

Nouveau système altimétrique Suisse



© swisstopo

Étude sur la modernisation du système et du cadre de référence altimétrique en Suisse

Partie I – Fondamentaux, état de l'art et comparaison internationale

(Version adaptée, correction à la page 13)

Dr Daniel Willi
Dr Andreas Schlatter
Dr Urs Marti
Dr Sébastien Guillaume



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral de topographie swisstopo

Photo de couverture : mesures GNSS statiques sur le point MN95 « Col du Sanetsch » (S. Condamin)

Impressum

© 2023 Office fédéral de topographie swisstopo

Rédaction :

Office fédéral de topographie swisstopo
Géodésie et Direction fédérale des mensurations cadastrales
Seftigenstrasse 264
CH-3084 Wabern

Téléphone : +41 58 469 01 11

Courriel : mensuration@swisstopo.ch



Management summary

Les altitudes peuvent être définies de façon purement géométrique ou de façon physique. Une mesure GNSS va conduire à une altitude dite ellipsoïdale, qui est purement géométrique. Or, ce type d'altitude ne répond pas aux exigences de la pratique. Seules des altitudes dites physiques, c'est-à-dire des altitudes qui prennent en compte le champ de pesanteur terrestre, répondent à toutes les exigences pratiques et permettent de combiner des mesures émanant de techniques différentes. Cela est important afin de pouvoir combiner les différentes mesures, par exemple du niveling avec des mesures GNSS.

La Suisse possède deux systèmes altimétriques, NF02, le système officiel, et RAN95, un système rigoureux, mais qui n'a jamais été officiellement introduit. RAN95 est basé sur des cotes géopotentielle et des altitudes orthométriques, qui sont un type d'altitude physique. Les principales différences avec NF02, qui est toujours officiellement en vigueur, sont :

1. NF02 est basé sur des altitudes usuelles, une forme d'altitude non rigoureuse. Une des conséquences est une erreur de 1 cm par 100 m de dénivelée, respectivement 100 ppm (facteur d'échelle).
2. Les mouvements verticaux de la Suisse ne sont pas considérés dans NF02. Cela conduit à des erreurs de l'ordre de 10 à 20 cm.
3. Les mesures sur lesquelles se base NF02 ont plus de cent ans. Les manquements de ces mesures conduisent à des erreurs supplémentaires de 10 à 20 cm.

Près des lignes de niveling, on dispose avec NF02 d'une précision relative de l'ordre du mm/km.

Il existe des efforts internationaux d'unification altimétrique. Le **système de référence vertical européen (EVRS)** est basé sur des mesures de niveling que les différents pays livrent au centre de calcul du BKG allemand. Les résultats sont ensuite transmis aux pays participants. Le **système de référence altimétrique international (IHRS)** suit une approche complètement différente. Sous l'égide de l'*Association internationale de géodésie (IAG/AIG)*, les pays membres s'accordent sur des conventions numériques, afin que chaque pays puisse réaliser indépendamment des altitudes compatibles. Cette réalisation s'appuie sur des modèles du géoïde et des mesures GNSS.

En comparaison internationale, un certain nombre de pays ont introduit des nouveaux systèmes altimétriques ces dernières années, par exemple la Norvège, la Suède, la Nouvelle-Zélande ou les États-Unis d'Amérique. Tous ces pays avaient des systèmes de référence altimétrique qui dataient de la deuxième moitié du 20^e siècle. Ce sont des objectifs d'unification ou des objectifs d'amélioration de la précision qui ont motivé ces changements, ainsi que des réflexions liées aux coûts d'entretien des points fixes.

Les types d'altitudes les plus fréquemment rencontrés sont les altitudes normales, les altitudes orthométriques ainsi que les altitudes usuelles. Ce dernier type d'altitude n'est plus considéré pour des nouveaux systèmes. Globalement, les altitudes normales semblent être préférées par la plupart des nations. Dans tous les cas, des systèmes altimétriques rigoureux sont mis en place lors de changements de système.

Alors que la plupart des pays européens continuent à miser sur le **niveling** pour la réalisation d'un cadre de référence, certains pays comme les États-Unis d'Amérique ou la Nouvelle-Zélande misent sur la détermination du géoïde, éventuellement appuyée par des mesures aérogravimétriques, afin d'établir un cadre de référence altimétrique applicable au pays entier.

Le groupe de travail recommande de poursuivre les investigations en lien avec un nouveau système de référence altimétrique. Il s'agit notamment de développer les conventions numériques et de calcul et d'évaluer des logiciels scientifiques, notamment des logiciels de détermination du géoïde. Les travaux proposés seront bénéfiques et ceci, indépendamment de l'instauration ou non d'un nouveau système de référence altimétrique.





Table des matières

1. Introduction	9
2. Fondamentaux théoriques de la détermination altimétrique	11
2.1. Altitudes géométriques	11
2.2. Altitudes physiques	12
2.2.1. Cotes géopotentielles	12
2.2.2. Types d'altitudes physiques	12
2.2.3. Potentiel de gravité	12
2.3. Lien entre les altitudes géométriques et les altitudes physiques	13
2.3.1. Géoïde	13
2.3.2. Quasi-géoïde	13
2.4. Exigences envers une altitude	14
2.5. Cinématique	14
2.6. Marées	15
2.6.1. Utilisation des systèmes de marées	15
2.6.2. Conversion entre les systèmes de marées	16
2.7. Définition d'un système de référence altimétrique	17
2.8. Transformations entre systèmes altimétriques	17
2.8.1. Particularité des systèmes de référence altimétrique locaux	17
2.9. Techniques de détermination altimétrique	17
2.9.1. Nivellement géométrique	18
2.9.2. Modèle du géoïde et GNSS	18
2.9.3. Nivellement trigonométrique	18
2.9.4. Nivellement barométrique	18
2.9.5. Nivellement chronographique	18
2.9.6. Nivellement hydrostatique	19
2.10. Définition de la précision	19
2.11. Utilisation d'altitudes en pratique	19
2.11.1. Evolution des cas pratiques	20
3. Le système de référence altimétrique Suisse	21
3.1. Nivellement de précision de la Commission géodésique suisse (1864 – 91)	21
3.2. Le niveling de repérage du Bureau topographique fédéral (1893 – 1902)	21
3.3. Le niveling fédéral et les altitudes usuelles officielles de la Suisse NF02	22
3.4. Le réseau altimétrique national 1995 (RAN95)	24
3.4.1. Rappel historique et définitions du système	24
3.4.2. Réalisation du cadre de référence altimétrique RAN95	25
3.4.3. Principaux résultats issus de RAN95	26
3.4.4. Différences entre RAN95 et NF02	30
3.4.5. État actuel et perspectives de RAN95	32
3.5. Différences avec les pays voisins	33
4. Le système de référence altimétrique international	35
4.1. Définition du système de référence altimétrique international	35



4.2. Systèmes des marées (tidal systems)	35
4.3. Autres conventions et conventions liées au géoïde	35
5. Le système de référence vertical européen	37
5.1. Rappel historique	37
5.2. Les premiers cadres (UELN-55 et UELN-73/86)	37
5.3. UELN 95/98, EVRS2000	39
5.4. EVRF2007	39
5.5. EVRF2019	41
5.6. EUVN/EUVN-DA	43
5.7. Les modèles du géoïde européens	44
6. Les systèmes de référence altimétrique nationaux	47
6.1. États-Unis	47
6.1.1. Contexte	47
6.1.2. Renouvellement des altitudes	48
6.1.3. Aspects théoriques	48
6.1.4. Composants	49
6.1.5. Problématique de la montée du niveau des mers	50
6.1.6. Données	50
6.1.7. Transformation des altitudes	52
6.1.8. Dissémination	52
6.1.9. Mise à jour	53
6.2. Norvège	54
6.2.1. Alignement avec les cadres européens	54
6.2.2. Cadre historique	54
6.2.3. L'anneau de nivellation baltique (BLR2000)	54
6.2.4. Bases théoriques pour l'établissement de NN2000	55
6.2.5. Mesures de nivellation	55
6.2.6. Mesures gravimétriques	56
6.2.7. Système des marées	56
6.2.8. Dissémination altimétrique	56
6.2.9. Passage au nouveau cadre	57
6.3. Allemagne	58
6.3.1. Rappel historique	58
6.3.2. Réseau altimétrique principal allemand DHHN2016	60
6.4. France	65
6.4.1. Rappel historique	65
6.4.2. Modèles du quasi-géoïde / transformation altimétrique	67
6.4.3. La contribution de la France au REUN	67
6.5. Autriche	68
6.5.1. Le système altimétrique officiel	68
6.5.2. Altitudes orthométriques, altitudes normales	68
6.5.3. Transformations, géoïde	69
6.6. Italie	69



6.6.1.	Rappel historique	69
6.6.2.	Mise en place de GE42	70
6.6.3.	Renouvellement du réseau	71
6.6.4.	Modèles du géoïde	71
6.6.5.	Contribution de l'Italie au REUN	72
6.7.	Nouvelle-Zélande	72
6.7.1.	Le système initial	72
6.7.2.	NZVD2009	73
6.7.3.	NZVD2016	74
6.8.	Suède	76
6.8.1.	Définition du système altimétrique	76
6.8.2.	Mesures et ajustement de RH2000	77
6.8.3.	Modèle du quasi-géoïde	77
6.8.4.	Implémentation du nouveau système RH2000 (statut 2006)	77
6.9.	Résumé	78
7.	Conclusions	79
7.1.	Le système altimétrique Suisse	79
7.2.	Les systèmes de référence altimétrique européen et mondial	79
7.3.	Comparaison internationale	79
8.	Recommandations	81
Bibliographie		83
Liste des figures		85
Liste des tableaux		87
Abréviations		89





1. Introduction

Le système altimétrique officiel en vigueur en Suisse est « NF02 », pour « Nivellement fédéral de 1902 » (« LN02 » en allemand). Ce système vieux de plus de cent ans est un système d'altitudes dites « usuelles ». Lors du calcul des altitudes, les effets du champ de pesanteur n'ont pas été pris en compte. Les altitudes NF02 ne sont pas univoques et dépendent du cheminement utilisé lors du niveling.

Pendant plus d'un siècle, la dissémination altimétrique en Suisse s'est appuyée sur « NF02 », fournissant des altitudes fiables et relativement précises aux utilisatrices et aux utilisateurs, notamment dans la mensuration officielle. Aujourd'hui, et avec l'avènement des méthodes de mesure globales comme le GNSS¹, les manquements du système deviennent de plus en plus apparents.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le projet « Introduction d'un nouveau cadre de référence altimétrique dans la mensuration officielle », financé par les moyens de l'Infrastructure nationale de données géographiques (INDG). Ce projet est une collaboration entre la *Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD)* et swisstopo. swisstopo y assume le rôle d'autorité nationale responsable de la définition et de l'entretien des cadres de référence, à travers le groupe de travail « Système de référence altimétrique et conversion des données ».

Alors qu'en termes de systèmes de référence planimétrique l'*« International Terrestrial Reference System » (ITRS)* est le standard de fait, aucun système de référence altimétrique mondial n'a encore été déployé. Au sein de la communauté géodésique internationale, la référence altimétrique mondiale est souvent considérée comme un des plus grands défis géodésiques du 21^e siècle. Le groupe de travail sera donc particulièrement sensible à suivre les développements internationaux en la matière afin d'assurer la compatibilité du futur système suisse avec tout futur système européen ou international.

Le présent rapport est une analyse de l'état de l'art en matière de systèmes de référence altimétrique. Après l'introduction des fondamentaux, une comparaison internationale présente les systèmes altimétriques en vigueur dans plusieurs pays choisis. Ce rapport servira de base à toute décision future en lien avec le système altimétrique Suisse.

¹ GNSS est l'abréviation de « Global Navigation Satellite System » et est le sigle standard pour désigner les principaux systèmes de navigation par satellite, soit le GPS (États-Unis d'Amérique), Galileo (Union européenne), GLONASS (Russie) et Beidou (Chine).





2. Fondamentaux théoriques de la détermination altimétrique

L'altitude au sens géodésique possède tant une composante géométrique qu'une composante physique. Les altitudes qui ne tiennent pas compte de la composante physique, c'est-à-dire du champ de pesanteur terrestre, sont dites géométriques. Les altitudes physiques combinent les deux aspects, géométrique et physique.

Pour les explications générales au sujet de la définition altimétrique, les lecteurs sont renvoyés à la littérature standard :

- Vanicek and Krakiwski (1986)
- Moritz and Hofmann-Wellenhof (2006)
- Torge and Müller (2012)

Pour le système altimétrique suisse, les lecteurs sont renvoyés à :

- Schlatter (2007)
- Schlatter and Marti (2007)

2.1. Altitudes géométriques

Les altitudes géométriques se caractérisent par une surface de référence définie de manière purement géométrique et par une mesure de l'altitude perpendiculairement à cette surface. De façon générale en géodésie, la surface de référence est un ellipsoïde de révolution.

L'altitude ellipsoïdale $h_{ell}(X_P)$ d'un point P est la distance (le long de la normale à l'ellipsoïde) de ce point à l'ellipsoïde de révolution, par exemple GRS80. X_P est le vecteur avec les coordonnées géocentriques de P , soit (X_P, Y_P, Z_P) .

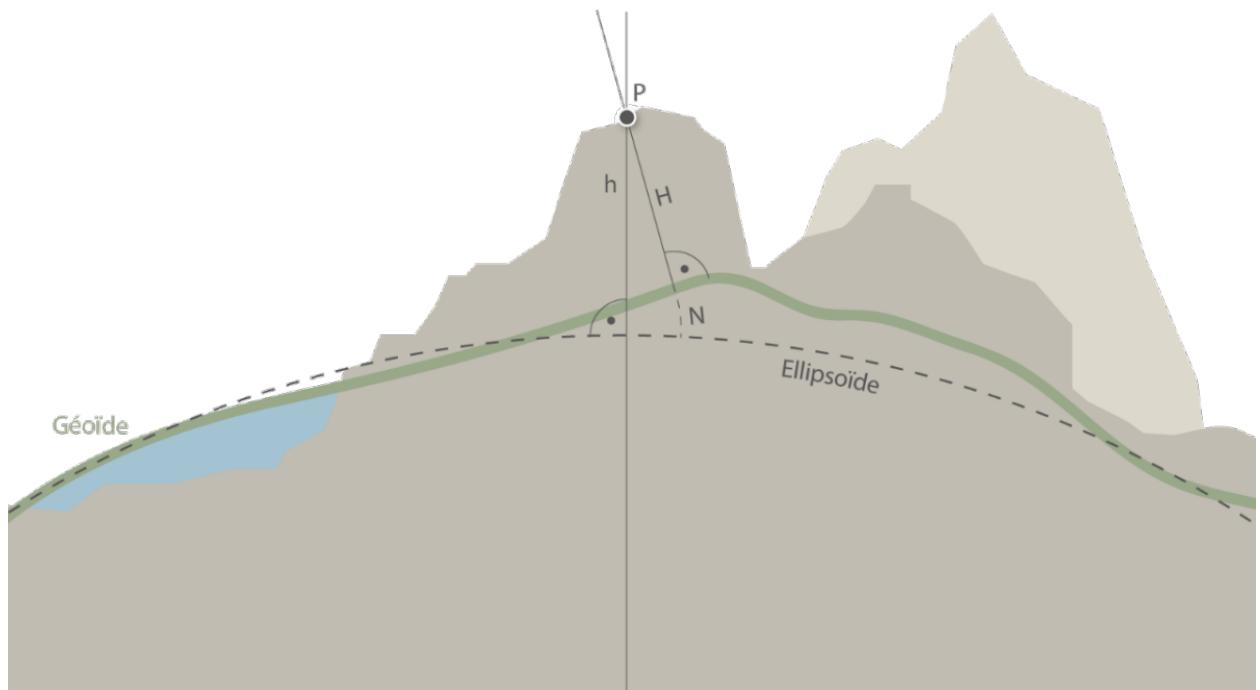


Figure 2-1 : altitude ellipsoïdale h d'un point P , altitude orthométrique H et cote du géoïde N en ce point.



2.2. Altitudes physiques

Contrairement aux altitudes géométriques, les altitudes physiques sont toutes dérivées du potentiel de gravité.

2.2.1. Cotes géopotentielles

La cote géopotentielle (ou nombre géopotentiel) C d'un point se calcule comme suit :

$$C(x_p) = W_0 - W(x_p) = \int_{xW_0}^{xp} g(x) dn \quad (2.1)$$

Avec W_0 le potentiel de gravité de référence, W le potentiel de gravité d'un point et g l'accélération de pesanteur. A partir des cotes géopotentielles, des altitudes sont dérivées en divisant la cote géopotentielle par une accélération g_0 :

$$H(x_p) = \frac{C(x_p)}{g_0} \quad (2.2)$$

2.2.2. Types d'altitudes physiques

Le type de l'accélération choisie pour g_0 conditionnera l'altitude, soit :

- $g_0 = \gamma_0 = \text{const.}$ pour des altitudes dynamiques H' ,
- $g_0 = \bar{g}$ pour des altitudes orthométriques H ou
- $g_0 = \bar{\gamma}$ pour des altitudes normales H^* .

Avec γ_0 étant l'accélération de pesanteur normale à un point choisi, \bar{g} étant l'accélération de pesanteur moyenne le long de la ligne du fil à plomb et $\bar{\gamma}$ étant la pesanteur normale moyenne le long de la normale à l'ellipsoïde de référence passant par le point.

A cause du défaut d'interprétation géométrique, les altitudes dynamiques ont peu d'applications pratiques. Elles sont parfois utilisées pour des projets hydrologiques, car les courbes de niveau des altitudes dynamiques forment des équipotentielles.

Les systèmes altimétriques modernes se basent sur des altitudes orthométriques ou des altitudes normales. Contrairement aux altitudes normales, le calcul des altitudes orthométriques à partir des cotes géopotentielles nécessite des hypothèses sur les masses à l'intérieur de la topographie (ou une connaissance parfaite de ces masses). Cela rend le calcul d'altitudes orthométriques plus difficile que le calcul d'altitudes normales, raison pour laquelle ces dernières sont généralement préférées dans les pays ayant introduit un système altimétrique rigoureux. La réalisation la plus fidèle d'une altitude « au-dessus de la mer » n'est cependant atteinte qu'avec des altitudes orthométriques.

2.2.3. Potentiel de gravité

En géodésie, le potentiel de gravité est défini comme suit :

$$W(x) = V(x) + \Phi(x) \quad (2.3)$$

Où $V(x)$ est le potentiel gravitationnel dû à l'attraction des masses terrestres et $\Phi(x)$ est le potentiel centrifuge, dû à la rotation terrestre. L'effet des marées quant à lui est absent de cette définition. Il est modélisé et soustrait des mesures.



2.3. Lien entre les altitudes géométriques et les altitudes physiques

Le lien entre une altitude ellipsoïdale et une altitude orthométrique est le suivant :

$$h_{ell} - N = H \quad (2.4)$$

Avec N qui est la cote du géoïde et H une altitude orthométrique. Le lien entre une altitude ellipsoïdale et une altitude normale est similaire :

$$h_{ell} - \zeta = H^* \quad (2.5)$$

Avec ζ qui est l'anomalie altimétrique (ce qui est égal à la cote du quasi-géoïde) et H^* une altitude normale.

2.3.1. Géoïde

Le géoïde est la surface de référence pour la détermination d'altitudes orthométriques. En termes mathématiques, le géoïde est défini comme la surface formée par tous les points P pour lesquels :

$$W(\mathbf{x}_P) = W_0 \quad (2.6)$$

2.3.2. Quasi-géoïde

Le quasi-géoïde est la surface de référence pour la détermination d'altitudes normales. Il n'a pas de signification physique équivalente au géoïde. Il peut être défini à travers le telluroïde. Le telluroïde est la surface formée par tous les points Q pour lesquels :

$$U(\mathbf{x}_Q) = W(\mathbf{x}_S) \quad (2.7)$$

Où U désigne le potentiel normal et \mathbf{x}_S est un point correspondant à la surface de la Terre. En d'autres termes, le telluroïde est formé par l'ensemble des points qui présentent un potentiel normal égal au potentiel de pesanteur à la surface (cf. Figure 2-2). La distance verticale entre le telluroïde et la surface de la Terre est égale à l'anomalie altimétrique. Les anomalies altimétriques, rapportées depuis l'ellipsoïde, forment le quasi-géoïde.

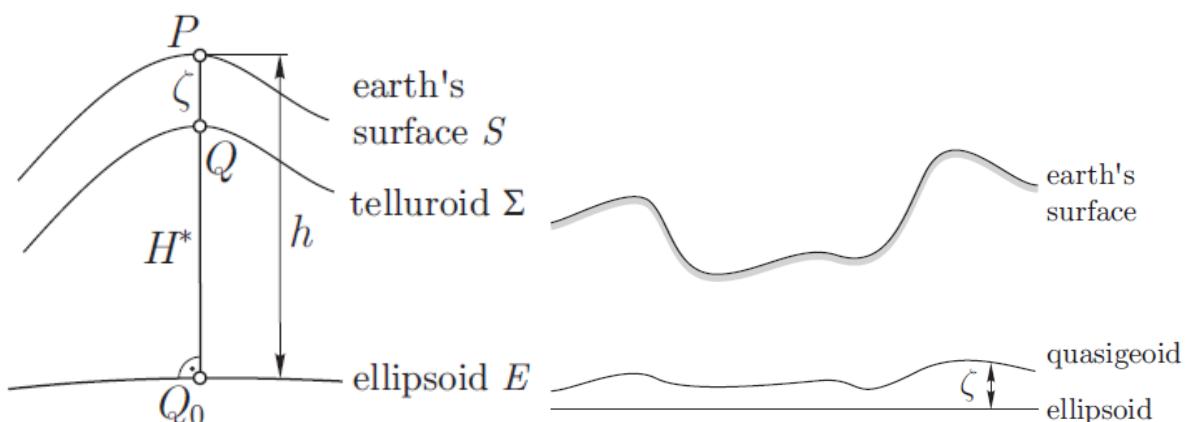


Figure 2-2 : lien entre surface, telluroïde et ellipsoïde (à gauche) et entre surface, quasi-géoïde et ellipsoïde (droite).
Source : Moritz and Hofmann-Wellenhof (2006).



2.4. Exigences envers une altitude

Différentes exigences théoriques et pratiques peuvent être formulées à l'égard d'un système altimétrique. *Schlatter (2007)* propose plusieurs critères pour mesurer l'aptitude d'une altitude à remplir les exigences d'un système altimétrique national. Quatre propriétés sont centrales :

1. Tout point possède une altitude unique, qu'il se trouve à la surface de la Terre, au-dessus ou en dessous d'elle.
2. L'altitude d'un point reflète l'énergie potentielle de gravité. En d'autres termes, l'eau ne coule pas entre deux points de même altitude.
3. L'altitude représente une distance verticale et se rapporte au niveau de la mer.
4. Les corrections à appliquer à des mesures de nivellation sont négligeables localement (pour de petits cheminements).

Le premier point implique que l'altitude H d'un point P ne dépende que des coordonnées du point et non d'autres paramètres, par exemple le cheminement de nivellation :

$$H(P) = f(\mathbf{x}_P) \quad (2.8)$$

Où \mathbf{x}_P est la coordonnée du point P et f est une fonction liant les coordonnées géométriques d'un point à son altitude. Les altitudes usuelles sont un exemple d'altitudes qui ne respectent pas la première condition, car :

$$H_{\text{usuelle}}(P) = f(\mathbf{x}_P, \mathcal{S}) \quad (2.9)$$

Où \mathcal{S} est le cheminement choisi pour déterminer l'altitude à partir du point de référence.

Le second point est une exigence pratique. Afin qu'un système altimétrique soit utile dans des projets d'infrastructure et pour l'étude de phénomènes environnementaux, il doit représenter la direction dans laquelle coule l'eau, au minimum localement. Ainsi, l'eau ne coule pas entre deux points de même altitude. En termes physiques, cela implique que l'altitude d'un point découle de son potentiel de gravité, ce qui exclut les altitudes ellipsoïdales.

Le troisième point est indispensable pour des questions d'acceptation et d'interprétation. Ainsi, un système altimétrique basé uniquement sur des cotes géopotentielles remplirait les conditions 1 et 2, mais l'interprétation courante d'altitudes serait extrêmement difficile. Il n'est pas concevable d'indiquer des altitudes sur les cartes nationales sous forme de potentiels. De plus, la surface de référence naturelle doit être proche du niveau de la mer. Historiquement, le niveau moyen de la mer a toujours servi de référentiel.

Le quatrième point est également imposée par la pratique. Un système altimétrique qui requiert la correction de mesures locales de nivellation n'est pas utilisable en pratique. Ainsi, un chantier classique doit pouvoir être nivélé sans devoir apporter des corrections altimétriques aux mesures brutes.

2.5. Cinématique

Une altitude physique est définie comme la cote géopotentielle $C(\mathbf{x}_P)$ d'un point \mathbf{x}_P divisée par une accélération g_0 :

$$H(\mathbf{x}_P) = \frac{C(\mathbf{x}_P)}{g_0} \quad (2.10)$$

Or, tant les coordonnées du point (donc son altitude géométrique), la cote géopotentielle que l'accélération (sauf pour les altitudes dynamiques) sont susceptibles de changer dans le temps. Il en découle :

$$H(\mathbf{x}_P, t) = \frac{C(\mathbf{x}_P(t), t)}{g_0(t)} \quad (2.11)$$



La variation temporelle de x_p se traduit par une variation temporelle de l'altitude ellipsoïdale, alors que la variation de la cote géopotentielle et de l'accélération se traduisent par une variation temporelle du géoïde et donc des cotes du géoïde. Ainsi :

$$h_{ell}(t) + N(t) = H(t) \quad (2.12)$$

Dans le cas général, les altitudes auront donc une vitesse, tout comme les cotes géopotentielles et le modèle du géoïde auront une composante temporelle.

2.6. Marées

Le traitement des marées est un des aspects de la définition d'un système altimétrique. Trois systèmes sont généralement considérés (cf. Tableau 2-1) :

- **Tide-free (ou non-tidal)** Dans une quantité dite « tide-free », tous les effets des marées sont enlevés par calcul, comme si la Lune, le Soleil et les autres planètes n'existaient pas. Ce système ne peut jamais être observé en réalité.
- **Mean-tide** Une quantité « mean-tide » est réduite des effets périodiques, mais contient l'effet permanent du Soleil et de la Lune. Pour la croûte terrestre, il s'agit de la croûte moyenne. « Mean-tide » décrit les mouvements de l'eau et la marche des horloges. Or, ce système pose des problèmes lors de la détermination du géoïde, car les effets des masses à l'extérieur du corps terrestre sont encore inclus.
- **Zero-tide** Une quantité dite « zero-tide » ne contient que les effets indirects dus à la déformation de la Terre à cause de marées, mais tous les effets directs (attraction directe du Soleil et de la Lune) ont été supprimés. Cette solution intermédiaire règle les problèmes lors de la détermination du géoïde.

Tableau 2-1 : systèmes de marées

Système	Effet permanent direct	Déformations indirectes
Mean-tide	Retenu	Retenues
Zero-tide	Supprimé	Retenues
Tide-free (non-tidal)	Supprimé	Supprimées

Pour la croûte terrestre, les systèmes zero-tide et mean-tide sont identiques. Pour le champ de pesanteur, le système zero-tide correspondrait au système tide-free, si la Terre était parfaitement rigide. Autrement dit, pour le champ de pesanteur, le système zero-tide est identique au système tide-free, à la différence près qu'une Terre déformée est présumée dans le premier cas.

L'influence sur la détermination altimétrique est discutée en détail dans *Ekman (1979)*, *Ekman (1989)* ou *Ekman (1996)*.

2.6.1. Utilisation des systèmes de marées

Pour des études océanographiques, pour des mesures de nivellation et à d'autres fins de monitoring environnemental, un système mean-tide s'impose naturellement. Cependant, un calcul rigoureux du géoïde n'est pas possible dans ce système, en raison du champ non harmonique².

Les trois systèmes de marées sont malheureusement utilisés en géodésie, bien que dans la résolution n° 13 de l'IAG de 1983 (International Association of Geodesy, 1983), zero-tide ait été défini pour le champ

² Au sens d'une fonction harmonique. Une fonction est harmonique, si elle satisfait l'équation de Laplace $\Delta f = 0$



du potentiel et mean-tide pour les coordonnées en 3D (équivalant alors à zero-tide). ITRS (et donc ETRS89 aussi) livre toutefois des coordonnées en 3D dans le système tide-free. Dans les modèles globaux du champ de pesanteur, on rencontre également tous les systèmes de marées. Et les trois systèmes sont aussi utilisés pour la détermination des altitudes. En l'absence de toute correction, les résultats sont implicitement fournis dans le système mean-tide. Si l'on apporte la correction luni-solaire classique, on en arrive au système tide-free. Des réseaux altimétriques zero-tide n'ont été introduits que récemment en Suède (2005) et en Finlande (2007) (Saaranen et al., 2007; Svensson et al., 2006).

Un ellipsoïde de référence global dépend lui aussi du système des marées (demi-grand axe et aplatissement). Pour l'ellipsoïde global actuel GRS80 (et donc aussi pour WGS84), le système auquel il se rapporte n'a même jamais été précisé. Implicitement, il s'agit d'un système tide-free.

Le système de référence vertical européen EVRS est défini comme étant zero-tide. Cependant, les données d'entrée n'ont jamais été corrigées en conséquence jusqu'à la solution « EVRF2000 », si bien que les cadres EVRF mélangeaient différents systèmes de marées auparavant. Le système zero-tide est logiquement appliqué depuis EVRF2007. Et depuis la solution EVRF2019, les altitudes sont aussi publiées en mean-tide.

2.6.2. Conversion entre les systèmes de marées

L'ellipsoïde de référence est affecté par le système des marées choisi. Son rayon équatorial et son aplatissement devraient donc varier en fonction du système choisi. Si l'ellipsoïde est considéré d'un point de vue purement géométrique, les différences entre les systèmes de marées peuvent être modélisées comme des différences de géoïde et paramétrées sous forme d'*harmoniques sphériques*.

Les conventions EVRF prévoient une transformation valable pour les altitudes normales qui inclut le terme de deuxième ordre (Ihde et al., 2008, formule 5-5) :

$$H_{zt}^* - H_{mt}^* = 0.09940 - 0.29541 \sin^2 \varphi - 0.00042 \sin^4 \varphi \quad (2.13)$$

Avec φ qui est la latitude géodésique. Pour la Suisse, cette correction varie presque linéairement de -0.063 m au sud à -0.052 m au nord (cf. Figure 2-3).

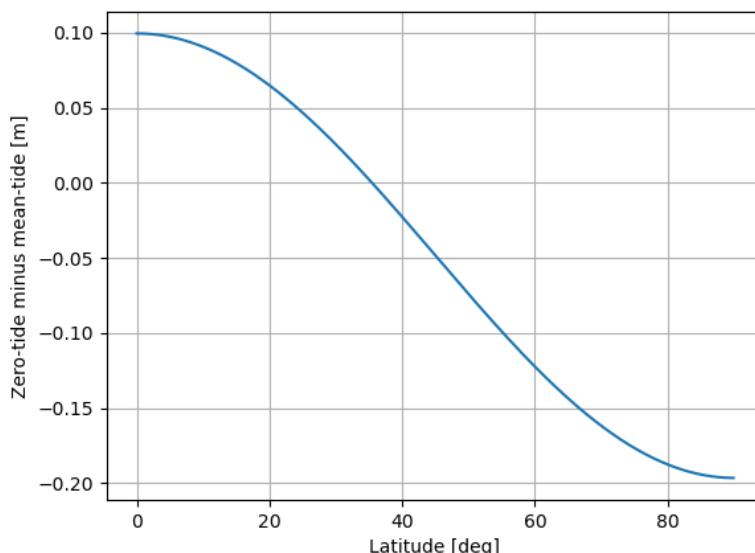


Figure 2-3 : différence entre une altitude normale mean-tide et une altitude normale zero-tide selon les conventions EVRF.



2.7. Définition d'un système de référence altimétrique

En résumé, la définition d'un système de référence altimétrique comporte les éléments suivants :

- choix du potentiel de référence W_0
- le type d'altitudes, p.ex. normales ou orthométriques
- le système des marées
- inclusion ou non d'un modèle cinématique
- critères pour l'établissement d'un nouveau cadre (p.ex. tolérance à partir de laquelle un nouveau cadre est réalisé).

2.8. Transformations entre systèmes altimétriques

Par définition et pour un système rigoureux, la seule différence de potentiel entre un point et le géoïde suffit à déterminer la cote géopotentielle de ce point :

$$C(\mathbf{x}_P) = W_0 - W(\mathbf{x}_P) = \int_{x_{W_0}}^{x_P} g(\mathbf{x}) dn \quad (2.14)$$

Le système de référence géodésique choisi n'aura aucune influence sur le résultat, puisque :

$$C(\mathbf{x}'_P) = W_0 - W(\mathbf{x}'_P) = \int_{x_{W_0'}}^{x'_P} g(\mathbf{x}') dn = \int_{x_{W_0}}^{x_P} g(\mathbf{x}) dn \quad (2.15)$$

Où x'_P sont les coordonnées de P dans un autre système de référence géodésique. Cependant, il est primordial d'adapter la borne inférieure d'intégration, $x_{W_0'}$. La transformation entre deux systèmes altimétriques A et B ayant un W_0 différent se fera à l'aide d'un seul paramètre, ΔW_0^{AB} :

$$C^A(\mathbf{x}'_P) = W_0^A - W(\mathbf{x}'_P) = C^B(\mathbf{x}_P) - \Delta W_0^{AB} = W_0^B - W(\mathbf{x}_P) - \Delta W_0^{AB} \quad (2.16)$$

$$\Delta W_0^{AB} = \Delta W_0^B - \Delta W_0^A \quad (2.17)$$

La différence de potentiel des géoïdes ΔW_0^{AB} est donc un paramètre de transformation nécessaire et suffisant entre deux systèmes ou deux cadres de référence altimétrique.

Pour des systèmes non rigoureux, une surface de transformation du type « Height Reference Surface » (HREF) peut être nécessaire. La transformation sera alors non rigoureuse et limitée en précision par la qualité de l'interpolation de la HREF.

2.8.1. Particularité des systèmes de référence altimétrique locaux

Pour un système de référence altimétrique local (ou régional), il est envisageable de minimiser les écarts altimétriques entre deux systèmes ou deux cadres par un choix judicieux de W_0 . valeur W_0 différente pour les différents cadres de référence altimétrique d'un même système de référence altimétrique est donc un choix valable.

2.9. Techniques de détermination altimétrique

Une multitude de techniques sont disponibles pour réaliser des altitudes. Traditionnellement, le niveling, accompagné de mesures gravimétriques, est la méthode la plus utilisée. Plus récemment, des géoïdes gravimétriques combinés à une détermination altimétrique uniquement par GNSS ont fait leur apparition.



2.9.1. Nivellement géométrique

Le nivelllement géométrique consiste à déterminer des différences d'altitudes usuelles :

$$H_{B,\text{usuelle}} = H_{A,\text{usuelle}} + \sum_A^B \Delta h_{\text{nivelllement}} \quad (2.18)$$

Afin d'obtenir des différences de potentiel, la pesanteur le long du cheminement de nivelllement doit être prise en compte :

$$C(x_B) = C(x_A) + \sum_A^B g_{\text{surface}} \Delta h \quad (2.19)$$

Où C est la cote géopotentielle du point en question. Le nivelllement de précision requiert une mesure gravimétrique tous les 1 à 2 km en région alpine et seulement tous les 5 à 10 km en plaine (Torge & Müller, 2012).

Le nivelllement a une très bonne précision locale (0.4 mm par km de nivelllement double). Cependant, les mesures sont souvent affectées par des systématismes à longue longueur d'onde, d'origine inconnue. De plus, le nivelllement est coûteux en termes de ressources en personnel. Les coûts sont directement proportionnels à la longueur du cheminement.

2.9.2. Modèle du géoïde et GNSS

Le GNSS fournit des altitudes ellipsoïdales. A l'aide des équations 2.4 et 2.5, une altitude ellipsoïdale peut être transformée en altitude physique. Typiquement, les modèles du géoïde locaux ont une précision de quelques centimètres, ce qui fait d'eux le facteur limitant dans la détermination altimétrique, tout du moins lors de mesures GNSS statiques. L'avantage de cette méthode est la bonne précision (notamment pour les longues longueurs d'ondes). Cependant, la détermination d'un géoïde local de précision suffisante peut être difficile et requiert un nombre important de mesures gravimétriques ou astronomiques (déviations de la verticale).

2.9.3. Nivellement trigonométrique

L'application du nivelllement trigonométrique est principalement limitée par la réfraction atmosphérique. Des mesures réciproques simultanées permettent d'éliminer les erreurs de premier ordre, mais sont difficiles à mettre en œuvre. Pour la détermination de cadres de référence altimétrique, le nivelllement trigonométrique est limité à certains cas particuliers, comme la traversée de rivières ou de fjords.

Les déviations de la verticale devront être prises en considération afin d'obtenir des différences d'altitudes rigoureuses. Sans correction, il en résulte des altitudes « usuelles » qui dépendent du cheminement et de l'emplacement des stations le long du cheminement.

2.9.4. Nivellement barométrique

Cette méthode très répandue par le passé n'a plus d'application en géodésie.

2.9.5. Nivellement chronographique

Selon la relativité générale, deux horloges soumises à deux potentiels gravitationnels $V(x_A)$ et $V(x_B)$ différents subissent le redshift gravitationnel suivant (Grotti et al., 2018) :

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{V(x_B) - V(x_A)}{c^2} \quad (2.20)$$



Ainsi, une précision relative de 10^{-18} en termes de fréquences équivaut à $0.1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ de différence de potentiel, ce qui correspond à une différence altimétrique de 1 cm.

Les principaux obstacles à ce type de mesure sont la capacité à effectuer une comparaison d'horloges suffisamment précise sur de longues distances ainsi que le développement d'horloges transportables suffisamment précises. Actuellement limité à des expériences isolées, il est probable que le nivellation chronographique joue, à l'avenir, un rôle plus important dans la connexion de systèmes altimétriques nationaux.

2.9.6. Nivellement hydrostatique

Le nivellation hydrostatique produit des différences altimétriques très précises sur des étendues limitées (quelques centaines de mètres au maximum). Pour cette raison, le nivellation hydrostatique ne peut pas contribuer de façon significative à la réalisation d'un cadre de référence.

2.10. Définition de la précision

Etant donné les n points \mathbf{x}_i , et connaissant l'altitude vraie de chaque point $\tilde{H}(\mathbf{x}_i)$ ainsi que son altitude estimée $\hat{H}(\mathbf{x}_i)$, le vecteur des résidus \mathbf{v} est défini comme suit :

$$v_i = \hat{H}(\mathbf{x}_i) - \tilde{H}(\mathbf{x}_i) \quad (2.21)$$

Plusieurs indicateurs de la précision d'un cadre de référence altimétrique sont utiles :

- le résidu maximal $v_{max} = \max|\mathbf{v}|$, avec max qui est une fonction qui retourne la valeur maximale d'un vecteur
- la racine carrée de la moyenne des résidus (ou root mean square, RMS), $RMS_v = \sqrt{\frac{1}{n} \mathbf{v}^T \mathbf{v}}$

Ces indicateurs scalaires ont l'inconvénient de ne pas refléter la corrélation spatiale entre les résidus. Les techniques de détermination altimétrique conduisent à une corrélation spatiale des résidus. La semi-variance est à même de combler cette lacune. Cet indicateur est défini comme suit :

$$\hat{\gamma}(d \pm \delta) = \frac{1}{2n} \sum_{(i,j) \in (d-\delta < \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\| \leq d+\delta)} |\mathbf{v}(\mathbf{x}_i) - \mathbf{v}(\mathbf{x}_j)|^2 \quad (2.22)$$

$\hat{\gamma}(d \pm \delta)$ est la semi-variance des paires de points distants de $d - \delta$ à $d + \delta$, n est le nombre de points dans ce groupe et \mathbf{v} est le résidu au point x . Cette représentation de la précision permet d'associer une précision à une longueur d'onde. Ainsi, la précision du cadre de référence pour une longueur d'onde λ sera définie par $\hat{\gamma}(\lambda \pm \delta)$.

2.11. Utilisation d'altitudes en pratique

Le Tableau 2-2 donne un aperçu des cas pratiques d'utilisation d'altitudes. Alors que le GNSS donne accès au système altimétrique à travers un modèle du géoïde ou du quasi-géoïde, les méthodes terrestres nécessitent des produits dérivés du champ de pesanteur.

Pour les utilisations locales à basse exigence de précision et les utilisations très localisées, aucune correction n'est nécessaire, selon les exigences définies au paragraphe 2.2.

Les autres cas d'utilisation non énumérés peuvent être ramenés à un des cas présentés ici.



Tableau 2-2 : cas pratiques d'utilisation des altitudes ainsi que les produits nécessaires.

	Type de mesure	Précision demandée	Exemple	Produit nécessaire
1.1	Nivellement	mm	Nivellement technique pour un chantier	Aucune correction nécessaire
1.2	Nivellement, long cheminement	mm	Nivellement de grande précision pour un chantier d'envergure	Correction orthométrique ou correction normale
1.3	Nivellement	mm - cm	Nivellement de terrassement	Aucune correction nécessaire
2.1	Mesures trigonométriques	mm	Transfert d'altitude par visées réciproques simultanées	Déviations de la verticale à la surface
2.2	Mesures trigonométriques	mm - cm	Mesures trigonométriques par visées réciproques simultanées	Aucune correction nécessaire
2.3	Mesures trigonométriques	cm	Mesures trigonométriques pour un chantier	Aucune correction nécessaire
3.1	GNSS	mm - cm	Mesures GNSS statiques pour un chantier d'envergure	Modèle du géoïde ou du quasi-géoïde de très haute précision
3.2	GNSS	cm	Mesure GNSS RTK pour un chantier	Modèle du géoïde ou du quasi-géoïde de grande précision
3.3	GNSS	dm	Relevé topo	Modèle du géoïde ou du quasi-géoïde de précision moyenne

2.11.1. Evolution des cas pratiques

Avec des progrès en positionnement GNSS et en détermination globale du géoïde, il est imaginable que les cas pratiques 3.2 et 3.3 ci-dessus deviennent accessible au grand public à travers des GNSS low-cost et des modèles globaux du géoïde. En général, les mesures globales du type Precise Point Positioning (PPP) tendent à s'améliorer en termes de précision et à gagner des parts de marché, aux dépens des systèmes régionaux comme le RTK par station de référence virtuelle. Ainsi, la compatibilité d'un système de référence géodésique avec les cadres supérieurs va gagner en importance, tout comme les transformations entre systèmes de référence.



3. Le système de référence altimétrique Suisse

Les paragraphes suivants constituent pour l'essentiel des résumés tirés de Schlatter (2007) et de Schlatter and Marti (2007). Ces deux documents visaient principalement à établir une documentation complète et définitive des travaux portant sur le nouveau réseau altimétrique national RAN95.

3.1. Nivellement de précision de la Commission géodésique suisse (1864 – 91)

Le premier effort de détermination d'altitudes précises à l'échelle nationale fut entrepris dès 1864, sous la conduite de la Commission géodésique suisse (CGS) et sous le nom de « Nivellement de précision (NdP) ». Le principal résultat de ces travaux, le « Catalogue des hauteurs (CdH) » publié en 1891, contenait les altitudes au-dessus du Repère Pierre du Niton (RPN) de tous les points fixes altimétriques de 1^{er} et de 2^{ème} ordre. La Commission géodésique suisse laissa sciemment ouverte la question de l'altitude de référence, estimant qu'il était du ressort d'une Commission géodésique internationale de fixer celle-ci.

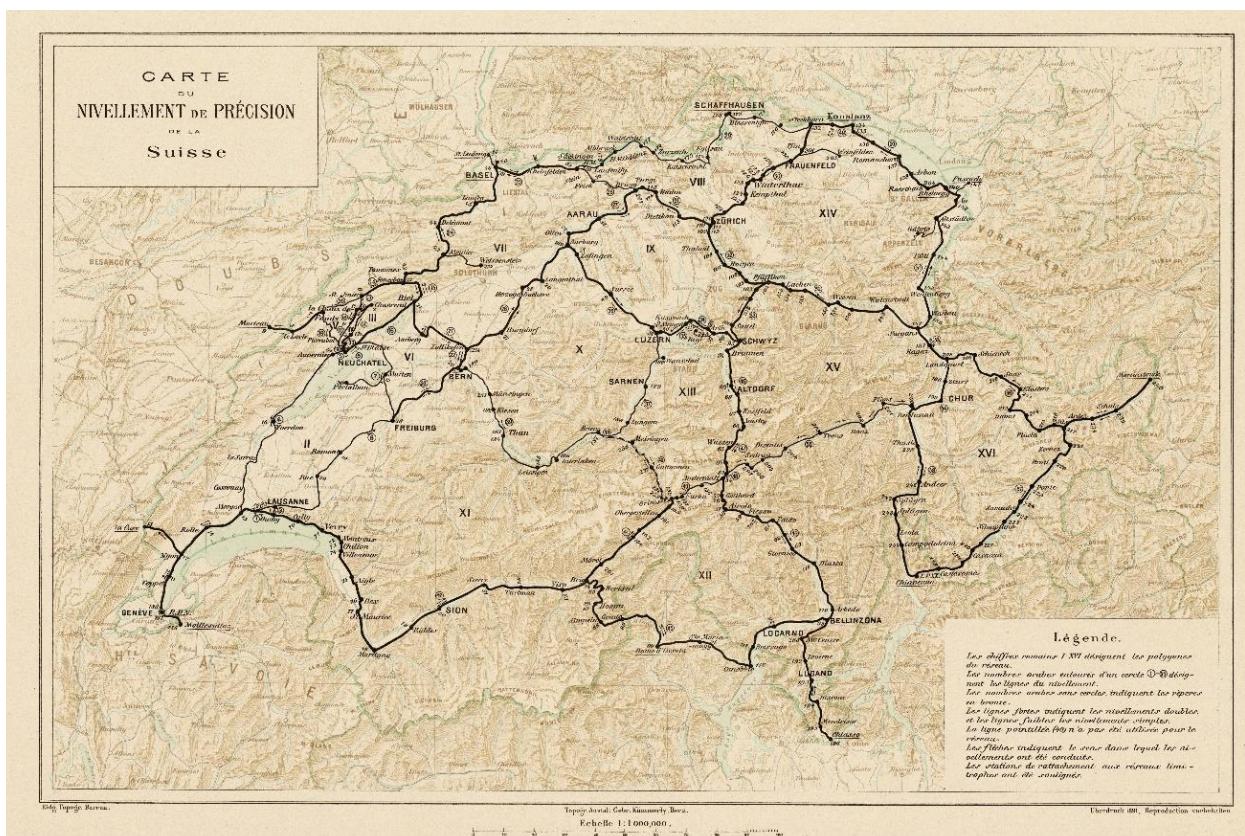


Figure 3-1 : Nivellement de précision de la Suisse (Hirsch & Plantamour, 1891).

3.2. Le nivelllement de repérage du Bureau topographique fédéral (1893 – 1902)

Après la publication du Catalogue des hauteurs, la CGS confia les travaux d'entretien au Bureau topographique fédéral, lointain prédecesseur de l'actuel Office fédéral de topographie swisstopo. Entre 1893 et 1902, le Bureau topographique entreprit un nivelllement de repérage afin de préserver un réseau de points fixes en rapide détérioration. 45% des points du Nivellement de précision furent définitivement perdus. Avec le nivelllement de repérage, un nouveau type de matérialisation fut introduit, tout comme de nouvelles méthodes de mesure, qui perdurent jusqu'à aujourd'hui.

Des nivelllements de contrôle, aussi nombreux que complets, furent effectués à la fois pour remettre le réseau de la CGS en état et pour le densifier. On conserva les cotes du NdP dès lors que les écarts



constatés restaient dans les limites de la précision de mesure du nivelllement initial. Les résultats furent publiés jusqu'en 1907, dans 17 livraisons en tout. Comme dans le Catalogue des hauteurs de la CGS, les altitudes se rapportaient au RPN. Dans les remarques introductives, il était toutefois renvoyé très visiblement à l'ancien horizon de 376,86 m déterminé en 1879.

3.3. Le nivelllement fédéral et les altitudes usuelles officielles de la Suisse NF02

C'est en 1901, dans l'optique des nouvelles triangulations prévues et de la nouvelle édition de la carte nationale, que les bases pour l'introduction d'un nouveau système de projection homogène et d'un horizon adapté furent jetées. Jakob Hilfiker publia ses travaux l'année suivante, dans un document intitulé *Untersuchungen der Höhenverhältnisse der Schweiz* (Hilfiker, 1902). Son étude servit de fondement au « nouvel horizon » de 373,6 m pour le Repère Pierre du Niton. L'horizon de la Suisse ainsi déterminé est toujours en vigueur aujourd'hui. Il est du reste ancré dans la loi. C'est la base des altitudes dites usuelles NF02.

En 1903 débutèrent les travaux relatifs au nivelllement fédéral (NF) et donc au réseau altimétrique tel que nous le connaissons encore actuellement. Le réseau principal constitué de 18 polygones ne fut achevé qu'en 1927, les travaux ayant été interrompus durant la guerre. Au début du 20^e siècle, le besoin en indications altimétriques se faisait cependant de plus en plus pressant, si bien que le Service topographique fédéral décida rapidement de contraindre les mesures des lignes sur les résultats du nivelllement de précision de la CGS et du nivelllement de repérage, de les porter au niveau du nouvel horizon et de les publier en continu à partir de 1915 en tant qu'« altitudes usuelles provisoires ». Du reste, la Commission géodésique suisse n'avait pas encore achevé les mesures gravimétriques, lesquelles auraient été requises pour calculer un système altimétrique rigoureux.

Malgré leur caractère provisoire, les altitudes usuelles furent rapidement adoptées, tant dans les domaines ferroviaire et hydraulique qu'en mensuration officielle. A la conclusion des mesures en 1927, il était déjà trop tard : les altitudes usuelles provisoires s'étaient déjà diffusées si largement qu'il fallut renoncer à introduire des altitudes issues d'une compensation rigoureuse pour les remplacer définitivement. De fait, une modification a posteriori, une fois le réseau principal achevé, était ainsi devenue impossible. C'est la principale raison pour laquelle la Suisse dispose d'un cadre de référence altimétrique non rigoureux, uniquement fondé sur des mesures de nivelllement et sur les altitudes du 19^e siècle. Le réseau ainsi établi fait l'objet d'un entretien régulier depuis lors, les nouvelles mesures continuant à venir s'appuyer sur les altitudes initiales. Si les modifications locales par rapport à ces altitudes de référence sont ainsi prises en compte, les points de référence « stables » n'ont guère vu leur altitude initiale évoluer depuis plus d'un siècle, malgré le soulèvement alpin clairement mis en évidence. Cet état de fait est présenté sur les figures suivantes.

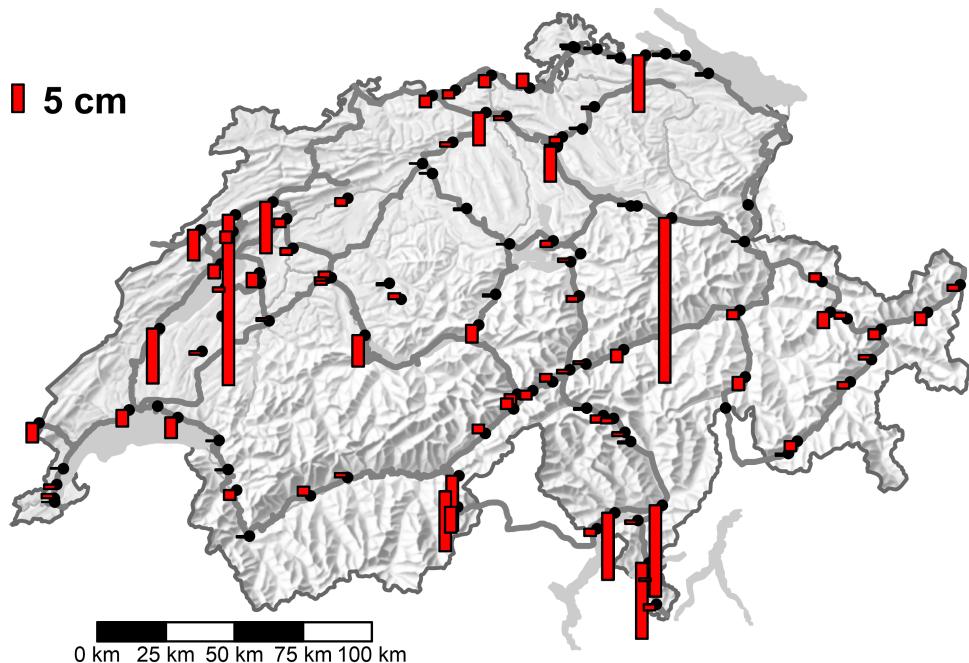


Figure 3-2 : différences entre les altitudes du Catalogue des hauteurs / du nivellement de repérage et les altitudes usuelles actuelles NF02 des points fixes du 1^{er} ordre du Nivellement de précision existant toujours, état en 2002 (Schlatter, 2007). Les barres les plus grandes signalent des points instables.

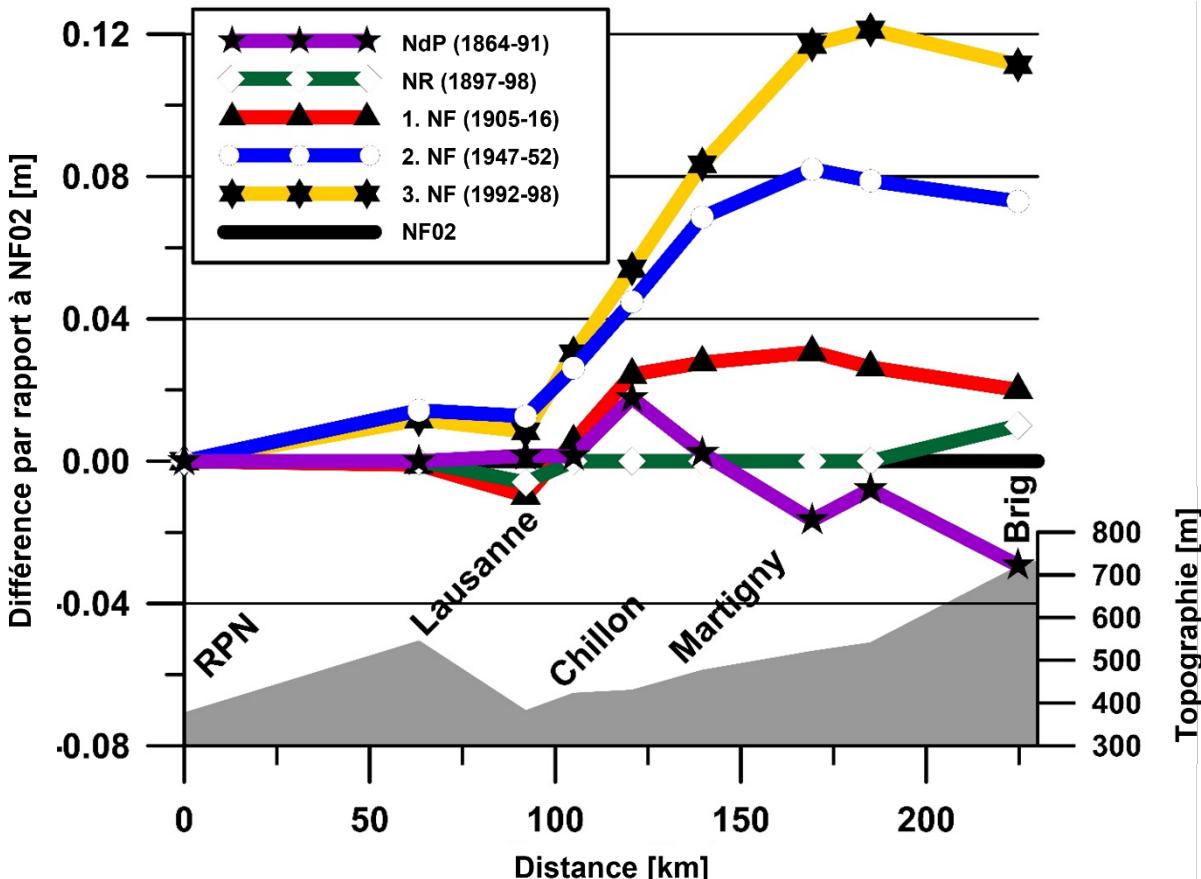


Figure 3-3 : comparaison entre les altitudes usuelles officielles NF02, le Nivellement de précision (NdP), le Nivellement de repérage (NR) et les valeurs observées par nivellage fédéral (NF) le long des lignes Genève (RPN) – Martigny – Brig.

3.4. Le réseau altimétrique national 1995 (RAN95)

3.4.1. Rappel historique et définitions du système

L'élaboration du nouveau réseau altimétrique national RAN95 était un sous-projet de la nouvelle mensuration nationale de la Suisse MN95. Le projet MN95 fut lancé au sein de l'Office fédéral de topographie (swisstopo) au milieu des années 1980 afin d'adapter la mensuration nationale aux possibilités nées des méthodes de mesure de la géodésie par satellites moderne tout en se conformant aux exigences de la pratique. Les altitudes GNSS devant impérativement être compatibles avec les altitudes nationales, il était indispensable d'être parfaitement au clair avec les types d'altitudes rigoureuses, liées au champ de pesanteur. Les méthodes de la géodésie par satellites fournissent des coordonnées géocentriques cartésiennes, respectivement des grandeurs définies de manière purement géométrique sur la base d'un ellipsoïde de référence, soit la latitude, la longitude et des altitudes dites ellipsoïdales (h). Le lien direct avec les altitudes physiques (orthométriques) H est fourni via un modèle du géoïde précis avec les ondulations (ou cotes) du géoïde N .

Un système altimétrique est réputé cohérent si la condition :

$$h_{ell} = H + N \quad (3.1)$$

est satisfaite, objectif qui peut être atteint en recourant à des hypothèses adaptées et une compensation commune des trois grandeurs. Les méthodes de la géodésie par satellites ne peuvent être utilisées pour



déterminer des altitudes physiques absolues que lorsque cette condition de cohérence est respectée avec une précision appropriée. Le projet RAN95 traitait ainsi la détermination des altitudes physiques H . Le respect de la condition de cohérence était assuré par le calcul du nouveau modèle du géoïde CHGeo2004.

C'est sur la base d'études préliminaires et de la thèse de doctorat de Wirth (1990) que le choix se porta très tôt sur un système altimétrique orthométrique, au contraire de certains pays européens qui disposaient déjà d'altitudes normales. Parmi les autres définitions importantes, on peut citer :

- l'altitude de référence : le potentiel du point fondamental de Zimmerwald (Z_0) est défini de telle façon, à l'époque 1993.0, que le RPN conserve son altitude (orthométrique) de 373.600 m dans le système CH1903+
- Les altitudes sont fixées à l'époque 1993.0, la règle cinématique $dC/dt = 0.0 \text{ mgpu/a}$ devant s'appliquer pour la référence Aarburg.

Rien n'avait encore été défini à la fin des années 1980 en matière de marées terrestres.

3.4.2. Réalisation du cadre de référence altimétrique RAN95

Au départ, le degré de priorité accordé à RAN95 au sein du projet MN95 n'était pas aussi élevé que ce qu'il était du temps du réseau national GPS MN95. Grâce aux travaux préliminaires de Wirth (1990), les définitions théoriques essentielles concernant aussi le futur système altimétrique purent également être publiées en 1995, dans Schneider et al. (1995). La réalisation concrète du projet RAN95 ne débuta cependant qu'en 1996. Parmi les aiguillons les plus puissants, on citera le besoin d'un cadre altimétrique aussi précis que possible pour la réalisation des deux tunnels de base d'AlpTransit, à savoir le Lötschberg et le Saint-Go-thard, ainsi que le souhait de disposer de meilleures altitudes orthométriques pour les points d'appui (points GNSS / de nivellation) du modèle du géoïde à venir CHGeo2004 (Marti, 2016).

La réalisation du cadre de référence altimétrique RAN95 va être brièvement exposée sur la base des sous-projets définis à l'époque (*les noms en allemand ont été conservés, LHN=RAN*) :

Tableau 3-1 : sous-projets et échelonnement initial du projet RAN95 en 1999 (Schlatter & Marti, 2007).

Sous-projet	Travail	Exécution
LHN95-LIN	Saisie de données, mesure des lignes du NF et mesures de rattachement à MN95	Jusqu'à fin 2000
LHN95-V	Projet pilote, mesures de densification via GPS en collaboration avec le canton de Berne	Jusqu'à fin 2000
LHN95-KIN	Compensation cinématique de RAN95 ; cohérence entre GPS, géoïde et nivellation ; calcul des altitudes orthométriques de tous les PFA1	2000 – 2003
LHN95-NF	Saisie des mesures de mise à jour	2000 – 2001
LHN95-TrF	Transformation / conversion entre systèmes altimétriques	2000 – 2002
LHN95-DB	Passage dans la charge de base de la mensuration nationale, création d'une banque de données, acquisition du matériel et des logiciels inclus	2001 – 2003

LHN95-LIN/LHN95-NF : saisie de données – mesure des lignes et des rattachements à MN95 / saisie des mesures de mise à jour

Toutes les lignes principales et secondaires du nivellation fédéral qui n'étaient pas encore disponibles sous forme numérique furent intégralement saisies. Il s'agissait pour l'essentiel des mesures du NF de 1902 à 1985 environ. Le consortium Vermessung Gotthard-Basistunnel (VI-GBT) participa également à



ces travaux. En outre, tous les rattachements au NF (via nivellation ou GPS) de points principaux et de densification de MN95 firent l'objet d'une saisie et d'une documentation en vue de leur traitement dans RAN95. Et pour que des altitudes orthométriques puissent être mises à disposition à l'avenir pour tous les PFA1 de RAN95, les gros travaux de mise à jour effectués le long des lignes de mesure durent aussi être saisies. Cela ne concernait cependant que les mises à jour réalisées depuis les dernières mesures en date des lignes considérées du NF.

LHN95-V : projet pilote pour des mesures de densification par GPS

C'est en collaboration avec le service cantonal du cadastre de Berne (Office de l'information géographique OIG aujourd'hui) que des investigations furent menées dans la vallée de l'Emmen et au col de Susten pour savoir dans quelle mesure le GPS pouvait venir remplacer les mesures de nivellation, lourdes et dispendieuses, dans les réseaux de PFA2 et quelles conclusions pouvaient en être tirées pour l'établissement et l'entretien des futurs réseaux de PFA2. Ce sous-projet fut lancé dès 1997 et conclu en 2000 avec un rapport technique et un article spécialisé (Schlatter et al., 2001).

LHN95-KIN : compensation cinématique de RAN95

Ce sous-projet est le cœur des travaux relatifs à RAN95. Les procédures de calcul et leurs résultats constituent des éléments essentiels de la présente documentation. Ce sous-projet devait initialement se conclure en 2003. La compensation purement cinématique avec les données du nivellation fédéral aurait également été achevée à cette date. Il s'est cependant avéré que les données à disposition formaient une base encore insuffisante pour l'établissement d'un cadre altimétrique cohérent doublé d'un nouveau modèle du géoïde. On attendit donc les résultats de la campagne pour les points GPS / de nivellation supplémentaires (Schlatter et al., 2005) et de la deuxième remesure complète du réseau GPS national MN95 (CHTRF2004). Le nouveau modèle du géoïde CHGeo2004 et le cadre de référence RAN95 par voie de conséquence ne furent publiés qu'en mars 2005 (avec des données recueillies jusqu'à fin 2004).

LHN95-TrF : Transformation / conversion entre les systèmes altimétriques

Le développement du logiciel *HTRANS* destiné à la conversion entre les deux cadres de référence RAN95 et NF02 constituait un élément important du projet RAN95. La mensuration officielle en restant au cadre des altitudes usuelles NF02, *HTRANS* conserve son statut d'outil essentiel lorsque les altitudes sont déterminées via GNSS en Suisse.

Le concept et le logiciel requis pour déterminer et utiliser cette surface de transformation sont l'œuvre d'Urs Marti (swisstopo). Les travaux ne furent achevés qu'à la publication de RAN95 en mars 2005. Le logiciel est mis gratuitement à la disposition de tous les utilisateurs et est aussi intégré au *Swiss Positioning Service* (swipos).

3.4.3. Principaux résultats issus de RAN95

Les figures des pages suivantes proviennent de Schlatter and Marti (2007). Si elles sont reproduites ici, c'est que les données sur lesquelles elles se fondent, les résultats et les ordres de grandeur restent très probablement d'actualité pour la définition d'un nouveau système altimétrique.

Ce sont près de 12 000 km de mesures de lignes du nivellation fédéral qui ont été injectés dans la compensation cinématique globale après avoir été convertis en différences de potentiel et réduits aux points principaux (environ 10 à 15% des PFA1 existants) (cf. Figure 3-4 et Figure 3-5). Les résultats principaux fournis par la compensation cinématique ont été les cotes potentielles des PFA1 (à l'époque 1993.0), les modifications dans le temps (« vitesses ») aux points où les mesures étaient répétées et les indications stochastiques résultant de la compensation selon la méthode des moindres carrés pour ces deux grandeurs (cf. Figure 3-6 et Figure 3-7). On peut estimer, à partir de ces grandeurs, que la précision d'une altitude orthométrique est au mieux de 1 à 2 cm à l'échelle du pays entier. Les modifications altimétriques verticales par rapport à Aarburg, fondées sur les mesures répétées, présentent des écarts-types pouvant atteindre 0,25 mm/an (toutes les indications sont fournies au niveau de signification 1σ).



Les modifications altimétriques résultantes (Figure 3-7) ont également permis de générer un modèle (CHKLM95, Figure 3-9), requis de manière générale pour calculer les cotes géopotentielles de tous les points à une époque de référence définie.

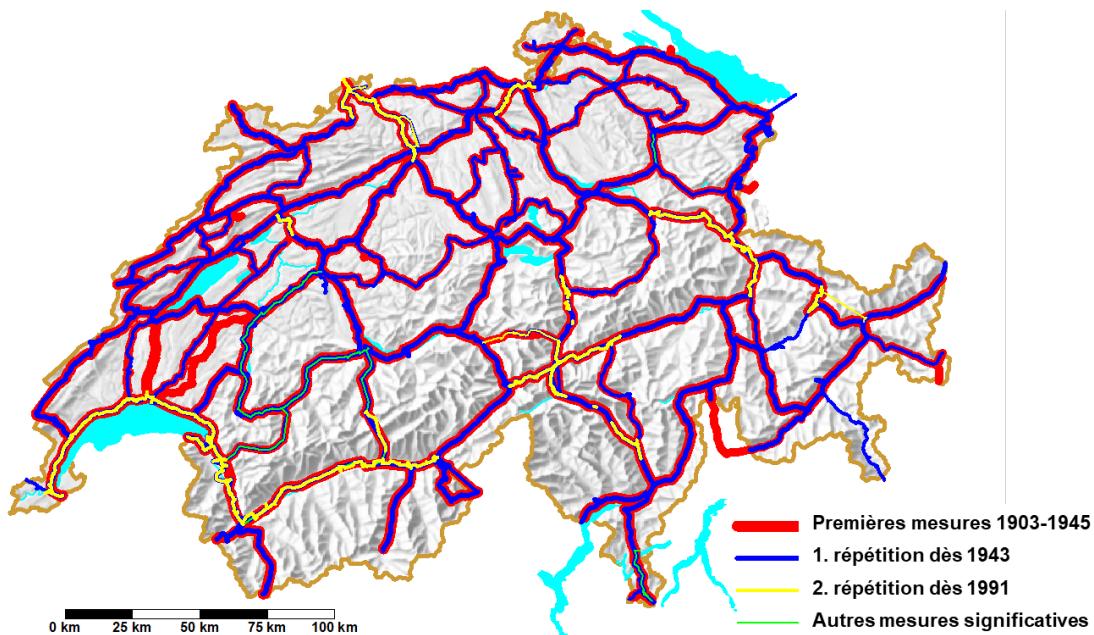


Figure 3-4 : les mesures de précision dans le nivelllement fédéral suisse entre 1903 et 2004.

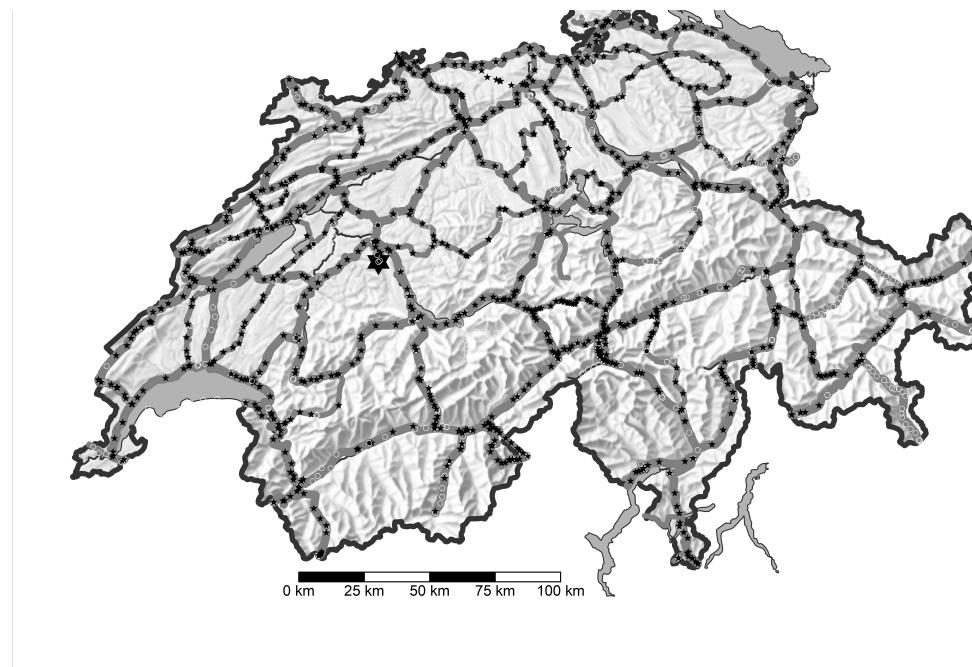


Figure 3-5 : vue d'ensemble des points principaux de la compensation cinématique (CHVRF04/RAN95) : grande étoile : Zimmerwald Z0 ; petite étoile : observation répétée ; cercles blancs : une seule observation.

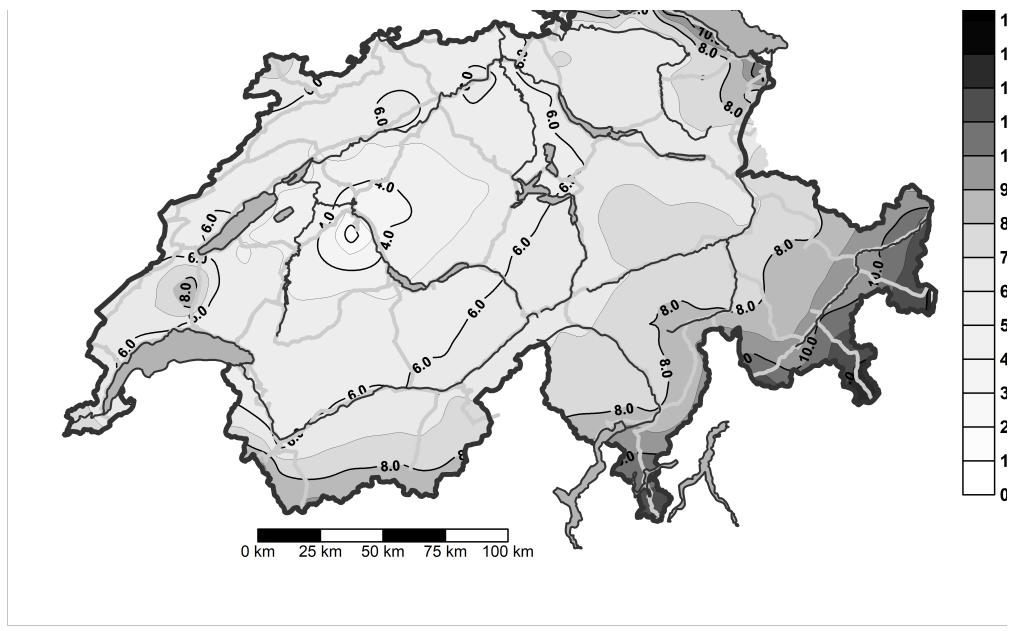


Figure 3-6 : écarts-types relatifs des cotes géopotentielles par rapport au point de référence de Zimmerwald [mgpu].

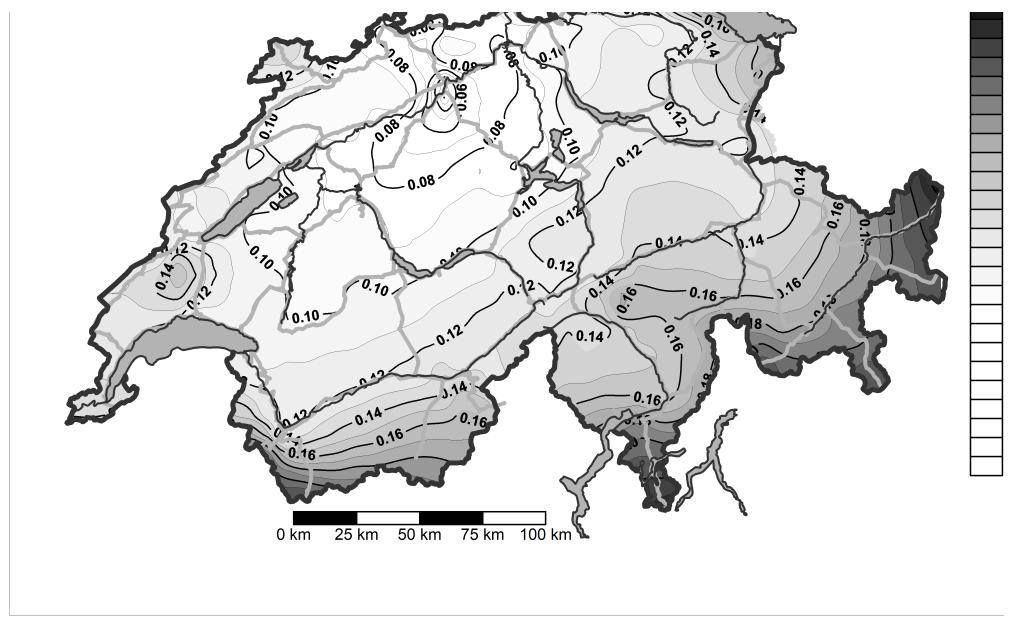


Figure 3-7 : écarts-types relatifs des modifications du potentiel par rapport au point de référence d'Aarburg [mgpu·a⁻¹].

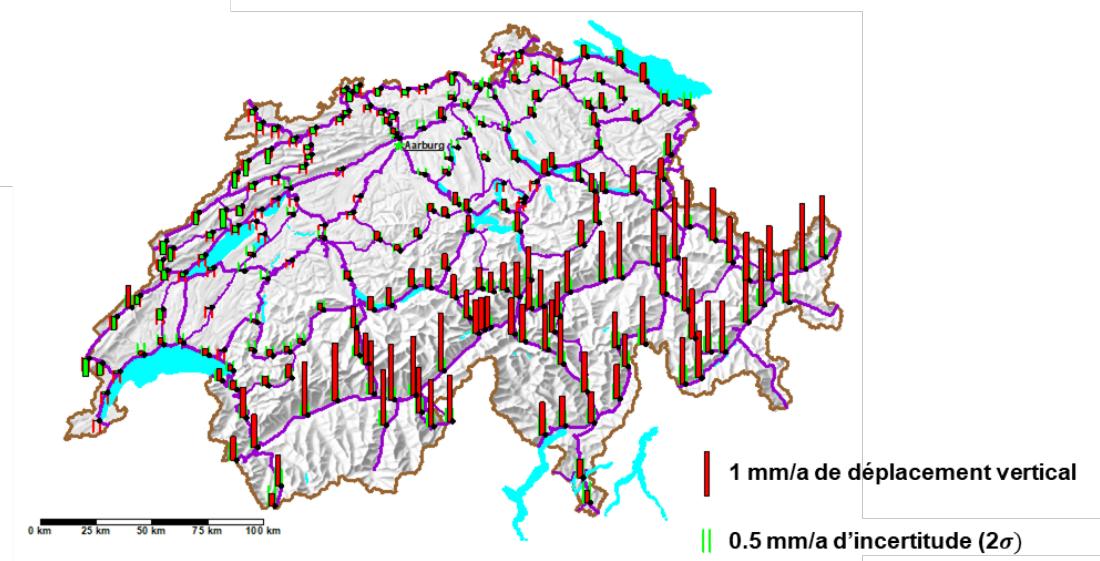


Figure 3-8 : mouvements verticaux récents de la croûte terrestre le long des lignes du RAN (état à fin 2004) ; modifications altimétriques positives (barres rouges) / négatives (barres vertes), par rapport à Aarburg [$\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$].

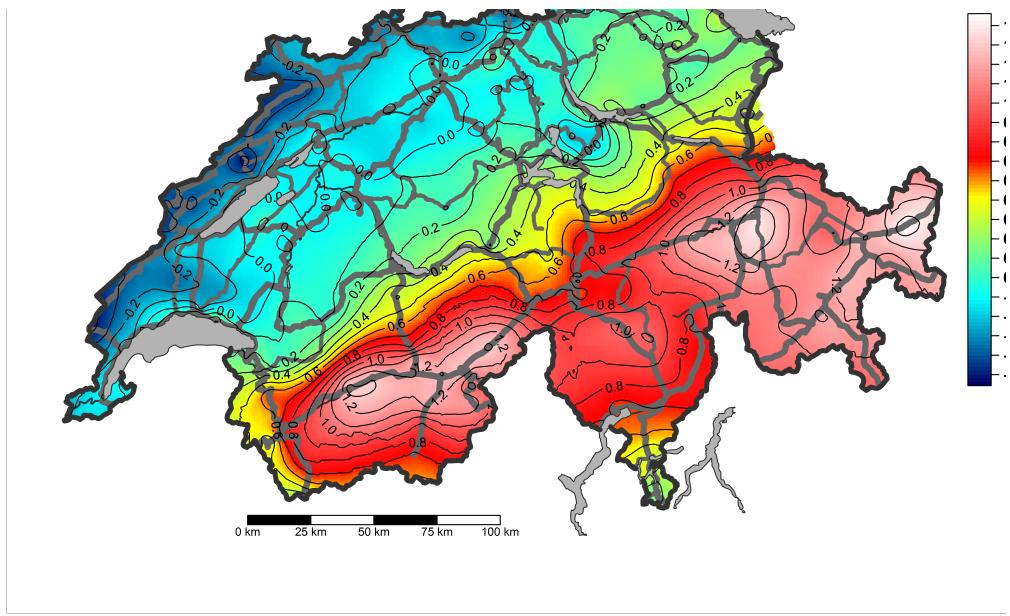


Figure 3-9 : le modèle CHKLM95 des mouvements verticaux en Suisse [$\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$].

La pesanteur moyenne le long de la ligne du fil à plomb est la seule grandeur (d'où son caractère décisif) pour passer de la cote géopotentielle à l'altitude orthométrique. Elle dépend des hypothèses prises en compte pour la répartition des masses et des densités à l'intérieur de la Terre. La détermination de ces influences demande par ailleurs une grande puissance de calcul. Ces deux raisons constituent toujours des entraves à l'introduction en pratique des altitudes orthométriques. En matière de modélisation du géoïde et du champ de pesanteur, des développements simplifiant grandement les étapes du calcul ont été entrepris à l'ETHZ et au sein de swisstopo dans le cadre de la détermination du géoïde. Contrairement à la pesanteur normale moyenne que l'on peut quasiment déterminer en théorie, la pesanteur moyenne le long de la ligne du fil à plomb est entachée d'une incertitude de mesure et conduit systématiquement à une réduction de la précision des altitudes orthométriques déduites des cotes géopotentielles. Des simulations ont permis de quantifier la fraction de l'erreur sur les altitudes orthométriques due à la pesanteur moyenne. Les valeurs, représentées sur la Figure 3-10 et liées à l'altitude, peuvent atteindre $\pm 2 \text{ cm}$.

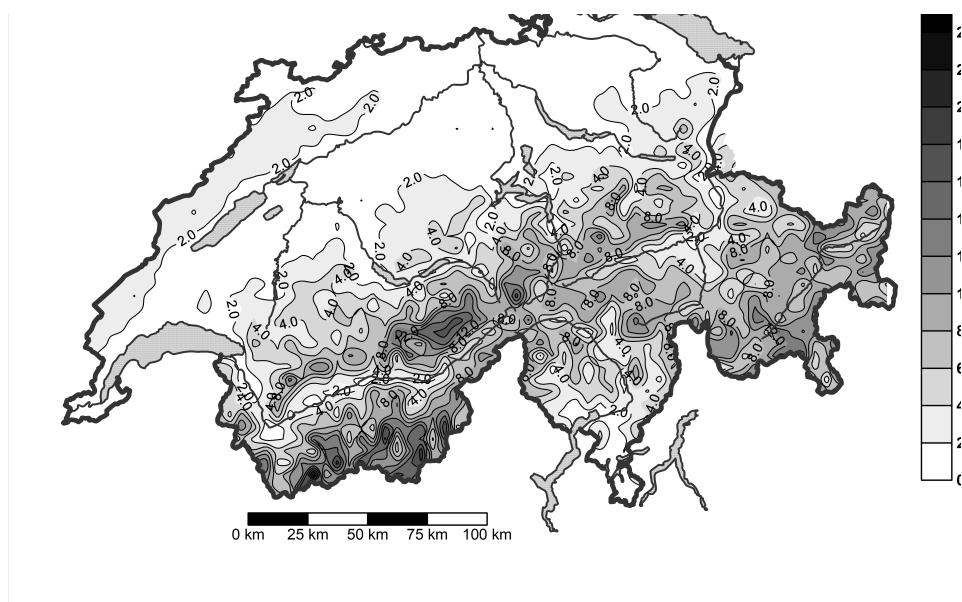


Figure 3-10 : fraction de l'erreur sur les altitudes orthométriques due à la pesanteur moyenne [mm].

Les altitudes orthométriques ont été calculées pour les points principaux et les points GNSS / de nivelllement. Le modèle du géoïde actuel de la Suisse CHGeo2004 a finalement été contraint sur les valeurs altimétriques des points GNSS / de nivelllement (en combinaison avec les altitudes ellipsoïdales issues de CHTRF2004) (Marti 2002).

3.4.4. Différences entre RAN95 et NF02

Les altitudes usuelles NF02 sont connues sur les points principaux de la compensation cinématique (cf. Figure 3-5), si bien que des comparaisons avec RAN95 ont pu être calculées. En outre, les écarts par rapport à d'autres types d'altitudes (altitudes normales ou dynamiques) peuvent aussi être simulés sur ces points.

La différence entre RAN95 et NF02 est présentée sur la Figure 3-11. Si l'on considère les altitudes RAN95 comme étant exemptes de toute erreur, l'écart résulte pour l'essentiel de trois causes principales :

1. L'influence des types d'altitudes différents : l'écart entre les altitudes orthométriques et les altitudes usuelles, qui sont des altitudes observées par nivelllement puis contraintes, s'exprime d'abord par un facteur d'échelle altimétrique d'environ 1 cm / 100 mètres de dénivellation, resp. 100 ppm.
2. Les changements altimétriques verticaux : ils n'ont jamais été prises en compte dans NF02 (cf. Figure 3-3) et entraînent des contraintes en conséquence, de l'ordre de 10 à 20 cm.
3. Les contraintes inhérentes aux bases de NF02 : elles résultent avant tout des incertitudes de mesure dont le nivelllement de précision est entaché et peuvent atteindre 10 à 20 cm.

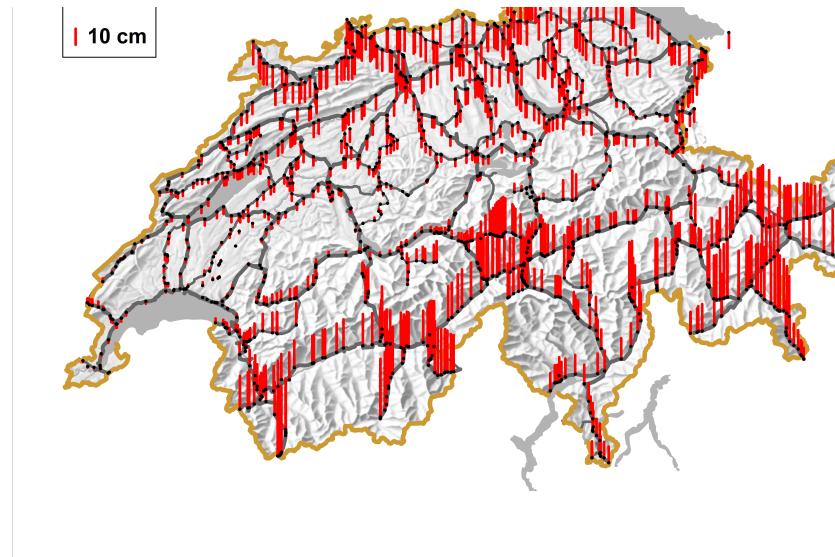


Figure 3-11 : les écarts entre les altitudes orthométriques RAN95 et les altitudes usuelles NF02.

La réalisation de *HTRANS*, le module de transformation permettant de calculer les écarts entre RAN95 et NF02, se base pour l'essentiel sur une séparation des différences, faisant intervenir les altitudes normales déduites des cotes géopotentielle :

$$H_{RAN95} - H_{NF02} = (H^* - H_{NF02}) + (H_{RAN95} - H^*) = f(y, x) + g(y, x, H) \quad (3.2)$$

Où H^* représente une altitude normale. Les figures suivantes (Figure 3-12 et Figure 3-13) illustrent les deux séparations. On reconnaît clairement le lien de dépendance envers l'altitude dans la différence entre les altitudes normales et orthométriques :

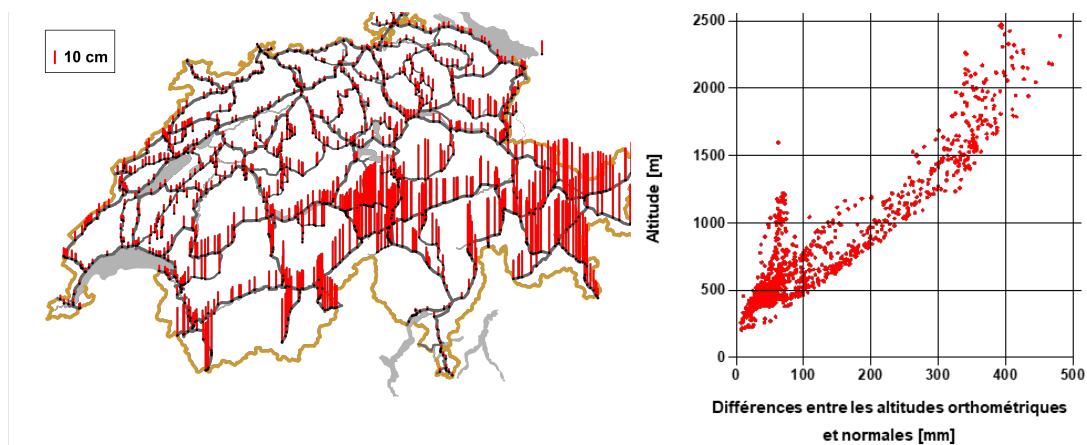


Figure 3-12 : différence entre les altitudes orthométriques et les altitudes normales RAN95 : à droite, le lien de dépendance entre les altitudes [m] et les différences [mm].

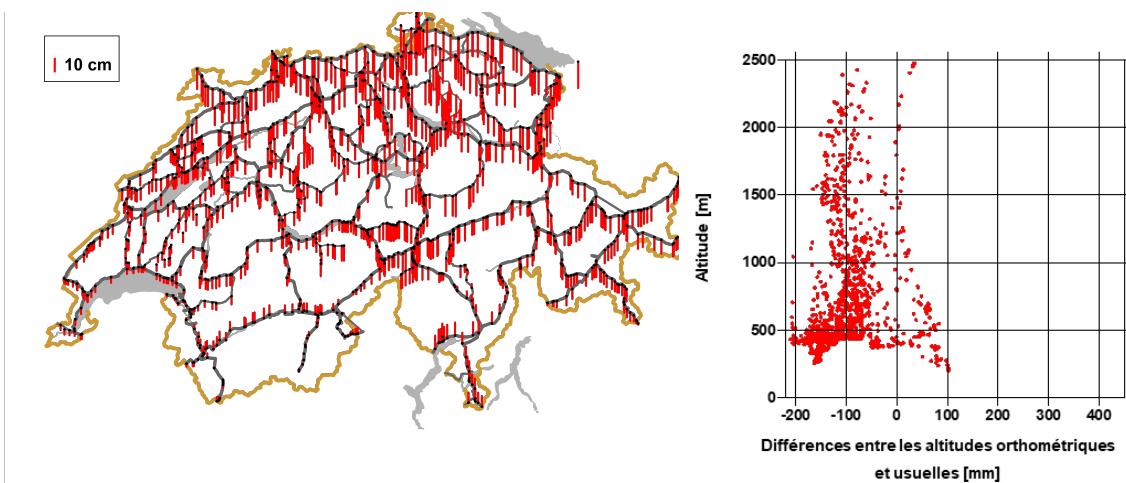


Figure 3-13 : différence entre les altitudes normales RAN95 et les altitudes usuelles NF02 : à droite, le lien de dépendance entre les altitudes [m] et les différences [mm].

Au final, la dépendance à l'altitude a pu être approché à l'aide des anomalies de Bouguer locales, les résidus restants sur les points d'appui étant interpolés sur la base d'une surface restante dépendant de la position. La transformation complète prend alors la forme suivante :

$$H_{RAN95} = H_{NF02} + f_{Norm-NF02}(y, x) + f_{rest}(y, x) - \Delta g_{Boug}(y, x) \cdot H \quad (3.3)$$

Une précision millimétrique peut ainsi être atteinte sur les points d'appui. Le long des lignes de nivellation, on peut donc compter avec une très bonne précision d'interpolation. En dehors des lignes, il faut compter avec des écarts de l'ordre de 10 à 20 cm, principalement en raison de la provenance et de la précision inconnues des altitudes NF02 existantes.

3.4.5. État actuel et perspectives de RAN95

On décida en 2002 que la mensuration officielle ne passerait pas du cadre des altitudes usuelles NF02 à RAN95 (Wicki et al., 2002). Une consultation, menée auprès des principaux producteurs et utilisateurs de données à référence spatiale, a permis de dégager les raisons essentielles suivantes qui ont finalement motivé le refus :

- *le risque de confusion (entre RAN95 et NF02), et donc le risque de commettre des erreurs lourdes de conséquences, est très élevé, les différences entre NF02 et RAN95 n'étant guère perceptibles³,*
- *une grande partie des données altimétriques numériques n'est pas encore prête aujourd'hui pour la transformation, les coordonnées planimétriques qui leur sont associées faisant défaut,*
- *de nombreuses cotes altimétriques sont utilisées au sein de séries temporelles, un changement de cadre équivaudrait à un saut,*
- *les normes et les standards permettant d'introduire un système altimétrique européen restent fragiles et insuffisamment acceptés à l'heure actuelle, si bien que des adaptations ne peuvent pas être exclues,*
- *le débat et les préparatifs concernant la planimétrie (introduction de MN95) sont autrement plus avancés que pour l'altimétrie. Une association de l'altimétrie à la planimétrie pourrait porter préjudice à la mise en œuvre déjà décidée en planimétrie.*

Que RAN95 constitue un complément moderne au nouveau cadre de référence planimétrique MN95, à la fois tourné vers l'avenir et compatible avec le GNSS, personne ou presque n'en doute dans les milieux spécialisés. Le recours fructueux à RAN95 lors de la réalisation des tunnels d'AlpTransit, mais également

³ La distinction élégante établie entre les nouvelles coordonnées planimétriques (MN95) et les anciennes (MN03) grâce à l'introduction de nouvelles valeurs dites 'false northing' et 'false easting' n'est pas transposable aux altitudes, pour d'évidentes raisons pratiques.



son utilisation indirecte lors de la détermination des altitudes par GNSS via CHGeo2004 et *HTRANS* ont notamment prouvé l'intérêt de disposer d'un cadre altimétrique moderne aujourd'hui. Les points précédents, qui ne relèvent pas tous du domaine technique, pesèrent cependant d'un poids supérieur en 2002.

Toutefois, il est d'ores et déjà clair que certains de ces points fourniront encore matière à discussion lors du choix et de l'éventuelle introduction d'un nouveau système altimétrique pour la Suisse.

C'est à dessein qu'il a été renoncé jusqu'à présent à un calcul couvrant le pays entier en incluant tous les PFA1. La demande en altitudes calculées de façon rigoureuse n'a par ailleurs jamais été présente. Les nouvelles mesures de lignes dans le réseau altimétrique national ont été intégrées dans les compensations cinématiques, surtout pour actualiser les modifications des altitudes dans le temps. Les altitudes RAN95 peuvent aussi être actualisées en procédant de la sorte. Tant que le modèle du géoïde actuel n'est pas remplacé, il n'y a pas non plus de réel besoin en cette matière.

3.5. Différences avec les pays voisins

Il est toujours intéressant, pour un pays enclavé, donc dépourvu de toute façade maritime, de connaître les différences d'horizon avec les pays qui le bordent. Considérons donc en premier lieu les altitudes officielles (CH : NF02 ; état en 2021) (Figure 3-14). Les informations concernant les systèmes altimétriques des pays voisins sont tirées des paragraphes 6.3 à 6.6.

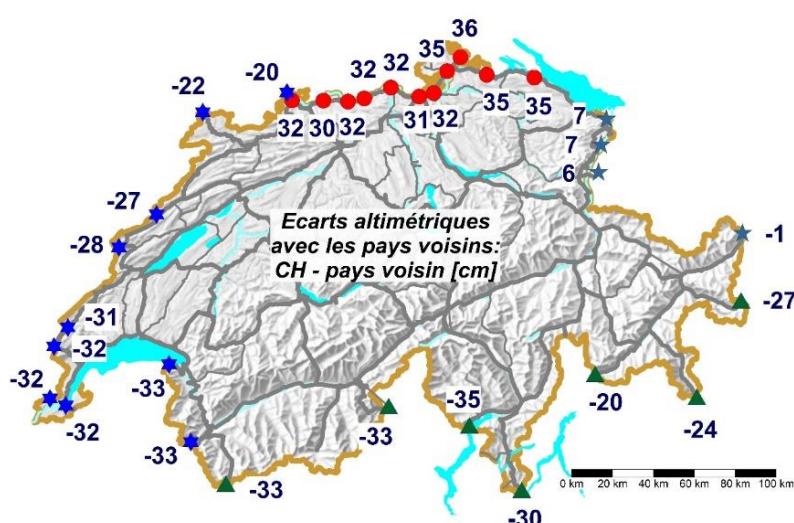


Figure 3-14 : différences (CH – pays voisin) entre les altitudes officielles de la Suisse et des pays voisins, en [cm].

Les écarts par rapport à l'Allemagne oscillent entre 30 et 36 cm, ceux par rapport à l'Autriche entre -1 et 7 cm, ceux par rapport à l'Italie entre -20 et -35 cm et enfin ceux par rapport à la France entre -20 et -33 cm. Ici aussi, diverses influences s'exercent sur les écarts : des types d'altitudes différents, la qualité des altitudes NF02, mais également celle des altitudes des pays voisins. S'agissant des types d'altitudes différents, on peut aisément le mettre en évidence en convertissant les cotes géopotentielles issues de RAN95 en altitudes normales et en renouvelant la comparaison avec les pays voisins (Figure 3-15).

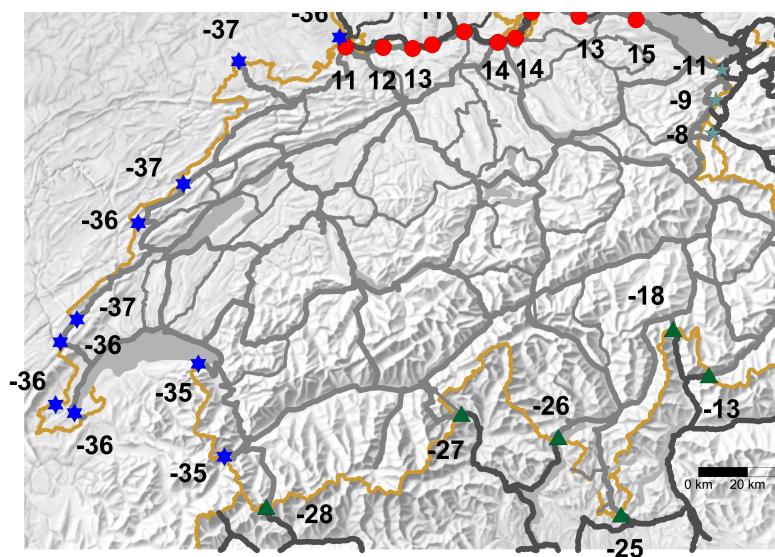


Figure 3-15 : différences (CH – pays voisin) entre les altitudes normales suisses (issues de RAN95) et les altitudes officielles des pays voisins, en [cm].

La fourchette des écarts entre la Suisse et la France se réduit considérablement, passant de 13 à 2 cm. Des altitudes normales (CH et F) sont désormais comparées entre elles. On remarquera cependant que l'écart entre la France et l'Allemagne à Bâle reste quasiment inchangé, à environ 50 cm.

Si les pays voisins ne procèdent à aucune adaptation, des différences d'horizon à la frontière nationale continueront à exister, même si la Suisse introduit un nouveau système altimétrique.



4. Le système de référence altimétrique international

Un système altimétrique suisse compatible avec le système de référence altimétrique international, serait non seulement une précieuse contribution à l'effort global, mais serait aussi un moyen efficace de profiter des avancés en matière de détermination globale du géoïde. De plus, l'échange international de données altimétriques s'en verrait grandement simplifié.

Ce chapitre introduit les bases théoriques les plus importantes avant de présenter les conventions sous-jacentes au cadre de référence altimétrique international.

4.1. Définition du système de référence altimétrique international

La définition du système de référence altimétrique international (IHRS pour International Height Reference System en anglais) a été adoptée par l'IAG en 2015 (International Association of Geodesy, 2015) :

- la surface de référence pour les altitudes est une surface équipotentielle du champ de pesanteur terrestre avec un potentiel $W_0 = 62\ 636\ 853.4\ m^2\ s^{-2}$, qui correspond au niveau moyen des mers en 2010
- les paramètres, les observations et les données sont dans le système des marées mean-tide
- l'unité de longueur est le mètre (SI), l'unité de temps est la seconde (SI)
- la coordonnée verticale du point P ayant un potentiel de pesanteur W_P est sa cote géopotentielle C_P :
$$C_P = W_0 - W_P \quad (4.1)$$
- la référence spatiale pour la position de P pour le calcul de son potentiel $W_P = W(\mathbf{x})$ est exprimée en coordonnées \mathbf{x} qui se réfèrent à l'ITRF.

4.2. Systèmes des marées (tidal systems)

La stratégie de réalisation de l'IHRS recommande un calcul du géoïde dans le système zero-tide puis une transformation des coordonnées de potentiel vers le système mean-tide en s'appuyant sur les conventions IERS (Sánchez et al., 2021).

Les coordonnées ITRF sont données dans un système tide-free basé sur la réponse élastique de la Terre. En gravimétrie terrestre et pour le nivelllement, le système tide-free est basé sur l'hypothèse d'une Terre à l'équilibre hydrostatique. La différence entre ces deux approches peut générer des différences allant jusqu'à 0.16 m, mais aucune recommandation n'est donnée pour gérer ce type d'erreurs. Les coordonnées sont à transformer dans le système mean-tide (équivalent à zero-tide dans ce cas) si nécessaire, suivant la convention fixée /hde et al. (2008).

4.3. Autres conventions et conventions liées au géoïde

Tant qu'aucun nouveau système de référence géodésique autre que GRS80 n'est publié par l'IAG, GRS80 est à utiliser.

Une correction de degré zéro est à utiliser pour corriger la valeur de GM afin qu'elle corresponde à la convention choisie pour W_0 (Sánchez et al., 2021, eqs. 6, 14 et 15).

Au minimum, les effets atmosphériques, topographiques et ellipsoïdaux sont à corriger lors de la détermination du géoïde (appelée résolution du « *geodetic boundary value problem* » (GBVP) dans les articles cités). Jusqu'à présent, les effets atmosphériques étaient traités de façon inhomogène au niveau international.



Si le GBVP est résolu en faisant appel à la théorie de Stokes (estimation du géoïde et non du quasi-géoïde), le calcul du potentiel W_P à la surface de la Terre doit être exécuté de façon à garantir la cohérence avec l'estimation du géoïde.

L'inventaire des standards et des conventions utilisés pour la génération des produits de l'IAG (*Angermann et al., 2020*) cite quelques standards supplémentaires en lien avec l'IHRF :

- la valeur de la constante gravitationnelle G
- la valeur de GM , la constante gravitationnelle géocentrique
- la vitesse de rotation angulaire moyenne de la Terre
- la densité moyenne de la topographie
- comment tenir compte des différences de standard (p.ex. dans la valeur GM) entre les modèles du géoïde globaux et l'IHRS, respectivement comment corriger ces termes ?



5. Le système de référence vertical européen

5.1. Rappel historique

Les premiers efforts visant à définir un système altimétrique européen remontent à la fondation de l'Association internationale de géodésie (AIG/IAG). Lors de sa première réunion qui eut lieu en 1864, il fut décidé de relier les différents marégraphes entre eux par voie de nivellation et de définir un point de datum européen. Des nivelllements furent alors entrepris dans de nombreux pays et une compensation globale fut présentée en 1889, forte de 48 boucles et de 42 rattachements à des marégraphes. La correction normale orthométrique fut apportée⁴. La précision obtenue s'élevait à environ 4-5 mm/km, ce que Helmert considérait comme totalement insuffisant. Il fut impossible de s'accorder sur un point de datum commun.

5.2. Les premiers cadres (UELN-55 et UELN-73/86)

Les activités internationales concernant une compensation européenne globale des mesures des nivelllements de précision nationaux afin de déterminer des altitudes unifiées au niveau européen reprirent peu après la fin de la Seconde Guerre mondiale. C'est sous le nom d'UELN (United European Levelling Network) ou de REUN (Réseau européen unifié de nivellation) que l'on commença à regrouper des mesures de nivellation et des mesures gravimétriques en Europe à partir de 1955, sur décision de l'IUGG/UGGI. Deux objectifs principaux furent alors définis (Remmer, 1986) :

- définir et réaliser un datum altimétrique européen commun,
- comparer le niveau moyen de la mer en différents marégraphes le long des côtes européennes.

On décida que seul un réseau à mailles très lâches devait être compensé et que le calcul devait se fonder sur des cotes géopotentielles. La Scandinavie devait en outre faire l'objet d'un traitement particulier en raison des mouvements verticaux que l'on y enregistrait. Une première solution pour l'Europe de l'Ouest fut présentée en 1963 sous le nom d'UELN-55 et le projet fut provisoirement clôturé. Des travaux similaires eurent lieu simultanément en Europe de l'Est, sous le nom d'« Uniform Precise Levelling Network of Central and Eastern Europe » (UPLN) ou « Einheitliches Präzisionsnivellementsnetz » (EPNN).

C'est lors de la 15^{ème} assemblée générale de l'IUGG qui se tint à Moscou, en 1972, que l'on décida d'établir un nouveau REUN. La sous-commission ad hoc de l'IAG s'étant réunie pour la toute première fois en 1973, on décida de baptiser le nouveau réseau UELN-73. L'objectif était largement identique à celui poursuivi en 1955, à cela près qu'il fallait utiliser les données de nivellation les plus récentes à disposition pour les différents pays participants. Des centres de données furent mis en place à Munich et à Delft.

La compensation définitive fut présentée en 1986 sous le nom d'UELN-73/86 (Ehrnsperger & Kok, 1986) puisqu'elle venait clôturer les travaux relatifs à UELN-73. 14 pays en tout y avaient pris part, avec des données couvrant 91 750 km de nivellation de précision pour relier 774 points au total. La contribution de la Suisse se limita à 1315 km de mesures entre 13 points seulement. Les pays étaient invités à fournir leurs mesures sous la forme de différences de potentiel mesurées entre les points. Les principaux résultats de la compensation statique libre (référence : marégraphe d'Amsterdam – NAP : Normaal Amsterdams Peil) étaient constitués par les nœuds géopotentiels compensés avec leurs erreurs moyennes associées.

Le problème des calculs statiques était déjà abordé dans *Ehrnsperger and Kok (1986)* et dans *Remmer (1986)*. Le rebond postglaciaire fennoscandien était déjà connu, mais seule la Suisse était en mesure de fournir des données relatives aux soulèvements récents des points. Heureusement, les rattachements aux frontières avaient été mesurés à la même époque par les différents pays, les mesures en Suisse ayant été

⁴ Les altitudes normales orthométriques sont des altitudes particulières basées sur la pesanteur normale. Ce type d'altitude présente un intérêt essentiellement historique.



réalisées entre 1943 et 1976. Il s'est révélé par la suite que le rattachement à l'Italie à Chiasso était très instable localement.

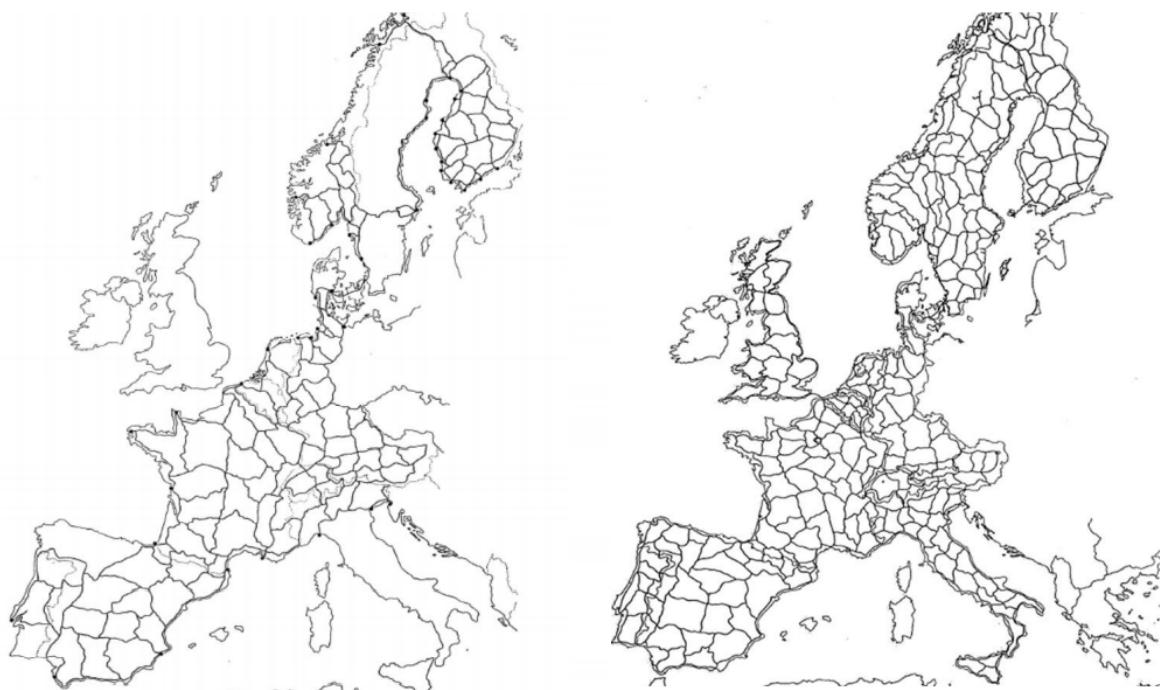


Figure 5-1 : réseaux UELN-55 et UELN-73.

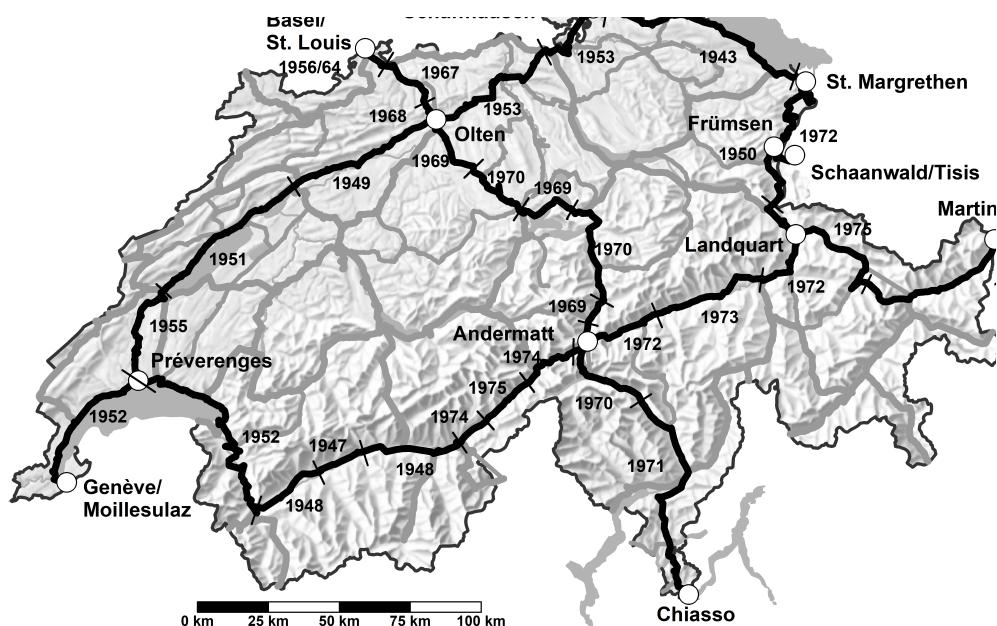


Figure 5-2 : les mesures (lignes noires) de la contribution suisse à UELN-73/86 et à UELN-95/98.



5.3. UELN 95/98, EVRS2000

C'est après une interruption de près de 10 ans que les travaux relatifs au REUN furent repris en 1994 par la sous-commission de l'IAG pour les réseaux continentaux en Europe (EUREF). Le CERCO (Comité européen des responsables de la cartographie officielle) avait en effet adressé une demande pressante au groupe de travail technique (Technical Working Group, TWG) d'EUREF pour la réalisation d'un système altimétrique européen d'une précision de 0.1 m. Les travaux furent lancés sous la dénomination d'UELN-95. La nouvelle compensation se caractérisait principalement par l'extension du jeu de données initial, complété par des mesures issues d'Europe centrale et orientale (République tchèque, Hongrie, Slovénie, Pologne, Slovaquie, Bosnie, Croatie, Monténégro, Voïvodine). Certains pays livrèrent par ailleurs de nouveaux jeux de données (Allemagne, Autriche, Pays-Bas, Danemark). Le jeu de données suisse fut conservé, bien que des mesures plus récentes aient été disponibles sur certains tronçons. Les données étaient centralisées par l'office allemand de cartographie et de géodésie (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, BKG). Le développement d'un système altimétrique cinématique était en outre prévu (Ihde & Augath, 2003) sous le nom d'UELN-2000. Cela ne conduisit cependant qu'à une solution locale pour le nord de l'Allemagne, les Pays-Bas et le Danemark.

La solution fut présentée sous le nom d'UELN-95/98 lors du symposium EUREF de 1999. Les potentiels inconnus furent calculés en 3063 nœuds au total. Le positionnement de la compensation libre était identique à celui d'UELN-73/86 (NAP). A la différence des anciennes solutions, la pondération des contributions des différents pays provenait d'une estimation des composantes de la variance. Il en résulta un écart-type a posteriori de 1.10 mgpu/km (Ihde & Augath, 2003; Sacher et al., 1999). Dans la solution définitive, des altitudes normales furent présentées aux côtés des cotés géopotentielles. Les mesures fournies par la Suède, la Norvège et la Finlande furent réduites à l'époque 1960.0.

On modifia la terminologie après la publication d'UELN-95/98. Depuis lors, l'abréviation UELN (REUN) ne désigne plus que le réseau de mesure, la notion d'European Vertical Reference System 2000 (EVRS2000) ayant été introduite pour le système altimétrique. Le système zero-tide fut aussi ajouté à la définition pour la toute première fois. EVRF2000 fut ainsi le premier cadre de référence présenté. Il s'agissait pour l'essentiel d'une nouvelle compensation du jeu de données d'UELN95-98, ce dernier étant encore complété par les mesures réalisées dans les pays baltes et en Roumanie. Les mesures bulgares purent également être intégrées lors d'une reprise effectuée en 2003. Les mesures n'ayant pas encore été corrigées des influences des marées pour EVRF2000, il reste dans le système mean-tide (malgré la définition d'EVRS2000 comme système zero-tide).

5.4. EVRF2007

Different pays livrèrent encore de nouvelles mesures après la publication d'EVRF2000. La Suisse en fit partie en 2002, en transmettant un jeu de données étendu et plus actuel au centre de calcul du BKG allemand. Ce jeu de données comprenait alors la quasi-totalité des mesures les plus récentes des lignes du nivelllement fédéral et il fut veillé à ce que tous les points GNSS / de nivelllement suisses fassent partie du jeu de données. Le fait que le nœud de Chiasso soit instable (tassemement d'environ 4 mm/an) compliqua toutefois l'intégration de ces données. Pour pouvoir introduire les mesures les plus récentes, il fallut ouvrir le nœud de Chiasso pour les calculs, supprimant de ce fait la seule liaison UELN officielle entre la Suisse et l'Italie. Le nœud de Bâle - Saint-Louis fut lui aussi ouvert pour la solution définitive d'EVRF2007, de sorte que la liaison vers la France se limitait au seul nœud de Moillesulaz. Comparé à celui d'autres pays, le jeu de données de la Suisse est plutôt riche. Cela permet une transformation assez fiable entre les cadres de référence européen et national.

La solution définitive d'EVRF2007 englobait les données provenant de 27 pays. 7939 nœuds et 10 347 lignes furent traités. En revanche, le positionnement de la solution ne reposait plus sur le seul marégraphe d'Amsterdam, puisque 13 points de datum avaient été introduits. La compensation resta cependant libre. La solution définitive fut simplement translatée de façon qu'il n'y ait pas de différence, en moyenne, sur les points de datum par rapport à la solution EVRF2000. La Suisse renonça volontairement à un point de datum propre en raison des mouvements verticaux existants. Un nouveau modèle fut par ailleurs introduit dans EVRF2007 pour le rebond postglaciaire (NKG2005LU), lequel couvrait à présent le Danemark, les



pays baltes et certaines parties de l'Allemagne et de la Pologne en plus de la Scandinavie. Les mesures dans ces pays furent réduites à l'époque 2000.0. Les corrections des marées furent apportées, si bien qu'EVRF2007 put aussi être calculé de manière rigoureuse dans le système zero-tide. Un problème subsistait encore, à savoir le fait que l'écart entre les systèmes zero-tide et mean-tide s'élevait à 8.4 cm à Amsterdam. Pour assurer la compatibilité avec EVRF2000, cet écart fut pris en compte dans la solution définitive EVRF2007.

Après la publication d'EVRF2007, EUREF mit également des paramètres de transformation vers les systèmes altimétriques nationaux à disposition pour la toute première fois. En plus d'un décalage général, ces paramètres comprenaient également deux basculements, ce qui constitue naturellement une approximation très sommaire dans certains pays (la Suisse par exemple).

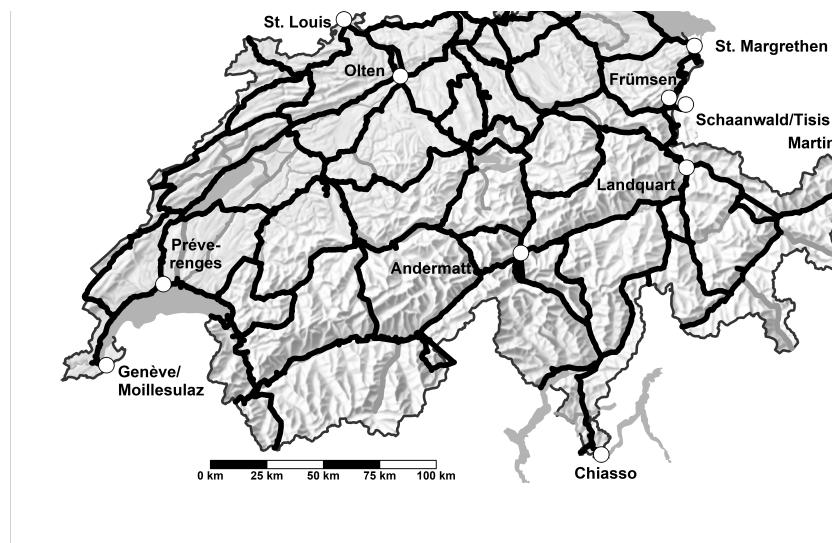


Figure 5-3 : jeu de données étendu et actualisé de la Suisse en 2002 (avec les anciens nœuds UELN/REUN). Contribution pour EVRF2007.

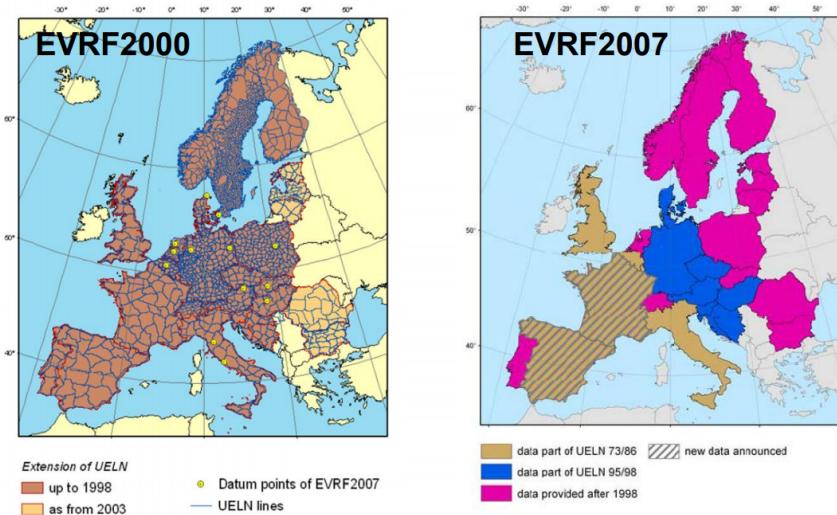


Figure 5-4 : vue d'ensemble des jeux de données pour EVRF2000 et EVRF2007 (Sacher et al., 2008).

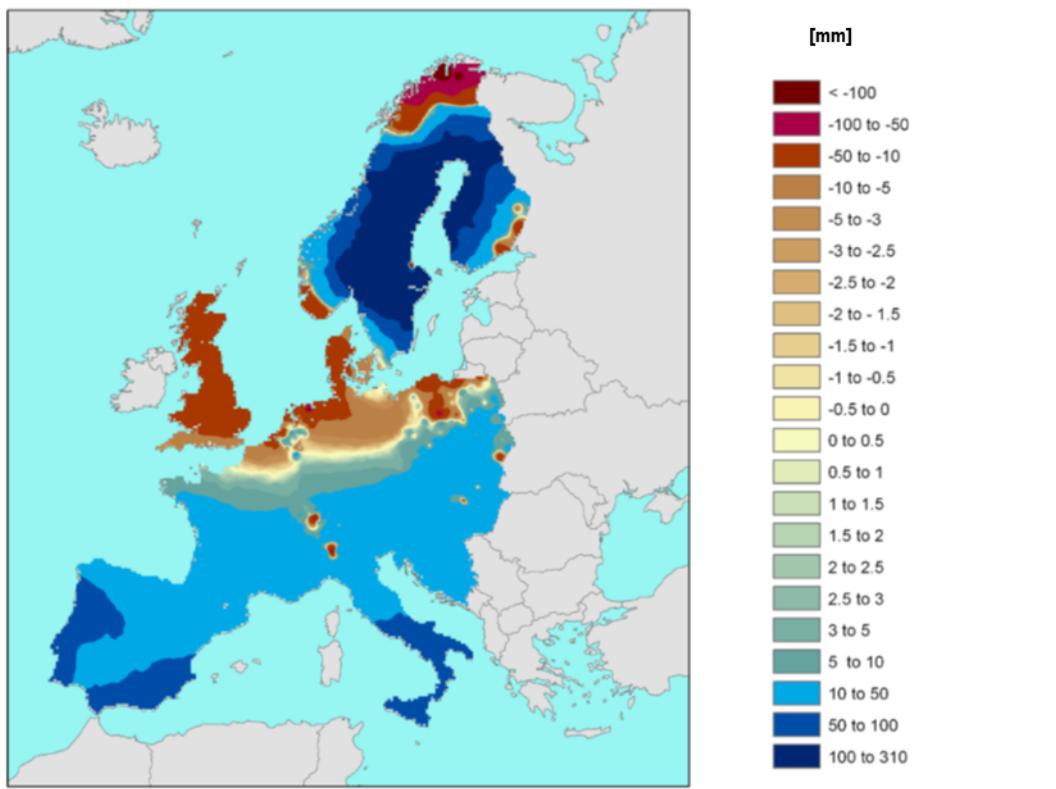


Figure 5-5 : différences entre EVRF2000 et EVRF2007 en mm (Sacher et al., 2008).

5.5. EVRF2019

Certains pays (Lettonie, Espagne, Allemagne, Estonie, Belgique, République tchèque, Slovénie, Bulgarie) livrèrent des mises à jour de leurs données après la publication d'EVRF2007. C'est la Russie qui apporta la nouvelle contribution la plus importante en transmettant la partie européenne de ses données de niveling en 2012. L'anneau baltique put ainsi être fermé et la Scandinavie put être mieux intégrée dans le réseau. De nouveaux pays annoncèrent par ailleurs leur participation, ce fut le cas de la Biélorussie en 2017, de l'Ukraine en 2018 et de la Macédoine du Nord en 2019. S'agissant de la France, les données du NIREF 2015 purent être intégrées, ce qui permit également d'améliorer le rattachement de l'Angleterre (niveling via l'Eurotunnel ; uniquement niveling hydrostatique auparavant). Le nouveau jeu de données italien était particulièrement important pour la Suisse. Il permettait d'intégrer 7 nouvelles liaisons à la frontière. En 2015 et en 2018, la Suisse livra une mise à jour de ses données avec les mesures les plus récentes, ce qui renforça notamment la liaison avec l'Italie.

Le concept des points de datum fut à nouveau utilisé pour positionner EVRF2019. On n'utilisa toutefois plus aucun point situé dans une zone de soulèvement ou dans une partie du réseau à la détermination peu sûre. Il en résulta un total de 12 points de datum répartis dans 12 pays.

En Europe du Nord, le nouveau modèle NKG2016LU fut utilisé pour les mouvements verticaux et les observations furent réduites à l'époque 2000.0. Un modèle des mouvements verticaux était aussi utilisé pour la toute première fois pour la Suisse. Il s'agissait des valeurs qui avaient été calculées (ou interpolées) à partir de la compensation cinématique pour RAN95. L'utilisation de ce modèle permit de réduire significativement l'erreur moyenne par kilomètre pour les données suisses de 1.09 à 0.86 mm.

Zero-tide fut utilisé pour le calcul en tant que modèle des marées. Les valeurs pour le système mean-tide figurèrent cependant elles aussi dans les altitudes publiées. Ces valeurs furent néanmoins décalées de telle façon qu'elles soient identiques dans les deux systèmes à la latitude d'Amsterdam.



Les résultats finaux furent transmis aux pays participants en novembre 2019. Une mise à jour suivit encore en août 2020, laquelle élimina notamment un léger basculement des données en Pologne.

Les différences par rapport à EVRF2007 oscillent entre -44 et +15 cm, ce qui reste relativement important. La faute en incombe principalement à l'intégration des données NIREF françaises, entraînant des modifications d'une certaine ampleur en Europe de l'Ouest. Les données de la Grande-Bretagne furent recalculées, ce qui y conduisit à un basculement plus marqué que dans les solutions antérieures. Les différences positives les plus fortes, observées en Italie, étaient imputables aux nouvelles données italiennes.

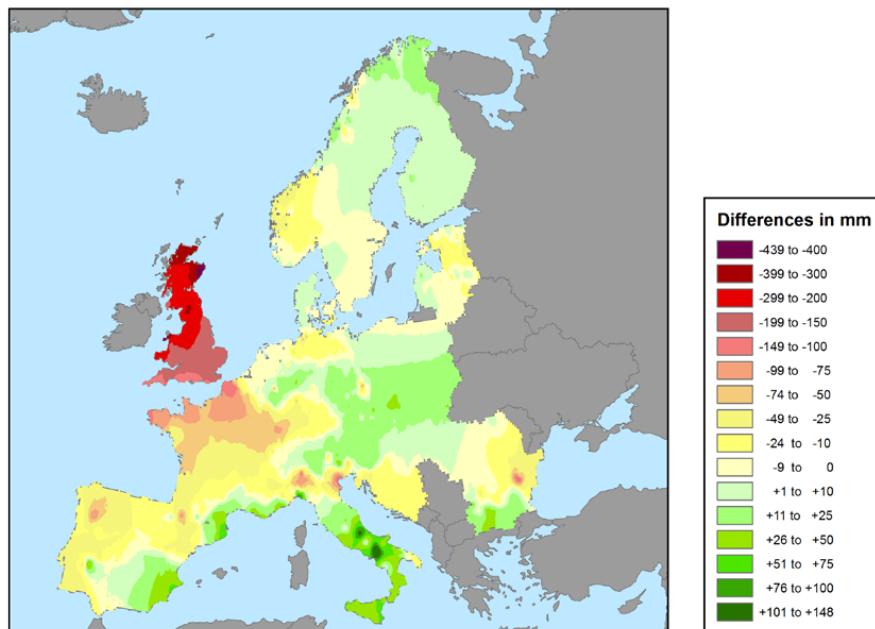


Figure 5-6 : différences EVRF2019 – EVRF2007 (Sacher & Liebsch, 2019).

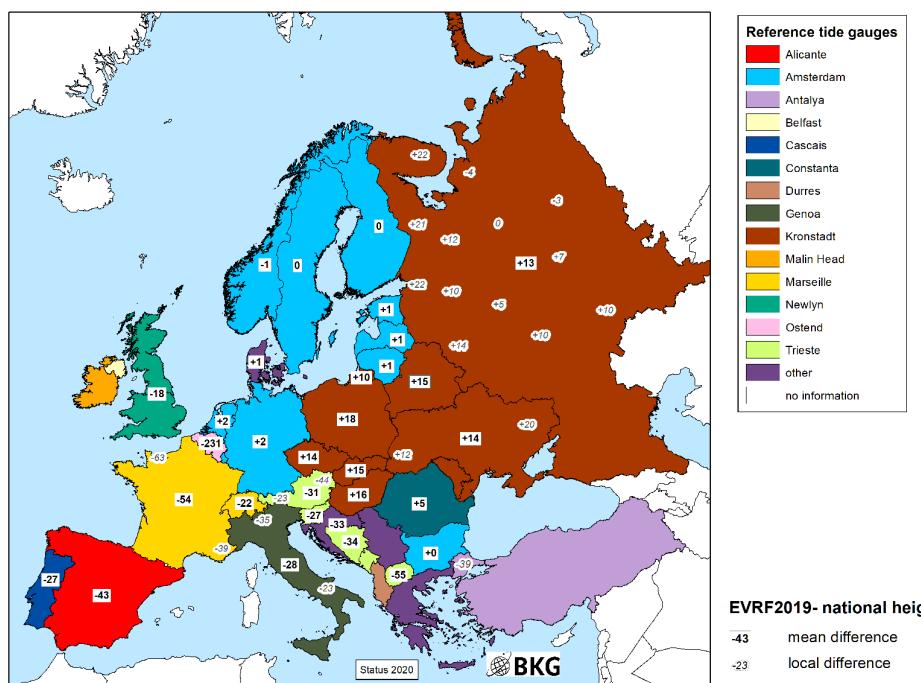


Figure 5-7 : décalages moyens des systèmes altimétriques nationaux par rapport à EVRF2019⁵.

⁵ Source : <https://evrs.bkg.bund.de/Subsites/EVRS/EN/EVRF2019/evrf2019.html>, visité le 10.11.2022



5.6. EUVN/EUVN-DA

EUREF lança le projet EUVN (European Vertical Reference Network) en 1995 afin d'unifier les différentes données altimétriques nationales avec une précision centimétrique, notamment dans des pays dépourvus de tout rattachement au REUN (Ihde et al., 2002). Le cœur de l'activité d'EUVN consistait à déterminer des coordonnées tridimensionnelles en ETRS89 via GPS en 196 stations réparties dans l'Europe entière. Ce travail permit de comparer les altitudes du REUN, référencées au champ de pesanteur, à des altitudes GPS. 63 stations marégraphiques situées le long des côtes européennes en faisait également partie. Relier ces stations EUVN via niveling aux noeuds du REUN les plus proches constituait un autre objectif. Les stations purent ainsi être considérées comme de véritables points de GPS-nivellement dans le réseau UELN-95 et contribuer ce faisant à une nouvelle détermination du géoïde à l'échelle européenne. Et pour densifier encore un peu plus ces données, EUREF lança le projet EUVN-DA (EUVN Densification Action) en 2003. Le jeu de données EUVN ne devait pas être densifié via une campagne GPS spéciale, mais uniquement en se servant de mesures déjà disponibles dans les pays concernés. Plus de 1400 stations réparties dans 25 pays furent ainsi réunies jusqu'en 2009 et purent être utilisées pour contrôler des modèles du géoïde européens et globaux.

La Suisse participa au projet avec 8 stations EUVN et 12 autres stations EUVN-DA.

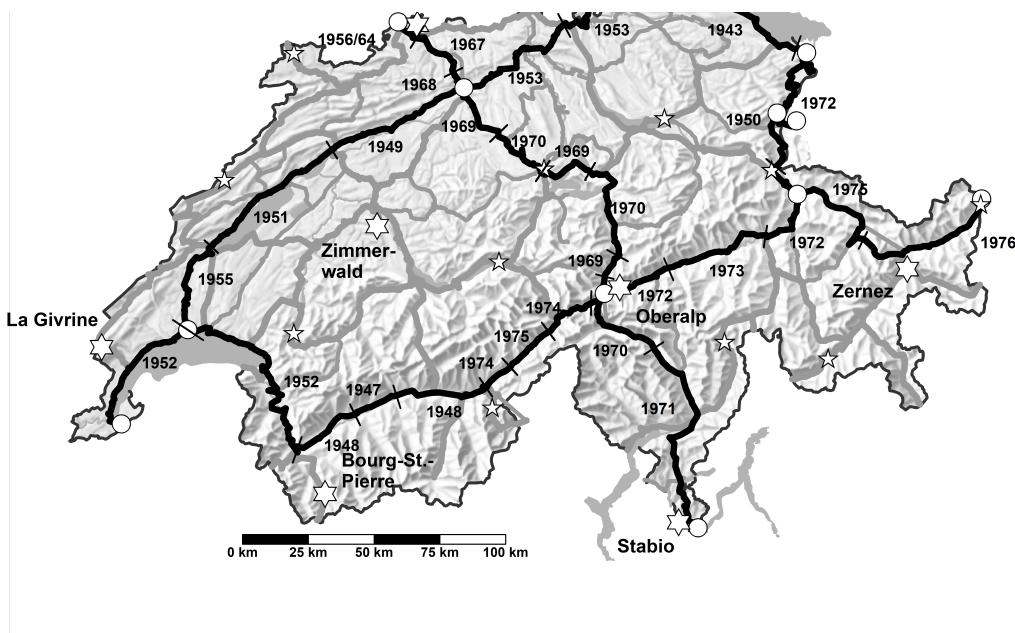


Figure 5-8 : liaisons UELN-73/95 et contribution suisse aux points EUVN (grandes étoiles) et EUVN-DA (petites étoiles).

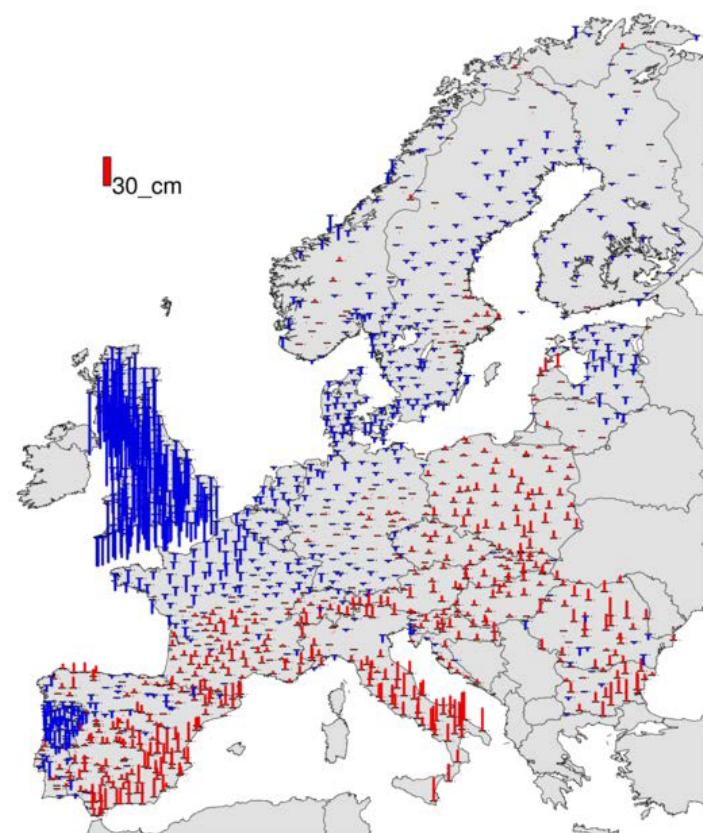


Figure 5-9 : points EUVN-DA et comparaison avec le quasi-géoïde européen EGG2008.

5.7. Les modèles du géoïde européens

Différents modèles du géoïde européens ont été calculés au cours de ces dernières années. Ils sont connus sous le nom d'EGGxxxx où EGG signifie European Gravimetric Geoid, xxxx étant l'année de publication. Ces modèles ont tous été calculés à l'Université de Hanovre (par H. Denker, Institut für Erdmessung, IfE). Il s'agit de solutions purement gravimétriques complétées par des données satellitaires (surtout GRACE) depuis qu'elles sont disponibles. Officiellement, le GPS-nivellement n'étaient utilisé qu'aux fins de vérification, sauf pour certaines versions d'essai. La transformation de Fourier rapide (Fast Fourier Transformation, FFT) était employée comme méthode de détermination du géoïde.

C'est le jeu de données gravimétrique alors disponible au sein du BGI (Bureau gravimétrique international) que l'on utilisa pour la Suisse dans les premières versions. Il s'agissait notamment des données utilisées pour la carte gravimétrique de 1980, complétées par quelques projets locaux plus anciens. A partir de 2004, l'IfE put disposer du jeu de données pour l'atlas gravimétrique au 1:100 000 et le MNT25 put également être utilisé comme modèle de terrain. En règle générale, les modèles EGG constituent un quasi-géoïde. Des modèles du géoïde ont parfois pu en être déduits à l'aide d'une méthode simple fondée sur les anomalies gravimétriques. Les modèles publiés à ce jour sont EGG1996, EGG1997, EGG2007, EGG2008 et EGG2015. Les modèles les plus anciens ont été publiés avec une résolution de 1x1.5 minutes d'arc, la résolution étant de 1x1 minute d'arc pour les modèles les plus récents.

EVRF2007 a été utilisé comme cadre altimétrique dans les calculs les plus récents. Toutefois, les modèles EGG étant purement gravimétriques, la transformation en EVRF2007 n'est possible que de façon approchée. Une surface de transformation compatible de manière rigoureuse avec ETRF2007 (ou aussi ETRF2019) n'existe pas encore. Cela supposerait de calculer un modèle du géoïde utilisant également les mesures de GNSS-nivellement. C'est l'un des prochains objectifs d'EUREF. Pour l'atteindre, il faudrait commencer par actualiser le jeu de données européen de GNSS-nivellement, sachant que toutes les altitudes (GNSS et nivellement) devraient avoir changé depuis la publication d'EUVN-DA (2009).

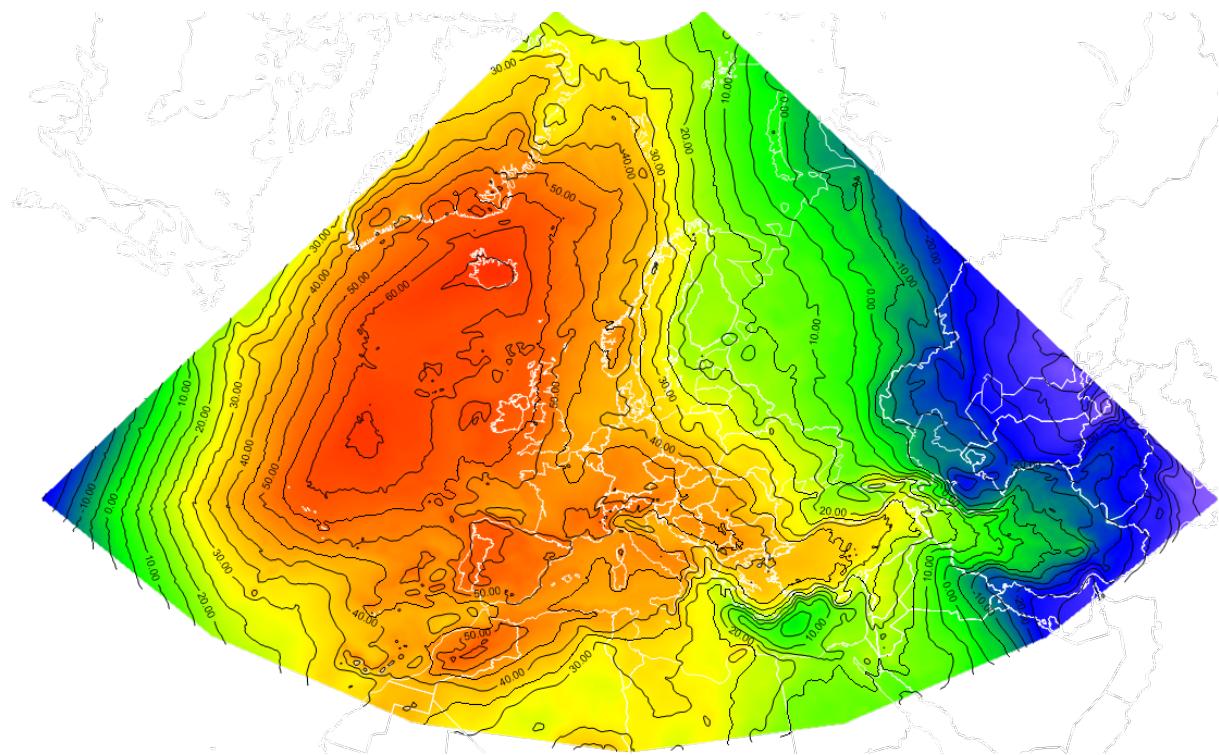


Figure 5-10 : le modèle du géoïde européen EGG2015 (équidistance des isolignes : 5 m).

En zoomant sur l'espace alpin dans EGG2015, on observe très bien la résolution spatiale élevée et la richesse de détails du modèle.

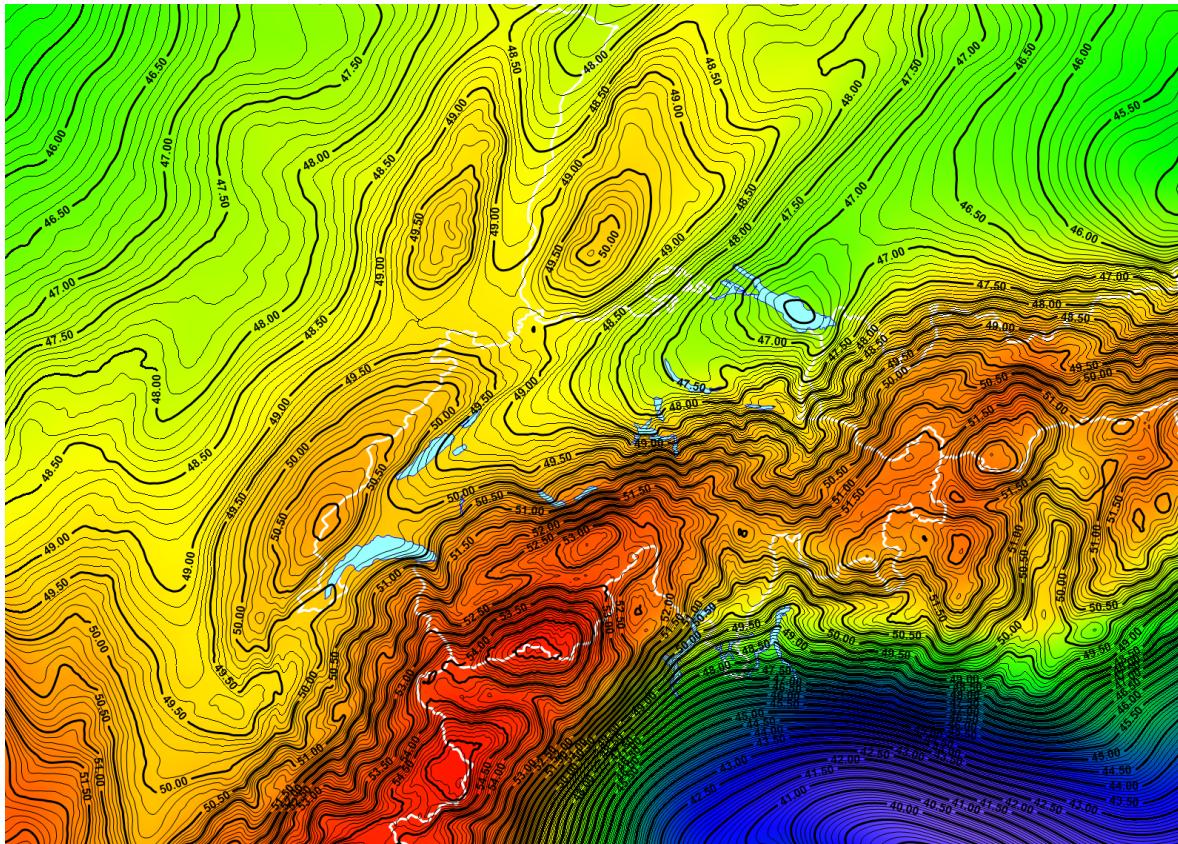


Figure 5-11 : quasi-géoïde EGG2015 dans l'espace alpin.





6. Les systèmes de référence altimétrique nationaux

Ce chapitre se base principalement sur les sources suivantes :

- Blueprint for 2022, Part 1: Geometric Coordinates (National Geodetic Survey, 2017a)
- Blueprint for 2022, Part 2: Geopotential Coordinates (National Geodetic Survey, 2017b)
- Blueprint for 2022, Part 3: Working in the Modernized NSRS (National Geodetic Survey, 2019)

6.1. États-Unis

Le nouveau datum américain, le « North American and Pacific Geopotential Datum 2022 » (NAPGD2022), qui devrait être déployé en 2022, comprend quatre produits :

- un modèle global du champ de pesanteur GM2022
- des grilles régionales des ondulations du géoïde GEOID2022
- des grilles régionales des déviations de la verticale DEFLEC2022
- des grilles régionales de la pesanteur à la surface GRAV2022

La dissémination des altitudes se fait à travers des altitudes ellipsoïdales et en utilisant le modèle GEOID2022. L'accès primaire au cadre de référence altimétrique se fera donc par GNSS. Le niveling reste la technique de choix pour le transfert local à très grande précision d'altitudes, mais devra se rattacher à des altitudes orthométriques déterminées par GNSS.

6.1.1. Contexte

L'ancien datum altimétrique nord-américain (NAVD88) présente d'importantes défaillances. Les différences entre la surface formée par les altitudes H=0 en NAVD88 et un géoïde gravimétrique montrent des erreurs systématiques de l'ordre du mètre ainsi qu'une inclinaison sud-ouest nord-est (Figure 6-1). En Alaska, et à cause de l'extrapolation des mesures hors de lignes de niveling, les différences sont encore plus grandes. Les raisons pour ces différences sont :

- la non géocentricité du cadre de référence planimétrique américain
- les biais introduits par le niveling
- un biais systématique introduit par le choix du point de référence (marégraphe à St. Lawrence River).

En conséquence, un modèle du géoïde purement gravimétrique est insuffisant pour transformer des altitudes ellipsoïdales en altitudes NAVD88.

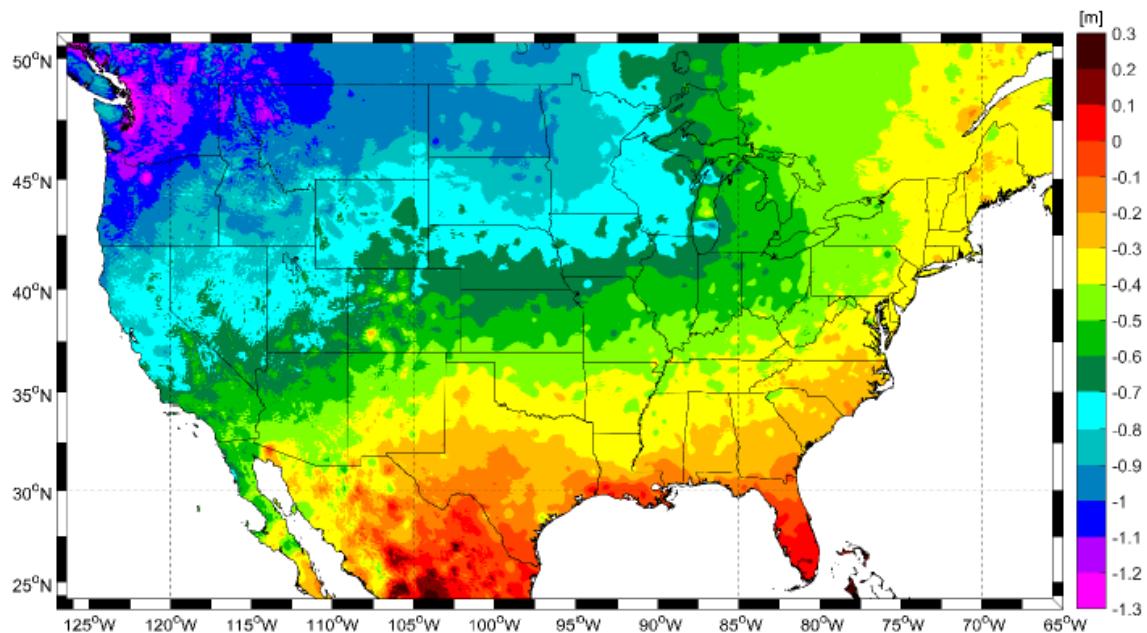


Figure 6-1 : différences entre la surface des altitudes H=0 en NAVD88 et un géoïde gravimétrique.

6.1.2. Renouvellement des altitudes

Le « National Geodetic Survey » (NGS) a estimé le coût de renouvellement du niveling entre 200 millions et 2 milliards de dollars. Le renouvellement du niveling n'aurait pas réglé les problèmes suivants :

- présence d'effets systématiques dans le niveling
- stabilité des points fixes altimétriques non assurée
- durabilité des points fixes non assurée (p. ex. par destruction des points)

Le NGS a donc décidé de changer radicalement d'approche pour passer à une détermination des altitudes par GNSS et avec un modèle du géoïde. Ce sont donc les stations GNSS permanentes et les modèles qui réalisent et matérialisent le cadre de référence altimétrique.

6.1.3. Aspects théoriques

Le Tableau 6-1 résume les caractéristiques du Datum géopotentiel nord-américain et Pacifique 2022. NAPGD2022 fournira, au minimum :

- les ondulations du géoïde pour tout $t, \lambda, \phi, h_{ell}$
- l'accélération de pesanteur pour tout $t, \lambda, \phi, h_{ell}$
- les cotes géopotentielles pour tout $t, \lambda, \phi, h_{ell}$
- les déviations de la verticale pour tout $t, \lambda, \phi, h_{ell}$

Avec $t, \lambda, \phi, h_{ell}$ qui sont le temps, la longitude, la latitude et l'altitude ellipsoïdale dans un cadre de référence global comme l'ITRF ou le cadre du service GNSS international (IGS).



Tableau 6-1 : caractéristiques du Datum géopotentiel nord-américain et Pacifique 2022.

Subject	Decision
Permanent Tide System	Tide Free (aka "Non-Tidal")
W_0 of GEOID2022	62,636,856.0 $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$
Epoch of SGEOD2022	TBD (possibly same epoch as the TRFs?)
Reference Frame	IGSxx ²²
Ellipsoid shape (a, f)	GRS-80
GM of normal Field ²³	398,600,500,000,000 $\text{m}^3 \text{s}^{-2}$
" a " of normal Field ²³	6,378,137 m
GM of true field ²³	TBD
" a " of true field ²³	TBD
Maximum degree of GM2022	TBD between 2190 and 10,800
Rotation rate of normal field (ω)	0.00007292115 rad s^{-1}
Rotation rate of full field	Identical to rotation rate of normal field
Grid Spacing of SGEOD2022	TBD (no larger than 1 arcminute)
Grid Spacing of SDEFLEC2022	TBD (no larger than 1 arcminute)
Product format for GRAV2022	TBD
Mean gravity on the plumbline computed from GRAV2022	TBD. But optimally, should account for topographic relief and, if feasible, variation in topographic density.
Product formats for DGEOID2022, DDEFLEC2022, and DNGRAV2022	TBD. If grids, they must be able to capture both secular changes and episodic changes.
Interpolation method of GEOID2022	TBD
Gravity Datum	TBD

Attention à la faute de frappe dans la troisième ligne depuis le bas (DNGRAV2022 au lieu de DGRAV2022).

6.1.4. Composants

Un **modèle global** du champ de pesanteur d'harmoniques sphériques sert de fondement au NAPGD2022. Il s'agit du modèle géopotentiel GM2022. Il comportera :

- une partie statique d'ordre et de degré 2160 (SGM2022)
- une partie cinématique représentant tant les effets séculaires qu'épisodiques (DGM2022).

Ce modèle global sera complété par des modèles de haute résolution en **grilles régionales** pour :

- les cotes du géoïde GEOID2022 avec
 - une partie statique SGEOD2022
 - une partie cinématique DGEOID2022
- les déviations de la verticale à la surface DEFLEC2022 avec
 - une partie statique SDEFLEC2022
 - une partie cinématique DDEFLEC2022
- la pesanteur à la surface GRAV2022 avec
 - une partie statique SGRAV2022
 - également une partie cinématique, en option (nommée probablement DGRAV2022). La faisabilité doit être évaluée.

Ces grilles régionales couvrent :

- les États-Unis continentaux, l'Alaska, Hawaï, les Caraïbes, le Canada, le Mexique, l'Amérique centrale et le Groenland
- les Samoa américaines
- les îles Mariannes.



6.1.5. Problématique de la montée du niveau des mers

Selon la définition du NGS (qui correspond à la définition usuelle), le géoïde est défini comme la surface équipotentielle s'approchant au mieux du niveau moyen de la mer. A cause de la montée du niveau des mers, cette surface sera amenée à changer, tout comme le potentiel de pesanteur W_0 au niveau du géoïde (Figure 6-2). La conséquence sera une diminution de toutes les altitudes orthométriques, à une vitesse d'environ 3.2 mm par an. Le NGS préconise un géoïde indépendant du niveau des mers mais avec l'option d'une adaptation de W_0 dans plusieurs années.

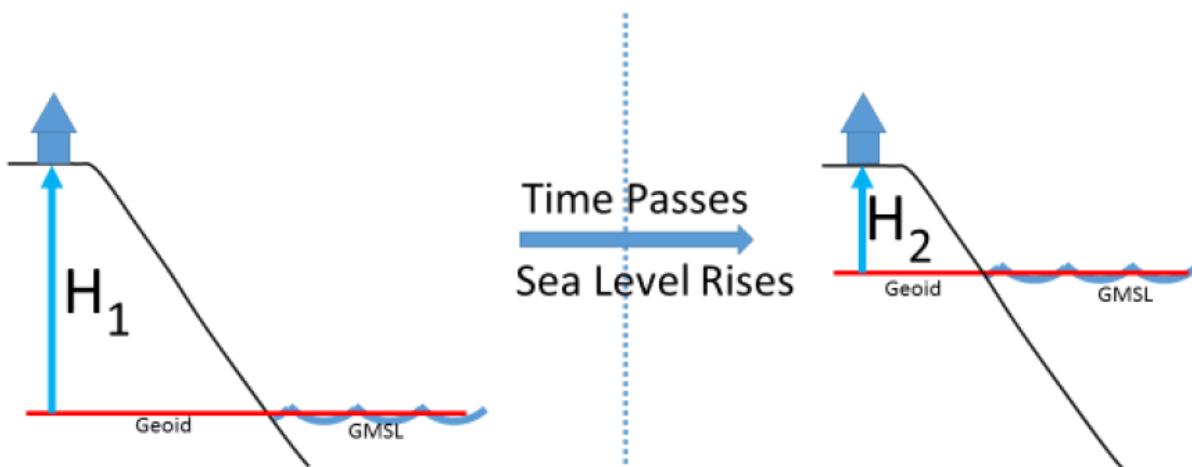


Figure 6-2 : diminution des altitudes avec la montée du niveau moyen de la mer (global mean sea level GMSL).

6.1.6. Données

Un aperçu des données utilisées pour le calcul du modèle global et des modèles en grilles est donné sur la Figure 6-3 et la Figure 6-4. Les sources principales sont la pesanteur à la surface, la pesanteur mesurée de façon aéroportée (issue du projet « Gravity for the Redefinition of the American Vertical Datum GRAV-D ») ainsi que des mesures satellitaires (gravité, altimétrie, modèle altimétrique).



Creation/interaction of various components of NAPGD2022
Step 1 of 2: Create Global 3-D GM2022 model

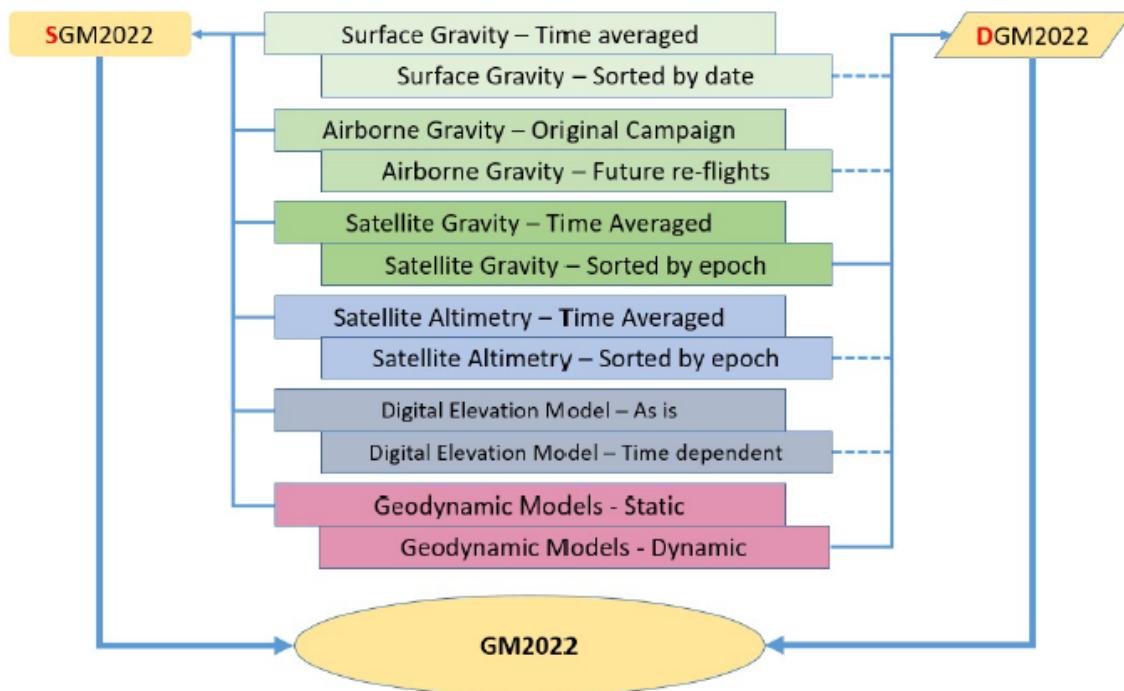


Figure 6-3 : sources de données servant à la réalisation du modèle global GM2022.

Creation/interaction of various components of NAPGD2022
Step 2 of 2: Create Regional High Resolution Gridded Models: GEOID2022, DEFLEC2022 and GRAV2022

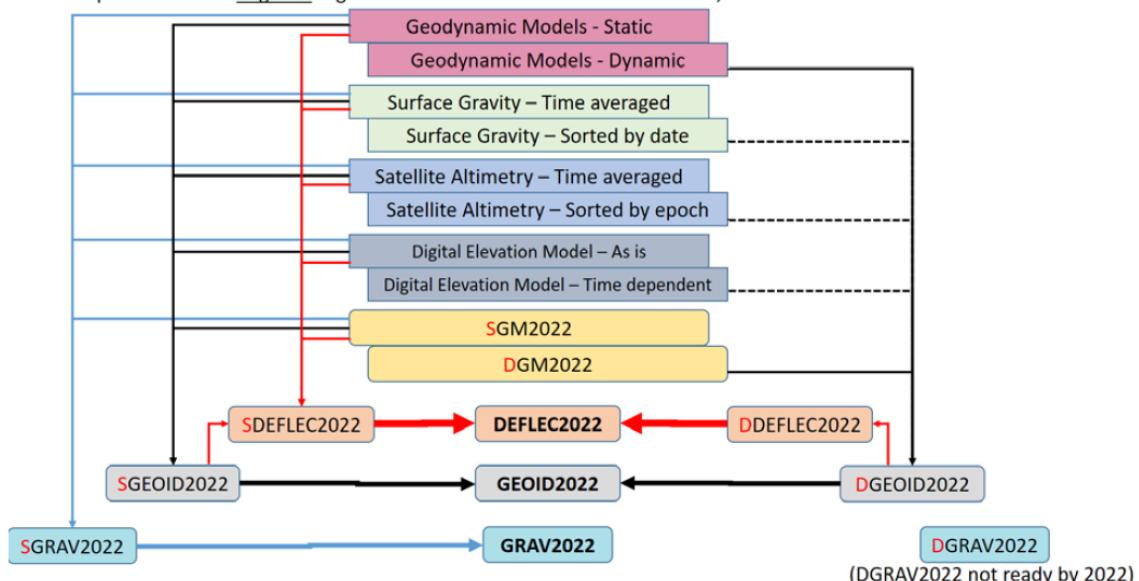


Figure 6-4 : sources de données servant à la réalisation des grilles de haute résolution.



6.1.7. Transformation des altitudes

Un outil de transformation va être créé afin de transformer les altitudes existantes dans le nouveau datum. Les systèmes de référence existants sont :

- le datum vertical nord-américain NAVD88
- le datum vertical de Porto Rico PRVD02
- le datum vertical des îles Vierges américaines VIVD09
- le datum vertical des Samoa américaines ASVD02
- le datum vertical du Commonwealth des îles Mariannes du Nord NMVD03
- le datum vertical de Guam GUVD04.

Le NGS recueille actuellement des données GNSS afin de calculer une transformation. Il s'agira d'une mise à jour de la transformation existante VERTCON.

6.1.8. Dissémination

La détermination des coordonnées géométriques, de cotes géopotentielles et d'altitudes orthométriques est illustrée sur les Figures 6-5 à 6-7. Il s'agit d'une procédure plus ou moins complexe, en fonction de la précision souhaitée :

- résultat de très haute précision, incluant les modèles cinématiques
- résultat de précision moyenne, sans les modèles cinématiques.

Le nivelllement va rester la technique de choix pour des transferts locaux des altitudes. L'utilisateur devra générer une altitude de départ orthométrique par GNSS pour y rattacher le nivelllement local. La procédure exacte n'est pas encore définie (p. ex. mesure rapide statique ou RTK). D'autres alternatives sont également imaginables, comme l'utilisation de points de nivelllement GNSS existants.

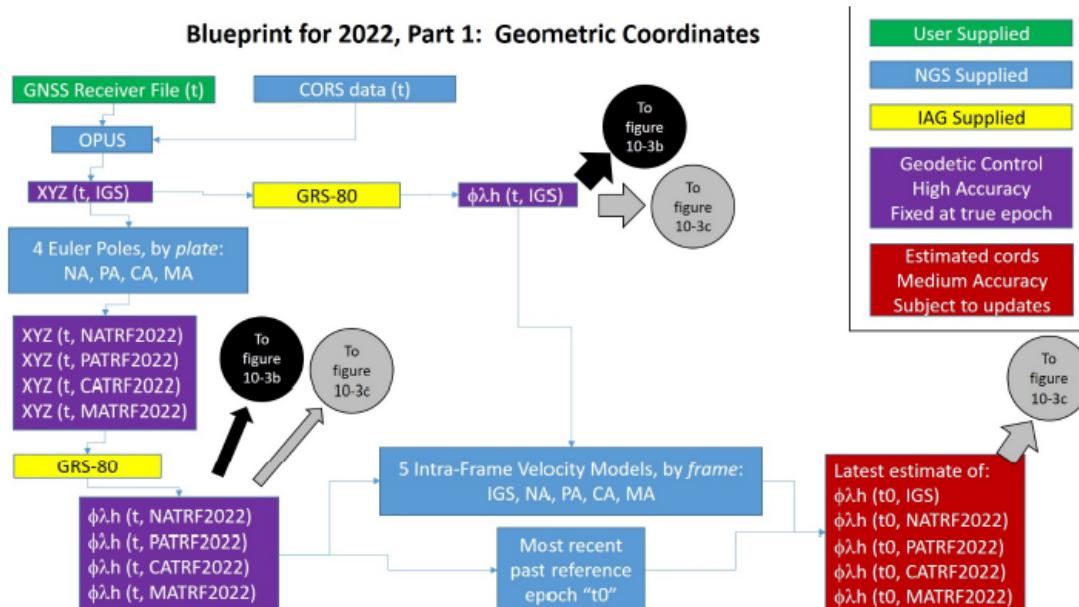


Figure 6-5 : détermination de coordonnées géométriques dans le nouveau datum.



Blueprint for 2022, Part 2: Geopotential Coordinates

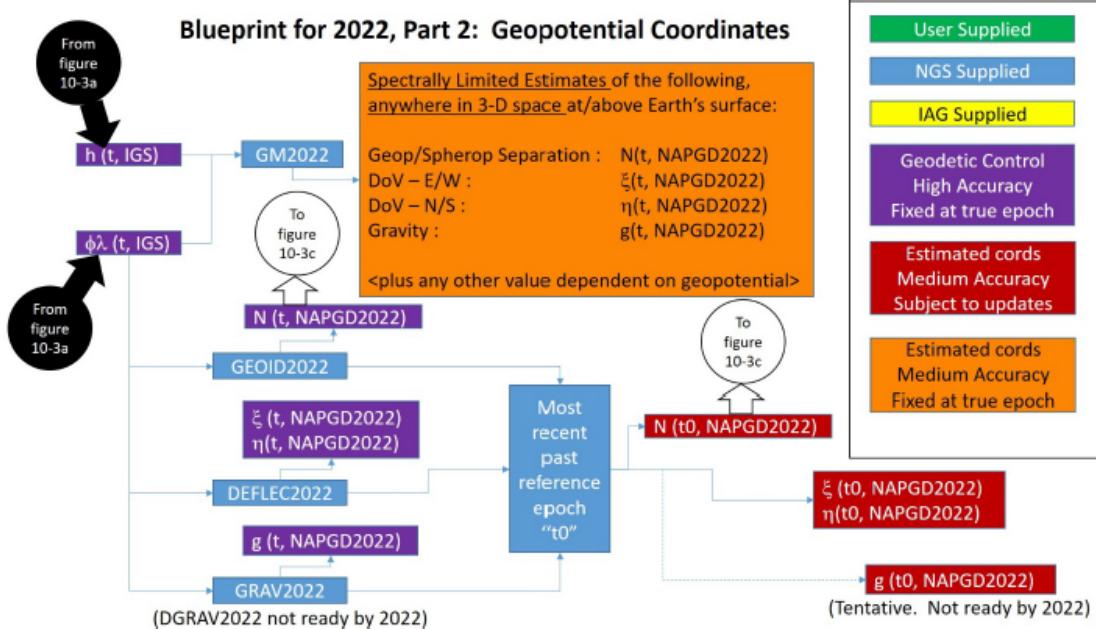


Figure 6-6 : détermination de coordonnées géopotentielles dans le nouveau datum.

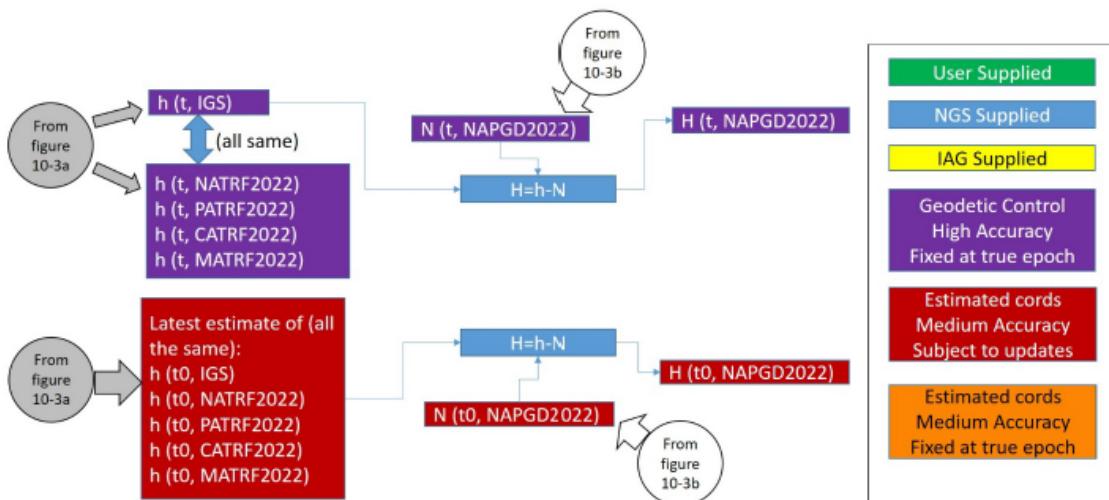


Figure 6-7 : détermination d'altitudes orthométriques dans le nouveau datum.

6.1.9. Mise à jour

Le NGS souhaite exploiter et entretenir NAPGD2022 pendant les décennies à venir. Cependant, le NGS précise que les modèles ne seront pas adaptés si des campagnes de mesures (p. ex. terrestres) montrent des incohérences. Ce sont au contraire les campagnes qui seront calées différemment afin de garantir la cohérence avec les modèles. Une nouvelle réalisation ultérieure n'est évidemment pas exclue.

En général, les raisons suivantes pourraient déclencher une mise à jour des modèles :

- événements spécifiques (tremblement de terre, éruption volcanique)



- amélioration significative des connaissances (nouveaux satellites, nouvelles technologies, nouvelles théories)
- corrections d'erreurs dans les versions précédentes
- augmentation cumulée du niveau de la mer dépassant un certain seuil.

L'objectif est de garantir une précision inférieure ou égale à 1 cm en termes d'écart-type sur tout le territoire.

6.2. Norvège

NN2000 (Lysaker & Vestøl, 2020) est le dernier cadre de référence altimétrique norvégien. Il est cohérent avec les cadres altimétriques suédois et finlandais, RH2000 et N2000. Il s'agit d'un système zero-tide d'altitudes normales. La dissémination est assurée à l'aide de 19 000 points fixes.

6.2.1. Alignement avec les cadres européens

NN2000 est différent de EVRF2000 et de EVRF2007. Les différences avec EVRF2007 variaient entre 0 et 2 cm dans la réalisation initiale et entre -4 et 6 cm dans la réalisation finale de NN2000.

6.2.2. Cadre historique

Le cadre historique porte la dénomination NN1954. Il a été réalisé grâce à des mesures de nivellation le long des principales voies de communication au sud du cercle arctique. NN1954 présente des problèmes à cause du rebond postglaciaire non modélisé. La mesure du réseau entier a pris 40 ans, conduisant à des déformations importantes du réseau entre le début et la fin des mesures. De plus, le marégraphe d'Oslo s'est révélé inadapté comme référence, également à cause du rebond postglaciaire.

Une étude estime la différence entre NN1954 et un NN1954 corrigé avec un modèle de rebond postglaciaire à plus de 20 cm.

Une difficulté supplémentaire émane de l'utilisation de corrections « sphéroïdales-orthométriques ». Dans ce cas, la pesanteur n'est pas mesurée mais calculée à l'aide de la formule de Clairaut. Les altitudes résultantes ne découlent pas de cotes géopotentielles.

6.2.3. L'anneau de nivellation baltique (BLR2000)

L'adoption d'EVRF2000 en Norvège a été étudiée. Cependant :

- la connexion des pays nordiques au réseau européen unifié de nivellation 95/98 était faible
- le rebond postglaciaire n'est pas traité de façon rigoureuse dans EVRF2000.

Pour ces raisons, les pays riverains de la Baltique ont calculé l'anneau de nivellation baltique (BLR2000), illustré sur la Figure 6-8, en utilisant le modèle de rebond postglaciaire NKG2005LU.

Les systèmes suédois (RH2000) et finlandais (N2000) sont des versions légèrement modifiées de BLR2000. NN2000 a été calculé selon la même procédure que BLR2000.

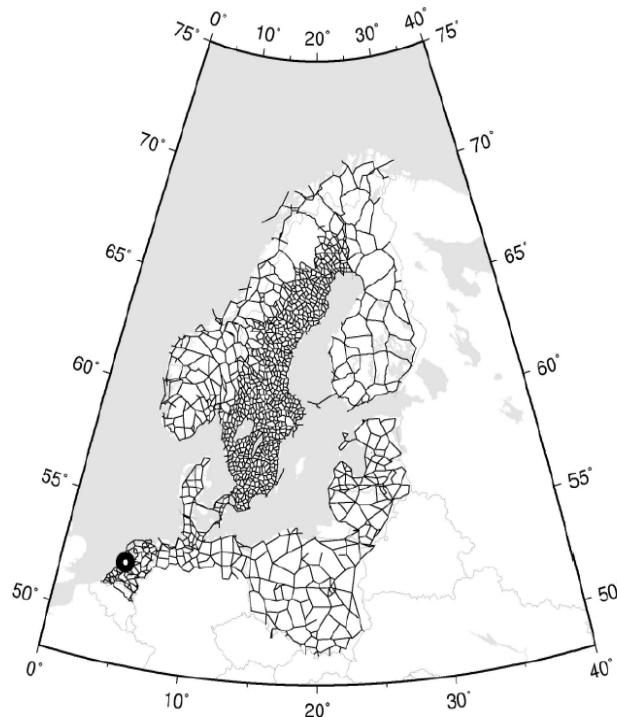


Figure 6-8 : l'anneau de nivellation baltique BLR2000. Le cercle montre le point fondamental à Amsterdam.

6.2.4. Bases théoriques pour l'établissement de NN2000

NN2000 est un système zero tide, rattaché au repère (marégraphe) d'Amsterdam (NAP) à l'époque 2000.0 :

$$C_{NAP} = 0 \quad (6.1)$$

$$W_{NAP} = U_{0_{GRS80}} \quad (6.2)$$

Où C_{NAP} est la cote géopotentielle d'Amsterdam, W_{NAP} le potentiel de pesanteur à Amsterdam et $U_{0_{GRS80}}$ le potentiel normal GRS80.

Le modèle de rebond postglaciaire de la Commission géodésique nordique est appliqué (NKG2005LU). Le système est réalisé à travers les altitudes normales de 19 000 points fixes de premier ordre.

6.2.5. Mesures de nivellation

NN2000 est calculé à partir de 26 000 km de nivellation (Figure 6-9), incluant également le réseau de nivellation ferroviaire. Les fjords représentent une difficulté particulière. Afin de boucler des polygones et d'obtenir un contrôle, des mesures à travers certains fjords sont exécutées (116 traversées de fjords avec une distance moyenne de 2 km). Des mesures d'angles zénithaux simultanées sont mises en œuvre, mais sans prendre en compte les déviations de la verticale. Ces mesures dégradent généralement la précision du réseau, mais amènent un contrôle appréciable.

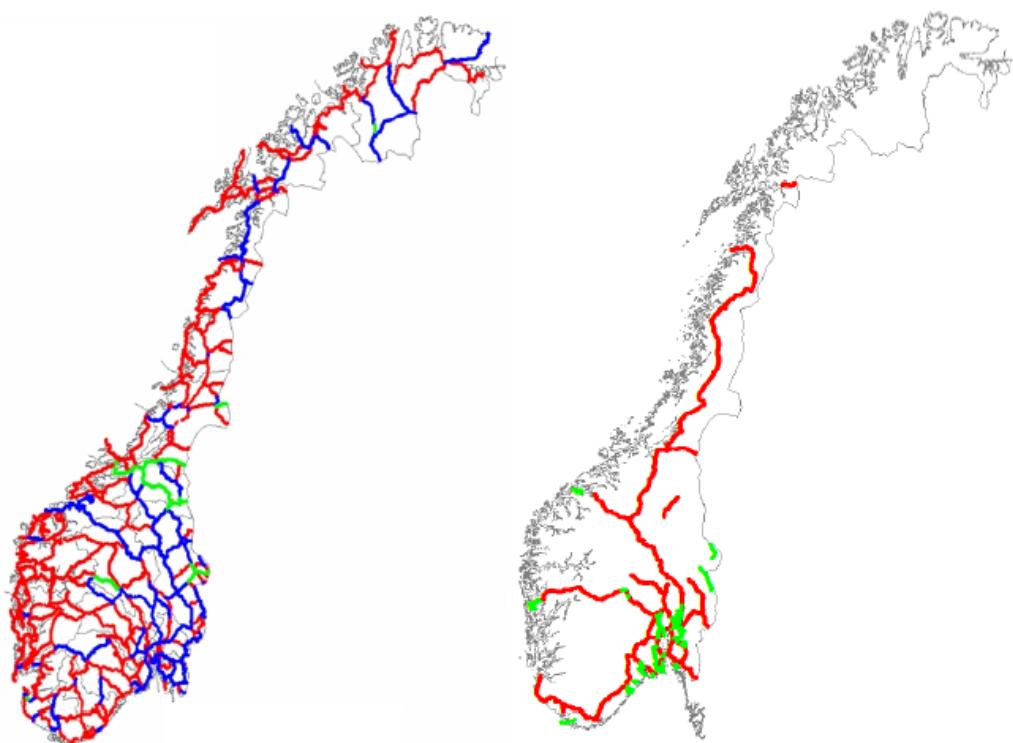


Figure 6-9 : à gauche : réseau de premier ordre norvégien ; rouge = 1 mesure, bleu = 2 mesures, vert = 3 mesures ; à droite : réseau de nivellation ferroviaire (en rouge) et réseau de deuxième ordre (en vert).

6.2.6. Mesures gravimétriques

En plus de mesures relatives avec des LaCoste-Romberg (LCR) et des Scintrex CG-5, il existe un réseau absolu mesuré au gravimètre absolu FG5 ainsi que 250 stations mesurées au gravimètre absolu de terrain A10.

Les points fixes altimétriques ne sont pas mesurés de façon systématique. Pour le calcul de NN2000, des valeurs interpolées ont été utilisées.

6.2.7. Système des marées

Aucune correction des marées n'est appliquée au nivellation, qui est donc dans un système mean-tide. Les corrections périodiques sont appliquées aux mesures gravimétriques, ce dont résultent également des valeurs mean-tide. Les résultats finaux sont convertis en zero-tide.

6.2.8. Dissémination altimétrique

La dissémination altimétrique n'est abordée que très brièvement dans le rapport NN2000 (Figure 6-10) via un « fitted geoid model » ou « height reference model » (HREF). Il s'agit d'un modèle du géoïde non purement gravimétrique, qui est calculé afin d'être cohérent aux points de nivellation GNSS. Les utilisateurs ont donc accès au cadre NN2000 tant par nivellation (points fixes) que par GNSS.

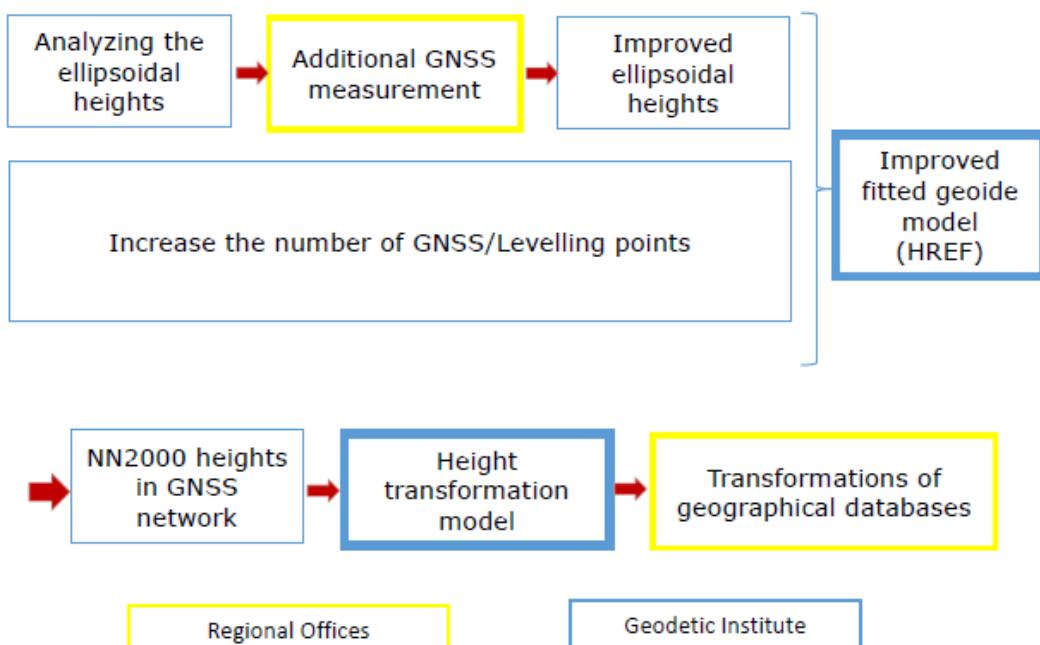


Figure 6-10 : procédure de dissémination des altitudes.

6.2.9. Passage au nouveau cadre

Le changement de cadre de référence altimétrique n'est que très brièvement décrit. Une transformation basée sur la collocation selon les moindres carrés est calculée (Figure 6-11). Ensuite, la transformation est publiée et les offices régionaux sont chargés d'exécuter les transformations sur les données existantes. Les partenaires sont :

- les communes,
- l'administration des routes,
- d'autres partenaires.

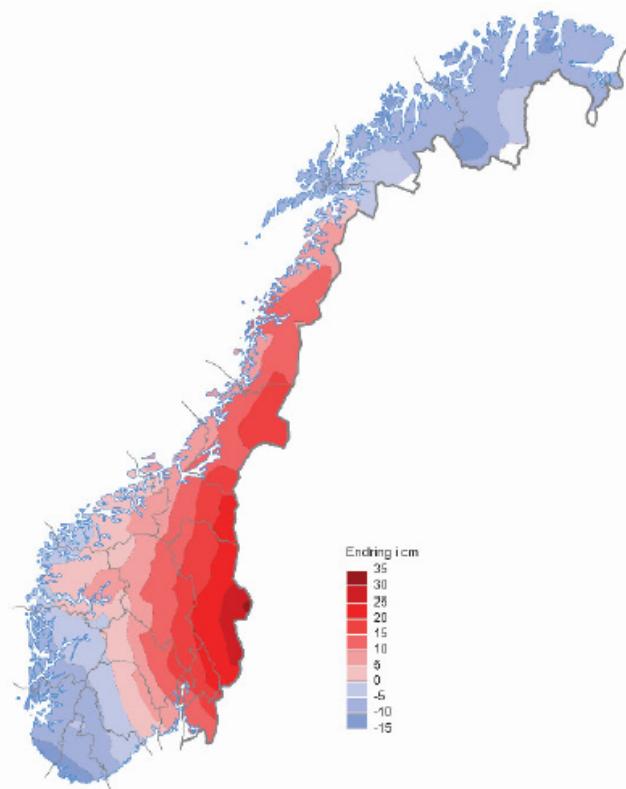


Figure 6-11 : différences altimétriques entre NN1954 et NN2000.

6.3. Allemagne

La documentation suivante concernant les systèmes altimétriques utilisés en Allemagne et le système altimétrique actuellement en vigueur DHHN2016 (Deutsches Haupthöhenetz 2016, réseau altimétrique principal allemand de 2016) se fonde pour l'essentiel sur la publication intitulée « DHNN2016: Die Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes und der einheitliche integrierte geodätische Raumbezug 2016 » (*Le renouvellement du réseau altimétrique principal allemand et la référence spatiale géodésique intégrée unifiée de 2016*) du groupe de travail sur la référence spatiale instauré par la communauté des administrations des mensurations des Länder de la République fédérale allemande (Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland, AdV) en 2018 (AdV, 2018).

6.3.1. Rappel historique

Le tableau suivant, tiré de AdV (2018), fournit une vue d'ensemble des cadres de référence altimétriques utilisés sur le territoire allemand (Tableau 6-2, *non traduit*). Si l'on excepte les cadres altimétriques établis du temps de la République démocratique allemande (RDA), toutes les indications altimétriques utilisées à l'Ouest, dans les anciens Länder fédéraux, se rapportent au marégraphe d'Amsterdam (Normaal Amsterdams Peil, NAP). C'est notamment le cas du Bade-Wurtemberg, frontalier de la Suisse.

Des points de datum spécifiques ont aussi été retenus pour les diverses réalisations, comme l'observatoire astronomique (Sternwarte) de Berlin, l'origine NHP (Nullpunkt Hoppegarten) ou le nœud du REUN de Wahlenhorst près d'Osnabrück. Tous se déduisaient du NAP, d'où l'analogie avec le RPN en Suisse, puisque le NAP n'est pas accessible directement pour l'Allemagne.

Jusqu'à l'introduction de DHHN92, DHHN12 était utilisé avec des altitudes normales orthométriques dans les anciens Länder fédéraux. A la réunification, les altitudes normales déjà utilisées en RDA furent également introduites dans les anciens Länder fédéraux (DHHN92/statut 160).



Tableau 6-2 : vue d'ensemble (*non traduite*) des cadres de référence altimétriques en Allemagne (AdV, 2018).

Messepoché	Höhen	Netz	Nullniveau	Datumspunkt	Höhenart	Bemerkung
1868 - 1894	Höhen über NN im "alten System"	Gradmessungs-nivellement	ab 1879 NAP	NHP Sternwarte Berlin	keine Korrekturen wegen Schwere angebracht	Trigonometrische Abteilung der Preuss. Landesaufnahme, sächsische Landesaufnahme
1910 - 1944	Höhen über NN im "neuen System"	DHHN12	NAP	NHP Sternwarte Berlin	Normalorthometrische Höhen	In Ausgleichung von Netzteil I Übertragung der Höhe von NHP Sternwarte Berlin nach NHP Hoppegarten
1947 - 1962	Höhen über NN im "neuen System"	DHHN12	NAP	Anschlusszwang an alte Netzteile	Normalorthometrische Höhen	nur alte Bundesländer: Anfelde rung von 3 Netzteilen + regionale Punkteinschaltungen
1947 - 1962	keine amtlichen Höhen	Nivellementsnetz 1960	NAP	UF I Wallenhorst	Normalorthometrische Höhen, orthometrische Höhen (Helmert Höhen), geopotentielle Koten	nur alte Bundesländer, zu Untersuchungszwecken
1954 - 1956	Höhen über HN	SNN56	Pegel Kronstadt	Kronstadt	Normalhöhen	nur neue Bundesländer
1974 - 1976	Höhen über HN	SNN76	Pegel Kronstadt	NHP Hoppegarten	Normalhöhen	nur neue Bundesländer
1980 - 1988	Höhen über NN	DHHN85	NAP	UF I Wallenhorst	Normalorthometrische Höhen	nur alte Bundesländer
1974 - 1992	Höhen über NHN	DHHN92	NAP	Kirche Wallenhorst	Normalhöhen	Messungen des SNN76 und DHHN85 sowie von 16 Verbindungslien zwischen diesen Netzteilen (1991-1992)
2004 - 2013	Höhen über NHN	DHHN2016	NAP	72 Punkte in Deutschland	Normalhöhen	

On peut apporter différents compléments concernant le Land frontalier du Bade-Wurtemberg.

L'observatoire astronomique de Berlin était le point fondamental du système altimétrique (dépourvu de toute réduction gravimétrique) utilisé avant 1912. L'altitude de 37.000 m indiquée pour ce point était déduite du marégraphe d'Amsterdam, origine des altitudes (Normalnull, NN).

DHHN12 vit le jour en 1912, après la démolition du bâtiment qui abritait le point de référence de l'époque (observatoire astronomique de Berlin, rattaché au marégraphe d'Amsterdam) et la création du nouveau point fondamental « Hoppegarten » près de Berlin. Pour distinguer les altitudes les unes des autres, on introduisit ce que l'on appela des statuts altimétriques. Le statut initial de DHHN12 était le statut 100. Des altitudes de ce statut furent gérées jusqu'en 1979 dans le Bade-Wurtemberg.

Le statut altimétrique 130 fut introduit en Bade-Wurtemberg après la réalisation de nombreuses nouvelles mesures. Le réseau altimétrique continuait à être appelé DHHN12 et comportait toujours des altitudes normales orthométriques. Le statut 130 fut introduit en 1971 (ou en 1979 selon d'autres sources). Il céda sa place à DHHN92 en 2008. Les altitudes au statut 130 furent disponibles jusqu'en 2012.

Le système altimétrique DHHN92 entra officiellement en vigueur le 1^{er} janvier 2008. Il s'agissait pour la toute première fois d'altitudes normales par rapport à Amsterdam. Le statut 160 leur fut attribué pour bien les distinguer des valeurs antérieures. DHHN92 fut réalisé en fixant le point « Wallenhorst » (près d'Osnabrück, nœud du REUN le plus proche d'Amsterdam sur le sol allemand) dans la solution UELN-73/76.

DHHN92 (et DHHN2016 ; cf. § 6.4) ne fut introduit que pour les points du 1^{er} et du 2^{ème} ordre. L'entretien des lignes du 3^{ème} ordre cessa en 2004, mais les altitudes de leurs points continuèrent à être publiées, dans le système altimétrique DHHN12 alors en vigueur (statut altimétrique 130, altitudes normales orthométriques par rapport à Amsterdam).

On peut par ailleurs apporter certains compléments pour les différents statuts altimétriques.

Les statuts altimétriques 110 et 120 ont également existé dans certains Länder fédéraux (mais pas dans le Bade-Wurtemberg). Il s'agissait dans les deux cas de modifications de DHHN12 après de nouvelles mesures. Un DHHN85 a aussi existé en Allemagne de l'Ouest, visant à introduire des altitudes orthométriques par rapport à Amsterdam.



triques (au statut 140). Elles ne furent introduites que dans de rares Länder, la solution n'ayant été disponible qu'en 1990 et rapidement supplantée par DHHN92 (compensation étendue à l'Allemagne entière, altitudes normales). Le statut 140 n'a jamais eu cours en Bade-Wurtemberg.

Les statuts altimétriques 150 et 156 se rapportaient aux systèmes d'altitudes normales utilisés en RDA (SNN56 et SNN76).

6.3.2. Réseau altimétrique principal allemand DHHN2016

La décision reproduite ci-dessous (*en version originale*), prise en 2016 par l'AdV, rendit le recours à DHHN2016 obligatoire en République fédérale d'Allemagne.

Beschluss 128/4 gemäß Nr. 5.1 der GO-AdV 2016

**Einführung der Ergebnisse des Projektes
„Erneuerung des DHHN“**

1. Das Plenum der AdV beschließt die Realisierung des einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezugs des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland zum 1. Dezember 2016 mit den folgenden Komponenten einzuführen:
 - a) das „Deutsche Haupthöhenetz 2016 (DHHN2016)“ als neuen amtlichen Höhenbezugsrahmen,
 - b) die verbesserten Koordinaten und verbesserten ellipsoidischen Höhen der Referenzstationspunkte (ETRS89/DREF91/Realisierung2016) des amtlichen SAPOS®-Referenzstationsnetzes (RSN),
 - c) die Koordinaten und ellipsoidischen Höhen der neu eingeführten Geodätischen Grundnetzpunkte (ETRS89/DREF91/Realisierung2016) des amtlichen Geodätischen Grundnetzes (GGN),
 - d) das „German Combined Geoid 2016 (GCG2016)“ als neues amtliches AdV-Quasigeoid,
 - e) das „Deutsche Hauptschwerenetz 2016 (DHSN2016)“ als neuen amtlichen Schwerebezugsrahmen, und
 - f) das Modell HOETRA2016 in der Version 1.0 zur Transformation von amtlichen Höhen im System DHHN92 in zukünftige amtliche Höhen des Systems DHHN2016 und umgekehrt.
2. Die Umsetzung der Einführung erfolgt in den Ländern bis spätestens zum 30. Juni 2017.
3. Für den reibungslosen Betrieb des SAPOS®-Dienstes ist die stichtagsbezogene bundesweite Einführung der Koordinaten und ellipsoidischen Höhen der Referenzstationspunkte unerlässlich. Das Plenum beschließt deren Einführung zum 1. Dezember 2016.

Figure 6-12 : décision du plénium de l'AdV introduisant la référence spatiale géodésique intégrée unifiée (AdV, 2018).

Les composants les plus importants (a à f) pour la référence spatiale géodésique intégrée sont définis sur la Figure 6-12. Ils se fondent sur les éléments décrits dans la suite, de façon très similaire à ce qui a été mis en place en Suisse.



i) Réseau altimétrique principal allemand DHHN2016

DHHN se base pour l'essentiel sur les lignes du 1^{er} et du 2^{ème} ordre des anciens réseaux DHHN85 et SNN76 (RDA). Les nouvelles mesures réalisées entre 2006 et 2011 s'étendaient sur 30 000 km au total.

Il a été spécifié ce qui suit dans (AdV, 2018) pour définir le système (datum) :

Tableau 6-3 : spécificités du système (AdV, 2018).

	DHHN92	DHHN2016
Ursprung	NAP – Nullpunkt des Amsterdamer Pegels (mittleres Tidehochwasser in Amsterdam zur Epoche 1683-1684)	
Realisierung des Ursprungs	1 Datumspunkt (Kirche Wallenhorst)	72 Datumspunkte (zwangsfrei, eine Bedingungsgleichung)
Maßstab		SI - Meter
Höhenart		Normalhöhen
Normalschwerefeld		GRS80
Festerdegezeiten	Nicht berücksichtigt	Variabler Anteil eliminiert
Reduktion des permanenten Gezeitenanteils	keine (mean tide)	Mean tide
Ozeangezeitenauflast	Nicht berücksichtigt	Berücksichtigt für HH, MV, NI, SH

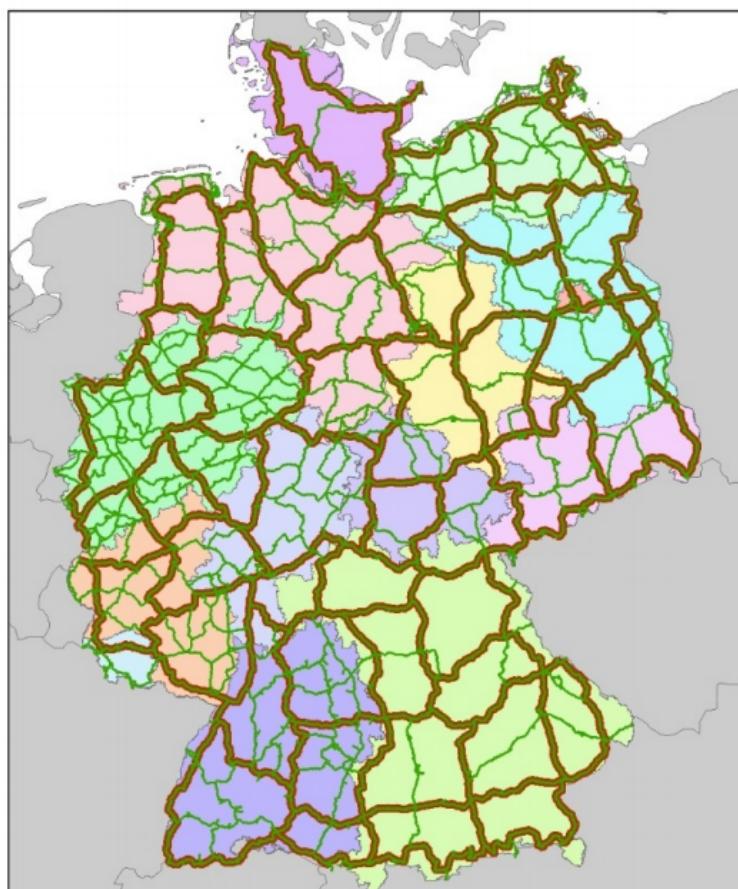


Figure 6-13 : projet du réseau altimétrique principal allemand DHHN2016 (AdV, 2018).



Tableau 6-4 : mesures exécutées dans le réseau altimétrique principal allemand DHHN2016, réparties par Länder (*tableau non traduit*).

Bundesland	DHHN92	urspr. Netzentwurf		endgültiger Netzentwurf		
	in km	in km	in Prozent des DHHN92	in km	in Prozent des DHHN92	in Prozent des urspr. Entwurfs
Baden-Württemberg	2387	1227	51	2954	124	241
Bayern	5181	3105	60	4363	84	141
Berlin	0	107		136		127
Brandenburg	1776	1078	61	2050	115	190
Hamburg	142	78	55	131	92	168
Hessen	1332	653	49	1788	134	274
Mecklenburg-Vorpommern	1545	1194	77	2769	179	232
Niedersachsen + Bremen	3062	1671	55	4126	135	247
Nordrhein-Westfalen	3979	1318	33	4255	107	323
Rheinland-Pfalz	1919	810	42	2062	107	255
Saarland	85	85	100	312	367	367
Sachsen	1365	871	64	1417	104	163
Sachsen-Anhalt	1270	723	57	1358	107	188
Schleswig-Holstein	1305	628	48	920	70	146
Thüringen	1046	588	56	1168	112	199
Gesamt	26394	14136	54	29809	113	211

ii) SAPOS : coordonnées et altitudes ellipsoïdales améliorées des points des stations de référence du réseau de stations permanentes officiel

Ce réseau est en tout point similaire à son homologue suisse AGNES.

iii) Coordonnées et altitudes ellipsoïdales des points géodésiques du réseau de base (GGN)

En 2008, 250 points au sol, répartis sur l'ensemble du territoire national, ont été mesurés par GNSS. Ils sont également rattachés au DHHN2016 et 100 d'entre eux sont en plus des points gravimétriques absolu. Ce réseau est semblable au réseau national GNSS MN95 de la Suisse.

iv) Modèle du quasi-géoïde GCG2016

Cohérent avec DHNN2016, le modèle du quasi-géoïde GCG a été établi à partir de données gravimétriques très complètes issues du pays entier, du modèle global du champ de pesanteur GGM, d'un modèle numérique du terrain actuel et des points GNSS / de nivellation provenant du GGN et du DHHN2016 (cf. Figure 6-14). Sa précision est de ± 1 cm en plaine et de ± 2 cm en montagne (analogie avec la Suisse : CHGeo2004).

v) Réseau gravimétrique principal DHSN2016

Réunion des mesures gravimétriques, analogue au réseau gravimétrique de base de la Suisse.

vi) Modèle de transformation HOETRA2016

Le modèle de transformation HOETRA2016 (cf. Figure 6-15) a été créé pour simplifier la conversion de données existantes. La conversion et l'utilisation des données des ordres suivants dans le réseau altimétrique allemand (à partir du 3^{ème} ordre) étaient ainsi garanties. Le modèle ne tient compte d'aucune modi-



fication des altitudes dans le temps dans les zones où l'on observe des mouvements de terrain. Il ne remplace pas non plus un nouveau calcul rigoureux et/ou une nouvelle mesure lorsque les exigences de précision sont très élevées (analogie avec la Suisse : *HTRANS*).

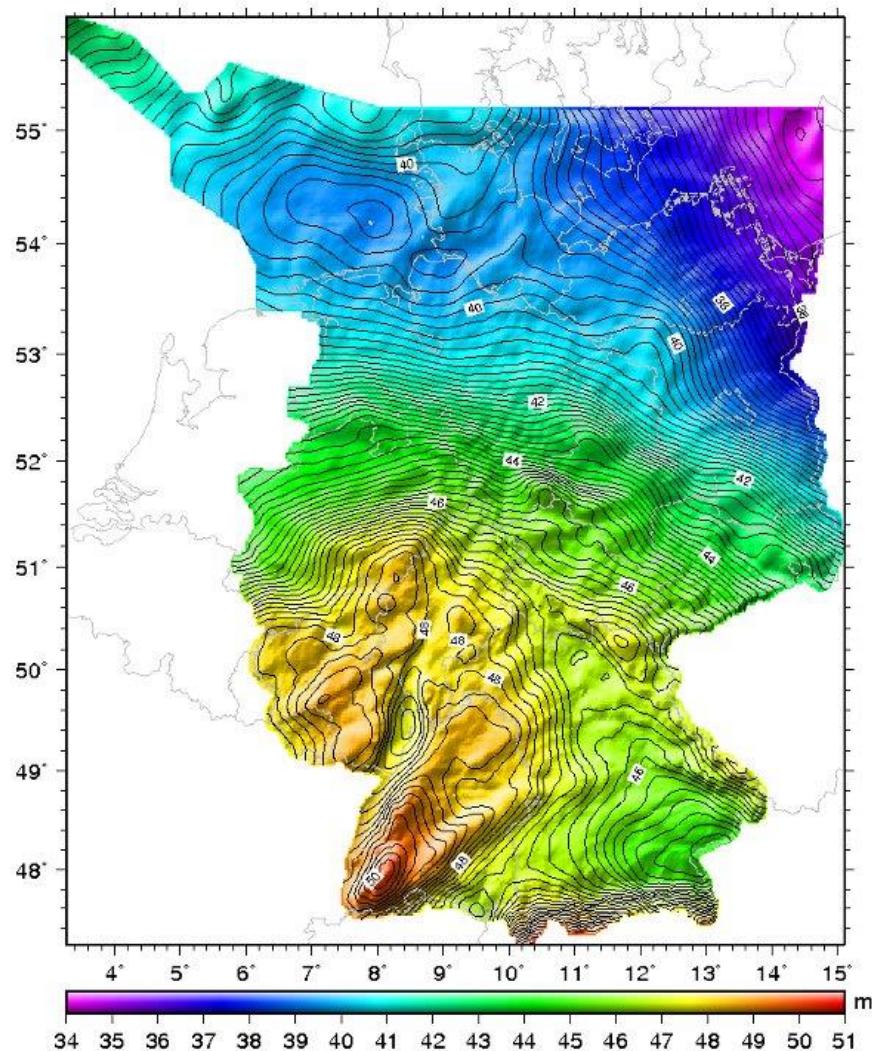


Figure 6-14 : modèle du quasi-géoïde GCG2016.

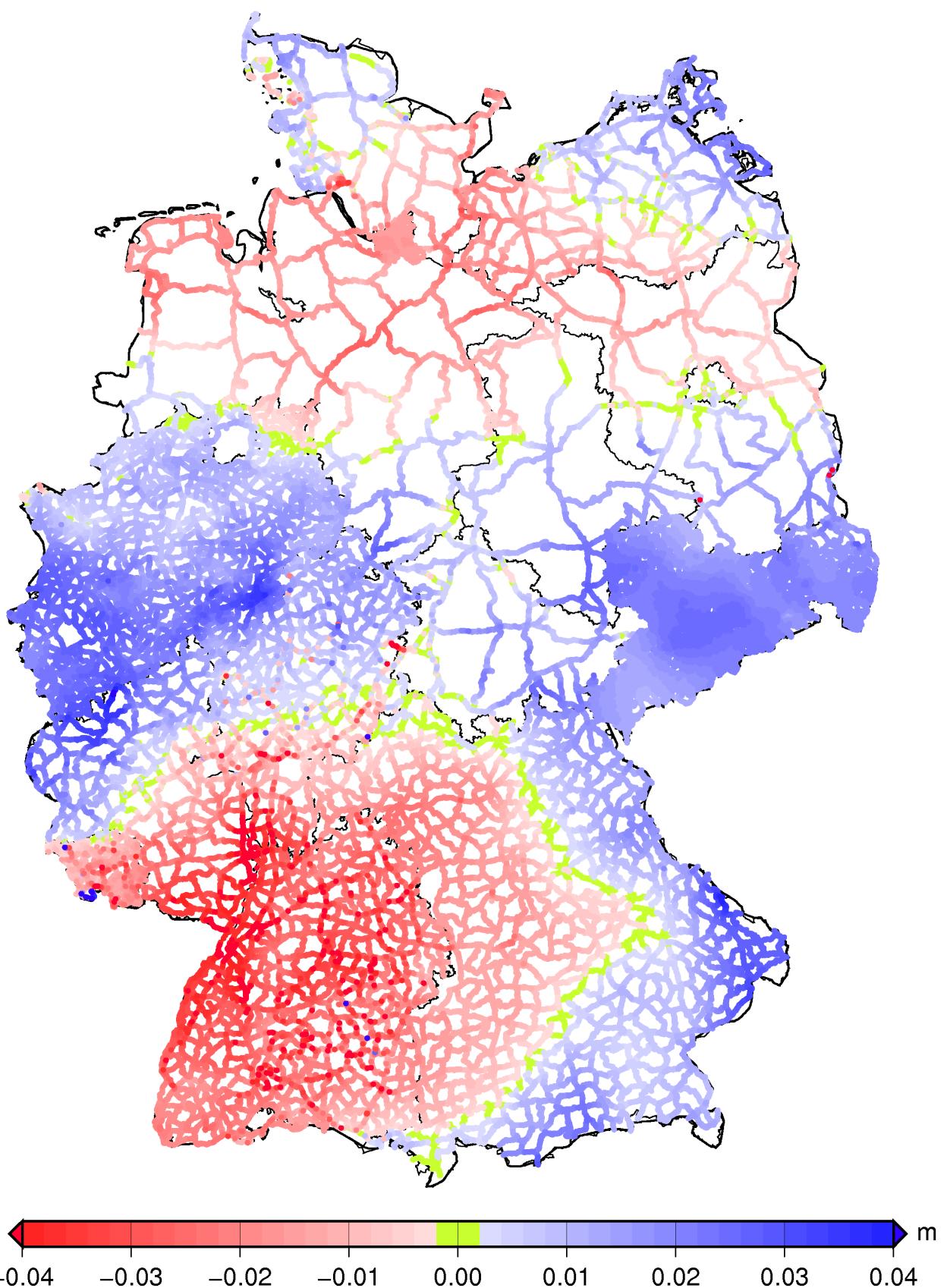


Figure 6-15 : écarts altimétriques DHHN2016 moins DHHN92, réalisation de 2016 (données utilisées en entrée pour calculer le modèle de transformation HOETRA2016).



Le système altimétrique DHHN2016 est officiel dans le Bade-Wurtemberg depuis le 1^{er} juillet 2017. Il se compose d'altitudes normales référencées au marégraphe d'Amsterdam. Elles ont le statut altimétrique 170. Les points des ordres inférieurs ne sont pas encore tous disponibles au statut 170. Le statut 160 reste donc en vigueur pour ces points.

Il est question, pour DHHN2016, d'altitudes au-dessus de l'origine des altitudes normales (Höhen über Normalhöhennull, NN), afin de bien établir la distinction avec l'origine NN (Normalnull).

6.4. France

6.4.1. Rappel historique

Le présent paragraphe se fonde sur un rapport du Conseil national de l'information géographique (Commission Géopositionnement, 2016), sur des informations provenant du site Internet officiel de l'IGN⁶ et sur diverses interventions lors de symposiums EUREF.

Actuellement, le système altimétrique officiel en France est NGF-IGN69, NGF signifiant Nivellement général de la France. Il s'agit là du troisième niveling national.

Le premier niveling (1857 – 1864) est connu sous le nom de NGF-Bourdalouë. Son origine se trouvait au Fort Saint-Jean à Marseille et aucune correction gravimétrique n'était apportée. Il s'agissait donc d'un système d'altitudes usuelles.

Le deuxième niveling (1884 – 1892) porte le nom de NGF-Lallemand. Son origine est la valeur moyenne du marégraphe de Marseille entre 1885 et 1892. Elle est inférieure de 7.1 cm à l'origine du système NGF-Bourdalouë. En termes de conception, NGF-Lallemand était un système orthométrique, uniquement basé, toutefois, sur des valeurs gravimétriques théoriques. La définition de l'origine suisse (Repère Pierre du Niton, « nouvel horizon ») repose pour l'essentiel sur le rattachement au réseau français NGF-Lallemand.

Les mesures du premier ordre pour le réseau NGF-IGN69 eurent lieu entre 1962 et 1969, 39 polygones d'une longueur totale de 13 700 km étant nivélés dans ce cadre. La structure du réseau fut pour ainsi dire reprise telle quelle du réseau NGF-Lallemand et l'origine (marégraphe de Marseille) resta elle aussi inchangée. Un nouveau système d'altitudes normales (on les appelle souvent les altitudes Vignal⁷) fut toutefois introduit. La modification des altitudes dépasse 60 cm dans la partie nord du pays.

La densification (du 2^{ème} au 4^{ème} ordre) date surtout des années 1970 et cessa en 1994. On recourut aussi au niveling motorisé (NIGEMO, niveling géométrique motorisé) à partir de 1979, dès que c'était possible. Aux yeux de l'IGN, la vitesse de progression plus élevée et une moindre influence de la réfraction (du fait de la mise en station des instruments à une hauteur supérieure) constituent des avantages. Les portées atteignaient jusqu'à 50 mètres (instrument – mire). C'est surtout la méthode NITRIMO (niveling trigonométrique motorisé) qui fut mise en œuvre sur les lignes du 4^{ème} ordre. Elle consistait à observer des angles verticaux réciproques depuis les véhicules, à des distances de 600 mètres au plus. Des mesures gravimétriques systématiques étaient uniquement réalisées sur les lignes du 1^{er} ordre, tous les 2 à 5 km, et lors de changements de pente ou de changements de direction importants (à cause des interpolations). Des mesures gravimétriques sur les lignes du 2^{ème} et du 3^{ème} ordre n'étaient réalisées qu'en montagne.

On sait depuis longtemps qu'IGN69 présente des erreurs systématiques de plusieurs décimètres en direction nord-sud. On s'en rendit d'abord compte lors du rattachement de marégraphes dans le nord du pays, puis lors de la compensation du niveling européen (REUN) ensuite. C'est pourquoi le projet NIREF fut lancé en 1996 pour mesurer quelques nouvelles traverses dans tout le pays.

⁶ www.ign.fr

⁷ Un gradient gravimétrique constant de 0.3086 mGal/m est utilisé pour les altitudes Vignal afin de calculer la pesanteur normale moyenne.



Cependant, des travaux préparatoires au NIREF avaient déjà été entrepris auparavant. Une liaison directe entre les deux marégraphes de Marseille et Dunkerque fut ainsi mesurée en 1983 et reconfirma l'inclinaison nord-sud d'environ 20 cm d'IGN69. Certaines lignes du premier ordre furent aussi remesurées dans les années 1990, principalement dans le nord du pays.

Ce réseau très sommaire sert surtout à des fins scientifiques en géodésie (mouvements verticaux, analyses du réseau, nouvelle contribution au REUN) et en océanographie. Il n'est pas prévu de l'introduire comme nouveau système altimétrique officiel. IGN69 restera le système officiel jusqu'à nouvel ordre, un changement de système altimétrique n'étant pas à même de susciter l'adhésion des utilisateurs.

Le NIREF est surtout réalisé par voie motorisée (NIGEMO, niveling géométrique motorisé). Le tracé des lignes est relativement direct et reste assez indépendant de celui du réseau existant IGN69. Le NIREF court désormais le long des routes et non plus le long des voies ferrées. Aucune mesure gravimétrique n'est effectuée pour lui. Les valeurs gravimétriques sont interpolées à partir du jeu de données existant.

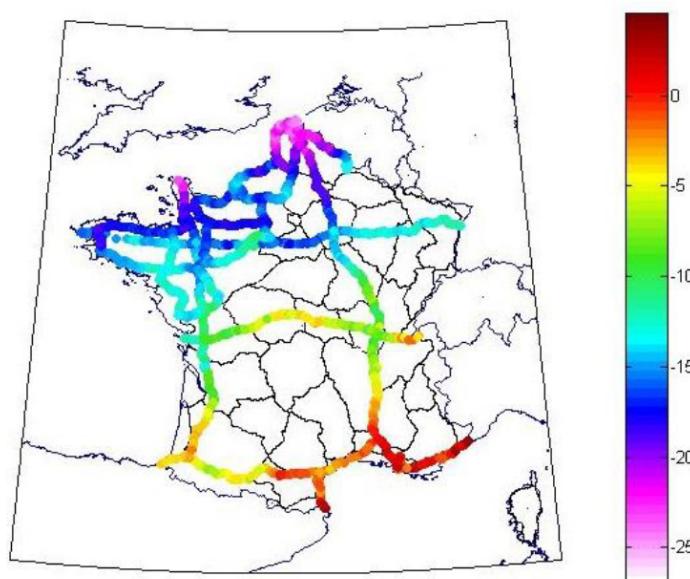


Figure 6-16 : différences NIREF – IGN69 (état en 2015), avec les nouvelles lignes du 1^{er} ordre mesurées entre 1992 et 1999 dans la partie nord du pays.

L'entretien de l'ensemble du réseau de niveling français était très coûteux. C'est pourquoi le Conseil national de l'information géographique (CNIG) décida en 1995 de restreindre l'entretien aux seuls points du 1^{er} au 3^{ème} ordre (soit 25% du réseau). En outre, les lignes devaient être déplacées, pour ne plus courir le long des voies ferrées, mais des routes.

L'IGN n'effectue toutefois plus de mesures de niveling direct désormais. Les points font cependant l'objet de visites à intervalles réguliers et leurs descriptifs sont tenus à jour. L'entretien effectif du cadre altimétrique se déroule aujourd'hui conformément au concept des « triplets », au moyen d'un niveling par GNSS. Le passage à cette méthode s'est déroulé dans le cadre du projet NIVAG (niveling assisté par GPS), dans les années 2000 à 2008. Depuis la clôture du projet NIVAG en 2008, ces triplets font l'objet d'une nouvelle mesure et d'une nouvelle documentation tous les 12 ans. Ces travaux de mise à jour ont été baptisés ERNIT (entretien du réseau de niveling par les triplets). Les informations concernant d'éventuels mouvements verticaux (en dehors des triplets) sont exclusivement obtenues via GNSS.

L'IGN a constaté que les PFA sont principalement utilisés en agglomération par ses clients. Les points hors agglomération ne servent guère. C'est pourquoi les PFA ne bénéficient plus d'un réel entretien que s'ils sont situés en zone habitée. Des triplets sont mis en place dans les localités comptant plus de 200 habitants, tout point habité devant être éloigné de moins de 5 km d'un triplet. Il s'agit de groupes d'au moins trois points de niveling existants (peu importe leur ordre) ou totalement nouveaux. Le lien avec le réseau altimétrique IGN69 n'est plus assuré par niveling que localement, au sein du groupe de points. Les différents points d'un triplet doivent être distants les uns des autres d'1 km au plus et la dénivelée entre



eux doit être inférieure à 30 m. Les triplets ne sont reliés entre eux que via GNSS et la surface de transformation RAFxx.

L'installation des triplets est précédée par la mise en place de stations dites pivot. Ces points de GNSS-nivellement durablement matérialisés sont proches de points de nivellement stables d'ordre supérieur et disposent d'une bonne visibilité GNSS. Ils sont par ailleurs distants de 5 km au plus d'une station RBF (Réseau de base français, points comparables à ceux du réseau MN95 suisse), afin que les lignes de base soient aussi courtes que possible. Des mesures GNSS sont effectuées sur les stations pivot durant 48 heures au moins, ces stations étant rattachées par nivellement à au moins 3 PFA.

Les triplets sont installés pendant les mesures sur la station pivot, non loin d'elle, la distance pivot – triplet ne devant pas excéder 15 km (avec une dénivellation maximale de 200 mètres). Une station de GNSS-nivellement temporaire (PGV, Point GPS village) est implantée pour cela à proximité des triplets (mesures GNSS durant 3 heures) et rattachée aux PFA environnants (une seule mire, en aller-retour).

Des mesures GNSS sont également effectuées durant 2 heures au moins sur la station RBF proche, pendant l'exécution des mesures sur la station pivot.

Les mesures GNSS du pivot sont traitées à l'aide du « logiciel bernois » (Bernese Software), par rapport aux stations du RGP (réseau GNSS permanent) dans un premier temps. La station RBF est fixe dans la solution GNSS définitive calculée pour tous les PGV. L'altitude normale d'un PGV est obtenue en faisant intervenir la surface de transformation RAFxx. Si des résidus GNSS-nivellement subsistent sur la station pivot, le rattachement au nivellement est prioritaire et le réseau local entier est décalé de la valeur correspondante.

On retrouve naturellement des différences sur les points des triplets entre les altitudes IGN69 publiées et celles déterminées via GNSS (+RAF). Elles sont corrigées à l'aide d'une moyenne pondérée (précision du nivellement : 2 mm, altitudes IGN69 publiées : 5 mm, altitude GNSS : 1 cm).

6.4.2. Modèles du quasi-géoïde / transformation altimétrique

En France, on établit une distinction entre les modèles du géoïde et les surfaces de transformation altimétrique. Tous les modèles sont calculés par l'IGN et mis gratuitement à la disposition des utilisateurs.

Les modèles du quasi-géoïde (désignation QGFxx) sont des modèles purement gravimétriques. Les derniers modèles sont QGF98 et QGF2016.

Les surfaces de transformation altimétrique (désignation RAFxx, Références des altitudes françaises) sont constituées par le quasi-géoïde contraint sur les points de GPS-nivellement (transformation linéaire plus collocation). Cela permet la transformation entre des altitudes ellipsoïdales RGF93 (correspondant à ETRF) et des altitudes normales IGN69. Le modèle actuel est RAF2018b. Ses prédecesseurs étaient RAF98, RAF09 et RAF2018.

6.4.3. La contribution de la France au REUN

La contribution classique de la France au nivellement européen REUN est constituée par les lignes du premier ordre du réseau IGN69, seules les différences de potentiel entre les nœuds ayant cependant été livrées. A cela s'ajoutaient quelques rares lignes d'ordres inférieurs pour les rattachements aux pays voisins (comme celle via le tunnel du Mont-Blanc). Seuls deux rattachements avec la Suisse sont inclus, à Bâle et à Genève.

Les données françaises ont toujours causé des problèmes assez importants dus à la présence des erreurs systématiques déjà citées. C'est d'ailleurs une des raisons qui ont conduit à la mesure du NIREF. Les données du NIREF ont été incluses pour la toute première fois dans le dernier calcul du REUN (EVRF2019), en plus des lignes du 1^{er} ordre répétées dans le nord du pays durant les années 1990. Le jeu de données n'en reste pas moins un réseau à mailles extrêmement lâches avec une très faible redondance et un très faible nombre de liaisons avec les pays limitrophes. C'est pourquoi l'ancien réseau du 1^{er} ordre complet a été contraint dans le NIREF et livré à EUREF. Les travaux concernant un jeu de données de transformation entre le NIREF et IGN69 se poursuivent encore.



6.5. Autriche

6.5.1. Le système altimétrique officiel

Le système altimétrique est officiellement appelé « sphäroidische Höhen des MGI (Militärgeografisches Institut) » (*altitudes sphéroïdales de l'Institut géographique militaire*). L'utilisation de la désignation « österreichische Gebrauchshöhen » (*altitudes usuelles autrichiennes*) est aussi courante.

Les altitudes sphéroïdales sont identiques aux altitudes normales orthométriques. Autrement dit, seules des pesanteurs normales (théoriques) sont utilisées pour la réduction gravimétrique, si bien que seule l'influence de l'aplatissement de l'ellipsoïde (sphéroïde) est prise en compte.

L'origine est le niveau moyen de la mer Adriatique au marégraphe de Trieste en 1875. C'est pourquoi les altitudes autrichiennes sont également indiquées par H.ü.A. (*Höhen über Adria, altitudes au-dessus de l'Adriatique*). Le marégraphe de Trieste ne pouvant plus être utilisé, c'est la station de Hutbiegel (au nord-ouest de Vienne) qui fait aujourd'hui office d'origine.

La première mesure du nivellation autrichien eut lieu entre 1873 et 1895 (avec des compléments jusqu'en 1912).

Des mesures de répétition du réseau furent effectuées à partir de 1948 sans qu'aucun changement ne soit apporté à la définition du système altimétrique. Le réseau se compose d'un nivellation de précision de 1^{er} ordre et d'un nivellation de précision de 2^{ème} ordre. La précision indiquée par le BEV est de 0.8 mm/km. Des incertitudes pouvant atteindre 2.0 mm/km viennent s'y ajouter, le réseau étant contraint en ses noeuds. Plus aucune mesure systématique de ligne n'est exécutée depuis 2018, toutes les lignes importantes ayant été observées à deux reprises au moins depuis 1948 (clôture en 2017 au Grossglockner). Aujourd'hui, des informations sur les modifications d'altitudes sont disponibles pour environ 5000 des 29 000 points fixes. Désormais, les travaux se limitent quasiment à des mises à jour locales et au remplacement de points détruits.

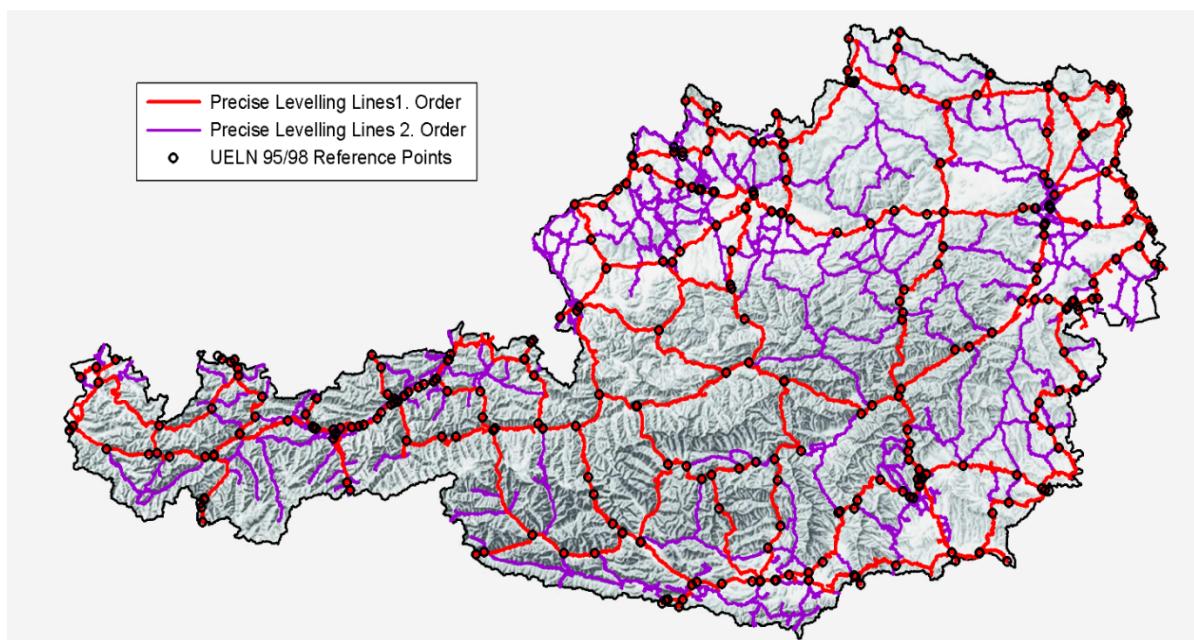


Figure 6-17 : le réseau de nivellation autrichien.

6.5.2. Altitudes orthométriques, altitudes normales

En Autriche, on part des cotes géopotentielles de la solution UELN 95/98 du nivellation européen pour calculer des altitudes orthométriques et des altitudes normales (non officielles). Ces altitudes se réfèrent

donc au marégraphe d'Amsterdam. Des cotes géopotentielles et des altitudes orthométriques sont disponibles aujourd'hui pour tous les points fixes altimétriques, mais elles ne sont fournies qu'à la demande.

6.5.3. Transformations, géoïde

Pour la transformation entre les altitudes usuelles et les altitudes orthométriques, l'approche suisse (*HTRANS*) a quasiment été reprise telle quelle en Autriche. Cela signifie que la différence est scindée en deux composantes, l'une dépendant de la planimétrie (altitudes usuelles moins altitudes normales) et l'autre de l'altimétrie (altitudes normales moins altitudes orthométriques). Pour la diffusion aux utilisateurs, les deux composantes sont cependant réunies au sein d'une grille applicable à la surface terrestre. Cette surface de transformation a une résolution de 15x22 secondes d'arc (environ 500 mètres).

Le modèle du géoïde autrichien actuel date de 2008 et a été calculé par l'université technique (TU) de Graz à l'instar des modèles qui l'ont précédé. Il combine des déviations de la verticale, des valeurs gravimétriques et de GNSS-nivellement. Il est remis gratuitement (par Land) aux utilisateurs sous la forme d'une grille de 2.5x1.5 minutes d'arc (environ 2.7 km).

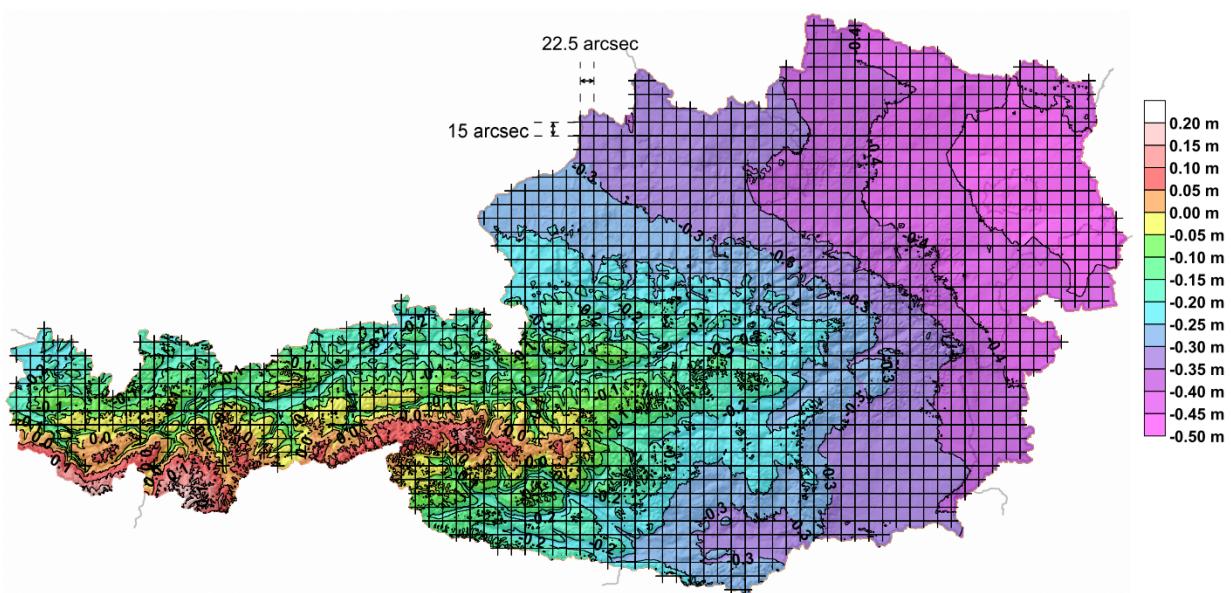


Figure 6-18 : différences altitudes usuelles (Adriatique) moins altitudes orthométriques (Amsterdam)

6.6. Italie

Le système altimétrique officiel italien est appelé « Rete di livellazione di alta precisione / Rete di livellazione fondamentale » (Di Sclafani et al., 2016). Sa désignation abrégée est « GE42 » pour « Genova 1942 ».

6.6.1. Rappel historique

Le premier niveling de précision appelé « Rete Antica » fut mesuré de 1878 à 1905 environ. Près de 7000 km au total (1^{er} ordre) furent nivelés, avec un PFA tous les kilomètres environ. Un réseau de 2^{ème} ordre, long de près de 15 000 km, fut mesuré immédiatement après.

Un nouveau réseau, baptisé GE42 « Rete Moderna », fut mesuré de 1948 à 1971. Il comprenait 36 polygones fermés d'une longueur totale d'environ 13 000 km. GE42 indique la référence : le niveau du marégraphe de Gênes (Genova) en 1942. Officiellement, GE42 est un système orthométrique, mais aucune correction gravimétrique n'ayant été entreprise, il s'agit d'un système d'altitudes usuelles comme en Suisse.



Une deuxième mesure du réseau est en cours depuis 1997. La nouvelle mesure tire notamment sa justification du grand nombre de points détruits. La structure du réseau est très proche de celle de la première mesure, quelques lignes de densification ayant toutefois été ajoutées. Il en résulte une longueur totale de l'ordre de 22 000 km. Le projet n'est pas encore complètement achevé. 18 000 km environ avaient été mesurés en 2016. Rien n'a été modifié à la définition du système altimétrique et les mesures ont été contraintes en un nombre relativement élevé de valeurs de GE42, ce qui explique aussi le nom de GE42 (2019) (soit Genova 1942, réalisation de 2019).

Les valeurs caractéristiques principales de GE42 (1971) et GE42 (2019) sont les suivantes :

Système	GE42 (1971) « Rete Moderna »	GE42 (2019)
Période de mesure	1948 –1971	Depuis 1997
Ampleur	36 polygones fermés, 100 lignes, 13 000 km (rattachements aux pays voisins compris)	38 polygones (principaux), 22 000 km
Points fixes altimétriques	13 000 points, distants d'1 km en moyenne	22 000 points, distants d'1 km en moyenne
Origine	Marégraphe de Gênes (Genova) niveau en 1942 (moyenne des mesures de 1937 à 1946, date de référence : 1 ^{er} janvier 1942).	Inchangée, marégraphe de Gênes
Système altimétrique	Officiellement un système orthométrique, mais la gravimétrie n'est pas prise en compte. C'est donc un système d'altitudes usuelles comme NF02 en Suisse.	Inchangé, système d'altitudes usuelles
Précision	1.3 mm/km	1.6 mm/km (lignes principales), 1.8 mm/km (lignes de densification)

6.6.2. Mise en place de GE42

En 1940, l'Institut géographique militaire (IGM) se vit confier pour tâche de mesurer un nouveau réseau altimétrique. De nombreuses anciennes chevilles avaient disparu et les mouvements verticaux devenaient un problème grandissant.

Si les mesures démarrèrent bien en 1941, la guerre y mit rapidement un terme et elles ne reprirent qu'en 1948. Les mesures furent achevées en 1971.

Le réseau altimétrique national se compose exclusivement des lignes principales aujourd'hui. Des lignes d'ordre inférieur existent ici ou là, mais elles sont entretenues par les provinces ou par des organisations privées. Elles ne font donc pas partie de la mensuration nationale.

À des fins scientifiques et dans le cadre de la contribution au REUN, des valeurs gravimétriques furent aussi mesurées pour le nivelllement de précision italien à partir de 1955 (tous les 3 km en plaine, tous les 1 à 2 km en montagne). Ces mesures (sur 5000 points environ) furent également achevées en 1972. La valeur de la pesanteur fut obtenue par interpolation sur les autres PFA. Des cotes géopotentielles (et des altitudes dynamiques) furent calculées à partir de là, mais ne trouvèrent jamais à s'appliquer en pratique.

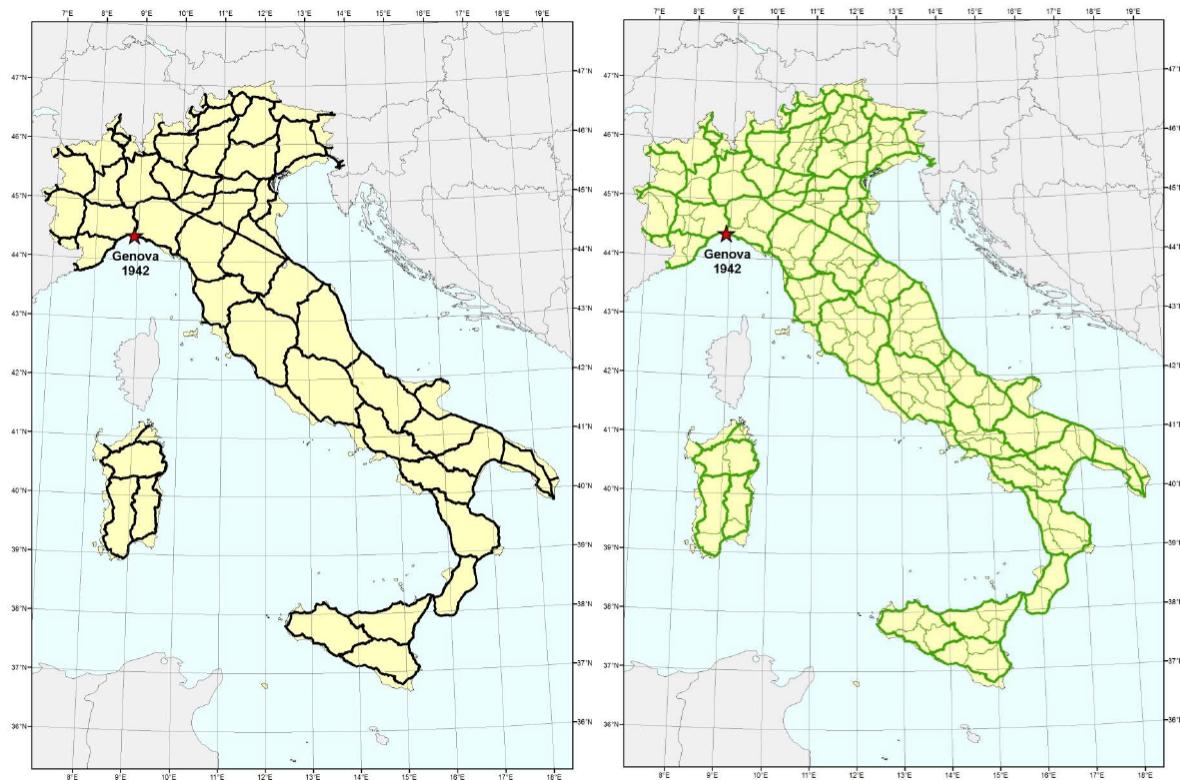


Figure 6-19 : lignes principales de GE42 et plan des nouvelles mesures.

6.6.3. Renouvellement du réseau

L'IGM décida de renouveler le réseau en 1997. Le problème principal résidait dans le grand nombre de points détruits. Toutes les lignes existantes devaient être remesurées et complétées par de nouvelles lignes de densification. Une longueur totale d'environ 22 000 km devait être nivélée à nouveau. Au départ, cette tâche devait être achevée en 2013, mais elle ne l'est toujours pas totalement aujourd'hui (statut en 2016 : 18 000 km mesurés). A proximité de la Suisse, toutes les lignes ont cependant été remesurées (hormis Bormio – Livigno – Punt dal Gall). Dans certaines provinces, les mesures n'ont pas été effectuées par l'IGM lui-même, mais ont été déléguées aux administrations locales (avec des directives très précises de l'IGM et une participation financière conséquente de ce dernier).

Les mesures gravimétriques n'ont pas été systématiquement renouvelées. Les valeurs ont été interpolées à partir du jeu de données existant. Certaines provinces (le Haut-Adige par exemple) ont toutefois réalisé des mesures gravimétriques.

Le système altimétrique n'a pas été modifié lors de ce renouvellement. L'Italie continue à exploiter un système (statique) d'altitudes usuelles. Un nombre relativement élevé de points de l'ancien réseau ont été maintenus fixes lors du nouveau calcul et les nouvelles mesures ont été contraintes en ces points. Le fait que le système n'ait pas changé transparaît également dans son nom, à savoir GE42 (2018) (ou GE42 (2019) dans d'autres documents).

Des cotes géopotentielles, des altitudes orthométriques et des altitudes normales sont aussi calculées à des fins scientifiques (généralement par le Politecnico di Milano).

6.6.4. Modèles du géoïde

En Italie, le Politecnico di Milano calcule des modèles du quasi-géoïde gravimétriques et hybrides (avec du GNSS-nivellement). Les derniers modèles en date sont ItalGeo95, ItalGeo2000 (ou ItalGeo1999) et ItalGeo05. ItalGeo2020 est en préparation. La diffusion de ces modèles est assurée par l'IGM.



Aujourd’hui, le modèle du géoïde officiel est ItalGeo2005. Il en existe deux versions. L’une est une solution purement gravimétrique, tandis que l’autre a été adaptée aux points de GPS-nivellement et permet une transformation des altitudes officielles italiennes en ETRS89 avec une précision de l’ordre de 3 cm. Les modèles du géoïde italiens sont payants pour les clients finaux.

Le modèle GISGEO2012 existe encore, parallèlement à cela. Il est né dans le cadre du projet transfrontalier HELIDEM (POLIMI/SUPSI/swisstopo) et porte sur la zone frontalière entre la Suisse et l’Italie.

6.6.5. Contribution de l’Italie au REUN

L’Italie a livré les cotes géopotentielles de tous les nœuds et de tous les rattachements aux pays voisins du réseau initial GE42(1971). Elle compléta sa livraison en 2018 en transmettant une partie des lignes nouvellement mesurées dont certaines purent encore être prises en compte pour le calcul d’EVRF2019.

6.7. Nouvelle-Zélande

NZVD2016 est le système altimétrique néo-zélandais. Les informations du présent paragraphe sont issues d’Amos (2010) ainsi que du site Internet officiel du système altimétrique néo-zélandais⁸.

6.7.1. Le système initial

Jusqu’à fort récemment, la Nouvelle-Zélande n’avait pas de système altimétrique national. Elle disposait de 13 systèmes altimétriques locaux au total (LVD, local vertical datum) qui se basaient tous sur des repères locaux.

Ces repères étant pour partie situés à l’embouchure de fleuves, ils ne se prêtent pas particulièrement bien à la réalisation du niveau moyen de la mer. Une conséquence sont les décalages atteignant parfois plusieurs décimètres entre les différents LVD.

Le réseau de nivellation de précision s’étend sur près de 16 000 km en tout. La précision moyenne est de 2 mm/km. Les mesures débutèrent vers 1960. On densifia le réseau par un nivelllement trigonométrique et une détermination barométrique d’altitudes dans les régions particulièrement difficiles d’accès.

Aucune mesure gravimétrique ne fut effectuée, mais des corrections normales orthométriques furent apportées.

Les réseaux partiels furent parfois reliés les uns aux autres. Les points de liaison se voyaient alors associer deux altitudes différentes. Du fait des erreurs de mesure et de la correction normale orthométrique appliquée, les réseaux partiels ne sont pas séparés les uns des autres par un simple décalage, si bien que la réunification des LVD au sein d’un système national s’est révélée impossible.

⁸ <https://www.linz.govt.nz/data/geodetic-system/datums-projections-and-heights/vertical-datums/new-zealand-vertical-datum-2016-nzvd2016>

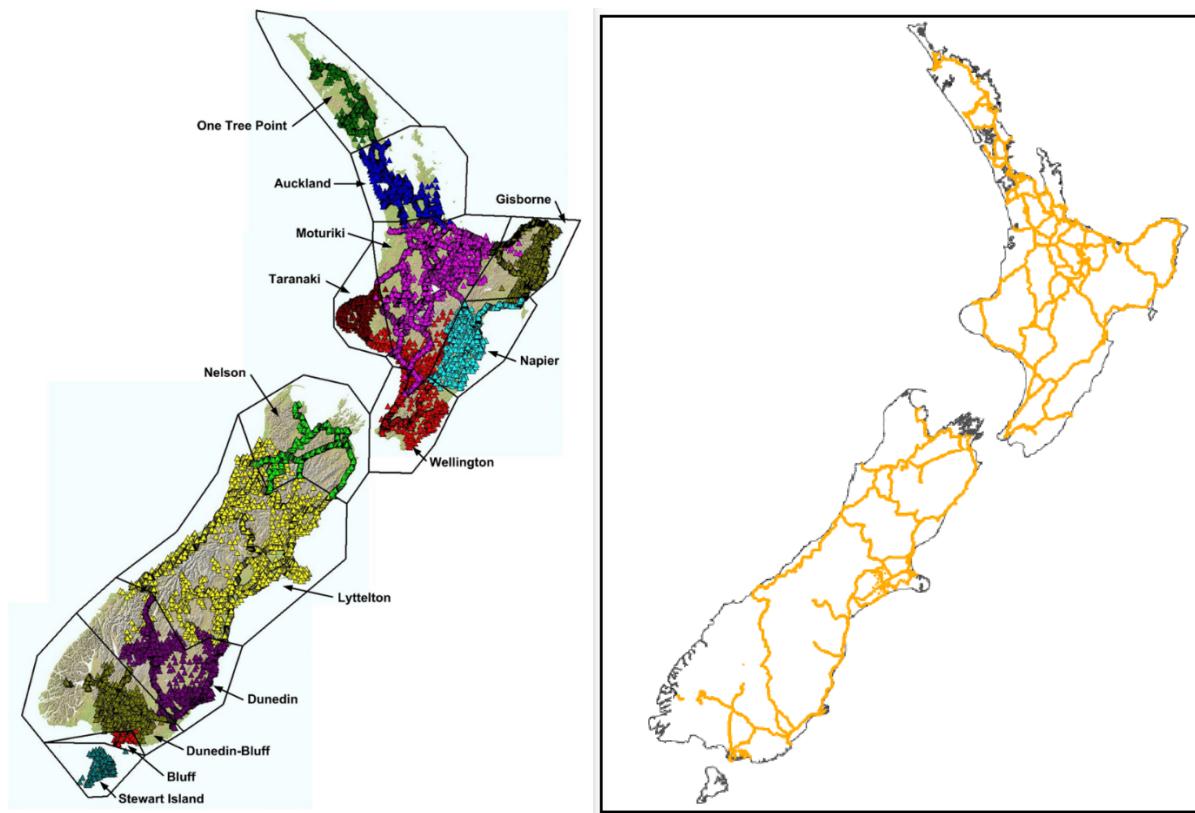


Figure 6-20 : les systèmes altimétriques locaux (LVD) avant 2009 et le réseau de nivellation.

La Nouvelle-Zélande est marquée par une forte activité tectonique. Les séismes et les éruptions volcaniques, mais aussi les activités d'origine anthropique (forages pour la géothermie) sont susceptibles de modifier des altitudes de plusieurs mètres. Dans la durée, les mouvements purement dus aux activités tectoniques sont de l'ordre de 1 cm/an. Ces modifications altimétriques sont très peu connues à l'échelle nationale. La détermination de mouvements verticaux a presque exclusivement lieu via GNSS.

Ces mouvements réduisent fortement la valeur du nivellation en l'espace de quelques années à peine.

Près de 1400 points de GPS-nivellement furent mesurés à partir des années 1990. Il s'agissait surtout de rendre le GNSS pleinement opérationnel en pratique pour la mensuration. On échoua cependant à atteindre l'objectif visé (la détermination de surfaces de transformation entre les LVD et les altitudes ellipsoïdales) à cause des mouvements verticaux (soulèvement continu dans le temps ou sauts soudains dus à des séismes ?).

Une refonte complète du système altimétrique s'ensuivit.

6.7.2. NZVD2009

Une nouvelle mesure du réseau de nivellation n'entrant pas en ligne de compte, non seulement pour des raisons financières, mais aussi parce que les mouvements verticaux feraient à nouveau perdre sa valeur au nivellation au bout de quelques années. En outre, le système altimétrique devait aussi être accessible dans les zones les plus reculées, objectif parfaitement inatteignable par du nivellation.

C'est pourquoi on décida de baser le nouveau système altimétrique uniquement sur un modèle du géoïde (et sur des altitudes ellipsoïdales). Une idée importante ici était le fait que les effets des mouvements verticaux portent essentiellement sur les altitudes physiques et ellipsoïdales, le géoïde n'étant quasiment pas affecté par les séismes et les autres mouvements tectoniques.

Il s'agissait du premier système altimétrique national en Nouvelle-Zélande qui était aussi le premier pays au monde à n'introduire qu'un géoïde pour la définition de son système altimétrique.



NZVD2009 reste fondamentalement un système normal orthométrique. En d'autres termes, la correction normale orthométrique reste apportée pour des nivellements locaux.

C'est toutefois le modèle du quasi-géoïde NZGeoid2009 qui sert de surface de référence effective pour la détermination des altitudes. Celui-ci est compatible avec les altitudes normales et aux dires des auteurs, les différences par rapport à un système normal orthométrique sont négligeables, tout au moins localement.

Désormais, il faut d'abord déterminer une altitude ellipsoïdale actuelle sur un point de rattachement connu avant de pouvoir déterminer des altitudes.

La transformation vers les anciens LVD est effectuée au moyen de simples décalages constants.

Les LVD et NZVD2009 pouvaient être utilisés en parallèle par les autorités locales.

6.7.3. NZVD2016

NZVD2016 le système altimétrique officiel en Nouvelle-Zélande depuis 2016.

Le renouvellement tirait sa justification de certaines faiblesses de NZVD2009, notamment la précision du modèle du géoïde NZGeoid2009. Les mesures gravimétriques existantes étaient pour partie anciennes et très irrégulièrement réparties. En outre, le décalage utilisé pour la transformation vers les LVD était trop imprécis.

C'est pourquoi on décida de doter le pays entier de mesures gravimétriques actuelles, réalisées par aéro-gravimétrie. Les lignes survolées en 2013 et en 2014 couvraient une distance cumulée de 50 000 km.

Un modèle du quasi-géoïde NZGeoid2016 amélioré en résulte, d'une précision de l'ordre de 3 cm.

A présent, la transformation vers les LVD est effectuée au moyen de plans inclinés, ce dont résulte une précision de transformation de 1 à 2 cm dans la majeure partie du pays.

NZVD2016 reste un système normal orthométrique.



Figure 6-21 : aérogravimétrie en Nouvelle-Zélande en 2013 – 2014.



6.8. Suède

Le présent paragraphe se base principalement sur Svensson et al. (2006).

6.8.1. Définition du système altimétrique

Le système altimétrique suédois (RH2000) est une réalisation du système altimétrique vertical européen (EVRS) à l'époque $t = 2000.0$, à quelques petites différences près. Il remplace RH70, l'ancien système officiel basé sur des mesures de nivellation effectuées entre 1951 et 1967⁹.

RH2000 est d'un système d'altitudes normales zero-tide. Le référencement à la valeur de l'équipotentielle de référence $W_{0,EVRS}$ s'est fait indirectement par le rattachement du réseau de nivellation au marégraphe d'Amsterdam (NAP, Normaal Amsterdam Peil). La définition du système RH2000 (qui est plutôt un cadre de référence) n'est pas rigoureusement une réalisation du système EVRS car deux définitions supplémentaires spécifiques y sont ajoutées :

1. une époque de référence y est définie ($t = 2000.0$)
2. un modèle de rebond postglaciaire (NKG2005LU) est défini afin de pouvoir réduire les mesures à l'époque de référence ($t = 2000.0$). Le modèle de rebond postglaciaire (NKG2005LU) est une combinaison entre un modèle géophysique et un modèle basé sur des mesures géodésiques. Concrètement, le produit final est une grille de vitesses verticales sur l'ensemble des pays nordiques.

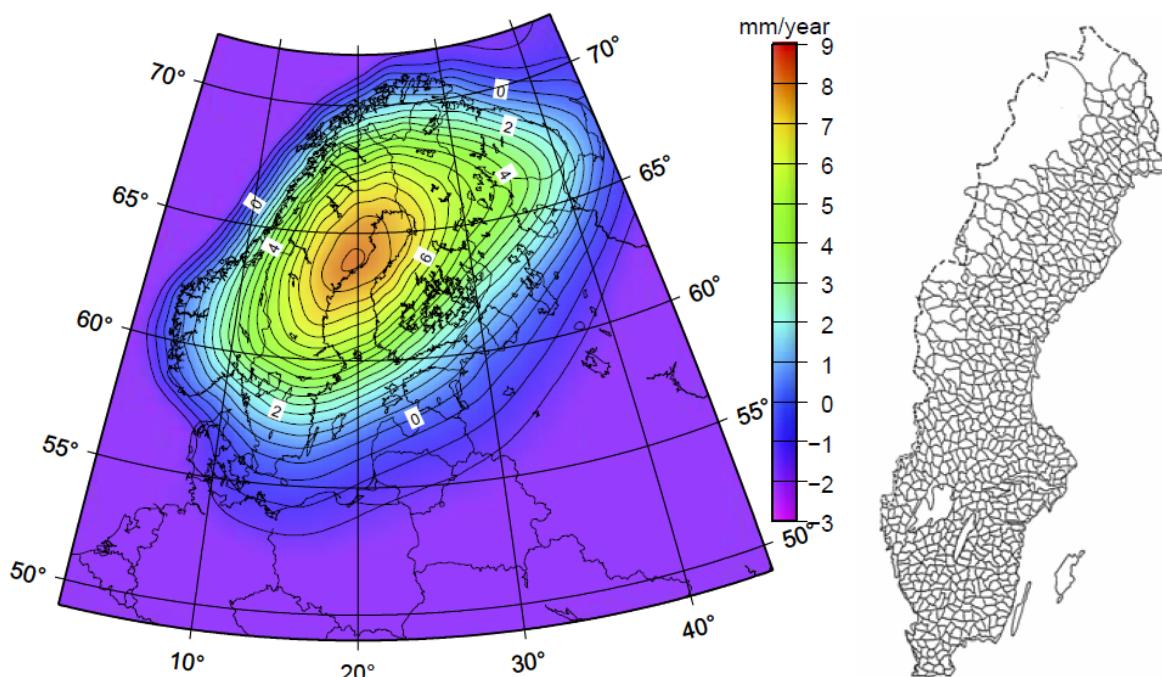


Figure 6-22 : déplacements verticaux selon le modèle cinématique NKG2005LU, en mm/an (à gauche) et réseau du troisième nivellation de précision, 1979 – 2003 (à droite). Source : Svensson et al. (2006)

⁹ <https://www.lantmateriet.se/contentassets/4202802253364edca62359a102390999/overview-of-swedish-reference-systems.pdf> (28.04.2022)



6.8.2. Mesures et ajustement de RH2000

Ce cadre de référence RH2000 est une détermination des altitudes normales d'environ 50 000 points matérialisés. Ces altitudes ont été déterminées uniquement à partir de mesures de niveling motorisé réalisées entre 1979 et 2003 (avec une précision indiquée à $1\text{mm}/\sqrt{\text{km}}$). L'ajustement s'est fait sur les cotes géopotentielles issues du niveling motorisé et des mesures gravimétriques. La nature des mesures gravimétriques n'est pas précisée.

6.8.3. Modèle du quasi-géoïde

Un modèle du quasi-géoïde (SWEN 05LR) a été publié avec le système altimétrique RH2000. Ceci, afin de pouvoir déterminer des altitudes normales RH2000 via les altitudes ellipsoïdales (GNSS) du système de référence local suédois SWEREF99. Ce modèle du quasi-géoïde est déterminé en ajustant (par collocation selon les moindres carrés) un modèle du quasi-géoïde gravimétrique (NKG 2004) à un ensemble de 1178 anomalies altimétriques déterminées par GNSS-nivellement :

$$\zeta = h_{\text{SWEREF99}} - H_{\text{RH2000}} \quad (6.3)$$

Ainsi, il serait plus correct de dénommer le modèle du quasi-géoïde (SWEN 05LR) comme un modèle de référence altimétrique. La précision annoncée est de 3-4 cm et probablement plus dans les régions montagneuses.

6.8.4. Implémentation du nouveau système RH2000 (statut 2006)

Il existe un nombre considérable de systèmes de référence altimétrique locaux. Quasiment chaque municipalité à son système. Sur 290 municipalités, 4 ont adopté le système RH2000, 45 sont en train d'étudier le passage à RH2000. La tendance serait, semble-t-il, à l'adoption du RH2000 par de plus en plus de municipalités. Néanmoins, il est précisé qu'il est indispensable que le service de géodésie fournit au moins des outils pour transformer les altitudes locales en RH2000.



6.9. Résumé

Pays	Système	Référence / marégraphe	Système des marées	Type d'altitudes	Réalisation	Modèle cinématique	Modèle du géoïde / quasi-géoïde	Dissémination	Compatibilité
États-Unis	NAPGD2022	W_0 fixé	Tide-free	Orthométriques	Géoïde gravitationnel, y compris par aérogravimétrie	Oui, y compris un géoïde cinématique	Géoïde gravitationnel	Uniquement par GNSS	-
Norvège	NN2000	Amsterdam	Zero-tide	Normales	Nivellement	Oui, modèle de rebond postglaciaire NKG2005LU	HREF ¹	Points fixes et GNSS	RH2000, N2000
Allemagne	DHHN2016	Amsterdam	Mean-tide	Normales	Nivellement	Non	GCG2016 (HREF ¹)	Points fixes et GNSS	EVRF2000
France	NGF-IGN69	Marseille	Non définies (Mean-tide)	Normales	Nivellement, mise à jour par GNSS/quasi-géoïde	Non	RAF2018b (HREF ¹)	Points fixes et GNSS	-
Autriche	IGM	Trieste	Non définies (Mean-tide)	Normales orthométriques	Nivellement	Les informations concernant les mouvements verticaux sont disponibles, mais elles ne sont pas utilisées pour les altitudes officielles.	Geoid 2008 (GEOnAUT) et HREF ¹ pour les altitudes usuelles	Points fixes et GNSS	-
Italie	GE42 (2019)	Gênes	Non définies (Mean-tide)	Usuelles	Nivellement	Non	Géoïde gravitationnel Ital-Geo2005 et HREF ¹	Point fixes et GNSS	-
Nouvelle-Zélande	NZVD2016	NZGeoid2016	Non définies (Mean-tide)	Normales orthométriques ²	Géoïde gravitationnel, y compris par aérogravimétrie	Hypothèse d'un géoïde statique, les points n'ont pas d'altitude fixe	Quasi-géoïde gravitationnel	Uniquement par GNSS	-
Suède	RH2000	Amsterdam	Zero-tide	Normales	Nivellement	Oui, modèle de rebond postglaciaire NKG2005LU	SWEN 05LR (HREF ¹)	Points fixes et GNSS (pas de mention explicite dans le rapport)	EVRF2000

¹HREF = Height Reference Surface = géoïde ou quasi-géoïde non purement gravitationnel (souvent adapté à des mesures de nivellation).

²Localement, les différences avec des altitudes normales (issues du quasi-géoïde) sont négligeables (selon les auteurs).



7. Conclusions

Parmi les différents types d'altitudes présentés au chapitre 2, seules les altitudes physiques répondent aux exigences d'un système de référence altimétrique moderne. Parmi les altitudes physiques, les altitudes orthométriques et les altitudes normales répondent le mieux aux exigences pratiques et théoriques actuelles.

Dans tous les cas, un système de référence altimétrique moderne sera basé sur des cotes géopotentielles, permettant de calculer tant des altitudes normales que des altitudes orthométriques.

D'autres aspects théoriques de la définition d'un système de référence altimétrique, comme le système des marées, n'ont que peu d'impact sur les utilisatrices et les utilisateurs, mais doivent être définis rigoureusement, afin d'éviter des problèmes de compatibilité avec les systèmes de référence internationaux.

7.1. Le système altimétrique Suisse

Le système altimétrique officiel en vigueur en Suisse est NF02. Les altitudes officielles se basent sur des mesures de nivellation effectuées dans la deuxième moitié du 19^e siècle. Ces altitudes présentent des différences de 20 à 40 cm par rapport aux altitudes orthométriques RAN95. RAN95 est un système d'altitudes physiques, basé sur des cotes géopotentielles. Or, RAN95 n'a jamais été officiellement introduit.

7.2. Les systèmes de référence altimétrique européen et mondial

Plusieurs initiatives internationales d'unification des systèmes altimétriques sont en cours. Le système de référence vertical européen (EVRS) est basé sur l'échange de données de nivellation et sur un calcul centralisé auprès du BKG. Le système de référence altimétrique international (IHRS) suit une autre stratégie. Sous l'égide de l'Association internationale de géodésie (IAG), les pays membres s'accordent sur des standards numériques et des conventions de calcul, ce qui permet à chaque pays de réaliser des altitudes dans l'IHRS. Des modèles globaux du géoïde sont une des composantes importantes à cette fin.

7.3. Comparaison internationale

Un certain nombre de pays ont récemment changé de système de référence altimétrique ou de cadre de référence altimétrique. Les objectifs de ces changements sont l'unification et l'amélioration de la précision. Ainsi, les États-Unis d'Amérique ont installé un système altimétrique unique couvrant tous les territoires nationaux. La majorité des pays ayant récemment changé opte pour des altitudes normales. En fonction des spécificités nationales, la réalisation s'appuie sur des mesures de nivellation.

La Nouvelle-Zélande ainsi que les États-Unis d'Amérique ont radicalement renoncé à des mesures de nivellation dans la réalisation de leur système. En Nouvelle-Zélande, la cinématique est si importante, que les premières mesures de nivellation deviendraient obsolètes après quelques années, donc potentiellement avant la fin de la mesure complète du réseau. La cinématique est présumée n'affecter que les altitudes ellipsoïdales et non les cotes du géoïde, considérées comme étant statiques.

Aux États-Unis d'Amérique, les coûts de mesure et d'entretien du réseau de nivellation sont le principal argument pour renoncer à un nivellation national. De plus, des mesures terrestres ne permettent pas de raccorder les territoires outre-mer. Des mesures aérogravimétriques sont mises en œuvre afin d'échantillonner le territoire avec une densité spatiale suffisante.

Un modèle cinématique, sous une forme ou une autre, est également considéré par la plupart des pays ayant récemment passé à un nouveau système ou cadre. Soit un modèle cinématique s'est imposé naturellement à cause de la forte cinématique, comme dans les pays nordiques, soit des arguments de longévité du cadre de référence sont mis en avant.





8. Recommandations

Le groupe de travail recommande de poursuivre les investigations en lien avec un changement de système de référence altimétrique en Suisse. Les prochaines étapes sont :

1. Définition de l'orientation stratégique portant sur l'affinement du système RAN95 ou sur le développement d'un nouveau système altimétrique en étroite coordination avec les standards européens ou internationaux.
2. Dans le cas où l'orientation choisie est le développement d'un nouveau système de référence altimétrique, étude des conventions numériques et définitions des conventions numériques pour le futur système de référence altimétrique suisse.
3. Evaluation et tests de logiciels scientifiques, notamment pour le calcul du géoïde. Le logiciel de détermination du géoïde doit correctement implémenter les conventions numériques retenues (RAN95 ou nouveau système).
4. Développement d'une stratégie de réalisation du nouveau cadre de référence altimétrique en assurant une bonne distribution des points, une densité adéquate et un entretien efficace.
5. Développement de la méthodologie de transformation altimétrique vers le nouveau système, y compris une estimation de la précision des altitudes transformées.
6. Etude d'un concept de modélisation numérique des informations planimétriques et altimétriques afin de gérer systématiquement et de manière efficiente les systèmes/cadres de référence et époques de détermination des coordonnées et des altitudes en Suisse. Par contre, il n'y a pas lieu de définir maintenant les stratégies de gestion dynamique des informations planimétriques et altimétriques.

Ces travaux peuvent se faire en parallèle à l'évaluation, par l'HEIG-VD, du rapport bénéfice-coût d'un changement de système de référence altimétrique. C'est ce rapport bénéfice-coût qui conditionnera le choix de changer ou non de système officiel de référence altimétrique en Suisse.

Même si le nouveau système n'est pas introduit comme système officiel, les travaux proposés seront bénéfiques pour swisstopo. Ils permettront de moderniser le système de référence altimétrique scientifique (qui est actuellement RAN95) afin d'appuyer le maintien du système officiel, la détermination du géoïde, les travaux d'infrastructure d'envergure ou encore les applications scientifiques.





Bibliographie

- AdV. (2018). Die Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes und der einheitliche integrierte geodätische Raumbezug 2016. Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland.
- Amos M. (2010). New Zealand Vertical Datum 2009. New Zealand Surveyor, No. 300.
- Angermann D, Gruber T, Gerstl M, Heinkelmann R, Hugentobler U, Sánchez L, Steigenberger P. (2020). Bureau of Products and Standards: Inventory of standards and conventions used for the generation of IAG products. The Geodesists Handbook 2020. Journal of Geodesy, 94, 221–223.
- Commission Géopositionnement. (2016). Rapport Final du Groupe de Travail sur la révision du décret de 2006 sur les références géodésiques. Conseil national de l'information géographique.
- Di Sclafani N, Maseroli R, Palmieri F, Russo P. (2016). Determinazione delle reti altimetriche nella provincia autonoma di Bolzano. Bollettino della società italiana di fotogrammetria e topografia, 23-35.
- Ehrnsperger W, Kok JJ. (1986). Status and Results of the 1986 Adjustment of the United European Levelling Network - UELN - 73. In: Pelzer H, Niemeier W (eds), Symposium on Height Determination and Recent Vertical Crustal Movements in Western Europe. Ferd. Dümmler Verlag, Bonn, University of Hannover.
- Ekman M. (1979). The stationary effect of moon and sun upon the gravity of the earth, and some aspects of the definition of gravity. Uppsala University, Geodetic Institute, Report 5.
- Ekman M. (1989). Impacts of geodynamic phenomena on systems for height and gravity. Bulletin géodésique, 63, 281-296.
- Ekman M. (1996). The permanent problem of the permanent tide: What to do with it in geodetic reference systems? Marées terrestres (Bruxelles), 125, 9508-9513.
- Grotti J, Koller S, Vogt S, Häfner S, Sterr U, Lisdat C, Denker H, Voigt C, Timmen L, Rolland A, Baynes FN, Margolis HS, Zampaolo M, Thoumany P, Pizzocaro M, Rauf B, Bregolin F, Tampellini A, Barbieri P, Zucco M, Costanzo GA, Clivati C, Levi F, Calonico D. (2018). Geodesy and metrology with a transportable optical clock. Nature Physics, 14, 437-441. doi: <https://doi.org/10.1038/s41567-017-0042-3>.
- Hilfiker J. (1902). Untersuchung der Höhenverhältnisse der Schweiz im Anschluss an den Meereshorizont. Landestopographie L+T, Bern.
- Hirsch A, Plantamour E. (1891). Nivellement de précision de la Suisse / exécuté par la Commission géodésique fédérale ; sous la dir. de A. Hirsch et E. Plantamour. H. Georg, Genève.
- Ihde J, Augath W. (2003). The Vertical Reference System für Europe. In: Annoni A, Luzet C, Gubler E, Ihde J (eds), Map Projections for Europe. Institute for Environment and Sustainability, European Communities 2003.
- Ihde J, Augath W, Sacher M. (2002). The vertical reference system for Europe. In: Vertical Reference Systems. Springer, pp. 345-350.
- Ihde J, Mäkinen J, Sacher M. (2008). Conventions for the definition and realization of a european vertical reference system (EVRS). EVRS conventions 2007.
- International Association of Geodesy. (1983). Resolution N° 16. In: Resolutions adopted by the International Association of Geodesy at the XVIIIth IUGG General Assembly, Hambourg.
- International Association of Geodesy. (2015). Resolution 1: Definition and Realization of an International Height Reference System (IHRS) In: IAG Resolutions adopted by the IAG Council at the XXVIth IUGG General Assembly, Prague.
- Lysaker DI, Vestøl O. (2020). The Norwegian vertical reference frame NN2000. In: Norwegian Mapping Authority (ed), Technical report of the Norwegian Mapping Authority.
- Marti U. (2016). Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz 'LV95' - Das Geoid der Schweiz 2004 „CHGeo2004“. Federal Office of Topography, Wabern, Switerzland.
- Moritz H, Hofmann-Wellenhof B. (2006). Physical geodesy. Springer, Wien, New York.



- National Geodetic Survey. (2017a). Blueprint for 2022, Part 1: Geometric Coordinates. In: NOAA (ed), NOAA Technical Report.
- National Geodetic Survey. (2017b). Blueprint for 2022, Part 2: Geopotential Coordinates. In: NOAA (ed), NOAA Technical Report.
- National Geodetic Survey. (2019). Blueprint for 2022, Part 3: Working in the Modernized NSRS. In: NOAA (ed), NOAA Technical Report.
- Remmer O. (1986). The United European Levelling Network – Present State and Future Plans. In: Pelzer H, Niemeier W (eds), Symposium on Height Determination and Recent Vertical Crustal Movements in Western Europe. Ferd. Dümmler Verlag, Bonn, University of Hannover.
- Saaranen V, Lehmuskoski P, Rouhiainen P, Takalo M, Mäkinen J. (2007). The new Finnish height system N2000. In: Proceeding of the EUREF Symposium, Riga, 14–17 June 2006.
- Sacher M, Ihde J, Liebsch G, Mäkinen J. (2008). EVRF2007 as Realization of the European Vertical Reference System. In: Symposium of the IAG Sub-commission for Europe (EUREF). EUREF, Brussels, pp. 25 - 50.
- Sacher M, Lang H, Ihde J. (1999). Status and Results of the Adjustement and Enlargement of the United European Levelling Network 1995 (UELN-95). EUREF Publication No. 7.
- Sacher M, Liebsch G. (2019). EVRF2019 as new realization of EVRS. In: Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF). EUREF, Tallinn.
- Sánchez L, Ågren J, Huang J, Wang YM, Mäkinen J, Pail R, Barzaghi R, Vergos GS, Ahlgren K, Liu Q. (2021). Strategy for the realisation of the International Height Reference System (IHRS). Journal of Geodesy, 95, 33. doi: 10.1007/s00190-021-01481-0.
- Schlatter A. (2007). Das neue Landeshöhenhennet der Schweiz LHN95. Schweizerische Geodätische Kommission, Zürich, Switzerland.
- Schlatter A, Brockmann E, Signer T, Wiget A, Wysser K. (2001). Konzept- und Machbarkeitsstudie zu HFP2-Netzen im heutigen Umfeld. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik VPK, 99, 169 - 175.
- Schlatter A, Marti U. (2007). Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz 'LV95'. Teil 12: Landeshöhenhennet 'LHN95': Konzept, Referenzsystem, kinematische Gesamtausgleichung und Bezug zum Landesnivelllement 'LN02'. In: Berichte aus der L+T (Landestopografie), Wabern, Switzerland.
- Schlatter A, Mattli B, Kistler M. (2005). CHGeoid2003: GPS/Nivellement Rekognosierung, Versicherung, Nivellement-Anschlussmessungen und Punktdokumentation. swisstopo, Wabern.
- Schneider D, Gubler E, Marti U, Gurtner W. (1995). Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz 'LV95' - Terrestrische Bezugssysteme und Bezugsrahmen. Federal Office of Topography, Wabern, Switerzland.
- Svensson R, Ågren J, Olsson P-A, Eriksson P-O, Lilje M. (2006). The New Swedish Height System RH 2000 and Geoid Model SWEN 05LR. In: XXIII FIG Congress. FIG, Munich, Germany.
- Torge W, Müller J. (2012). Geodesy. de Gruyter.
- Vanicek P, Krakiwski E. (1986). Geodesy: the Concepts. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.
- Wicki F, Signer T, Messmer W. (2002). Das Höhensystem für die amtliche Vermessung und weitere raumbezogene Daten. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 100, 2.
- Wirth B. (1990). Höhensysteme, Schwerepotentiale und Niveauflächen: Systematische Untersuchungen zur zukünftigen terrestrischen und GPS-gestützten Höhenbestimmung in der Schweiz. Schweizerische Geodätische Kommission, Zürich, Switzerland.



Liste des figures

Figure 2-1 : altitude ellipsoïdale h d'un point P, altitude orthométrique H et cote du géoïde N en ce point.....	11
Figure 2-2 : lien entre surface, telluroïde et ellipsoïde (à gauche) et entre surface, quasi-géoïde et ellipsoïde (droite). Source : Moritz and Hofmann-Wellenhof (2006).....	13
Figure 2-3 : différence entre une altitude normale mean-tide et une altitude normale zero-tide selon les conventions EVRF.	16
Figure 3-1 : Nivellement de précision de la Suisse (Hirsch & Plantamour, 1891).	21
Figure 3-2 : différences entre les altitudes du Catalogue des hauteurs / du nivelllement de repérage et les altitudes usuelles actuelles NF02 des points fixes du 1 ^{er} ordre du Nivellement de précision existant toujours, état en 2002 (Schlatter, 2007). Les barres les plus grandes signalent des points instables	23
Figure 3-3 : comparaison entre les altitudes usuelles officielles NF02, le Nivellement de précision (NdP), le Nivellement de repérage (NR) et les valeurs observées par nivelllement fédéral (NF) le long des lignes Genève (RPN) – Martigny – Brig.....	24
Figure 3-4 : les mesures de précision dans le nivelllement fédéral suisse entre 1903 et 2004.	27
Figure 3-5 : vue d'ensemble des points principaux de la compensation cinématique (CHVRF04/RAN95) : grande étoile : Zimmerwald Z0 ; petite étoile : observation répétée ; cercles blancs : une seule observation.....	27
Figure 3-6 : écarts-types relatifs des cotes géopotentielle par rapport au point de référence de Zimmerwald [mgpu].....	28
Figure 3-7 : écarts-types relatifs des modifications du potentiel par rapport au point de référence d'Aarburg [mgpu·a ⁻¹].....	28
Figure 3-8 : mouvements verticaux récents de la croûte terrestre le long des lignes du RAN (état à fin 2004) ; modifications altimétriques positives (barres rouges) / négatives (barres vertes), par rapport à Aarburg [mm·a ⁻¹].....	29
Figure 3-9 : le modèle CHKLM95 des mouvements verticaux en Suisse [mm·a ⁻¹].....	29
Figure 3-10 : fraction de l'erreur sur les altitudes orthométriques due à la pesanteur moyenne [mm]....	30
Figure 3-11 : les écarts entre les altitudes orthométriques RAN95 et les altitudes usuelles NF02.	31
Figure 3-12 : différence entre les altitudes orthométriques et les altitudes normales RAN95 : à droite, le lien de dépendance entre les altitudes [m] et les différences [mm].	31
Figure 3-13 : différence entre les altitudes normales RAN95 et les altitudes usuelles NF02 : à droite, le lien de dépendance entre les altitudes [m] et les différences [mm].	32
Figure 3-14 : différences (CH – pays voisin) entre les altitudes officielles de la Suisse et des pays voisins, en [cm].	33
Figure 3-15 : différences (CH – pays voisin) entre les altitudes normales suisses (issues de RAN95) et les altitudes officielles des pays voisins, en [cm].....	34
Figure 5-1 : réseaux UELN-55 et UELN-73.....	38
Figure 5-2 : les mesures (lignes noires) de la contribution suisse à UELN-73/86 et à UELN-95/98.	38
Figure 5-3 : jeu de données étendu et actualisé de la Suisse en 2002 (avec les anciens nœuds UELN/REUN). Contribution pour EVRF2007.....	40
Figure 5-4 : vue d'ensemble des jeux de données pour EVRF2000 et EVRF2007 (Sacher et al., 2008). 40	



Figure 5-5 : différences entre EVRF2000 et EVRF2007 en mm (Sacher et al., 2008).....	41
Figure 5-6 : différences EVRF2019 – EVRF2007 (Sacher & Liebsch, 2019).	42
Figure 5-7 : décalages moyens des systèmes altimétriques nationaux par rapport à EVRF2019.	42
Figure 5-8 : liaisons UELN-73/95 et contribution suisse aux points EUVN (grandes étoiles) et EUVN-DA (petites étoiles).....	43
Figure 5-9 : points EUVN-DA et comparaison avec le quasi-géoïde européen EGG2008.....	44
Figure 5-10 : le modèle du géoïde européen EGG2015 (équidistance des isolignes : 5 m).	45
Figure 5-11 : quasi-géoïde EGG2015 dans l'espace alpin.	45
Figure 6-1 : différences entre la surface des altitudes H=0 en NAVD88 et un géoïde gravimétrique.	48
Figure 6-2 : diminution des altitudes avec la montée du niveau moyen de la mer (global mean sea level GMSL).	50
Figure 6-3 : sources de données servant à la réalisation du modèle global GM2022.....	51
Figure 6-4 : sources de données servant à la réalisation des grilles de haute résolution.	51
Figure 6-5 : détermination de coordonnées géométriques dans le nouveau datum.....	52
Figure 6-6 : détermination de coordonnées géopotentielles dans le nouveau datum.	53
Figure 6-7 : détermination d'altitudes orthométriques dans le nouveau datum.	53
Figure 6-8 : l'anneau de niveling baltique BLR2000. Le cercle montre le point fondamental à Amsterdam.....	55
Figure 6-9 : à gauche : réseau de premier ordre norvégien ; rouge = 1 mesure, bleu = 2 mesures, vert = 3 mesures ; à droite : réseau de niveling ferroviaire (en rouge) et réseau de deuxième ordre (en vert).....	56
Figure 6-10 : procédure de dissémination des altitudes.	57
Figure 6-11 : différences altimétriques entre NN1954 et NN2000.	58
Figure 6-12 : décision du plenum de l'AdV introduisant la référence spatiale géodésique intégrée unifiée (AdV, 2018).	60
Figure 6-13 : projet du réseau altimétrique principal allemand DHHN2016 (AdV, 2018).	61
Figure 6-14 : modèle du quasi-géoïde GCG2016.	63
Figure 6-15 : écarts altimétriques DHHN2016 moins DHHN92, réalisation de 2016 (données utilisées en entrée pour calculer le modèle de transformation HOETRA2016).	64
Figure 6-16 : différences NIREF – IGN69 (état en 2015), avec les nouvelles lignes du 1 ^{er} ordre mesurées entre 1992 et 1999 dans la partie nord du pays.	66
Figure 6-17 : le réseau de niveling autrichien.	68
Figure 6-18 : différences altitudes usuelles (Adriatique) moins altitudes orthométriques (Amsterdam)....	69
Figure 6-19 : lignes principales de GE42 et plan des nouvelles mesures.	71
Figure 6-20 : les systèmes altimétriques locaux (LVD) avant 2009 et le réseau de niveling.....	73
Figure 6-21 : aérogravimétrie en Nouvelle-Zélande en 2013 – 2014.	75
Figure 6-22 : déplacements verticaux selon le modèle cinématique NKG2005LU, en mm/an (à gauche) et réseau du troisième niveling de précision, 1979 – 2003 (à droite). Source : Svensson et al. (2006).....	76



Liste des tableaux

Tableau 2-1 : systèmes de marées	15
Tableau 2-2 : cas pratiques d'utilisation des altitudes ainsi que les produits nécessaires.	20
Tableau 3-1 : sous-projets et échelonnement initial du projet RAN95 en 1999 (<i>Schlatter & Marti, 2007</i>).	25
Tableau 6-1 : caractéristiques du Datum géopotentiel nord-américain et Pacifique 2022.	49
Tableau 6-2 : vue d'ensemble (<i>non traduite</i>) des cadres de référence altimétriques en Allemagne (AdV, 2018).	59
Tableau 6-3 : spécificités du système (AdV, 2018).....	61
Tableau 6-4 : mesures exécutées dans le réseau altimétrique principal allemand DHHN2016, réparties par Länder (<i>tableau non traduit</i>).	62





Abréviations

A10	Gravimètre absolu Micro-g LaCoste A10
AdV	Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik (Groupe de travail sur la référence spatiale instauré par la communauté des administrations des mensurations des Länder de la République fédérale allemande)
AGNES	Automatisches GNSS Netz der Schweiz (Réseau GNSSS automatisé pour la Suisse)
ASVD02	American Samoa Vertical Datum of 2002 (Datum vertical des Samoa américaines de 2002, USA)
BEV	Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (Office fédéral de métrologie et de topographie, Autriche)
BGI	Bureau gravimétrique international
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (Office fédérale de cartographie et de géodésie, Allemagne)
BLR2000	Baltic Levelling Ring of 2000 (Anneau de nivelllement baltique de 2000)
CdH	Catalogue des hauteurs
CERCO	Comité européen des responsables de la cartographie officielle
CGS	Commission géodésique suisse
CH1903+	Système de référence local géodésique suisse
CHGeo2004	Modèle suisse de géoïde de 2004
CHKLM95	Swiss Kinematic Levelling Modell of 1995 (Modèle suisse de nivelllement cinématique de 1995)
CHTRF2004	Swiss Terrestrial Reference Frame of 2004 (Cadre de référence terrestre globale suisse de 2004)
CHVRF04	Swiss Vertical Reference Frame of 2004 (Cadre de référence vertical globale suisse de 2004)
CNIG	Conseil national de l'information géographique (France)
DDEFLEC2022	Dynamic Deflection of the Vertical model of 2022 (Grilles régionales des déviations de la verticale cinématique de 2022, USA)
DEFLEC2022	Regional gridded deflection of the vertical models of 2022 (Grilles régionales des déviations de la verticale de 2022, USA)
DGEOID2022	Dynamic Geoid model of 2022 (Grilles régionales des cotes du géoïde cinématique de 2022, USA)
DGM2022	Dynamic Geopotential Model of 2022 (Modèle géopotentiel cinématique de 2022, USA)
DHHN12	Deutsches Haupthöhennetz 1912 (Réseau altimétrique allemand 1912)
DHHN2016	Deutsches Haupthöhennetz 2016 (Réseau altimétrique allemand 2016)
DHHN85	Deutsches Haupthöhennetz 1985 (Réseau altimétrique allemand 1985)
DHHN92	Deutsches Haupthöhennetz 1992 (Réseau altimétrique allemand 1992)
DHSN2016	Deutsches Hauptschwerenetz 2016 (réseau gravimétrique allemand 2016)
EGG1996	European Gravimetric Geoid of 1996 (Modèle de géoïde européen de 1996)
EGG1997	European Gravimetric Geoid of 1997 (Modèle de géoïde européen de 1997)
EGG2007	European Gravimetric Geoid of 2007 (Modèle de géoïde européen de 2007)
EGG2008	European Gravimetric Geoid of 2008 (Modèle de géoïde européen de 2008)



EGG2015	European Gravimetric Geoid of 2015 (Modèle de géoïde européen de 2015)
EGM2008	Earth Gravitational Model of 2008 (Modèle gravitationnel terrestre de 2008)
EGM96	Earth Gravitational Model of 1996 (Modèle gravitationnel terrestre de 1996)
EPNN	Einheitliches Präzisionsnivellementsnetz (Réseau de nivellation de précision de l'Europe centrale et de l'est), aussi Uniform Precise Levelling Network of Central and Eastern Europe (UPLN)
ERNIT	Entretien du réseau de nivellation par les triplets (France)
ETHZ	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (Ecole polytechnique fédérale de Zürich)
ETRF	European Terrestrial Reference Frame (Cadre de référence terrestre européen)
ETRF2007	European Terrestrial Reference Frame of 2007 (Cadre de référence terrestre européen de 2007)
ETRF2019	European Terrestrial Reference Frame of 2019 (Cadre de référence terrestre européen de 2019)
ETRS89	European Terrestrial Reference System of 1989 (Système de référence terrestre européen de 1989)
EUREF	IAG Reference Frame Sub-Commission for Europe (Sous-commission de l'IAG pour le cadre de référence européen)
EUVN	European Vertical Reference Network (Réseau de référence vertical européen)
EUVN-DA	European Vertical Reference Network Densification Action (Action de densification du réseau de référence vertical européen)
EVRF	European Vertical Reference Frame (Cadre de référence verticale européen)
EVRF2000	European Vertical Reference Frame of 2000 (Cadre de référence verticale européen de 2000)
EVRF2007	European Vertical Reference Frame of 2007 (Cadre de référence verticale européen de 2007)
EVRF2019	European Vertical Reference Frame of 2019 (Cadre de référence verticale européen de 2019)
EVRS	European Vertical Reference System (Système de référence verticale européen)
EVRS2000	European Vertical Reference System of 2000 (Système de référence verticale européen de 2000)
FFT	Fast Fourier Transformation (Transformation de Fourier rapide)
FG5	Gravimètre absolu Micro-g LaCoste FG5
GBVP	Geodetic Boundary Value Problem (Problème de la valeur limite géodésique)
GCG	German Combined QuasiGeoid (Quasi-géoïde combiné allemand)
GCG2016	German Combined QuasiGeoid of 2016 (Modèle du quasi-géoïde combiné allemand de 2016)
GE42	Genova 1942 (Italie)
GEOID2022	Regional gridded geoid undulation models of 2022 (Grilles régionales des cotes du géoïde de 2022, USA)
GEOAUT	Géoïde autrichien 2008
GGM	Globales Geoidmodell (Modèle global du géoïde, Allemagne)
GGN	Geodätischen Grundnetzpunkte (Points géodésiques de base, Allemagne)
GISGEO2012	Géoïde pour la région frontière entre l'Italie et la Suisse de 2012



GLONASS	Global Navigation Satellite Systems (Systèmes de navigation globaux par satellite, Russie)
GM	Paramètre gravitationnel terrestre
GM2022	Geopotential Model of 2022 (Modèle géopotentiel de 2022, USA)
GMSL	Global Mean Sea Level (Niveau moyen global des mers)
GNSS	Global Navigation Satellite Systems (Systèmes de navigation globaux par satellite, USA)
GPS	Global Positioning System (Système de positionnement global, USA)
GRACE	Gravity Recovery and Climate Experiment (Mission satellitaire de la NASA)
GRAV2022	Regional gridded surface gravity models of 2022 (Grilles régionales de la pesanteur à la surface de 2022, USA)
GRAV-D	Gravity for the Redefinition of the American Vertical Datum (Gravité pour la redéfinition du datum vertical, USA)
GRS80	Geodetic Reference System of 1980 (Ellipsoïde de révolution de référence de 1980)
GUVD04	Guam Vertical Datum of 2004 (Datum vertical de Guam de 2004, USA)
H.ü.A	Höhen über Adria (Altitudes au-dessus de l'Adriatique, Autriche)
HEIG-VD	Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud
HELIDEM	Helvetia Italy Digital Elevation Model
HOETRA2016	Höhentransformation 2016 (Modèle de transformation altimétrique de 2016, Allemagne)
HREF	Hight Reference Surface (Géoïde ou quasi-géoïde non purement gravitationnel)
HTRANS	"Höhentransformation" entre NF02 et RAN95
IAG/AIG	International Association of Geodesy/ Association Internationale de Géodésie
IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service (Service international de la rotation terrestre et des systèmes de référence)
IfE	Institut für Ermessung, université Leibniz, Hanovre
IGM	Instituto Geografico Militare (Institut géographique militaire, Italie)
IGN	Institut national de l'information géographique et forestière (France)
IGS	International GNSS Service (Service GNSS International)
IGSxx	Datum géodésique de l'IGS
IHRF	International Height Reference Frame (Cadre de référence altimétrique international)
IHRS	International Height Reference System (Système de référence altimétrique international)
INDG	Infrastructure Nationale des données géographiques
ItalGeo1999	Italian Quasi-Geoid of 1999 (Modèle de quasi-géoïde italien de 1999)
ItalGeo2000	Italian Quasi-Geoid of 2000 (Modèle de quasi-géoïde italien de 2000)
ItalGeo2005	Italian Quasi-Geoid of 2005 (Modèle de quasi-géoïde italien de 2005)
ItalGeo2020	Italian Quasi-Geoid of 2020 (Modèle de quasi-géoïde italien de 2020)
ItalGeo95	Italian Quasi-Geoid of 1995 (Modèle de quasi-géoïde italien de 1995)
ITRF	International Terrestrial Reference Frame (Cadre de référence terrestre international)



ITRS	International Terrestrial Reference System (Système de référence terrestre international)
IUGG/UGGI	International Union of Geodesy and Geophysics / Union Géodésique et Géophysique Internationale
LCR	LaCoste-Romberg
LHN95	Landesöhennetz 1995 (Cadre de référence altimétrique de 1995, Suisse)
LHN95-DB	Datenbank des Landesöhennetz 1995 (Base de données associée à RAN95, Suisse)
LHN95-KIN	Kinematische Ausgleichung LHN95 (Compensation cinématique de RAN95, Suisse)
LHN95-LIN	Erfassung der Linienmessungen und LV95-Anschlussmessungen (Saisie de données et mesures des lignes de rattachements à MN95, Suisse)
LHN95-NF	Erfassung der Nachführungsmessungen (Saisie des mesures de mise à jour, Suisse)
LHN95-TrF	Transformation / Übergang zwischen den Höhensystemen (Transformation / conversion entre les systèmes, Suisse)
LHN95-V	Pilotprojekt zur Verdichtungsmessung mit GPS (Projet pilote pour des mesures de densification par GPS, Suisse)
LN02	Landesnivelllementnetz 1902 (Réseau du nivellation fédéral 1902, Suisse)
LVD	Local Vertical Datum (Datum Vertical local, Nouvelle Zélande)
MGI	Militärgeografisches Institut (Institut géographique militaire, Autriche)
MN03	Mensuration nationale 1903 (Suisse)
MN95	Mensuration nationale 1995 (Suisse)
MNT25	Modèle numérique de terrain à l'échelle 1:25'000
N2000	Système de référence altimétrique finlandais de 2000
NAP	Normaal Amsterdams Peil (Niveau normal d'Amsterdam)
NAPGD2022	North American-Pacific Geopotential Datum of 2022 (Datum géopotentiel nord-américain-pacifique de 2022, USA)
NAVD88	North American Vertical Datum of 1988 (Datum vertical nord-américain de 1988, USA)
NdP	Nivellement de précision
NF	Nivellement fédéral
NF02	Réseau du nivellation fédéral 1902
NGF-Bourdalouë	Nivellement général de la France - Réseau Bourdalouë
NGF-IGN69	Nivellement général de la France - Institut national de l'information géographique et forestière de 1969
NGF-Lallemand	Nivellement général de la France - Réseau Lallemand
NGS	National Geodetic Survey (Agence de géodésie nationale, USA)
NHN	Höhen über Normalhöhennull (Altitudes au-dessus de l'origine des altitudes normales, Allemagne)
NHP	Nullpunkt Hoppegarten (Point zéro de Hoppegarten, Allemagne)
NIGEMO	Nivellement géométrique motorisé (France)
NIREF	Nivellement de Référence (France)
NIREF 2015	Nivellement de référence de 2015 (France)
NITRIMO	Nivellement trigonométrique motorisé (France)



NIVAG	Nivellement assisté par GPS (France)
NKG 2004	Modèle du quasi-géoïde suédois de 2004
NKG2005LU	Nordic Geodetic Commission Land Uplift of 2005 (Modèle pour le rebond post-glaciaire de la commission de géodésie nordique de 2005)
NKG2016LU	Nordic Geodetic Commission Land Uplift model of 2016 (Modèle pour le rebond postglaciaire de la commission de géodésie nordique de 2016)
NMVD03	North Marianas Vertical Datum of 2003 (Datum vertical du Commonwealth des îles Marianes du nord, USA)
NN	Normalnull (Zéro normal, Allemagne)
NN1954	Norway Normal Null 1954 (Cadre de référence altimétrique norvégien de 1954)
NN2000	Norway Normal Null 2000 (Cadre de référence altimétrique norvégien de 2000)
NR	Nivellement de repérage
NZGeoid2009	New Zealand Quasigeoid of 2009 (Modèle du quasi-géoïde néo-zélandais de 2009)
NZGeoid2016	New Zealand Quasigeoid of 2016 (Modèle du quasi-géoïde néo-zélandais de 2016)
NZVD2009	New Zealand Vertical Datum of 2009 (Datum vertical néo-zélandais de 2009)
NZVD2016	New Zealand Vertical Datum of 2016 (Datum vertical néo-zélandais de 2016)
OIG	Office de l'information géographique du Canton de Berne
PFA	Point fixe altimétrique
PGV	Point GPS village (France)
POLIMI	Politecnico di Milano (École polytechnique de Milan, Italie)
PPP	Precise Point Positioning (Positionnement précis des points)
PRVD02	Puerto Rico Vertical Datum of 2002 (Datum vertical de Porto-Rico de 2002, USA)
QGF2016	Modèle de quasi-géoïde français de 2016
QGF98	Modèle de quasi-géoïde français de 1998
RAF	Références des altitudes françaises
RAF09	Grille de conversion de 2009 (France)
RAF2018	Grille de conversion de 2018 (France)
RAF2018b	Grille de conversion de 2018b (France)
RAF98	Grille de conversion de 1998 (France)
RAN	Réseau altimétrique national
RAN95	Réseau altimétrique national de 1995
RBF	Réseau de base français
RDA	République démocratique allemande
REUN	Réseau européen unifié de nivellation, également UELN
RGF93	Réseau géodésique français de 1993
RGP	Réseau GNSS permanent (France)
RH70	Rikets Hojdsystem 1979 (Cadre altimétrique national de 1979, Suède)
RH2000	Rikets Höjdsystem 2000 (Cadre altimétrique national de 2000, Suède)
RMS	Root Mean Square (Moyenne quadratique)
RPN	Repère de la Pierre du Niton
RTK	Real Time Kinematic (Cinématique en temps réel)



SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst (Service de positionnement par satellite, Allemagne)
SDEFLEC2022	Static Deflection of the Vertical model of 2022 (Grilles régionales des déviations de la verticale statique de 2022, USA)
SGEOID2022	Static Geoid model of 2022 (Grilles régionales des cotes du géoïde statique de 2022, USA)
SGM2022	Static Geopotential Model of 2022 (Modèle géopotentiel statique de 2022, USA)
SGRAV2022	Static Gravity model of 2022 (Grilles régionales de la pesanteur à la surface statique de 2022, USA)
SI	Système international d'unités
SNN56	Staatliches Nivellementnetz von 1956 (Réseau national de nivellation de 1956, Allemagne)
SNN76	Staatliches Nivellementnetz von 1976 (Réseau national de nivellation de 1976, Allemagne)
SUPSI	Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana (Haute école spécialisée de la Suisse italienne)
SWEN 05LR	Swedish quasigeoid model of 2005 (Modèle de quasi-géoïde suédois de 2005)
SWEREF99	Swedish Reference Frame of 1999 (Cadre de référence suédois de 1999)
TBD	To Be Defined (à définir)
TRFs	Terrestrial Reference Frames (Cadres de références terrestres)
TU	Technische Universität (Université technique)
TWG	Technical Working Group (Groupe de travail technique)
UELN	United European Levelling Network (Réseau européen unifié de nivellation)
UELN-2000	United European Levelling Network of 2000 (Réseau européen unifié de nivellation de 2000)
UELN-55	United European Levelling Network of 1955 (Réseau européen unifié de nivellation de 1955)
UELN-73	United European Levelling Network of 1973 (Réseau européen unifié de nivellation de 1973)
UELN-73/86	United European Levelling Network of 1973-1986 (Réseau européen unifié de nivellation de 1973-1986)
UELN-95	United European Levelling Network of 1995 (Réseau européen unifié de nivellation de 1995)
UELN-95/98	United European Levelling Network of 1995-1998 (Réseau européen unifié de nivellation de 1995-1998)
UPLN	Uniform Precise Levelling Network of Central and Eastern Europe (Réseau de nivellation de précision unifiée d'Europe centrale et de l'est)
VERTCON	Vertical Conversion (transformation altimétrique, USA)
VI-GBT	Vermessung Gotthard-Basistunnel (Mensuration du tunnel du Saint-Gothard, Suisse)
VIVD09	Virgin Islands Vertical Datum of 2009 (Datum Vertical des îles Vierges américaines de 2009, USA)
WGS84	World Geodetic System 1984 (Système géodésique mondial 1984)