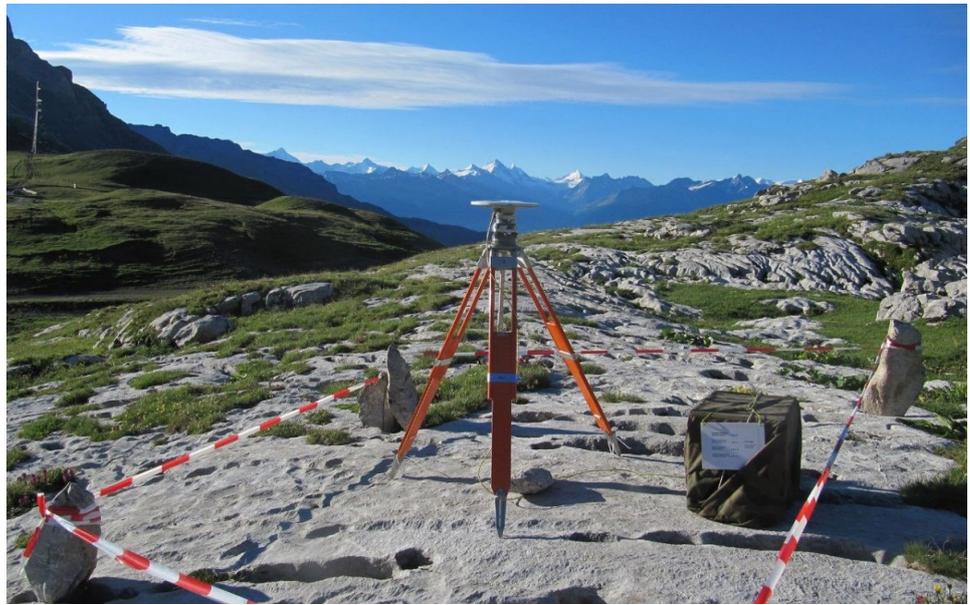


# Nouveau système altimétrique suisse



© swisstopo

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

Partie II – Définition du système  
et analyse des conséquences techniques

Dr Daniel Willi  
Dr Andreas Schlatter  
Dr Urs Marti  
Elisa Borlat  
Dr Sébastien Guillaume  
Jérôme Carrel



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

**Office fédéral de topographie swisstopo**

**Ce rapport est en consultation. Nous vous invitons à le lire et à nous faire part de vos commentaires et suggestions à l'adresse e-mail [daniel.willi@swisstopo.ch](mailto:daniel.willi@swisstopo.ch)**

---

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

### **Impressum**

© 2024 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](mailto:mensuration@swisstopo.ch)



## Management summary

Ce deuxième rapport technique comporte la définition du nouveau système altimétrique, le concept de réalisation et de transformation ainsi que quelques pistes pour la mise en œuvre.

Le nouveau système sera basé sur des altitudes normales, calculées à partir de cotes géopotentielles. Les altitudes normales présentent des avantages théoriques par rapport aux altitudes orthométriques qui étaient utilisées par RAN95.

Le groupe de travail recommande l'introduction d'un modèle cinématique. Les déplacements verticaux différentiels en Suisse sont de l'ordre de 1 à 2 mm par an entre le plateau et les Alpes et s'additionnent au fil des années pour devenir progressivement significatifs pour des usages courants. Seule la modélisation des déformations intra-cadres permet de garantir la longévité du cadre de référence altimétrique pour une précision centimétrique et homogène sur l'ensemble de la Suisse,

La gestion du modèle cinématique sera facilitée par des services de transformation. Les altitudes des géodonnées à caractère officiel seront gérées à l'époque de référence du cadre, c'est-à-dire à l'année de réalisation du cadre de référence. Elles seront ainsi invariables dans le temps, tout comme maintenant avec le système NF02. Pour la plupart des applications, le modèle cinématique ne devra être considéré qu'au moment de la détermination altimétrique.

Une transformation rigoureuse entre RAN95 et le nouveau cadre de référence altimétrique sera déterminée. Pour le passage de NF02 à RAN95, une transformation résiduelle sera mise en œuvre. À cette fin, des points d'appui à la transformation devront être acquis par mesures GNSS statiques.

Finalement, des « Proofs of Concept », qui consistent en des démonstrations concrètes visant à valider la faisabilité de l'approche choisie, seront mis en œuvre en collaboration avec quelques cantons. Ces essais déboucheront sur les concepts finaux de transformation et de mise en œuvre.

En parallèle, toutes les mesures d'accompagnement sont à mettre en place, notamment les plans de communication et de financement, afin de permettre l'introduction du nouveau système altimétrique officiel suisse à l'horizon de 2030.





## Table des matières

<b>1. Introduction</b>	<b>7</b>
<b>2. Définition du nouveau système</b>	<b>9</b>
2.1. Principes et objectifs	9
2.2. Définitions fondamentales	9
2.3. Produits	10
2.4. Nomenclature	11
2.1. Conventions de notation	11
2.2. Aspects formels et légaux	11
2.3. Résumé	12
<b>3. Concept de réalisation</b>	<b>13</b>
3.1. Calcul des cotes géopotentielles	13
3.1.1. Données de base et réseaux	13
3.1.2. Procédé de calcul	13
3.1.3. Définition du datum	15
3.2. Calcul des altitudes normales	16
3.3. Détermination du géoïde	17
3.3.1. Mesures et données	17
3.3.2. Concept et méthode	17
3.4. Gestion des contraintes résiduelles	18
3.5. Mise à jour des cadres de référence	18
3.6. Lien avec les systèmes supérieurs	18
<b>4. Modèle cinématique</b>	<b>21</b>
4.1. Utilisation du modèle cinématique	21
4.1.1. Rattachement à des points fixes	21
4.1.2. Utilisation d'un service de positionnement par GNSS	21
4.1.3. Mesures GNSS post-traitées	21
4.1.4. Utilisation d'un service PPP	21
4.2. Réalisation du modèle cinématique	21
4.2.1. Estimation des déplacements verticaux des points fixes	22
4.2.2. Méthode d'interpolation	22
<b>5. Modèles de géodonnées</b>	<b>25</b>
5.1. Définition du nouveau système de référence en INTERLIS 2	26
5.2. Adaptations du module de base de la Confédération	27
5.3. Recommandations pour la prise en compte de la cinématique	27
5.4. Recommandations pour le modèle de géodonnées de la mensuration officielle DMAV	28
<b>6. Concept de transformation des géodonnées existantes</b>	<b>29</b>
6.1. Algorithme de transformation	29
6.2. Transformation résiduelle	30
6.2.1. Algorithme d'interpolation	31
6.3. Mise en œuvre	31



6.3.1. « Proofs of Concept » avec les cantons	31
6.3.2. Obligation de transformer les géodonnées altimétriques existantes	31
<b>7. Conclusions et recommandations</b>	<b>33</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>35</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>37</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>39</b>
<b>Glossaire</b>	<b>41</b>



## 1. Introduction

Les forts développements du GNSS<sup>1</sup> et la perspective d'atteindre prochainement une précision altimétrique de l'ordre du centimètre permettent d'envisager des perspectives de gains techniques et d'efficacité significatifs par rapport aux méthodes actuelles de détermination relative ou absolue des altitudes dans le système NF02.

Pour bénéficier de ces avantages, la définition pérenne d'un nouveau système de référence altimétrique nommé CHVRS<sup>2</sup> est nécessaire pour l'ensemble du pays. Le système doit être compatible avec les systèmes internationaux supérieurs et adapté aux techniques actuelles de la géodésie spatiale.

Dans le cadre du projet « swiss height system », ce deuxième rapport technique, qui succède à la comparaison internationale développée dans le premier rapport, vise à concrétiser la définition du nouveau système altimétrique suisse, en transposant les objectifs fixés au nouveau système, l'état de l'art et les expériences des autres pays à la Suisse.

Le nouveau système altimétrique est basé sur des cotes géopotentielles et sur des altitudes normales. De plus, dans le but d'assurer la pérennité la plus longue possible du cadre de référence altimétrique, un modèle cinématique est défini, permettant de tenir compte des déformations intra-cadre présentes en Suisse.

Le présent rapport contient les principales définitions du nouveau système altimétrique suisse, son concept de réalisation, l'application d'un modèle cinématique, une proposition de modélisation en INTERLIS et le concept de transformation des géodonnées altimétriques existantes.

---

<sup>1</sup> 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 (USA), Galileo (UE), GLONASS (Russie) et Beidou (Chine).

<sup>2</sup> *Swiss Verticale Reference System*





## 2. Définition du nouveau système

### 2.1. Principes et objectifs

La définition du nouveau système altimétrique est guidée par les principes et les objectifs suivants. Fondamentalement, les exigences envers un système altimétrique demeurent identiques aux exigences posées lors de l'établissement de RAN95. Les points suivants ressemblent donc fortement aux principes et objectifs énoncés par Schlatter (2007).

- **Compatibilité internationale** : le nouveau système altimétrique est compatible avec les conventions et les standards européens et internationaux ; pour des raisons de faisabilité ou de spécificités suisses, on pourra déroger à cette règle.
- **Compatibilité avec la géodésie spatiale** : à l'ère de la géodésie spatiale, le nouveau système altimétrique Suisse sera compatible avec les techniques de géodésie spatiale, en particulier avec le GNSS.
- **Introduction généralisée** : le nouveau système altimétrique suisse est introduit comme nouveau système officiel ; ainsi, il répond aux exigences de la mensuration nationale, de la mensuration officielle, de la géoinformation et aux exigences des autres utilisateurs.
- **Pérennité** : le nouveau système altimétrique sera en vigueur pendant plusieurs décennies ; il n'a, à priori, pas de fin de vie nominale et donc une durée de vie potentiellement illimitée.

### 2.2. Définitions fondamentales

**Définition 1** – Le nouveau système altimétrique est basé sur des cotes géopotentielle ( $C$ ), à partir desquelles des altitudes normales et des altitudes orthométriques sont calculées.

*La majorité des systèmes altimétriques rigoureux implémente soit des altitudes normales, soit des altitudes orthométriques. Alors qu'un type d'altitude doit être choisi pour les altitudes officielles, il est indispensable à des fins scientifiques et techniques de connaître, en tout point, la différence entre les altitudes normales et les altitudes orthométriques.*

*swisstopo devra donc être en mesure de produire les deux types d'altitudes, les altitudes normales et les altitudes orthométriques.*

En d'autres termes, la coordonnée géopotentielle  $C_P$  d'un point  $P$  est la différence entre le potentiel de la surface de référence  $W_0$  et le potentiel de pesanteur terrestre  $W_P$  du point, soit  $C_P = W_0 - W_P$ .

*Cette définition correspond à la définition du système de référence altimétrique international (cf. résolution n° 1 2015 de l'Association Internationale de Géodésie).*

**Définition 2** – Le potentiel de référence  $W_0$  est soumis à la réalisation du nouveau système altimétrique. Il est calculé en imposant une condition « no net translation » sur une sélection de points stables en Suisse.

*La condition « no net translation » signifie qu'il n'y a pas de translation du réseau de points de référence. Cela implique que la somme des déplacements de ces points est nulle.*

**Définition 3** – Les altitudes sont de type normal.

*Alors que les altitudes normales ne nécessitent aucune hypothèse sur la distribution des masses dans la terre, les altitudes orthométriques dépendent de la pesanteur moyenne le long de la ligne d'aplomb. Ainsi, la connaissance des différences entre les altitudes normales et les altitudes orthométriques va continuellement s'améliorer à l'avenir, sans affecter les altitudes normales.*



*En termes de propagation d'erreurs et de pérennité, il est plus avantageux de définir un système d'altitudes normales.*

**Définition 4** – Le champ de pesanteur normal est celui défini par l'ellipsoïde GRS80.

*Conformément à la résolution n° 1 1979 de l'Association Internationale de Géodésie.*

*Les altitudes normales sont dépendantes à l'ellipsoïde de référence. L'ellipsoïde de référence permet de déterminer la valeur de pesanteur normale utilisée pour déterminer les altitudes normales.*

*Il est à noter que l'ellipsoïde de référence pour la planimétrie est l'ellipsoïde de Bessel (définie dans le système CH1903+). Il n'est pas envisageable d'utiliser deux ellipsoïdes différents dans la pratique. Pour cette raison, le quasi-géoïde sera fourni dans le même référentiel que la planimétrie, à savoir dans le système CH1903+ sur l'ellipsoïde de Bessel.*

**Définition 5** – Les paramètres, les observations et les données sont réduits dans le système de marées « mean-tide », à moins qu'ils soient déjà dans ce système.

**Définition 6** – Le système de référence géométrique pour le nouveau système altimétrique est CHTRS. En d'autres termes : le potentiel du point  $W_P$  est une fonction des coordonnées  $\mathbf{X}_P$  du point. Ainsi,  $W_P = W(\mathbf{X}_P)$  où  $\mathbf{X}_P$  est exprimé en CHTRS.

*CHTRS est un système de référence terrestre géocentrique compatible avec ETRS89 et attaché à la croûte terrestre en Suisse.*

**Définition 7** – Le nouveau système altimétrique est cinématique<sup>3</sup>. L'altitude varie dans le temps. Le modèle cinématique permet de transformer une altitude d'une époque à une autre époque.

*Les déplacements verticaux relatifs sur les points localement stables atteignent des valeurs d'environ 1 à 2 mm par année en Suisse. Afin de garantir la pérennité des cadres de référence, le système altimétrique comporte une composante cinématique.*

## 2.3. Produits

**Définition 8** – Chaque cadre de référence comporte les produits suivants :

- les altitudes officielles des points du réseau altimétrique, avec une partie statique et une partie cinématique ;
- un modèle du quasi-géoïde avec une partie statique et une partie cinématique ;
- un modèle de la pesanteur à la surface avec une partie statique et une partie cinématique ;
- un modèle des déviations de la verticale à la surface, avec une partie statique et une partie cinématique.

*Les parties cinématiques peuvent être de valeur nulle.*

**Définition 9** – Ces produits sont consistants entre eux, c'est-à-dire qu'ils sont issus du même cadre de référence et du même modèle de champ de pesanteur.

**Définition 10** – Les produits sont fournis dans le système et le cadre de référence suisse officiel, soit en coordonnées projetées MN95, ainsi que dans le système européen ETRS89.

---

<sup>3</sup> C'est-à-dire que le système altimétrique est doté d'un modèle de déformation intra-cadre.



## 2.4. Nomenclature

**Définition 11** – Le nouveau système altimétrique est nommé *Swiss Vertical Reference System* (CHVRS). Les cadres sont nommés *Swiss Verticale Reference Frame* xxxx (CHVRFxxxx), avec xxxx l'année du cadre.

**Définition 12** – Les produits suivent la nomenclature ci-après.

- CHQGEOxxxx et CHKQGEOxxxx pour les parties statiques et cinématiques du modèle du géoïde.
- CHGRAVxxxx et CHKGRAVxxxx pour les parties statiques et cinématiques du modèle de pesanteur à la surface.
- CHDEFLECxxxx et CHKDEFLECxxxx pour les parties statiques et cinématiques du modèle de déviations de la verticale.

*Afin d'éviter des confusions, cette nomenclature devrait être utilisée exclusivement comme décrit ici, et chaque nouvel élément devrait être doté d'une nouvelle abréviation.*

## 2.1. Conventions de notation

**Définition 13** – À partir de l'introduction du nouveau système altimétrique, toute altitude CHVRFxxxx devra obligatoirement être accompagnée de la mention du cadre CHVRFxxxx. Par exemple :

*1239.943 m CHVRF2030*

Cette mention peut apparaître soit directement à côté de l'altitude ou de manière générale, par exemple dans la cartouche d'un plan, en marge d'une carte ou sous forme d'attribut dans les métadonnées d'un jeu de données.

**Définition 14** – La mention de l'époque est optionnelle, mais fortement recommandée. Dans ce cas, l'altitude s'écrit :

*1239.943 m CHVRF2030 2030.0*

**Définition 15** – En l'absence de la mention de l'époque, l'altitude sera traitée comme une altitude à l'époque de référence du cadre.

## 2.2. Aspects formels et légaux

**Définition 16** – Par altitude officielle, on entend une altitude dans le cadre de référence en vigueur selon les dispositions légales et à l'époque de référence du cadre.



## 2.3. Résumé

Le tableau suivant résume les principales définitions du nouveau système altimétrique décrites dans le présent document.

Tableau 2-1 : Résumé des définitions du nouveau système altimétrique CHVRS.

	<b>CHVRS</b>	<b>Référence dans le document</b>
Origine/référence	$W_0$ soumis à réalisation	Définition 2
Type d'altitude	Altitude normale	Définition 3
Champ de gravité normal	GRS80	Définition 4
Système des marées	Mean-tide	Définition 5
	<b>CHVRFxxxx</b>	<b>Référence dans le document</b>
Réalisation de l'origine	« no net translation » sur plusieurs points de référence	Définition 2
Cinématique	Modèle cinématique intra-cadre	Définition 7
Géoïde	CHQGEOxxxx	Définition 12



### 3. Concept de réalisation

Ce chapitre décrit le concept de réalisation du système altimétrique CHVRS tel qu'il est défini dans le chapitre précédent. La réalisation comporte deux aspects principaux : l'obtention de cotes géopotentielles (y compris leurs variations dans le temps) pour les points fixes altimétriques ainsi que la détermination du géoïde.

#### 3.1. Calcul des cotes géopotentielles

Le calcul des cotes géopotentielles pour le nouveau système altimétrique se fonde en grande partie sur les méthodes et les logiciels qui ont été développés pour la réalisation de RAN95. Ce dernier a de nombreuses caractéristiques en commun avec le nouveau système altimétrique. Les méthodes et les procédés de calcul ont fait leurs preuves et les logiciels sont disponibles, ce qui est un immense avantage. En effet, le travail de développement fastidieux et marqué d'incertitudes se verra ainsi fortement réduit. La description détaillée des méthodes et des procédés de calculs est disponible dans les paragraphes suivants et dans les publications en référence.

##### 3.1.1. Données de base et réseaux

De manière générale, on utilise les **mesures de nivellement** du réseau altimétrique national (RAN) pour réaliser le nouveau système altimétrique. Comme pour la réalisation de RAN95, les données sont complétées par quelques lignes cantonales qui sont mesurées avec les mêmes exigences de qualité que les lignes du RAN. Depuis le calcul de RAN95, le jeu de données a été régulièrement complété et contient les dernières mesures du RAN.

Des **mesures gravimétriques** seront utilisées pour calculer les différences de potentiel. Ici aussi, des jeux de données existent déjà. Dans ce contexte, deux sources de données sont pertinentes :

1. La première source de données concerne les mesures gravimétriques le long des lignes de nivellement fédéral. Ces mesures sont prises régulièrement depuis 1974. Pour ce faire, on a utilisé un gravimètre LaCoste&Romberg jusqu'à la fin 2007. Depuis, les mesures sont prises avec un Scintrex CG-5 ou CG-6. Cependant, il existe aussi des mesures encore plus anciennes, qui ont été recueillies sous la direction de la Commission géodésique suisse entre 1953 et 1957. On utilisait alors des gravimètres de Worden.
2. La deuxième source est le jeu de données du relevé gravimétrique national de la Commission géophysique suisse. Ce jeu de données comprend environ 30 000 mesures. Il permet l'interpolation de la pesanteur en tout point de la surface.

Ces deux jeux de données ont également été régulièrement complétés depuis la réalisation de RAN95 et comprennent les mesures les plus récentes qui seront donc aussi utilisées pour la réalisation du nouveau système altimétrique.

##### 3.1.2. Procédure de calcul

Le procédé pour le calcul de cotes géopotentielles sur les points principaux de RAN95 se trouve dans Schlatter (2007). Voici un résumé des étapes de calculs :

1. Les différences d'altitude observées sont intégrées numériquement à l'aide des mesures gravimétriques afin de calculer les différences de potentiel. Cela se fait par fascicules ; un fascicule représente une campagne de nivellement.
2. Les mesures sont réduites aux points principaux. Les points principaux sont les nœuds (liaisons entre les fascicules ainsi que les nœuds entre les boucles). En font également partie d'autres points sélectionnés manuellement qui sont considérés comme particulièrement stables. Tous les points intermédiaires supplémentaires sont supprimés.



3. Le calcul des erreurs de boucle sert au contrôle de qualité (vérification du calcul correct et complet).
4. La compensation cinématique se trouve au cœur du processus de calcul. Les résultats de cette étape de calcul sont les cotes géopotentielle compensées ainsi que leurs vitesses.

En principe, le même processus et la même solution logicielle seront utilisés pour le calcul des cotes géopotentielle dans le nouveau système altimétrique.

L'intégration numérique se fait par tronçon d'après la formule suivante :

$$\Delta C = \sum_i g_i \delta n_i \quad (3.1)$$

$\Delta C$  est ici la différence de potentiel de la section,  $\delta n_i$  la différence d'altitude nivelée et  $g_i$  la pesanteur interpolée pour cette différence d'altitude.

La réduction aux points principaux est également maintenue. Il n'est cependant pas nécessaire de sélectionner les mêmes points principaux que pour le calcul de RAN95. On peut de nouveau choisir les points principaux pour le calcul du nouveau système altimétrique et tenir compte des mesures les plus récentes, mais de grandes adaptations ne devraient pas être nécessaires et ne sont pas souhaitables.

La compensation cinématique, qui constitue le cœur du calcul, est effectuée selon le modèle suivant :

$$\Delta C_{i,j}^k + \epsilon_{i,j}^k = C_j^0 - C_i^0 + \Delta t (\dot{C}_j - \dot{C}_i) \quad (3.2)$$

$\Delta C_{i,j}^k$  représente ici la différence potentielle entre les points  $i$  et  $j$  par rapport à l'époque de mesure,  $C_j^0$  et  $C_i^0$  sont les cotes géopotentielle des points  $i$  et  $j$  par rapport à l'époque de référence  $t_0$ ,  $\Delta t$  est la différence de temps entre l'époque de mesure et l'époque de référence ( $\Delta t = t_k - t_0$ ),  $\dot{C}_i$  et  $\dot{C}_j$  sont les dérivées temporelles des cotes géopotentielle.



### 3.1.3. Définition du datum

Les deux cadres de référence altimétrique<sup>4</sup> CHVRFyy<sup>5</sup> et RAN95 développés dans le cadre de la nouvelle mensuration de 1995 ont été définis à l'époque de la manière suivante :

Tableau 3-1 : Définition des deux cadres de référence altimétrique de la nouvelle mensuration de 1995, CHVRFyy et RAN95.

Système de référence planimétrique	CHTRS95	CH1903+
Type d'altitude	Cotes géopotentielle	Altitudes orthométriques
Point de départ	Point fondamental Z <sub>0</sub> à Zimmerwald	Point fondamental Z <sub>0</sub> à Zimmerwald
Altitude de départ	C <sub>0</sub> = 880.3459 gpu	H <sub>0</sub> = 897.9063 m
Rattachement altimétrique		
Origine	Solution UELN 1973/1986	Choisie de telle sorte que H <sub>RPN</sub> = 373.6000 m
Cadre de référence altimétrique correspondant	CHVRFyy	RAN95
Référence cinématique		
$\dot{C} = 0$ sur le point suivant	Aarburg	Aarburg

Le nouveau système altimétrique sera défini différemment :

- D'une part, la dualité des systèmes devient caduque ; à l'avenir, il n'y aura plus qu'un seul système altimétrique suisse. Si nécessaire, des paramètres de transformation vers d'autres systèmes altimétriques seront calculés et publiés.
- D'autre part, le système n'est plus rattaché à un seul point, mais à une sélection de points avec une condition « no net translation ». Celle-ci s'applique de préférence aux altitudes et non aux cotes géopotentielle, car la stabilité altimétrique est l'aspect pertinent. Le choix des points se fait pendant la phase de réalisation, avec un accent sur la stabilité à long terme des points. Grâce à cette adaptation, la réalisation du système altimétrique ne dépend plus d'un seul point fixe altimétrique et gagne à la fois en flexibilité et en robustesse.
- Lors de la première réalisation, le système altimétrique est rattaché au EVRS au moyen d'une sélection de points adaptés. Lors des réalisations suivantes, il est rattaché au dernier cadre de référence altimétrique réalisé.

Voici la formule de la condition « no net translation » :

$$0 = \sum_i (H_i^* - H_i^{ref}) p_i$$

$H_i^*$  est ici l'altitude normale du i-ème point fixe altimétrique, qui est intégrée dans la définition du datum, et  $H_i^{ref}$  est l'altitude de référence du même point pour le rattachement.  $p_i$  est un poids optionnel (de 1 par défaut). L'altitude de référence peut, mais ne doit pas impérativement être une altitude normale.

<sup>4</sup> Dans ce rapport, RAN95 est parfois décrit comme système altimétrique, ce qui est en réalité faux. Deux systèmes altimétriques ont été intégrés dans le cadre de la nouvelle mensuration de 1995, un global et un local. Cependant, aucun nom n'a été attribué aux systèmes. Les cadres de référence altimétrique correspondants ont été appelés CHVRFyy et RAN95.

<sup>5</sup> À ne pas confondre avec CHVRFxxxx, un cadre du nouveau système altimétrique CHVRS.



### 3.2. Calcul des altitudes normales

Le calcul de l'altitude normale à partir des cotes géopotentielle compensées se fait de la façon suivante :

$$H^*(x_P) = \frac{C(x_P)}{\bar{\gamma}}$$

$H^*(x_P)$  et  $C(x_P)$  sont ici les altitudes normales et les cotes géopotentielle du point  $P$  ayant les coordonnées  $x_P$ , et  $\bar{\gamma}$  représente la pesanteur normale moyenne (GRS80) le long de l'aplomb normal. Étant donné que  $\bar{\gamma}$  dépend de l'altitude normale, ce calcul doit se faire de manière itérative.

Il faut utiliser la formule suivante (ou au moins une formule équivalente) pour  $\bar{\gamma}$  (Heiskanen & Moritz, 1967) :

$$\bar{\gamma} = \gamma_0 \left[ 1 - (1 + f + m - 2f \sin^2 \varphi) \frac{H}{a} + \frac{H^2}{a^2} \right]$$

Ici,  $\varphi$  représente la latitude ellipsoïdale dans un système de référence global ;  $H$  est l'altitude normale ;  $a$  est le grand demi-axe de l'ellipsoïde ;  $f$  est l'aplatissement et  $m$  représente le rapport entre la force gravitationnelle et centrifuge à l'équateur.

$$m = \frac{\omega^2 a^2 b}{GM}$$

Avec  $\omega$  : vitesse de rotation de la Terre ;  $b$  : petit demi-axe de l'ellipsoïde ;  $GM$  : constante gravitationnelle géocentrique.

$\gamma_0$  est la pesanteur normale sur l'ellipsoïde (Moritz, 1980) :

$$\gamma_0 = \gamma_E \cdot \frac{1 + k \cdot \sin^2 \varphi}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi}}$$

Avec  $\gamma_E$  : pesanteur normale à l'équateur ;  $e^2$  : première excentricité numérique au carré ;  $k$  : formule de pesanteur constante, soit :

$$k = \frac{b \cdot \gamma_P}{a \cdot \gamma_E} - 1$$

Où  $\gamma_P$  est la pesanteur normale au pôle.

Il faut utiliser les constantes et les grandeurs dérivées suivantes pour le système de référence GRS80 :

$$a = 6378137.0000 \text{ m}$$

$$b = 6356752.3141 \text{ m}$$

$$f = \frac{a - b}{a} = \frac{1}{298.257222101} = 0.00335281068118$$

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} = 0.00669438002290$$

$$\omega = 7.292115 \cdot 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$$

$$GM = 398600.5 \cdot 10^9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$$

$$\gamma_E = 9.7803267715 \text{ m s}^{-2}$$

$$\gamma_P = 9.8321863685 \text{ m s}^{-2}$$

$$m = \frac{\omega^2 a^2 b}{GM} = 0.00344978600308$$

$$k = \frac{b \cdot \gamma_P}{a \cdot \gamma_E} - 1 = 0.001931851353$$



### 3.3. Détermination du géoïde

Conformément au choix des altitudes normales, le quasi-géoïde correspond à la surface de référence pour déterminer l'altitude. Dans ce chapitre, tout comme dans d'autres publications spécialisées, le terme géoïde est également utilisé pour désigner le quasi-géoïde.

#### 3.3.1. Mesures et données

Les observables du champ de pesanteur sont la déviation de la verticale, la pesanteur, la différence de potentiel (résultant du nivellement et de la pesanteur), ainsi que les anomalies d'altitude (généralement sous forme de points de GNSS-nivellement). Il existe en Suisse et dans les pays limitrophes suffisamment de mesures pour une bonne détermination du géoïde, mais il serait souhaitable d'avoir quelques nouvelles mesures. Il faudrait en particulier remplacer certaines anciennes mesures de déviation de la verticale pour ainsi éliminer d'éventuelles erreurs systématiques. De plus, il faudrait si possible déterminer quelques nouveaux points de GNSS-nivellement. Ces points se trouvent jusqu'à présent presque exclusivement le long des lignes du nivellement fédéral. Pour une meilleure répartition spatiale, il faudrait traiter les lignes de nivellement cantonales à partir des données brutes.

Des campagnes ciblées visant à combler les lacunes dans les jeux de données gravimétriques ne sont pas envisagées, car elles demandent des grands efforts. Ces lacunes en matière de données existent bien entendu principalement en haute montagne. Effectuer quelques mesures de déviation de la verticale constitue le meilleur moyen pour pallier à de telles lacunes.

Il faut utiliser un modèle de champ de pesanteur global comme modèle de référence pour le calcul d'un géoïde local. Pour un pays comme la Suisse, l'accent doit être mis sur l'utilisation d'un modèle combiné (satellite et terrestre) à haute résolution.

Pour calculer avec précision un modèle de géoïde national, il faut utiliser au moins un modèle altimétrique numérique à haute résolution. Pour ce faire, une résolution de 10 mètres suffit, mais il serait également utile d'utiliser un modèle de 2 mètres pour la réduction de la pesanteur et la réduction des déviations de la verticale.

Il est également nécessaire d'avoir un modèle bathymétrique des plus grands lacs de Suisse. Cela permet avant tout d'améliorer la réduction des mesures directement sur les rives des lacs, mais aussi d'interpoler le modèle de géoïde au-dessus des lacs, car aucune donnée de mesure n'y est généralement disponible.

Il reste encore à déterminer dans quelle mesure d'autres modèles de densité sont nécessaires pour un modèle de géoïde national. Il s'agirait surtout d'un modèle des glaciers (GLAMOS), de la modélisation des vallées quaternaires (GeoQuat) ou d'un modèle des densités de surface (SAPHYR).

#### 3.3.2. Concept et méthode

Pour les transformations entre systèmes altimétriques, la séparation entre le géoïde et le quasi-géoïde doit être modélisée indépendamment du type de système altimétrique choisi. Pour cette raison, il est également possible de calculer soit un modèle de géoïde, soit un modèle de quasi-géoïde pour ensuite le transformer.

Il n'est pas possible de déterminer la variation temporelle du géoïde (approche cinématique) avec le jeu de données existant. Le modèle de géoïde restera donc statique.

Pour une réalisation optimale du système altimétrique par un modèle de géoïde, la solution qui sera fournie aux utilisateurs doit être contrainte sur les points de GNSS-nivellement (solution hybride ; Marti, 1997, p. 19). Des différences systématiques peuvent sinon apparaître en fonction de la détermination de l'altitude par GNSS (plus géoïde) ou par nivellement (corrigé par gravimétrie).

La première étape pour déterminer le géoïde consiste à enlever l'influence de la pesanteur (selon les modèles de masse connus) des observations effectuées. Il s'agit en général d'un modèle de champ de pesanteur global et de l'influence du modèle numérique de terrain (y compris la bathymétrie). On pourrait



également tenir compte d'autres modèles de densité connus, mais ils sont généralement de moindre importance. Cette étape a pour objectif d'obtenir un champ résiduel relativement lisse et facile à interpoler.

Ce champ résiduel est interpolé de façon appropriée dans une deuxième étape. Pour ce faire, les observations originales (pesanteur et déviations de la verticale) sont converties en anomalies d'altitude. Dans ce contexte, il faut considérer les propriétés connues du champ de pesanteur en tant que champ de force harmonique. Pour les modèles officiels de géoïde, en Suisse, on a utilisé jusqu'à présent une approche de collocation selon les moindres carrés. D'autres méthodes sont toutefois possibles. L'inconvénient de l'approche de collocation est qu'il faut inverser une matrice avec la dimension « nombre d'observations » et que cela limite son utilisation à des zones relativement restreintes.

La troisième étape pour déterminer le géoïde consiste à rajouter les influences que l'on a précédemment enlevées des modèles de masse, mais cette fois-ci sous la forme d'anomalies d'altitude ou de cotes du géoïde. Le calcul de cette troisième étape se fait sur des points d'une grille régulière. Les utilisatrices et utilisateurs finaux recevront ensuite la grille qui a été générée.

Comme le quasi-géoïde présente un tracé plus rugueux que le géoïde, on peut déjà affirmer que la résolution de la grille du nouveau modèle de quasi-géoïde sera plus élevée que celle du modèle actuel CHGeo2004 (1 km ou 30 arcs secondes).

### **3.4. Gestion des contraintes résiduelles**

Des contraintes résiduelles apparaissent inévitablement au moment de réaliser le système altimétrique. Les mesures de nivellement sont typiquement entachées d'erreurs systématiques à longues longueurs d'onde et les mesures GNSS d'erreurs stochastiques à courtes longueurs d'onde.

Dans le cadre de la réalisation, il faut déterminer s'il est possible de procéder à une répartition spectrale exacte des contraintes résiduelles afin d'attribuer les différentes parts à la source correspondante. Lors de la réalisation de RAN95, cette démarche n'a pas été possible, raison pour laquelle les contraintes résiduelles ont été intégrées dans le géoïde (par la contrainte du géoïde sur les mesures de GNSS-nivellement).

### **3.5. Mise à jour des cadres de référence**

Le système altimétrique est défini afin que les cadres de références aient une durée de vie maximale. L'expérience du passage de MN03 à MN95 a montré que tout changement de cadre de référence est inévitablement lié à d'importants coûts, rendant le rapport coût/bénéfice défavorable pour tout changement, à moins d'amener d'importants avantages. Le cadre altimétrique en vigueur actuellement est NF02 et date de 1902. Il a donc plus de 120 ans. Il est possible que le nouveau cadre altimétrique ait une durée de vie similaire.

Dans tous les cas, la consistance entre les produits sera maintenue, afin de ne pas contrevenir à la définition. De plus, le choix de réaliser ou non un nouveau cadre incombera dans tous les cas à swisstopo. Aucun automatisme n'est prévu. Voici quelques exemples de situations qui pourraient conduire à la réalisation d'un nouveau cadre de référence :

- dégradation inacceptable du cadre en vigueur
- nouveaux besoins internes ou externes à swisstopo
- introduction de nouvelles technologies
- mandat légal

### **3.6. Lien avec les systèmes supérieurs**

La définition rigoureuse du système altimétrique est un des prérequis pour une bonne compatibilité avec les systèmes supérieurs. Le passage des cadres des systèmes supérieurs comme EVRS et IHRS aux cadres du système suisse sera assuré par des transformations. Dans l'idéal, ces transformations devraient



consister uniquement en un  $\Delta W_0$  (ou  $\Delta H$ ). Cependant, il est probable que des inconsistances rendent nécessaire une transformation plus complexe, par exemple une surface de transformation interpolée ou un modèle de géoïde, compatible avec le système supérieur.

Ainsi :

$$H_{\text{VRF}} = \frac{H_{\text{CHVRF}}^* \bar{\gamma} + \Delta W_0}{g_0}$$

$H_{\text{VRF}}$  est une altitude dans le système d'altitude cible,  $H_{\text{CHVRF}}^*$  est une altitude dans le CHVRS,  $\bar{\gamma}$  est la pesanteur normale moyenne le long de la normale à l'ellipsoïde et  $g_0$  est l'accélération correspondant au type d'altitude du système d'altitude cible.

À la publication d'un nouveau cadre de référence supérieur et en cas de besoin avéré, swisstopo fournira aux utilisatrices et utilisateurs une transformation appropriée de ce cadre vers le cadre suisse en vigueur.





## 4. Modèle cinématique

### 4.1. Utilisation du modèle cinématique

L'utilisation du modèle cinématique se distingue en fonction du cas d'utilisation. Les sections suivantes détaillent les différents cas.

#### 4.1.1. Rattachement à des points fixes

À proximité des lignes de nivellement, les utilisatrices et utilisateurs auront accès au cadre de référence altimétrique à travers les points fixes. Les lignes de nivellement cantonales y seront également rattachées. Pour des cheminements raisonnablement courts, c'est-à-dire moins de quelques kilomètres, le modèle cinématique peut être négligé, les utilisatrices et utilisateurs travailleront uniquement avec des coordonnées à l'époque de référence. L'époque de mesure ne doit donc pas être considérée.

#### 4.1.2. Utilisation d'un service de positionnement par GNSS

Les services de positionnement par GNSS (comme par exemple le RTK) mettront à disposition plusieurs « Mountpoints », laissant aux utilisatrices et utilisateurs le choix de l'époque à laquelle se réfère la coordonnée. Le cas standard sera l'utilisation de coordonnées de l'époque de référence du cadre. Le modèle cinématique sera donc appliqué par le service de positionnement. Les utilisatrices et utilisateurs n'ont pas à se préoccuper du modèle cinématique.

#### 4.1.3. Mesures GNSS post-traitées

Afin de garantir un traitement rigoureux, le post-traitement de mesures GNSS devra être accompli à l'époque des mesures. Les utilisatrices et utilisateurs doivent récupérer les données de la station AGNES à l'époque de mesure. Ensuite, les résultats devront être transformés à l'époque de référence du cadre. Cette transformation se fera à l'aide d'un service web. En entrée, le service web demandera les informations suivantes :

- coordonnée est, coordonnée nord (MN95) et altitude du point ;
- époque de l'altitude avant transformation ;
- époque souhaitée après la transformation (valeur par défaut : époque de référence du cadre).

Le service renvoie l'altitude à l'époque souhaitée, par exemple à l'époque de référence du cadre.

#### 4.1.4. Utilisation d'un service PPP

Les utilisatrices et utilisateurs de services PPP (ou autres services globaux) obtiendront à priori des coordonnées géocentriques dans un système global ou continental, par exemple ITRS ou ETRS. Les coordonnées devront donc d'abord être transformées dans le cadre de référence terrestre suisse (à l'aide d'un service web du type de REFRAME), avant d'être transformées à la bonne époque, comme dans le cas des mesures GNSS post-traitées.

### 4.2. Réalisation du modèle cinématique

Le modèle cinématique aura les propriétés suivantes :

- Bonne représentation des mouvements verticaux de la croûte terrestre, sans les effets locaux. Par « effets locaux », on entend les phénomènes qui se limitent à une pente respectivement une zone de glissement ou une zone d'affaissement. Les zones d'affaissement connues, comme par exemple la plaine de la Linth (Cantons de Glaris, Saint-Gall, Schwytz) ou la région du Locle



(Canton de Neuchâtel), et dues à des phénomènes non tectoniques sont également à exclure du modèle.

- Le modèle cinématique renvoie pour chaque point situé en Suisse le déplacement vertical que ce point a subi entre  $t_1$  et  $t_2$ , soit :

$$\Delta h = f(E, N, t_1, t_2)$$
$$h(t = t_2) = h(t = t_1) + \Delta h$$

- Le modèle est continu au sens mathématique, tant dans la dimension spatiale que temporelle, c'est-à-dire qu'il ne présente pas de sauts. La première dérivée n'est pas obligatoirement continue.
- Le modèle cinématique représentera, en tout temps, la meilleure approximation connue du champ de vitesse de la croûte terrestre en Suisse. Le modèle pourra être actualisé sans besoin d'assurer la consistance avec les modèles précédemment publiés. En pratique, cela signifie que les altitudes qui ont été réduites à l'époque du cadre à l'aide du modèle disponible à ce moment-là ne peuvent pas être recalculées de manière identique si le modèle cinématique a été mis à jour entre-temps.

Si cette contrainte est inacceptable pour un cas d'utilisation spécifique, les altitudes en question sont à conserver à l'époque de mesure. En effet, il se peut qu'une application requière des transformations entre plusieurs époques qui soient consistantes.

#### 4.2.1. Estimation des déplacements verticaux des points fixes

Les déplacements verticaux relatifs d'une sélection de points de nivellement avaient déjà été calculés dans le cadre de la réalisation de RAN95. La Figure 4-1 en présente le résultat. Le modèle cinématique du nouveau système altimétrique sera principalement basé sur cette méthodologie, car il fournit, à ce jour, les résultats les plus précis et les plus robustes. Une autre source d'information importante sur les déplacements verticaux sont les stations permanentes GNSS du réseau AGNES.

Au besoin et en fonction de l'évolution technologique future, d'autres méthodes pourront venir compléter ces mesures, notamment les mesures GNSS et l'interférométrie radar (InSAR).

#### 4.2.2. Méthode d'interpolation

Une importance capitale revient à la méthode d'interpolation des déplacements verticaux. Une interpolation est nécessaire afin de pouvoir prédire les déplacements verticaux entre les lignes de nivellement et les points fixes.

Plusieurs méthodes existent pour l'interpolation bi-dimensionnelle de données éparses (grille irrégulière). Quelques-unes sont :

- pondération inverse à la distance
- interpolation linéaire sur un réseau irrégulier de triangles
- interpolation non-linéaire sur un réseau irrégulier de triangles
- interpolation par fonctions de base radiale

L'interpolation par fonctions de base radiale présente l'inconvénient de retomber à zéro en l'absence d'observations. Or, ce n'est pas le cas du champ de vitesse de la croûte. Cette méthode semble donc inappropriée dans le cas présent. Les méthodes envisageables sont donc l'interpolation linéaire ou non-linéaire sur un réseau irrégulier de triangles ainsi que la pondération inverse de la distance.

L'interpolation linéaire sur un réseau irrégulier de triangles a l'avantage d'être connue par les spécialistes de la géomatique en Suisse, car elle est à la base de la transformation FINELTRA, qui permet le passage de MN03 à MN95. De plus, cette transformation s'applique de façon très flexible à toute configuration de point et elle permet la densification locale sans influence sur les points hors du triangle concerné. L'inconvénient est la définition des triangles, qui est difficilement automatisable à cause des spécificités de la mensuration officielle.



Outre une interpolation sur une grille irrégulière, une interpolation bilinéaire sur une grille régulière est également envisageable, du moins pour la mise à disposition du champ de vitesse. Il est également possible de définir des sous-régions avec une densité de points supérieure, par exemple avec le format NTV2.

La décision finale pour l'algorithme d'interpolation sera prise lors de la mise en œuvre.

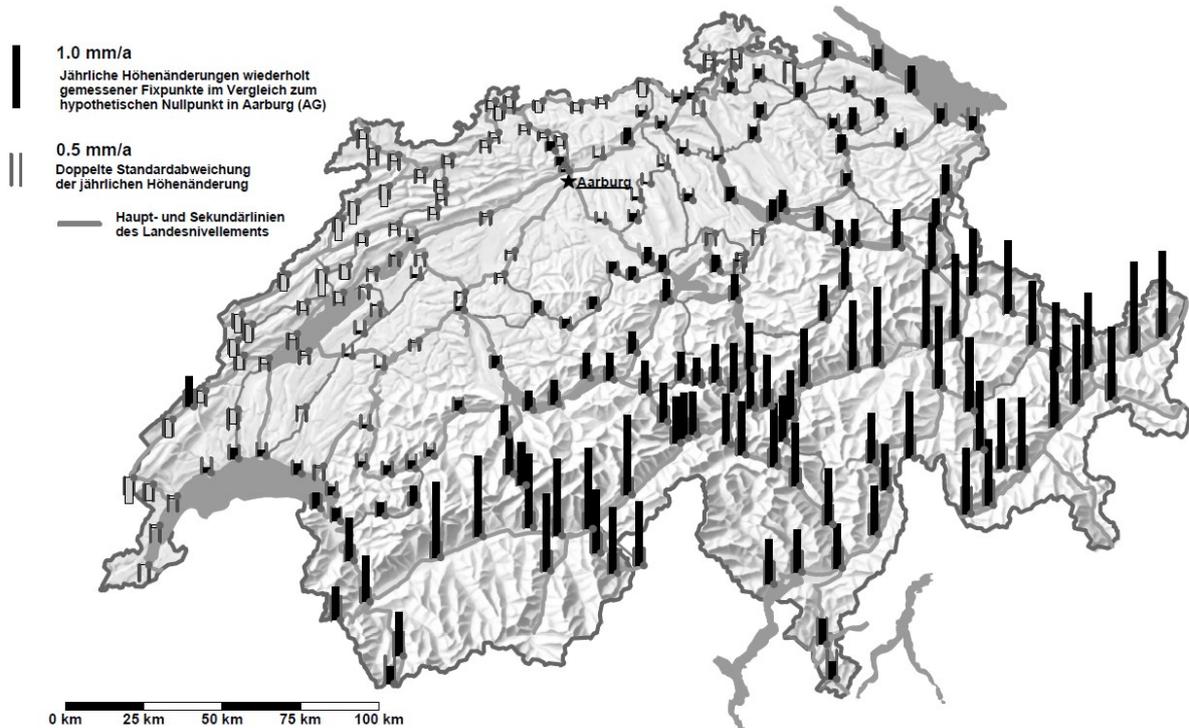


Figure 4-1 : Déplacements verticaux relatifs à Aarburg d'une sélection de points fixes du nivellement fédéral. Source : Schlatter (2007).





## 5. Modèles de géodonnées

Ce chapitre vise à proposer les adaptations nécessaires aux fichiers de référence INTERLIS et aux modèles de géodonnées minimaux suite à l'introduction du nouveau système altimétrique. Il propose également des recommandations pour adapter le modèle de géodonnées de la mensuration officielle DMAV.

Les fichiers de référence INTERLIS, qui traitent des systèmes de référence et des systèmes de coordonnées, sont détaillés dans l'annexe K du manuel de référence INTERLIS 2 eCH-0031. Il s'agit des fichiers suivants :

- *CoordSys.ili* (modèle de système de référence)
- *MiniCoordSysData.xtf* (fichier de description des systèmes de référence)

Les modèles doivent être ajustés pour refléter les définitions du nouveau système (voir section 2.2). Cela implique particulièrement l'association d'une coordonnée altimétrique à son cadre de référence<sup>6</sup>, ainsi que la capacité à prendre en compte la gestion des époques de mesure.

Il y a notamment lieu d'adapter le module de base de la Confédération pour les modèles de géodonnées minimaux qui décrit les géométries :

- *CHBase\_Part1\_GEOMETRY\_V2.ili*

---

<sup>6</sup> En réalité, dans la modélisation INTERLIS, les altitudes se réfèrent à un système de coordonnées à axe unique, et l'on n'emploie pas directement les termes de système de référence ou de cadre de référence.



## 5.1. Définition du nouveau système de référence en INTERLIS 2

La modélisation du nouveau système altimétrique peut être réalisée en tant que nouvelle classe *GeoHeight*, conformément au modèle du système de référence *CoordSys* qui reste inchangé. Les attributs nécessaires pour définir cette classe *GeoHeight* comprennent le type de système altimétrique, l'altitude de référence ainsi que la description de cette dernière. Cette classe est associée à un ellipsoïde de référence, un géoïde, et à un modèle de gravité.

Ainsi, pour permettre d'associer une altitude à son cadre de référence, le fichier *MiniCoordSys* doit être complété avec les descriptions nouvelles suivantes :

```
<GeoHeight ili:tid="BcoordSys.CHVRFXXX">
  <ili:Name>SwissVerticalReferenceFrameXXXX</ili:Name>
  <ili:Axis>
    <LengthAXIS>
      <ShortName>H</ShortName>
      <Description>Swiss Normal Altitude</Description>
    </LengthAXIS>
  </ili:Axis>
  <System>normal</System>
  <ReferenceHeight>0</ReferenceHeight>
  <ReferenceHeightDescr>XX reference points</ReferenceHeightDescr>
  <EllipsoidRef ili:ref="BcoordSys.GRS80"/>
  <GeoidRef ili:ref="BcoordSys.CHQGEOXXX"/>
  <GravityRef ili:ref="BcoordSys.CHGRAVXXX"/>
</GeoHeight>

<Ellipsoid ili:tid="BcoordSys.GRS80">
  <ili:Name>GRS80</ili:Name>
  <EllipsoidAlias>GRS 1980</EllipsoidAlias>
  <SemiMajorAxis>6378137</SemiMajorAxis>
  <InverseFlattening>298.2572221</InverseFlattening>
  <Remarks>Geodetic Reference System 1980</Remarks>
</Ellipsoid>

<GeoidModel ili:tid="BcoordSys.CHQGEOXXX">
  <ili:Name>SwissGeoidXXXX</ili:Name>
  <Definition>See new Swiss Geoid swisstopo</Definition>
</GeoidModel>

<GravityModel ili:tid="BcoordSys.CHGRAVXXX">
  <ili:Name>SwissGravityNetworkXXXX</ili:Name>
  <Definition>See documentation swisstopo Landesschwerenetz</Definition>
</GravityModel>
```

Figure 5-1 : Description de CHVRFXXX (fichier MiniCoordSys.xml).

Dès lors, pour les modèles INTERLIS entièrement nouveaux, l'altitude est modélisée comme suit :

```
REFSYSTEM BASKET BcoordSys ~ CoordSys.CoordsysTopic
OBJECTS OF GeoHeight: CHVRFXXXX;

DOMAIN
Hoehe = COORD
-200.000 .. 5000.000 [INTERLIS.m] {CHVRFXXXX[1]};
Hkoord = COORD
2460000.000 .. 2870000.000 [INTERLIS.m] {CHLV95[1]},
1045000.000 .. 1310000.000 [INTERLIS.m] {CHLV95[2]},
-200.000 .. 5000.000 [INTERLIS.m] {CHVRFXXXX[1]},
ROTATION 2 -> 1;
```

Figure 5-2 : Modélisation d'une altitude CHVRFxxxx



## 5.2. Adaptations du module de base de la Confédération

Afin d'adopter le nouveau système altimétrique, le module CHBase\_Part1\_GEOMETRY\_V2.ili<sup>7</sup> doit être modifié.

Ce module comprend les trois modèles suivants :

- *Geometry\_V2*
- *GeometryCHLV03\_V2*
- *GeometryCHLV95\_V2*

Il y a lieu de modifier les modèles *GeometryCHLV03\_V2* et *GeometryCHLV95\_V2* comme suit :

```
TYPE MODEL GeometryCHLV95_V2 (en)
  AT "https://models.geo.admin.ch/CH/" VERSION "2021-10-19" =

  IMPORTS Units;
  IMPORTS CoordSys;
  IMPORTS Geometry_V2;

  REFSYSTEM BASKET BcoordSys ~ CoordSys.CoordsysTopic
    OBJECTS OF GeoCartesian2D: CHLV95
    OBJECTS OF GeoHeight: CHVRFXXXX;

  DOMAIN
    !!@CRS=EPSG:2056
    Coord3 EXTENDS Geometry_V2.Coord3 = COORD
      2460000.000 .. 2870000.000 [INTERLIS.m] {CHLV95[1]},
      1045000.000 .. 1310000.000 [INTERLIS.m] {CHLV95[2]},
      -200.000 .. 5000.000 [INTERLIS.m] {CHVRFXXXX [1]},
      ROTATION 2 -> 1;

    !!@CRS=EPSG:2056
    MultiPoint3D EXTENDS Geometry_V2.MultiPoint3D = MULTICOORD
      2460000.000 .. 2870000.000 [INTERLIS.m] {CHLV95[1]},
      1045000.000 .. 1310000.000 [INTERLIS.m] {CHLV95[2]},
      -200.000 .. 5000.000 [INTERLIS.m] {CHVRFXXXX [1]},
      ROTATION 2 -> 1 ;
```

Figure 5-3 : Recommandation d'adaptation du module CHBase\_Part1\_GEOMETRY\_V2.

## 5.3. Recommandations pour la prise en compte de la cinématique

On peut identifier deux scénarios distincts en ce qui concerne la gestion des époques :

1. **Valeur de l'altitude officielle sans indication d'époque** : Dans ce cas, l'altitude ne comporte pas d'information sur l'époque de mesure. On considère alors cette altitude comme une altitude officielle, soit à l'époque de référence du cadre.
2. **Valeur de l'altitude mesurée avec indication de l'époque de mesure** : L'altitude inclut une indication de l'époque de mesure. Dans cette situation, la valeur de l'altitude correspond à celle de l'époque de mesure. Pour obtenir une altitude officielle, soit à l'époque du cadre de référence, l'application du modèle cinématique est nécessaire.

Le groupe de travail recommande d'exprimer l'époque de mesure dans les modèles minimaux en années.

```
UNIT
  Year [Y] EXTENDS INTERLIS.TIME;
```

<sup>7</sup> [https://models.geo.admin.ch/CH/CHBase\\_Part1\\_GEOMETRY\\_V2.ili](https://models.geo.admin.ch/CH/CHBase_Part1_GEOMETRY_V2.ili)



La modélisation de l'époque de mesure peut être réalisée en créant un nouveau domaine pour l'époque de mesure, comme le présente l'exemple suivant :

```
DOMAIN
  Hoehe = COORD
    -200.000 .. 5000.000 [INTERLIS.m] {CHVRFXXXX[1]};
  Epoch = 1582 .. 2999 [Y];
```

#### **5.4. Recommandations pour le modèle de géodonnées de la mensuration officielle DMAV**

Aujourd'hui, les altitudes de la mensuration officielle sont modélisées simplement par une valeur et ne sont associées à aucun système de référence. Dans le modèle *DMAVTYM\_Geometrie\_V1\_0.ili*, l'altitude est définie de la façon suivante :

```
DOMAIN
  Hoehe = -200.000 .. 5000.000 [INTERLIS.m]
```

Nous recommandons pour la mensuration officielle :

- d'indiquer le cadre de référence dans la description du modèle (voir figure 5-2 : Modélisation d'une altitude CHVRF) ;
- de ne pas modéliser l'époque de mesure et de n'admettre que des coordonnées à l'époque de référence du cadre.



## 6. Concept de transformation des géodonnées existantes

Ce chapitre couvre les aspects des transformations altimétriques des géodonnées existantes entre le cadre de référence altimétrique officiellement en vigueur NF02, le cadre de référence altimétrique rigoureux RAN95 et le nouveau cadre de référence altimétrique CHVRFxxxx.

### 6.1. Algorithme de transformation

L'algorithme de transformation est présenté à la Figure 6-1. La partie centrale de l'algorithme est la transformation de RAN95 vers CHVRFxxxx. RAN95 est présumé suffisamment compatible avec CHVRFxxxx pour qu'une transformation mathématique directe soit possible avec une précision suffisante, validée par des points de contrôle en nombre suffisant. Cet aspect est à vérifier dans le cadre des « Proofs of Concept ».

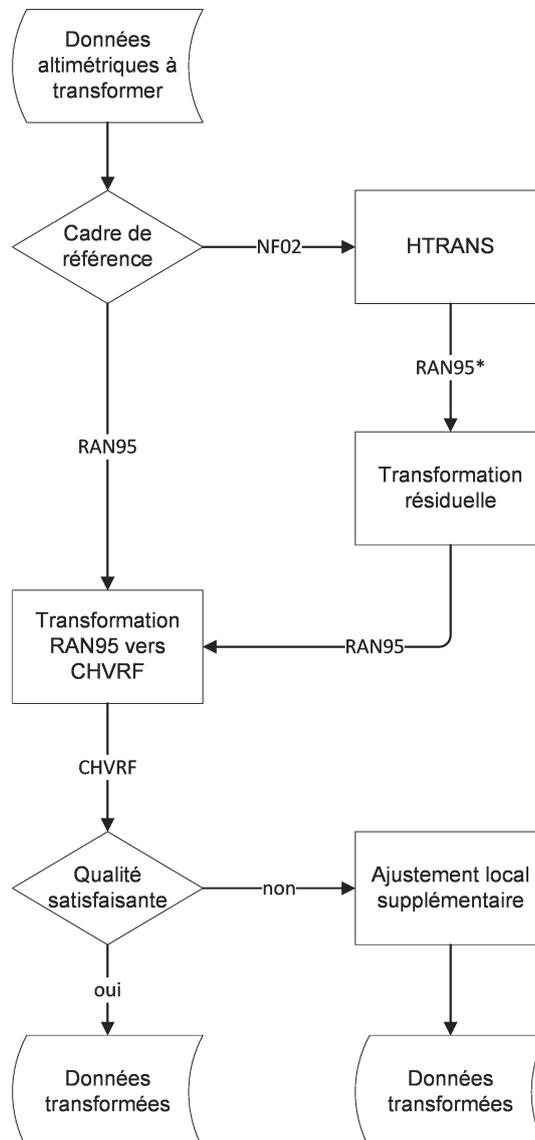


Figure 6-1 : Algorithme de transformation des altitudes. RAN95\* désigne une approximation de RAN95 avant la transformation résiduelle.



Cependant, les géodonnées altimétriques dans le cadre NF02 ne peuvent pas être transformées directement par HTRANS vers CHVRFxxxx avec une précision suffisante. Dans ce cas, HTRANS doit être suivi d'une transformation résiduelle.

## 6.2. Transformation résiduelle

Afin de maintenir la précision altimétrique des géodonnées existantes dans le cadre de référence NF02, voire de l'améliorer, une transformation supplémentaire est nécessaire. En effet, HTRANS n'est pas défini hors des lignes fédérales de nivellement. Les imprécisions inhérentes à NF02 sont un autre facteur limitant. Les résidus sont une fonction des paramètres suivants :

- Type de mesure qui a conduit à l'altitude d'un point (RTK-GNSS, nivellement géométrique, nivellement trigonométrique)
- Cheminement de nivellement (pour les points nivelés)
- Altitude des points de rattachement
- Epoque de mesure

Ces facteurs ne sont en principe pas connus. Cependant, des résidus seront déterminés grâce à des mesures GNSS statiques effectuées sur des points adéquats, ayant une altitude NF02 connue. La Figure 6-2 présente le processus pour obtenir les résidus sur les points d'appui à la transformation (PAT). Une partie cruciale du travail consiste donc à identifier les PAT. Des PAT cantonaux et communaux viendront compléter la transformation, en fonction des besoins locaux et des résultats des transformations.

De plus, pour évaluer la qualité des transformations, des points de contrôle en nombre suffisant seront systématiquement déterminés et comparés avec les altitudes transformées.

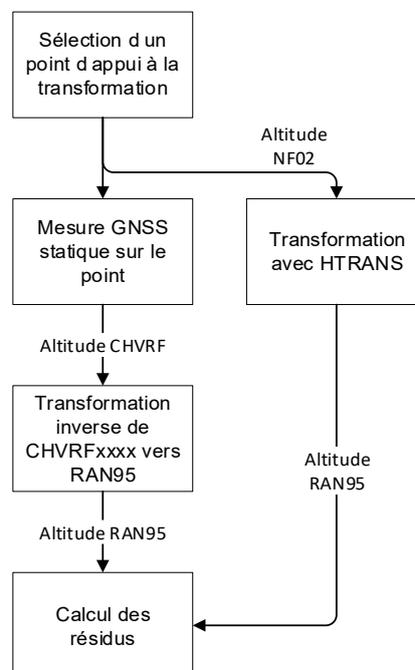


Figure 6-2 : Processus d'établissement des points d'appui à la transformation (PAT).



### **6.2.1. Algorithme d'interpolation**

La méthode d'interpolation est à définir lors de la réalisation de la transformation. Plusieurs algorithmes sont envisageables (liste non exhaustive) :

- Transformation par maillage triangulaire (même type que « FINELTRA », utilisée pour le passage de MN03 à MN95).
- Interpolation bilinéaire sur une grille régulière avec sous-grilles de plus haute densité.

## **6.3. Mise en œuvre**

Afin de faciliter la mise en œuvre du nouveau système altimétrique officiel suisse à l'horizon de 2030, des services de transformations ergonomiques et performants seront préalablement mis à disposition des utilisatrices, des utilisateurs et du public. Le/la gestionnaire des géodonnées sera responsable pour la mise en œuvre, c'est-à-dire la transformation des géodonnées dans le nouveau cadre de référence altimétrique. Les géodonnées transformées devront répondre aux exigences en matière de terminologie, mentionnées dans la partie « définition » du présent document.

### **6.3.1. « Proofs of Concept » avec les cantons**

Dans le but de vérifier la mise en œuvre du concept de transformation des géodonnées existantes, environ quatre projets pilotes sur quelques communes et avec des géodonnées altimétriques de différents domaines d'activités seront réalisés en Suisse avec les cantons concernés et sous la conduite de swisstopo.

L'Office fédéral de topographie swisstopo lancera un appel à projets auprès des cantons afin de bien définir les conditions et objectifs du projet. Au terme de la réalisation des projets, chaque projet pilote fera l'objet d'un rapport et contribuera à consolider le concept de transformation et de mise en œuvre.

### **6.3.2. Obligation de transformer les géodonnées altimétriques existantes**

La décision d'adoption du nouveau système et cadre de référence altimétrique suisse sera accompagnée de l'obligation de transformer l'ensemble des géodonnées altimétriques existantes en Suisse de NF02 vers CHVRFxxxx, dans un délai prédéfini.





## 7. Conclusions et recommandations

Le groupe de travail recommande d'introduire le nouveau système altimétrique CHVRS en tant que système officiel suisse à l'horizon de l'année 2030. Les altitudes CHVRS sont basées sur le calcul de cotes géopotentielles, elles sont de type normal et dans le système de marées « mean-tide ». Le cadre géométrique pour les altitudes est CHTRS. L'ellipsoïde pour le calcul du champ de pesanteur normal est le GRS80. Afin de garantir la pérennité des cadres altimétriques dans le temps, les vitesses verticales des altitudes sont modélisées. Les altitudes officielles sont les altitudes du cadre de référence en vigueur à l'époque de référence du cadre. Au besoin, elles sont réduites à l'époque du cadre de référence à l'aide du modèle cinématique.

Le concept de réalisation du nouveau système altimétrique est principalement basé sur une compensation cinématique de différence de cotes géopotentielles provenant des mesures de nivellement du réseau altimétrique national, corrigées des effets de pesanteur. Le groupe de travail recommande de fixer le datum sur les altitudes de plusieurs points de référence.

Une transformation rigoureuse entre RAN95 et CHVRS sera calculée. Les points qui ne présentent pas d'altitude connue en RAN95 devront être transformés à l'aide d'une transformation résiduelle. Afin de calculer cette transformation, des mesures de densification par GNSS statique sont indispensables. L'algorithme d'interpolation est à définir dans la phase de réalisation.

Les concepts de transformation et de mise en œuvre seront affinés dans le cadre de « Proofs of Concept » en collaboration avec quelques cantons.

Le groupe de travail recommande de poursuivre les travaux, en particulier :

1. évaluation et tests de logiciels scientifiques, notamment pour le calcul du géoïde ;
2. réalisation et adaptations des outils logiciels pour la transformation des altitudes de différentes géodonnées à caractère officiel avec estimation de la précision des altitudes transformées ;
3. réalisation provisoire du nouveau système altimétrique en vue des « Proofs of Concept » ;
4. réalisation de « Proofs of Concept » afin de vérifier la mise en œuvre du concept de transformation des géodonnées existantes ;
5. élaboration de plans détaillés de mise en œuvre et de communication ;
6. établissement d'un plan de financement.





## Bibliographie

Heiskanen WA, Moritz H. (1967). Physical geodesy. San Francisco, WH Freeman.

Marti U. (1997). Geoid der Schweiz 1997. Schweizerische Geodätische Kommission, Zürich, Switzerland.

Moritz H. (1980). Geodetic reference system 1980. Bulletin géodésique, 54, 395-405. doi: 10.1007/BF02521480.

Schlatter A. (2007). Das neue Landeshoehennetz der Schweiz LHN95. Schweizerische Geodätische Kommission, Zürich, Switzerland.





## Liste des figures

Figure 4-1 : Déplacements verticaux relatifs à Aarburg d'une sélection de points fixes du nivellement fédéral. Source : Schlatter (2007). .....	23
Figure 5-1 : Description de CHVRFXXX (fichier MiniCoordSys.txtf). .....	26
Figure 5-2 : Modélisation d'une altitude CHVRFxxxx.....	26
Figure 5-3 : Recommandation d'adaptation du module CHBase_Part1_GEOMETRY_V2. ....	27
Figure 6-1 : Algorithme de transformation des altitudes. RAN95* désigne une approximation de RAN95 avant la transformation résiduelle. ....	29
Figure 6-2 : Processus d'établissement des points d'appui à la transformation (PAT).....	30





## Liste des tableaux

Tableau 2-1 : Résumé des définitions du nouveau système altimétrique CHVRS. ....	12
Tableau 3-1 : Définition des deux cadres de référence altimétrique de la nouvelle mensuration de 1995, CHVRFyy et RAN95. ....	15





## Glossaire

AGNES ; *Automatisches GNSS Netz Schweiz* ; réseau de stations permanentes GNSS suisse.

Altitude ; une altitude peut être de type normal, orthométrique, ellipsoïdal ou usuel.

Cadre de référence ; ensemble des points et des résultats qui permettent de se repérer à l'aide de coordonnées sur terre ou dans l'espace.

Cadre de référence altimétrique ; cadre de référence qui permet la détermination d'altitudes.

Cadre de référence planimétrique ; cadre de référence qui permet la détermination de coordonnées planimétriques.

CH1903+ ; Système de référence planimétrique officiel Suisse.

CHTRS ; *Swiss Terrestrial Reference System* ; Système de référence terrestre suisse.

CHVRFxxx ; *Swiss Vertical Reference Frame xxx* (ou xxx est l'année du cadre). Il s'agit d'un cadre associé à CHVRS.

CHVRFyy ; *Swiss Vertical Reference Frame yy* (ou yy est l'année du cadre). Il s'agit d'une désignation pour le cadre de référence altimétrique associé aux altitudes globales dans le contexte du projet MN95. Cette appellation est obsolète.

CHVRS ; il s'agit du nouveau système altimétrique suisse.

Cinématique ; qui présente une vitesse. Si les vitesses sont le résultat d'une modélisation physique, on parle alors de dynamique.

Commission géophysique suisse ; une commission de l'académie suisse des sciences, chargée, entre-autre, de recueillir les données gravimétriques en Suisse.

Compensation cinématique ; dans le contexte présent, il s'agit du calcul des altitudes en tenant compte des déplacements verticaux.

Cote géopotentielle ; différence de potentiel entre le géoïde et le point en question. Il s'agit d'un type particulier d'altitude qui est à la base des altitudes rigoureuses.

Déviations de la verticale ; angle formé entre l'aplomb local et la normale à l'ellipsoïde du lieu.

DMAV ; *Datenmodell der Amtlichen Vermessung*. Le futur modèle de données de la mensuration officielle en Suisse.

ETRS89 ; *European Terrestrial Reference Frame 1989* ; Système de référence européen.

EVRS ; *European Vertical Reference System* ; Système de référence altimétrique européen.

Géodésie spatiale / géodésie satellitaire ou par satellite ; terme générique qui englobe généralement tous les systèmes satellitaires pouvant être utilisés pour mesurer des positions, c'est-à-dire le GNSS, le VLBI, le SLR et DORIS.

GNSS ; *Global Navigation Satellite Systems* désigne les principaux systèmes de navigation par satellite, soit le GPS (États-Unis d'Amérique), Galileo (Union européenne), GLONASS (Russie) et Beidou (Chine).

GRS80 ; *Geodetic Reference System of 1980* ; Système et ellipsoïde de référence de 1980.

HTRANS ; Transformation permettant de convertir des altitudes entre les cadres de référence NF02 et RAN95.

IAG ; *International Association of Geodesy* ; association internationale de géodésie.

IHRS ; *International Height Reference System* ; Système de référence altimétrique international.



InSAR ; *Interferometric Synthetic Aperture Radar* ; technique de télédétection par satellites qui permet de détecter des changements millimétriques de la surface de la terre. En pratique, cette technique souffre de beaucoup de limitations et a donc, pour l'instant, un usage limité à certaines applications spécifiques.

INTERLIS ; langage de modélisation des géodonnées utilisé en Suisse.

Intra-cadre ; utilisé pour désigner des déformations au sein du cadre. En présence de déformations intra-cadre, le passage d'un cadre à un autre doit inclure un modèle cinématique.

ITRS ; *International Terrestrial Reference System* ; Système de référence international.

Mesures gravimétriques, également : mesures de pesanteur ; mesures de la pesanteur terrestre à l'aide d'un gravimètre. Utile pour la détermination altimétrique.

MN03 ; cadre de référence planimétrique officiel suisse jusqu'en 2016.

MN95 ; cadre de référence planimétrique officiel suisse depuis 2016.

Modèle de densité ou modèle de masses ; modèle du sous-sol qui comprend l'information sur la géométrie mais aussi sur la densité des roches.

NF02 ; Cadre de référence altimétrique officiel suisse basé sur le nivellement fédéral 1902.

PPP ; *Precise Point Positioning* ; technique de mesures GNSS en temps réel, avec une précision décimétrique et le potentiel d'obtenir un positionnement centimétrique.

Proof of Concept ; preuve de faisabilité, qui intervient avant un projet pilote.

RAN95 ; réseau altimétrique national 1995, ensemble des points fixes, des mesures et des résultats qui permettent d'obtenir une altitude orthométrique selon la définition correspondante en Suisse.

REFRAME ; service web de transformation de coordonnées de swisstopo, donnant accès aux transformations officielles suisse.

Résidus ; différence entre une valeur mesurée et une valeur estimée.

RTK ; *Real Time Kinematic* ; mesures GNSS cinématiques en temps réel avec une précision centimétrique.

Système de référence ; ensemble des considérations théoriques qui permettent de réaliser un cadre de référence. On distingue les systèmes de référence altimétrique et planimétrique.

Système des marées ; conventions utilisées pour le calcul des marées (luni-solaires) pour la réduction des observations qui entrent dans le calcul des altitudes.

Transformation résiduelle ; transformation empirique qui vise à minimiser les différences entre les altitudes transformées et les altitudes mesurées.

UELN ; *United European Levelling Network* ; Réseau européen unifié de nivellement.