P)$ calculés avec les modèles EGM2008 et EIGEN6C4 (Förste et al. 2014), les deux développés jusqu'au degré 2190. Dans quelques régions comme l'Afrique, l'Inde ou l'Amérique du Sud les contradictions entre les modèles sont bien plus grandes que ± 2 m^2s^{-2} (± 20 cm).

Pour s'approcher de la précision demandée pour la réalisation de l'IHRS, il est proposé de calculer les potentiels $W(P)$ après une combinaison d'un GGM purement satellitaire avec des mesures gravimétriques de haute résolution. Un GGM purement satellitaire est indispensable pour l'implémentation de l'IHRS et permet la réalisation d'un niveau de référence commun pour toutes les régions/pays du monde. Ces GGMs sont calculés normalement avec des observations satellitaires différentes ; par exemple des observations terrestres vers des satellites (SLR), observations entre satellites (CHAMP²¹, GRACE²²), gradiométrie satellitaire (GOCE²³) ou altimétrie satellitaire (sur les océans).

21 *Challenging Minisatellite Payload*, <http://op.gfz-potsdam.de/champ/>

22 *Gravity Recovery and Climate Experiment*, www.csr.utexas.edu/grace/

23 *Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer*, www.esa.int/SPECIALS/GOCE/index.html

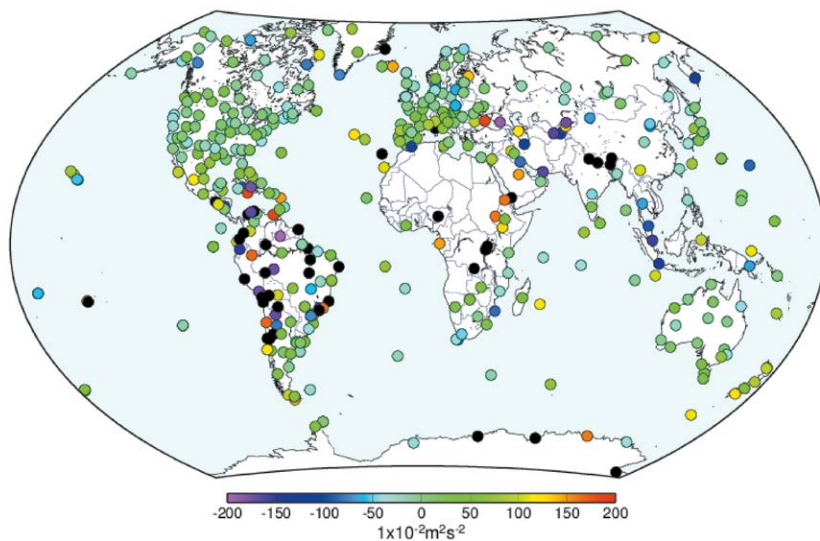


Figure 4. Différences des potentiels $W(P)$ dérivés des modèles EGM2008 et EIGEN6C4, les deux développés aux harmoniques 2190. Statistiques : Moyen : $8 \pm 153 \times 10^{-2} \text{ m}^2\text{s}^{-2}$, max. $835 \times 10^{-2} \text{ m}^2\text{s}^{-2}$, min. $-1339 \times 10^{-2} \text{ m}^2\text{s}^{-2}$



Des GGMs différents produisent quand même des potentiels différents pour les mêmes stations (figure 5). Pour minimiser les incertitudes provenant de l'application de différentes stratégies et standards dans le calcul de GGMs, il est indispensable de désigner un certain GGM satellitaire comme modèle conventionnel. Une mise à jour régulière sera possible comme pour toutes les autres conventions géodésiques.

Les mesures gravimétriques de haute densité sont indispensables pour augmenter la résolution d'un GGM purement satellitaire et pour arriver à la précision demandée dans le calcul des potentiels $W(P)$. Les observations possibles incluent la gravimétrie terrestre, aéroportée et par navire, ainsi que des méthodes astro-géodésiques, des mesures de nivellement, des anomalies gravimétriques dérivées de l'altimétrie satellitaire sur les océans, etc. Il est bien connu que l'accès aux données gravimétriques terrestres est encore restreint dans beaucoup de pays. Il est donc important et nécessaire de faire participer les experts nationaux/régionaux à la réalisation de l'IHRS. Si les données gravimétriques de leurs régions ne sont pas accessibles pour l'IAG, ils peuvent calculer les potentiels eux-mêmes en suivant certaines directives et standards de l'IAG. Dans le meilleur scénario, des points gravimétriques, avec une distribution homogène autour de la station de réfé-

rence de l'IHRF jusqu'à une distance de 210 km ($\sim 2^\circ$) devraient être disponibles (figure 6). Les données gravimétriques peuvent déjà exister ou elles doivent encore être observées. La précision peut varier de $\pm 20 \mu\text{Gal}$ à $\pm 100 \mu\text{Gal}$. Il serait souhaité que les positions des points gravimétriques soient déterminées par GNSS (une précision de quelques cm est suffisante). Dans des régions montagneuses il est recommandé d'augmenter le nombre de points de 50 %. Évidemment, un plus grand nombre de points gravimétriques améliore la solution.

Pour avancer la collection des données gravimétriques nécessaires pour le calcul des potentiels sur les stations

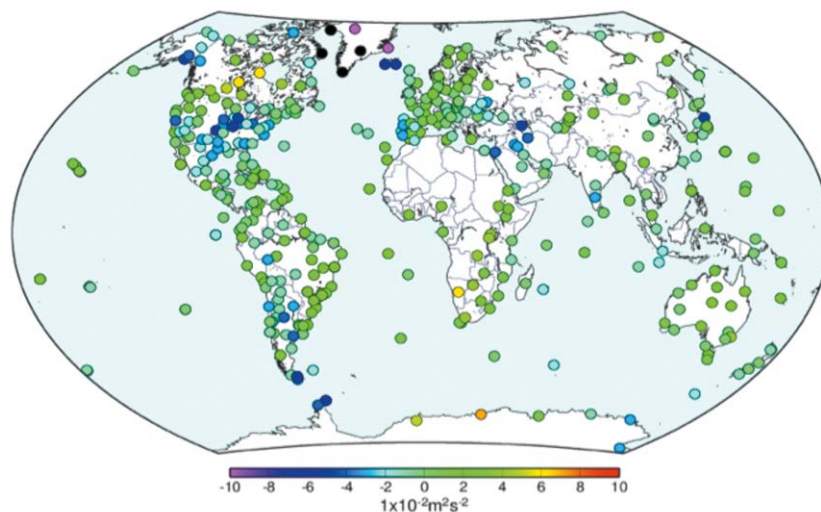


Figure 5. Différences des potentiels $W(P)$ des modèles satellitaires EIGEN-6S4 et GO_CONS DIR_R5, les deux jusqu'au degré 300. Statistique Moyenne : $0 \pm 3 \times 10^{-2} \text{ m}^2\text{s}^{-2}$, max. $7 \times 10^{-2} \text{ m}^2\text{s}^{-2}$, min. $-21 \times 10^{-2} \text{ m}^2\text{s}^{-2}$.

préliminaires de l'IHRF, les plans suivants sont prévus :

Plan A : Collecter des données gravimétriques (déjà existantes ou encore à observer) autour des stations noyaux par le bureau des réseaux et observations de GGOS²⁴, le Bureau Gravimétrique International (BGI²⁵), ou directement par les personnes responsables pour chaque station (assistés par les sous-commissions régionales de l'IAG).

Plan B : Demander aux institutions régionales/nationales responsables pour la modélisation du géoïde de calculer elles-mêmes les potentiels $W(P)$, en utilisant les données gravimétriques disponibles et en suivant quelques directives pour assurer la consistance avec les calculs dans d'autres régions.

Plan C : Utiliser des grilles existantes avec les valeurs moyennes d'anomalies gravimétriques (pas d'un GGM) ; par exemple du NGA²⁶ ou du BGI.

Plan D : Utiliser des modèles existants de géoïde locaux.

Plan E : Utiliser un GGM combiné de haut degré.

Dépendant de la précision des potentiels $W(P)$ obtenus selon un de ces plans, des classes de précision différentes vont être introduites pour les stations de référence de l'IHRF ; et peut-être quelques-unes devront même être rejetées.

Pour des raisons de redondance et de

²⁴ Global Geodetic Observing System, <http://www.ggos.org/>

²⁵ <http://bgi.omp.obs-mip.fr>

²⁶ US National Geospatial-Intelligence Agency, <https://www.nga.mil/>

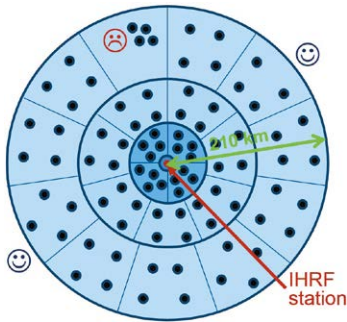


Schéma selon l'effet gravimétrique sur le géoïde ($\Delta g = 1 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-2} \rightarrow 1 \text{ mm}$)		
Distance	Compartiments	Nombre de points plaine / montagne
10 km	1	4 / 8
50 km	4	20 / 30
110 km	7	30 / 45
210 km	11	50 / 75
total	23	104 / 158

Figure 6. Exemple de distribution des points gravimétriques autour d'une station IHRF, nécessaires pour le calcul du potentiel $W(P)$.

contrôle, il serait utile d'avoir plusieurs centres de calcul de l'IHRF pour estimer les potentiels $W(P)$ aux stations IHRF en utilisant des méthodes différentes mais avec les mêmes données d'entrée. Il est donc nécessaire que les experts régionaux et nationaux fournissent des données gravimétriques aux centres de calcul IHRF (voir figure 6) pour au moins une station sélectionnée dans leur territoire. Cette station servira comme point commun (ou point de transformation) pour comparer les potentiels provenant du centre de calcul avec les calculs régionaux. Une composante importante de cette estimation empirique est l'identification et la définition des standards à suivre pour une réalisation consistante et fiable de l'IHRS.

Perspectives

Les explications précédentes démontrent que la réalisation de l'IHRS n'est pas du tout une tâche facile. Des efforts additionnels sont nécessaires ; entre autres les suivants :

- Compilation de directives pour l'unification des systèmes altimétriques avec une description détaillée des données d'entrée nécessaires, les stratégies d'analyses et les produits à générer.
- Implémentation d'un système d'informations contenant un inventaire des systèmes altimétriques régionaux/ locaux existants et leurs caractéristiques (par exemple : localisations du marégraphe de référence, période utilisée pour le calcul du niveau moyen de la mer pour déterminer l'altitude-zéro, réductions gravimétriques appliquées aux mesures de nivellement, précision du nivellement et des données gravimétriques, etc.).

- Désignation de stratégies pour la maintenance et l'utilisation en pratique de l'IHRS/IHRF en considérant :
 - détermination de changements temporels de l'IHRS/IHRF,
 - mise en accord de la définition et la réalisation de l'IHRS/IHRF avec le progrès dans l'analyse et la modélisation géodésique,
 - interaction avec les disciplines autres que la géodésie qui ont aussi besoin d'un système de référence vertical, comme l'hydrographie et l'océanographie.

Beaucoup de travail est encore nécessaire pour avancer sur ces problématiques. Quand même, une source d'inspiration est l'ITRF. Si nous comparons les premières versions publiées de l'ITRF (ITRF89) avec les plus récentes (ITRF2014), une énorme amélioration est évidente. L'ITRF89 contenait seulement les positions des stations (les mouvements étaient négligés), il y avait autant de jeux de coordonnées qu'il y avait des centres qui calculaient cette station, la conversion aux coordonnées ellipsoïdales était réalisée avec des valeurs arbitraires pour les constantes de l'ellipsoïde (le GRS80 n'était pas utilisé), la précision des positions des stations variait de 11 à 60 mm, etc. L'ITRF2014 est totalement différent : calculs standardisés, plusieurs centres de calcul et de combinaison, précision des positions et des vitesses des stations au niveau du mm. Donc, commençons l'implémentation d'une "première approximation" de l'IHRF. Une fois que celle-ci sera réalisée, on pourra l'améliorer en prenant en considération de plus en plus de détails qui au début semblaient être des obstacles insolubles. ●

Contacts

Laura SÁNCHEZ - Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, Technische Universität München, Munich, Allemagne
lm.sanchez@tum.de

Urs MARTÍ - Office fédéral de topographie swisstopo, domaine de mensuration, Wabern, Suisse - urs.marti@swisstopo.ch

Johannes IHDE - Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum, Potsdam, Allemagne
jihde@gfz-potsdam.de

ABSTRACT

Most of the existing vertical reference systems do not fulfil the accuracy requirements of modern Geodesy. They refer to local sea surface levels, are stationary (do not consider variations in time), realise different physical height types (orthometric, normal, normal-orthometric, etc.), and their combination in a global frame presents uncertainties at the metre level. The International Association of Geodesy, taking care of providing a precise geodetic infrastructure for monitoring the Earth system, promotes the standardisation of height systems worldwide. The main objectives are: (1) to provide a reliable frame for consistent analysis and modelling of global phenomena and processes affecting the Earth's gravity field (e.g. redistribution of masses in the atmosphere, oceans, continents and the Earth's interior, etc.) and the Earth's surface geometry (e.g. deformations), and (2) to support a precise combination of physical and geometric heights in order to exploit at a maximum the advantages of satellite geodesy (e.g. combination of GNSS with gravity field models for worldwide unified precise height determination). According to this, present efforts of the geodetic community concentrate on the implementation of the International Height Reference System (IHRS) as a global standard for the height determination. This contribution summarizes the definition of the IHRS, the possible strategies for its realisation (i.e. the establishment of the International Height Reference Frame - IHRF) and the activities currently faced to achieve a reliable, sustainable and exploitable global vertical reference infrastructure.