

# Modélisations géodésiques / physiques avancées dans les réseaux géodésiques de surveillance.


## Franck Schmidt


**Février 2026**

Domaine Ingénierie et Architecture

Master conjoint UNIGE-HES-SO en développement territorial

Orientation Ingénierie géomatique

Directeur : Prof. Dr. Sébastien Guillaume

Expert : Dr. Daniel Willi

Mémoire n° : 1130

UNIVERSITÉ DE GENÈVE

Hes·so
Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale

# Résumé

Ce travail de master évalue l'apport de modèles avancés de géodésie physique dans le cadre de la compensation géodésique et de la surveillance d'ouvrages. L'objectif est d'analyser la possibilité d'intégrer, au sein d'une compensation unique et cohérente, l'ensemble des observations géodésiques, sans recourir à des adaptations stochastiques des calculs.

Les observations locales d'astro-géodésie et de gravimétrie ont permis l'établissement d'un modèle local du géoïde de haute qualité. Les composantes atmosphériques ont été mesurées et évaluées à l'aide de nivellements trigonométriques réciproques et de mesures météorologiques. Ces observations ont servi de base au développement d'un modèle de température proche du sol fondé sur une approche d'apprentissage automatique, puis à la construction d'un modèle atmosphérique quadridimensionnel.

Le positionnement GNSS de haute précision constitue un élément central des réseaux d'auscultation. Ces observations permettent de fixer le cadre de référence de l'ouvrage et d'assurer le suivi à long terme des réseaux de surveillance. La prise en compte des mouvements tectoniques et des déformations de la croûte terrestre garantit un suivi géodésique basé sur le réseau de stations permanentes AGNES. Les résultats montrent que la modélisation fine du champ de pesanteur améliore la cohérence des déterminations altimétriques ainsi que leur intégration avec les observations GNSS.

Si la modélisation avancée de la réfraction atmosphérique demeure une limitation, les développements et tests menés autour de cette thématique ont permis de confirmer que les modèles standards restent des solutions robustes et suffisamment précises.

Ce travail met en évidence que, malgré des gains métriques limités, l'intégration cohérente des phénomènes de géodésie physique, de l'atmosphère et du GNSS améliore les résultats d'une compensation multi-technologies et l'homogénéité des réseaux géodésiques. Ce qui permet d'obtenir au final une meilleure précision relative et à un renforcement de la qualité des contrôles internes.

---

Photo page de titre : Zeuzier — Mesures GNSS vues depuis le pilier 2. Source : auteur

# Abstract

This master's thesis evaluates the contribution of advanced physical geodesy models in the context of geodetic compensation and structural monitoring. The objective is to analyze the possibility of integrating all geodetic observations into a single, consistent compensation system without resorting to stochastic adjustments of calculations.

Local astrogeodetic and gravimetric observations have enabled the establishment of a high-quality local geoid model. Atmospheric components were measured and evaluated using reciprocal trigonometric levelling and meteorological measurements. These observations were used as the basis for developing a near-surface temperature model based on a machine learning approach, and then for constructing a four-dimensional atmospheric model.

High-precision GNSS positioning is a central element of monitoring networks. These observations make it possible to establish the reference frame for the structure and ensure long-term monitoring of the monitoring networks. The consideration of tectonic movements and deformations of the Earth's crust ensures geodetic monitoring based on the AGNES network of permanent stations. The results show that detailed modeling of the gravity field improves the consistency of altimetric determinations and their integration with GNSS observations.

While advanced modeling of atmospheric refraction remains a limitation, developments and tests conducted in this area have confirmed that standard models remain robust and sufficiently accurate solutions.

This work highlights that, despite limited metric gains, the consistent integration of physical geodesy, atmospheric, and GNSS phenomena improves the results of multi-technology compensation and the homogeneity of geodetic networks. This ultimately leads to better relative accuracy and enhanced internal control quality.

---

Cover photo : Zeuzier — GNSS measurements seen from pillar 2. Source : author

# Remerciements

Ce travail de master n'aurait pu être mené à bien sans le soutien, l'accompagnement et les contributions de nombreuses personnes, tant sur les plans académiques, professionnels que personnels. Je tiens à leur exprimer ici ma sincère reconnaissance.

Je souhaite adresser mes plus sincères remerciements à Dr Sébastien Guillaume, professeur responsable de ce travail de master, pour la qualité de son encadrement, sa grande disponibilité et la pertinence de ses conseils tout au long de ce projet.

Je remercie également Dr Daniel Willi , en tant qu'expert, pour son regard critique, ses remarques constructives et ses apports éclairants, qui ont contribué à enrichir la réflexion et à renforcer la qualité scientifique de ce travail.

Mes remerciements s'adressent aussi à la société Oiken, et plus particulièrement à M. Grégoire Sauthier, pour l'accueil, la disponibilité, la mise à disposition du site et des infrastructures.

Je remercie l'ensemble des personnes qui, par leurs échanges, leurs conseils ou leurs aides ponctuelles, ont contribué à l'avancement de ce travail. Je souhaite notamment remercier M. Matteo Casto pour la collaboration fructueuse autour des développements liés au champ de gravité, et M. Fabilen Délèze pour la formation sur les mesures astro-géodésiques, ainsi que M. Reynald Berthod, ingénieur en génie civil (GRUNER SA), pour ses précieux conseils concernant le comportement structurel des ouvrages et l'influence de la température de l'air.

Mes remerciements vont également aux collaborateurs des offices fédéraux, en particulier ceux de l'Office fédéral de la topographie, Dr Urs Marti et Dr Arturo Villiger, ainsi qu'aux services de l'Office fédéral de météorologie et de climatologie, pour leurs conseils avisés et leurs expertises.

Je souhaite aussi remercier toutes les personnes qui m'ont accompagnées sur le terrain, plus particulièrement Kilian Morel et Samuel Schwyn de la Heig-VD, pour leurs soutiens, leurs disponibilités et leurs engagements.

Je tiens également à remercier l'ensemble du personnel de l'entreprise Geosat SA, et plus particulièrement ses directeurs, M. Christian Hagin et M. Patrick Lathion, pour leur soutien, ainsi que pour l'allègement de mes obligations professionnelles, qui m'a permis de me consacrer pleinement à la réalisation de ce projet.

Enfin, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à ma famille, et en particulier à mon épouse et à mes enfants, pour leur soutien indéfectible, leur patience, leurs relectures et leur compréhension tout au long de la période consacrée à la réalisation de ce travail et tout de ces années d'études.

# Table des matières

**Liste des figures et graphiques** **14**

**Liste des tableaux** **16**

**Liste des algorithmes** **17**

**Liste des scripts** **17**

**Liste des symboles** **19**

**1 Introduction** **21**
1.1 Contexte . . . 21
1.2 Objectifs . . . 22

**2 Éléments théoriques** **23**
2.1 Acquisitions d'observations . . . 23
2.1.1 Station totale . . . 23
2.1.1.1 Les angles zénithaux . . . 23
2.1.1.2 Les directions horizontales . . . 24
2.1.1.3 Les distances . . . 24
2.1.2 Nivellement géométrique . . . 25
2.1.3 GNSS . . . 26
2.1.3.1 Constellations satellitaires . . . 27
2.1.3.2 Principe de base du calcul GNSS . . . 28
2.2 Géodésie physique . . . 31
2.2.1 Le géoïde . . . 31
2.2.1.1 Les observations d'altitude et le géoïde . . . 32
2.2.2 La déviation de la verticale . . . 33
2.2.2.1 Correction des observations . . . 35
2.2.3 Micro Géoïde local . . . 36
2.3 Température, Pression, Hydrométrie . . . 37
2.3.1 Pression atmosphérique . . . 37
2.3.2 Humidité relative . . . 38
2.3.3 Température . . . 39
2.4 Détermination d'une dénivelée . . . 40
2.4.1 Nivellement trigonométrique . . . 40
2.4.2 Nivellement géométrique . . . 45
2.5 Systèmes de référence pour la surveillance d'ouvrages d'art . . . 45
2.5.1 Généralité sur l'usage des systèmes de référence . . . 45
2.5.1.1 Cadre absolu et référencement à long terme . . . 45
2.5.1.2 La problématique des systèmes altimétriques . . . 46
2.5.1.3 Le référentiel temporel . . . 46
2.5.2 Systèmes de référence . . . 46
2.5.2.1 Système de référence suisse . . . 47
2.5.2.2 Cadre de référence MN95 . . . 48

2.5.2.3 Problématique de la tectonique des plaques . . . 48
2.5.3 Proposition de surveillance à long terme . . . 52
2.6 Bilan de la partie théorique . . . 55

**3 Application à un réseau de surveillance 57**
3.1 Acquisition de données . . . 57
3.1.1 Choix du site . . . 57
3.1.2 Observations du réseaux géodésique . . . 57
3.1.2.1 Réseau Géodésique . . . 57
3.1.2.2 Bilan mesures géodésiques . . . 57
3.2 Observations spécifiques . . . 58
3.2.1 But et problématique . . . 58
3.2.2 Nivellement trigonométrique réciproque simultané automatique . . . 58
3.2.2.1 But . . . 58
3.2.2.2 Mesures terrain - Matériel . . . 59
3.2.3 Micro Gravimétrie . . . 62
3.2.3.1 Contexte . . . 62
3.2.3.2 Instrumentation . . . 62
3.2.4 Mesures de déviation de la verticale . . . 65
3.2.4.1 But . . . 65
3.2.4.2 Mesures terrain - Matériel . . . 65
3.2.5 Paramètres atmosphériques . . . 67
3.2.5.1 Le but . . . 67
3.2.5.2 Les capteurs . . . 67
3.2.5.3 Acquisition terrain . . . 68
3.2.6 Monitoring . . . 70
3.2.6.1 But . . . 70
3.2.6.2 Caractéristique, configuration, acquisition . . . 70
3.2.6.3 Les capteurs temps réels de l'ouvrage . . . 72
3.3 Bilan des acquisitions . . . 76
3.4 Création d'un champs atmosphérique . . . 77
3.4.1 Calibration des capteurs . . . 77
3.4.2 Modèle météo . . . 77
3.4.3 Transfert de la pression atmosphérique . . . 77
3.4.4 Transfert de l'hydrométrie . . . 78
3.4.5 Estimation du gradient de température . . . 78
3.4.5.1 Transfert standard de la température . . . 78
3.4.5.2 Premier test : transfert direct . . . 79
3.4.5.3 Première approche modèle simple . . . 79
3.4.5.4 Premières estimations . . . 80
3.4.5.5 Deuxième estimation . . . 81
3.4.6 Modèle météo affiné . . . 82
3.4.6.1 Ombre - soleil . . . 83
3.4.6.2 Pente locale . . . 85
3.4.6.3 Angle d'incidence soleil . . . 87
3.4.6.4 Nouveaux paramètres . . . 87
3.4.6.5 Calcul multi-époques . . . 89
3.4.7 Analyse de la stratégie par moindre carré . . . 89
3.4.8 Bilan modèle linéaire . . . 92
3.5 Prédiction de la température du sol . . . 93
3.5.1 L'idée . . . 93
3.5.2 Les données en entrée . . . 93
3.5.3 Le modèle d'apprentissage . . . 95

3.5.3.1 Stratégie . . . 95
3.5.3.2 Les descripteurs . . . 97
3.5.3.3 Entraînement du modèle . . . 97
3.5.3.4 Résultats du modèle Random Forest . . . 97
3.5.3.5 Analyse de la qualité du modèle Random Forest . . . 100
3.5.4 Validation du modèle RF . . . 102
3.6 Création d'un modèle 4D . . . 102
3.6.1 Hypothèse d'une température référence de l'air $T_{3000}^{\mathrm{MCH}}$ . . . 102
3.6.1.1 Interpolation temporelle du gradient thermique . . . 104
3.6.1.2 Température de référence à une altitude donnée $T_{3000}^{\mathrm{MCH}}$ . . . 104
3.6.2 Température cible à $T_{400\mathrm{sol}}^{MCH}$ . . . 105
3.6.3 Modèle de transfert vertical $T_{sol}$ vers $T_{400\mathrm{sol}}^{\mathrm{MCH}}$ . . . 108
3.6.3.1 Principe général . . . 108
3.6.3.2 Fonction de poids . . . 109
3.6.3.3 Contrôle vitesse de transition avec $w$ . . . 111
3.6.3.4 Synthèse . . . 112
3.6.4 Optimisation des paramètres de transfert de température . . . 112
3.6.4.1 Vecteurs des observations . . . 113
3.6.4.2 Vecteur de paramètres . . . 113
3.6.4.3 Fonction de coût et apprentissage des paramètres (implémentation Python) . . . 114
3.6.4.4 Implémentation dans un script des éléments d'optimisation . . . 117
3.6.4.5 Résultats de l'optimisation et prédiction d'une température air . . . 118
3.6.4.6 Analyse de la qualité du modèle air . . . 120
3.6.5 Modèle météo final . . . 121
3.6.5.1 Modèles de températures . . . 121
3.7 Correction des observations . . . 123
3.7.1 Paramètres atmosphériques . . . 123
3.7.1.1 Pré-traitement des mesures géodésiques . . . 123
3.7.2 Correction des distances . . . 124
3.7.2.1 Variation entre un modèle standard et une atmosphère 4D . . . 124
3.7.3 Détermination de la réfraction . . . 126
3.7.4 Géoïde et déviation de la verticale . . . 129
3.7.4.1 CHGEO2004 vs Géoïde local . . . 132
3.8 Traitement du Monitoring . . . 133
3.8.1 Traitement des données du monitoring . . . 133
3.8.2 Impact sur les mesures géodésiques . . . 135

**4 Validation avec le réseau géodésique de Zeuzier 139**
4.1 Positionnement global par GNSS . . . 139
4.1.1 Post-traitement des mesures GNSS . . . 139
4.1.1.1 Traitement avec Bernese, état 2025 . . . 139
4.1.1.2 Traitement des états de 2010 à 2025 avec Leica Infinity . . . 143
4.1.1.3 Compensation dans un modèle topocentrique . . . 143
4.1.2 Comparaison Bernese – Leica Infinity . . . 148
4.1.3 Auscultation GNSS à long terme . . . 148
4.1.3.1 Conversion des coordonnées IGB14 vers le cadre $CH1903+(2014.70)$ . . . 148
4.1.3.2 Détermination des vitesses . . . 149
4.1.3.3 Validation de l'application des vitesses . . . 151
4.2 Ajustement des observations géodésiques . . . 153
4.2.1 Approche classique . . . 153
4.2.2 Modèle locaux du géoïde et atmosphère 4D . . . 153
4.3 Déterminations altimétriques . . . 156
4.3.1 Les dénivelées via le GNSS . . . 156

4.3.2 Nivellement géométrique . . . 156
4.3.2.1 Validation de l'apport des corrections orthométriques . . . 157
4.3.3 Nivellement trigonométrique réciproque simultané . . . 158
4.3.3.1 Évaluation des dénivelées trigonométriques . . . 161
4.3.4 Le coefficient de réfraction . . . 162
4.3.4.1 À partir du nivellement trigonométrique . . . 162
4.3.4.2 Lancer de rayon . . . 162
4.4 Compensation complète . . . 165

**5 Discussion** **169**
5.1 Validation des résultats . . . 169
5.2 Perspectives – Réfraction . . . 170
5.3 Perspectives – GNSS . . . 170
5.4 Commentaires personnels . . . 170

**6 Conclusion** **173**

**Bibliographie** **175**

**Annexes** **A-1**

**A Fiche signalétique VSF15** **A-5**

**B Fichier mesures CG-6** **A-7**

**C Acquisitions du réseau géodésique** **A-9**

**D Base de donnée json du monitoring** **A-15**

**E Calibration des capteurs météos** **A-17**

**F Les indicateurs d'analyses et qualités** **A-23**

**G Mise en valeur du modèle Random Forest** **A-25**

**H Modèle conceptuel du script d'optimisation du modèle météo 4D** **A-27**

**I Architecture du fichier LandXML Leica** **A-29**

**J Deltas distances avec le modèle 4D** **A-31**

**K Compensation NelCas Monitoring** **A-33**

**L Résumé calcul Bernese** **A-47**

**M Résultat compensation session Bernese avec point 1103 comme pivot** **A-57**

**N Analyse du fichier Rinex points 1103** **A-61**

**O Analyse du fichier Rinex points 13** **A-67**

**P Rapport ligne de base calcul Leica Infinity** **A-73**

**Q Comparaison Bernese VS Leica Infinity** **A-79**

**R Compensation : Classique problématique stations 13 et 15** **A-85**

**S Compensation : Classique** **A-87**

**T Compensation : Géoïde local et atmosphère 4D** **A-95**

**U Statistique des résultats finaux : terrestres** **A-103**

**V Statistique des résultats finaux : GNSS** **A-105**

**W Situation des points et cheminements du nivellement géométrique** **A-107**

**X Situation du réseau trigonométrique, vue d'ensemble** **A-111**

**Y Situation du réseau trigonométrique proche de l'ouvrage** **A-115**

# Liste des figures et graphiques


2.1 Visualisation de $E$, $R$, l'erreur de collimation horizontale et l'importance de l'égalité des portées 26
2.2 Principe des observations de phase GNSS en zéro différence et ambiguïtés entières . . . . . 28
2.3 Représentation du géoïde. Source : (Swisstopo, 2025) . . . . . 31
2.4 Profil topographique, illustrant le géoïde et les relations entre altitudes ellipsoïdale : $h(\mathrm{x})$, orthométriques : $H^{\mathrm{orth}}(\mathrm{x})$ et l'ondulation du géoïde : $N(\mathrm{x})$. Adapté de (Guillaume, 2024) . . . . . 32
2.5 Mise en évidence de la déviation de la verticale entre la verticale locale et la normale à l'ellipsoïde de référence . . . . . 34
2.6 Dépendances des observations géodésiques aux effets de la gravité. Inspiré de (Guillaume, 2024) 37
2.7 Nivellement trigonométrique longue porté. Source : (Guillaume, 2023) . . . . . 42
2.8 Détermination de $\delta_{\mathrm{refr}}$ le long du chemin. Source : (Guillaume, 2023) . . . . . 42
2.9 Condition d'égalité recherchée . . . . . 44
2.10 Relation entre les systèmes de références terrestres, inspiré de : (Swisstopo-Cadastre-48, 2025) 47
2.11 Vitesse horizontale des stations ITRF2014 par rapport à l'époque de référence $t_0 = 2010.0$. Source : (Guillaume, 2024) . . . . . 48
2.12 Vecteurs vitesses horizontal des points fixes du cadre de référence **CHTRF2016** à l'époque $t = 2018.0$, orienté dans le cadre de référence MN95. Source des données : (Swisstopo-PNAC, 2024) . . . . . 49
2.13 Interpolation des vitesses **horizontales** des points fixes du cadre de référence **CHTRF2016** à l'époque $t = 2018.0$ selon les composantes MN95, Est et Nord. Source des données : (Swisstopo, 2025), (Swisstopo-PNAC, 2024) . . . . . 50
2.14 Représentation des vitesses **verticales** des points de référence **CHTRF2016** à l'époque $t = 2018.0$. Source des données : (Swisstopo, 2025), (Swisstopo-PNAC, 2024) . . . . . 51
2.15 Graphique mis à disposition par PNAC pour le suivi à long terme des stations permanentes. Vitesses données par rapport au cadre ETRS. Sources : (Swisstopo-PNAC, 2024) . . . . . 52
2.16 Interpolation des vitesses horizontales des stations du réseau AGNES dans le cadre de référence IGS14. Source de données : (Swisstopo, 2025) et (Swisstopo-PNAC, 2024) . . . . . 54
2.17 Représentation des vitesses verticales des stations du réseau AGNES dans le cadre de référence IGS14. Source de données : (Swisstopo, 2025) et (Swisstopo-PNAC, 2024) . . . . . 55

3.1 Installation nivellement trigonométrique au pilier 14 . . . . . 59
3.2 Situation des deux nivellements trigonométriques. . . . . 60
3.3 Le concept d'acquisition mis en place . . . . . 60
3.4 Visualisation de la série temporelle sur la mesure Trig1, écart à la moyenne de la semaine . . . . 61
3.5 Visualisation de la série temporelle sur la mesure Trig2, écart à la moyenne de la semaine . . . . 61
3.6 Situation des points de référence absolu VSF15 et local N16b. . . . . 63
3.7 Mesures avec le **CG6** . . . . . 64
3.8 Principe des mesures de micro-gravimétrie, avec une boucle secondaire. . . . . 64
3.9 Répartition des points de mesures. . . . . 65
3.10 Station de mesure astro-géodésique, avec système PyDeadalus . . . . . 66
3.11 Répartition des stations de mesures de déviation de la verticale, avec les valeurs en WGS84. . . . 67
3.12 Répartition des capteurs météos. . . . . 68
3.13 Situation des points auscultés par le monitoring. . . . . 71
3.14 Déplacement durant la semaine sur la composante Est . . . . . 71
3.15 Déplacement durant la semaine sur la composante Nord . . . . . 72

3.16 Déplacement durant la semaine sur la composante Altimétrique . . . . . 72
3.17 Situation des capteurs automatiques, exploités afin de suivre l'évolution de l'ouvrage durant les acquisitions. Inspiré de Oiken (2025) . . . . . 73
3.18 Représentation vecteur unitaire . . . . . 85
3.19 Les éléments permettant de calculer l'angle d'incidence alpha . . . . . 85
3.20 Illustration de la grille de sélection des pixels, $\mathbf{z_5}$ pixel central . . . . . 86
3.21 Répartition des mesures météorologiques entre la vallée et la crête des alpes . . . . . 94
3.22 Visualisation des données sur la plateforme EUMETSAT, pour le 20.09.2025 à 12 :30 UTC, en blanc les nuages. Source : EUMETSAT [1] . . . . . 94
3.23 Vue de l'interface de conversion des fichiers sources vers Geotiff. Source : EUMETSAT . . . . . 95
3.24 Température au sol prédite par le modèle Random Forest le 17.09.2025 à 12 :00 . . . . . 99
3.25 Illustration du décalage de 400 mAGL dans un profil avec une topographie plate. . . . . 106
3.26 Illustration du décalage de 400 mAGL dans un profil avec une topographie accidentée. . . . . 106
3.27 Visualisation de la surface cible pour calcul de la température $T^{MCH}_{400\text{sol}}$. . . . . 106
3.28 Visualisation de la température à la surface 400 mAGL, à la date du 18.09.2025 à 12 :00. . . . . 107
3.29 Représentation de la température interpolé à 1 900 m le 18 septembre à 18 : 06. Avec la température sol au même moment. . . . . 119
3.30 Situation du profil pour le graphique des courbes isothermes, avec la température au sol à la date du 17.09.2025 à 13h00 . . . . . 120
3.31 Structure du dictionnaire après traitement du fichier XML . . . . . 123
3.32 Illustration de l'incrémentation des coordonnées . . . . . 124
3.33 Évolution de la température le long de la ligne de visée 11-14. . . . . 125
3.34 Mise en évidence des écarts entre un modèle de correction des distances standard et le modèle 4D, pour les observations de la station 11 . . . . . 125
3.35 Les profils de température au-dessus du sol le long de la ligne de visée 11-14, la flèche noire représente la ligne de visée. . . . . 126
3.38 Carte représentant la précision du co-géoïde et des déviations de la verticale sur le site d'étude. Source : (Casto, 2026) . . . . . 130
3.39 Déviation de la verticale dans le système ITRS astronomique et en MN95. Source : (Casto, 2026) 131
3.40 Résumé des paramètres importants de la compensation libre du monitoring dans NelCas . . . . . 134
3.41 Situation des points auscultés par le monitoring. . . . . 135

4.1 Lignes de base calculées par le logiciel Bernese. Source : (Swisstopo-PNAC, 2024) . . . . . 140
4.2 Deux variantes de calculs Bernese pour les points du site d'étude. Source : (Swisstopo-PNAC, 2024) . . . . . 140
4.4 Analyses des performances entre les deux approches de corrections des observations géodésiques. 154

C.1 Stations AGNES prises en compte dans le réseau de surveillance . . . . . A-9
C.2 Répartition des points mesurés par GNSS autour de l'ouvrage . . . . . A-10
C.3 Images des deux matérialisations mises en place durant les mesures . . . . . A-11
C.4 Visualisation de la répartition temporelle des mesures GNSS . . . . . A-11
C.5 Les mesures par nivellement géométrique de précision . . . . . A-12
C.6 Vue isométrique des mesures réalisées par station totale [2] . . . . . A-13

E.1 Comparaison des capteurs de référence-Humidité relative . . . . . A-17
E.2 Delta entre les capteurs de référence-Humidité relative . . . . . A-17
E.3 Comparaison des capteurs de référence - Température . . . . . A-18
E.4 Delta entre les capteurs de référence - Température . . . . . A-18
E.5 Comparaison des capteurs de référence - Pression . . . . . A-19
E.6 Delta entre les capteurs de référence - Pression . . . . . A-19
E.7 Comparaison des capteurs Humidité relative . . . . . A-21
E.8 Comparaison des capteurs Température . . . . . A-21
E.9 Comparaison des capteurs Pression . . . . . A-21

I.1 Architecture du fichier XML de Leica Geosystems avec les clefs relationnelles . . . . . A-29

# Liste des tableaux

2.1 Caractéristiques principales des systèmes GNSS utilisés . . . . . 27
2.2 Correction pour une dénivelée en fonction de la distance . . . . . 41

3.1 Protocole de contrôle qualité sur le terrain de la détermination d'une déviation de la verticale . . 66
3.2 Liste des capteurs météo . . . . . 68
3.3 Validation de la pression atmosphérique par transfert standard le 17.09.2025 à 00 :00 . . . . . 78
3.4 Validation de la pression atmosphérique par transfert standard le 18.09.2025 à 16 :00 . . . . . 78
3.5 Gradients verticaux moyens de l'évolution de la température en [°C/100m] proposés par Bouët à deux niveau d'altitude. . . . . 79
3.6 Validation de la température par transfert standard le 17.09.2025 à 00 :00, vers une altitude de 1 800 m . . . . . 79
3.7 Validation de la température par transfert standard le 18.09.2025 à 09 :30, vers une altitude de 1 800 m . . . . . 79
3.8 Extrait des données de la station de mesures des Diablerets. Source MétéoSuisse. . . . . 93
3.9 Températures calculées depuis les paramètres de la droite de régression, et les résidus pour chacune des stations . . . . . 96
3.10 Paramétrage du modèle Random Forest et de l'apprentissage . . . . . 97
3.11 Extrait des résultats du calcul des gradients thermiques par radiosondage entre les altitudes 2 500 et 4 000 m . . . . . 104
3.12 Extrait de températures interpolées à $T_{3000}^{\mathrm{MCH}}$, à partir des données des stations DIA et JUN, avec le gradient adiabatique calculé des radiosondages. L'écart type standard sur les données de toute la semaine est à 0.6 °C. . . . . 105
3.13 Ordres de grandeur numériques et impact des paramètres du modèle sur la fonction de coût et la stabilité de l'optimisation. . . . . 116
3.14 Comparaison entre les valeurs de cotre du géoïde et déviation de la verticale issues du modèle CHGEO2004 et local. Sources des valeurs Local (Casto, 2026) . . . . . 132

4.1 Variations des coordonnées sur le site d'étude entre deux variantes de calcul . . . . . 141
4.2 Liste des points mesurés pour chaque état . . . . . 143
4.3 Nombre d'observations éliminées en fonction de la stratégie de calcul. La mention 19–8 correspond à la sélection des observations acquises uniquement durant la nuit. . . . . 145
4.4 Erreurs moyennes a posteriori sur les observations et précisions des composantes topocentriques $(y, x, z)$ après ajustement des sessions GNSS pour chaque état . . . . . 146
4.5 Déplacements planimétriques et altimétriques entre les époques, stations AGNES communes et rotations activées. . . . . 147
4.6 Vitesses des stations AGNES recalculées dans le cadre $CH1903+(2014.70)$ et comparaison avec les valeurs officielles PNAC. . . . . 150
4.7 Comparaison des résidus issus des stratégies $CH1903+(2014.70)$ et PNAC pour les époques 2010, 2015 et 2020 ; après transfert à l'époque 2025. Les valeurs RMS sont calculées pour chaque composante. . . . . 151
4.8 Comparaison des distances GNSS 3D depuis le pilier 11, comparée aux résultats des variantes de compensation. . . . . 155
4.9 Dénivelée de référence depuis le pilier 11 . . . . . 156

4.10 Corrections orthométriques pour les cheminements du site d'étude. Source des corrections (Casto, 2026) . . . 157
4.11 Dénivelées ellipsoïdales corrigées de la cote orthométrique . . . 157
4.12 Comparaison des dénivelées ellipsoïdales **corrigées** des cotes orthométriques avec les autres méthodes d'acquisition. . . . 157
4.13 Comparaison des dénivelées ellipsoïdales **non corrigées** des cotes orthométriques avec les autres méthodes d'acquisition. . . . 158
4.14 Comparaison des dénivelées entre les points 1 et 2 . . . 161
4.15 Comparaison des dénivelées entre les points 1 et 14 . . . 161
4.16 Écarts entre la dénivelée mesurée par GNSS depuis le point 11 ; par rapport à la station totale, avec diverses stratégies de prise en compte de $\delta_{\text{refr}}$. . . . 163
4.17 Comparaison des dénivelées (nivellement géométrique) et effets de $\delta_{\text{refr}}$, pris en compte dans le nivellement des corrections orthométriques, avec indicateur visuel de qualité. . . . 164
4.18 Synthèse des performances des différentes corrections de nivellement . . . 164
4.19 Ellipsoïdes d'erreur moyenne relative 3D avec gain global de la solution 4D par rapport à la versions classique, avec l'orientation des axes A et B de l'ellipsoïde. . . . 167

C.1 Résumé des stations de mesures avec les précisions des mesures de séries [3] . . . A-14

E.1 Valeurs de référence des capteurs sur le site test . . . A-20

## Liste des algorithmes

3.1 Test ombrage : lancé de rayon pour le test d'ombrage . . . 84
3.2 Principe du calcul du gradient Γ par régression linéaire, pour les données par radiosondage, au temps des mesures $t$ . . . 103
3.3 Principe du calcul de la correction de la distance par intégration numérique . . . 124
3.4 Estimation itérative de la réfraction par lancer de rayon (`ray_trace_zeta`) . . . 127

## Liste des scripts

3.1 Fonction de récupération des éléments de position du soleil . . . 83
3.2 Extrait des données brutes d'un profil de radiosondage du 17.09.2025 à 11h04 UTC (site de Payerne) 103
3.3 Résultat du programme de lancer de rayon avec l'évolution de $\delta_{\text{refr}}$, pour un angle testé à 100 gon 127
3.4 Test d'un lancer de rayon en atmosphère standard, pour un angle testé à 100 gon . . . 128
4.1 Listing des résultats de la compensation de la session 2025 en GPS seul . . . 145
4.2 Accroissements sur les stations AGNES – calcul multi-époques avec stations AGNES considérées comme invariantes . . . 146
4.3 Erreurs moyennes sur les coordonnées et observations, sur un ajustement entre époque des points du site. . . . 147
4.4 Résultats de l'ajustement avec prédiction à l'époque cible 2025 à partir des vitesses estimées dans le cadre $CH1903+(2014.70)$ . . . 152
4.5 Résultats de l'ajustement avec prédiction à l'époque cible 2025 à partir des vitesses officielles PNAC 152
4.6 Résultats compensation libre, avec corrections classique des observations . . . 153
4.7 Résultats compensation libre, avec micro géoïde et atmophsère 4D . . . 153
D.1 Extrait du format du fichier JSON de la base de données du monitoring, pour une mesure complète d'un point. Source : Pareto Solutions Sàrl . . . A-15

# Liste des symboles

## Observables

| | | | |
|---|---|---|---|
| $r'$ $[gon]$ | direction horizontale interne à l'instrument | $\zeta'$ $[gon]$ | angle zénithal interne à l'instrument |
| $r$ $[gon]$ | direction horizontale mesurée | $\zeta$ $[gon]$ | angle zénithal mesuré |
| $\check{r}$ $[gon]$ | direction horizontale vraie | $\check{\zeta}$ $[gon]$ | angle zénithal vrai |
| $d'$ $[m]$ | distance inclinée | $d$ $[m]$ | distance horizontale au niveau du lieu |
| $d_0$ $[m]$ | distance réduite au niveau de la mer | $d_{\text{proj}}$ $[m]$ | distance dans le plan de projection |
| $R$ $[m]$ | rayon moyen de la Terre : 6 380 000 m | $\mathbf{g}$ $[m\,s^{-2}]$ | gravité locale |
| $T$ [°C] | température de l'air | $T_{\text{ref}}$ [°C] | température de référence |
| $P$ $[mbar][hPa]$ | pression atmosphérique | $H_{\text{hydro}}$ [%] | humidité relative |
| $P_{\text{sat}}$ $[mmHg]$ | pression de vapeur saturante | $e$ $[mmHg]$ | pression partielle de vapeur d'eau |
| $\Gamma$ [°C/$m$] | gradient adiabatique | $T^{MCH}$ [°C] | température issue des données Météo-Suisse |
| K | constante conversion [°C] en Kelvin [K] : + 237.15 | $\mathbf{R}$ $[m]$ | effet de la réfraction |
| $\mathbf{E}$ $[m]$ | effet de la sphéricité terrestre | $k$ | coefficient de réfraction atmosphérique |
| I, II | première et deuxième position de l'instrument | | |
| $\xi, \eta$ $[gon]$ | déviations de la verticale | $\alpha$ $[gon]$ | gisement entre deux points |

## Coordonnées

| | | | |
|---|---|---|---|
| $\lambda, \phi$ [°] | longitude et latitude géographiques | $\Lambda, \Phi$ [°] | longitude et latitude astronomiques |
| $E, N$ $[m]$ | coordonnées planimétriques en MN95 | $H^{\text{u}}$ $[m]$ | altitude usuelle |
| $H^{\text{orth}}$ $[m]$ | altitude orthométrique | $h$ $[m]$ | altitude ellipsoïdale |
| $x, y, z$ $[m]$ | coordonnées topocentrique ou cartésienne locales | $X, Y, Z[m]$ | coordonnées géocentriques |
| $Z_{\text{agl}}$ $[m]$ | hauteur au-dessus du sol | | |
| $N$ $[m]$ | cote du géoïde | $C$ $[m]$ | cote géopotentielle |

## Altimétrie

| | | | |
|---|---|---|---|
| $ar$ $[m]$ | visée arrière | $av$ $[m]$ | visée avant |
| $\Delta h_{\text{comp}}$ $[m]$ | dénivelée ajustée | $\Delta h_{\text{corr}}$ $[m]$ | dénivelée corrigée |
| $\Delta h$ $[m]$ | dénivelée brute entre deux points | $\check{\Delta} h$ $[m]$ | dénivelée vraie entre deux points |
| *ellips* | élément basé sur l'ellipsoïde | *orth* | élément basé sur le géoïde |

## Mathématiques

| | | | |
|---|---|---|---|
| $\mathbf{l}$ | vecteur des observations | $\hat{\mathbf{v}}$ | vecteur des résidus |
| $\hat{\mathbf{x}}$ | vecteur des inconnues estimées | $\mathbf{K}_{\mathrm{ll}}$ | matrice de variance–covariance |
| $\mathbf{Q}_{\mathrm{ll}}$ | matrice des cofacteurs des observations | $\mathbf{P}$ | matrice des poids |
| $\mathbf{A}$ | matrice des coefficients de linéarisation | $\hat{\mathbf{w}}$ | vecteur des résidus normés |
| $\hat{w}_i$ | résidu normé | $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{v}}\hat{\mathbf{v}}}$ | matrice des cofacteurs des résidus |
| $\mathbf{K}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}}$ | matrice de variance–covariance empirique | $\sigma_0$ | unité de poids théorique |
| $\hat{\sigma}_0$ ou $s_0$ | unité de poids empirique | | |
| $\alpha, \beta, \gamma, \ldots$ | angles quelconques | $\lambda\ [m]$ | longueur d'onde |
| $\bar{x}$ | moyenne d'une valeur | $\delta$ | variation |

# CHAPITRE 1

# INTRODUCTION

## 1.1 Contexte

La surveillance géodésique des ouvrages d'art constitue un élément central de la gestion du risque et du suivi de la stabilité des infrastructures. Dans de nombreux cas, les concepts de surveillances ainsi que les techniques de mesures ont été mises en place à la fin des constructions. Il n'est pas rare de rencontrer des stratégies de contrôle datant de plus de 50 ans. Les concepts de surveillance ont rarement suivi avec les évolutions technologiques, scientifiques et les méthodes de mesures et de calculs sont restées identiques au fil des années.

Ces vingt dernières années, les instruments, les technologies d'acquisition et les méthodes de calculs géodésiques ont fortement évolués. Les observations, issues de techniques et technologies variées en topométrie classique, nivellement, GNSS, LiDAR ou encore gravimétrie atteignent aujourd'hui des niveaux de précisions très élevés. Les outils et algorithmes modernes d'ajustement permettent de combiner l'ensemble des observations afin de les compenser au sein d'un même réseau de surveillance.

En pratique, la compensation commune d'observations de provenances diverses pose de nombreuses difficultés. Il est nécessaire d'adapter artificiellement les précisions à priori, voir d'exclure certaines observations, afin d'obtenir, un ajustement avec un modèle stochastique à posteriori cohérent. Cette approche empirique, n'est pas rigoureuse d'un point de vue géodésique, chaque observation possède une précision intrinsèque réelle, issue de son principe physique et de sa technologie, de son environnement de mesures et des techniques d'acquisitions.

Les écarts observés entre les différentes techniques ne sont pas uniquement d'origines instrumentales. Ils résultent également d'effets géophysiques et de contraintes liées au cadre de référence, tels que la structure locale du champ de gravité, les déviations de la verticale, la trajectoire des rayons lumineux dans l'atmosphère avec les effets de réfraction atmosphérique. Si ces phénomènes ne sont pas correctement modélisés, ils introduisent des biais incompatibles avec une compensation homogène et physiquement cohérente des observations.

Ce travail de master, montrera qu'une modélisation avancée et locale des principaux éléments de la géodésie physique permettrait de compenser un réseau géodésique de surveillance, sans pénaliser une technologie au profit d'une autre. L'objectif est de ne plus d'adapter les observations à l'ajustement, mais de corriger les observations, en tenant compte de la réalité physique du terrain.

Une branche fondamentale de la géodésie, consiste à déterminer la forme de la Terre à travers la modélisation du champ de gravité et de ses variations. Les observations issues des instruments topométriques sont intimement liées à la géométrie du géoïde ; mais également à la propagation des ondes électromagnétiques dans l'atmosphère. Les avancées technologiques, dans les domaines de la gravimétrie, de l'astro-géodésie et de la modélisation atmosphérique offrent la possibilité de déterminer des corrections plus fines et physiquement justifiées.

Dans le cadre d'un usage courant, ces corrections sont généralement appliquées à l'aide de modèles globaux ou empiriques, qui ne représentent que partiellement la réalité locale du terrain. Pour des applications de surveillance de haute précision, notamment sur des ouvrages sensibles, tels que des barrages ou des grandes infrastructures, ces approximations sont insuffisantes.

L'acquisition et la modélisation de modèles locaux de très haute précision constituent ainsi le cœur de ce travail. Le but visé est de corriger les observations géodésiques de manière cohérente, afin de permettre un ajustement tridimensionnel rigoureux d'un réseau de surveillance et d'évaluer l'impact de ces corrections sur la précision interne et la cohérence globale des résultats.

## 1.2 Objectifs

Les corrections nécessaires à la compensation rigoureuse des observations géodésiques peuvent être regroupées en deux grandes catégories principales :

- **les corrections liées au champ de gravité** ;
- **les corrections atmosphériques**.

La modélisation de ces deux composantes repose sur l'acquisition de mesures spécifiques, notamment :

- nivellement trigonométrique réciproque simultané ;
- observations météorologiques : température, pression, humidité ;
- mesures gravimétriques ;
- détermination des déviations de la verticale.

À partir des données gravimétriques et des déviations de la verticale, un modèle de géoïde local pourra être calculé. Ce modèle permettra de prédire, sur l'ensemble du site d'étude, les ondulations du géoïde, les altitudes et cotes orthométriques, ainsi que les déviations de la verticale. Ces informations seront utilisées pour corriger les observations angulaires, ainsi que les observations du nivellement géométrique.

La modélisation atmosphérique constitue un élément central du travail. La prédiction et l'interpolation des paramètres atmosphériques en tout point de l'espace à l'aide d'un modèle spatio-temporel représentent un défi majeur, en particulier dans des contextes topographiques complexes. L'établissement d'un modèle atmosphérique local permettra de déterminer un indice de l'air pour la correction des distances mesurées, ainsi que l'estimation du trajet de la lumière dans l'air, et en déduire l'angle de réfraction applicable aux angles zénithaux.

Si la correction des observations terrestres est au cœur de cette étude, l'utilisation des systèmes de positionnement satellitaires joue également un rôle fondamental. Le GNSS permet de déterminer des positions tridimensionnelles dans un cadre de référence global. En Suisse, le réseau de stations GNSS permanentes AGNES constitue une infrastructure de référence de haute qualité. Ce travail étudiera la faisabilité et la pertinence de s'appuyer sur ce réseau afin de définir un cadre de référence stable et cohérent pour la surveillance géodésique d'un ouvrage à long terme.

L'objectif global est de démontrer qu'une approche intégrée, fondée sur la géodésie physique et des modèles locaux de haute précision, permet d'améliorer la cohérence, la rigueur et la précision de l'ajustement tridimensionnel des réseaux de surveillance d'ouvrages.

# CHAPITRE 2

# ÉLÉMENTS THÉORIQUES

Avant de pouvoir implémenter les différents modèles de correction, il est nécessaire de définir de manière claire les équations associées ainsi que le rôle et l'influence de chaque paramètre. Ce chapitre est exclusivement consacré aux aspects théoriques et mathématiques des méthodes utilisées. Les stratégies de calcul des différents paramètres, ainsi que leur implémentation numérique, sont présentées dans le chapitre 3, page 57.

## 2.1 Acquisitions d'observations

### 2.1.1 Station totale

L'instrument, *station totale robotisée*, permet d'acquérir des observations angulaires (angle zénithal et direction horizontale), de distances, depuis un point donné. Les observations acquises durant les mesures sont réalisées dans les deux positions de la lunette afin d'éliminer les erreurs instrumentales, un bref rappel de l'implication de ces erreurs est donné aux formules 2.2 et 2.4

Les mesures acquises sont directement influencées par deux paramètres géophysiques :

- la déviation de la verticale du lieu
- l'indice de l'air déterminé à partir des valeurs de l'atmosphère

#### 2.1.1.1 Les angles zénithaux

Les mesures d'angles zénithaux sont des observations dites optiques et liées à la position de l'instrument. Ces observations étant optiques, elles sont fortement influencées par la composition de l'atmosphère quantifiable par l'indice de l'air $n$.

**Observations brutes**

L'observation fournie par l'instrument est corrigée par divers éléments, tels que le défaut de verticalité de l'instrument (lue par le compensateur à deux axes) et les erreurs internes de l'instrument :

$$\zeta_{\mathrm{I}} = \zeta'_{\mathrm{I}} + incl_{\mathrm{l}} + i_0 \quad [gon] \tag{2.1}$$

avec :

| | |
|---|---|
| $\zeta$ | : valeur brute lue par l'instrument sur le cercle vertical $[gon]$ |
| $incl_{\mathrm{l}}$ | : lecture de la valeur longitudinale du compensateur $[gon]$ |
| $i_0$ | : erreur d'index du zéro du cercle $[gon]$ |

Avec la technique de mesure dans les deux positions de la lunette, il est possible d'éliminer les erreurs instrumentales :

$$\begin{aligned} \bar{\zeta}_{\text{I-II}} &= [\zeta_{\mathrm{I}} + 400 - (\zeta_{\mathrm{II}})] \cdot 0.5 \\ &= [(\zeta'_{\mathrm{I}} + incl_{\mathrm{l\,I}} + i_0) + 400 - (\zeta'_{\mathrm{II}} + \overbrace{incl_{\mathrm{l\,II}}}^{\approx -incl_{\mathrm{l\,I}}} + i_0)] \cdot 0.5 \\ &= [\zeta'_{\mathrm{I}} + 400 - \zeta'_{\mathrm{II}} + (incl_{\mathrm{l\,I}} + incl_{\mathrm{l\,II}})] \cdot 0.5 \end{aligned} \tag{2.2}$$

#### 2.1.1.2 Les directions horizontales

**Observations brutes**

L'observation fournie par l'instrument est corrigée par divers éléments, tels que le défaut de verticalité de l'instrument (lue par le compensateur à deux axes) et les erreurs internes de l'instrument :

$$r = r' + \frac{incl_{\mathrm{t}}}{\tan\zeta} + \frac{c}{\sin\zeta} + \frac{a}{\tan\zeta} \quad [gon] \tag{2.3}$$

avec :

| | |
|---|---|
| $r'$ | : valeur brute lue par l'instrument sur le cercle horizontal $[gon]$ |
| $incl_{\mathrm{t}}$ | : lecture de la valeur transversale du compensateur $[gon]$ |
| $c$ | : erreur de collimation horizontale $[gon]$ |
| $a$ | : erreur de tourillonnement $[gon]$ |
| $\zeta$ | : angle zénithal corrigé de ces erreurs instrumentales $[gon]$ |

Avec la technique de mesure dans les deux positions de la lunette, il est possible ici aussi, d'éliminer les erreurs instrumentales. Seul le défaut de verticalité subsiste :

$$\begin{aligned}
\bar{r}_{\text{I-II}} &= [r_{\mathrm{I}} + (r_{\mathrm{II}} - 200.0)] * 1/2 \\
&= \left[ r'_{\mathrm{I}} + \frac{incl_{\mathrm{t\ I}}}{\tan\zeta_{\mathrm{I}}} + \frac{c}{\sin\zeta_{\mathrm{I}}} + \frac{a}{\tan\zeta_{\mathrm{I}}} + \left( r'_{\mathrm{II}} + \underbrace{\frac{\overbrace{incl_{\mathrm{t\ II}}}^{\approx -incl_{\mathrm{t\ I}}}}{\tan\zeta_{\mathrm{II}}}}_{inv.posI} + \underbrace{\frac{c}{\sin\zeta_{\mathrm{II}}}}_{inv.posI} + \underbrace{\frac{a}{\tan\zeta_{\mathrm{II}}}}_{inv.posI} \right) - 200.0 \right] \cdot 1/2 \\
&= \left[ r'_{\mathrm{I}} + r'_{\mathrm{II}} - 200.0 + \frac{incl_{\mathrm{t\ I}}}{\tan\zeta_{\mathrm{I}}} + \frac{incl_{\mathrm{t\ II}}}{\tan\zeta_{\mathrm{II}}} \right] \cdot 1/2 \quad [gon]
\end{aligned} \tag{2.4}$$

#### 2.1.1.3 Les distances

Dans les observations de distances réalisées à l'aide d'un distancemètre infra rouge, les paramètres de températures, pression atmosphérique et hydrométrie seront à corriger. Les formules de correction fournies par les constructeurs permettent de calculer une valeur en millimètre par kilomètre [mm/km].

Les instruments utilisés dans le cadre de ce travail sont de la marque Leica Geosystems. La valeur de référence, calibration interne de l'instrument, est fixée pour les conditions météos suivantes :

- Température : 12 °C
- Pression : 1 013.3 mbar
- Humidité relative : 60 %

Afin d'être rigoureux, la valeur de correction devrait tenir compte de l'évolution de l'atmosphère tout le long du chemin de la ligne de visée. Cette information est rarement disponible, il est d'usage de corriger les observations avec les paramètres météos à la station de mesure ou en les interpolant au niveau moyen de la visée.

Dans le cadre de ce travail, un modèle météo 4D doit être mit en place afin de pouvoir estimer la correction tout le long de la ligne de visée. Il est donc possible de considérer la correction totale pour une mesure de distance comme l'intégrale entre deux points $A(ENH, t)$ et $B(ENH, t)$ ; l'estimation prent en compte l'évolution des paramètres atmosphériques le long de la ligne de visée au moment de la mesure $t$.

La formule générale du calcul de la correction est :

$$corr_{\mathrm{d}} = \int_{x=0}^{x=d'_{\mathrm{AB}}} \delta_{\text{corr-d}} \quad dx[mm] \tag{2.5}$$

Avec pour formule de calcul de la correction en [mm/km], pour un instrument Leica Geosystems de type TS60 (GEOSYSTEMS-TS60, 2025) :

$$ppm(t,P,T,H_{\text{hydro}}) = \left( 286.338 - \left[ \frac{0.29535 \cdot P}{\left(1+\frac{T}{273.15}\right)} - \frac{4{,}126\times10^{-4}\cdot H_{\text{hydro}}}{\left(1+\frac{T}{273.15}\right)} \cdot 10^{7.5\cdot\frac{T}{(237.3+T)}+0.7857} \right] \right) \quad [mm/km] \tag{2.6}$$

Et pour une correction sur la distance totale en [m] :

$$\frac{\partial \delta_{\text{corr-d}}}{\partial d'_{\text{AB}}} = ppm \cdot (1 \cdot e^{-6}) \cdot \Delta d'_{\text{AB}} \quad [m] \tag{2.7}$$

Où les différentes variables sont déterminées pour une position et un temps donné :

| | |
|---|---|
| $P(E,N,H^{\text{u}},t)$ | : Pression atmosphérique en [hPa] |
| $T(E,N,H^{\text{u}},t)$ | : Température de l'air [°C] |
| $H_{\text{hydro}}(E,N,H^{\text{u}},t)$ | : Humidité relative [%] |
| $\Delta d'_{\text{AB}}$ | : Fraction de distance AB [km] |

Le modèle atmosphérique doit être de bonne précision. Les paramètres influencent significativement la correction sur la distance. Ci-dessous, de combien doivent varier les paramètres afin d'obtenir une correction de 1 ppm :

- Température : 1 °C
- Pression : 4 hPa
- Hydrométrie : 180 %

### 2.1.2 Nivellement géométrique

Le nivellement géométrique est une technique de mesures couramment utilisée dans le domaine de la surveillance des ouvrages d'art. Il présente un très haut degré de précision, s'il est exécuté dans les règles de l'art. La précision des niveaux électroniques actuels, utilisés pour le nivellement de précision, est de 0.2 mm/km permettant de réaliser des transferts d'altitude sur de longues distances.

Les formules du calcul d'une dénivelée du nivellement géométrique, avec la prise en compte des erreurs instrumentales et de la sphéricité de la terre sont les suivantes :

$$\begin{aligned} \Delta h^{\text{u}} &= (ar + i\cdot d_{\text{ar}} + E\cdot d_{\text{ar}}) - (av + i\cdot d_{\text{av}} + E\cdot d_{\text{av}}) \\ &= (ar-av) + i\cdot \underbrace{(d_{\text{ar}} - d_{\text{av}})}_{\text{Si } d_{\text{ar}} \approx d_{\text{av}} => 0} + E\cdot \underbrace{(d_{\text{ar}} - d_{\text{av}})}_{\text{Si } d_{\text{ar}} \approx d_{\text{av}} => 0} \\ &= ar - av \quad [m] \end{aligned} \tag{2.8}$$

Avec :

| | |
|---|---|
| $\Delta h^u$ | : dénivelé usuel [m] |
| $ar/\,av$ | : lecture arrière et avant du niveau [m] |
| $d$ | : distance horizontale entre l'appareil et le point mesuré [m] |
| $i$ | : erreur d'horizontalité de l'axe optique ou numérique [mm/m] |
| $E$ | : effet de sphéricité de la courbure terrestre avec $E = d^2/(2R)$ |

La formule 2.8 montre que les erreurs de collimation horizontale de l'axe optique, celles liées la sphéricité de la terre et celles liées à la réfraction s'éliminent en respectant l'équidistance des portées entre les points à déterminer et la station de mesure. De plus l'influence liées à la réfraction sont négligeables car la distance entre la station et le point visé est au maximum env. 25 m. Voir schémas, figure 2.1.

La détermination d'un point $B$ depuis un point $A$, en réalisant des dénivelés le long d'un chemin $S$, peut s'écrire sous la forme comme étant la somme des dénivelées $\Delta h^{\mathrm{u}}$, que l'on peut simplifier par d$n$ tel que :

$$H^{\mathrm{u}}(\mathrm{B}, S) = \int_{\mathrm{A},S}^{B} \mathrm{d}n \tag{2.9}$$

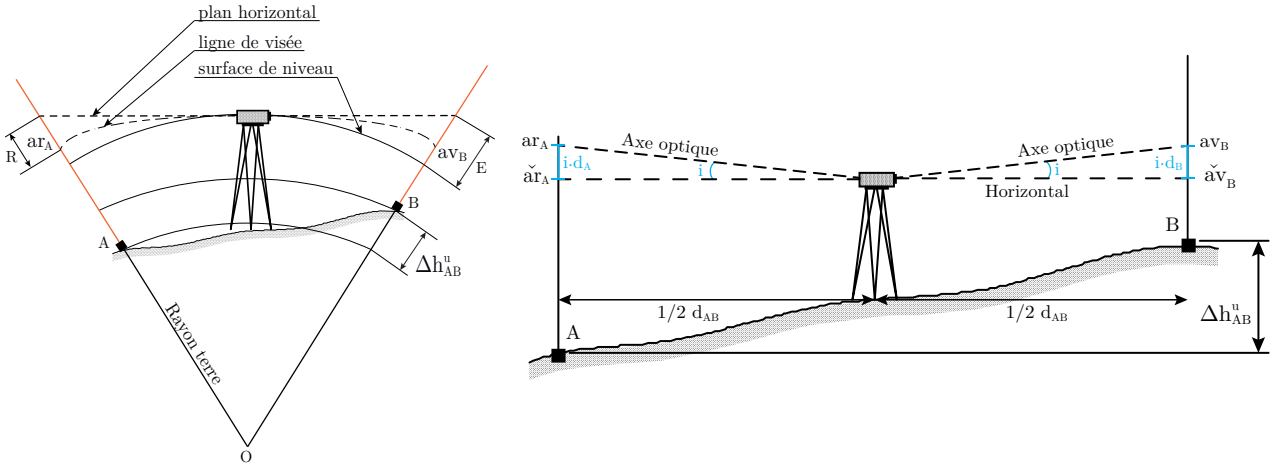



**Fig. 2.1** – Visualisation de $E$, $R$, l'erreur de collimation horizontale et l'importance de l'égalité des portées

Sur le terrain, l'équidistance des portées doit être respectées, afin de garantir des observations de grande précision et entachées d'un minimum d'incertitude. Le contrôle des mesures est garanti par des cheminements aller-retour qui permettent de contrôler les écarts sur les dénivelées.

### 2.1.3 GNSS

Le positionnement à l'aide du *Global Navigation Satellite Systems* (GNSS) est devenu un standard dans les réseaux de surveillance et d'auscultation d'ouvrages. Cette technique permet de déterminer avec une très grande précision des lignes de base, sous forme de vecteurs tridimensionnels, sur de longues distances, et sans nécessiter de ligne de visée directe entre les points observés, dans un cadre de réfrence global : ITRS.

Dans le cadre des mesures d'auscultation d'ouvrages, la méthode d'acquisition statique, reposant sur l'enregistrement continu des observations, est généralement privilégiée par rapport aux solutions en temps réel.

Avec une stratégie de mesure en mode statique, basée sur l'enregistrement des phases des signaux satellitaires et un post-traitement adapté, la précision du vecteur 3D d'une ligne de base peut atteindre :

$$\sigma_{\mathrm{vec3D}} = 2\,\mathrm{mm} + 0.5\,\mathrm{mm/km}$$

Cette précision est atteignable pour des durées d'observation longues, supérieures à 8 h, et idéalement réalisées de nuit afin de bénéficier de conditions ionosphériques plus stables.

L'obtention d'une ligne de base GNSS de haute précision dépend de plusieurs paramètres liés à l'acquisition et au traitement des observations :

- **Récepteur GNSS** : de qualité géodésique, garantissant une mesure fine du temps et un traitement interne optimal des signaux.
- **Antenne GNSS** : de qualité géodésique, idéalement de type *choke ring* afin de limiter les effets de multi-trajet et de signaux parasites. Pour le post-traitement, une calibration absolue de l'antenne est

requise, l'antenne doit être orientée vers le nord afin que les corrections de calibration soient correctement appliquées.

- **Compatibilité multi-constellation** : l'antenne et le récepteur doivent permettre l'observation simultanée de plusieurs systèmes satellitaires.
- **Stabilité de la matérialisation** : absence de mouvements parasites durant toute la durée de l'acquisition.
- **Environnement du point** : emplacement dégagé offrant une bonne visibilité du ciel.
- **Intervalle d'enregistrement** : généralement de 15 s ou 30 s. Des intervalles plus courts sont peu pertinents en raison de la forte corrélation temporelle des observations.
- **Post-traitement des observations** à l'aide d'un logiciel de qualité géodésique prenant en compte :
  - les éphémérides précises des satellites (orbites des satellites $\approx 2.5\,\text{cm}$) [1],
  - les calibrations d'antennes,
  - l'exploitation multi-constellation,
  - la modélisation individuelle de la troposphère et de l'ionosphère,
  - différentes stratégies de résolution des ambiguïtés.

#### 2.1.3.1 Constellations satellitaires

Dans le cadre des acquisitions GNSS statiques, les quatre constellations satellitaires utilisées sont GPS, GLONASS, Galileo et BeiDou.

- **GPS** : système de positionnement par satellite **américain** et constitue la référence historique du positionnement par satellite. Il offre une excellente stabilité temporelle et une compatibilité universelle avec les récepteurs GNSS.
- **GLONASS** : système de positionnement par satellite **russe**. Il complète efficacement le GPS en améliorant la géométrie satellitaire et la disponibilité des observations, notamment aux latitudes élevées.
- **Galileo** : système de positionnement par satellite **européen**, entièrement civil. Il se distingue par la qualité de ses signaux, en particulier la bande E5 qui permet de fortement améliorer la précision sur le code.
- **BeiDou** : système de positionnement par satellite **chinois**. Il apporte une redondance supplémentaire aux solutions multi-constellations et améliore la robustesse du positionnement GNSS.

| **Système** | **Pays / Organisation** | **Nb. sat.** | **Altitude [km]** | **Signaux civils** | **Plans orbitaux / sat. par plan** |
|---|---|---|---|---|---|
| GPS | États-Unis | ∼31 | ∼20 200 | L1, L2, L5 | 6 / 4 |
| GLONASS | Russie | ∼24 | ∼19 100 | L1, L2, L3 | 3 / 8 |
| Galileo | Union européenne | ∼28 | ∼23 200 | E1, E5a, E5b, E6 | 3 / 8 |
| BeiDou | Chine | ∼35 | ∼21 500 | B1, B2, B3 | 3 / 8 |

**Tab. 2.1** – Caractéristiques principales des systèmes GNSS utilisés

Dans les applications GNSS statiques de haute précision, l'utilisation combinée de ces constellations permet d'améliorer la précision, la fiabilité et la robustesse des calculs des solutions de positionnement.

1. Source : https://igs.org/products/

#### 2.1.3.2 Principe de base du calcul GNSS

La figure 2.2 illustre le principe des observations de phase GNSS, incluant les ambiguïtés entières associées à chaque couple satellite-récepteur. Un récepteur $A$ considéré comme fixe, et récepteur $B$ mobile. Les deux récepteurs observent simultanément les signaux émis par plusieurs satellites GNSS, notés $i$ et $j$.

Les observations $L_A^i$, $L_B^i$, $L_A^j$ et $L_B^j$ correspondent aux mesures de phase de l'onde porteuse GNSS, exprimées en mètres. Elles sont liées à la distance géométrique satellite-récepteur, au nombre entier de longueurs d'onde $\lambda$, et sont affectées par les erreurs d'horloge, les retards atmosphériques ainsi que le bruit de mesure.

La combinaison appropriée de ces observations permet, après élimination des erreurs communes et résolution des ambiguïtés entières, l'estimation précise du vecteur de ligne de base $\boldsymbol{AB}$.

Les différentes étapes du calcul sont les suivantes :

- **zéro différence** : mise en relation directe des observations des récepteurs $A$ et $B$ vers les satellites $i$ et $j$ ;
- **simple différence** : différence entre les observations des récepteurs $A$ et $B$ vers un même satellite ;
- **double différence** : différence entre les simples différences associées aux satellites $i$ et $j$.

Dans la suite, seules les équations finales sont explicitement présentées. Les développements intermédiaires sont disponibles dans les notes de cours de (D. Willi, 2022).

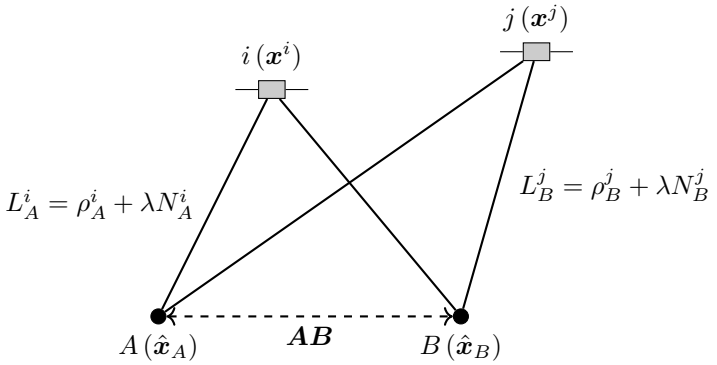



**Fig. 2.2** – Principe des observations de phase GNSS en zéro différence et ambiguïtés entières

#### Zéro différence

Les mesures de deux récepteurs $A$, $B$ vers deux satellites $i$, $j$ :

$$L_A^i + \hat{v}_{L_A^i} = \left\|\hat{\mathrm{x}}_A - \mathrm{x}^i\right\| + c \cdot \delta\hat{t}_{\mathrm{rec}}^A - c \cdot \delta t_{\mathrm{em}}^{\mathrm{sat}_i} + \lambda\left(N_A^i + \alpha_A - \alpha^i\right) + \delta\rho_{A,\mathrm{trop}}^i - \delta\rho_{A,\mathrm{iono}}^i \tag{2.10}$$

$$L_B^i + \hat{v}_{L_B^i} = \left\|\hat{\mathrm{x}}_B - \mathrm{x}^i\right\| + c \cdot \delta\hat{t}_{\mathrm{rec}}^B - c \cdot \delta t_{\mathrm{em}}^{\mathrm{sat}_i} + \lambda\left(N_B^i + \alpha_B - \alpha^i\right) + \delta\rho_{B,\mathrm{trop}}^i - \delta\rho_{B,\mathrm{iono}}^i \tag{2.11}$$

$$L_A^j + \hat{v}_{L_A^j} = \left\|\hat{\mathrm{x}}_A - \mathrm{x}^j\right\| + c \cdot \delta\hat{t}_{\mathrm{rec}}^A - c \cdot \delta t_{\mathrm{em}}^{\mathrm{sat}_j} + \lambda\left(N_A^j + \alpha_A - \alpha^j\right) + \delta\rho_{A,\mathrm{trop}}^j - \delta\rho_{A,\mathrm{iono}}^j \tag{2.12}$$

$$L_B^j + \hat{v}_{L_B^j} = \left\|\hat{\mathrm{x}}_B - \mathrm{x}^j\right\| + c \cdot \delta\hat{t}_{\mathrm{rec}}^B - c \cdot \delta t_{\mathrm{em}}^{\mathrm{sat}_j} + \lambda\left(N_B^j + \alpha_B - \alpha^j\right) + \delta\rho_{B,\mathrm{trop}}^j - \delta\rho_{B,\mathrm{iono}}^j \tag{2.13}$$

Avec :

| | |
|---|---|
| $L$ | : observation de phase GNSS (en mètres) |
| $N$ | : ambiguïté entière de phase |
| $\lambda$ | : longueur d'onde du signal GNSS |
| $\alpha$ | : biais de phase électronique du récepteur ou du satellite |
| $\delta t_{\text{rec}}, \delta t_{\text{em}}$ | : erreurs d'horloge des récepteurs et satellites |
| $c$ | : vitesse de la lumière |
| $\hat{\mathrm{x}}_A, \hat{\mathrm{x}}_B$ | : coordonnées approchées des récepteurs |
| $\mathrm{x}^i\, \mathrm{x}^j$ | : coordonnées des satellites |
| $\delta\rho$ | : erreur de propagation due à la troposphère (trop) et à l'ionosphère (iono) |

### Simple différence

En formant la différence simple des observations de phase entre les récepteurs $A$ et $B$ pour un même satellite, on obtient les équations (2.14) et (2.15). Les délais électroniques des satellites sont éliminés par la simple différence, et les délais électroniques des récepteurs $\alpha_A - \alpha_B$ subsistent. Le terme $N^i_{AB}$ représente l'ambiguïté des simples différences de phase.

$$L^i_{AB} + \hat{v}_{L^i_{AB}} = \left\|\hat{\mathrm{x}}_A - \mathrm{x}^i\right\| - \left\|\hat{\mathrm{x}}_B - \mathrm{x}^i\right\| + c\left(\delta\hat{t}^A_{\text{rec}} - \delta\hat{t}^B_{\text{rec}}\right) + \lambda\left(N^i_{AB} + \alpha_A - \alpha_B\right) \tag{2.14}$$

$$L^j_{AB} + \hat{v}_{L^j_{AB}} = \left\|\hat{\mathrm{x}}_A - \mathrm{x}^j\right\| - \left\|\hat{\mathrm{x}}_B - \mathrm{x}^j\right\| + c\left(\delta\hat{t}^A_{\text{rec}} - \delta\hat{t}^B_{\text{rec}}\right) + \lambda\left(N^j_{AB} + \alpha_A - \alpha_B\right) \tag{2.15}$$

### Double différence

$$L^{ij}_{AB} + \hat{v}_{L^{ij}_{AB}} = \left\|\hat{\mathrm{x}}_A - \mathrm{x}^i\right\| - \left\|\hat{\mathrm{x}}_B - \mathrm{x}^i\right\| - \left\|\hat{\mathrm{x}}_A - \mathrm{x}^j\right\| + \left\|\hat{\mathrm{x}}_B - \mathrm{x}^j\right\| + \lambda N^{ij}_{AB} \tag{2.16}$$

Dans l'équation de la double différence de phase 2.16, les erreurs dues à l'atmosphère, à savoir l'ionosphère et la troposphère, de même que les erreurs d'horloges des satellites et des récepteurs n'apparaissent pas de manière explicite. Cette formulation est valable pour des lignes de base courtes, inférieures à 10 km, pour lesquelles les différentes erreurs sont fortement corrélées entre les récepteurs. Dans ce cas, ces erreurs s'éliminent ou se réduisent fortement lors du processus de double différence.

En revanche, lorsque la longueur de la ligne de base augmente et dépasse environ 10 km, cette corrélation diminue. Les effets atmosphériques deviennent alors non négligeables et doivent être explicitement pris en compte à l'aide de modèles adaptés. Ces modèles visent à quantifier l'influence des couches ionosphériques et troposphériques sur la vitesse de propagation des ondes GNSS, afin de garantir la précision du positionnement.

La double différence permet de déterminer les ambiguïtés de phase entières. En considérant deux époques successives, notées $t$ et $t+1$, et en réalisant la différence temporelle des doubles différences, on obtient les triples différences. L'analyse de l'évolution temporelle des résidus des triples différences, permet de détecter les sauts de cycles et de vérifier la cohérence des observations.

### Impact de l'ionosphère et de la troposphère

Les signaux GNSS traversent deux couches atmosphériques principales avant d'atteindre le récepteur : l'ionosphère et la troposphère. Ces couches possèdent des caractéristiques physiques distinctes et induisent des effets différents sur les observations. L'objectif ici n'est pas de détailler les modèles de correction, mais d'en rappeler les principales propriétés et impacts :

- **Ionosphère :**
  - Couche atmosphérique située approximativement entre 60 km et 1 000 km.
  - Son activité dépend de la densité d'ions et d'électrons, influencée par l'activité solaire, l'heure locale et la latitude géographique.
  - Effet principal sur la phase : avance de phase (accélération apparente de la propagation de l'onde).
  - L'influence ionosphérique dépend de la fréquence du signal.
  - Atténuation des effets possibles par l'utilisation de combinaisons bi-fréquences, notamment la combinaison ionosphère-libre (L3) issue de L1 et L2, les modèles ionosphériques globaux ou régionaux.
  - En pratique, dans les traitements GNSS modernes bi-fréquences, l'effet ionosphérique peut être correctement éliminé ou modélisé, et son impact final sur les résultats est généralement faible.
- **Troposphère :**
  - Couche atmosphérique s'étendant du sol jusqu'à environ 20 km.
  - Son effet est non dispersif, donc indépendant de la fréquence.
  - Le retard troposphérique peut être décomposé en deux contributions :

$$\delta t_{\text{trop}} = \delta t_{\text{trop,sec}} + \delta t_{\text{trop,humide}} \tag{2.17}$$

  - La composante sèche (hydrostatique) représente environ 90 % du délai total et est relativement stable.
  - La composante humide, liée à la vapeur d'eau, est fortement variable spatialement et temporellement et difficile à modéliser précisément.
  - L'erreur troposphérique affecte principalement la composante altimétrique de la position, en raison de la géométrie des observations GNSS.
  - Pour une bonne estimation du délai troposphérique et pour limiter les corrélations entre paramètres, il est nécessaire de disposer d'observations avec des élévations bien réparties. Pour des observations statiques de haute précision, un masque d'élévation bas est recommandé, idéalement de l'ordre de 3°. Les observations basses permettent de décorréler les paramètres passant de -0.985 avec une élévation de 20° à -0.830 avec une élévation 5° (D. Willi, 2022).

**Bilan**

Cette section a présenté les principes fondamentaux du positionnement GNSS par mesures de phase, appliqués au calcul précis d'une ligne de base entre deux récepteurs.

La formulation en double différence constitue l'étape clé du traitement GNSS de haute précision, en isolant essentiellement la composante géométrique du vecteur de ligne de base et les ambiguïtés entières associées. Pour les longues lignes de base, la prise en compte des effets ionosphériques, troposphérique et erreur d'horloge, permettent d'atteindre des précisions centimétriques à millimétriques, rendant cette approche particulièrement adaptée aux applications d'auscultation d'ouvrages et de surveillance géodésique.

Après l'obtention des lignes de base $\boldsymbol{AB}$, il est possible de déterminer des coordonnées géocentriques tridimensionnelles dans le cadre de référence international ITRS en vigueur (voir chapitre 2.5.2). Le positionnement GNSS repose sur un référentiel global, indépendant des contraintes locales du terrain, telles que la topographie, la géologie ou les déformations locales. Cette caractéristique permet d'obtenir un ensemble de coordonnées homogènes et cohérentes à l'échelle globale du site.

Le positionnement GNSS fournit des coordonnées géocentriques homogènes, indépendantes des contraintes locales du terrain. L'interprétation physique de ces coordonnées, notamment pour l'altimétrie, nécessite la prise en compte du champ de gravité terrestre, ce qui relève des concepts de la géodésie physique.

## 2.2 Géodésie physique

Ce chapitre est scindé en deux parties. La première est consacrée au géoïde et sa définition, la seconde traite de la déviation de la verticale. Le but est d'aborder les fondements théoriques et les implications pour les observations géodésiques de précision.

La description physique de la Terre repose sur l'analyse du champ de gravité et des surfaces. Le géoïde occupe une place centrale dans la géodésie physique. Il correspond à une surface équipotentielle du champ de pesanteur $W_0$, qui est à considérer comme le prolongement du niveau moyen des mers sous les continents, voir le schéma de principe (Swisstopo-Geoide, 2024) à la figure 2.3.

Le géoïde constitue ainsi une surface de référence typique pour la définition des hauteurs et joue un rôle fondamental dans la cohérence des systèmes altimétriques. Les formules et concepts de la géodésie physique sont tirées du cours Éléments de géodésie (Guillaume, 2024).

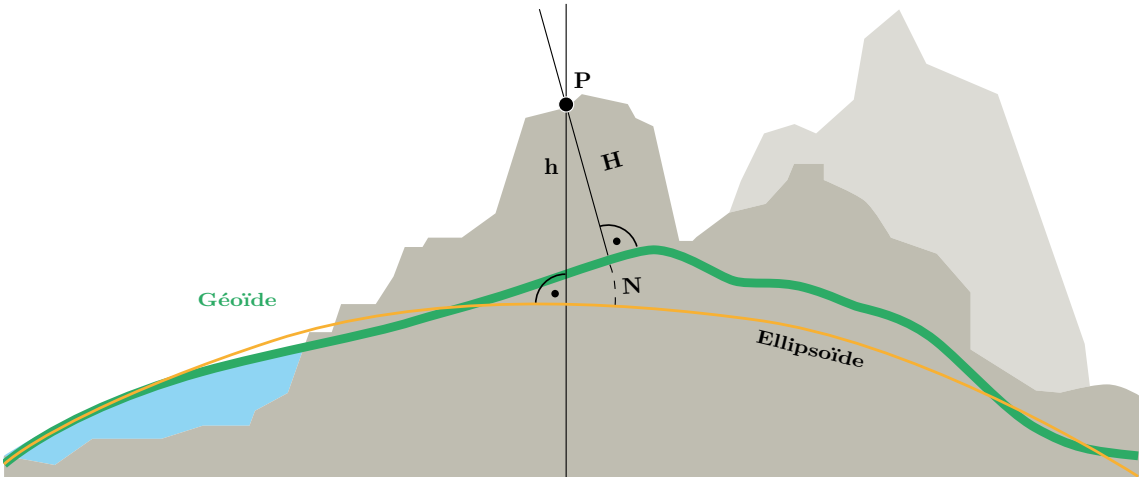



**Fig. 2.3** – Représentation du géoïde. Source : (Swisstopo, 2025)

La formule de base liant les altitudes le géoïde est la suivante :

$$h = H^{\text{orth}} + N \tag{2.18}$$

### 2.2.1 Le géoïde

Le potentiel de pesanteur $W$ est constant en tout point, la valeur de référence du potentiel associée au géoïde est fixée par l'International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) (IERS, 2025) et vaut : $W_0^{\text{IERS}} = 62'636'853.400\ \text{m}^2.\,\text{s}^{-2}$.

D'un point de vue mathématique, le géoïde est l'ensemble des points $x_{W_0}$ satisfaisant la condition :

$$W(x_{W_0}) = W_0. \tag{2.19}$$

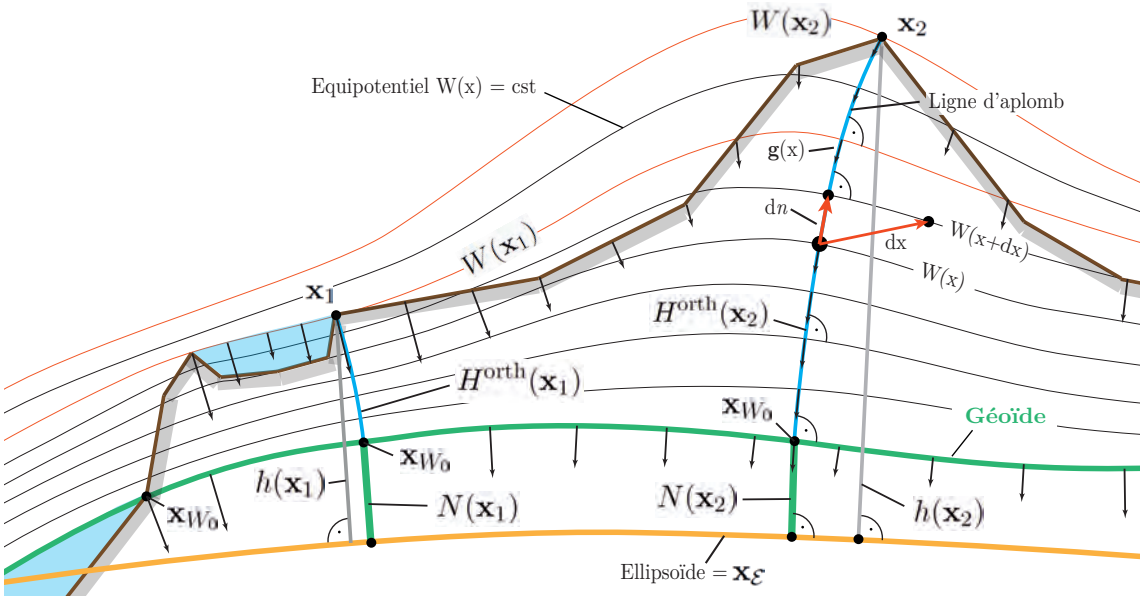



**Fig. 2.4** – Profil topographique, illustrant le géoïde et les relations entre altitudes ellipsoïdale : $h(\mathrm{x})$, orthométriques : $H^{\text{orth}}(\mathrm{x})$ et l'ondulation du géoïde : $N(\mathrm{x})$. Adapté de (Guillaume, 2024)

La figure 2.4, illustre les relations fondamentales entre le champ de pesanteur terrestre, le géoïde, l'ellipsoïde de référence et les différentes notions de hauteur utilisées en géodésie physique .

Le champ de pesanteur évoluant de manière constante, il est possible de définir des surfaces telles que $W(x) = \text{cst}$, sur la figure 2.4 représentées par les lignes noires. La direction de la ligne d'aplomb est orthogonale en tout point à ces surfaces équipotentielles.

La grandeur fondamentale reliant le potentiel de pesanteur aux systèmes altimétriques est la cote géopotentielle, définie par :

$$C(\mathrm{x}) = W(\mathrm{x}_{W_0}) - W(\mathrm{x}) = \int_{\mathrm{x}_{W_0},S}^{\mathrm{x}} \boldsymbol{g}(\mathrm{x}) \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{n} \tag{2.20}$$

Où $W_0$ désigne le potentiel de référence du géoïde. En intégrant les différences de potentiels le long de la ligne d'aplomb (chemin $S$) entre la surface de référence, géoïde, et le point souhaité à la surface, on obtient la cote géopotentielle. Comme le montre l'équation 2.20, afin d'être rigoureux, il faudrait connaître $\boldsymbol{g}$ tout du long de la ligne d'aplomb, mais cela est difficilement réalisable.

A l'aide d'un modèle de masse et de mesure de gravité en surface il est alors possible d'estimer le $\overline{g}(\mathrm{x})$ moyen selon la ligne d'aplomb au point x. La cote géopotentielle peut alors être reliée à l'altitude orthométrique par :

$$C(\mathrm{x}) = H^{\text{orth}} \cdot \overline{g}(\mathrm{x}) \tag{2.21}$$

#### 2.2.1.1 Les observations d'altitude et le géoïde

**Détermination par GNSS**

En partant du principe que la cote du géoïde est connue, il est possible de lier les hauteurs orthométriques à l'ellipsoïde de référence $\mathrm{x}_v$. Cette relation est fondamentale, car elle permet de relier les observations GNSS qui sont définies géométriquement sur l'ellipsoïde à des altitudes physiques :

$$h(\mathrm{x}) = H^{\text{orth}}(\mathrm{x}) + N(\mathrm{x}) \tag{2.22}$$

#### Nivellement géométrique

Dans la section 2.1.2, le nivellement géométrique permet d'obtenir des altitudes usuelles des points en additionnant les dénivelées usuelles successives. Du point de référence $X_{W_0}$ connu sur le géoïde jusqu'à un autre point x le long de la ligne de cheminement $S$, mathématiquement cela donne, en prenant exemple sur le schéma 2.4 entre le point $X_1$ et $X_2$ on a :

$$H^{\mathrm{u}}(\mathrm{x}_2, S_{12}) = \int_{\mathrm{x}_1 W_0}^{\mathrm{x}_2} \mathrm{d}n \tag{2.23}$$

En reprenant les formules de (Guillaume, 2024), il est possible de relier une dénivelée orthométrique avec la dénivelée usuelle réalisée par le cheminement d'un nivellement géométrique de la manière suivante :

$$H^{\mathrm{orth}}(\mathrm{x}_2) - H^{\mathrm{orth}}(\mathrm{x}_1) = H^{\mathrm{u}}(\mathrm{x}_2.S_2) - H^{\mathrm{u}}(\mathrm{x}_1, S_1) + E^{\mathrm{orth}}_{S_{12}} \tag{2.24}$$

Avec la correction orthométrique $E^{\mathrm{orth}}$ selon le chemin $S_{12}$ équivalent à :

$$E^{\mathrm{orth}}_{S_{12}} = \int_{\mathrm{x}_1, S_{12}}^{\mathrm{x}_2} \frac{g(\mathrm{x}) - \gamma_0}{\gamma_0} \cdot \mathrm{d}n + \frac{\overline{g}(\mathrm{x}_1) - \gamma_0}{\gamma_0} \cdot H^{\mathrm{orth}}(\mathrm{x}_1) - \frac{\overline{g}(\mathrm{x}_2) - \gamma_0}{\gamma_0} \cdot H^{\mathrm{orth}}(\mathrm{x}_2) \tag{2.25}$$

Et $\gamma_0 = 9.806199203[m.\,s^{-2}]$ comme gravité normale à la latitude $\lambda = 45°$.

Dans la correction orthométrique, il est possible de voir que le premier terme nécessite de connaître la gravité le long du chemin parcouru par la ligne de nivellement. L'un des objectifs de ce travail est de pouvoir corriger les dénivelées usuelles de la cote orthométrique. Pour évaluer une meilleure intégration avec les autres observations, des mesures locales de microgravimétrie ont étés réalisées, voir section 3.2.3 page 62.

#### Nivellement trigonométrique

Comme illustré précédemment à la figure 2.4, la verticale locale d'un point x n'est pas confondue avec la normale à l'ellipsoïde de référence en ce même point. La verticale du lieu est définie par la direction du vecteur $\boldsymbol{g}$, alors que la verticale ellipsoïdale est orthogonale à la surface de l'ellipsoïde de révolution.

Une dénivelée obtenue par nivellement trigonométrique est composée d'une observation angulaire (angle zénithal) et d'une observation de distance. L'angle mesuré est dans le système de la verticale du lieu, la différence de hauteur ainsi calculée est en relation avec la direction de $\boldsymbol{g}$ et non de la normale à l'ellipsoïde.

Afin d'obtenir des différences de hauteurs ellipsoïdales, il faut appliquer une correction angulaire à l'angle zénithal. L'écart angulaire entre la verticale du lieu et la normale à l'ellipsoïde est appelé déviation de la verticale, notée $\boldsymbol{\upsilon} = (\eta, \xi)$. Les développements relatifs à la correction des observations angulaires en fonction de la déviation de la verticale sont présentés à la section 2.2.2.1.

### 2.2.2 La déviation de la verticale

Comme mis en évidence dans le chapitre précédent, consacré à la définition du géoïde, la verticalité d'un instrument de mesure est définie par la direction locale de la pesanteur. Cette verticale du lieu est donc perpendiculaire à la surface équipotentielle du champ de pesanteur passant par le point considéré. Elle ne coïncide pas avec la normale à l'ellipsoïde de référence au même point.

L'angle entre la verticale locale et la normale à l'ellipsoïde est appelé *déviation de la verticale*. Cette grandeur vectorielle est notée $\boldsymbol{\upsilon} = (\xi, \eta)$ et est illustrée sur la figure 2.5.

Dans le cadre de référence CH1903+, la déviation de la verticale est définie par deux composantes :

- $\eta_{\mathrm{A}}$ : êta, composante Est-Ouest [gon]
- $\xi_{\mathrm{A}}$ : xi, composante Nord-Sud [gon]

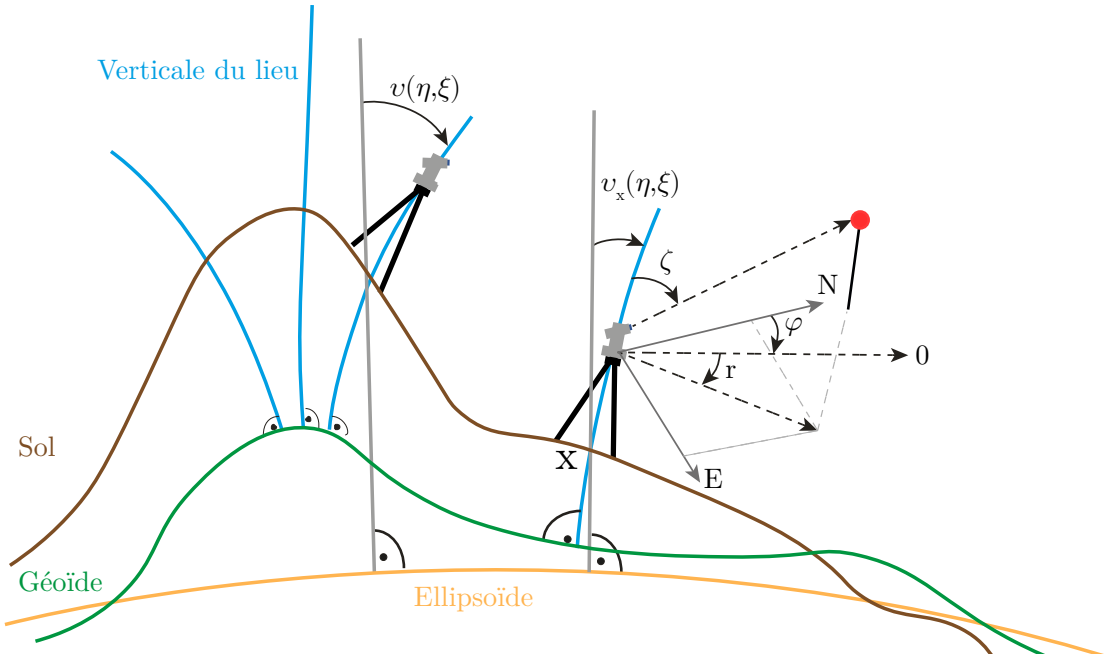



**Fig. 2.5** – Mise en évidence de la déviation de la verticale entre la verticale locale et la normale à l'ellipsoïde de référence

Il est possible de déterminer les déviations de la verticale selon deux approches complémentaires : soit à partir d'un modèle du géoïde, soit à partir d'observations astro-géodésiques réalisées à la surface. Dans les deux cas, les composantes de la déviation de la verticale sont exprimées dans un système topocentrique rattaché à l'ellipsoïde de référence.

- **Détermination à partir du géoïde**

  Les relations suivantes sont données sans démonstration et sont issues du cours de (Guillaume, 2024). Une première relation relie l'ondulation du géoïde au potentiel perturbateur, connue sous le nom de formule de Brun :

  $$N(x_\varepsilon) = \frac{T(x_\varepsilon)}{g(x_\varepsilon)}, \tag{2.26}$$

  Où $T$ désigne le potentiel perturbateur, défini comme la différence entre le potentiel réel de pesanteur et le potentiel normal, au point $x_\varepsilon$ sur l'ellipsoïde.

  En supposant la pesanteur localement constante et en considérant les dérivées partielles de l'ondulation du géoïde dans un système topocentrique (topo) ellipsoïdal, les composantes de la déviation de la verticale s'expriment comme le gradient horizontal du géoïde :

  $$\begin{aligned} \xi(x_\varepsilon) &= -\frac{\partial N(x_\varepsilon)}{\partial x^{\text{topo}}} \\ \eta(x_\varepsilon) &= -\frac{\partial N(x_\varepsilon)}{\partial y^{\text{topo}}} \end{aligned} \tag{2.27}$$

- **Détermination à partir d'observations astro-géodésiques**

  Les déviations de la verticale peuvent également être déterminées directement à la surface par des observations astro-géodésiques. Celles-ci permettent de déterminer les coordonnées astronomiques, à savoir la latitude $\Phi(x_{\text{topo}})$ et la longitude $\Lambda(x_{\text{topo}})$, définies par la direction réelle de la pesanteur.

En comparant ces coordonnées aux coordonnées géodésiques ellipsoïdales $\phi(x_{\text{topo}})$ et $\lambda(x_{\text{topo}})$, les composantes de la déviation de la verticale s'écrivent :

$$\begin{aligned} \xi(x_{\text{topo}}) &= \Phi(x_{\text{topo}}) - \phi(x_{\text{topo}}) \\ \eta(x_{\text{topo}}) &= \big[\Lambda(x_{\text{topo}}) - \lambda(x_{\text{topo}})\big] \cos\phi(x_{\text{topo}}) \end{aligned} \tag{2.28}$$

Sur le terrain, les instruments sont verticalisés à l'aide de compensateurs à deux axes ou de nivelles, ce qui assure leur alignement à la verticale locale du lieu. Les composantes de la déviation de la verticale ne sont généralement pas connues lors des mesures, les observations devront donc être corrigées en post-traitement au bureau.

La prise en compte de la déviation de la verticale permet de corriger les observations angulaires afin de les ramener dans un référentiel géodésique cohérent, défini par rapport à la normale à l'ellipsoïde.

#### 2.2.2.1 Correction des observations

De manière classique, les observations acquises sur le terrain sont compensées ; soit dans des logiciels basés sur le cadre de référence MN95 (LTOP, NelCas, ...), soit dans des systèmes topocentriques tel que Trinet+. Les équations de correction des observations sont données pour les deux systèmes :

**Cadre de référence CH1903+**

La prise en compte des valeurs de déviation de la verticale dans une compensation basée directement sur le système de coordonnées MN95 s'applique comme suit pour des observations à une station x :

- **Directions horizontales à** :

$$r_{corr} = r - \eta_{\text{x}} \tan\phi_{\text{x}} - (\xi_{\text{x}} \cdot \sin\varphi_{\text{x}} - \eta_{\text{x}} \cdot \cos\varphi_{\text{x}}) \cot\zeta_{\text{x}} \tag{2.29}$$

Avec :

$r_{corr}$ : direction horizontale corrigée de la déviation de la verticale [gon]
$\varphi_{\text{x}}$ : azimut astronomique, peut être assimilé au gisement en Suisse [gon]
$\phi_{\text{x}}$ : latitude au point de la station de mesure [°]

- **Angles zénithaux** :

$$\zeta_{corr} = \zeta + (\xi_{\text{x}} \cos\varphi_{\text{x}} + \eta_{\text{x}} \sin\varphi_{\text{x}}) \tag{2.30}$$

Avec :

$\zeta_{corr}$ : angle zénithal corrigé de la déviation de la verticale [gon]

**Système topocentrique**

Avec un système de coordonnées topocentrique, les déviations de la verticale déterminées dans le système de référence géodésique doivent être préalablement transformées dans le référentiel topocentrique. Cette transformation s'effectue à l'aide des coordonnées ellipsoïdales astronomiques du point de station et du topocentre.

Les formules permettant de réaliser la transformation des composantes de déviation de la verticale à un point donné, vers un système de référence topocentrique sont les suivantes, les éléments sont issus du manuel Trinet+ (Sébastien Guillaume, 2010) :

$$\xi_{\text{T+x}} = \Phi_{\text{x}} - \phi_O = (\varphi_{\text{x}} + \xi_{\text{x}}) - (\varphi_O + \xi_O) \quad [gon] \tag{2.31}$$

$$\eta_{\text{T+x}} = \Lambda_{\text{x}} - \Lambda_O = (\Lambda_{\text{x}} + \frac{\eta_{\text{x}}}{\cos\varphi_{\text{x}}}) - (\Lambda_O + \frac{\eta_O}{\cos\varphi_O}) \quad [gon] \tag{2.32}$$

Avec :

| | |
|---|---|
| $\xi_{T+x}, \eta_{T+x}$ | : déviation de la verticale en x |
| $\Phi_x$, $\Lambda_x$ | : latitude et longitude astronomique au point x |
| $\Phi_O$, $\Lambda_O$ | : latitude et longitude astronomique au topocentre O |
| $\varphi_x$, $\lambda_x$ | : latitude et longitude ellipsoïdales (CH1903+) au point x |
| $\varphi_O$, $\lambda_O$ | : latitude et longitude ellipsoïdales (CH1903+) au topocentre O |
| $\xi_x$, $\eta_x$ | : déviation de la verticale (CH1903+) au point x |
| $\xi_O$, $\eta_O$ | : déviation de la verticale (CH1903+) au topocentre O |

Avec les déviations de la verticale dans le système topocentrique, il est maintenant possible de calculer les corrections à appliquer aux directions horizontales et angles zénithaux d'une station de mesure vers des points visés :

$$\Delta r_{T+} = -(\xi_{T+x} \sin\varphi - \eta_{T+x} \cos\varphi) \cot\zeta \tag{2.33}$$

$$\Delta\zeta_{T+} = \xi_{T+x} \cos\varphi + \eta_{T+x} \sin\varphi \tag{2.34}$$

Avec :

| | |
|---|---|
| $\Delta r_{T+}$ | : correction d'une direction horizontale [gon] |
| $\Delta\zeta_{T+}$ | : correction d'un angle zénithal [gon] |
| $\xi_{T+}$ | : défaut de verticalité Xi à la station dans le système topocentrique [gon] |
| $\eta_{T+}$ | : défaut de verticale Eta à la station dans le système topocentrique [gon] |
| $\alpha$ | : gisement du point visé [gon] |
| $\zeta$ | : angle zénithal [gon] |

### 2.2.3 Micro Géoïde local

Les relations établies précédemment ont montrés que le géoïde joue un rôle clef dans les observations géodésiques. Il influence les résultats de deux manières : d'une part lors de la détermination des altitudes, et d'autre part à travers les observations angulaires des instruments. En fonction des prestations et du niveau de précision recherché, la précision des cotes du géoïde, ainsi que celle des déviations de la verticale peuvent avoir un impact significatif sur les résultats.

Le géoïde suisse CHGeo2004 a été déterminé et calculé par le service de géodésie de swisstopo sous la direction de Urs Marti (Marti, 2004). Son calcul repose sur la combinaison de différentes sources d'informations, notamment des observations gravimétriques, observations de déviation de la verticale, des données GNSS couplées au nivellement géométrique, ainsi que des modèles globaux du géoïde. Ces observations sont intégrées à des modèles de masse afin de permettre la prédiction, en tout point du territoire, des cotes du géoïde ainsi que des déviations de la verticale.

La précision du modèle CHGeo2004 est excellente à l'échelle nationale, atteignant 1 cm en plaine et de 3 cm à 5 cm en région montagneuse. Malgré cette très haute précision à grande échelle, les petites longueurs d'onde du champ de pesanteur, notamment dans les vallées étroites et encaissées, ne sont pas correctement modélisées. Pour ce faire, il faut réaliser des observations complémentaires telles que des mesures de déviation de la verticale par astro-géodésie. Ces déterminations permettront d'affiner le modèle du géoïde global dans le secteur des mesures à l'aide de la méthode *Remove–Compute–Restore*.

Dans le cadre de ce travail, des mesures locales de déviation de la verticale ainsi que de micro-gravimétrie seront réalisées en vue du calcul d'un géoïde local. Le calcul du géoïde local est réalisé dans le cadre du travail de master de Matteo Casto (Casto, 2026), et ces résultats exploités afin de corriger les observations et altitudes des valeurs du géoïde.

La représentation 2.6, ci-dessous, met en avant la dépendance et l'importance des observations avec les effets de la gravité :

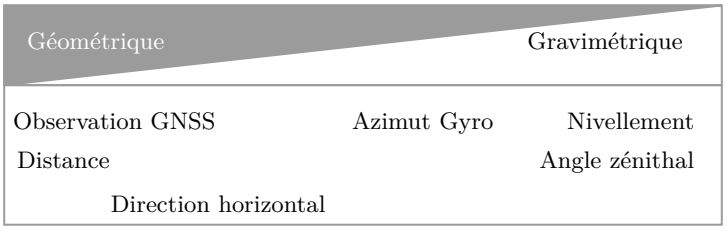



**Fig. 2.6** – Dépendances des observations géodésiques aux effets de la gravité. Inspiré de (Guillaume, 2024)

## 2.3 Température, Pression, Hydrométrie

La précision des observations réalisées dans les réseaux géodésiques dépendent de plusieurs facteurs ( matérialisations, techniques de mesures), mais également des conditions atmosphériques.

La formule 2.6 (chapitre 2.1.1.3, observations de distance) permet de corriger les distances en tenant compte des paramètres atmosphériques, la correction des angles zénithaux est réalisée à l'aide des formules du chapitre 2.4.1.

Afin que les corrections soient appliquées de manière cohérente, il est nécessaire de pouvoir prédire en tout point $ENH$ et tout temps $t$ les paramètres atmosphériques. Les formules de base permettant d'interpoler en tout point les paramètres atmosphériques depuis un point à un temps donné vont être décrites dans les paragraphes ci-après.

### 2.3.1 Pression atmosphérique

La relation entre la pression atmosphérique et l'altitude peut être dérivée à partir de l'équilibre hydrostatique de l'atmosphère et de la loi des gaz parfaits. Sous l'hypothèse d'un gradient thermique vertical standard et constant, l'intégration conduit à la formule barométrique généralisée utilisée notamment en nivellement barométrique (Roedel & Wagner, 2000).

Sous ces hypothèses, et en considérant avec un gradient de température typique soit $-0.006\,5\,°C/m$ un transfert de pression entre un point A et B peut s'écrire comme suit :

$$P_B = P_A \left(1 - \frac{0.0065 \cdot \Delta h_{AB}}{T_A}\right)^{\frac{\boldsymbol{g}M}{RL}} \tag{2.35}$$

Avec :

| | |
|---|---|
| $P_B(ENH, t)$ | : pression au point B [hPa] |
| $P_A(ENH, t)$ | : pression au point A [hPa] |
| $\Delta h_{AB}(H_A, H_B)$ | : dénivelé entre les points A et B [m] |
| $T_A(ENH, t)$ | : température en Kelvin au point A [K] |
| $\boldsymbol{g}M/RL$ | : exposant barométrique |
| K = 273.15 | : constante de conversion [°C] en [K] |

L'exposant barométrique de la formule 2.35 correspond au rapport $\frac{\boldsymbol{g}M}{RL}$, sous des conditions atmosphériques standards ($\boldsymbol{g}$ accélération de la pesanteur ; $M$ masse molaire moyenne de l'air ; $R$ constante universelle des gaz parfaits ; $L$ gradient thermique vertical moyen).

La valeur de l'exposant barométrique de 5.255 est obtenue en prenant les valeurs suivantes :

- $\boldsymbol{g}$ : accélération moyenne de la pesanteur, g $\approx 9.80665$ [m s$^{-2}$]
- $M$ : masse molaire moyenne de l'air sec, $M \approx 0.0289644$ [kg mol$^{-1}$]
- $R$ : constante universelle des gaz parfaits, $R = 8.314462618$ [J mol$^{-1}$ K$^{-1}$]
- $L$ : gradient thermique vertical moyen dans la troposphère, $L = 0.0065$ [K m$^{-1}$]

Comme il sera démontré dans le chapitre 3.4.3 page 77, l'utilisation de la formule de transfert de pression avec un gradient de température standard est tout à fait suffisante. Dans la correction des distances, il faudrait une imprécision de 4 hPa sur le calcul afin d'engendrer une correction de 1 mm à 1 km. De même, dans la dénivelée, il faudrait faire une erreur de 32 m (1 hPa≈8 m). De telles erreurs ne sont pas réalistes.

Dans cette étude, plusieurs stations météorologiques sont à disposition (voir le chapitre 3.2.5.3, page 68). La pression atmosphérique recherchée au point $B$ est estimée par une moyenne pondérée des mesures issues des stations disponibles, selon la méthode de l'*Inverse Distance Weighting* (IDW) (Shepard, 1968).

La méthode IDW est couramment utilisée dans le domaine des systèmes d'information géographique afin de tenir compte du caractère local des mesures et de réduire l'influence des stations éloignées à l'aide d'une pondération décroissante en fonction de la distance. Cette approche permet ainsi d'intégrer la répartition spatiale des stations de mesure tout en limitant l'impact d'effet local éventuels.

La formule retenue pour le transfert de la pression atmosphérique d'une station météorologique $i$ vers le point $B$ est la suivante :

$$P_{\mathrm{B}} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \frac{P_{\mathrm{B},i}}{d'(B,i)^{\,p}}}{\sum_{i=1}^{N} \frac{1}{d'(B,i)^{\,p}}} \tag{2.36}$$

Avec :

| | |
|---|---|
| $P(B)$ | : pression interpolée par IDW au point souhaité $B(ENH,t)$ [hPa] |
| $P_{\mathrm{B},i}$ | : pression caclulée avec la formule 2.35 depuis la station météo $i(ENH,t)$ [hPa] |
| $d'(B,i)$ | : distance 3D entre les points $B$ et $i$ [m] |
| $p$ | : puissance de pondération |
| $N$ | : nombre de stations météos |

Dans le cadre de cette étude, l'exposant de pondération est fixé à $p = 2$ et l'interpolation repose sur les $N = 9$ stations météorologiques.

Et :

$$d'(B,i) = \sqrt{(E_B - E_i)^2 + (N_B - N_i)^2 + (H_B - H_i)^2} \tag{2.37}$$

### 2.3.2 Humidité relative

L'influence de l'humidité relative sur l'indice de réfraction de l'air est nettement inférieure à celle de la température et de la pression. Son impact sur une mesure de distance est du second ordre, variation de 180 % pour une correction de 1 mm à 1 km. La création d'un modèle physique robuste et fiable de l'atmosphère est trop délicat et devrait faire l'objet d'une étude spécifique afin d'en valider l'apport. La pression atmosphérique et la température sont les facteurs majoritaires de la variation de l'indice de l'air, il sera fait le choix d'appliquer une interpolation en fonction de la distance du type IDW afin de définir l'humidité relative à un point $B$ depuis les stations $i$.

De manière similaire au calcul de la pression atmosphérique, la formule utilisée pour l'interpolation de l'humidité relative est la suivante :

$$H_{\text{hydro}}(B) = \frac{\sum_{i=1}^{N} \frac{H_{\text{hydro},i}}{d'(B,i)^{\,p}}}{\sum_{i=1}^{N} \frac{1}{d'(B,i)^{\,p}}} \tag{2.38}$$

Avec :

| | |
|---|---|
| $H_{\text{hydro}}(B)$ | : hydrométrie interpolée au point souhaité $B(ENH,t)$ [%] |
| $H_{\text{hydro}}(i)$ | : hydrométrie mesurée à la station météo $i(ENH,t)$ [%] |

### 2.3.3 Température

La composante température de l'air constitue la contribution la plus délicate à modéliser. D'une part, la température a un impact direct sur l'indice de réfraction de l'air et sur la mesure de distance optique, avec un ordre de grandeur typique d'environ1 mm/°C pour 100 m. D'autre part, la température de l'air est difficile à prédire spatialement, même si les stations de mesures sont placées idéalement : à l'ombre et à environ 2 m sur sol. Ces conditions de mesure ne permettent tout de même pas d'estimer directement la température de l'air le long de la ligne de visée.

La formule standard de transfert de l'évolution de la température en fonction de l'altitude est modélisée à l'aide d'un gradient thermique moyen, tel que défini dans des conditions d'atmosphère standard de l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI, 1993).

Sous cette hypothèse, la température au point $B$ est estimée par la relation linéaire suivante :

$$T_{\text{B}} = T_i + \frac{\delta T}{\delta H} \cdot \Delta H \tag{2.39}$$

Avec :

| | |
|---|---|
| $T_{\text{B}}$ | : température prédite à la position du point $B(ENH,t)$ [°C] |
| $T_i$ | : température à la station de mesure $i(ENH,t)$ [°C] |
| $\delta T/\delta H$ | : gradient thermique vertical moyen [°C/m] |
| $\Delta H$ | : dénivelée entre la station de mesure $i$ et le point B [m] |

Conformément à l'atmosphère standard OACI, le gradient thermique vertical moyen est équivalent à $\delta T/\delta H = -0.0065$[°C/m].

L'un des objectifs de ce travail consiste à définir une stratégie permettant de modéliser un champ de température tridimensionnel et temporel, soit un modèle quadridimensionnel (4D). Les développements relatifs à cette problématique sont présentés au chapitre 3.4.2, page 77.

## 2.4 Détermination d'une dénivelée

De manière très simple, voici la définition du calcul de l'altitude d'un point à partir d'une dénivelée entre deux points, ici avec des altitudes orthométriques :

$$H_{\mathrm{B}}^{\mathrm{orth}} = H_{\mathrm{A}}^{\mathrm{orth}} + \Delta h_{\mathrm{AB}}^{\mathrm{orth}} \quad [m] \tag{2.40}$$

Qui peut également s'écrire en transformant les altitudes orthométriques en altitude ellipsoïdale comme suit :

$$\begin{aligned} \overbrace{h_{\mathrm{B}} + N_{\mathrm{B}}}^{H_{\mathrm{B}}^{\mathrm{orth}}} &= \overbrace{(h_{\mathrm{A}} - N_{\mathrm{A}})}^{H_{\mathrm{A}}^{\mathrm{orth}}} + \Delta h_{\mathrm{AB}}^{\mathrm{ellips}} \\ h_{\mathrm{B}} &= h_{\mathrm{A}} + \Delta h_{\mathrm{AB}}^{\mathrm{ellips}} + (N_{\mathrm{B}} - N_{\mathrm{A}}) \quad [m] \end{aligned} \tag{2.41}$$

Avec :

$N_{\mathrm{A}}(ENH)$ : cote du géoïde à la coordonnée du point A [m]
$N_{\mathrm{B}}(ENH)$ : cote du géoïde à la coordonnée du point B [m]

Comme remarqué dans l'équation 2.41, la dénivelée entre deux points ne dépend pas uniquement de l'altitude des points mais également de la cote du géoïde pouvant amener une incertitude sur la détermination de l'altitude du point que l'on cherche à calculer. En géodésie et plus particulièrement dans la surveillance d'ouvrage, les dénivelées entre les points s'obtiennent, le plus souvent, par nivellement trigonométrique ou géométrique.

### 2.4.1 Nivellement trigonométrique

Les angles zénithaux sont couramment combinés à la distance inclinée afin de calculer une dénivelée dite trigonométrique (voir schéma 2.7). Dans le calcul de cette dénivelée, divers paramètres interviennent car l'observation de l'angle zénithal est influencé par deux paramètres importants : la réfraction atmosphérique et la sphéricité de la terre.

La composante de la sphéricité de la terre est définissable par une formule approximant la forme de la terre à une sphère, dans la suite du développement ce paramètre est nommé **E**.

Le second paramètre **R** est l'impact de l'angle de réfraction, il est bien plus difficile à déterminer et fera l'objet d'un développement approfondi dans la suite du travail.

La formule du nivellement trigonométrique longue portée tenant compte des paramètres de réfractions **R**, et sphéricité de la terre **E**, est la suivante :

$$\Delta h_{\mathrm{AB}} = \cos \zeta_{\mathrm{AB}} \cdot d'_{\mathrm{AB}} + \mathbf{E} - \mathbf{R} + (I - S) \tag{2.42}$$

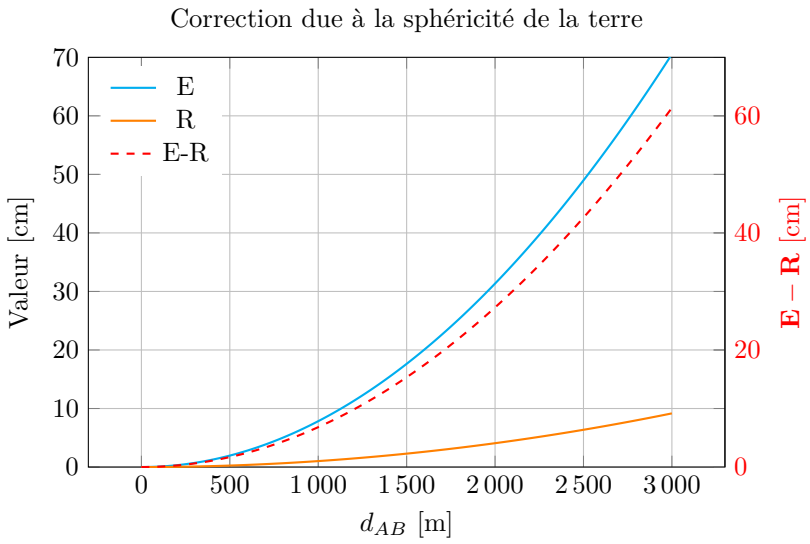
Avec :

$$\mathbf{E} = \frac{d_{\mathrm{AB}}^2}{2 \cdot R} \quad [m] \tag{2.43}$$

Quantification de l'effet de la sphéricité de la terre, de la réfraction et mise en évidence des effets :

| $d_{AB}$ [m] | **E** | **R** | Unité |
|---|---|---|---|
| 10 | 7.85 | 1.02 | [µm] |
| 100 | 0.78 | 0.10 | [mm] |
| 250 | 4.91 | 0.64 | [mm] |
| 500 | 1.96 | 0.25 | [cm] |
| 750 | 4.42 | 0.57 | [cm] |
| 1000 | 7.85 | 1.02 | [cm] |
| 1250 | 12.26 | 1.59 | [cm] |
| 1500 | 17.66 | 2.29 | [cm] |
| 1750 | 24.04 | 3.12 | [cm] |
| 2000 | 31.40 | 4.08 | [cm] |

**Tab. 2.2** – Correction pour une dénivelée en fonction de la distance




**Graph. 2.1** – Effet de la sphéricité de la terre $E$ et de la réfraction $R$ en fonction de la distance et leurs impacts total.

On constate que l'effet de la sphéricité dépend essentiellement de la distance horizontale, le rayon de la terre pouvant être considéré comme connu. Il est donc possible de s'interroger sur le degré de précision avec lequel il faut connaître cette distance, on peut écrire le développement suivant :

$$\mathrm{d}\mathbf{E}(d_{AB}) = \frac{\partial E}{\partial d_{AB}} = \frac{d_{AB}}{R} \cdot \mathrm{d}_{d_{AB}} \tag{2.44}$$

Si l'on a une incertitude sur la distance $\mathrm{d}_{d_{AB}} = 1\,m$ à une distance $d_{AB}$ de 2 000 m on trouve que $\mathrm{d}\mathbf{E}(d_{AB}) = 0.3\,mm$. Donc la distance $d_{AB}$ ne doit pas être connue avec une grande précision afin de déterminer l'effet de la sphéricité.

Et :

$$\mathbf{R} = k \cdot \frac{d^2_{\mathrm{AB}}}{2 \cdot R} \quad [\mathrm{m}] \tag{2.45}$$

Mais **R** peut également s'écrire sous la forme suivante en tenant compte de l'angle de réfraction $\delta_{\mathrm{refr}}$ :

$$\delta_{\mathrm{refr}} = k \cdot \frac{d_{\mathrm{AB}}}{2 \cdot R} \quad [\mathrm{rad}] \tag{2.46}$$

D'où en décomposant **R** on :

$$\mathbf{R} = k \cdot \frac{d_{\mathrm{AB}}}{2 \cdot R} \cdot d_{\mathrm{AB}} = \delta_{\mathrm{refr}} \cdot d_{\mathrm{AB}} \quad [\mathrm{m}] \tag{2.47}$$

Avec les éléments suivants pour une visée de A vers B :

| | |
|---|---|
| $\zeta_{\mathrm{AB}}$ | : angle zénithal [gon] |
| $d'_{\mathrm{AB}}$ | : distance inclinée [m] |
| $d_{\mathrm{AB}}$ | : distance horizontale [m] |
| $R$ | : rayon de la terre en A = 6 380 000 m |
| $I$ et $S$ | : hauteur d'instrument et de signal [m] |
| $\delta_{\mathrm{refr}}$ | : l'angle de réfraction [rad] |

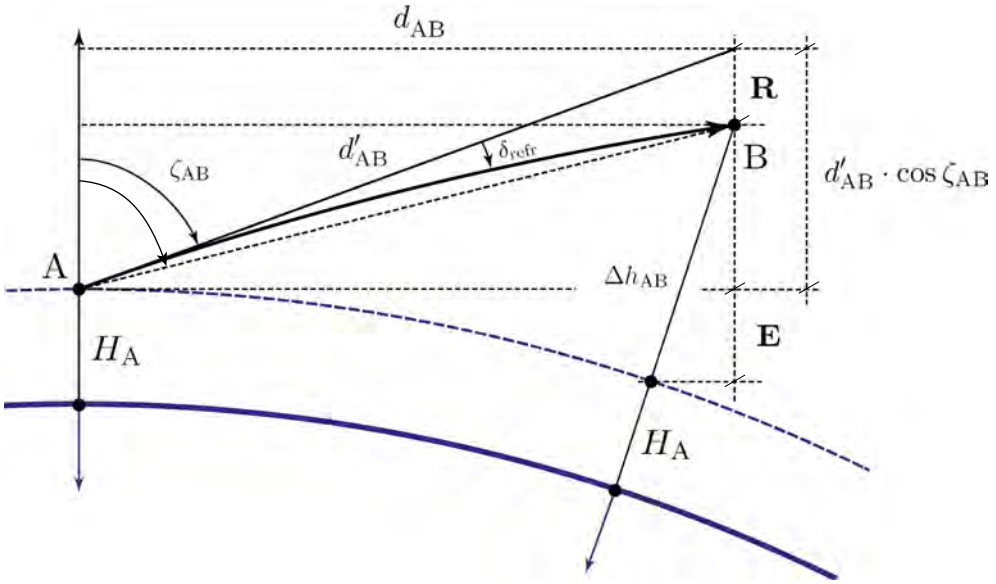



**Fig. 2.7** – Nivellement trigonométrique longue porté. Source : (Guillaume, 2023)

Dans les futurs développements, l'objectif est de pouvoir calculer $\delta_{refr}$ en fonction du chemin parcouru par le rayon lumineux et les différentes couches de l'atmosphère franchies, voir schéma 2.8. L'intégration de $\delta_{refr}$ s'exprime comme suit :

$$\delta_{refr}[rad] = -\frac{1}{n} \cdot \int_{x=0}^{x=d_{AB}} \frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}\Delta h} \cdot dx \tag{2.48}$$

Avec :

| | |
|---|---|
| $\delta_{refr}$ | : variation de l'angle due au gradient vertical |
| $\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}H}$ | : gradient différentiel vertical de l'indice de l'air |
| $\mathrm{d}n(T, P, e, t)$ | : variation de l'indice de l'air |
| $\mathrm{d}\Delta h$ | : épaisseur de la couche d'air traversée |

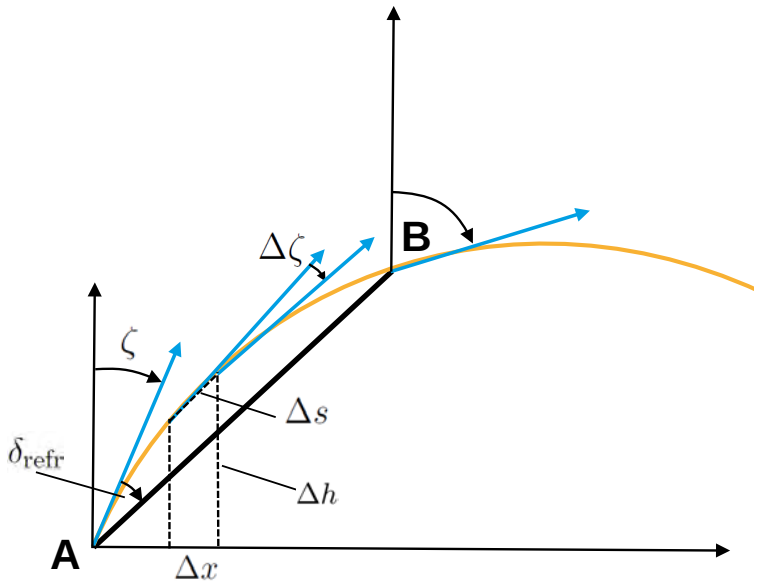



**Fig. 2.8** – Détermination de $\delta_{refr}$ le long du chemin. Source : (Guillaume, 2023)

**Calcul de $\mathrm{d}n/\mathrm{d}H$ :**

$\mathrm{d}n/\mathrm{d}\Delta h$ représente le gradient différentiel vertical de l'indice de l'air entre deux pas d'étude le long de la visée de A vers B, cf. figure 2.7 et 2.8 et $H$ l'altitude du point étudié à la coordonnée Est et Nord au temps $t$. Afin d'expliciter les différents éléments, les formules suivantes sont données pour la lumière jaune pour une longueur d'onde $\lambda = 590\,nm$ :

$$\frac{\mathrm{d}n_{\text{jaune}}}{\mathrm{d}\Delta h}(t) \approx \frac{n_{\text{jaune}}\big(T(H+\Delta H),\, P(H+\Delta H),\, e(H+\Delta H)\big) - n_{\text{jaune}}\big(T(H),\, P(H),\, e(H)\big)}{\mathrm{d}\Delta h} \tag{2.49}$$

**Calcul de $n_{\text{jaune}}$**

L'indice de réfraction $n_{\text{jaune}}(ENH, T, P, e, t)$ a un point donné peut être calculé à l'aide des observations de températures $T$, pression atmosphérique $P$ et la pression partielle de la vapeur d'eau $e$, pour une longueur d'onde donnée.

Le coefficient de réfraction pour la lumière jaune peut être calculé comme suit :

$$n_{\text{jaune}}(ENH, T, P, e, t) \approx 1 + 105.13 \cdot \frac{P}{273.15+T} \cdot 10^{-6} - 15.02 \cdot \frac{e}{273.15+T} \cdot 10^{-6} \tag{2.50}$$

Avec à une altitude donnée $H$ :

| | | |
|---|---|---|
| $T(E,N,H,t)$ | [°C] | : température |
| $P(E,N,H,t)$ | $[mmHg]$ | : pression atmosphérique $1[mmHg] = 1.3332[mBar]$ |
| $e\,(E,N,H,t)$ | $[mmHg]$ | : pression partielle de vapeur d'eau |

La pression partielle de vapeur d'eau peut s'obtenir à partir de l'humidité relative, $H_{\text{hydro}}$ :

$$e(H_{\text{hydro}}, P_{\text{sat}}) = \frac{H_{\text{hydro}}}{100} \cdot P_{\text{sat}}(T) \quad [mmHg] \tag{2.51}$$

Et $P_{\text{sat}}$ est la pression en vapeur saturante qui correspond à la pression à laquelle une substance passe de l'état liquide à l'état gazeux pour une température donnée. Une formule simple, l'équation d'Antoine (Wikipedia contributors, 2024) permet de trouver cette valeur :

$$P_{\text{sat}}(T) = 10^{\left[\mathrm{A} - \frac{\mathrm{B}}{\mathrm{C}+T}\right]} \quad [\mathrm{mmHg}] \tag{2.52}$$

Avec :

| | |
|---|---|
| $A$ | $= 8.07131$ |
| $B$ | $= 1\,730.63$ |
| $C$ | $= 233.426$ |
| $T$ | : Température en [°C] |

**Recherche de $\delta_{\text{refr}}$**

Dans le cas de ce travail, un modèle météo 4D a été calculé, il est donc envisageable de déterminer par itération successive l'évolution du rayon lumineux entre le point A et B, et de trouver la valeur de $\delta_{\text{refr}}$.

Comme le montre le schéma 2.7, le but avec le modèle météo est de pouvoir prédire la trajectoire du rayon de sorte que la condition suivante soit validée :

$$\Delta z_{\text{AB}}^{\text{topo}} = d'_{\text{AB}} \cdot \cos(\zeta_{\text{AB théorique}}) = d'_{\text{AB}} \cdot \cos(\zeta_{\text{AB}} + \delta_{\text{refr}}) \quad [\mathrm{m}] \tag{2.53}$$

La recherche de $\delta_{\text{refr}}$ est à réaliser par incrémentation successive, jusqu'à obtention de l'égalité, comme le montre la figure ci-dessous 2.9.

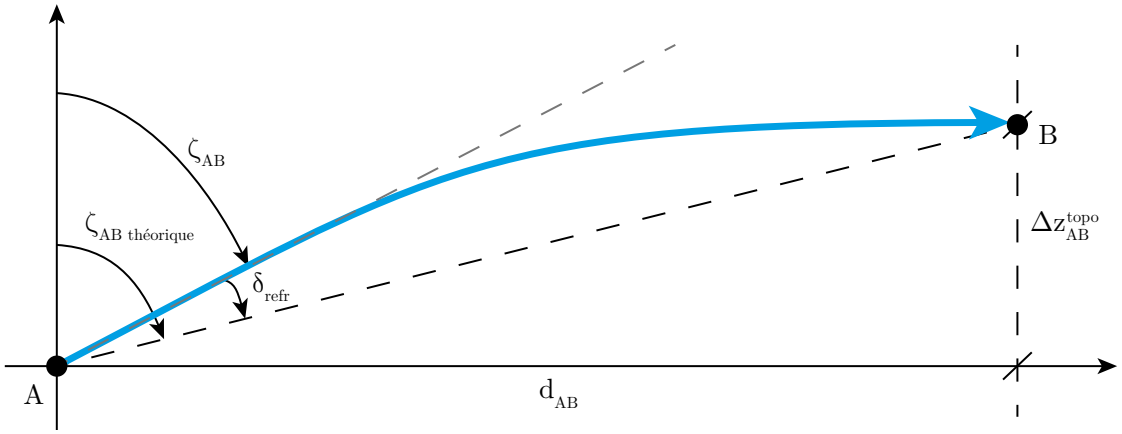



**Fig. 2.9** – Condition d'égalité recherchée

### Formule finale du nivellement trigonométrique

La formule suivante est donnée pour le calcul d'une dénivelée trigonométrique ellipsoïdale dans le cadre MN95 avec prise en compte des déviations de la verticale, en supposant que l'angle de réfraction a été déterminé à l'aide d'un modèle météo 3D :

$$\Delta h_{\text{AB}}^{\text{ellips}} = \cos(\zeta_{\text{AB}} + (\xi \cdot \cos\varphi + \eta \cdot \sin\varphi)) - \delta_{\text{refr}} \cdot d_{\text{AB}} + E + (I - S) \quad [\text{m}] \tag{2.54}$$

### Détermination de $k$ par nivellement trigonométrique réciproque simultané

Il est également possible de déterminer $k$, coefficient de réfraction, sur le terrain à l'aide de la méthode du nivellement trigonométrique réciproque simultané. Cette méthode de mesure consiste à mesurer au même temps $t$, une dénivelée entre deux points en enregistrant l'angle zénithal et la distance inclinée, depuis le point $A$ et $B$. Afin de déterminer $k$ pour une longue période de mesure, ce procédé peut être automatisé.

Si les conditions atmosphériques sont symétriques au moment de la mesure réciproque simultanée, alors il est possible d'écrire la dénivelée entre deux points $AB$ sous la forme :

$$\begin{aligned} 0 &= h_{AB} + h_{BA} \\ &= \cos\zeta_{\text{AB}} \cdot d'_{\text{AB}} + \cos\zeta_{\text{BA}} \cdot d'_{\text{BA}} + \mathbf{E}_{AB} + \mathbf{E}_{BA} - \mathbf{R}_{AB} - \mathbf{R}_{BA} + (I_{AB} - S_{AB}) + (I_{BA} - S_{BA}) \end{aligned} \tag{2.55}$$

Sachant que les conditions sont symétriques, il est possible de considérer que $E_{AB} \approx E_{BA}$ et $R_{AB} \approx R_{BA}$. Il est possible d'écrire que :

$$\mathbf{R}_{AB} = \frac{\cos\zeta_{\text{AB}} \cdot d'_{\text{AB}} + \cos\zeta_{\text{BA}} \cdot d'_{\text{BA}} + 2 \cdot \mathbf{E}_{AB} + (I_{AB} - S_{AB}) + (I_{BA} - S_{BA})}{2} \tag{2.56}$$

Avec la formule 2.57, reliant le coefficient de réfraction $k$ et les valeurs de $\mathbf{R}$, on peut écrire que $k$ vaut :

$$k = \frac{2 \cdot R}{d_{AB}^2} \cdot \mathbf{R}_{AB} \tag{2.57}$$

### 2.4.2 Nivellement géométrique

Pour le nivellement géométrique, l'hypothèse est que les dénivelées usuelles sont déterminées selon les règles de l'art. Les effets liés à la réfraction atmosphérique et à la sphéricité de la Terre sont considérés comme négligeables, ces derniers sont éliminés par l'équivalence des portées lors des observations.

Le passage d'une dénivelée usuelle à une dénivelée orthométrique nécessite l'application d'une correction orthométrique le long du cheminement de nivellement. Le calcul de cette correction requiert la connaissance de la position tridimensionnelle des stations (ENH), ainsi qu'une estimation du champ de pesanteur le long du chemin parcouru.

Afin d'obtenir une correction orthométrique d'une précision compatible avec les observations du nivellement de précision, des mesures de gravité par micro-gravimétrie ont été réalisées avec un pas maximal de 100 m le long des lignes de nivellement.

La dénivelée ellipsoïdale associée à un nivellement géométrique entre deux points $x_1$ et $x_2$, le long du chemin $S_{12}$, peut alors être exprimée à posteriori par la relation suivante :

$$\begin{aligned}\Delta h^{\text{ellips}}_{\text{x}_{12}}(S_{12}) &= h_{\text{x}_2,S_2} - h_{\text{x}_1,S_1} \\ &= (H^{orth}_{\text{x}_2,S_2} + N(\text{x}_2)) - (H^{orth}_{\text{x}_1,S_1} + N(\text{x}_1)) \\ &= H^{\text{u}}(\text{x}_2.S_2) - H^{\text{u}}(\text{x}_1,S_1) + E^{\text{orth}}_{S_{12}} + (N(\text{x}_2) - N(\text{x}_1)) \\ &= \int_{\text{x}_1 W_0}^{\text{x}_2} \text{d}n + E^{\text{orth}}_{S_{12}} + (N(\text{x}_2) - N(\text{x}_1)) \quad [\text{m}]\end{aligned} \tag{2.58}$$

## 2.5 Systèmes de référence pour la surveillance d'ouvrages d'art

La surveillance géodésique d'ouvrages d'art vise à détecter, quantifier et interpréter des déplacements généralement faibles, souvent de l'ordre du millimètre, voir du dixième de milimètre. La définition rigoureuse des systèmes de référence constitue un élément fondamental de la chaîne de mesures et d'interprétation des résultats, au même titre que la précision instrumentale ou la qualité des observations.

Les mesures mises en œuvre dans le cadre de la surveillance d'ouvrages proviennent souvent de capteurs hétérogènes, tels que le GNSS, le nivellement géométrique, la station totale robotisée, ou encore des capteurs géotechniques locaux. Chacun de ces capteurs est rattaché à un référentiel propre, géométrique ou physique, qui ne sont pas obligatoirement inter-compatibles entre eux. L'exploitation cohérente des observations, impose la mise en place d'une architecture de systèmes de références clairement définis ou reliés de manière univoque entre eux.

### 2.5.1 Généralité sur l'usage des systèmes de référence

#### 2.5.1.1 Cadre absolu et référencement à long terme

Un système de référence géodésique global constitue le cadre absolu dans lequel l'ouvrage d'art doit être étudié. Ce référentiel, est indispensable pour le rattachement GNSS, de même que pour l'intégration des observations dans un cadre géodésique homogène afin d'assurer la comparabilité et l'analyse des résultats sur le long terme.

Dans un contexte de surveillance à long terme, le système de référence joue un rôle fondamental de contrôle de la stabilité globale de l'ouvrage. Il permet de distinguer les déplacements propres à l'ouvrage (déformations locales), de ceux affectant globalement le site de l'ouvrage à une échelle régionale concernant l'ensemble du réseau de référence. C'est le cadre sur lequel devrait s'appuyer toutes les observations et interprétations géométriques qui incombent à la surveillance.

Au final, ce cadre de référence absolu doit permettre de à la question : est-ce l'ouvrage qui bouge ou le terrain autour de lui ?

#### 2.5.1.2 La problématique des systèmes altimétriques

Les déplacements verticaux constituent souvent la composante la plus critique dans la surveillance d'ouvrages d'art. Contrairement aux composantes horizontales, les hauteurs ne peuvent pas être définies de manière purement géométrique sans dépendre du champ de pesanteur terrestre. Cette dépendance géophysique est d'autant plus importante que certaines techniques de mesure, telles que le nivellement géométrique de précision, permettent de déterminer des dénivelées avec une très haute précision, de l'ordre de $\pm 0.2\,\text{mm}$. Un tel niveau de précision demande la définition d'un système altimétrique présentant une excellente homogénéité sur l'ensemble du site, afin de garantir l'inter-compatibilité et la cohérence des observations.

Un système altimétrique fondé sur le champ de pesanteur, et donc sur le géoïde, est indispensable pour assurer la signification physique des altitudes. Les observations GNSS, naturellement exprimées en hauteurs ellipsoïdales, doivent être converties en altitudes usuelles au moyen d'un modèle de géoïde. Inversement, les observations réalisées au niveau du terrain, telles que le nivellement géométrique ou trigonométrique, doivent pouvoir être rattachées sans perte de rigueur au référentiel ellipsoïdal afin de permettre leur intégration avec les autres techniques de mesure.

Le système altimétrique retenu doit ainsi être capable de fournir, de manière cohérente et précise, les observables géophysiques nécessaires ; notamment le champ de pesanteur et la déviation de la verticale au traitement des observations. Ces grandeurs conditionnent la définition rigoureuse des composantes altimétriques et constituent un prérequis essentiel à toute analyse fiable des déplacements verticaux dans le cadre de la surveillance d'ouvrages d'art.

#### 2.5.1.3 Le référentiel temporel

La surveillance d'un ouvrage d'art repose sur l'analyse de l'évolution temporelle des déplacements. La dimension temporelle constitue donc un système de référence à part entière. Les observations doivent être rigoureusement datées et rattachées à un référentiel temporel cohérent afin de permettre la comparaison fiable des campagnes de mesure successives.

La continuité du référentiel dans le temps peut toutefois s'avérer délicate, en particulier dans le cadre de mesures géotechniques ou de systèmes de suivi en temps réel de l'ouvrage. Ces dispositifs doivent en effet être capables de s'inscrire durablement dans le cadre de référence global de l'ouvrage, sans introduire de dérive ou de décalage par rapport au référentiel au cours du temps.

La stabilité temporelle du référentiel conditionne l'identification des tendances à long terme, de phénomènes saisonniers ou encore de réponses ponctuelles à des sollicitations extérieures telles que les variations thermiques, les charges hydrauliques ou les événements sismiques. Une définition rigoureuse du référentiel temporel est donc indispensable pour distinguer les déplacements réels de l'ouvrage des effets liés à l'évolution du cadre de référence lui-même.

Cependant, la définition d'un cadre de référence à la fois planimétrique et altimétrique strictement fixes dans le temps demeure un défi, dans la mesure où la Terre ne constitue pas un système statique. Les mouvements tectoniques, induisent des déplacements à grande échelle, qui doivent être pris en compte dans une analyse temporelle de haute précision ; pour des déplacements locaux ou globaux.

### 2.5.2 Systèmes de référence

Les cadres de référence permettant l'utilisation des coordonnées sont toujours liés à un système de référence global terrestre. Cette notion est fondamentale ; cela sous-entend que tous les systèmes sont liés à l'évolution et la vie de la Terre. Cette dernière est reliée au système céleste, considéré comme système de référence fixe.

En reliant tous les systèmes entre eux, il est alors possible de pouvoir relier toutes les technologies dans un même cadre de référence. Dans le développement qui suit, on s'intéresse uniquement à la problématique de la Suisse et du suivi d'un ouvrage d'art.

#### 2.5.2.1 Système de référence suisse

L'infrastructure géodésique suisse s'inscrit dans une succession de systèmes de référence imbriqués, allant d'un cadre terrestre global jusqu'au système national. Cette structure garantit la compatibilité des observations réalisées en Suisse avec les systèmes de positionnement globaux tout en tenant compte des spécificités nationales. Les principaux systèmes de référence peuvent être présentés comme suit :

1. **ITRS** (*International Terrestrial Reference System*) est le système de référence terrestre global, directement lié au système de référence céleste ICRS. Les cadres de référence terrestre et céleste, ainsi que les paramètres d'orientation de la Terre, sont fournis par l'IERS. La réalisation la plus récente de ce système est **ITRF2020** (Altamimi et al., 2023), qui permet notamment :
   - la détermination des positions et vitesses de stations de référence avec une précision millimétrique
   - l'accès à des éphémérides GNSS de précision centimétrique
   - la détermination de coordonnées centimétriques pour des points à la surface de la Terre ou pour des satellites en orbite basse.
2. **ETRS89** (*European Terrestrial Reference System*) est le système de référence terrestre européen, issu de l'ITRS et solidaire de la plaque Eurasienne. Il permet ainsi d'éliminer les effets des mouvements tectoniques à l'échelle continentale. Les systèmes de référence européens sont définis et maintenus par la commission EUREF (Reference Frame Sub-Commission for Europe (EUREF), 2025). La réalisation actuellement en vigueur est **ETRF2020**.
3. **CHTRS95** (*Swiss Terrestrial Reference System*) constitue le système de référence terrestre national suisse. Il est rattaché à l'ETRS89 et tient compte des mouvements tectoniques régionaux de la Suisse par rapport à la plaque eurasienne. Dans la pratique, il peut être considéré comme équivalent à l'ETRS89 à la précision centimétrique. La dernière réalisation dont les formules ont été publié est celle de CHTRS95. Des contrôles et mesures du cadre de référence sont réalisés tous les 6 ans mais la transformation ETRS89-CHTRS n'est pas publié, la dernières réalisation est **CHTRF2016**.
4. **CH1903+** est le système de référence cartographique suisse, lié à **CHTRS95**. Son cadre de référence est nommé **MN95**. Comme le montre l'imbrication des systèmes de référence précédents, le cadre MN95 est pleinement compatible avec les systèmes de positionnement globaux.

La figure 2.10 illustre la hiérarchie des systèmes de référence utilisés en Suisse ainsi que leurs cadres de réalisation, depuis le système terrestre global jusqu'au cadre national.

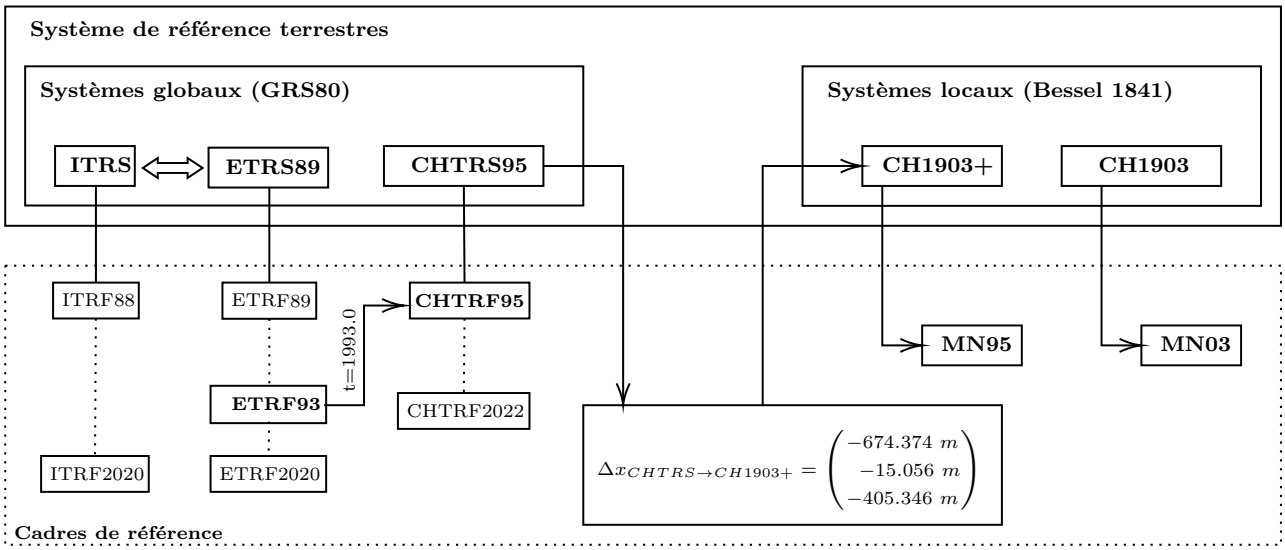



**Fig. 2.10** – Relation entre les systèmes de références terrestres, inspiré de : (Swisstopo-Cadastre-48, 2025)

#### 2.5.2.2 Cadre de référence MN95

Le rôle d'un cadre de référence est de fournir une base stable et cohérente permettant l'exploitation et l'interprétation simple des coordonnées géographiques. Ce cadre est un élément fondamental pour des applications telles que les systèmes d'information géographique (SIG), la cartographie du territoire ou encore la mensuration officielle.

Le cadre de référence **MN95** a été fixé une fois pour toutes à l'époque $t = 1993.0$ et est relié au système de référence **CHTRS95** par une transformation à trois translations, exprimées en coordonnées cartésiennes géocentriques :

- $t_x = -674.374\,\mathrm{m}$
- $t_y = -15.056\,\mathrm{m}$
- $t_z = -405.346\,\mathrm{m}$

Du point de vue de l'utilisateur, qu'il s'agisse d'un positionnement GNSS en temps réel via le Swiss Positioning Service (swipos) ou d'un post-traitement fondé sur les coordonnées des stations permanentes AGNES, les effets liés à la tectonique des plaques ne sont généralement pas perceptibles. Ces effets sont pris en compte dans les mises à jour périodique, tous les 6 ans, du système de référence national **CHTRS95** et de ses réalisations successives, dont la plus récente est **CHTRF2016**.

#### 2.5.2.3 Problématique de la tectonique des plaques

La Terre ne constitue pas un système rigide : la croûte terrestre est animée de mouvements continus liés à la tectonique des plaques. Comme illustré à la figure 2.11, la plaque eurasienne présente une vitesse moyenne d'environ 25 mm/an en direction du nord-est dans le cadre de référence **ITRF2014**.

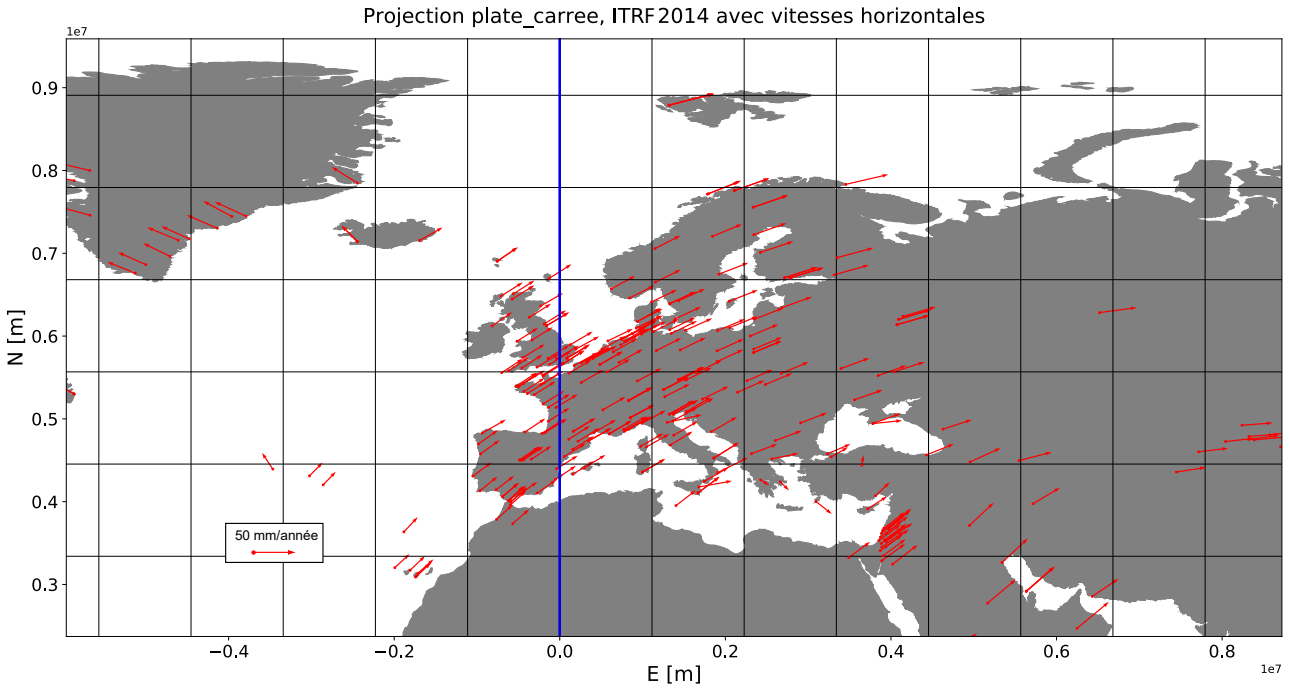



**Fig. 2.11** – Vitesse horizontale des stations ITRF2014 par rapport à l'époque de référence $t_0 = 2010.0$. Source : (Guillaume, 2024)

À titre d'exemple, la position de l'antenne GNSS de la station ZIMM à Zimmerwald, exprimée dans le cadre de référence **ITRF2020**, peut s'écrire sous la forme suivante (Swisstopo-Cadastre-48, 2025) :

$$\boldsymbol{x}_{\mathrm{ITRF2020}}(t) = \begin{pmatrix} 4331296.92975\,\mathrm{m} \\ 567556.05813\,\mathrm{m} \\ 4633134.05193\,\mathrm{m} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -0.01378\,\mathrm{m/an} \\ 0.01810\,\mathrm{m/an} \\ 0.01164\,\mathrm{m/an} \end{pmatrix} (t - 2015.0), \tag{2.59}$$

Afin de faciliter l'utilisation des cadres de référence en Europe, le système **ETRS89** est défini comme solidaire de la plaque eurasienne. Les vitesses issues de l'**ITRF** y sont donc compensées, ce qui permet de disposer d'un cadre de référence quasi fixe à l'échelle européenne. Dans ce contexte, le système **CH1903+** peut être considéré comme stable par rapport à l'**ETRS89** pour les applications courantes.

Le cadre **MN95** ayant été fixé à l'époque $t = 1993.0$, des écarts significatifs apparaissent progressivement entre les systèmes **ITRF**, **ETRS89** et **CHTRS95**. Pour des applications locales classiques, telles que le positionnement GNSS à l'aide des services Swipos, ces écarts restent généralement négligeables.

En revanche, les solutions GNSS modernes de type *Precise Point Positioning* (PPP) permettent d'obtenir des positions centimétriques sans recours à une station de référence locale. Ces solutions étant directement rattachées au système **ITRS**, une transformation rigoureuse et actualisée entre les cadres **ITRS**, **ETRS89** et **CHTRS95** devient indispensable. De plus, les vitesses internes au territoire suisse, en fonction des régions, ne peuvent plus être négligées pour ce type d'application.

Un outil de transformation officiel, mis à disposition par l'EUREF, permet d'effectuer les conversions entre les cadres **ETRF** et **ITRF** aux différentes époques. Il est disponible à l'adresse suivante : https://www.epncb.oma.be/_productsservices/coord_trans/.

La dernière réalisation de **CHTRF2016** a permis de générer la carte 2.12 du vecteur vitesse de déplacement des points fixes du cadre de référence. Cette visualisation, met bien en évidence des déplacements planimétriques plus importants dans les Alpes que pour la région du plateau.

Cependant, pour l'instant, l'utilisateur doit toujours revenir en **CHTRF95** car la transformation entre le dernier cadre **ETRF2014** et **CHTRF2016** n'est pas disponible.

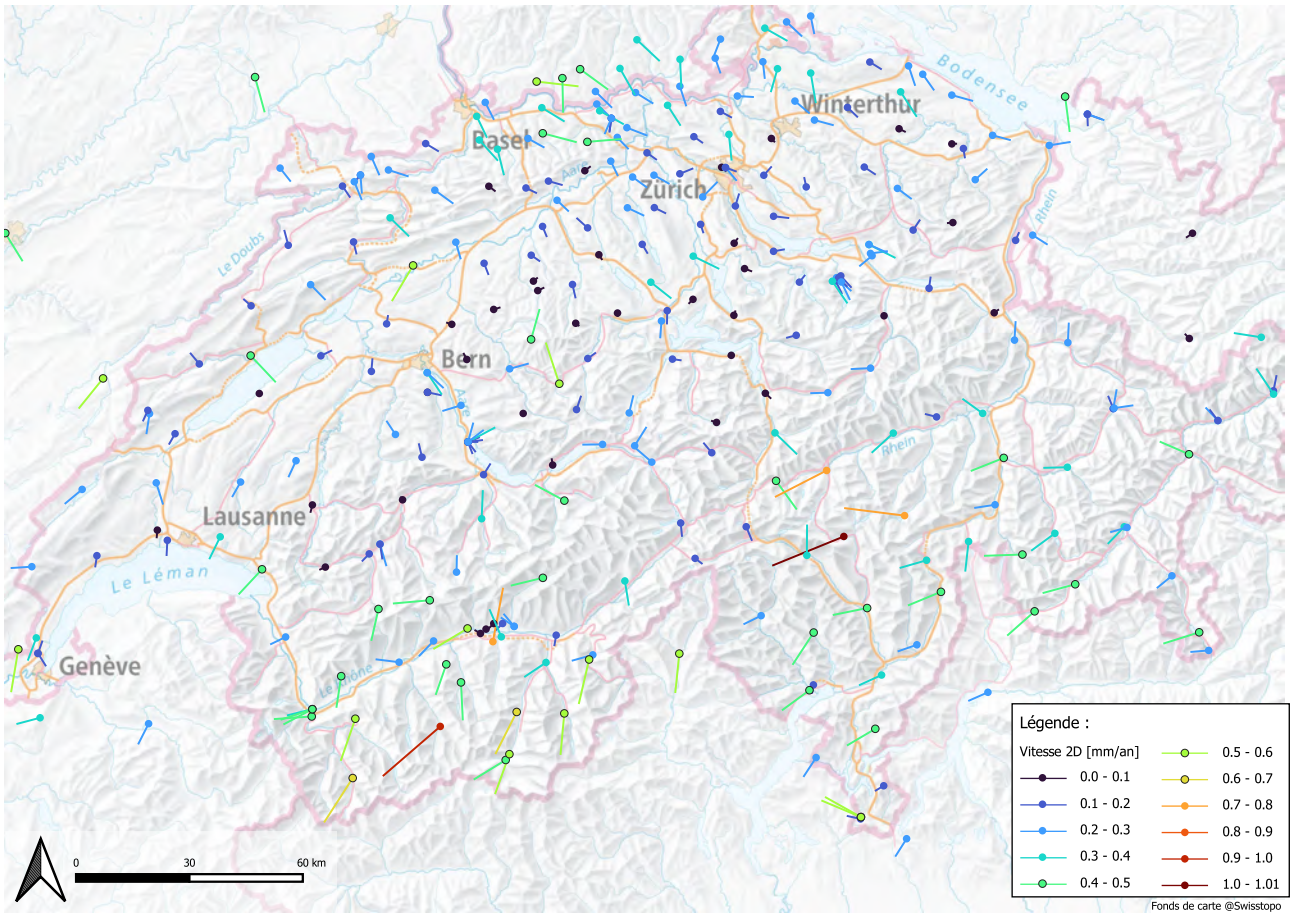
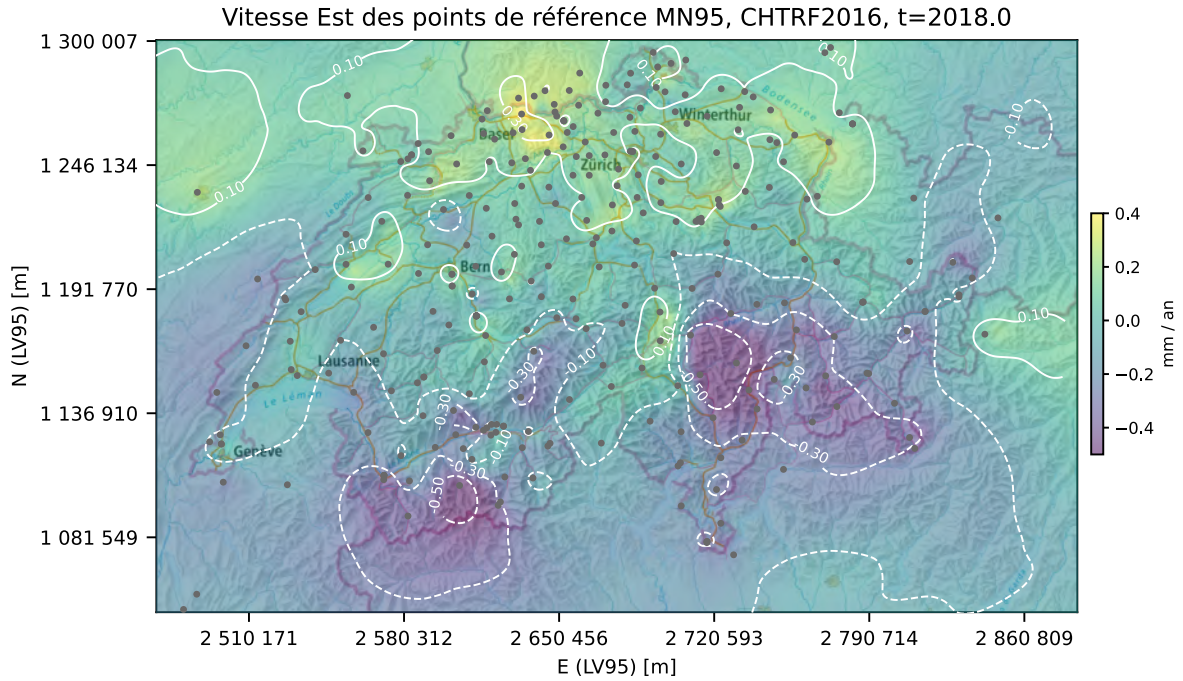
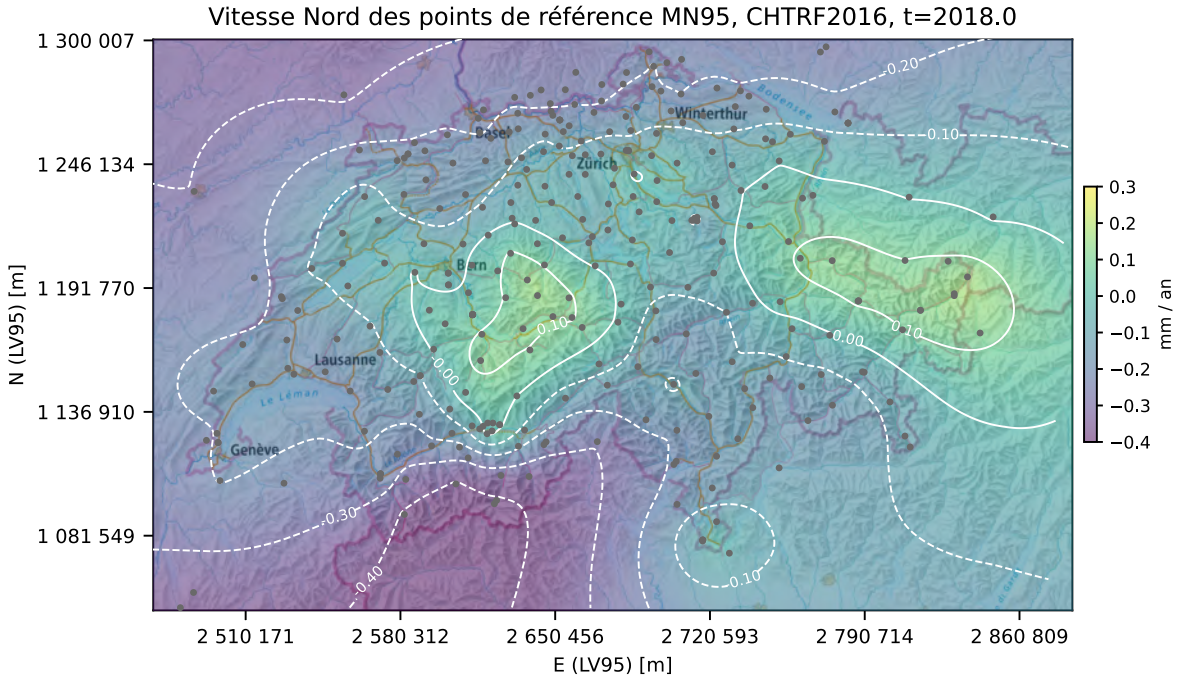



**Fig. 2.12** – Vecteurs vitesses horizontal des points fixes du cadre de référence **CHTRF2016** à l'époque $t = 2018.0$, orienté dans le cadre de référence MN95. Source des données : (Swisstopo-PNAC, 2024)




**(a)** Vitesse Est




**(b)** Vitesse Nord

**Fig. 2.13** – Interpolation des vitesses **horizontales** des points fixes du cadre de référence **CHTRF2016** à l'époque $t = 2018.0$ selon les composantes MN95, Est et Nord. Source des données : (Swisstopo, 2025), (Swisstopo-PNAC, 2024)

La carte (fig. 2.12) représente des vecteurs vitesses par station. Il également possible de créer des cartes avec une interpolation spatiale des valeurs de vitesse selon les diverses composantes. La méthode d'interpolation est basée sur un algorithme de **kriegage**, avec un modèle sphérique ; ce type de modèle est très utilisé dans le monde du SIG pour générer une surface de valeur à estimer depuis des mesures ponctuelles. L'interpolation spatiale des vitesses a été réalisée à l'aide de la bibliothèque Python *PyKrige* (Murphy, 2018) dans laquelle on retrouve les divers éléments nécessaires aux méthodes géostatistiques d'interpolations classiques, décrites notamment par (Cressie, 1993).

Dans les deux cartes de vitesses planimétriques 2.13a et 2.13b, on constate les déplacements par composante sont également différenciables entre la partie du plateau et des Alpes. Les amplitudes par années sont faibles, au maximum 0.5 mm/an.

Ce différentiel de vitesse entre le plateau et les Alpes met en lumière une première complexité de la mise en place d'un cadre de référence fixe et pérenne dans le temps pour la surveillance d'un ouvrage. Ces vitesses mettent en évidence les mouvements absolus internes dans le cadre de référence **MN95** au niveau du pays :

- Plateau : planimétrie (norme,val.absolu) $\approx 0.2$ mm/an, altimétrie : $\approx +1$ mm/an
- Alpes : planimétrie (norme,val.absolu) $\approx 0.8$ mm/an, altimétrie : $\approx +2$ mm/an

La représentation colorisée des déplacements altimétriques 2.14 met en évidence un soulèvement plus marqué dans les Alpes, avec pour le Valais, un exhaussement deux fois plus rapide que pour le plateau à 2.25 mm/an contre 1 mm/an.

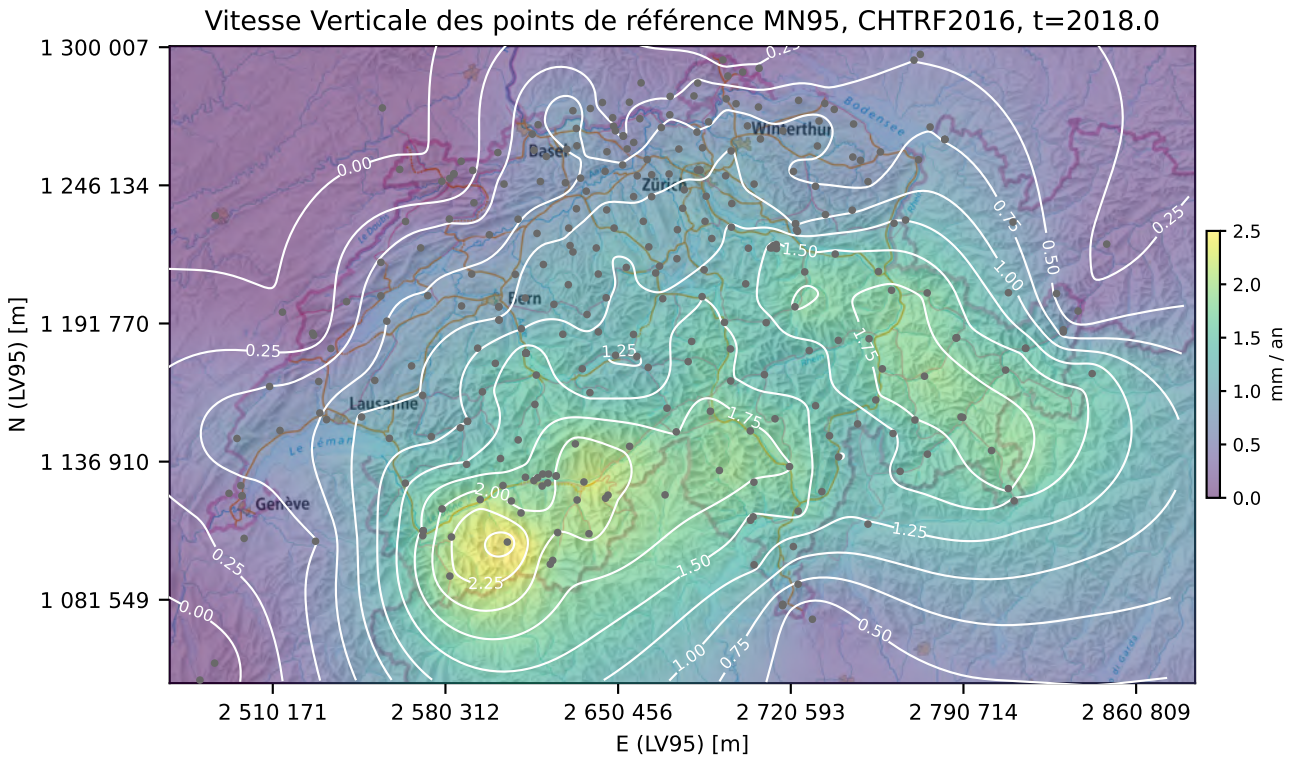
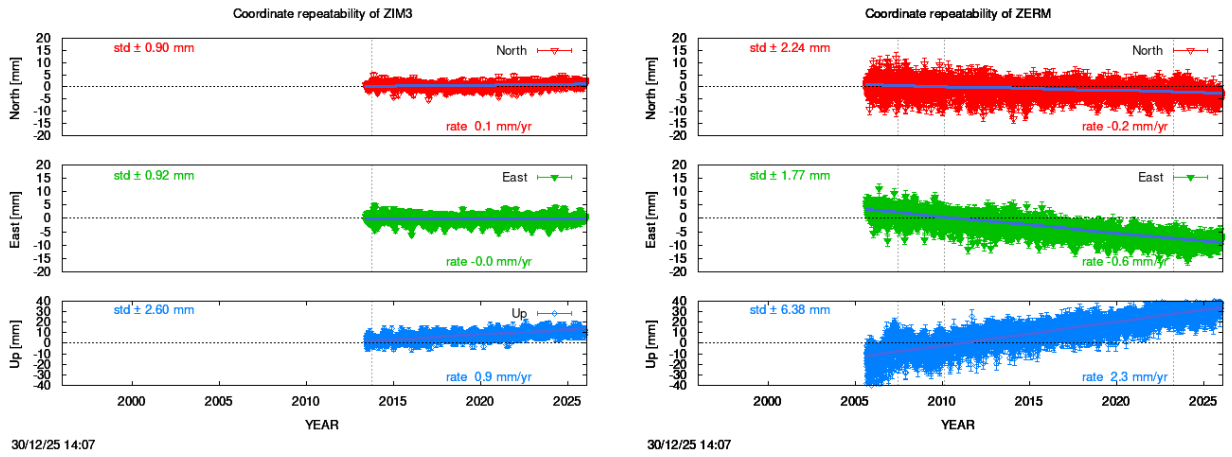



**Fig. 2.14** – Représentation des vitesses **verticales** des points de référence **CHTRF2016** à l'époque $t = 2018.0$. Source des données : (Swisstopo, 2025), (Swisstopo-PNAC, 2024)

Il est également possible de visualiser les vitesses planimétriques et altimétriques des stations permanentes du réseau *Automated GPS Network of Switzerland* (AGNES)(Swisstopo-AGNES, 2025) directement sur la plateforme du Permanent Network Analysis Center (PNAC) (Swisstopo-PNAC, 2024). Comme exemple de visualisation l'évolution temporelle des coordonnées absolues de deux stations :




**(a)** Vitesses de Zimmerwald **(b)** Vitesses de Zermatt. IGS14

**Fig. 2.15** – Graphique mis à disposition par PNAC pour le suivi à long terme des stations permanentes. Vitesses données par rapport au cadre ETRS. Sources : (Swisstopo-PNAC, 2024)

Les directives de l'office fédéral de l'énergie (OFEN) exigent qu'un ouvrage de type barrage soit ausculté au minimum tous les 5 ans. Au vu des vitesses présentes dans les Alpes, en 5 ans, les coordonnées absolues peuvent changer de 5 mm pour la planimétrie et 10 mm pour l'altimétrie. Ce qui avec les techniques modernes de positionnement global comme le GNSS, est significativement détectable entre deux états de mesures.

### 2.5.3 Proposition de surveillance à long terme

Tous les 6 ans, un contrôle par mesures GNSS des points de référence du cadre **MN95** (environ 200 stations) est réalisé par Swisstopo. Ces campagnes permettent d'établir une nouvelle réalisation du cadre de référence cinématique suisse (CHTRF).

La répartition spatiale ainsi que la densité des points sont déterminantes. Toutefois, l'élément essentiel réside dans le fait que ces points sont mesurés, intégrés et calculés conjointement avec les observations des stations permanentes AGNES ainsi que du réseau européen EUREF (Swisstopo-Cadastre-28, 2018). Cette intégration garantit une détermination optimale et homogène des coordonnées tridimensionnelles à une époque donnée.

Pour chacun de ces points, il est alors possible d'estimer des vitesses de déplacement planimétriques et altimétriques. Les résultats correspondants sont publiés sur la plateforme d'actualisation du cadre de référence (PNAC), dans la réalisation CHTRF la plus récente [2].

Comme présenté précédemment, les déplacements de la croûte terrestre en Suisse ne sont pas négligeables. Dans le cadre d'une surveillance s'inscrivant sur la durée de vie d'un ouvrage, ces effets ne peuvent donc pas être ignorés lors de la détermination de coordonnées absolues. Néanmoins, afin de garantir la comparabilité temporelle des observations, il est indispensable de disposer de points supposés stables, situés à proximité ou à distance du site étudié, et considérés comme fixes relativement entre eux dans le temps.

La connaissance des vitesses tectoniques permet de construire une grille d'interpolation des vitesses de déplacement issues de la dernière réalisation de CHTRF par exemple. Cette grille fournit un champ continu de vecteurs vitesses dans l'espace tridimensionnel $(E, N, H)$, applicable à une époque donnée $t$, pour tout point x du domaine considéré :

$$\vec{v}(\boldsymbol{x}) = \begin{pmatrix} v_E^{\text{inter}}(\boldsymbol{x}) \\ v_N^{\text{inter}}(\boldsymbol{x}) \\ v_H^{\text{inter}}(\boldsymbol{x}) \end{pmatrix} \quad [\text{mm/an}] \tag{2.60}$$

2. Lien vers CHTRF2016 (valable au 1.1.2026) : https://pnac.swisstopo.admin.ch/pages/en/chtrf.html

Avec :

| | |
|---|---|
| $\boldsymbol{x} = (E, N, H)$ | : position du point dans le cadre MN95 [m] |
| $v_E^{\text{inter}}, v_N^{\text{inter}}, v_H^{\text{inter}}$ | : composantes interpolées du champ de vitesse CHTRF [mm/an] |

À partir de ce vecteur vitesse, il est alors possible de corriger les coordonnées d'un point x pour les ramener à une époque de référence $t_0$, correspondant par exemple à l'époque initiale du réseau d'auscultation. Cette correction temporelle s'effectue selon la relation suivante :

$$\boldsymbol{x}_{t_0}(t) = \boldsymbol{x}(t) - \vec{v}(\boldsymbol{x}) \cdot (t - t_0) \tag{2.61}$$

Où :

| | |
|---|---|
| $\boldsymbol{x}_{t_0}(t)$ | : coordonnées $(E, N, H)$ à l'époque $t$, ramenées à l'époque de référence $t_0$ [m] |
| $\boldsymbol{x}^t$ | : coordonnées $(E, N, H)$ du point à l'époque $t$ [m] |
| $\vec{v}$ | : exprimé en [mm/an] est converti en [m/an]. |
| $t - t_0$ | : delta temps entre deux époques en année |

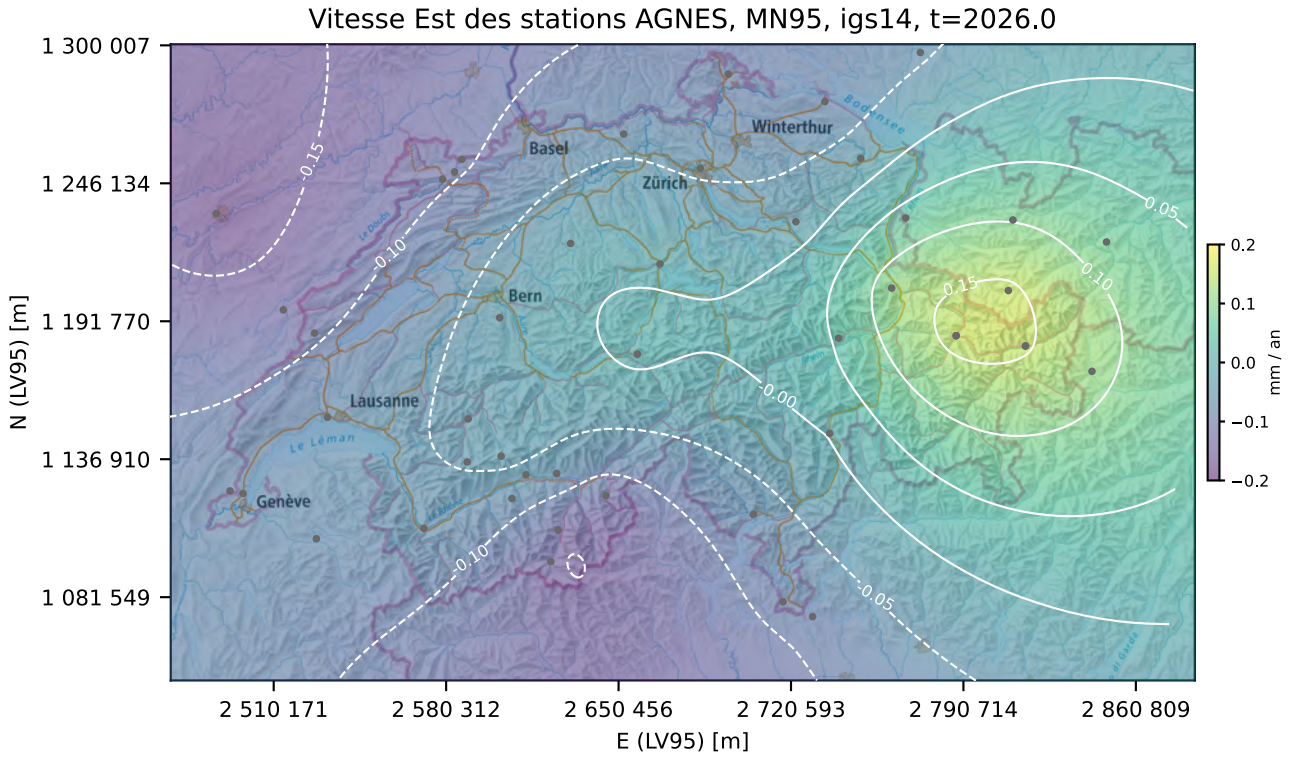
Rappelons que l'application de corrections de vitesse sur les coordonnées des points ou observations GNSS, est à appliquer uniquement si la configuration l'exige. Pour des mesures réalisées localement ce paramètre est négligeable. Par contre, dans le cadre d'une intégration et un suivi basé avec les observations des mesures AGNES, l'application des vitesses doit être réalisée afin de corriger l'évolution tectonique non homogène de la croûte terrestre Suisse.

#### Les données des vitesses des stations AGNES

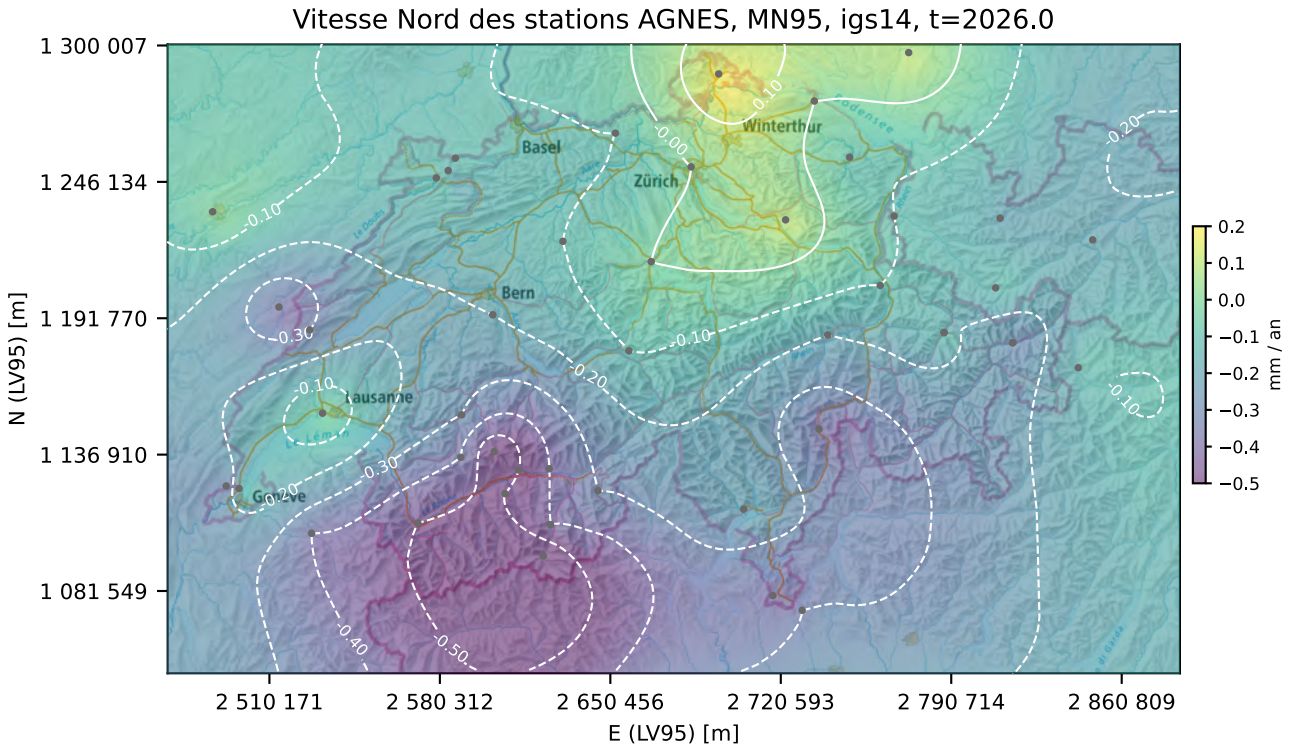
Les cartes colorisées des déplacements (fig ; 2.13a, 2.13b, 2.14), sont valables pour la mise à jour du cadre de référence CHTRF. Dans une optique de suivi à long terme des réseaux de surveillance, il est plus pertinent d'utiliser les vitesses **IGS14** des stations AGNES projetées dans le cadre de référence **MN95** (fig. 2.15). Le système IGS14 est une réalisation de **ITRF2014** qui est utilisé comme cadre de référence par excellence pour les systèmes de positionnement GNSS. Les cartes de vitesse ci-dessous (fig. 2.16a 2.16b 2.17), montrent des mouvements sensiblement différent que ceux des points de références pour le cadre **CHTRF**.

La composante "est" (fig 2.16a) met en avant des déplacements très faibles, quasiment nuls par année sur l'ensemble de la Suisse, hormis dans les Grisons avec une vitesse à 0.2 mm/an. La composante "nord" (fig. 2.16b) est plus active dans les Alpes Valaisannes avec un déplacement de $-0.5$ mm/an. Les vitesses les plus importantes concernent la composante altimétrique, qui au maximum, est de l'ordre de 2.5 mm/an pour le Valais.

Concernant la planimétrie, ces valeurs sont relativement faibles pour un suivi annuel. Si des mesures sont réalisées tous les 5 ans par exemple, cela représente dans les secteurs actifs des variations de 2.5 mm. La valeur pour elle même est tout juste non significative, au vu du degré de précision du GNSS, $\pm\, 2 - 3$ mm, mais montre une tendance non négligeable. Sur 10 ans, il faut toutefois tenir compte de cette tendance car cela représenterait une correction de 5 mm afin de ramener les observations coïncidentes avec l'époque de référence du réseau.




**(a)** Vitesse Est. AGNES only IGS14




**(b)** Vitesse Nord. AGNES only IGS14

**Fig. 2.16** – Interpolation des vitesses horizontales des stations du réseau AGNES dans le cadre de référence IGS14. Source de données : (Swisstopo, 2025) et (Swisstopo-PNAC, 2024)

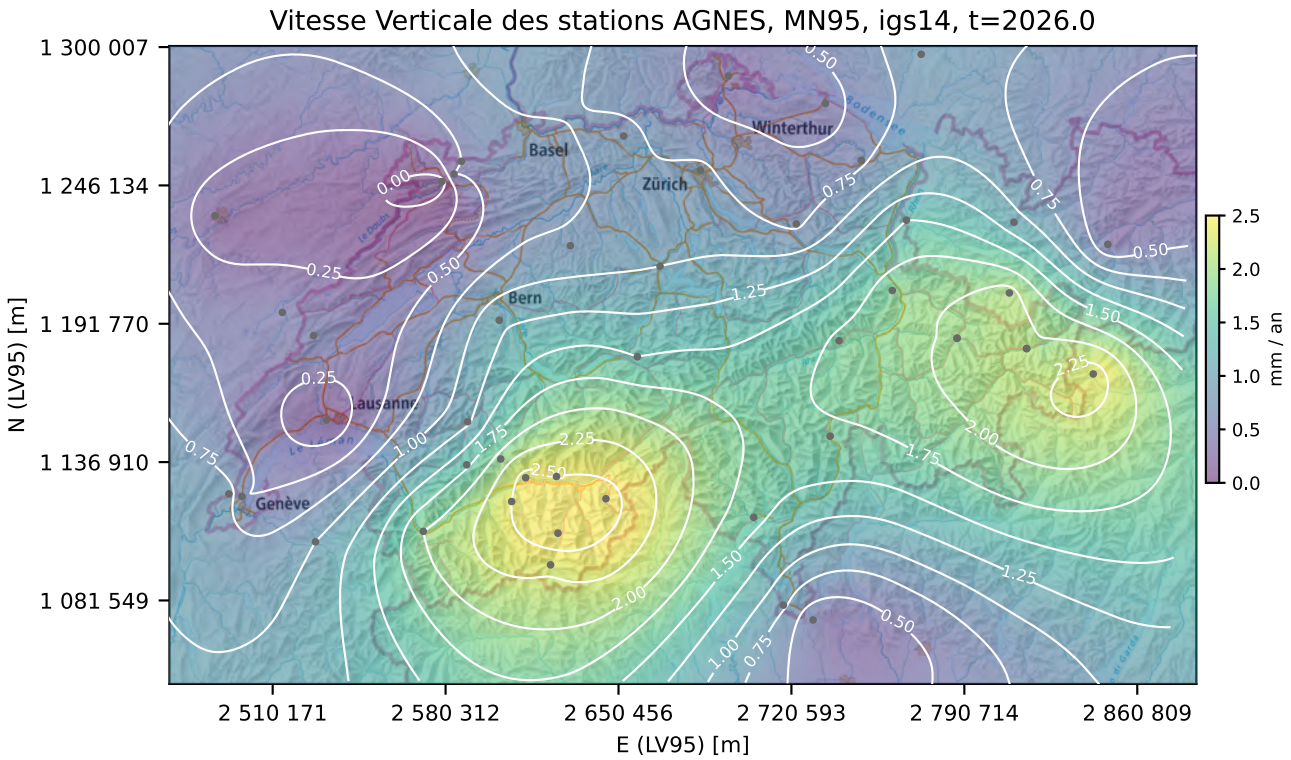



**Fig. 2.17** – Représentation des vitesses verticales des stations du réseau AGNES dans le cadre de référence IGS14. Source de données : (Swisstopo, 2025) et (Swisstopo-PNAC, 2024)

Concernant la partie altimétrique, figure 2.17, les vitesses sont non négligeables pour toute la Suisse avec un mouvement minimum moyen pour le plateau de 1 mm/an et de 2 mm/an pour les Alpes. Comme le montre la figure 2.17, les différentiels entre les régions peuvent être importants, nécessitant l'application d'une correction quasi systématique afin de ne pas introduire de tension dans les observations GNSS à grande échelle.

## 2.6 Bilan de la partie théorique

Les éléments théoriques présentés dans ce chapitre mettent en évidence la difficulté d'obtenir des observations homogènes entre elles, ainsi que la complexité inhérente à leur combinaison au sein d'un même ajustement. En effet, ces observations sont affectées par des corrections de nature atmosphérique et physique, notamment liées au champ de gravité, mais également par des effets structurels à grande échelle, tels que les mouvements de la croûte terrestre.

La suite de ce travail, va consister à acquérir des observations d'un réseau géodésique de surveillance, et de mettre en place des protocoles de mesures complémentaires afin d'estimer le maximum de paramètres en vue de la correction des mesures et l'homogénéisation des techniques entre elles.

# CHAPITRE 3

# APPLICATION À UN RÉSEAU DE SURVEILLANCE

## 3.1 Acquisition de données

### 3.1.1 Choix du site

Afin de mettre en avant les diverses problématiques rencontrées dans un réseau de surveillance d'ouvrage d'art, le choix du site est déterminant. Le réseau de surveillance doit combiner les diverses technologies d'acquisitions, à savoir : nivellement géométrique, station totale et GNSS.

Les corrections dépendantes de la géodésie physique doivent également être significatives, le réseau de surveillance doit donc se situer dans une région alpine afin de mettre en évidence des petites longueurs d'ondes du champ de pesanteur. Les lignes de visées doivent être dans toutes les orientations et également spatialement bien réparties, distances courtes et longues.

Le choix s'est donc porté sur le site du barrage de Zeuzier, exploité par la société *Électricité de la Lienne SA* (Electricité de la Lienne, 2025) qui fait partie du groupe *OIKEN* (OIKEN, 2025). Son réseau de surveillance remplit toutes les caractéristiques. De plus une mesure quinquennale du réseau de surveillance est réalisée par l'entreprise *Geosat SA* (Geosat SA, 2025) bureau d'ingénieurs géomètres spécialisé dans la surveillance d'ouvrages d'art, du 15 au 19 septembre 2025. Ce qui permet d'avoir accès à des mesures récentes de haute précision.

### 3.1.2 Observations du réseaux géodésique

#### 3.1.2.1 Réseau Géodésique

Le concept de surveillance géodésique est basé sur trois techniques de mesures principales :

- **GNSS** : permet de fournir des blocs de coordonnées très homogènes sur tout le site, avec des points de références situés loin du secteur d'étude et des points proches,
- **Nivellement géométrique de précision** : il assure un suivi de haute précision altimétrique des déplacements verticaux, de la relation entre les rives de la vallée et participe à la liaison altimétrique entre les technologies,
- **Station totale** : les mesures angulaires et de distances vont permettre de déterminer les positions 3D de points caractéristiques situés autour du barrage ainsi que de contribuer à l'augmentation de la précision interne en combinaison aux observations GNSS proches de l'ouvrage.

Le détails de ces acquisitions de bases sont disponibles à l'annexe C page A-9.

#### 3.1.2.2 Bilan mesures géodésiques

Les observations brutes transmises par le bureau *Geosat SA* sont conformes aux précisions et exigences de qualité d'un réseau géodésique. Il sera possible d'apporter les corrections atmosphériques et physiques aux observations, afin de valider la combinaison de toutes les technologies d'acquisitions avec leurs précisions internes.

Afin de pouvoir estimer les corrections à apporter aux observations géodésiques, des mesures additionnelles sont à réaliser en parallèle ou en complément sur le site. Elles concernent les paramètres de l'atmosphère, la réfraction, déviations de la verticale et gravimétrie.

## 3.2 Observations spécifiques

### 3.2.1 But et problématique

Comme présenté dans les chapitres précédents, plusieurs méthodes d'acquisition géodésique ont été mises en œuvre pour la mesure du réseau de surveillance. Afin de pouvoir exploiter conjointement ces différentes techniques, il est indispensable d'assurer leur cohérence géométrique et physique afin de les rendre pleinement compatibles entre elles.

Le présent chapitre a pour objectif de décrire les observations spécifiques complémentaires nécessaires à cette intégration, en particulier celles liées à l'altimétrie, à l'atmosphère et aux effets thermiques susceptibles d'influencer les mesures.

#### Altimétrie

Afin de pouvoir comparer et compenser rigoureusement les altitudes issues des différentes méthodes de mesure, celles-ci doivent être exprimées dans un même système altimétrique. Afin de s'affranchir des dépendances directes du champ de pesanteur, les observations altimétriques sont ramenées dans un système d'**altitudes ellipsoïdales h**. Ces altitudes sont définies uniquement par le système de référence géodésique et les caractéristiques de l'ellipsoïde de référence, qui est l'ellipsoïde de Bessel dans le cadre du système CHTRF.

L'obtention d'un géoïde de haute précision ainsi que le calcul rigoureux des corrections orthométriques nécessitent des observations complémentaires :

- **Déviations de la verticale** : elles permettent de caractériser la verticale du lieu à la surface et de contraindre l'ondulation locale du géoïde.
- **Mesures gravimétriques** : elles servent à déterminer les variations du champ de pesanteur **g** le long des lignes de cheminement.

#### Atmosphère

Outre la problématique du référentiel altimétrique, il est nécessaire de corriger les observations géodésiques à l'aide d'un modèle atmosphérique précis. Ce modèle a pour objectif, d'une part, de permettre la correction des distances par la détermination de l'indice de réfraction de l'air, et d'autre part, de réduire les erreurs affectant les observations d'angles zénithaux et les dénivelées issues du nivellement trigonométrique.

Les observations suivantes sont réalisées en parallèle des mesures géodésiques durant la semaine d'acquisition :

- **Paramètres atmosphériques** : température, pression et hydrométrie.
- **Indice de réfraction** : déterminé à partir de mesures de nivellement trigonométrique réciproque simultané.

#### Effets thermiques

Un dernier facteur susceptible d'introduire des résidus dans les observations est lié aux déformations de l'ouvrage durant la campagne de mesure. En effet, les variations thermiques peuvent engendrer des déplacements, remettant en question l'hypothèse de stabilité des points observés entre deux stations de mesures.

Afin de contrôler ces effets, un dispositif de **monitoring** est mis en place durant la campagne d'acquisition. Celui-ci permet de suivre l'évolution de l'ouvrage sur l'ensemble de la période de mesures et de quantifier les déplacements journaliers dû aux effets thermiques.

### 3.2.2 Nivellement trigonométrique réciproque simultané automatique

#### 3.2.2.1 But

Dans les réseaux géodésiques, les points qui ne sont pas déterminés par la méthode du nivellement géométrique sont acquis à l'aide d'observations par station totale. La différence de la dénivelée entre le point de station et le point mesuré est déterminée à l'aide de deux observations : la distance inclinée et l'angle zénithal.

Comme vu dans la partie théorique deux paramètres doivent être pris en compte dans le nivellement trigonométrique :

1. **sphéricité de la terre** : la formule est connue, elle ne dépend d'aucun autre paramètre que la distance horizontale et du rayon de la terre,
2. **réfraction atmosphérique** : la valeur de l'angle de réfraction $\delta_{\text{refr}}$ ou le coefficient $k$ doivent être déterminés.

Il est possible de déterminer $k$ à l'aide de la technique de mesure du nivellement trigonométrique réciproque simultané et de la formule 2.57.

#### 3.2.2.2 Mesures terrain - Matériel

Sur le site, durant la campagne de terrain géodésique, deux nivellements trigonométriques réciproques simultanés automatiques sont mis en place, voir figure 3.2 :

- Piliers 1 et 2 : distance de 924 m
- Piliers 1 et 14 : distance de 1 863 m

En complément du nivellement trigonométrique et afin de qualifier la précision de la détermination trigonométrique le système 1-2 est rattaché au nivellement géométrique de précision. Les références altimétriques pour le calcul des dénivelés trigonométriques sont directement liés aux piliers proches des instruments.

Afin de ne pas interférer avec les mesures du réseau de surveillance, les instruments et prismes sont placés à une dizaine de mètre des piliers bétons, photo 3.1 de l'installation au pilier 14 .



**Fig. 3.1** – Installation nivellement trigonométrique au pilier 14

**Le matériel mis en place est le suivant :**

- 4 stations totale MS60 1" de Leica Geosystemens (Geosystems-MS60, 2025)
- Communication radio avec des Campbell RF422, 1 paire par station de mesure (1 coté ordinateur, 1 coté instrument) [1]
- Accessoires : trépieds, prismes, antennes communications

1. Campbell RF422 Radio 868Mhz : https://www.campbellsci.fr/rf422

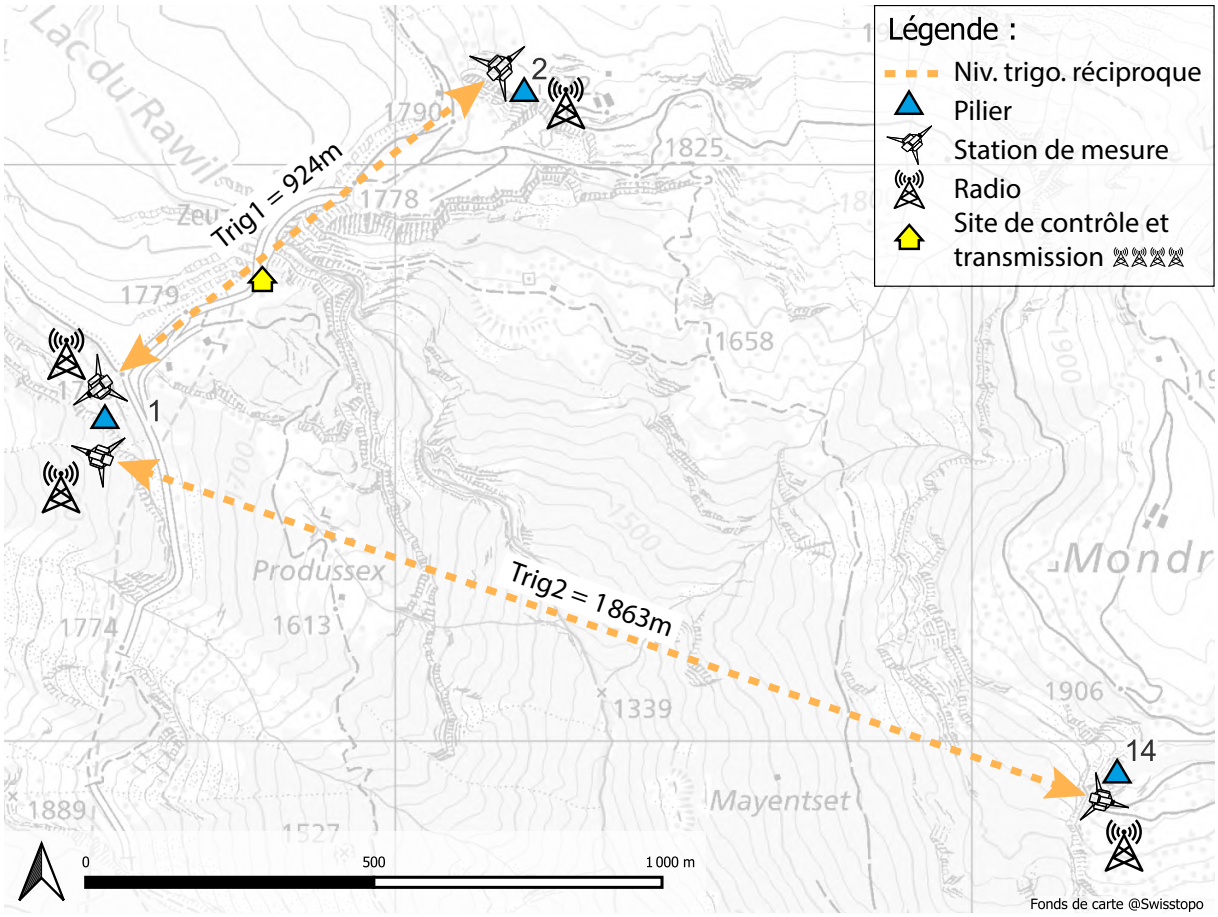



**Fig. 3.2** – Situation des deux nivellements trigonométriques.

D'un point de vue schématique la configuration des mesures est explicité dans le schéma 3.3 ci-dessous

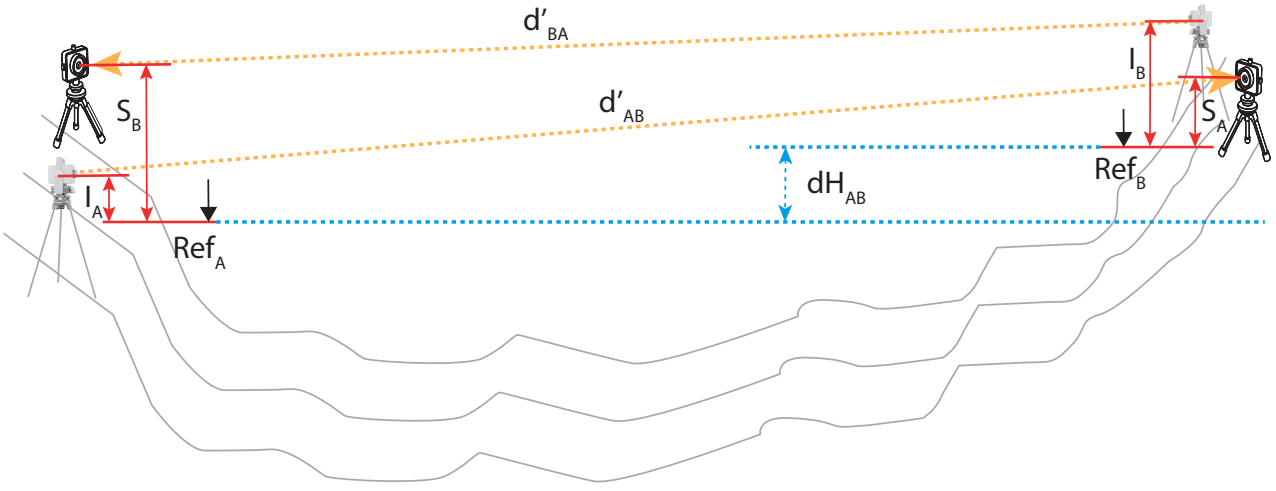



**Fig. 3.3** – Le concept d'acquisition mis en place

L'automatisation des mesures est assurée par le programme de mesures fournit par la HEIG-VD. Le script assure le pilotage de chaque instrument avec une synchronisation des observations et la gestion des différentes erreurs de mesures. Les instruments fonctionnent en continu et il a été possible d'acquérir des séries temporelles sur toute la semaine, du 15 au 19 septembre 2025, comme visible sur les graphique 3.4 et 3.5 .

En se référant au schéma 3.3 la dénivelée brute non corrigée depuis la station A s'exprime comme suit :

$$dH_{AB} = d'_{AB} \cdot \cos\zeta + (I_A - S_A) \quad [\text{m}] \tag{3.1}$$

**Les problèmes suivants ont étés rencontrés durant les mesures :**

- Nivellement trigonométrique 1
  - problème d'alimentation avec les batteries en raison du froid ;
  - une erreur non gérée, l'instrument à rencontré un problème durant un retournement de première en deuxième position.
- Nivellement trigonométrique 2
  - communication radio la distance de 2 km exige une liaison "line of sight" parfaite ;
  - problème d'alimentation avec les batteries en raison du froid ;
  - en fonction de l'orientation du soleil le pointé automatique ATR (Automatique Target Reconnaissance [2]) ne fonctionnait pas d'où les sauts visibles dans la période d'acquisition, figure 3.5, surtout le matin entre 8 h et midi.

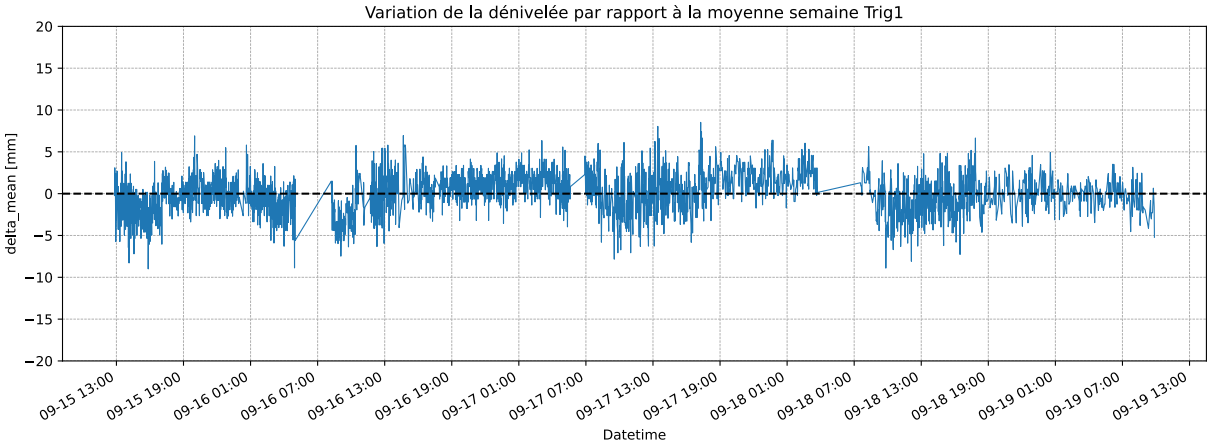



**Fig. 3.4** – Visualisation de la série temporelle sur la mesure Trig1, écart à la moyenne de la semaine

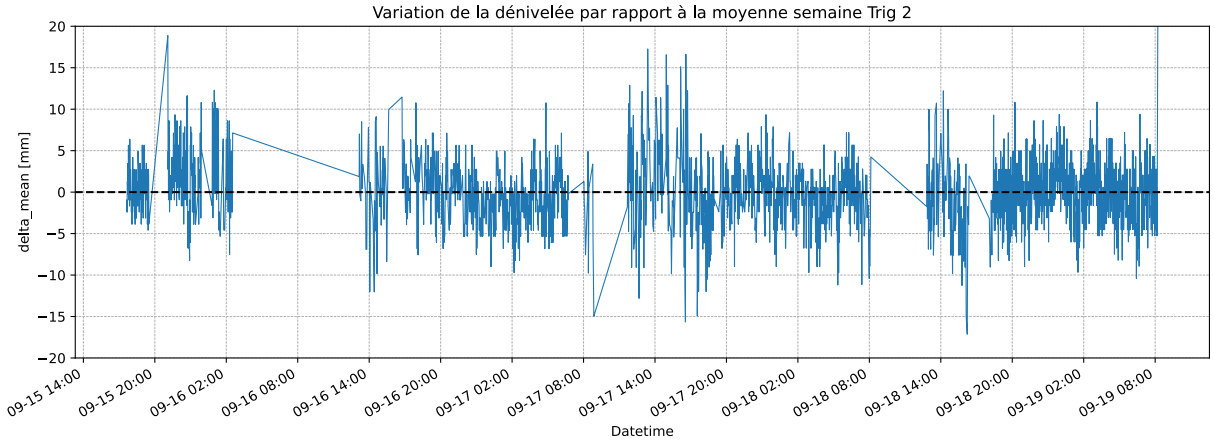



**Fig. 3.5** – Visualisation de la série temporelle sur la mesure Trig2, écart à la moyenne de la semaine

Ces séries temporelles de dénivelées trigonométriques vont être exploitées d'une part afin d'extraire une dénivelée mesurée par station totale et la confronter au nivellement géométrique. D'autre part évaluer la valeur du coefficient de réfraction durant toute la période des mesures, pour pouvoir corriger les observations angulaires d'une valeur locale et non théorique, telles que celles appliquées dans les réseaux de surveillance actuellement.

2. Documentation ATR : https://leica-geosystems.com/about-us/content-features/atrplus-white-paper

### 3.2.3 Micro Gravimétrie

#### 3.2.3.1 Contexte

La mesure de la gravité terrestre peut être réalisée selon deux approches complémentaires. Il est essentiel de distinguer la *gravimétrie absolue* de la *gravimétrie relative (micro-gravimétrie)*, les objectifs, instruments et contraintes sont différentes.

- **gravimétrie absolue :** cette méthode vise à mesurer directement l'accélération de la pesanteur **g** en un point donné, de manière indépendante de toute autre station. Elle offre une précision très élevée (de l'ordre du $\mu$Gal), mais nécessite des instruments lourds, une mise en station délicate et des conditions strictes d'observation.
- **gravimétrie relative (ou micro-gravimétrie) :** la micro-gravimétrie ne mesure pas la valeur absolue de **g**, mais les variations de gravité entre plusieurs points, comme le *Scintrex CG-6*Scintrex Ltd., 2025. Contrairement au gravimètre absolu qui utilise des techniques de mesures avec la chute d'un corps, le *CG-6* observe la variation de la position d'une masse suspendue qui est proportionnelle à la variation de la gravité locale. Afin de pouvoir exploiter les mesures de gravimétrie relative , les observations doivent être rattachées à un point de gravité absolue connue comme référence.

Le traitement, l'exploitation et la mise en place de formules de détermination des corrections orthométriques ne sont pas traités dans ce travail, les valeurs seront directement fournies grâce au travail de (Casto, 2026).

#### 3.2.3.2 Instrumentation

Afin de réaliser ces mesures de gravimétrie absolue, Swisstopo, met à disposition pour ce travail un gravimètre relatif : *Scintrex CG-6*.

Le *Scintrex CG-6* est un micro-gravimètre de dernière génération avec une dérive très faible, et une précision de mesure élevée.

**Principe de fonctionnement du Scintrex-CG6**

Le Scintrex CG-6 utilise un **capteur à quartz fusionné** , spécialement conçu pour offrir une grande stabilité mécanique et thermique. Le cœur du système est constitué d'une masse suspendue par un ressort en quartz fusionné, matériau extrêmement rigide, peu sensible aux variations de température et présentant une très faible hystérésis. Les variations de gravité modifient la position de cette masse, et ces déplacements sont mesurés avec une grande précision par un **capteur capacitif**.

Un circuit de rétroaction électromagnétique maintient la masse à son point d'équilibre : le courant nécessaire pour compenser les variations de position est directement proportionnel à la variation de gravité. Ce principe assure une excellente linéarité et une réponse stable dans le temps, permettant au CG-6 d'atteindre une précision typique de 5 µGal dans des bonnes conditions, ce qui représente pour une différence de potentiel entre deux points une incertitude métrique de 2.2 cm avec gradient standard de variation de la pesanteur à l'air libre de 0.308 6 mGal/m.

**Caractéristiques technique du CG6**

Les caractéristiques principales du CG6 sont :

- Résolution d'affichage 1 µGal
- Déviation standard inférieure 5 µGal
- Dérive journalière entre 0.02 et 0.2 mGal/j
- Diverses corrections automatiques : diurne, inclinaison, température, bruit sismique
- Autonomie de batterie : 24 h

**Méthodologie de mesure**

Le levé de micro-gravimétrie doit se baser sur un point gravimétrique absolu. Il permettra de transférer la valeur absolue vers un point de référence local situé sur le site d'étude. Pour cette étude, le point de référence absolu

"*VSF15*" se situe en plaine, à Noës. Le point de référence local, "*N16b*" se situe sur le site de Zeuzier. (voir figure 3.6 et annexe A page A-5 fiche signalétique complète)

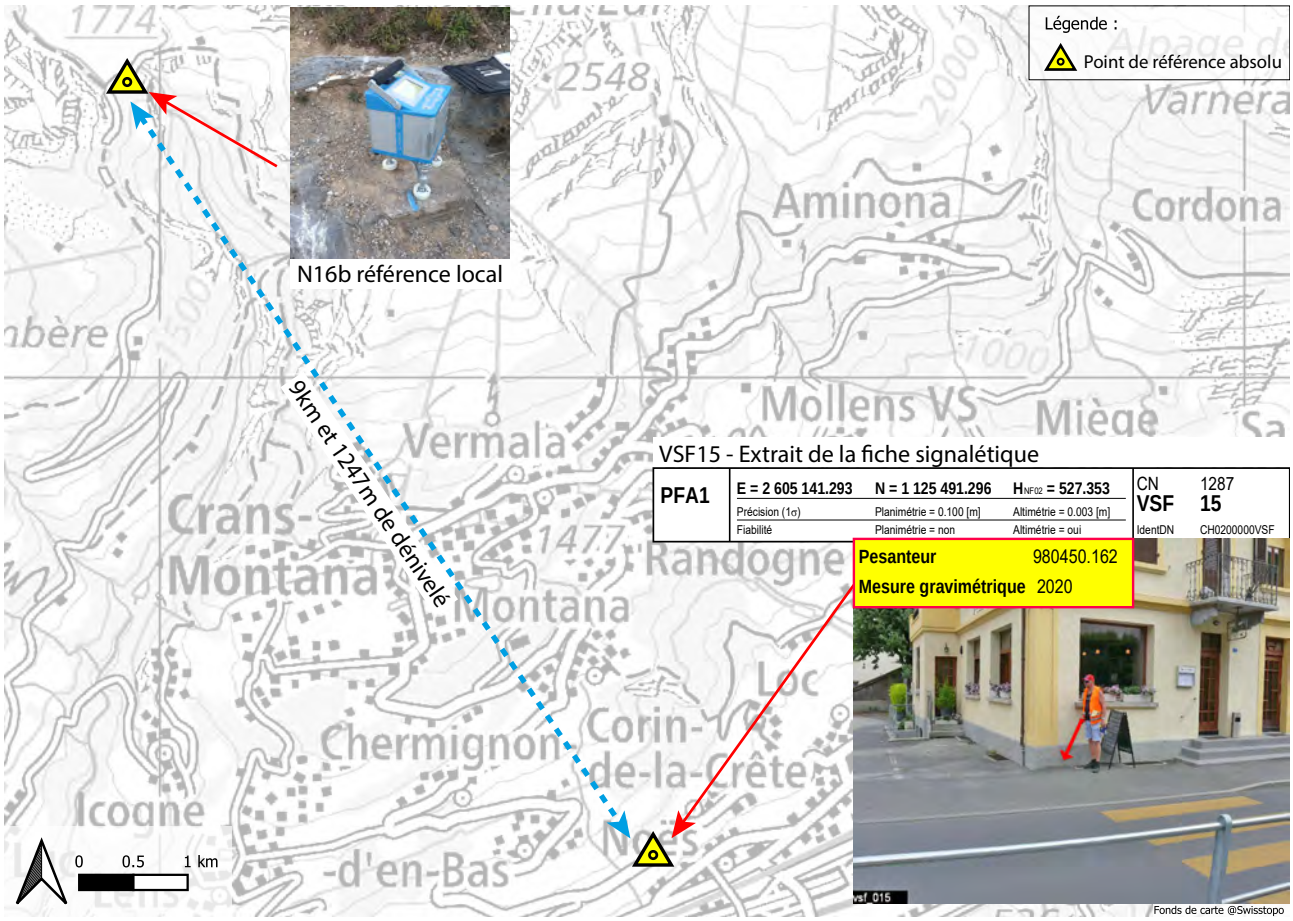



**Fig. 3.6** – Situation des points de référence absolu VSF15 et local N16b.

Il est important de souligner que le gravimètre **CG-6** doit être chaud afin de réaliser des observations. L'instrument reste toujours en fonction afin que sa température interne reste constante,il doit donc être stocké en mode veille et branché au secteur.

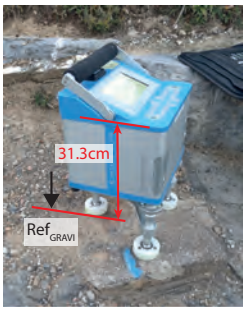
Le protocole d'acquisition mis en place pour les mesures de micro-gravimétrie est le suivant :

1. l'instrument a été contrôlé et configuré chez Swisstopo par Dr.Urs Marti (Marti, 2016) :
   - coordonnée du point central de Zeuzier en WGS84 est introduite afin de corriger de l'effet des marées
   - acquisition en mode moyenne sur 30 s
   - validation de la mesure d'un point avec 5 sessions de 30 s, la validation de la moyenne sera réalisée en post-traitement
2. **Transfert de la référence absolue** : trois aller-retour sont réalisés afin d'assurer précision et fiabilité entre le point "*VSF15*" et "*N17b*"
3. **Mesures par cheminement** : toutes les sessions de mesures démarrent depuis le point de référence local et reviennent à ce point comme fermeture. Le but est de pouvoir compenser la dérive du gravimètre durant la période de mesure, voir schéma 3.8.
4. L'**acquisition d'un point** se déroule de la manière suivante :
   - installation et mise en place de l'appareil sur une surface dure ou trépied
   - mise à niveau de l'instrument
   - acquisition de 5 sessions de mesures au minimum avec contrôle que la précision de la moyenne soit proche de 5 µGal

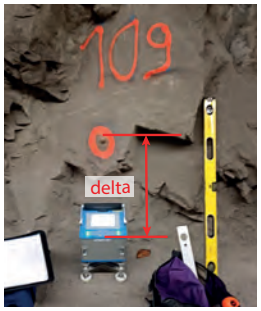
- mesure de la hauteur entre une référence du gravimètre et un point de référence (cheville de nivellement), voir figure 3.7c
- une des 3 vis de réglage a été bloquée, figure 3.7a, afin de garantir une hauteur constante entre le sol et l'appui de référence à 31.3 cm entre le sol et le clavier du **CG-6**, voir 3.7b.



**(a)** Blocage de la vis calante




**(b)** CG-6 avec la hauteur de référence




**(c)** CG-6 hauteur à déterminer

**Fig. 3.7** – Mesures avec le **CG6**

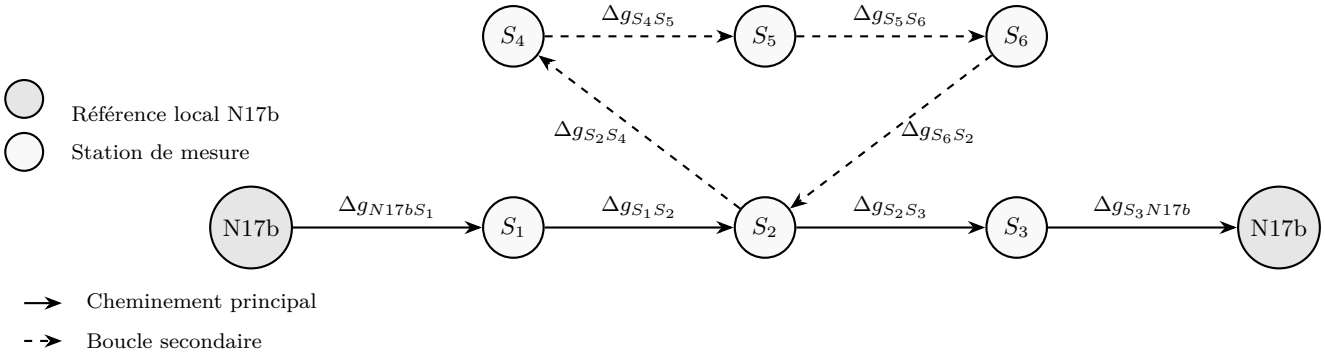



**Fig. 3.8** – Principe des mesures de micro-gravimétrie, avec une boucle secondaire.

Le fichier des observations brutes enregistrées par le **CG-6**, fournit un nombre important d'informations. Les plus importantes sont la valeur de la gravité mesurée, de même que les erreurs standards nécessaires à l'évaluation de la qualité de la mesure, position, température, inclinaison, ..., voir extrait à l'annexe B page A-7.

80 observations ont été réalisées à l'aide du **CG-6**. Les mesures ont toujours été réalisées au plus proche d'un point de nivellement avec un espacement maximal de 120 m pour garantir la meilleure précision possible, afin de déterminer en post-traitement les cotes géopotentielles, voir figure 3.9.

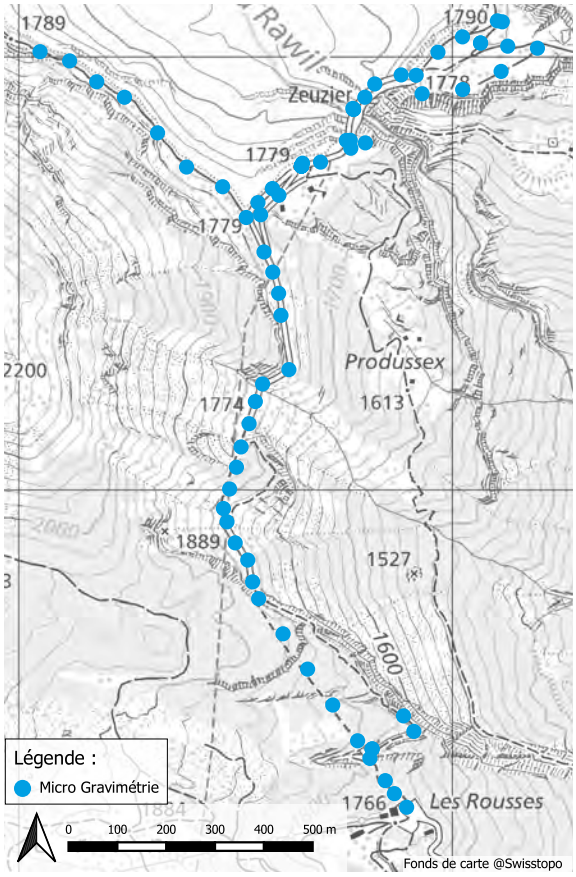



**Fig. 3.9** – Répartition des points de mesures.

## 3.2.4 Mesures de déviation de la verticale

### 3.2.4.1 But

Les mesures de déviation de la verticale vont permettre d'affiner le modèle de géoïde Suisse CHGEO2004 défini par le service de géodésie de Swisstopo. Ces mesures vont permettre de mesurer les courtes longueurs d'onde de la forme du géoïde local, et par la suite déterminer les variations du géoïde sur le site de Zeuzier avec une très grande précision.

### 3.2.4.2 Mesures terrain - Matériel

Les observations astro-géodésique sont effectuées à l'aide du logiciel **PyDeadalus** développé dans le cadre du travail de Master "*Développement d'un système de mesures astro-géodésiques*" (Délèze, 2024). Le logiciel permet de pointer et tracker automatiquement les étoiles, calculer la position géocentrique et les déviations de la verticale dans le système ITRS.

**Matériel utilisé** pour les mesures est le suivant, figure ci-contre 3.10 :

- Station totale : Leica TS60 0.5"
- Caméra pour la visée des étoiles
- Antenne GNSS
- Module de pilotage de la station totale, contrôle de la caméra, et GNSS
- Ordinateur portable pour le logiciel PyDeadlus

**Protocole d'acquisition :** :

- Mise en station traditionnelle
- Calibration de la caméra selon notice PyDeadalus
- Orientation sur une étoile connue, idéalement l'étoile polaire ($\alpha$ UMi) c'est une étoile fixe
- Acquisition automatique des étoiles à un angle zénithal de 30°
- Nombre minimum d'observations à atteindre 180 et réalisation de 3 séries de mesures
- Calculs des déviations de la verticale directement sur site et validation de l'homogénéité des 3 séries, à l'aide du protocole de validation voir tableau 3.1. Le calcul final est réalisé plus tard, il faut attendre les paramètres de rotation de la terre pour calculer avec précision les déviations finales dans le système ITRS.

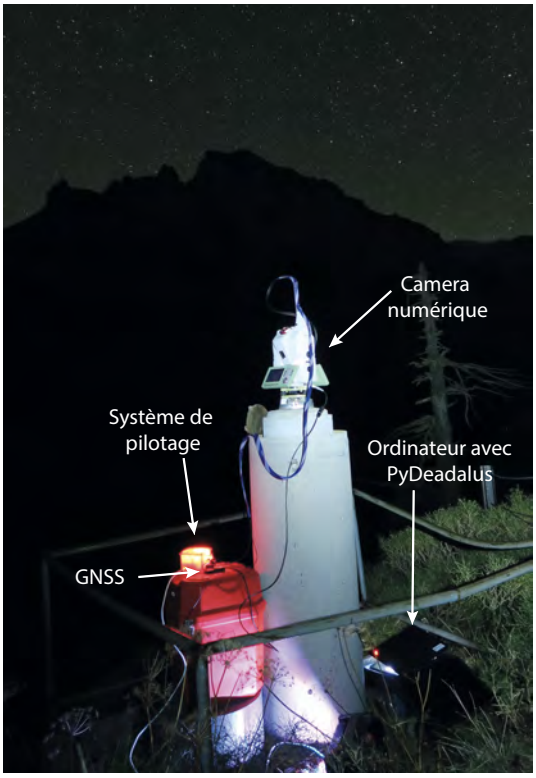



**Fig. 3.10** – Station de mesure astro-géodésique, avec système PyDeadalus

Les mesures de déviation de la verticale sont réalisées durant 7 nuits pour un total de 18 points mesurés. Afin d'obtenir la meilleure précision possible en vue du post-traitement des observations, les mesures sont réalisées au plus proche des piliers géodésiques ou dessus, comme le montre l'image 3.10. La répartition des déterminations est visible sur la carte 3.11.

**Estimated parameters**

| Parameter | Sexagesimal value [-] | Decimal value [°] | Theo. Std ["] | Emp. Std ["] |
|---|---|---|---|---|
| Astro. longitude | 7°26′7.6500″ | 7.43545833 | 0.049 | 0.266 |
| Eta | -- | +6.9642 | 0.049 | 0.266 |
| Astro. latitude | 46°20′36.8019″ | 46.34355609 | 0.034 | 0.184 |
| Xi | -- | -5.7635 | 0.034 | 0.184 |

**Stationings quality**

| Station | Obs [-] | Astro long [°] | Astro lat [°] | Eta ["] | Std ["] | $v_\eta$ ["] | Xi ["] | Std ["] | $v_\xi$ ["] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| st1 | 384/438 (88%) | 7.43529325 | 46.34346803 | 6.554 | 0.077 | 0.594 | -6.081 | 0.056 | 0.317 |
| st2 | 366/406 (90%) | 7.43565539 | 46.34363020 | 7.454 | 0.093 | -0.709 | -5.497 | 0.061 | -0.267 |
| st3 | 383/414 (93%) | 7.43549462 | 46.34358465 | 7.054 | 0.089 | -0.131 | -5.661 | 0.061 | -0.103 |

**Tab. 3.1** – Protocole de contrôle qualité sur le terrain de la détermination d'une déviation de la verticale

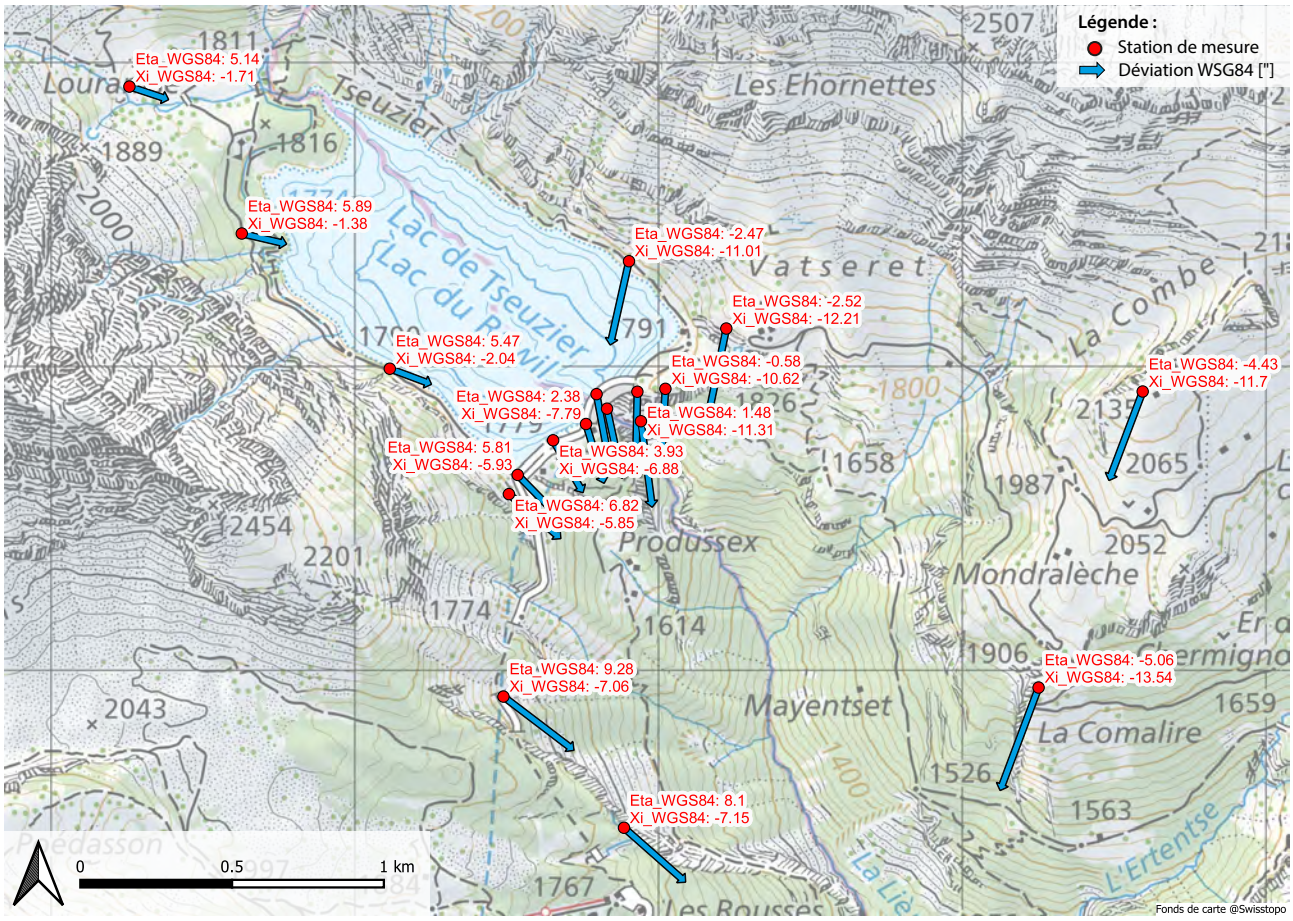



**Fig. 3.11** – Répartition des stations de mesures de déviation de la verticale, avec les valeurs en WGS84.

### 3.2.5 Paramètres atmosphériques

#### 3.2.5.1 Le but

Les paramètres météo influencent directement la mesure électronique des distances. De manière traditionnelle, les composantes atmosphériques sont introduites à la station. Pour les réseaux de surveillance présentant des dénivelés importants, un calcul de la température et pression moyenne est calculé à l'aide des formules de Barrel&Sears (Barrell & Sears, 1939). Cette approximation, permet de tenir compte partiellement des différences de pressions et de températures entre la station et le point mesuré.

La météo, pourrait être bien différente, entre la station et le point mesuré. Par exemple, pour un versant à l'ombre et l'autre au soleil, s'il y a de très grandes distances et dénivelés ; la pression peut ne pas être aussi homogène que supposée.

L'objectif est de modéliser au mieux, l'évolution de la température, de la pression, de l'humidité relative durant la période de mesures. Pour ce faire, 9 capteurs sont placés sur le site afin d'enregistrer l'évolution des composantes atmosphériques. A l'aide des données acquises, un modèle météo sera calculé, afin de pouvoir interpoler en tout point et tout temps $t$ : la température, la pression, l'hydrométrie ; et corriger rigoureusement les distances.

#### 3.2.5.2 Les capteurs

**Matériel**

Les capteurs doivent être assez précis, autonomes afin de pouvoir enregistrer, toutes les 2 min les différentes valeurs. Les capteurs suivants sont utilisés :

| Modèle | Photo | Nombre | $\sigma$ T [°C] | $\sigma$ P [mbar] | $\sigma$ HR [%] |
|---|---|---|---|---|---|
| EASYLog 80 |  | 7 | 0.3 | 1 | 2 |
| EL-SIE-6+ |  | 1 | 0.2 | 1 | 1.5 |
| Extec Sd700 |  | 1 | 0.8 | 2 | 4 |

**Tab. 3.2** – Liste des capteurs météo

Le capteur Extec Sd700 est moins précis, mais reste dans une précision parfaitement acceptable par rapport à la modélisation recherchée.

#### 3.2.5.3 Acquisition terrain

En parallèle à la campagne de mesure, les 9 capteurs sont disposés autour de l'ouvrage et dans la vallée, afin d'enregistrer l'évolution des paramètres atmosphériques durant toute la semaine, avec un intervalle de 2 min.

Les capteurs sont placés selon la stratégie suivante :

- aux stations de mesures des nivellements trigonométriques réciproques simultanés automatiques,
- à la station de monitoring,
- au fond de la vallée afin de valider la variation de la température en raison de la topographie,
- sur les visées éloignées, pour bien encadrer le site et pouvoir créer un modèle global cohérent.

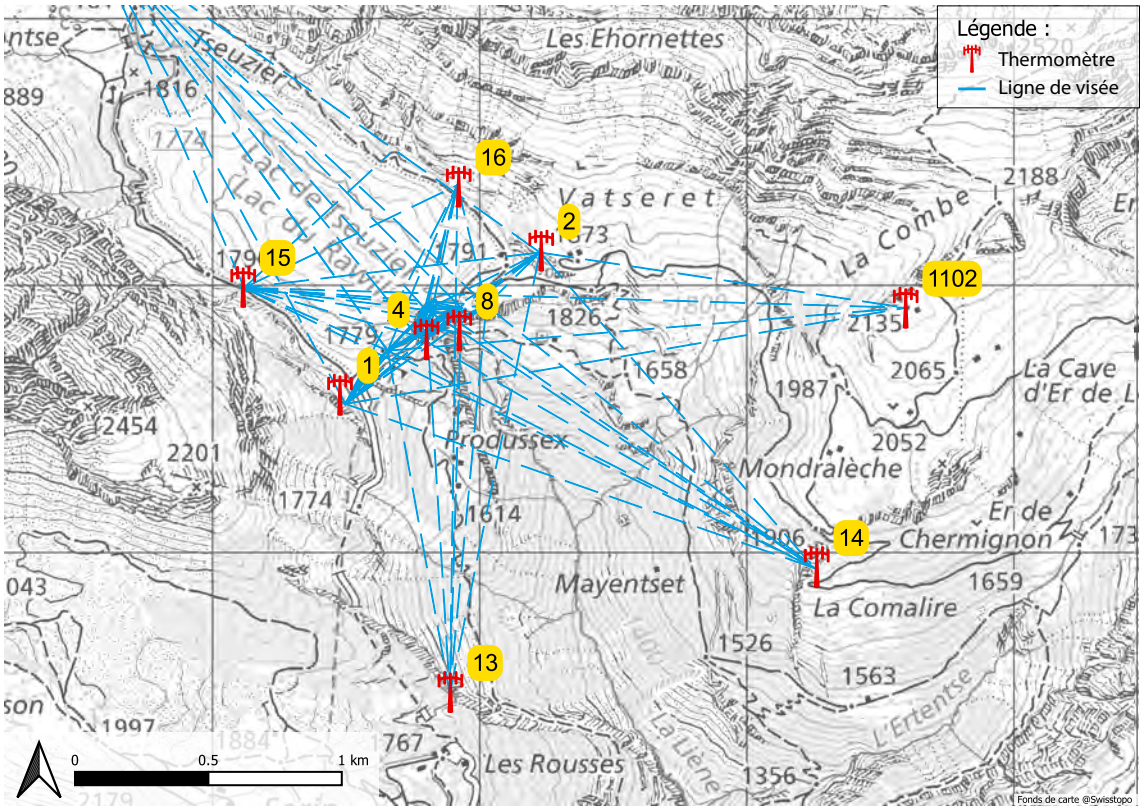
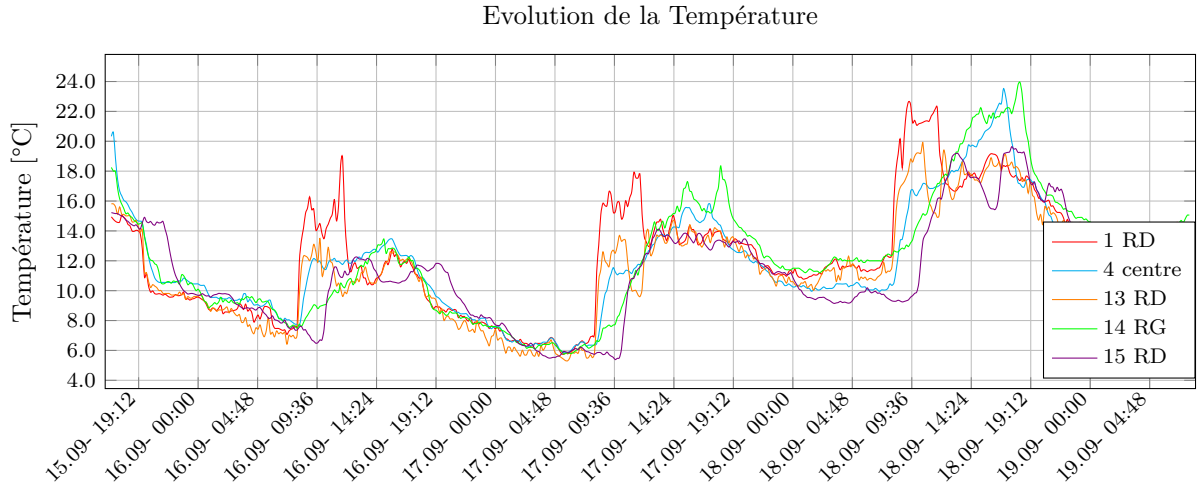



**Fig. 3.12** – Répartition des capteurs météos.

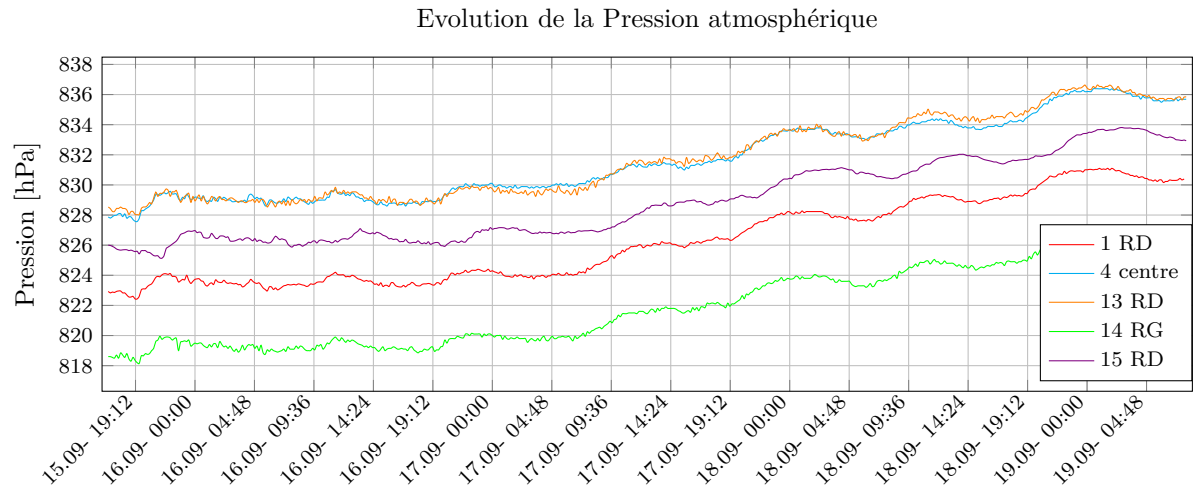
### Visualisation des variations atmosphériques durant la semaine

Pour pouvoir observer et analyser l'évolution de la météo, les capteurs sont synchronisés entre eux à un intervalle de 2 min. Trois emplacements significatifs sont choisis, afin de mettre en évidence l'importance d'une potentielle correction à l'aide d'un modèle météo et non pas uniquement à la station de mesure ou à l'aide d'extrapolation. Les piliers choisis sont :

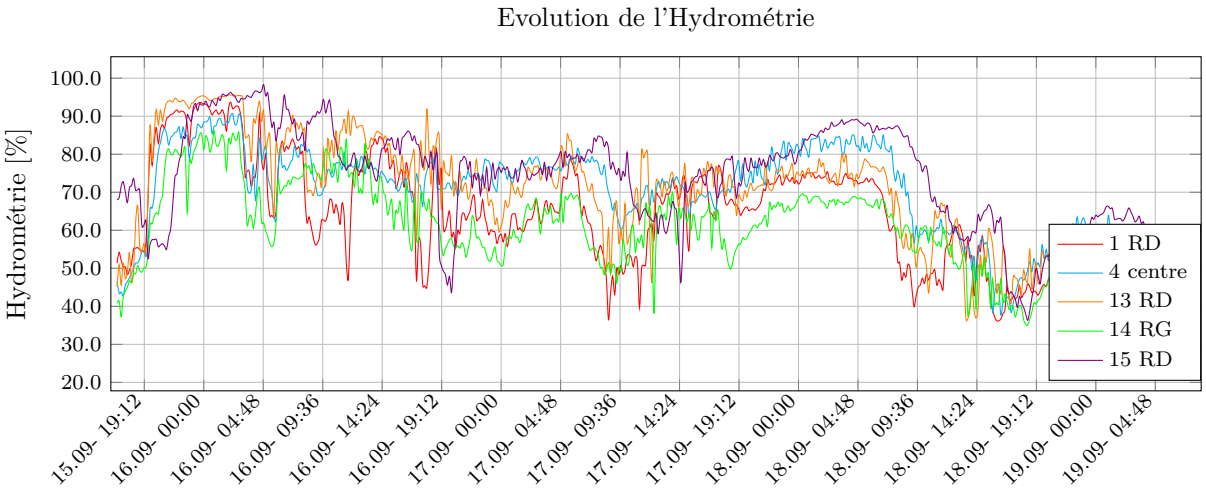
- 1 : situé en RD sous une falaise prend le soleil tôt le matin et vite à l'ombre, c'est également l'emplacement du nivellement trigonométrique, altitude 1 825.00 m
- 4 : proche du barrage au niveau où sont principalement concentrées les observations géodésique, altitude 1 779.40 m
- 13 : à l'aval du barrage en rive droite dans une falaise, altitude 1 770.50 m
- 14 : à l'aval du barrage en rive gauche au sommet d'une falaise, altitude 1 872.90 m
- 15 : situé à l'amont de l'ouvrage en rive droite proche du lac, altitude 1 786.00 m




**Graph. 3.1** – Température durant la semaine aux piliers 1, 4, 13, 14, 15




**Graph. 3.2** – Pression atmosphérique durant la semaine aux piliers 1, 4, 13, 14, 15




**Graph. 3.3** – Hydrométrie durant la semaine aux piliers 1, 4, 13, 14, 15

Comme on le constate dans les représentations ci-dessus, graphique 3.1- 3.2 et 3.3, l'évolution des paramètres atmosphériques n'est pas forcément linéaire dans le temps elle varie entre les rives soleil, pas soleil, matin ou après-midi. La composante la plus influencée par ce phénomène est la température graphique 3.1.

La mise en place d'un modèle d'interpolation des composantes atmosphériques est indispensable ; afin de corriger les observations en tenant compte des variations dans le temps et de la topographie locale.

## 3.2.6 Monitoring

### 3.2.6.1 But

La mise en place d'un monitoring de l'ouvrage au niveau du couronnement, permettra de quantifier les amplitudes thermiques durant la semaine de mesure. Afin de d'acquérir des données brutes, les observations du monitoring sont acquises sans corrections atmosphériques, et aucune corrections appliquées.

Le monitoring est mis en place proche du pilier de mesure 4, il présente l'avantage d'être à proximité du couronnement et éloigné des chemins et passages de personnes non impliquées dans le travail, voir situation figure 3.13. Le pilotage de l'instrument est assuré à l'aide d'un boitié de communication GSM 5G et une plate-forme web fourni par *pareto-solutions.com* et le module *skillalert* de *Pareto Solutions Sàrl* (Allorant, 2025).

### 3.2.6.2 Caractéristique, configuration, acquisition

La configuration du monitoring est la suivante :

- **Mesures** : station totale TS60 0.5" de Leica Geosystems
- **Points de référence** : 5 points fixes
- **Points de surveillance** : 8 points sur le couronnement
- **Intervalle de mesure** : 5 min → total de 1 180 cycles de mesures complet
- **Configuration des mesures** : première et deuxième position en mode ABCDDCBA
- **Post-traitement interne des mesures** :
  - contrôle qualité, première, deuxième position
  - moyenne, première, deuxième position
  - pas de prise en compte des paramètres atmosphériques
  - pas de réduction dans le cadre de référence MN95
  - pas de prise en compte du coefficient de réfraction

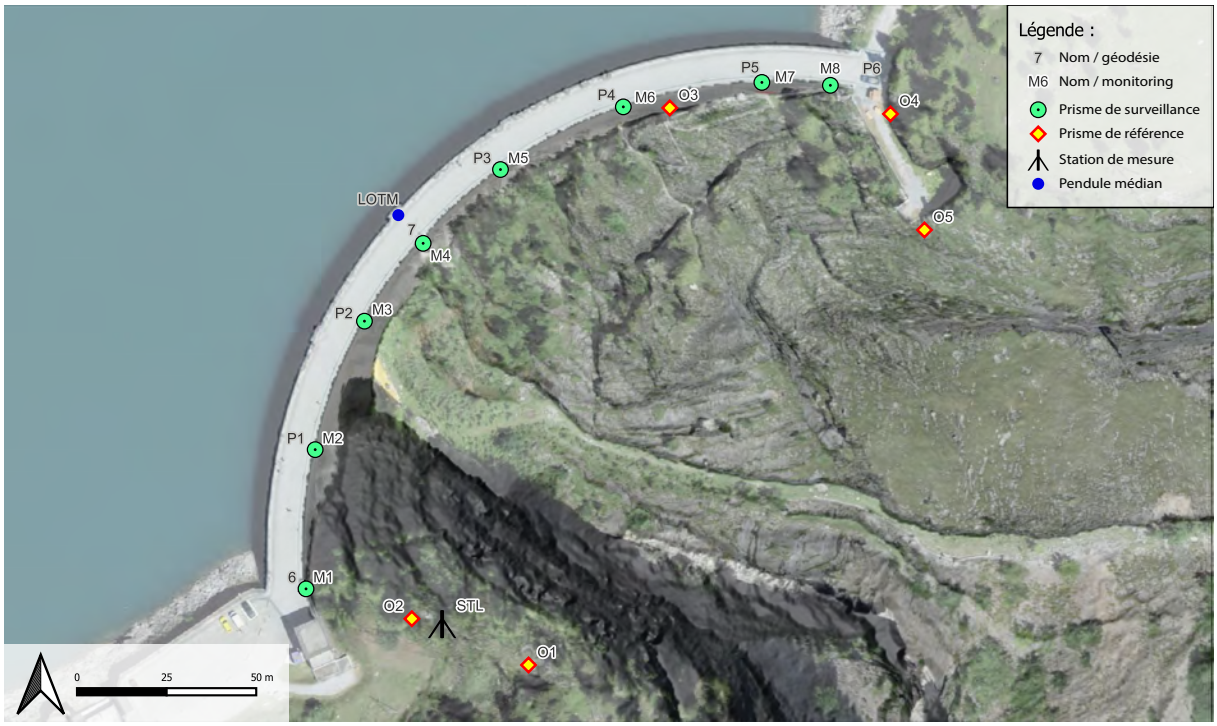



**Fig. 3.13** – Situation des points auscultés par le monitoring.

Les points de surveillance sont matérialisés par des miniprismes, coin de cube, afin d'être le plus discret possible, et assurer un pointé automatique avec le système de centrage automatique de l'appareil. Au total 8 prismes sont mis en place sur le couronnement au droit de points également mesurés par la géodésie, les points géodésique sont annotés en gris dans la situation 3.13. Il sera possible de comparer les déplacements du monitoring avec ceux du pendule automatique médian noté LOTM.

Les différents filtres disponibles dans la configuration des mesures permettent de s'assurer que les observations acquises sont de bonnes qualité et permettront d'analyser l'évolution de l'ouvrage durant la période de mesures, figure 3.14, 3.15, 3.16. La référence des déplacements est la moyenne de chaque point durant la première heure de mesures.

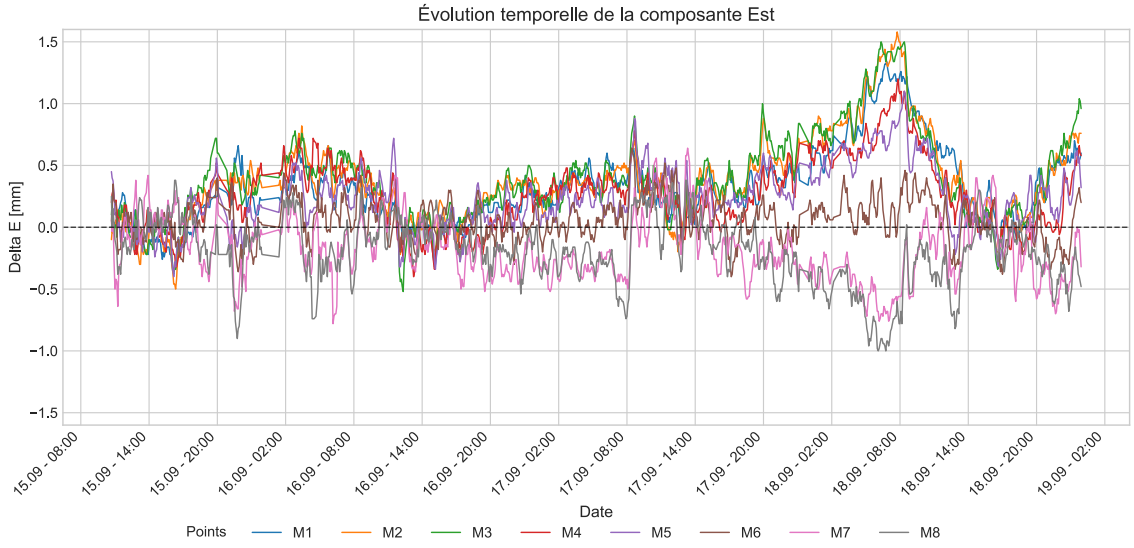



**Fig. 3.14** – Déplacement durant la semaine sur la composante Est

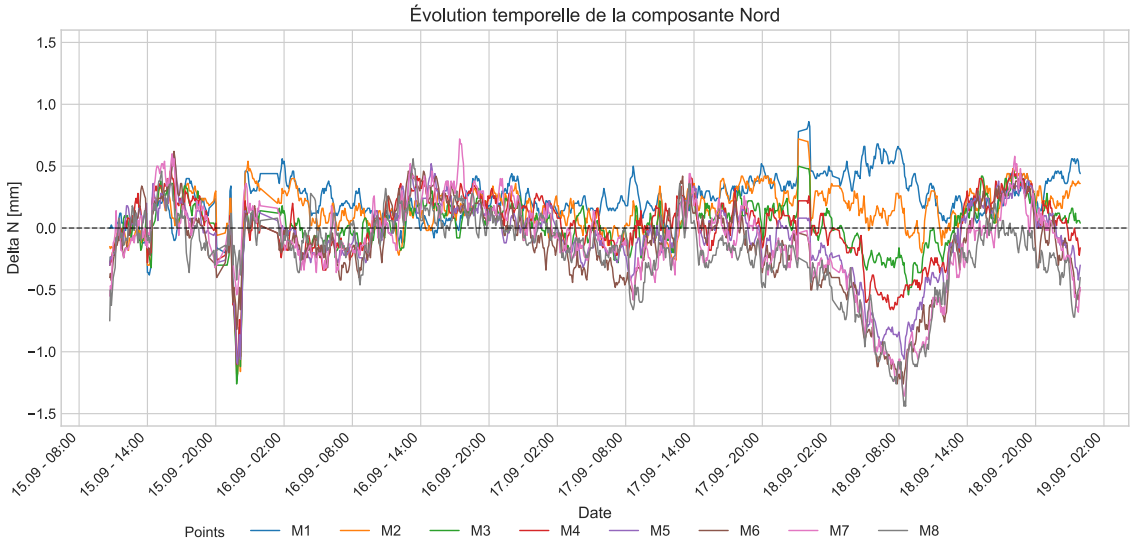



**Fig. 3.15** – Déplacement durant la semaine sur la composante Nord

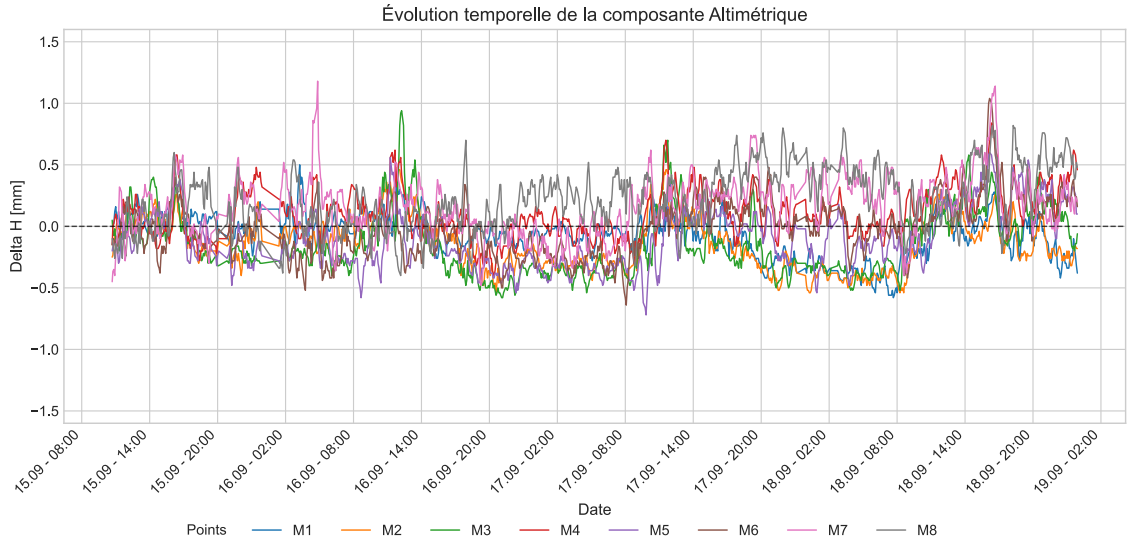



**Fig. 3.16** – Déplacement durant la semaine sur la composante Altimétrique

Des graphiques précédents, il est possible de faire des premiers commentaires, la détermination de la station libre de même que la stabilité des points de référence sont bonnes. Aucune dérive dans le temps des points de surveillance est constatable. Deuxième élément, des variations cycliques journalières apparaissent ce qui montrent les variations des conditions atmosphériques et une partie de déplacements structurels.

Les données du monitoring sont enregistrés dans une base de donnée, exploitable à distance à l'aide d'une API. Un extrait de la structure des données est présenté dans le listing à l'annexe D page A-15.

#### 3.2.6.3 Les capteurs temps réels de l'ouvrage

Dans le cadre de la surveillance des barrages, les exploitants mettent en place à la construction de l'ouvrage des capteurs indépendant de la géodésie, afin de suivre périodiquement le comportement de l'ouvrage. L'instrumentation mise en place est le plus couramment composée de pendules (normaux ou inversés), capteurs de pression, températures, ..., la répartition des capteurs utilités pour ce travail est visible à la figure 3.17.

Le barrage de Zeuzier est équipé de nombreux capteurs, liste non exhaustive, dont :

- **3 pendules**, dont un automatique, le pendule médian
- **thermomètres**, tous automatiques mesurent de la température du béton, côté eau et air

- **niveau du lac**, acquis avec une balance Rittmeyer, mesures automatiques

Pour le pendule automatique les mesures sont réalisées à deux points une fois à la galerie IV (courbe bleue) et la deuxième en galerie X (courbe rouge) dans le rocher, voir graphique 3.4 et plan 3.17 . Le pendule n'étant pas un pendule inverse, on peut faire l'hypothèse suivante, durant la période des mesures afin d'obtenir le déplacement du point d'ancrage au niveau du couronnement. L'appareil de mesure situé en galerie X sera considéré comme la référence, donc représentant le déplacement du couronnement, et le mouvement en galerie IV donné par rapport la galerie X. Cette supposition est valable uniquement pour le temps des mesures.

Les représentations ci-dessous montrent l'évolution des mesures automatiques durant la semaine :

- Graphique 3.4 : valeurs du pendule, déplacement radial (amont-aval) de l'ouvrage, avec superposition de la température extérieure au pilier 4, et le thermomètre électronique au milieu de la voûte T6.
- Graphique 3.5 : similaire au graphique précédent mais pour le déplacement tangentiel (rive-rive)
- Graphique 3.6 : valeurs du pendule, déplacement radial, avec la variation de la hauteur d'eau pour la semaine.

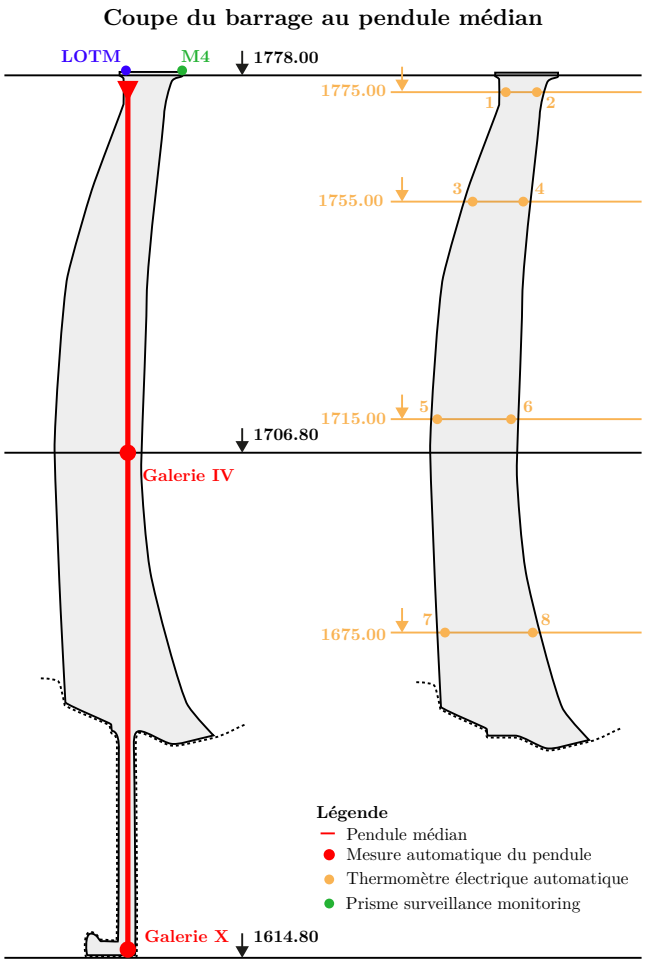
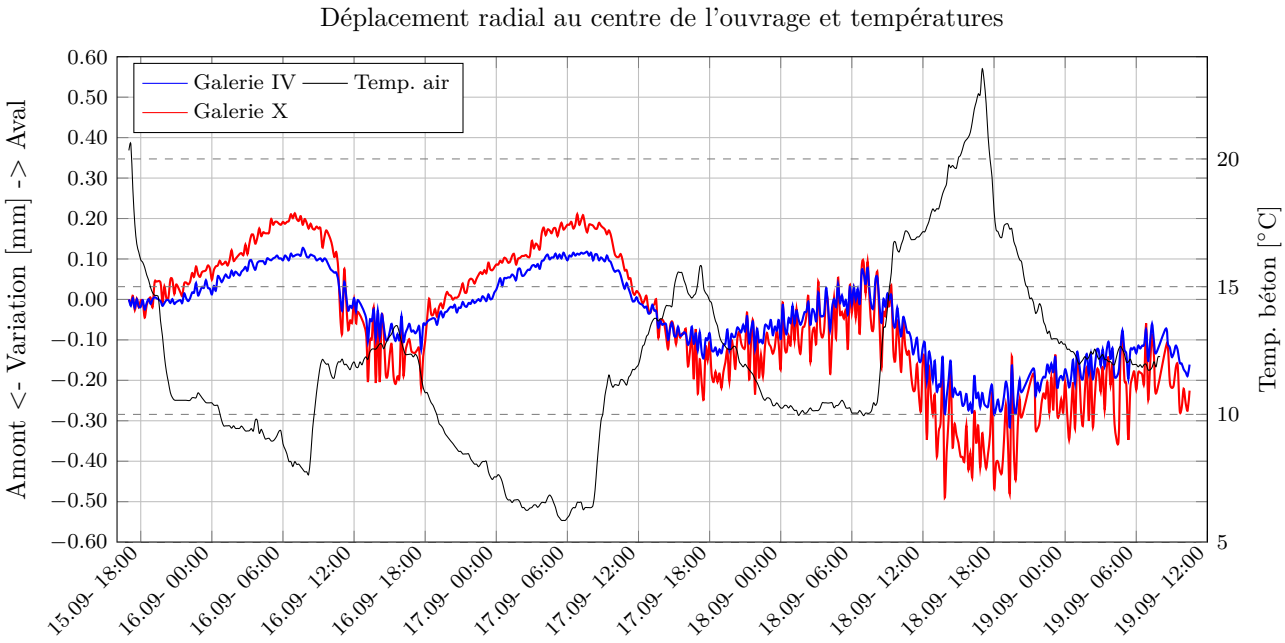
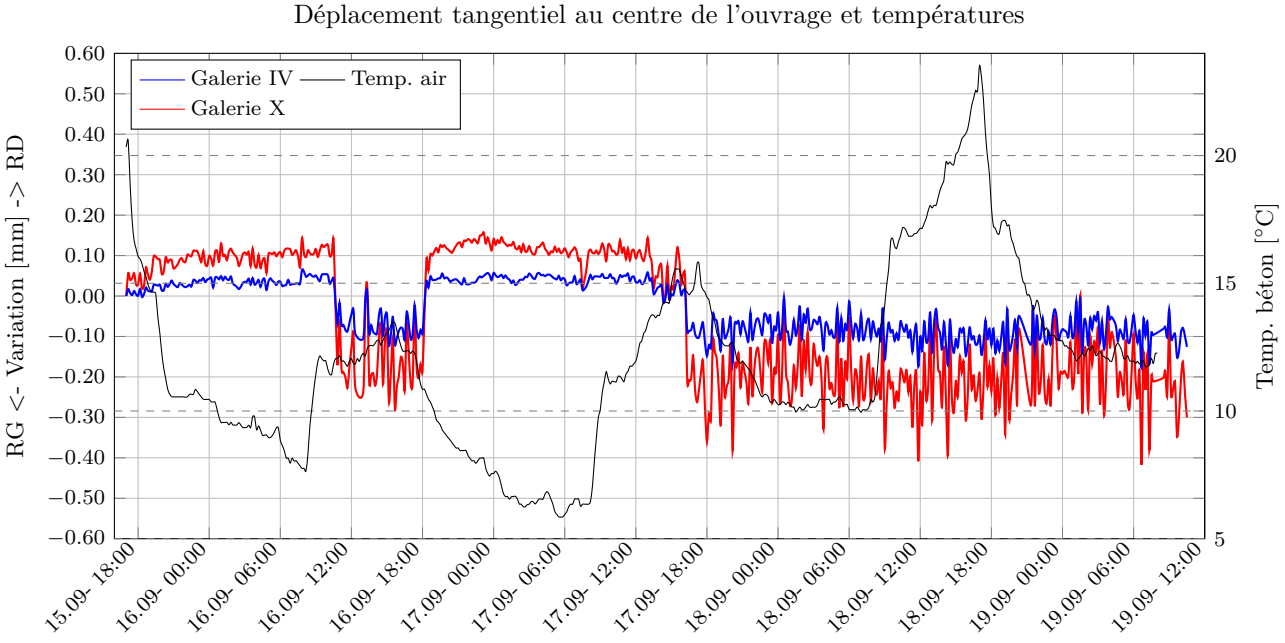


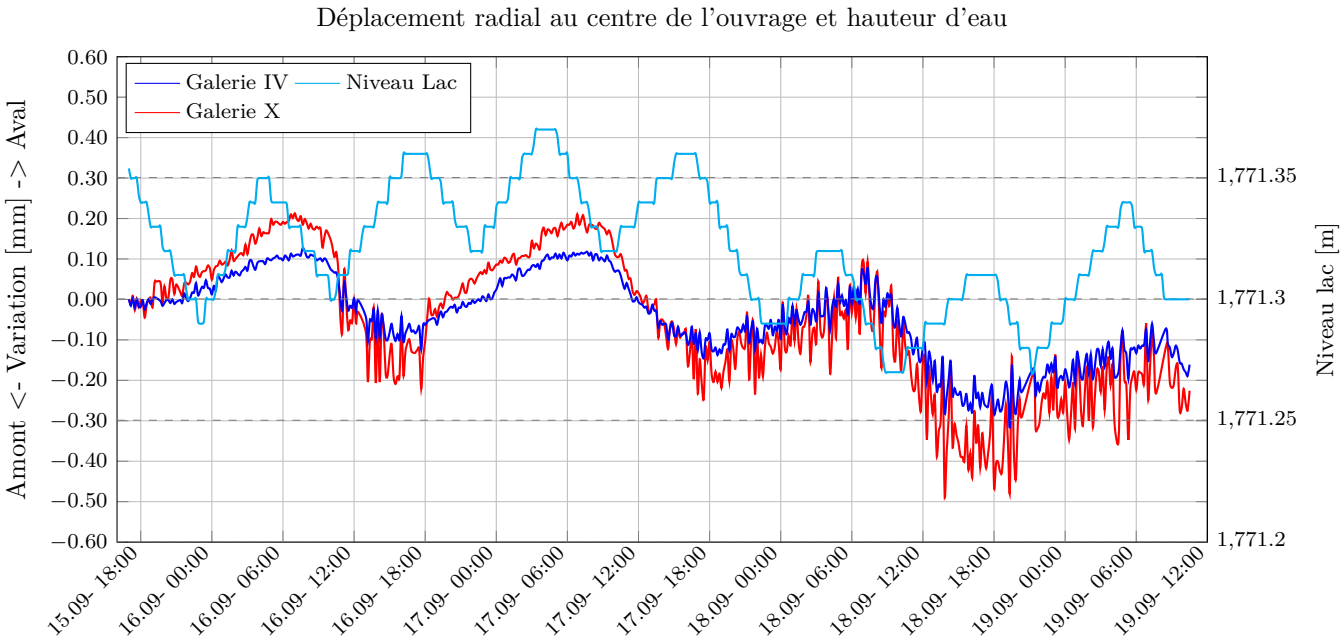

**Fig. 3.17** – Situation des capteurs automatiques, exploités afin de suivre l'évolution de l'ouvrage durant les acquisitions. Inspiré de Oiken (2025)




**Graph. 3.4** – Évolution du couronnement par rapport à la galerie X amont-aval, variation positive vers l'aval. Référence des déplacements Galerie X au 15.09 à 17 :00 Source : Oiken (2026)




**Graph. 3.5** – Évolution du couronnement par rapport à la galerie X rive-rive, variation positive vers la rive droite. Référence des déplacements Galerie X au 15.09 à 17 :00. Source : Oiken (2026)

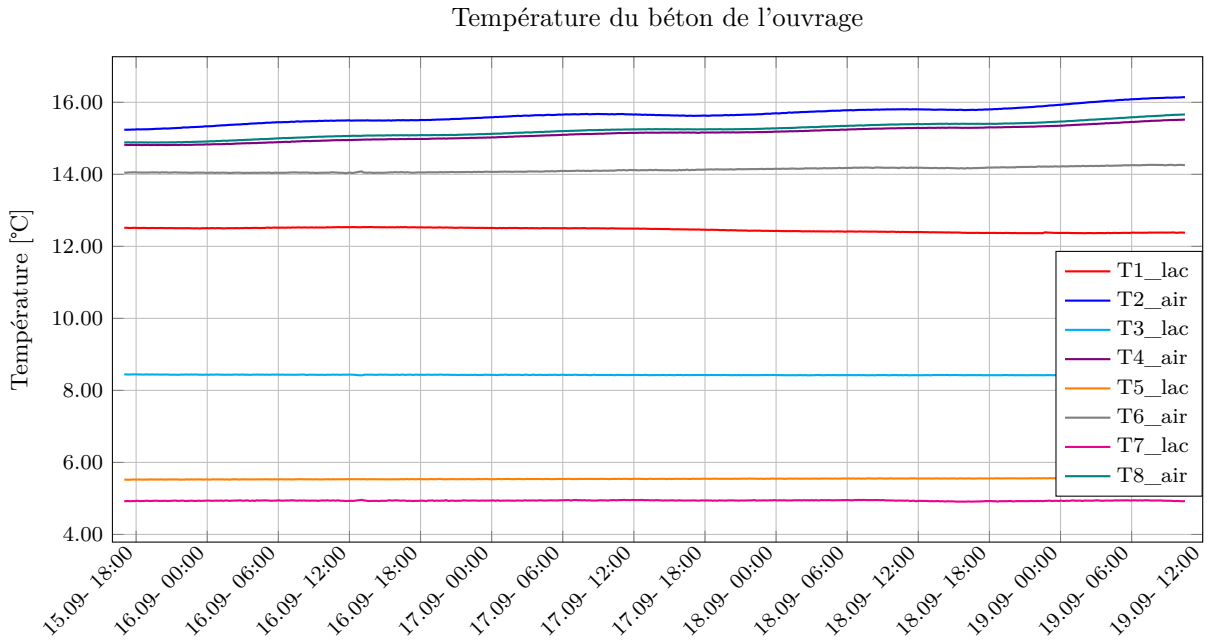



**Graph. 3.6** – Évolution du niveau d'eau et des pendules durant les mesures. Référence des déplacements Galerie X au 15.09 à 17 :00. Source (**OIKEN_Official**)

### Commentaires sur les déplacements des pendules

Les graphiques précédents 3.4 et 3.5 montrent que les variations journalières sont faibles et au maximum de −0.5 mm en galerie X pour le jeudi 18 septembre entre 14 h et 19 h. L'ouvrage suit bien l'évolution de la température un refroidissement ayant pour effet une rétraction du béton, la voûte se ressert et le couronnement se déplace vers l'aval, au contraire quand il fait chaud la voûte se réchauffe le béton se dilate et le couronnement est repoussé vers l'amont. Le bruit de mesure observé à partir du 17.09 vers 18 h ne s'explique pas.

On constate que les déplacements rive-rive sont presque non significatifs avec une amplitude maximale de 0.2 mm par rapport au début des mesures. Avec le graphique couplant la hauteur du lac, et le pendule, il est possible de constater que la hauteur du lac n'a pas varié durant les mesures, variation maximale de 10 cm, des cycles d'environ 5 cm sont visibles mais les mouvements du pendule ne corrèlent pas avec les niveaux du lac. Il est donc possible d'en déduire dans une première constatation que la température extérieure est la principale responsable des mouvements amonts-avals de l'ouvrage durant la semaine de mesures.




**Graph. 3.7** – Evolution de la température du béton durant la semaine. Source (**OIKEN_Official**)

#### Commentaires sur la température des bétons

L'ouvrage est équipé de plusieurs capteurs de températures automatique, section de droite du graphique 3.17, ils permettent d'enregistrer la température du béton aussi bien coté lac que air. Le graphique 3.7 montre l'évolution de la température durant la semaine. Les capteurs cotés lac montrent aucune variation significative durant la semaine. Cependant il est possible d'observer une légère augmentation de la température pour les capteurs coté air ce qui confirme l'évolution du pendule vers l'amont pour les 18 et 19 septembre.

## 3.3 Bilan des acquisitions

L'ensemble des mesures géodésiques réalisées, nivellement géométrique, observations GNSS statiques, station totale ainsi que les observations complémentaires spécifiques, constituent un jeu d'observations complet, précis pour lui même et cohérent.

La phase d'acquisition est maintenant achevée, les étapes suivantes portent sur l'élaboration de modèles physiques et géométriques destinés à corriger les observations brutes, notamment la modélisation atmosphérique, la prise en compte du champ de pesanteur, des déviations de la verticale.

Le but recherché dans la création de ces différents modèles est de corriger les observations, afin de les rendre homogènes et directement comparables, condition indispensable à leur intégration dans une compensation globale. Des analyses complémentaires permettront d'évaluer la qualité des acquisitions, quantifier l'apport des traitements spécifiques mis en œuvre et, in fine, à valider la pertinence de la méthodologie proposée pour la surveillance géodésique.

## 3.4 Création d'un champs atmosphérique

Au total ce sont 9 capteurs qui ont enregistré les paramètres atmosphériques durant toute la semaine de mesure. Les points sont spatialement répartis sur le site ce qui doit permettre la mise en place d'un modèle météo quadridimensionnel. Pour ce faire plusieurs étapes sont nécessaires à la réalisation de ce champs atmosphérique, validation de la qualité des capteurs entre eux, identification des paramètres pouvant influencer le modèle, génération d'un modèle sol et pour finir d'un modèle air.

Cette partie est l'élément central de ce travail, l'atmosphère est un des paramètres les plus impactant dans le domaine de la mesure optique et de distance.

### 3.4.1 Calibration des capteurs

Les trois capteurs "*Greisinger Dataloger EASYLog 80*" fournis par Swisstopo (S1, S2, S7b) ont été étalonnés à l'aide d'un capteur barométrique, température, humidité calibré par l' Institut fédéral de métrologie, Suisse (METAS, 2025). Il est donc possible de considérer les capteurs de Swisstopo comme références.

Afin de caler les différents capteurs entre eux, une acquisition simultanée des 9 capteurs pendant environ 6 heures avec un intervalle d'enregistrement à 2 min dans une pièce fermée a été réalisée afin de déterminer les différences entre eux et calculer les offsets avec les six autres capteurs dans le but de les rendre homogènes.

Les détails de la procédure de calibration et les résultats sont disponibles à l'annexe E page A-17. Il est à noter, que l'homogénéité de base est très bonne avant recalage ; les capteurs enregistrent un delta moyen sur la température inférieur à 0.5 ℃ et pour la pression atmosphérique de 1.5 mbar au maximum.

Avec ces capteurs maintenant calibrés et synchronisés temporellement il est possible d'envisager la conception d'un modèle météo.

### 3.4.2 Modèle météo

Le but d'un modèle météo est de pouvoir prédire ou estimer quelles sont les caractéristiques de l'atmosphère, en tout point de l'espace et dans le temps. Dans le cas de cette étude, le but sera d'estimer les trois paramètres mesurés : températures, pressions et hydrométries, en tout point de l'espace et durant le temps des mesures.

Les prochains développements sont dédiés à la recherche et à l'établissement d'un modèle météo cohérent répondant à la précision nécessaire afin de corriger les observations. Les prochains chapitres vont être traités de la façon suivante :

1. Pression atmosphérique : cette composante est peu sensible aux variations journalières et en règle générale les anomalies locales sont rares, sa modélisation devrait pouvoir se baser sur des modèles standards.
2. Hydrométrie : ce paramètre atmosphérique n'est pas significatif pour la correction des observations, une interpolation standard est tout à fait adaptée.
3. Température : c'est le point clé et le plus sensible, elle influence fortement les calculs de corrections. Une attention toute particulière doit être portée à cette mesure. La modélisation de la température est complexe, de nombreux paramètres rentrent en compte, aussi bien locaux que globaux.

### 3.4.3 Transfert de la pression atmosphérique

#### Test de la précision du transfert

Dans le cas précis d'une mesure réalisée in situ, prenons la pression du mercredi 17 septembre à minuit, elle permet de considérer que l'influence d'un gradient de température entre les stations est négligeable.

En appliquant la formule, 2.35, on trouve les valeurs suivantes :

| Points | Altitude [m] | Dh [m] | $T$[K] | $P$ mesurée [hPa] | $P$ calculée [hPa] | $dP$ [hPa] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 (Ref) | 1770.35 | | 280.70 | 830.09 | | |
| 13 | 1770.55 | 0.20 | 280.55 | 829.74 | 830.07 | -0.33 |
| 14 | 1872.88 | 102.53 | 280.75 | 820.00 | 819.79 | 0.21 |

**Tab. 3.3** – Validation de la pression atmosphérique par transfert standard le 17.09.2025 à 00 :00

Les résultats du transfert standard ci-dessus mettent en évidence que les différences entre la pression mesurée et calculée sont faibles ; au maximum de $-0.33$ hPa soit un facteur en ppm de -0.08, ce qui représente une correction $-0.08$ mm à 1 km non significative, en relation avec la précision du distancemètre qui est 0.6+1 ppm.

Un nouveau test avec un gradient de température durant la journée à 16 :00.

| Points | Altitude [m] | Dh [m] | Temp.[K] | Press. mesurée [hPa] | Press. calculée [hPa] | Delta [hPa] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 (Ref) | 1770.35 | | 294.19 | 833.89 | | |
| 13 | 1770.55 | 0.20 | 292.05 | 834.44 | 833.87 | 0.57 |
| 14 | 1872.88 | 102.53 | 294.70 | 824.65 | 824.01 | 0.64 |

**Tab. 3.4** – Validation de la pression atmosphérique par transfert standard le 18.09.2025 à 16 :00

Durant une journée avec une différence de température entre les deux rives. Les deltas sont également non significatifs, avec une différence maximum de 0.64 hPa.

#### Modèle d'interpolation pour la pression

Au vu des constatations ci-dessus,il est choisi d'appliquer le modèle de transfert de pression standard avec l'équation 2.35 page 37 et la moyenne par IDW formule 2.36 page 38. Pour rappel, il faut une variation de 4hPa avec d'obtenir 1 ppm de correction.

### 3.4.4 Transfert de l'hydrométrie

La composante hydrométrique apporte une faible correction, aux observations topométriques et son influence sur la réfraction est négligeable ; sauf si la variation est supérieure à 100 %,ce qui n'est pas réaliste, la formule de transfert par moyenne IDW est utilisé dans la suite du travail 2.38.

### 3.4.5 Estimation du gradient de température

Cette section, s'intéresse tout particulièrement à l'estimation d'un modèle d'interpolation de la température sur le site de Zeuzier.

#### 3.4.5.1 Transfert standard de la température

Une première approche consiste à étudier l'évolution de la température avec la formule de transfert standard de la température. La formulation standard tient compte d'un gradient adiabatique de l'évolution de la température en fonction de l'altitude et de la différence d'altitude entre le point cible et la station de mesure :

$$T_B = T_A + \Gamma \cdot (\mathrm{H}_B - \mathrm{H}_A) \quad [°\mathrm{C}] \tag{3.2}$$

avec :

| | |
|---|---|
| $T_B$ | : température interpolée au point B [°C] |
| $T_A$ | : température mesurée au point A [°C] |
| $\mathrm{H}_A$ et $\mathrm{H}_B$ | : altitude au point A et B [m] |
| $\Gamma$ | : gradient standard ici $-0.005\,9$ °C/m |

Cette formule est valable pour des conditions atmosphériques standards et dans une atmosphère stable, loin du sol et des effets locaux.

On retrouve dans le travail mené par "Judith Eckman & al, "*Air temperature estimation at very high resolution in mountainous areas*"((Eeckman et al., 2022)), que l'évolution de la température en fonction de l'altitude n'est pas linéaire selon la saison mais également en fonction de l'altitude. Les différents facteurs ont été proposés par Bouët en 1985 (Bouët, 1985), et sont disponibles dans le tableau ci-dessous 3.5 page 79.

| Tranche d'air | Janv | Fév | Mars | Avril | Mai | Juin | Juil | Août | Sept | Oct | Nov | Déc | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 500-1500 m | 0.24 | 0.33 | 0.50 | 0.61 | 0.63 | 0.63 | 0.63 | 0.61 | 0.49 | 0.39 | 0.33 | 0.26 | 0.46 |
| 1500-4000 m | 0.54 | 0.56 | 0.58 | 0.61 | 0.63 | 0.63 | 0.63 | 0.61 | 0.59 | 0.57 | 0.55 | 0.54 | 0.59 |

**Tab. 3.5** – Gradients verticaux moyens de l'évolution de la température en [°C/100m] proposés par Bouët à deux niveau d'altitude.

La problématique de l'estimation du gradient de température est le point central de la modélisation de la température au niveau du site de Zeuzier. La taille du site est petite et la vallée est orientée nord sud, les variations thermiques entre les rives et durant la journée sont importantes. Une des variantes de calcul serait d'interpoler les températures à l'aide d'un gradient standard comme ceux proposés par Bouet. Ces gradients sont généraux et ne tiennent pas compte d'une topographie locale. Afin de trouver le gradient le plus proche de la réalité du site ; et en adéquation avec l'évolution des paramètres météorologiques journaliers, une approche à l'aide d'une estimation par les moindres carrés est envisagée et testée ci-dessous.

#### 3.4.5.2 Premier test : transfert direct

Dans la partie concernant la modélisation de la pression, un transfert direct à l'aide de la formule standard a été testée. Afin de valider le modèle standard une évaluation similaire est réalisée ci-dessous à l'aide de la formule 3.2, d'un gradient adiabatique $-0.59\,°C/100m$ pour une altitude de référence $Z_0 = 1800.00\,[m]$.

Le transfert de température ci-dessous, tableau 3.6 montre que pour la nuit les précisions sont très bonnes, les différences sont non significatives sous les 0.5 °C.

| Points | Altitude [m] | Dh [m] | T[°C] | T calculée [°C] | $dT$ [°C] |
|---|---|---|---|---|---|
| 4(ref) | 1 770.35 | 27.19 | 7.55 | 7.39 | |
| 1 | 1 770.55 | -26.77 | 7.44 | 7.59 | -0.20 |
| 15 | 1 872.88 | 12.52 | 7.70 | 7.63 | -0.24 |

**Tab. 3.6** – Validation de la température par transfert standard le 17.09.2025 à 00 :00, vers une altitude de 1 800 m

| Points | Altitude [m] | Dh [m] | Temp.[°C] | T [°C] | $T$ [°C] |
|---|---|---|---|---|---|
| 4(ref) | 1 770.35 | 27.19 | 16.63 | 16.47 | |
| 1 | 1 770.55 | -26.77 | 22.47 | 22.62 | -6.15 |
| 15 | 1 872.88 | 12.52 | 9.55 | 9.48 | 6.98 |

**Tab. 3.7** – Validation de la température par transfert standard le 18.09.2025 à 09 :30, vers une altitude de 1 800 m

Contrairement, au calcul de nuit, pour la journée tableau 3.7 les différences de transfert sont non acceptables, un delta de 6 °C positif, négatif est enregistré entre les 3 stations. Une modélisation plus fine de la température durant la journée doit être mise en place, afin de tenir compte de la topographie locale.

#### 3.4.5.3 Première approche modèle simple

Le gradient évoluant dans le temps et en fonction de l'altitude, une première estimation par la méthode des moindres carrés est envisagée afin d'évaluer les modèles standards.

Le modèle par les moindres carrés permettra d'estimer une température, "$T_{\text{ref}}$", à une altitude donnée "$Z_0$" ainsi que le gradient thermique vertical "Γ" décrivant la variation de température avec l'altitude.

Le modèle s'écrit :

$$T_i = \hat{T}_{\text{ref}} - \hat{\Gamma} \cdot (Z_i - Z_0) \tag{3.3}$$

avec :

| | |
|---|---|
| $T_i$ | : température mesurée à la station $i$ |
| $z_i$ | : altitude de la station $i$ |
| $z_0$ | : altitude de référence (ici fixée à 1800 m) |
| $t_{\text{ref}}$ | : température au niveau de référence (inconnue) |
| $grad$ | : gradient vertical de température (inconnu), un par station |

**Forme matricielle**

Pour $n$ stations, le modèle (3.3) se réécrit sous forme matricielle. Dans le modèle ci-dessous on considère que les observations de température sont toutes de la même précision, la matrice des poids n'est donc pas prise en compte. La formule ci-dessous, donne le modèle pour une station :

$$\underbrace{\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_i \end{pmatrix}}_{\mathbf{l}} + \underbrace{\begin{pmatrix} \hat{v_1} \\ \hat{v_2} \\ \vdots \\ \hat{v_i} \end{pmatrix}}_{\hat{\mathbf{v}}} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & -(z_1 - z_0) \\ 1 & -(z_2 - z_0) \\ \vdots & \vdots \\ 1 & -(z_i - z_0) \end{pmatrix}}_{\mathbf{A}} \underbrace{\begin{pmatrix} \hat{T}_{\text{ref}} \\ \hat{\Gamma} \end{pmatrix}}_{\hat{\mathbf{x}}} \tag{3.4}$$

Soit :

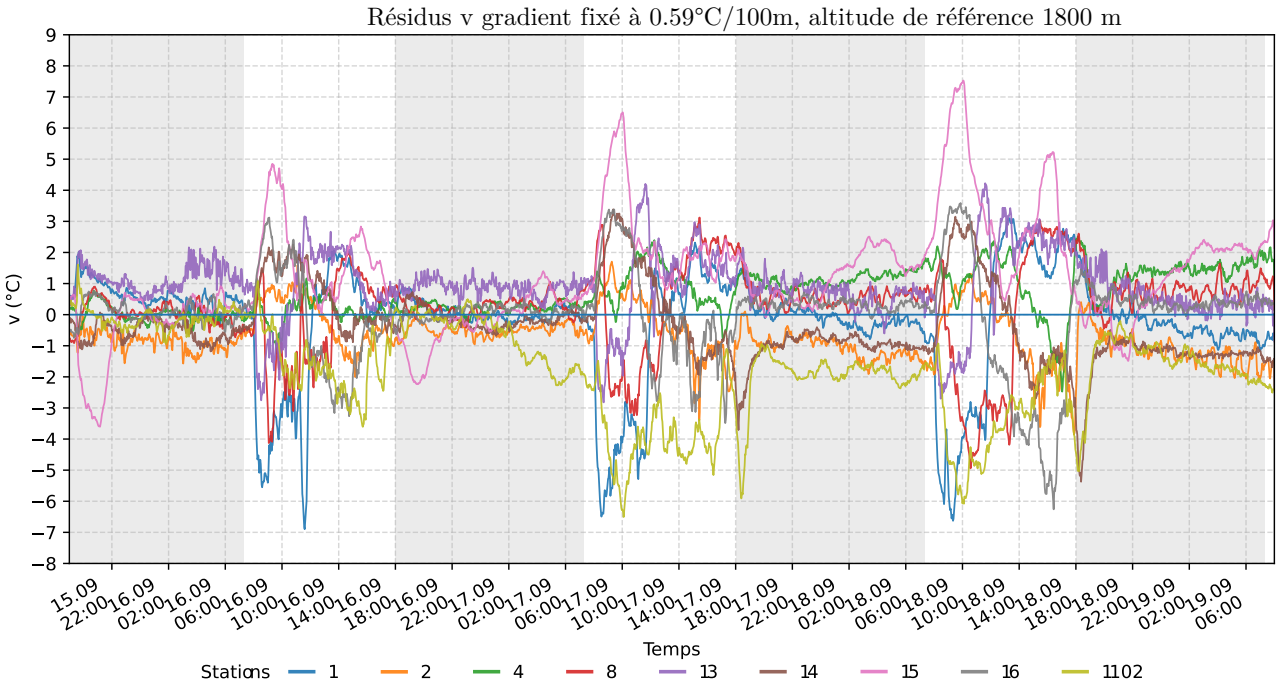
$$\mathbf{l} + \hat{v} = \mathbf{A}\,\hat{\mathbf{x}} \tag{3.5}$$

#### 3.4.5.4 Premières estimations

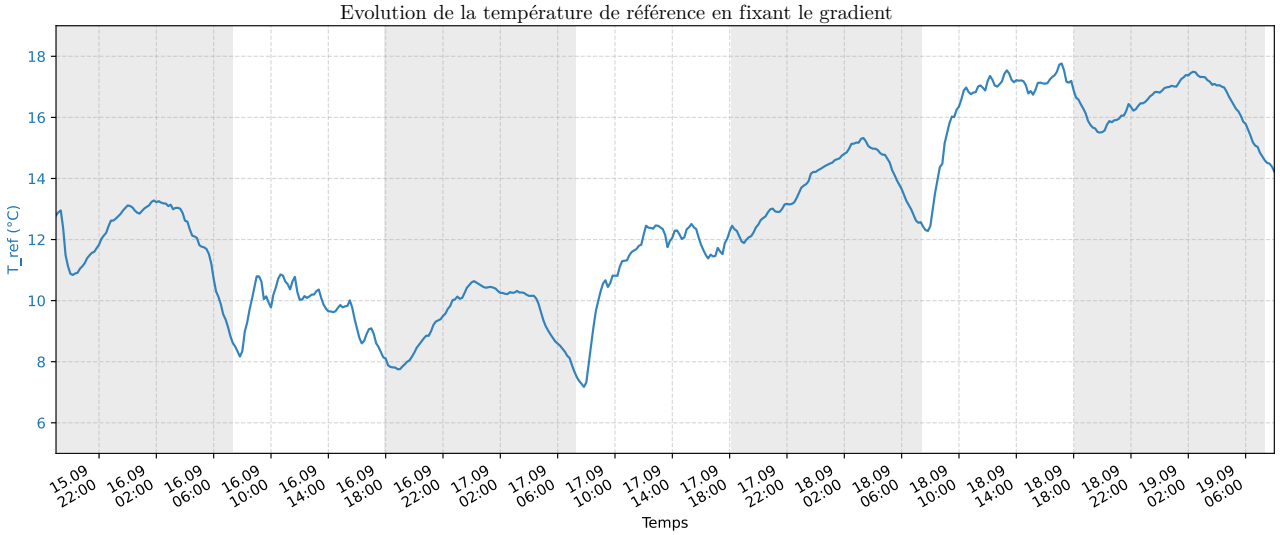
Un premier calcul est réalisé en fixant le gradient vertical à 0.59 °C/100m, issu du tableau 3.5 de Bouët, pour une altitude cible à 1 800 m. L'estimation est réalisée sur toutes les époques avec les 9 stations, sans filtrage ou moyenne glissante, par équation la seule inconnue est l'altitude de référence.

Comme le montre le graphique ci-dessous, 3.8, les résidus ont des variations importantes avec une amplitude totale de 15 °C. On constate également que durant les nuits, période en gris, les résidus sont faibles et compris entre ±2 °C. Tout le défi de la modélisation de la température sera de trouver des paramètres permettant de réduire les résidus durant la journée.

L'évolution de la température de référence, graphique 3.9, montre que l'atmosphère n'est pas stable dans le temps. Des phénomènes cycliques sont visibles dans entre les périodes nocturnes et diurnes. On constate également, l'augmentation globale de la température, donc le modèle suit bien les tendances observées sur le terrain voir graphique 3.1.




**Graph. 3.8** – Visualisation de l'évolution des résidus dans le temps avec un gradient fixé à 0.59°C/100m et une altitude de référence à 1 800 m

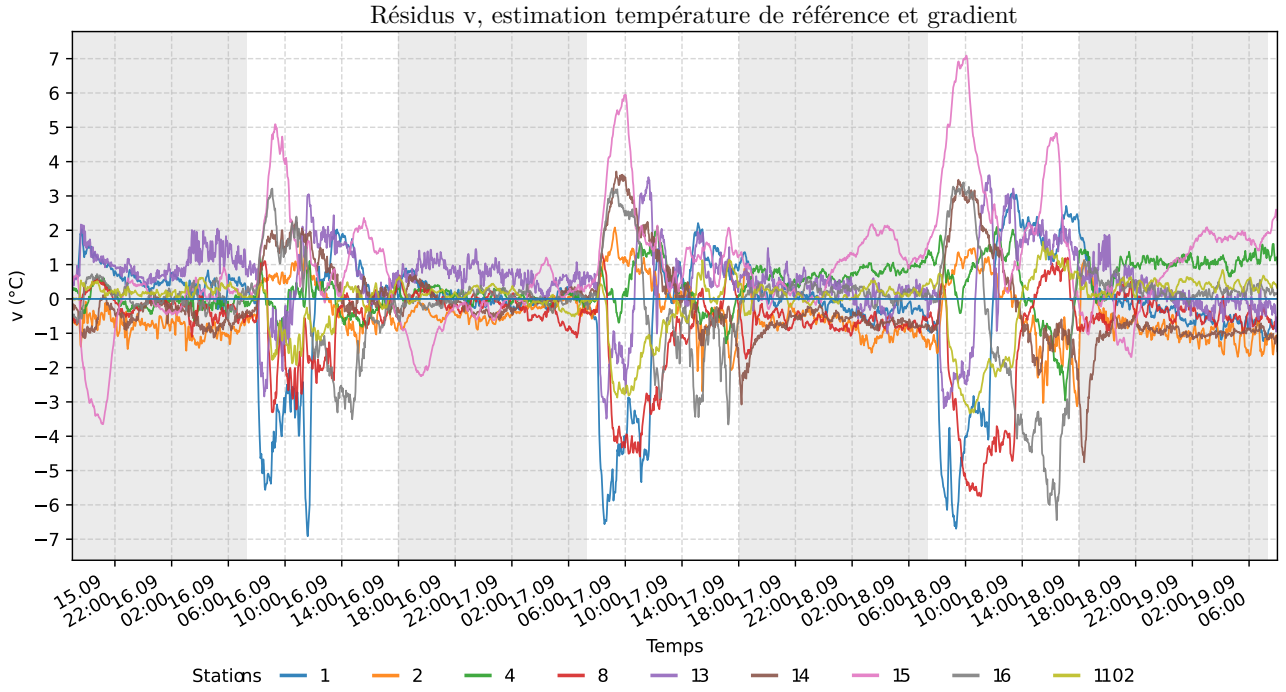



**Graph. 3.9** – Évolution de la température de référence durant la période de mesure

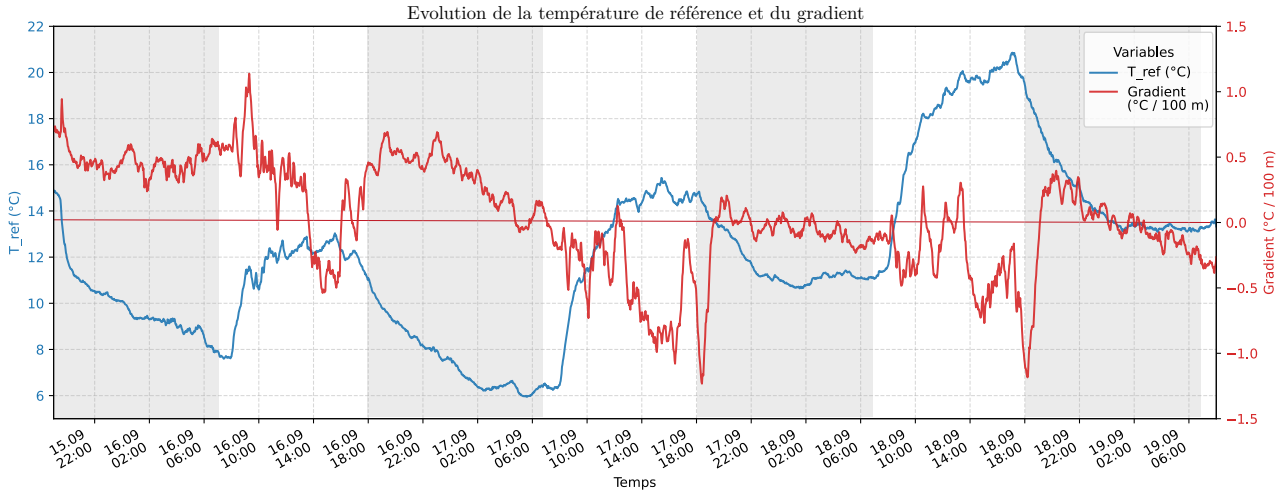
#### 3.4.5.5 Deuxième estimation

Avec les 9 stations de mesures, il est possible d'estimer le gradient de température et de suivre son évolution dans le temps. Après ajustement voici l'évolution dans le temps des deux paramètres, graphique 3.10 et 3.11.

Malgré une estimation du gradient dans le temps, les résidus n'ont pas diminué significativement, graphique 3.10. La différence la plus marquante est sur la température de référence, qui évolue de manière plus cohérente avec les effets journaliers,graphique 3.11. Baisse significative durant la nuit, montrant un refroidissement de l'atmosphère et augmentation durant la journée ce qui est cohérent avec la réalité, comparable à l'évolution de l'isotherme 0 dans une journée. Cependant le gradient de température n'est pas stable dans le temps et la constante globale par Bouët n'est que très peu respectée sur le site.




**Graph. 3.10** – Visualisation de l'évolution des résidus dans le temps avec estimation du gradient pour une altitude de référence à 1 800 m

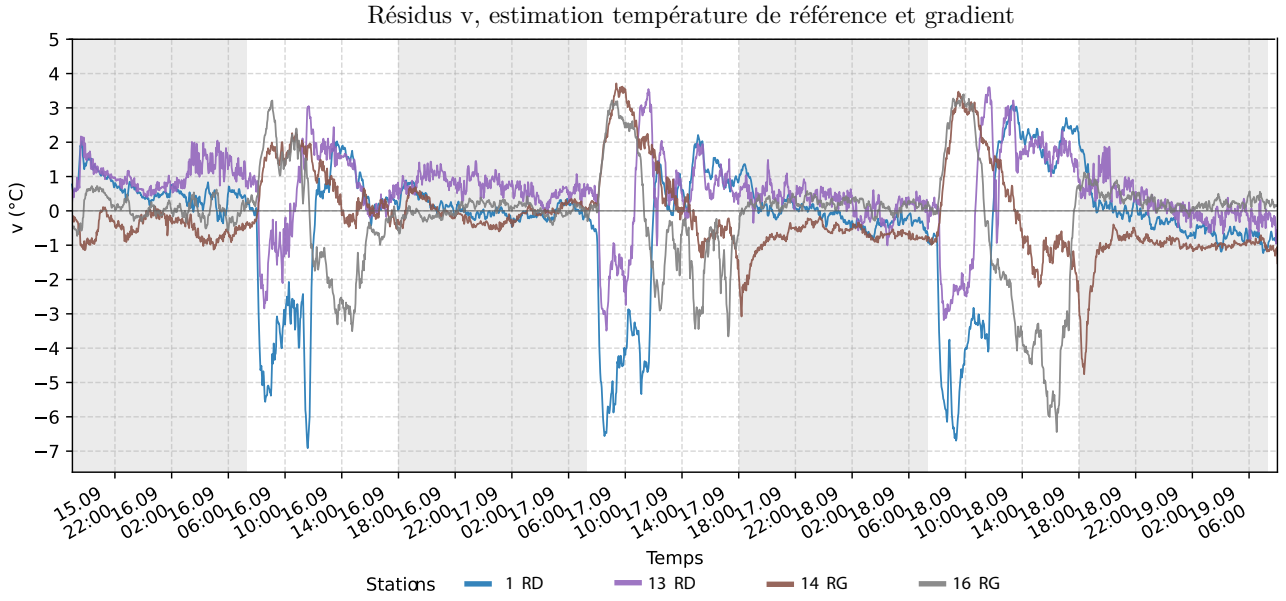



**Graph. 3.11** – Évolution de la température de référence et du gradient durant les mesures

Si les observations sont réalisées de nuit, un modèle à deux paramètres sera tout à fait acceptable avec des résidus moyens compris entre ±2 °C. Durant la journée le modèle n'est pas adapté, des paramètres complémentaires doivent être mis en place afin de réduire les résidus et mieux modéliser les effets journaliers.

### 3.4.6 Modèle météo affiné

Comme l'ont montré les graphiques, des résidus durant la journée s'opposent, montrant des effets ombre soleil ou de rives. La représentation,3.12, ci-dessous met bien en évidence ces effets.




**Graph. 3.12** – Effet des rives sur les résidus

Au niveau des stations de mesures, elles ont toutes été mises dans des boites aérées, placées dans des arbres à l'ombre et à deux mètres du sol. En théorie les effets thermiques du sol sont réduits au maximum. Il est possible d'imaginer une modélisation de l'influence direct du site de mesure. L'influence de la température d'un site de mesure est influencé par plusieurs paramètres :

- ombre ou soleil : ce paramètre est définissable en analysant la position du soleil et la topographie
- angle d'incidence du soleil par rapport au terrain : en connaissant l'orientation du soleil et la pente du terrain il est alors possible de calculer l'angle entre le soleil et le terrain local
- modélisation de l'effet du passage du soleil à l'ombre, l'effet thermique du passage à l'ombre n'est pas immédiat, ici mise en place d'un paramètre de retardement entre ombre et soleil

#### 3.4.6.1 Ombre - soleil

Le but est de déterminer quand une station météo était au soleil ou à l'ombre afin de pouvoir modéliser une correction complémentaire du gradient en fonction de l'ensoleillement. Le calcul est réalisé à l'aide d'une bibliothèque du module PvLib : *SolarPosition* (Holmgren et al., 2025) qui permet d'obtenir les éléments de position du soleil à une date donnée.

La fonction principale est la suivante,"*get_solarposition*" :

```
        import pvlib
        from pvlib import solarposition
        import pandas as pd

        times = pd.date_range('2025-09-15 00:00', '2025-09-19 12:00', freq='2mn')
        location = {'latitude': 46.348668, 'longitude': 7.434876}
        solarpos = solarposition.get_solarposition(times,location)
```

**Listing 3.1** – Fonction de récupération des éléments de position du soleil

La position du soleil pour une latitude et longitude donnée. La fonction "*get_solarposition*" retourne un dataframe avec angle d'élévation et l'azimut pour la période donnée. Il n'est pas nécéssaire de corriger l'azimut, la convergence du méridien à Zeuzier est très faible, $-0.002\,5\,^{\circ}$, selon la formule page 12 de la notice technique de Swisstopo (Swisstopo-Geodesie, 2016) :

$$\mu = \arctan \frac{\sin\phi_0 \cdot \sin(\alpha(\lambda - \lambda_0))}{\cos\phi_0 \cdot \cos\phi + sin\phi_0 \cdot \sin\phi \cdot \cos(\alpha(\lambda - \lambda_0))} = -0.0025^{\circ} \tag{3.6}$$

avec :

$\lambda_0$ : longitude à l'origine 7.439 583 333 3 °
$\phi_0$ : latitude l'origine 46.907 731 46 °
$\alpha$ : Rapport des longitudes 1.00072913843038
$\lambda$ : longitude du point terrain 7.436 060 197 1 °
$\phi$ : latitude du point terrain 46.346 548 598 0 °

Après obtention des paramètres solaires il est possible de réaliser plusieurs calculs :

1. **Analyse de l'ombrage :**

   Le principe de l'analyse est de réaliser un lancer de rayon depuis une station dans la direction du soleil, un pseudo code de l'algorithme est décrit ci-dessous, algo. 3.1 :

   - calcul par itération avec projection des composantes planimétrique sur SwissAlti3D 5 m (SWISSTOPO-APPLICATIONS, 2025) afin de récupérer l'altitude
   - recherche de l'élévation maximum entre la station et la direction du soleil,
   - comparaison à l'élévation du soleil : soleil = 1 , ombre = 0

**Input :** $DEM$, $(x_0, y_0)$, $az_{sun}$, $elev_{sun}$, $step_m$, $max_{dist}$
**Output :** 1 si ensoleillé, 0 si ombré

1: **if** $step_m \leq 0$ ***or*** $max_{dist} \leq 0$ **then**
2: | **erreur :** paramètres invalides
3: **end**
4: **if** $elev_{sun} \leq 0$ **then**
5: | **return** *0* // Soleil sous l'horizon
6: **end**
7: $(r_0, c_0) \leftarrow$ WorldToRC$(DEM.transform, x_0, y_0)$
8: $z_0 \leftarrow$ SampleDEMValue$(DEM, r_0, c_0)$
9: **if** $z_0$ *is NaN* **then**
10: | **return** *0* // Station hors emprise ⇒ ombre
11: **end**
12: $az_{rad} \leftarrow \text{deg2rad}(az_{sun})$
13: $v_E, v_N \leftarrow \sin(az_{rad}), \cos(az_{rad})$
14: $elev_{rad} \leftarrow \text{deg2rad}(elev_{sun})$
15: $max_{angle} \leftarrow -90$
16: **for** $d \leftarrow step_m$ **to** $max_{dist}$ **do**
17: | $x \leftarrow x_0 + v_E \cdot d$
18: | $y \leftarrow y_0 + v_N \cdot d$
19: | $(r, c) \leftarrow$ WorldToRC$(DEM.transform, x, y)$
20: | $z \leftarrow$ SampleDEMValue$(DEM, r, c)$
21: | **if** $z$ *is NaN* **then**
22: | | **stop** // Sortie raster / NoData
23: | **end**
24: | $angle \leftarrow \arctan\left(\frac{z - z_0}{d}\right)$
25: | **if** $angle > max_{angle}$ **then**
26: | | $max_{angle} \leftarrow angle$
27: | **end**
28: | **if** $max_{angle} \geq elev_{rad}$ **then**
29: | | **return** *0* // Occultation ⇒ ombre
30: | **end**
31: **end**
32: **return** *1* // Aucune occultation ⇒ ensoleillé

**Algorithme 3.1 :** Test ombrage : lancé de rayon pour le test d'ombrage

2. **Vecteur unitaire vers le soleil :**

La fonction *get.solarposition* retourne les valeurs d'azimut ($\phi$) et d'élévation ($\beta$), à partir de ces deux éléments il est possible de calculer le vecteur unitaire d'un rayon vers le soleil :
D'après la figure 3.18 ci-contre et en partant du principe que $\|\mathbf{u}\| = 1$ on a :

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \cos\beta \sin\phi \\ \cos\beta \cos\phi \\ \sin\beta \end{bmatrix} \tag{3.7}$$

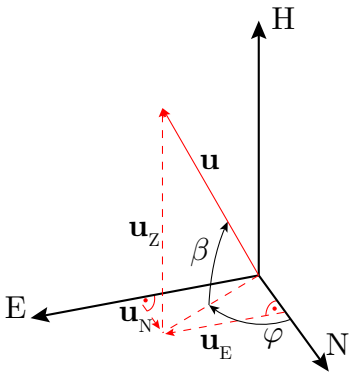
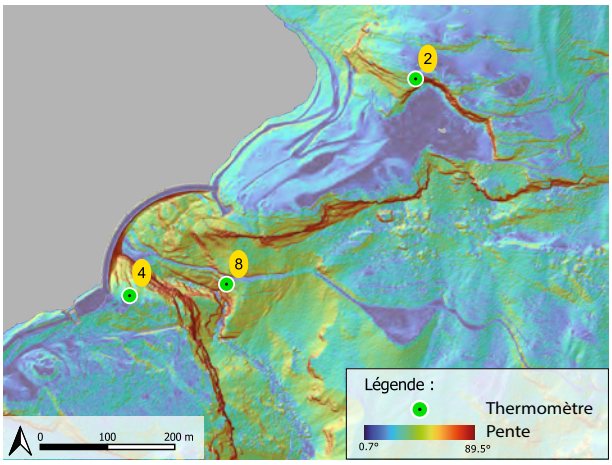


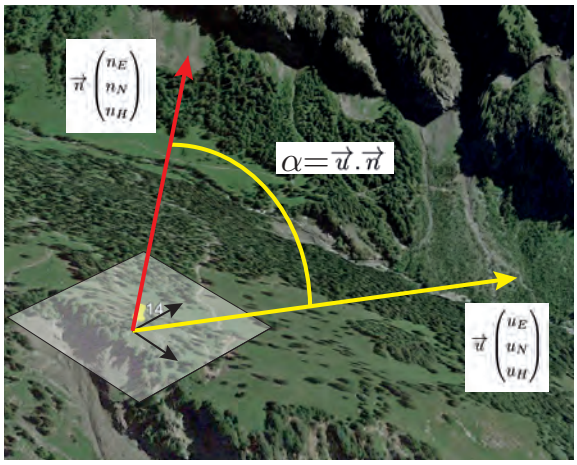

**Fig. 3.18** – Représentation vecteur unitaire

### 3.4.6.2 Pente locale

Un autre paramètre qui pourrait fournir une modélisation plus fine de l'effet du soleil sur la température à la station, est l'angle d'incidence qu'il fait avec le terrain. Pour calculer cette indicateur, il faut connaître la direction de la normale au terrain de même que le vecteur directeur pointant vers le soleil.




**(a)** Carte de pente




**(b)** Angle d'incidence

**Fig. 3.19** – Les éléments permettant de calculer l'angle d'incidence alpha

La carte de pente 3.19a est calculée à partir du produit SwissAlti3D 50 cm. Le choix est portée sur la version la plus précise afin d'obtenir une modélisation locale de la pente la plus précise possible. Le terrain étant très accidenté, il est souhaitable de ne pas perdre de précision à cette étape. Le calcul de la pente va être réalisé à l'aide du modèle de Horn (1981)(Horn, 1981), qui est très bien adapté aux calculs sur des grilles raster.

#### Modèle de Horn

Le modèle de Horn constitue l'une des premières formulations numériques robustes permettant de calculer la pente et l'orientation d'un terrain à partir d'un MNT régulier. Il repose sur l'approximation locale du relief par un plan incliné défini par les dérivées partielles de l'altitude selon les directions x et y. Les dérivées sont obtenues à l'aide d'un noyau de convolution de type Sobel (Sobel & Feldman, 1968), ce qui confère au modèle une bonne sensibilité aux variations locales du relief tout en limitant le bruit lié à la discrétisation des altitudes.

### Le principe mathématique

Le modèle de **Horn** estime le gradient d'altitude d'un pixel du MNT en combinant ses 8 voisins immédiats (fenêtre $3 \times 3$), voir schéma 3.20 avec une prise en compte des poids qui donnent plus d'importance aux voisins directs que ceux situés à la diagonale. À partir du gradient $(\partial z/\partial x, \partial z/\partial y)$, il est possible de déduire la pente, l'orientation et le vecteur normal.

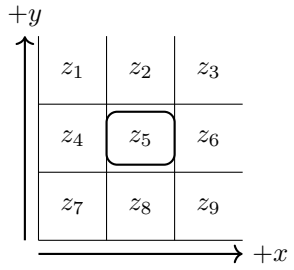



**Fig. 3.20** – Illustration de la grille de sélection des pixels, $\mathbf{z_5}$ pixel central

### Noyaux de Horn et gradients

Les gradients discrets sont obtenus par convolution avec les noyaux suivants, proches de ceux décrits par Sobel :

Les noyaux de Sobel s'écrivent :

$$S_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad S_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \tag{3.8}$$

Les dérivée partielle de l'altitude $\partial z$ selon $x$ et $y$ s'exprime alors par :

$$p = \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{(z_3 + 2.z_6 + z_9) - (z_1 + 2.z_4 + z_7)}{8\,\Delta x} \tag{3.9}$$

$$q = \frac{\partial z}{\partial y} = \frac{(z_1 + 2.z_2 + z_3) - (z_7 + 2.z_8 + z_9)}{8\,\Delta y} \tag{3.10}$$

$z_1$ à $z_9$ : altitudes des pixels de la fenêtre $3 \times 3$ centrée sur le pixel considéré $z_5$
$\Delta x$, $\Delta y$ : taille du pixel du MNT

### Calcul de la pente

Le module du gradient donne la pente (angle par rapport à l'horizontale) $\beta$ est donnée par :

$$\tan(\beta) = \sqrt{p^2 + q^2} \tag{3.11}$$

### Vecteur normal unitaire

Il est possible d'approximer l'équation du plan local à ces 9 pixels par :

$$z(x, y) = p \cdot x + q \cdot y \text{ avec } p = \frac{\partial z}{\partial x} \text{ et } q = \frac{\partial z}{\partial y} \tag{3.12}$$

Le vecteur normal non normé s'écrit :

$$\mathbf{n}_0 \;=\; (-p,\, -q,\, 1), \tag{3.13}$$

et le vecteur normal unitaire est :

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{n}_0}{\|\mathbf{n}_0\|} = \frac{(-p, -q, 1)}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}}. \tag{3.14}$$

A l'aide de la normalisation de $n$, il sera alors possible de calculer toutes les métriques nécessaire au calcul de l'angle d'incidence du soleil sur le terrain.

#### Agrégation à une zone plus grande

Le modèle de Horn décrit ci-dessus donne les paramètres pour un pixel dans une fenêtre $3 \times 3$, ce qui est très restrictif, soit une zone de $1.5 \times 1.5$ m avec un pixel de 50 cm.

Le modèle de Horn permet de générer rapidement les différents éléments pour chaque pixel. La stratégie mise en place est donc la suivante :

1. calcul des éléments pente et vecteur normal unitaire sur tout le MNT pour chaque pixel
2. autour des stations MNT, sélection des pixels par tolérance ici 20 pixels soit dans un rayon de 10 m.
3. réalisation d'une moyenne simple de toutes les normales et pentes afin d'obtenir l'orientation moyenne autour de la station

### 3.4.6.3 Angle d'incidence soleil

L'angle d'incidence du soleil est donné par le produit scalaire entre la normale au plan du terrain à la station et le vecteur dirigé vers le soleil, voir schéma 3.19b :

$$\cos\alpha = \mathbf{n} \cdot \mathbf{u} \tag{3.15}$$

avec :

- $\mathbf{n}$ : vecteur unitaire de la normale à la station
- $\mathbf{u}$ : vecteur unitaire en direction du soleil

Il est choisi de conserver le cosinus du produit scalaire comme paramètre, c'est un coefficient qui évolue entre [-1,1] ; il pourrait faciliter la modélisation d'un nouveau paramètre en fonction de l'orientation du rayon. Plus le soleil a un rayon direct sur le terrain, donc pente et rayon du soleil confondus, plus le coefficient est proche de 1, prise en compte complète de l'incidence, plus l'angle est grand, moins il a d'importance. Le but de ce $\cos\alpha$ est d'arriver à donner un coefficient de ressenti de "*chaleur*" plus ou moins fort en fonction de l'orientation du soleil. Ce qui pourrait apporter une correction de gradient plus importante, en fonction de l'orientation du soleil, un peu comme un effet de sol.

### 3.4.6.4 Nouveaux paramètres

Avec les développements précédents, il est possible d'intégrer de nouveaux paramètres dans le modèle météo simple. A l'aide du critère ombre soleil, il est possible de savoir si la station est exposée au soleil ou pas ; et avec l'angle d'incidence fournir une information sur "*l'intensité*" du soleil.

Dans le monde réel, quand une zone passe du soleil à l'ombre, la diminution de chaleur n'est pas immédiate, la chaleur diminue lentement. Mais, l'inverse n'est pas vrai, lorsque l'on passe de l'ombre au soleil, le plus souvent le ressenti de chaleur est presque instantané. Donc, un coefficient d'attente doit être pris en compte afin d'ajuster progressivement le passage du soleil à l'ombre.

La nouvelle équation de modélisation de la température peut s'exprimer comme suit :

$$T_i = \hat{T}_{\mathrm{ref}_t} - \hat{\Gamma} \cdot (Z_i - Z_0) + \hat{b}_{\mathrm{stat}} \cdot \cos\alpha \cdot S \quad [\mathrm{°C}] \tag{3.16}$$

avec :

| | |
|---|---|
| $\hat{T}_{\text{ref}_t}$ | : température de référence à estimer à chaque époque pour une altitude donnée $z_0$ |
| $Z_i$ | : altitude de la station météo |
| $\hat{\Gamma}$ | : gradient de température à estimer en [°C/m] |
| $\hat{b}_{\text{stat}}$ | : coefficient de correction de l'incidence du soleil à estimer pour chaque station [°C] |
| $\cos\alpha$ | : angle d'incidence du soleil à chaque époque |
| $S$ | : paramètre ombre ou soleil à chaque époque |

### Le paramètre S

Le paramètre **S** qui donne une information sur une zone à l'ombre ou au soleil, il doit être lissé, afin de tenter de modéliser au mieux l'effet réel du soleil sur le terrain. Actuellement, il est enregistré sous la forme 0 ou 1, donc aucun lissage.

Pour lui donner une augmentation et une diminution graduelle, il est choisi d'utiliser le principe d'un lissage exponentiel, avec une constante de temps basée sur le principe de la demi-vie. Ce modèle présente l'avantage que l'on cible, quand la valeur d'effet du soleil soit réduite ou augmentée de 50 %, voir graphique 3.13. La formule générale du lissage exponentiel est :

$$S_{eff,i} = \alpha.S_{eff,i-1} + (1-\alpha)\cdot S_{base,i} \tag{3.17}$$

avec :

| | |
|---|---|
| $S_{eff}$ | : le coefficient effectif à l'itération $i$ |
| $\alpha$ | : facteur de lissage |

On obtient $\alpha$ à l'aide du pas de temps et de $\tau$ coefficient de la demi-vie :

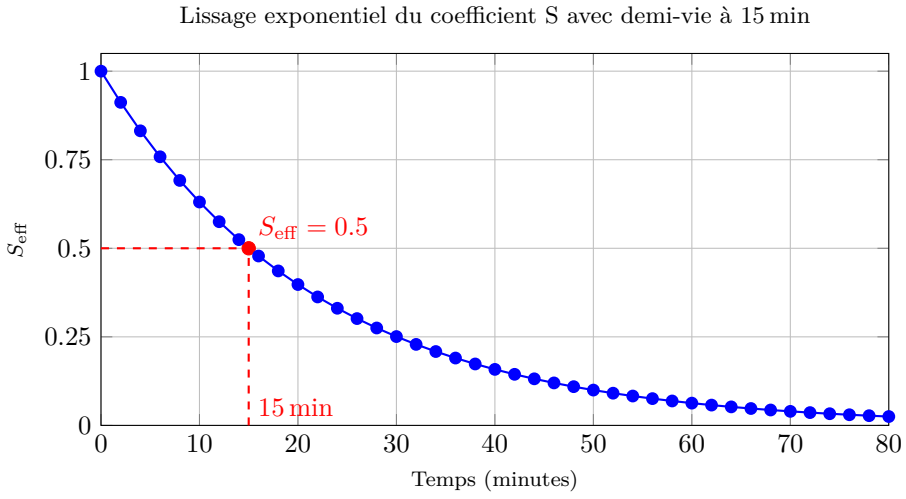
- on a $\tau$ :

$$\tau = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} \tag{3.18}$$

- avec $\alpha$ qui vaut, pour un pas de temps $dt$ :

$$\alpha = \exp^{-dt/\tau} \tag{3.19}$$

Ce qui donne comme évolution :




**Graph. 3.13** – Courbe de régression de S avec une demie-vie à 15 min

#### 3.4.6.5 Calcul multi-époques

**Le modèle mathématique**

Afin d'estimer avec précision les paramètres et ne pas obtenir des variables trop bruitées, l'estimation va se dérouler en prenant un groupe d'observations durant un laps de temps. L'élément qui va être estimé à tous les pas de temps est $\mathbf{T_{ref}}$. Idéalement, on aurait pu fixer un deuxième paramètre qui serait complètement indépendant de $\mathbf{T_{ref}}$ ou du gradient, mais ce n'est pas le cas. $\mathbf{b_{stat}}$ se comporte comme $\mathbf{T_{ref}}$, des singularités peuvent ressortir dans les matrices avec des valeurs aberrantes .

Divers tests sont réalisés pour étudier l'impact du pas de temps sur les résidus. Il n'y a pas de changement significatif sur le bruit généré. Le bruit mis en évidence est celui des observations qui pourrait être lissé si cela est nécessaire.

Les différentes inconnues sont estimées en un bloc, car $\mathbf{\Gamma}$ et $\mathbf{b_{stat}}$ sont communs à toutes les époques. Le calcul est donc assimilable à une inconnue multi-époques $\mathbf{T_{ref}}$.

Le modèle mathématique de la compensation par moindre carrée est le suivant avec les station "i" et les époques "j" :

$$\mathbf{T}_{i,j} = \hat{\mathbf{t}}_{\mathrm{ref_j}} - \widehat{\mathbf{\Gamma}} \cdot (Z_i - Z_0) + \hat{\mathbf{b}}_{\mathbf{i}} \cdot \cos\alpha_{i,j} \cdot S_{i,j}^{eff} \tag{3.20}$$

Avec une formulation matricielle du type :

$$\mathbf{l_{i,j}} + \hat{v}_(i,j) = \mathbf{A_{i,j}} \cdot \widehat{\mathbf{x_{i,j}}} \tag{3.21}$$

- Les observations, exemple avec les station 1, 2 et 4 :

$$\mathbf{l} = \begin{pmatrix} T_{1,1} & T_{2,1} & T_{4,1} & \cdots & T_{1,2} & T_{2,2} & T_{4,2} & \cdots & T_{i,j} \end{pmatrix}^\intercal \tag{3.22}$$

- La matrice des coefficients $\mathbf{A}$ :

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 & -(Z_1 - Z_0) & \cos\alpha_{1,1}\, S_{1,1}^{\mathrm{eff}} & 0 & 0 & \cdots \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & -(Z_2 - Z_0) & 0 & \cos\alpha_{2,1}\, S_{2,1}^{\mathrm{eff}} & 0 & \cdots \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & -(Z_4 - Z_0) & 0 & 0 & \cos\alpha_{4,1}\, S_{4,1}^{\mathrm{eff}} & \cdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & -(Z_1 - Z_0) & \cos\alpha_{1,2}\, S_{1,2}^{\mathrm{eff}} & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & -(Z_2 - Z_0) & 0 & \cos\alpha_{2,2}\, S_{2,2}^{\mathrm{eff}} & 0 & \cdots \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & -(Z_4 - Z_0) & 0 & 0 & \cos\alpha_{4,2}\, S_{4,2}^{\mathrm{eff}} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & T_{ref_j} & -(Z_i - Z_0) & \vdots & \vdots & \vdots & \cos\alpha_{i,j}\, S_{i,j}^{\mathrm{eff}} \end{pmatrix} \tag{3.23}$$

- La matrice des inconnus :

$$\hat{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} \hat{T}_{\mathrm{ref_1}} & \hat{T}_{\mathrm{ref_2}} & \cdots & \hat{T}_{\mathrm{ref}_j} & \widehat{\Gamma} & \hat{b}_1 & \hat{b}_2 & \cdots & \hat{b}_i \end{pmatrix}^\intercal \tag{3.24}$$

Le calcul d'estimation des paramètres étant un calcul par moindre carrés standard, les divers éléments statistiques de précisions, fautes probables, fiabilité et autres sont disponibles à l'aide des formules standards, un rappel des formules est fait à l'annexe F page A-23.

### 3.4.7 Analyse de la stratégie par moindre carré

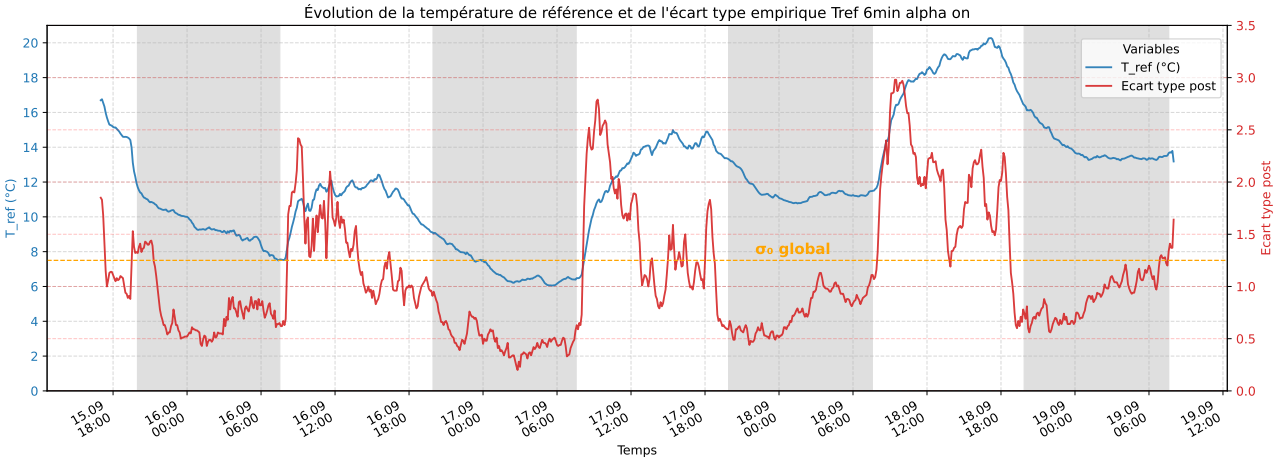
Le concept présenté ci-dessus, chapitre 3.4.6, permet de déterminer les trois paramètres du modèle, cependant le pas de temps ou la prise en compte des coefficients n'est pas optimisée et doit être réalisée de manière empirique. Les calculs sont toujours réalisés avec l'estimation du gradient, il est possible de désactiver l'option si le gradient a été déterminé avec une autre méthode.

Diverses variantes sont réalisées en faisant varier les paramètres essentiels :

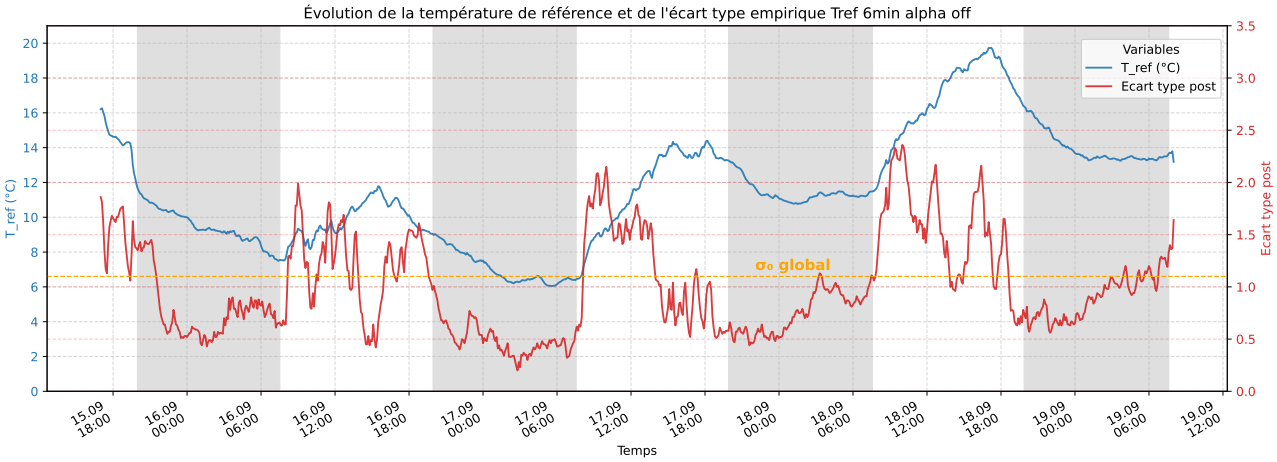
- pas de temps
- temps de demie-vie
- angle d'incidence du soleil pris en compte ou pas
- précision de la mesure de la température fixée à $\sigma_{temp} = 1\,℃$

**Ci-dessous présentation de deux variantes retenues :**

- **Avec angle d'incidence et paramètres**
  - Pas de temps = 6 min
  - demie-vie ombre soleil = 15 min
  - demie-vie soleil-ombre = 20 min
  - prise en compte de l'angle d'incidence )= oui
- **Sans angle d'incidence et paramètres**
  - Pas de temps = 6 min
  - demie-vie ombre soleil = 15 min
  - demie-vie soleil-ombre = 20 min
  - prise en compte de l'angle d'incidence )= off
- **Évolution de la température de référence et de l'écart type à posteriori des résidus**

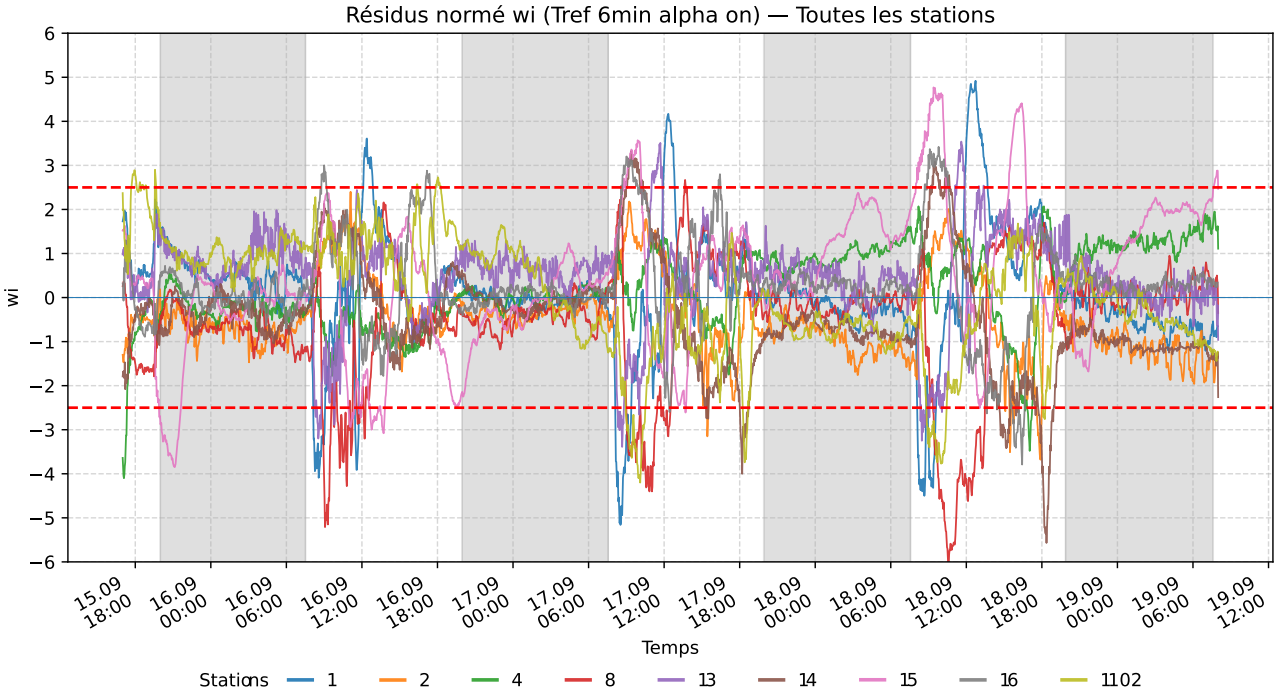



**Graph. 3.14** – Évolution de la température et de l'écart type des résidus par époque, avec angle d'incidence

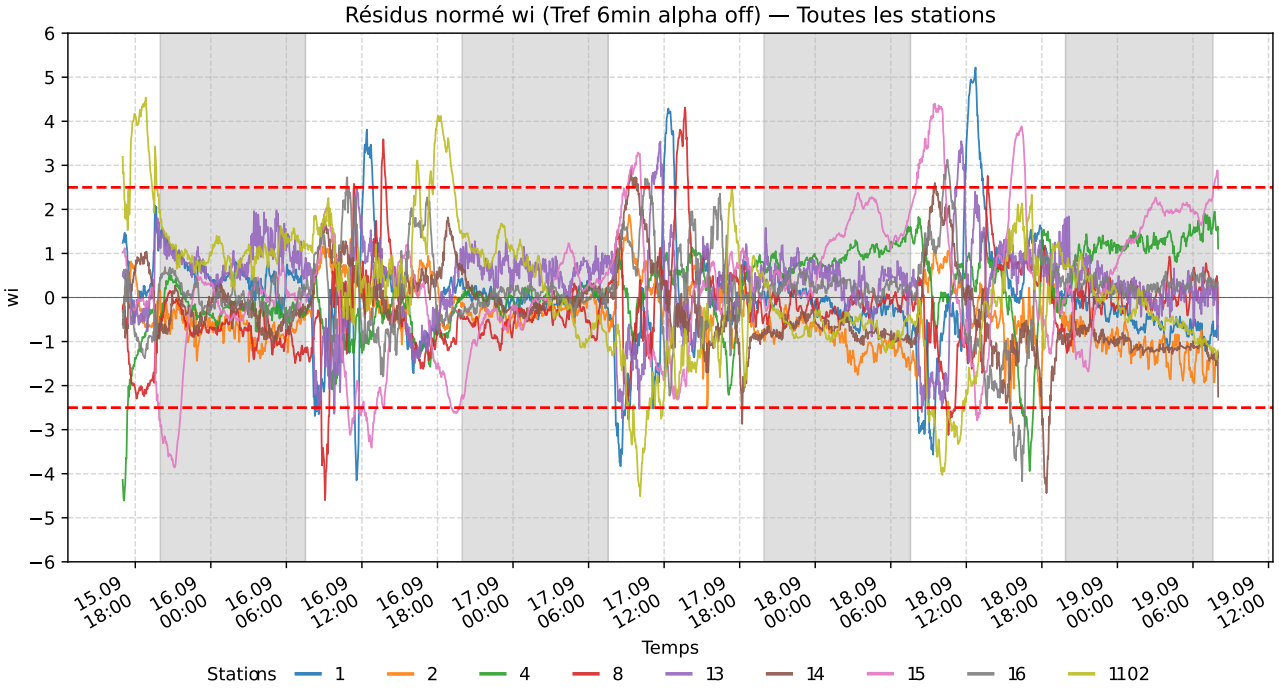



**Graph. 3.15** – Évolution de la température et de l'écart type des résidus par époque, sans angle d'incidence

- **Évolution des wi :**




**Graph. 3.16** – Évolution des wi, avec angle d'incidence

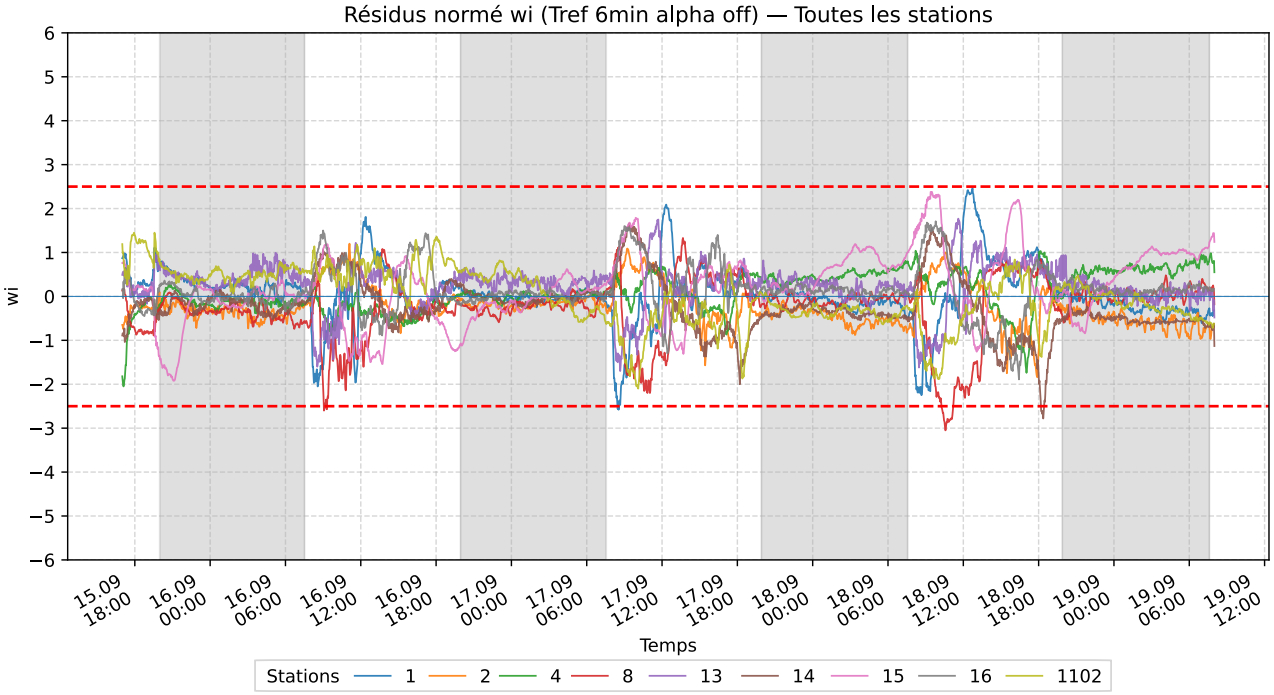



**Graph. 3.17** – Évolution des wi, sans angle d'incidence

L'évolution des wi dans le temps, graphique 3.16 et 3.17 mettent en évidence une répartition des résidus bien différentes en fonction des stratégies. Un modèle prenant en compte l'angle d'incidence aurait dû permettre une meilleure modélisation des caractéristiques locales de la température. Les résultats ne confirment pas cette variante. Les Wi observés sur le graphique 3.16 sont plus importants quand il fait beau, comme la journée du 18 septembre avec des wi maximum de -6. L'évolution de l'écart type des résidus à posteriori par époque, graphique 3.14, a des sigma jusqu'à 3.

La variante qui ne tient pas compte de l'angle d'incidence, présente des résultats plus homogènes avec un sigma à posteriori, graphique 3.15, avec des maximums de 2.5. La répartition des wi, graphique 3.17, met également en avant des résidus normés plus faibles avec des maximums de 5 durant la journée du 18 septembre.

Il est possible d'ajuster les résultats en faisant varier la précision de l'observation de température. Typiquement si elle passe à 2 °C alors les quotients et wi sont tous dans la tolérance.




**Graph. 3.18** – Évolution des wi, sans angle d'incidence, sigma température à 2 °C

### 3.4.8 Bilan modèle linéaire

Comme expliqué ci-dessus, l'importance de la prise en compte de paramètres complémentaires tels que la pente ou l'incidence du soleil, permettent de calculer ces éléments afin de mieux déterminer le gradient et une température de référence. L'analyse de la précision sur la température montre que si l'on considère une imprécision de 2 °C les éléments satisfont les tolérances habituellement définies.

Un problème persiste, les développements ont permis de définir une température de référence et un gradient atmosphérique. Ils sont fortement liés à l'emplacement des stations et des effets locaux. On cherche à obtenir un modèle afin de prédire la température de l'air en tout point.

C'est une nouvelle approche qui est envisagée dans la suite du travail, dans un premier temps, de trouver une stratégie afin de prédire en tout point la température au sol, puis de définir une formulation afin de calculer une température de l'air avec une perte non linéaire des effets de surchauffe du sol.

## 3.5 Prédiction de la température du sol

Comme démontré ci-dessus, la prédiction de la température repose sur l'interaction de paramètres complémentaires dont les relations ne peuvent être appréhendées de manière strictement linéaire. Ce qui rend nécessaire une approche de modélisation capable de capturer ces dépendances complexes, tant du point de vue géographique que physique. La nouvelle approche vise donc à s'appuyer sur une méthode de modélisation capable d'exploiter simultanément un grand nombre de variables explicatives et leurs interactions, tout en assurant robustesse et capacité de généralisation.

### 3.5.1 L'idée

L'objectif est de modéliser la température en tout point de la surface du sol. En Suisse, un large éventail de données sont disponibles en *open data*, permettant de caractériser finement les propriétés structurelles du terrain au moyen de coefficients descriptifs. À ces informations peuvent s'ajouter des paramètres relatifs à l'état de l'atmosphère, tels que la nébulosité ou les observations issues de stations météorologiques extérieures.

L'intégration conjointe de ces différentes sources de données vise à restituer au mieux les conditions locales, en tenant compte à la fois des caractéristiques géographiques et des phénomènes physiques en jeu. Cette approche doit permettre d'estimer un ensemble de paramètres explicatifs servant de base à la prédiction de la température au sol.

### 3.5.2 Les données en entrée

Dans le chapitre précédent, trois paramètres ont déjà été utilisés : la pente du terrain, la position du soleil et l'ombrage associé. Ces éléments sont repris dans la nouvelle approche. En complément, il est possible d'intégrer des informations issues de descriptifs supplémentaires, tels que :

- **Hauteur de la végétation** : intégration d'un GeoTIFF décrivant la hauteur de la végétation. Ces données sont disponibles sur Geocat (Geocat, 2024) sous le nom *Modèle de la hauteur de la végétation LiDAR de l'IFN*. La hauteur des arbres est déduite à partir des données LiDAR de la Confédération et de la classification du sol.
- **Données de stations météorologiques** : les capteurs météos sont situés majoritairement dans la vallée et leur répartition altimétrique n'est pas optimale, ce qui rend la détermination d'un gradient vertical délicate. Afin d'approximer ce gradient, l'utilisation de trois stations météorologiques situées hors du site d'étude, réparties entre la vallée et la crête des Alpes, peut être envisagée (figure 3.21). Sur le site de l'Office fédéral de météorologie et de climatologie (MétéoSuisse) (MeteoSwiss, 2025), via la page *Télécharger des données sans savoir coder*, il est possible de sélectionner une station, un intervalle de mesures, la période temporelle est fixe : annuelle.

  Le tableau 3.8 présente un extrait des données de la station des Diablerets (DIA). La première ligne correspond à la légende des variables, la seconde à leur nom d'origine tel que fourni par MétéoSuisse.

| Station | Date | T sol 2m [°C] | H [%] | Pts. rosée [°C] | P [mBar] | P niv. Mer [mBar] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| station_abbr | reference_timestamp | tre200s0 | ure200s0 | tde200s0 | prestas0 | pp0qnhs0 |
| DIA | 16.09.2025 23 :20 | 0.6 | 33.9 | -13.5 | 716.1 | 1029.2 |
| DIA | 16.09.2025 23 :30 | 0.7 | 33.9 | -13.4 | 716.1 | 1029.2 |
| DIA | 16.09.2025 23 :40 | 0.6 | 34.3 | -13.3 | 716.2 | 1029.3 |
| DIA | 16.09.2025 23 :50 | 0.3 | 34.2 | -13.6 | 716.2 | 1029.3 |
| DIA | 17.09.2025 00 :00 | 0.4 | 33.9 | -13.6 | 716.1 | 1029.2 |
| DIA | 17.09.2025 00 :10 | 0.5 | 34.6 | -13.3 | 716.0 | 1029.1 |
| DIA | 17.09.2025 00 :20 | 0.5 | 34.2 | -13.5 | 716.1 | 1029.2 |
| DIA | 17.09.2025 00 :30 | 0.5 | 34.5 | -13.3 | 716.0 | 1029.1 |
| DIA | 17.09.2025 00 :40 | 0.5 | 34.8 | -13.2 | 716.0 | 1029.1 |
| DIA | 17.09.2025 00 :50 | 0.5 | 34.7 | -13.3 | 716.0 | 1029.1 |
| DIA | 17.09.2025 01 :00 | 0.5 | 34.7 | -13.3 | 716.0 | 1029.1 |

**Tab. 3.8** – Extrait des données de la station de mesures des Diablerets. Source MétéoSuisse.

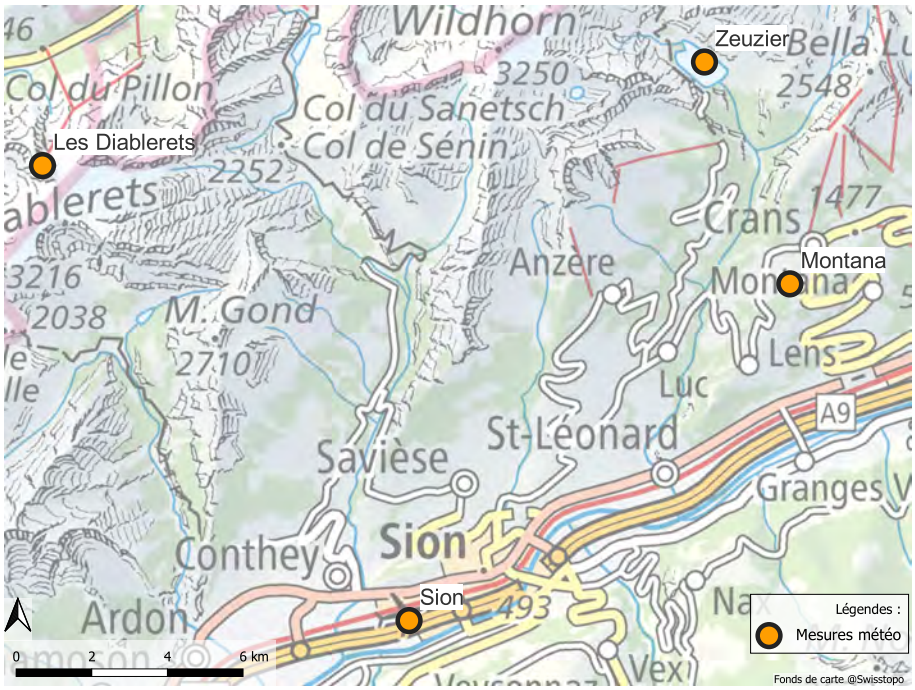



**Fig. 3.21** – Répartition des mesures météorologiques entre la vallée et la crête des alpes

- **Couverture nuageuse** : la couverture nuageuse constitue un paramètre important. Bien que l'incidence du soleil soit déjà prise en compte, elle ne permet pas de distinguer un fort rayonnement solaire d'un ensoleillement masqué par la présence de nuages. Ces informations peuvent être obtenues via le portail de l'Organisation européenne pour l'exploitation des satellites météorologiques (EUMETSAT) (EUMETSAT, 2026), qui met à disposition des produits d'observation de la Terre en *open data*. Les données utilisées ici correspondent au produit *Cloud Mask – MSG – 0 degree*. L'information est volontairement succincte mais adaptée aux besoins du modèle : ciel dégagé au-dessus de l'eau, ciel dégagé au-dessus de la terre ou couverture nuageuse. Chaque couche est codée de manière binaire (0 ou 1). Un extrait de la plateforme de recherche est présenté à la figure 3.22.

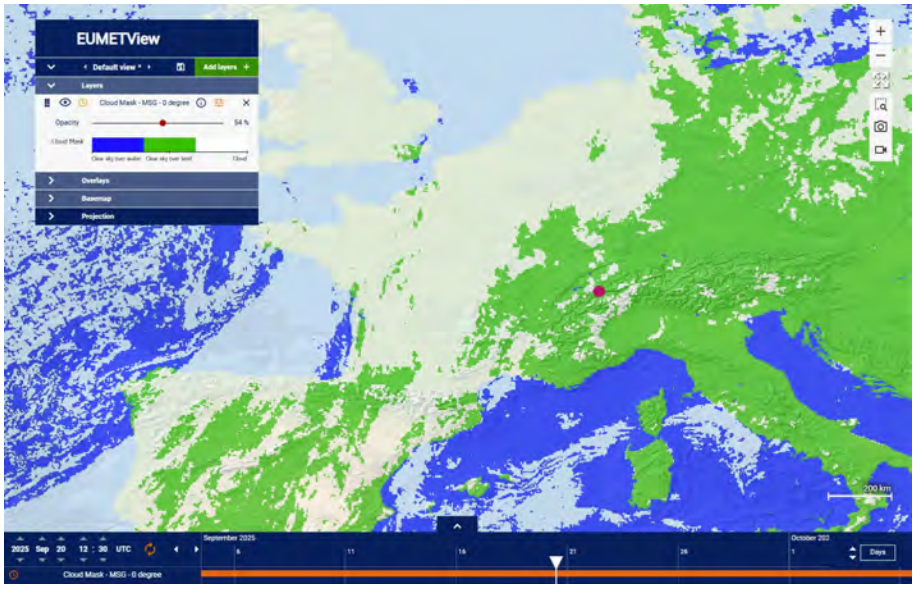



**Fig. 3.22** – Visualisation des données sur la plateforme EUMETSAT, pour le 20.09.2025 à 12 :30 UTC, en blanc les nuages. Source : EUMETSAT [3]

3. Lien vers les données :https://view.eumetsat.int/productviewer?v=msg_fes:clm

La fréquence de mise à disposition des images est de 15 min. Les données sont téléchargeables sous forme de listes via des requêtes *request*, mais sont fournies au format GRIB. EUMETSAT met à disposition une API permettant le post-traitement de ces données, notamment à travers l'outil *Data Tailor Standalone*[4]. Cette interface permet de transformer les données brutes en GeoTIFF projetés dans un système de coordonnées global. Pour les besoins de ce travail, les images sont ensuite reprojetées dans le cadre de référence MN95 et découpées selon l'emprise du site d'étude. La résolution spatiale, de l'ordre du kilomètre, est suffisante pour fournir une information pertinente sur la présence de nébulosité durant les mesures.

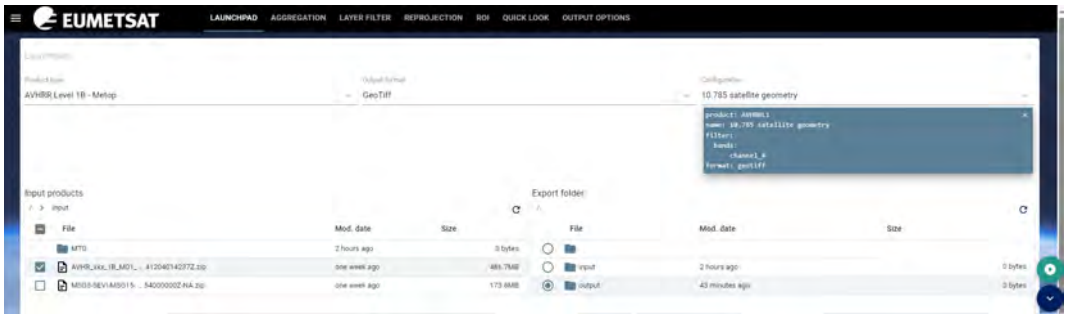



**Fig. 3.23** – Vue de l'interface de conversion des fichiers sources vers Geotiff. Source : EUMETSAT

- **Le lac** : la température de l'eau constitue un paramètre important, car elle influence directement la température de l'air dans les couches basses de l'atmosphère (Guo et al., 2025). L'emprise du lac est disponible en *open data* sur Geocat, au format GeoTIFF. Durant la semaine d'étude, la température de l'eau était d'environ 12 °C.

Les données présentant une composante temporelle sont interpolées de manière linéaire afin d'obtenir des valeurs à une fréquence d'acquisition homogène.

Concernant la couverture nuageuse, la variable étant binaire (0 ou 1), son utilisation directe peut s'avérer délicate, ce type de transition abrupte étant rarement représentatif des phénomènes naturels. Afin de lisser ce comportement, le passage entre les états est adouci en appliquant la même stratégie de filtrage par demi-vie que celle utilisée pour le paramètre $S$ (voir section 3.4.6.4).

L'intégration de ces descripteurs complémentaires permet d'enrichir l'information mise à disposition du futur modèle d'apprentissage, en vue d'interpoler la température du sol sur l'ensemble du site d'étude.

### 3.5.3 Le modèle d'apprentissage

Compte tenu de la complexité des phénomènes étudiés et du nombre important de variables explicatives à considérer ; le modèle *Random Forest* (RF) a été retenu pour ce travail. Proposé initialement par Leo Breiman, le modèle de forêt d'arbres décisionnels combine les prédictions d'un ensemble d'arbres construits sur des sous-ensembles aléatoires des données afin d'améliorer la robustesse et la capacité de généralisation de la prédiction (Breiman, 2001), (Wikipédia, 2026). Cette approche permet de prendre en compte des relations non linéaires entre les paramètres tout en intégrant des données de natures diverses, ce qui la rend particulièrement adaptée à la prédiction de la température du sol.

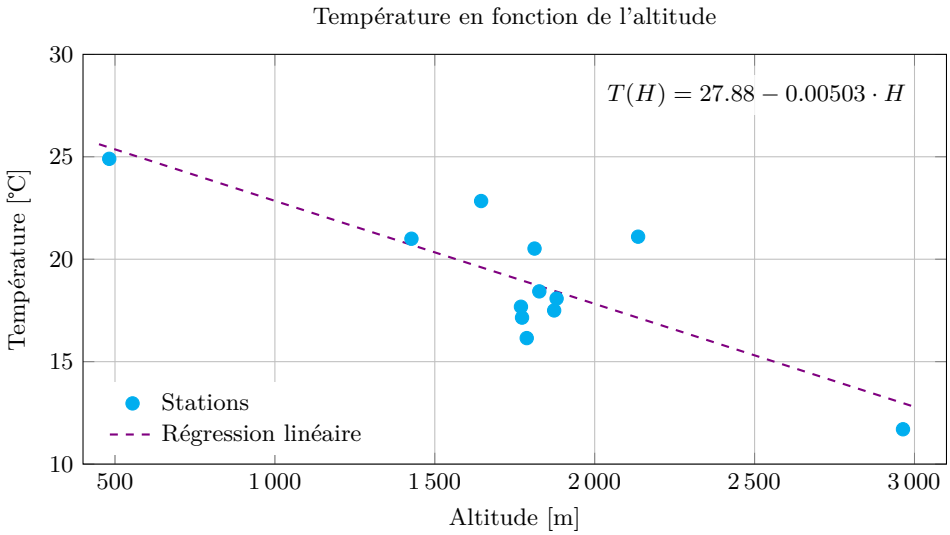
#### 3.5.3.1 Stratégie

L'objectif, n'est pas d'utiliser les données météos des 9 stations du site de Zeuzier pour tenter un apprentissage. La stratégie est d'entraîner un modèle RF sur les résidus aux stations. Le premier le but, est de trouver une fonction décrivant l'évolution de la température en fonction de l'altitude, et calculer les résidus avec ces paramètres généraux.

4. Data Tailor Guide : https://user.eumetsat.int/resources/user-guides/data-tailor-standalone-guide

Processus :

- Données en entrée : températures des stations MétéoSuisse (Les Diablerets, Montana, Sion) et les 9 stations locales, altitudes de chaque station
- Calcul d'une droite de régression de paramètres $a$ et $b$ de la forme $T(H) = a + b \cdot H$, pour tous les temps $t$, exemple dans le graphique ci-dessous 3.19




**Graph. 3.19** – Stations (points) et droite de régression linéaire, température en fonction de l'altitude, exemple pour les données du 18.09.2025 à 12 h.

- A partir des paramètres de la droite de régression il est possible de calculer les températures aux stations de mesures et les résidus, voici les résultats correspondant aux données du graphique précédent, tableau 3.9.

| St. météo | H [m] | $T$ [°C] | $T_{\text{regression}}$ [°C] | $dT$ [°C] |
|---|---|---|---|---|
| Sion | 482.0 | 24.90 | 25.46 | 0.56 |
| Montana | 1427.0 | 21.00 | 20.74 | -0.26 |
| 8 | 1644.9 | 22.84 | 19.65 | -3.18 |
| 13 | 1769.4 | 17.68 | 19.02 | 1.34 |
| 4 | 1772.8 | 17.15 | 19.01 | 1.86 |
| 15 | 1787.5 | 16.15 | 18.93 | 2.78 |
| 16 | 1811.9 | 20.52 | 18.81 | -1.70 |
| 1 | 1826.8 | 18.43 | 18.74 | 0.31 |
| 14 | 1873.2 | 17.5 | 18.50 | 1.00 |
| 2 | 1880.9 | 18.08 | 18.47 | 0.39 |
| 1102 | 2135.8 | 21.10 | 17.19 | -3.90 |
| Les Diablerets | 2964.0 | 11.70 | 13.05 | 1.35 |

**Tab. 3.9** – Températures calculées depuis les paramètres de la droite de régression, et les résidus pour chacune des stations

Dans le tableau 3.9 les résidus les plus grands sont sur les stations 1102 et 8 de -3.90 respectivement $-3.18\,°C$. La configuration géographique peut éventuellement expliquer ces différences la station 1102 située dans un espace complètement dégagé et en plein soleil, et la station 8 située au fond de la gorge, situation annexe X page A-111, donc des effets de surchauffe sont possibles. On souhaiterait que ce type de phénomène soit pris en compte dans le modèle RF.

- A l'aide des paramètres de régression pour tous les temps $t$, calcul de la température $T_{\text{regression}}$ aux stations et du résidus entre la valeur mesurée et interpolée.
- Ce sont ces résidus qui vont être en entrée pour le modèle RF

#### 3.5.3.2 Les descripteurs

Pour que le modèle puisse prédire la température en tout point du site, on intègre les descripteurs suivants, le résidu n'est pas un descripteur :

- Les valeurs statiques, valables pour tout le modèle, en tout temps $t$ :
  - Modèle numérique de terrain , ENH
  - Modèle de pente calculée précédemment, EN, attributs : $\mathbf{n}_E$, $\mathbf{n}_N$,$\mathbf{n}_H$
  - Modèle de canopée, EN, hauteur des arbres
  - Température du lac, EN, température de l'eau
- Les valeurs dynamiques au temps $t$ :
  - Position du soleil calculée précédemment avec attributs $\mathbf{u}_E$, $\mathbf{u}_N$, $\mathbf{u}_H$
  - Présence de nuage ou pas
  - Ombrage
  - Un descripteur combiné, entre nuage et ombrage,

#### 3.5.3.3 Entraînement du modèle

Le modèle RF va être entraîné à l'aide de la bibliothèque Python, *Scikit-Learn* et le module *RandomForestRegressor* (Scikit-Learn Developers, 2025), cette bibliothèque présente l'avantage d'avoir une prise en main facile tout en restant très paramétrable. Plusieurs, tests, ont été nécessaires afin de trouver les bons paramètres, pour éviter le sur-apprentissage.

Les paramètres globaux de l'apprentissage et du modèle sont définis comme suit et dans le tableau 3.10 :

- `TEST_SIZE = 0.4` : proportion des données réservée au jeu de test, soit 40 %, afin d'évaluer la capacité de généralisation du modèle.
- `RANDOM_STATE = 42` : graine aléatoire fixée afin d'assurer la reproductibilité des résultats, nombre par convention.

| Paramètre | Valeur | Rôle |
|---|---|---|
| `n_estimators` | 200 | Nombre d'arbres du modèle, permettant de stabiliser les prédictions par agrégation |
| `max_depth` | 10 | Profondeur maximale des arbres, limitant la complexité du modèle |
| `min_samples_leaf` | 30 | Nombre minimal d'observations par feuille, assurant un lissage des variations locales |
| `min_samples_split` | 60 | Nombre minimal d'observations pour autoriser une division |
| `max_features` | 0.2 | Proportion des variables explicatives considérées à chaque division |

**Tab. 3.10** – Paramétrage du modèle Random Forest et de l'apprentissage

#### 3.5.3.4 Résultats du modèle Random Forest

À partir des résultats issus de l'entraînement du modèle Random Forest (RF), il est possible d'extraire plusieurs indicateurs statistiques permettant d'évaluer la qualité de l'apprentissage, tels que l'importance des descripteurs, la distribution des résidus ou encore l'analyse des écarts en fonction de différents paramètres.

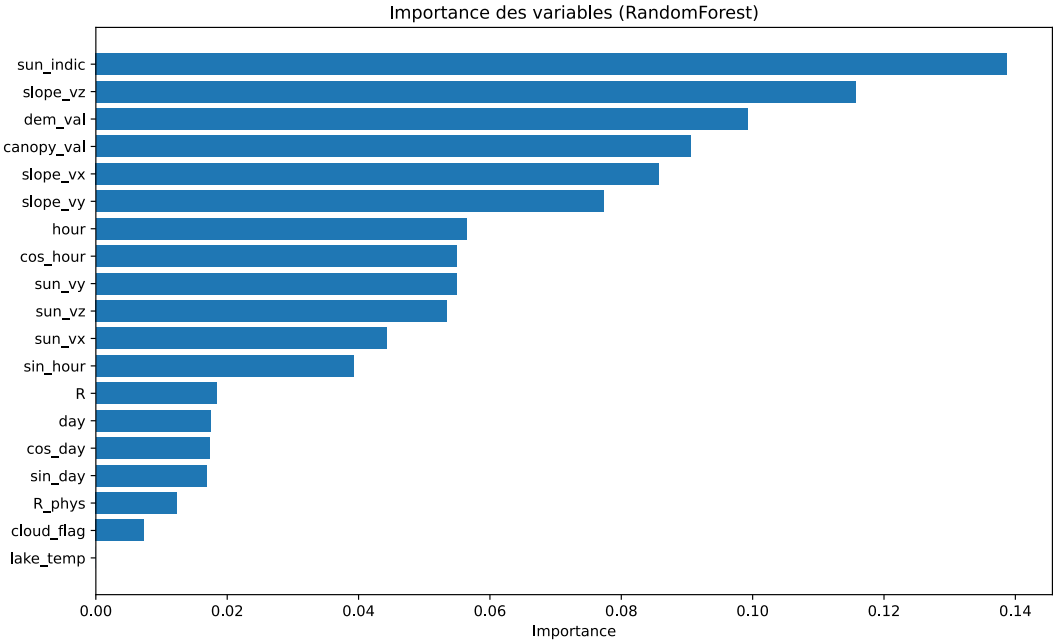
Des graphiques complémentaires, utiles à l'interprétation détaillée du comportement du modèle, sont présentés en annexe :

- Annexe G.1 page A-25 : dispersion des résidus par station de mesure, avec représentation de la densité sous forme de violons.
- Annexe G.2 page A-25 : comparaison entre les prédictions du modèle RF et les mesures manuelles réalisées par Geosat SA aux différents piliers géodésiques.

- Annexe G.3 page A-26 : évolution des résidus en fonction de la température observée et prédite.

Un nombre important de descripteurs a été introduit afin de décrire au mieux la topographie et les mécanismes physiques influençant la température au sol. Le graphique 3.20 présente l'importance relative de ces variables dans le modèle RF. Il ressort que le facteur dominant est la présence ou non de l'ensoleillement direct ; viennent ensuite les paramètres décrivant la géométrie du terrain (topographie, pente, orientation), puis l'heure de la journée et la position du soleil. Les paramètres liés à la couverture nuageuse apparaissent en dernière position, avec des poids très faibles, inférieurs à 0.02.

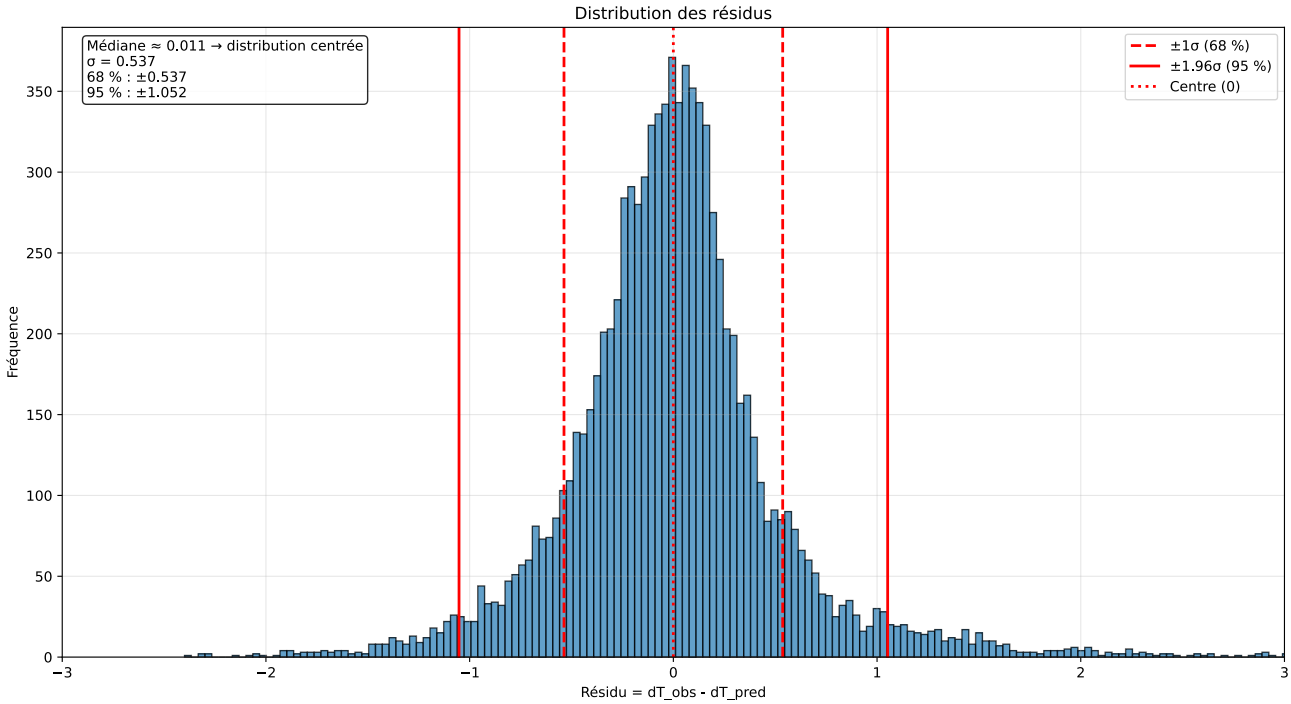
Ces résultats mettent clairement en évidence le rôle prépondérant de la topographie et de l'exposition dans la description et la prédiction de la température au sol.




**Graph. 3.20** – Répartition des descripteurs par ordre d'importance dans le modèle Random Forest

Un autre indicateur essentiel concerne la répartition des résidus sur le jeu de test. Pour rappel, l'apprentissage a été défini de manière à réserver 40 % des données au jeu de test, afin de valider la capacité de généralisation du modèle et de limiter les effets de sur-apprentissage.

Le graphique 3.21 présente la relation entre les valeurs observées de $dT$ (calculées à partir du gradient thermique) et les valeurs prédites par le modèle. La distribution des résidus suit une loi proche d'une loi normale centrée en zéro, indiquant l'absence de biais significatif dans l'apprentissage. La précision à 68 % obtenue sur ce jeu de données est de l'ordre de 0.5 °C, ce qui constitue un excellent résultat au regard de la configuration du site et les écarts météorologiques observés.




**Graph. 3.21** – Diagramme des résidus du modèle Random Forest

Les résultats de la prédiction spatiale de la température au sol suggèrent que cette approche est prometteuse pour la suite des développements. Comme illustré à la figure 3.24, les variations de température liées à la pente du terrain et à la présence de la canopée sont bien marquées et physiquement cohérentes. L'interprétation de surfaces planes, telles que les routes, comme étant plus chaudes que les zones situées au sommet des arbres ou sur certaines pentes, apparaît plausible et en adéquation aux mécanismes attendus.

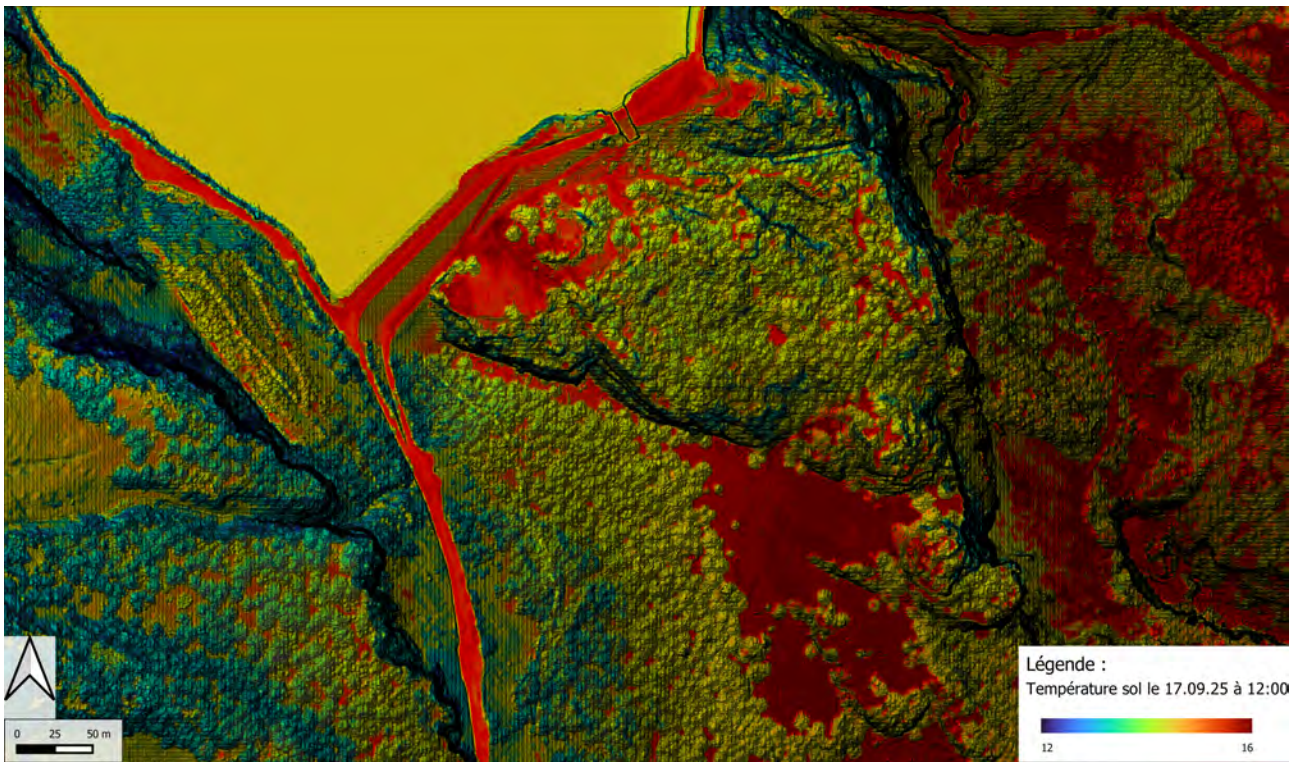



**Fig. 3.24** – Température au sol prédite par le modèle Random Forest le 17.09.2025 à 12 :00

Les premiers indicateurs de qualité montrent des résultats très satisfaisants. Il est toutefois nécessaire d'évaluer la robustesse du modèle et de vérifier si cette approche est plus performante qu'un modèle linéaire, tel que celui testé précédemment.

#### 3.5.3.5 Analyse de la qualité du modèle Random Forest

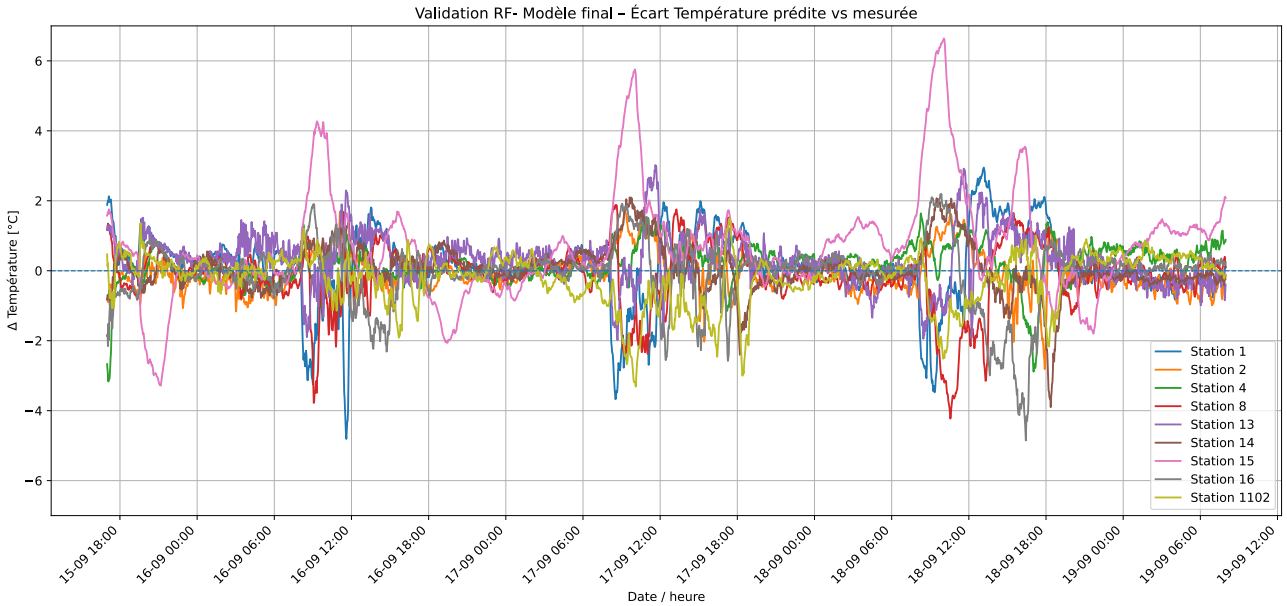
La robustesse du modèle et la qualité de la prédiction sont évaluées selon deux approches complémentaires :

1. la génération d'un nouveau modèle en excluant quatre stations météorologiques (piliers 1, 2, 4 et 8). Cette configuration introduit une rupture géographique importante, ces stations jouant un rôle clé dans la description du profil thermique du barrage (localisation présentée à l'annexe X page A-111) ;
2. la validation des prédictions à l'aide de mesures ponctuelles réalisées lors des observations géodésiques par le personnel de Geosat SA.

**Sans les stations 1, 2, 4 et 8**

Un nouveau modèle ainsi que de nouvelles cartes de prédiction de la température ont été générées afin de réaliser cette analyse. Les graphiques ci-dessous présentent la comparaison entre les mesures issues des stations météorologiques et les prédictions des deux modèles.

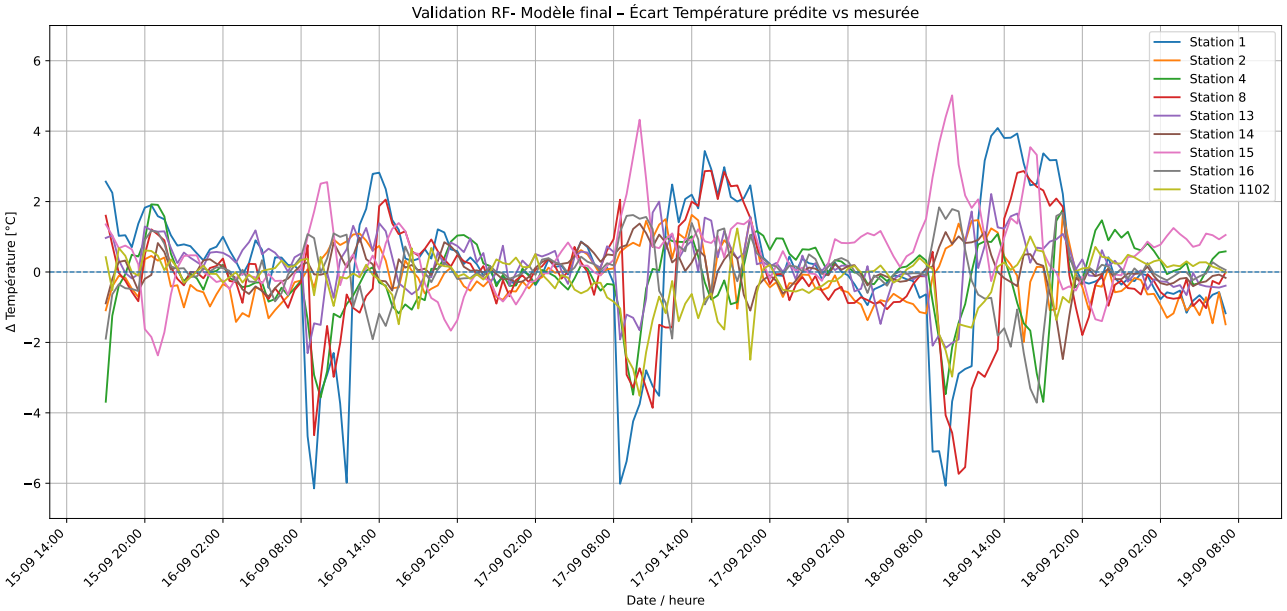
- **Modèle complet** : le graphique 3.22 montre que la prédiction obtenue avec l'ensemble des stations est globalement très satisfaisante. Les écarts entre les valeurs mesurées et prédites sont majoritairement compris entre −2 °C et 2 °C. Des variations plus importantes sont observées sur la station 15, où des comportements atypiques avaient déjà été identifiés. Malgré plusieurs tests (variation des paramètres, réduction du jeu de test, etc.), le modèle ne parvient pas à reproduire fidèlement la température mesurée à cette station. En revanche, comme présenté plus loin, le comportement au niveau du pilier géodésique associé diffère sensiblement. Lors de la journée du 18 septembre, caractérisée par un fort ensoleillement, des amplitudes de résidus plus élevées sont observées, pouvant atteindre 4 °C.




**Graph. 3.22** – Résidus entre les mesures de température aux stations et le modèle RF complet

- **Sans les stations 1, 2, 4 et 8** : le graphique 3.23 montre une prédiction plus bruitée durant les périodes diurnes, avec des amplitudes pouvant atteindre 6 °C. En revanche, le modèle conserve de très bonnes performances durant la nuit, avec des résidus faibles. Ce test met en évidence l'impact d'une réduction d'environ 50 % des données d'apprentissage combinée à une rupture géographique significative. Les stations exclues fournissent en effet des informations essentielles sur la variabilité thermique rive à rive et sur les effets d'exposition journaliers. Les amplitudes extrêmes sont principalement observées aux stations 1 et 8,

qui présentent des caractéristiques locales marquées : la station 1 est située en rive droite sous une falaise, fortement ensoleillée le matin puis rapidement à l'ombre dès 13 h, tandis que la station 8 est localisée au fond d'une gorge encaissée, rocheuse et soumise à un fort ensoleillement.




**Graph. 3.23** – Résidus entre les mesures de température aux stations et le modèle RF, sans les stations 1, 2, 4 et 8

### Comparaison modèle linéaire vs Random Forest

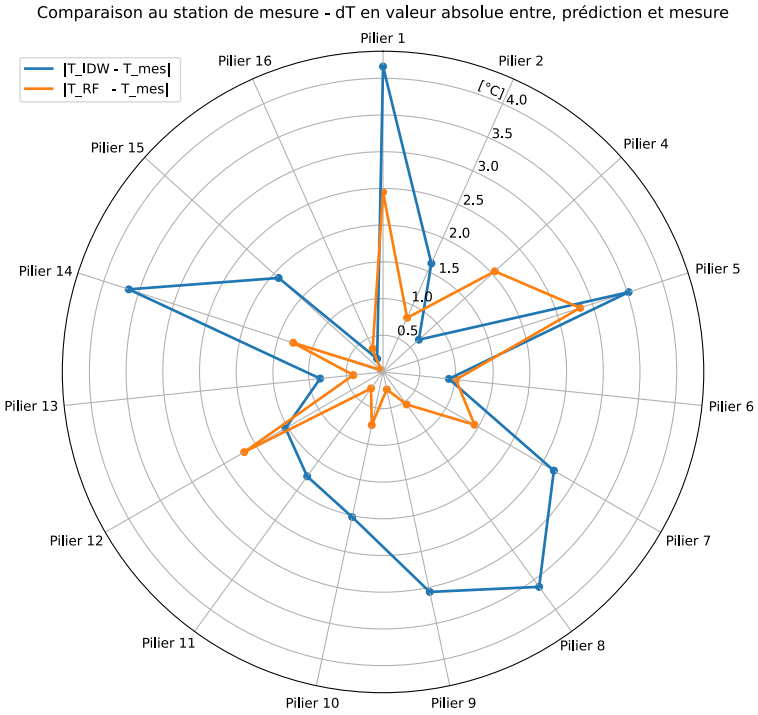
Le graphique en toile d'araignée 3.24 compare les écarts (en valeur absolue) entre deux stratégies d'estimation de la température au droit des piliers géodésiques :

- modèle linéaire moindres carrés avec IDW, noté $T_IDW$, déterminé à l'aide de la formulation 3.20, sans $\cos\alpha$ (estimation des paramètres puis interpolation IDW)
- modèle supervisé Random Forest (RF)

La comparaison met en évidence une amélioration nette en faveur du modèle RF : la distribution des résidus (courbe orange) est plus concentrée autour de zéro, avec des écarts maximaux limités à environ 2.6 °C, graphique complémentaire à l'annexe G.2 page A-25. Le modèle linéaire (courbe bleue) conserve une performance correcte, mais présente des résidus plus élevés, pouvant atteindre 4 °C, ce qui confirme une précision globale inférieure à celle du RF.

Il est également important de souligner que la problématique observée sur la station 15 n'apparaît pas dans cette comparaison. Au niveau du pilier géodésique correspondant, la température prédite par le modèle RF est cohérente avec la mesure manuelle effectuée par Geosat SA. Cela suggère qu'un phénomène local singulier affecte la station 15 (exposition immédiate, effet de site ou micro-environnement), sans nécessairement impacter la prédiction au niveau du pilier.

Une hypothèse plausible expliquant la performance plus limitée du modèle linéaire est liée à la configuration des stations météorologiques : celles-ci étant majoritairement situées à l'ombre, les effets de surface (route, roche, canopée, pente) sont partiellement sous-représentés, ce qui limite la capacité d'un modèle simple à généraliser les contrastes thermiques au sol.




**Graph. 3.24** – Répartition des écarts (valeurs absolues) aux mesures manuelles sur la semaine de mesure : comparaison du modèle RF et du modèle linéaire moindres carrées.

### 3.5.4 Validation du modèle RF

Les analyses précédentes montrent que la prédiction de la température au sol à l'aide d'une approche d'apprentissage supervisé est tout à fait envisageable. Les écarts observés, tant vis-à-vis des stations météorologiques que des mesures ponctuelles réalisées sur le terrain, présentent des résultats très satisfaisants.

La mise en œuvre de cette méthode nécessite toutefois un nombre important de descripteurs en entrée, et la génération de cartes de température à haute résolution demeure relativement coûteuse en ressources informatiques. Ces contraintes peuvent constituer des limites selon les contextes d'utilisation.

Néanmoins, le modèle météorologique basé sur Random Forest est retenu pour la suite des développements. La température du sol étant désormais correctement estimée, les travaux futurs s'orienteront vers la modélisation de la température de l'air, pour laquelle l'influence directe du sol est moindre. L'objectif est la mise en place d'un modèle quadridimensionnel (espace et temps) de la température de l'air.

## 3.6 Création d'un modèle 4D

A l'aide d'un modèle Random Forest il a été possible de prédire la température au sol, sur tout le site, avec un pas de temps de deux minutes. Cependant, les observations ne sont pas au sol mais en l'air. Il faut donc trouver un moyen de prédire la température de l'air en tout point de l'espace et par tout temps. Plusieurs problématiques subsistent : quel référence pour l'air ? comment modéliser la perte de chaleur du sol ? modélisation d'un système quadridimensionnel ?

### 3.6.1 Hypothèse d'une température référence de l'air $T_{3000}^{\mathrm{MCH}}$

La température de l'air, à une certaine altitude ou n'étant plus influencé par le sol, peut être considérée comme homogène. Et dans ces couches, un gradient adiabatique peut s'appliquer pour prédire la température en tout point en tout temps. Suite à des discussions avec MétéoSuisse, il est possible d'utiliser les données des ballons sondes de Payerne et les stations météorologiques automatiques situées sur les crêtes alpines afin de prédire une température *Météo Suisse* (MCH) air, à 3 000 m ($T_{3000}^{\mathrm{MCH}}$).

### Recherche des données de base

Concernant les données par radiosondages de Payerne, elles seront disponibles en OpenData sur le site de MétéoSuisse uniquement à partir du premier trimestre 2026. Les profils atmosphériques ont été obtenus à partir de la base de données de radiosondages de l'Université du Wyoming (University of Wyoming, 2025), qui possède une banque de données mondiale de capteurs météos en OpenData. Les autres données nécessaires sont disponibles sur le portail de MétéoSuisse.

- **Radiosondage** : téléchargement des mesures de 0 UTC et 12 UTC UTC pour les journées du 15 au 19 septembre 2025. Les données se présentent sous la forme d'un fichier texte, voir ci-dessous listing 3.2. Les colonnes utilisées sont *HGHT*, altitude du ballon et *TEMP* pour la température en degrés Celsius.

```
1   PAYERN, Switzerland
2   Latitude: 46.813 Longitude: 6.944
3   -------------------------------------------------------------------------------
4           Date         longitude   latitude     P       H       T      HR     Wind
5           UTC           [deg]       [deg]     [hPa]    [m]    [degC] [%]    [m/s]
6   -------------------------------------------------------------------------------
7   17.09.2025 11:04:43   6.9493      46.8108    850.0   1585.0   9.8    41.0    6.8
8   17.09.2025 11:04:43   6.9493      46.8108    849.8   1586.0   9.8    40.0    6.8
9   17.09.2025 11:04:44   6.9494      46.8108    849.2   1592.0   9.7    39.0    6.8
10  17.09.2025 11:04:45   6.9495      46.8108    848.5   1600.0   9.7    37.0    6.8
11  17.09.2025 11:04:46   6.9496      46.8108    847.7   1607.0   9.7    36.0    6.8
12  17.09.2025 11:04:47   6.9497      46.8108    847.0   1614.0   9.7    35.0    6.8
13  17.09.2025 11:04:48   6.9498      46.8108    846.4   1620.0   9.7    34.0    6.8
14  17.09.2025 11:04:49   6.9499      46.8108    845.8   1626.0   9.7    34.0    6.7
15  17.09.2025 11:04:50   6.9500      46.8108    845.2   1632.0   9.7    34.0    6.7
16  17.09.2025 11:04:51   6.9501      46.8109    844.6   1638.0   9.7    33.0    6.7
17  17.09.2025 11:04:52   6.9502      46.8109    844.0   1643.0   9.7    32.0    6.7
18  17.09.2025 11:04:53   6.9502      46.8109    843.4   1649.0   9.7    32.0    6.6
```

**Listing 3.2** – Extrait des données brutes d'un profil de radiosondage du 17.09.2025 à 11h04 UTC (site de Payerne)

- **Station météorologique** : les données des stations des Diablerets et Jungfraujoch (JUN) sont téléchargées pour les journées du 15 au 19 septembre. Ces deux stations présentent l'avantage d'être très hautes en altitude et les effets sols sont négligeables.

### Pré-traitement des données

- **Radiosondage** : ces données vont permettre de déterminer le gradient adiabatique pour deux périodes de la journée, une à 0 UTC et la deuxième à 12 UTC (rappel heure local = UTC+2 h). Ensuite le gradient sera interpolé linéairement afin d'obtenir une valeur synchronisée pour chaque enregistrement des données météos du site de Zeuzier soit à 2 min.

  Le calcul du gradient va être réalisé entre deux bornes altimétrique $[2500.00 - 4000.00]$[m]. Le principe est le suivant :

**Fonction** *ComputeGradient*(*df, alt_col, temp_col,* $z_{\min}$, $z_{\max}$, *t*)
- $t \leftarrow df[date_col]$
- $z \leftarrow df[alt_col]$
- $T \leftarrow df[temp_col]$
- **Sélectionner** les points tels que $z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$,$t$
- $(z_s, T_s, t) \leftarrow$ données filtrées
- **Calculer** la régression linéaire $T(z,t) = a\,z + b$ sur $(z_s, T_s)$
- $(a, b) \leftarrow$ Polyfit$(z_s, T_s, 1)$
- **return** $\Gamma_{sonde^{MCH}}(t)$ *gradient* $\mathrm{°C}/m$ *au temps* $t$ , $b$ *ordonnée à l'origine*

**Algorithme 3.2 :** Principe du calcul du gradient $\Gamma$ par régression linéaire, pour les données par radiosondage, au temps des mesures $t$

Le résultat de ce calcul est un fichier texte avec par session, un gradient en [°C/m] et sa précision, extrait dans le tableau 3.11. On constate que le gradient peut varier de 0.003 °C/m entre jour et nuit (ligne en bleu). Cependant, la nuit quand l'atmosphère est la plus comparable dans le temps on retrouve des valeurs proches d'un gradient adiabatique standard à savoir −0.006 5 °C/m, la moyenne des nuits des mesures par radiosondage correspond parfaitement à la valeur théorique.

| **Fichier** | **Date** | **Heure** | **Statut** | $n_{\textbf{points}}$ | $\Gamma_{\textbf{sonde}}$ [°C m$^{-1}$] | $\sigma_\Gamma$ [°C m$^{-1}$] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2025091500-06610.csv | 14.09.2025 | 23 :00 :05 | ok | 3.07 | −6.010 101 | 1.28E−4 |
| 2025091512-06610.csv | 15.09.2025 | 11 :00 :05 | ok | 2.85 | −6.563 408 | 8.07E−5 |
| 2025091600-06610.csv | 15.09.2025 | 23 :00 :05 | ok | 2.77 | −6.730 420 | 3.74E−5 |
| 2025091612-06610.csv | 16.09.2025 | 11 :00 :03 | ok | 2.50 | −3.940 415 | 6.00E−5 |
| 2025091700-06610.csv | 16.09.2025 | 23 :00 :06 | ok | 2.86 | −6.459 582 | 1.73E−5 |
| 2025091712-06610.csv | 17.09.2025 | 11 :00 :28 | ok | 3.23 | −3.062 943 | 6.33E−5 |
| 2025091800-06610.csv | 17.09.2025 | 23 :00 :05 | ok | 2.90 | −5.293 178 | 3.95E−5 |
| 2025091812-06610.csv | 18.09.2025 | 11 :00 :00 | ok | 3.22 | −6.117 538 | 3.41E−5 |
| 2025091900-06610.csv | 18.09.2025 | 23 :00 :07 | ok | 2.99 | −8.033 891 | 4.91E−5 |
| 2025091912-06610.csv | 19.09.2025 | 11 :01 :05 | ok | 2.60 | −8.604 368 | 1.58E−5 |

*Gradient moyen nocturne observé :* $\overline{\Gamma} \approx -0.0065\,°\mathrm{C}/m$.

**Tab. 3.11** − Extrait des résultats du calcul des gradients thermiques par radiosondage entre les altitudes 2 500 et 4 000 m

#### 3.6.1.1 Interpolation temporelle du gradient thermique

À partir des gradients de température en air libre, sans contrainte liée au sol, il est possible de déterminer une température de l'air à une altitude donnée. Afin d'obtenir un gradient thermique avec un pas de temps identique à celui des mesures acquises sur le terrain, le gradient issu des radiosondages de MétéoSuisse, noté $\Gamma^{\mathrm{MCH}}_{\mathrm{sonde}}$, est interpolé linéairement dans le temps entre deux déterminations successives effectuées à 0 UTC et 12 UTC.

L'interpolation temporelle du gradient est réalisée avec la relation suivante :

$$\Gamma^{\mathrm{MCH}}_{\mathrm{sonde}}(t) = \Gamma^{\mathrm{MCH}}_{\mathrm{sonde}}(t_0) + \frac{t - t_0}{t_{12} - t_0} \left( \Gamma^{\mathrm{MCH}}_{\mathrm{sonde}}(t_{12}) - \Gamma^{\mathrm{MCH}}_{\mathrm{sonde}}(t_0) \right), \quad t \in [t_0, t_{12}] \tag{3.25}$$

où :

- $t$ : temps interpolé [min], le pas est fixé à $\Delta t = 2$ minutes, de sorte que $t = k \cdot \Delta t$
- $t_0$ : temps du radiosondage à 0 UTC [min]
- $t_{12}$ : temps du radiosondage à 12 UTC [min]

#### 3.6.1.2 Température de référence à une altitude donnée $T^{\mathrm{MCH}}_{3000}$

À l'aide des températures mesurées aux stations météorologiques DIA et JUN, ainsi que du gradient thermique interpolé $\Gamma^{\mathrm{MCH}}_{\mathrm{sonde}}(t)$, il est possible de déterminer, pour chaque pas de temps $t$, une température de référence à l'altitude $H_{3000} = 3000\,\mathrm{m}$.

Un échantillon des résultats obtenus est présenté dans le tableau 3.12. Sur l'ensemble des mesures de la semaine, les résidus observés sont compris entre −0.8 et 2.8 °C. Compte tenu des simplifications physiques retenues pour la modélisation de l'atmosphère et des distances séparant les stations de mesure, ces écarts sont jugés acceptables.

La température de référence $T^{\mathrm{MCH}}_{3000}$ est calculée comme la moyenne des températures extrapolées depuis chacune des stations selon le gradient thermique interpolé :

$$T_{3000}^{\mathrm{MCH}}(t) = \frac{\left[T_{\mathrm{DIA}}^{\mathrm{MCH}}(t) + \Gamma_{\mathrm{sonde}}^{\mathrm{MCH}}(t)\,(H_{3000} - H_{\mathrm{DIA}})\right] + \left[T_{\mathrm{JUN}}^{\mathrm{MCH}}(t) + \Gamma_{\mathrm{sonde}}^{\mathrm{MCH}}(t)\,(H_{3000} - H_{\mathrm{JUN}})\right]}{2} \quad [\mathrm{°C}] \qquad (3.26)$$

avec :

| | |
|---|---|
| $T_{\mathrm{DIA}}^{\mathrm{MCH}}(t)$, $T_{\mathrm{JUN}}^{\mathrm{MCH}}(t)$ | : températures mesurées par MétéoSuisse à DIA et JUN au temps $t$ [°C] |
| $\Gamma_{\mathrm{sonde}}^{\mathrm{MCH}}(t)$ | : gradient thermique interpolé issu des radiosondages [°C/m] |
| $H_{\mathrm{DIA}}$, $H_{\mathrm{JUN}}$ | : altitudes des stations DIA et JUN [m] |
| $H_{3000}$ | : altitude de référence (3000 m) |

| **Date** | **DIA** [°C] | **JUN** [°C] | $\Gamma_{\mathbf{sonde}}$ [°C m$^{-1}$] | **DIA**–$T_{\mathbf{3000}}^{\mathbf{MCH}}$ [°C] | **JUN**–$T_{\mathbf{3000}}^{\mathbf{MCH}}$ [°C] | $\overline{T}_{\mathbf{3000}}^{\mathbf{MCH}}$ [°C] | **v** [°C] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 15.09.2025 17 :00 | 4.1 | 1.3 | −6.6 | 3.9 | 5.1 | 4.5 | 0.6 |
| 16.09.2025 00 :00 | 2.3 | −2.4 | −6.5 | 2.1 | 1.3 | 1.7 | −0.4 |
| 16.09.2025 12 :00 | 2.0 | −1.8 | −4.2 | 1.9 | 0.6 | 1.3 | −0.6 |
| 17.09.2025 00 :00 | 0.4 | −3.8 | −6.2 | 0.2 | −0.3 | −0.1 | −0.3 |
| 17.09.2025 12 :00 | 6.0 | −0.4 | −3.2 | 5.9 | 1.5 | 3.7 | −2.2 |
| 18.09.2025 00 :00 | 7.0 | 2.8 | −5.4 | 6.8 | 5.9 | 6.4 | −0.4 |
| 18.09.2025 12 :00 | 11.7 | 5.1 | −6.3 | 11.5 | 8.7 | 10.1 | −1.4 |
| 19.09.2025 00 :00 | 12.1 | 5.2 | −8.1 | 11.8 | 9.8 | 10.8 | −1.0 |
| 19.09.2025 07 :00 | 12.5 | 5.5 | −8.4 | 12.2 | 10.3 | 11.3 | −0.9 |

**Tab. 3.12** – Extrait de températures interpolées à $T_{3000}^{\mathrm{MCH}}$, à partir des données des stations DIA et JUN, avec le gradient adiabatique calculé des radiosondages. L'écart type standard sur les données de toute la semaine est à 0.6 °C.

Dans le cadre du modèle adopté, $T_{3000}^{\mathrm{MCH}}(t)$ est assimilé à une surface de température idéale, plane et infinie, définie à l'altitude de référence $H_{3000}$, et caractérisant l'état thermique moyen de l'atmosphère au-dessus du site d'étude à l'instant $t$.

### 3.6.2 Température cible à $T_{\mathbf{400sol}}^{MCH}$

Les données issues du radiosondage et des stations DIA et JUN montrent que l'air possède un gradient adiabatique stable loin du sol. L'idée est de convenir d'une surface théorique, *cible*, à laquelle il est possible de considérer que le sol n'a plus d'influence et que au delà de cette surface c'est le gradient standard ($\Gamma_{\mathrm{sonde}}^{\mathrm{MCH}}$) qui peut prendre le relais.

Sur les conseils des météorologues, de *MétéoSuisse*, il est raisonnable de considérer qu'à environ 400 m du sol (AGL(Above Ground Level)), les effets dus au sols sont nuls.

#### Création surface cible 400 mAGL

Cette surface est un décalage du modèle numérique de terrain sol de 400 mAGL. Ce décalage est à réaliser perpendiculairement à la ligne de pente et non pas verticalement. Si on est en plaine, le décalage peut s'apparenter à une translation altimétrique du terrain, figure 3.25. Mais dans le cas d'un site avec une topographie accidentée, on souhaite qu'en tout point la surface cible soit à 400 mAGL, donc si la vallée est trop étroite le décalage entre le fond et la surface cible est plus importante, comme le montre la figure 3.26.

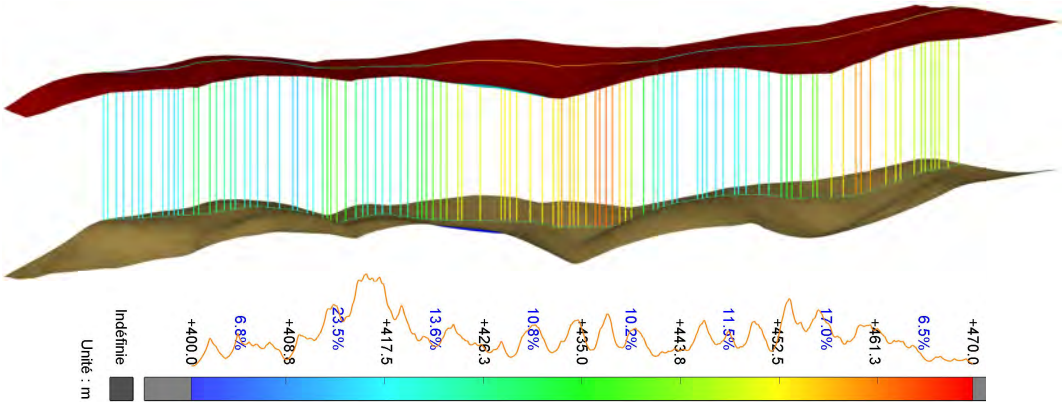



**Fig. 3.25** – Illustration du décalage de 400 mAGL dans un profil avec une topographie plate.

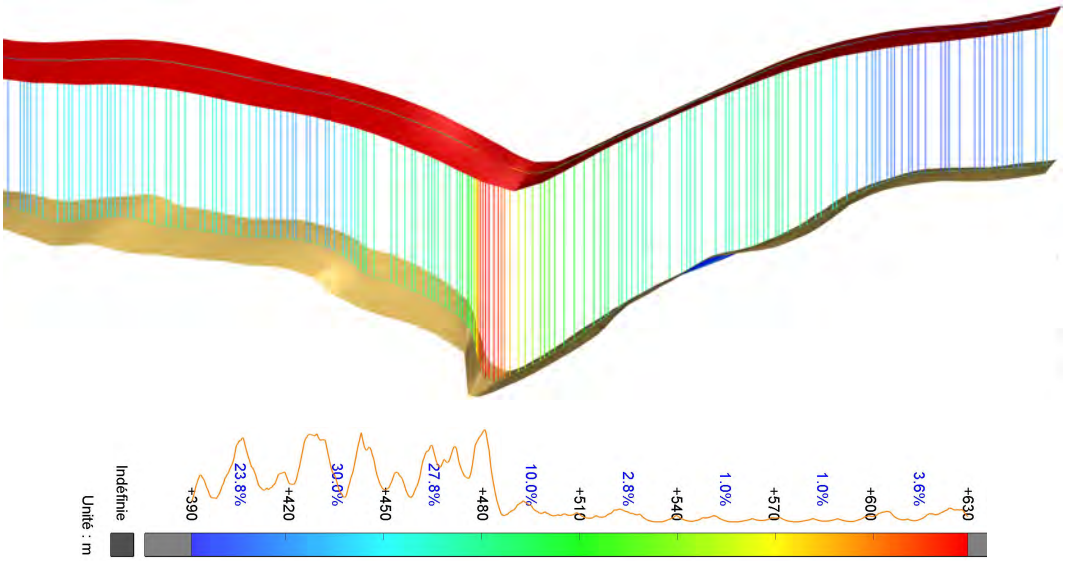



**Fig. 3.26** – Illustration du décalage de 400 mAGL dans un profil avec une topographie accidentée.

La surface cible est lissée, afin de perdre les petits reliefs, et représente une surface d'air, température, non perturbée par le terrain, figure 3.27.

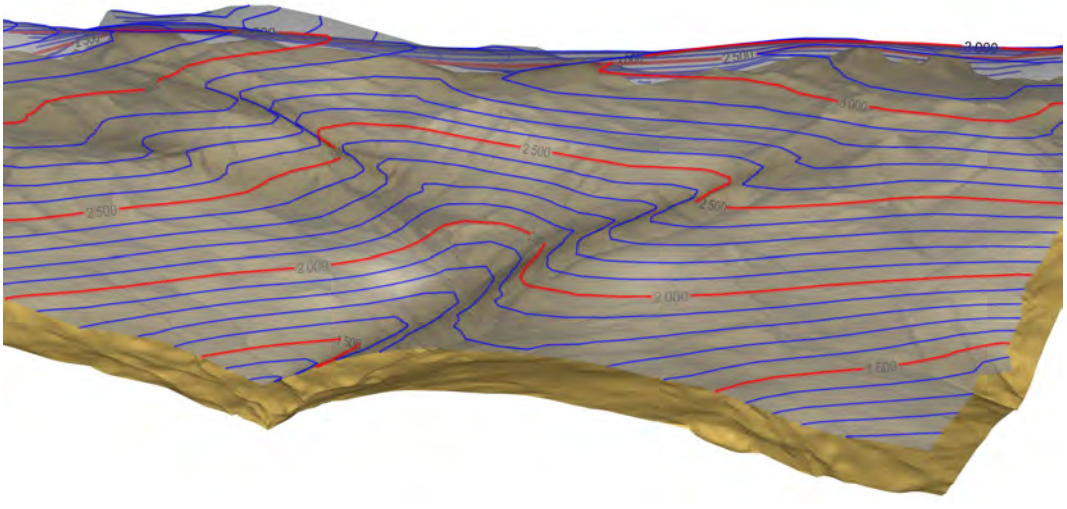


**Fig. 3.27** – Visualisation de la surface cible pour calcul de la température $T^{MCH}_{400\text{sol}}$.

### Calcul de la température cible spatialisée à 400 mAGL

À partir de la température de référence $T^{\mathrm{MCH}}_{3000}(t)$ et du gradient thermique interpolé $\Gamma^{\mathrm{MCH}}_{\mathrm{sonde}}(t)$, il est possible de déterminer, pour chaque instant $t$, un champ spatial de température de l'air sur la surface cible située à 400 mAGL au-dessus du sol.

La température $T^{\mathrm{MCH}}_{400\mathrm{sol}}$ est ainsi définie comme une fonction de la position $(E, N, H_{400\mathrm{sol}})$ d'un point. Les variations de températures sont donc exclusivement liées à forme de la surface et de la topographie du terrain, le gradient de température est considéré comme constant sur toute la surface au temps $t$. Le transfert de température s'effectue avec la formule suivante :

$$T^{\mathrm{MCH}}_{400\mathrm{sol}}(ENH_{400\mathrm{sol}}, t) = T^{\mathrm{MCH}}_{3000}(t) + \Gamma^{\mathrm{MCH}}_{\mathrm{sonde}}(t)\,(H_{400\mathrm{sol}}(E,N) - H_{3000}) \quad [°\mathrm{C}] \tag{3.27}$$

| | |
|---|---|
| $T^{\mathrm{MCH}}_{400\mathrm{sol}}(x,y,t)$ | : température de l'air à 400 mAGL au point $(E,N)$ et au temps $t$ [°C] |
| $T^{\mathrm{MCH}}_{3000}(t)$ | : température de référence définie sur la surface isotherme à 3 000 m [°C] |
| $\Gamma^{\mathrm{MCH}}_{\mathrm{sonde}}(t)$ | : gradient thermique interpolé, supposé spatialement homogène [°C/m] |
| $H_{400\mathrm{sol}}(E,N)$ | : altitude d'un point sur la surface à 400 mAGL au point $(E,N)$ [m] |
| $H_{3000}$ | : altitude de la surface de référence (3 000 m) |

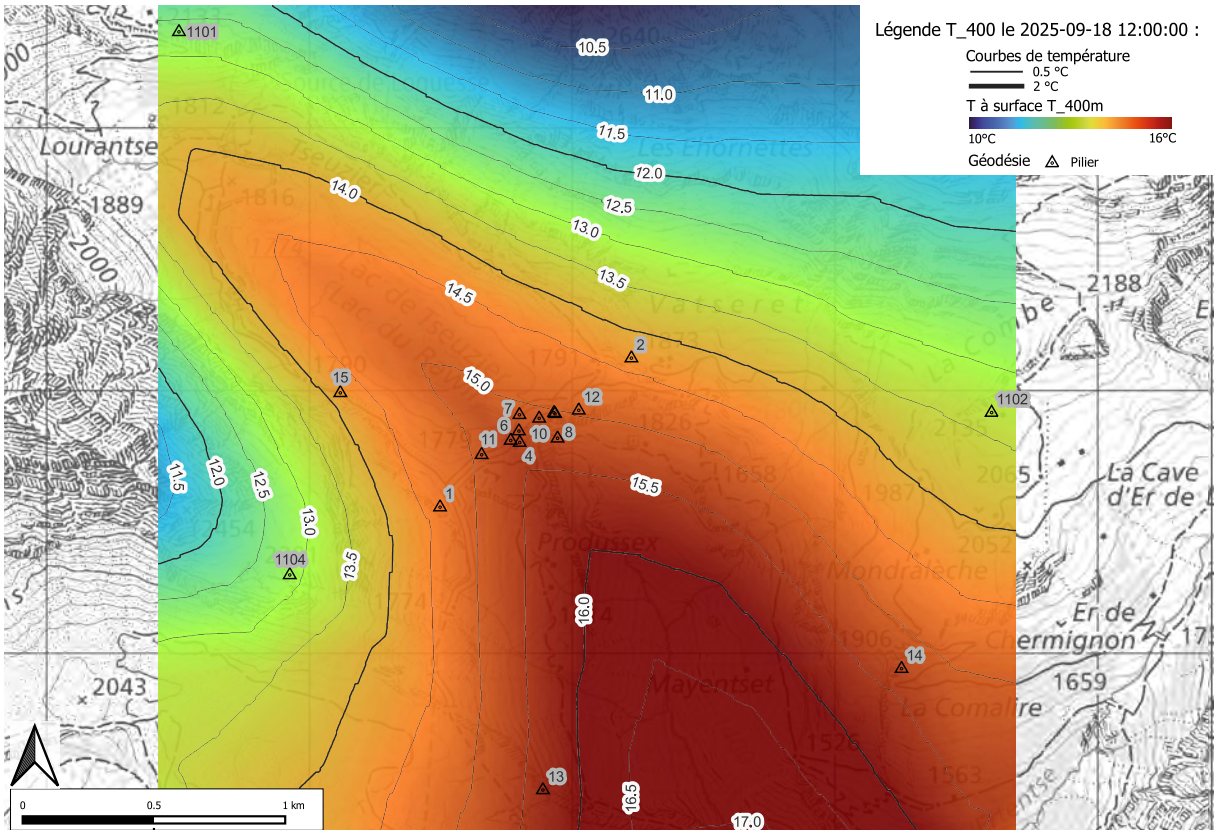



**Fig. 3.28** – Visualisation de la température à la surface 400 mAGL, à la date du 18.09.2025 à 12 :00.

Comme le montre la figure 3.28, il n'y a pas de courtes longueurs d'onde, les effets sols ne sont pas présents et la température évolue en fonction de la forme géométrique de la surface 400 mAGL.

On possède maintenant deux éléments essentiels, une température sol pour toute la surface du site et une température sur une surface à 400 mAGL pour tous les temps $t$. L'étape suivante est donc de trouver une fonction qui permette de passer de la température sol à la température $T^{\mathrm{MCH}}_{400\mathrm{sol}}$.

### 3.6.3 Modèle de transfert vertical $T_{sol}$ vers $T^{\mathbf{MCH}}_{\mathbf{400sol}}$

Comme l'a montré le modèle RF, la température sol présente de courtes longueurs d'onde. Cependant ces effets ne doivent pas être visibles en s'éloignant du sol, la température devenant plus homogène en s'éloignant du sol.

Le modèle de transfert vertical de température doit donc permettre de représenter une décroissance rapide de l'influence thermique du sol dans les couches basses, suivie d'une transition plus progressive jusqu'à atteindre une température de référence à une hauteur donnée, notée $T_{\text{cible}} = T^{\text{MCH}}_{400\text{sol}}$. Cette hauteur correspond à la surface du terrain décalé de 400 mAGL, est appelée dans la suite *surface cible*, les divers développements liés à la surface cible et sa température sont réalisés dans le chapitre 3.6.2.

L'objectif des développements présentés ci-après est de construire un champ de température de l'air, quadridimensionnel, combinant la géométrie tridimensionnelle de l'espace et la composante temporelle :

$$T_{\text{air}}(t, E, N, H) \quad [\text{°C}] \tag{3.28}$$

où :

| | |
|---|---|
| $t$ | : temps, avec un pas de 2 min |
| $E, N, H$ | : position 3D du point $[m]$ |

Afin de formaliser le problème, les notations suivantes sont introduites :

| | |
|---|---|
| $H_{\text{sol}}$ | : altitude du sol issue du MNT |
| $\Delta H(E, N)$ | : hauteur d'un point au-dessus du sol : $H(T_{\text{air}}) - H_{\text{sol}}$ $[m]$ |
| $Z^{\text{cible}}_{\text{agl}}$ | : hauteur sur sol de la surface cible |
| $DH_{\text{ref}}$ | : distance moyenne entre sol et surface de référence, coefficient fixe |

L'identification d'une fonction satisfaisant simultanément l'ensemble des contraintes mathématiques, physiques et interprétatives constitue un problème important. À des fins exploratoires, un outil d'intelligence artificielle générative a été utilisé afin de proposer des formes fonctionnelles candidates et d'orienter la recherche bibliographique. Les formulations retenues font ensuite l'objet d'analyses, de justifications et de validations détaillées dans la suite de ce travail.

#### 3.6.3.1 Principe général

Le profil vertical de température de l'air doit vérifier les conditions aux limites suivantes :

- au niveau du sol avec ($\Delta H = 0$) :

$$T_{\text{air}}(t, E, N, 0) = T_{\text{sol}}(t, E, N) \tag{3.29}$$

- à la surface cible ($\Delta H = Z^{\text{cible}}_{\text{agl}}$) :

$$T_{\text{air}}(t, E, N, Z^{\text{cible}}_{\text{agl}}) = T_{\text{cible}}(t, E, N). \tag{3.30}$$

Ces deux températures étant connues, la température de l'air à une hauteur intermédiaire peut être exprimée comme une interpolation pondérée entre la température du sol et la température cible :

$$T_{\text{air}}(t, E, N, H) = T_{\text{sol}}(t, E, N) + w(u, \theta, Z^{\text{cible}}_{\text{agl}}) \cdot [T_{\text{cible}}(t, E, N) - T_{\text{sol}}(t, E, N)] \quad [\text{°C}] \tag{3.31}$$

La fonction $w$ joue le rôle d'un coefficient de transition borné dans l'intervalle $[0, 1]$, dépendant d'un ensemble de paramètres $\theta$ à estimer, avec :

$$\theta = (a_0, a_1, a_2, b_0, b_1) \tag{3.32}$$

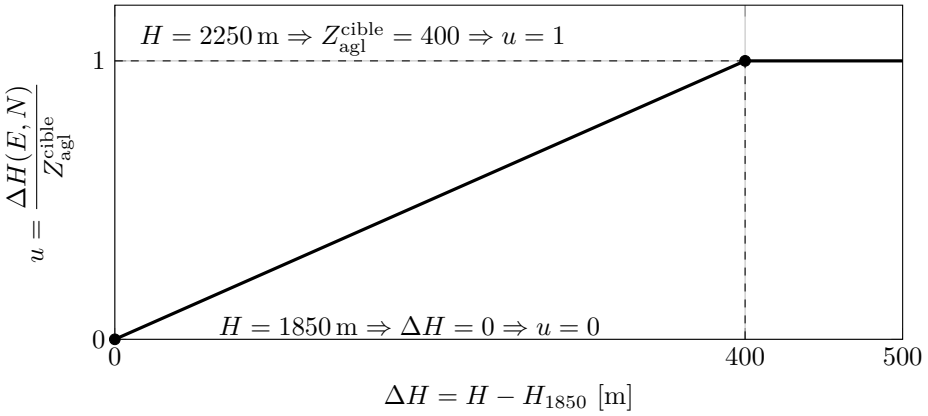
#### Dénivelée normalisée

Dans la fonction $w$ une variable complémentaire est définie, $u$ représentant une hauteur normalisée sur sol :

$$u = \frac{\Delta H(E,N)}{Z_{\text{agl}}^{\text{cible}}} \quad \in [0,1] \tag{3.33}$$

La formulation de la fonction $w(u, \theta, Z_{\text{agl}}^{\text{cible}})$ doit posséder les propriétés suivantes :

- si $u = 0$ alors $w = 0$ et $T_{\text{air}} = T_{\text{sol}}$
- si $u = 1$ alors $w = 1$ et $T_{\text{air}} = T_{\text{cible}}$




**Graph. 3.25** – Visualisation de l'évolution de la normalisation de la dénivelée entre $[0, 1]$, pour une altitude $Z_{\text{agl}}^{\text{cible}} = 400$.

#### Justification de l'introduction d'une dénivelée normalisée

La variable $u$ est introduite sous forme normalisée afin d'exprimer la hauteur sous une forme relative, indépendante de la dénivelée absolue entre le sol et la surface cible. Cette normalisation permet d'utiliser une fonction de poids unique, applicable avec toutes les dénivelées. Dans le cas contraire, des exceptions ou adaptations auraient été nécessaires. Le bornage de $u$ dans l'intervalle $[0, 1]$ améliore la stabilité numérique du modèle et facilite l'estimation des paramètres lors de la phase d'apprentissage.

La formulation de base étant posée, il convient de décrire la fonction de poids $w$ de même que les paramètres $\theta$.

### 3.6.3.2 Fonction de poids

La fonction de poids doit permettre de modéliser une transition non linéaire entre la température de surface et la température cible, caractérisée par une atténuation rapide de l'influence du sol dans les couches basses, suivie d'une transition plus progressive avec l'altitude. Elle doit cependant rester strictement bornée dans l'intervalle $[0, 1]$.

#### Fonction de base : Loi de Weibull

La fonction de pondération adoptée s'appuie sur la fonction de répartition de la loi de Weibull (Weibull, 1951), également appelée exponentielle étirée. Cette loi est couramment utilisée en ingénierie et en physique pour modéliser des phénomènes à saturation progressive et à décroissance exponentielle. Sa fonction de répartition s'écrit (NIST/SEMATECH, 2024) (Wikipédia, 2025) :

$$F(u) = 1 - \exp(-k\,u^p)\,, \quad u \geq 0, \tag{3.34}$$

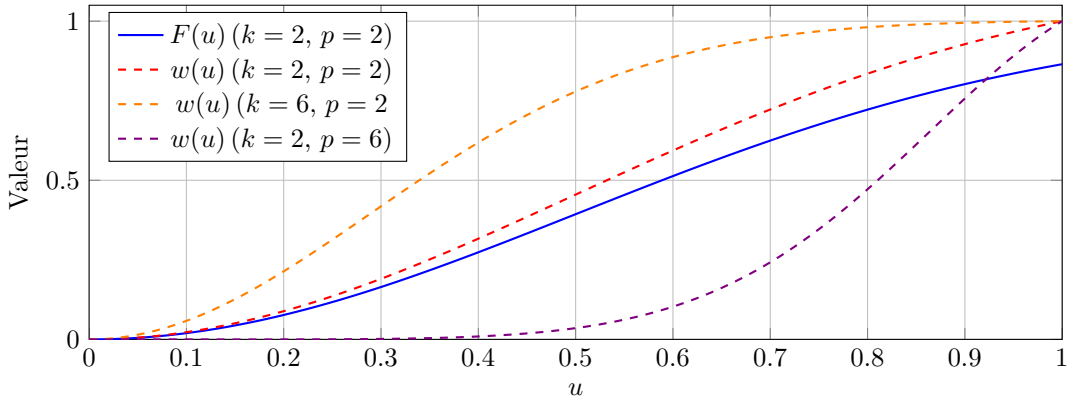
où $k > 0$ est un paramètre d'échelle et $p > 0$ un paramètre de forme.

Ici, la variable $u$ est normalisée sur l'intervalle $[0, 1]$. La fonction de répartition standard ne vérifiant pas $F(1) = 1$,

une normalisation est appliquée afin d'obtenir une fonction de poids bornée et interprétable :

$$\begin{aligned} w(u) &= \frac{F(u) - F(0)}{F(1) - F(0)} \\ &= \frac{1 - \exp\left(-k\, u^p\right)}{1 - \exp(-k)} \end{aligned} \tag{3.35}$$

Cette normalisation garantit les propriétés $w(0) = 0$ et $w(1) = 1$, indispensables à la validité de l'équation (3.31).




**Graph. 3.26** – Comparaison entre la fonction de répartition de Weibull $F(u)$ et sa version normalisée $w(u)$ sur l'intervalle $u \in [0, 1]$ avec différents paramètres.

La représentation ci-dessus 3.26 courbe bleue, $F(u)$ met bien en évidence la nécessité de normaliser la loi de Weidbull afin que la fonction de poids $w$ atteigne la valeur de 1 quand $u = 1$. Dans le cas du transfert de température c'est primordial. Cette condition doit être remplie afin que la formule 3.31 soit validée si $\Delta H(E, N) = Z_{\text{agl}}^{\text{cible}}$ alors toute la différence sol-surface cible est ajouté à $T_{\text{sol}}$ afin que $T_{\text{air}} = T_{\text{cible}}$.

### Rôle des paramètres $k$ et $p$

Les paramètres $k$ et $p$ contrôlent respectivement la vitesse globale de transition et la courbure de la fonction de poids près du sol. Une augmentation de $k$ conduit à une transition plus rapide vers la température cible, tandis qu'une augmentation de $p$ renforce la concentration de l'effet dans les couches proches du sol.

Afin de simplifier la notation dans la suite des développements le paramètre $\theta$ est décomposé en deux groupes :

$$\theta = (\theta_k, \theta_p) \tag{3.36}$$

tel que :

$$\begin{aligned} \theta_k &= (a_0, a_1, a_2) && : \text{contrôle du paramètre } k \\ \theta_p &= (b_0, b_1) && : \text{contrôle le paramètre } p. \end{aligned}$$

### Dépendance des paramètres à $Z_{\text{agl}}^{\text{cible}}$

La dépendance de la fonction de poids à $Z_{\text{agl}}^{\text{cible}}$ est introduite de manière indirecte par l'intermédiaire des paramètres $k$ et $p$. Cette approche permet de conserver une forme fonctionnelle stable tout en adaptant la transition aux conditions géométriques locales.

- $k(Z_{\text{agl}}^{\text{cible}})$

Le paramètre $k(Z_{\text{agl}}^{\text{cible}})$ contrôle la vitesse globale de la transition. Il est modélisé par une fonction exponentielle afin de garantir des valeurs de $k > 0$ d'éviter des variations non réelles, $w$ ne serait plus compris dans l'intervalle $[0; 1]$ :

$$k(Z_{\text{agl}}^{\text{cible}}, \theta_k) = \exp\left( \underbrace{a_0}_{\text{niveau moyen}} + \underbrace{a_1 \ln(Z_{\text{agl}}^{\text{cible}})}_{\text{tendance logarithmique}} + \underbrace{a_2\big(\alpha(Z_{\text{agl}}^{\text{cible}})\big)}_{\text{effet sur l'épaisseur}} \right) \tag{3.37}$$

avec :

| | |
|---|---|
| $\theta_k(a_0, a_1, a_2)$ | : des coefficients à déterminer par apprentissage |
| $\alpha(Z_{\text{agl}}^{\text{cible}})$ | : un coefficient complémentaire qui permet de contrôler la perte proche du sol |

Une courte description des effets de chaque terme dans la formulation de $k$ :

| | |
|---|---|
| $k$ | : paramètre de la pente verticale du transfert de température, contrôle la transition entre la température du sol $T_{\text{sol}}$ et la température cible $T_{\text{cible}}$ |
| $a_0$ | : terme global d'ancrage fixant le niveau moyen de $k$ lorsque l'épaisseur verticale à interpoler $Z_{\text{agl}}^{\text{cible}}$ est proche de l'épaisseur de référence $DH_{\text{ref}}$. |
| $a_1 \ln(Z_{\text{agl}}^{\text{cible}})$ | : terme de tendance logarithmique introduisant une variation lente et continue de $k$ avec l'épaisseur verticale à interpoler. |
| $a_2\,\alpha(Z_{\text{agl}}^{\text{cible}})$ | : terme structurel non linéaire modulant fortement la valeur de $k$ en fonction de l'écart relatif entre $Z_{\text{agl}}^{\text{cible}}$ et l'épaisseur de référence $DH_{\text{ref}}$. Il accentue la raideur du profil pour les couches minces et l'atténue pour les couches épaisses. |

Le coefficient multiplicatif de $a_2$ est fonction de la hauteur de référence moyenne et de celle de la surface cible au profil vertical, tel que :

$$\alpha(Z_{\text{agl}}^{\text{cible}}) = \frac{DH_{\text{ref}}}{Z_{\text{agl}}^{\text{cible}}} - 1, \quad Z_{\text{agl}}^{\text{cible}} > 0 \tag{3.38}$$

- $p(Z_{\textbf{agl}}^{\textbf{cible}})$

Le paramètre $p(Z_{\text{agl}}^{\text{cible}})$ agit sur la courbure de la fonction près du sol. La forme $p(Z_{\text{agl}}^{\text{cible}}) = 1 + \exp(\cdot)$ impose naturellement $p > 1$, condition nécessaire pour obtenir une transition plus rapide à proximité du sol tout en conservant une continuité et une variabilité suffisante :

$$p(Z_{\text{agl}}^{\text{cible}}, \theta) = 1 + \exp\big(b_0 + b_1 \cdot \log(Z_{\text{agl}}^{\text{cible}})\big) \tag{3.39}$$

et :

| | |
|---|---|
| $\theta_p(b_0, b_1)$ | : coefficient à déterminer par apprentissage |

#### 3.6.3.3 Contrôle vitesse de transition avec $w$

Les démonstrations précédentes ont permis de mettre en avant la forme mathématique de l'unité de poids et les effets des différents coefficients à déterminer. La fonction permet d'obtenir une unité de poids garantissant le passage d'une température du sol à celle de l'air et contrainte à la température de la surface cible.

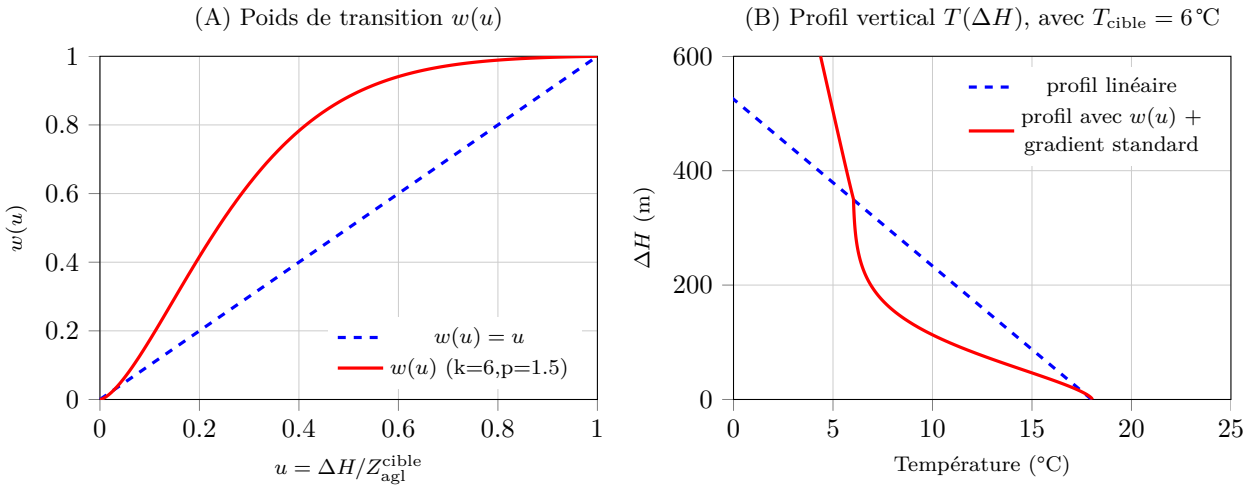
On peut donc écrire $w$ sous la forme :

$$w(u, \theta, \Delta H) = \frac{1 - \exp\left(-k(Z_{\text{agl}}^{\text{cible}}, \theta_k) \cdot\ u^{\,p(Z_{\text{agl}}^{\text{cible}}, \theta_p)}\right)}{1 - \exp\left(-k(Z_{\text{agl}}^{\text{cible}})\right)} \tag{3.40}$$

avec $u$ :

$$u = \frac{\Delta H(E, N)}{Z_{\text{agl}}^{\text{cible}}} \quad \in [0, 1] \tag{3.41}$$

En représentant graphiquement, graph. 3.27.A, la fonction $w(u, \theta, Z_{\text{agl}}^{\text{cible}})$ (eq. 3.40) il est possible de visualiser les effets sur la prédiction du profil de température interpolé depuis le sol jusqu'à une température cible. Graph. 3.27.B, dans ce cas c'est la formule 3.42 qui est utilisée. On constate qu'il est possible de modéliser une perte rapide de température avec un $\Delta H$ faible et ensuite une perte plus lente jusqu'à la température cible. Dans le graphique 3.27.B, la prédiction de température continue avec un gradient standard $\Gamma = -0.0065\,[℃/m]$.




**Graph. 3.27** – Principe du transfert thermique sol–air. Le poids $w(u)$, fonction de la hauteur normalisée $u = \Delta H / Z_{\text{agl}}^{\text{cible}}$, contrôle la vitesse de transition entre la température de surface $T_{\text{sol}}$ et la température atmosphérique de référence $T_{\text{cible}}$.

#### 3.6.3.4 Synthèse

Les développements précédents ont permis de définir une formulation analytique du transfert thermique vertical sol–air, fondée sur une fonction de poids non linéaire respectant les contraintes physiques et mathématiques du problème. La dépendance à la dénivelée est introduite de manière contrôlée par l'intermédiaire des paramètres de forme $k$ et $p$, garantissant à la fois la stabilité du modèle et sa capacité d'adaptation aux conditions locales. Le calcul d'une température dans n'importe quel point de l'espace pour un temps $t$ est pour rappel :

$$T_{\text{air}}(t, E, N, H) = T_{\text{sol}}(t, E, N) + w(u, \theta, Z_{\text{agl}}^{\text{cible}}) \cdot \Delta T_{\text{cible}}^{\text{sol}} \quad [℃] \tag{3.42}$$

où :

$\Delta T_{\text{cible}}(t, E, N)^{\text{sol}} = T_{\text{cible}} - T_{\text{sol}}$ : différence de température entre la surface cible et le sol
$\theta = (\theta_k, \theta_p)$ : paramètres à déterminer

Les paramètres du modèle, regroupés dans le vecteur $\theta = (a_0, a_1, a_2, b_0, b_1)$, ne sont pas fixés et doivent être estimés à partir des observations disponibles. La section suivante est consacrée à la méthodologie d'apprentissage de ces paramètres, à la définition de la fonction objectif, ainsi qu'à l'évaluation des performances du modèle obtenu.

### 3.6.4 Optimisation des paramètres de transfert de température

La formulation du modèle de transfert thermique présentée dans les sections précédentes repose sur une fonction de poids non linéaire dont la forme générale est fixée a priori. Cette fonction intègre explicitement les contraintes physiques et mathématiques du problème, telles que la continuité du profil vertical, le respect des conditions aux limites et la dépendance à l'écart altimétrique.

Si la structure du modèle est fixée, les valeurs numériques des paramètres qui décrivent son comportement ne peuvent pas être déterminés de manière arbitraire. Ces paramètres contrôlent les aspects du transfert thermique, tels que la vitesse de décroissance de l'influence du sol ou la concentration de cette influence dans les

couches atmosphériques basses. Leurs estimations conditionnent directement la capacité du modèle à représenter fidèlement les profils de températures observés.

L'objectif de cette étape est donc d'optimiser les paramètres du modèle à partir des données de température sol et de la surface cible, en recherchant les valeurs qui minimisent l'écart. Cette optimisation s'inscrit dans un cadre supervisé et constitue une étape clé pour assurer la robustesse, la stabilité numérique et la capacité de généralisation du modèle.

#### 3.6.4.1 Vecteurs des observations

Dans la formule 3.42 plusieurs variables mesurées ou calculées sont disponibles à savoir :

| | |
|---|---|
| $T_{\text{sol}}(t, E, N)$ | : température sol pour tout temps $t$ est disponible depuis le modèle RF calculé précédemment |
| $T_{3000}^{\text{MCH}}$ | : température et gradient calculés depuis les données de MétéoSuisse à l'altitude 3 000 m |
| $H_{400\text{sol}}$ | : surface représentant le terrain décalé de 400 mAGL minimum |
| $H_{\text{sol}}$ | : modèle numérique de terrain sol |
| $(E, N, H)$ | : coordonnées tridimensionnelles d'un point quelconque dans l'espace |

A partir de ces données il est alors possible de calculer ou d'obtenir les observations suivantes :

| | |
|---|---|
| $T_{\text{sol}}(t, E, N)$ | : directement depuis les valeurs calculées par le RF |
| $T_{\text{cible}}(t, E, N, H)$ | : température à la surface cible, ce calcul à l'aide de la formule 3.27 transfert d'une altitude à $T_{3000}^{\text{MCH}}(t)$ vers $T_{\text{cible}}(t)$ |
| $Z_{\text{agl}}^{\text{cible}}$ | : différence de hauteur entre la surface cible et le sol calculable à l'aide du MNT sol et de la surface cible de sorte que : $Z_{\text{agl}}^{\text{cible}} = H_{\text{cible}} - H\text{sol}$ |
| $\Delta H(E, N)$ | : dénivelée du point à prédire calculable depuis la cordonnée du point $(E, N, H)$ et le MNT sol de sorte que : $\Delta H(E, N) = H - H_{\text{sol}}$ |
| $DH_{\text{ref}}$ | : constante à définir définitivement pour le modèle par exemple décalage minimum de la surface cible, ici dans le projet $DH_{\text{ref}} = 400$ |

À partir de ces données, il est possible de définir les vecteurs d'observations associés à chaque instant $t$ et à chaque position $(E, N)$ :

$$\mathbf{l}(t, E, N) = \begin{pmatrix} T_{\text{sol}}(t, E, N) \\ T_{\text{cible}}(t, E, N) \\ Z_{\text{agl}}^{\text{cible}}(E, N) \\ \Delta H(E, N) \end{pmatrix}. \tag{3.43}$$

Ce vecteur regroupe l'ensemble des grandeurs observées ou dérivées nécessaires au calcul de la température de l'air $T_{\text{air}}(t)$ et à l'estimation des paramètres du modèle.

#### 3.6.4.2 Vecteur de paramètres

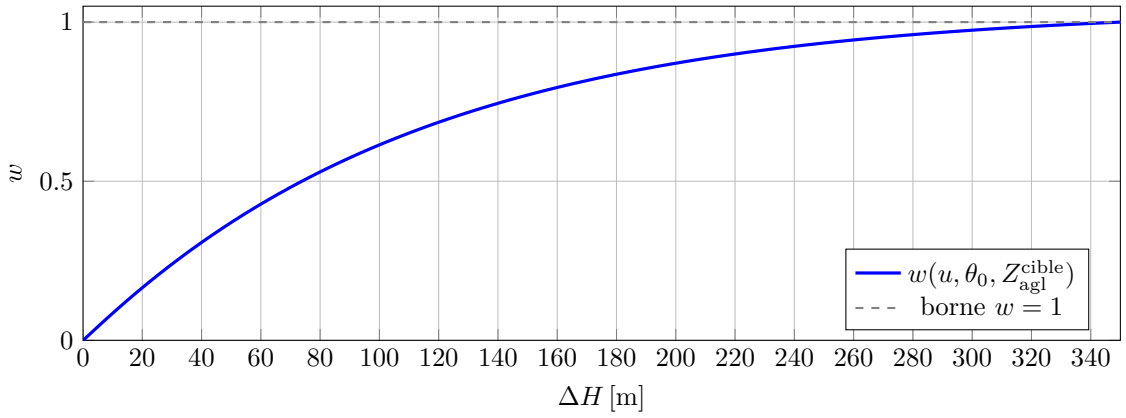
On rappelle que le vecteur de paramètres $\theta$, défini en section 3.6.3.1, regroupe l'ensemble des coefficients contrôlant la forme de la fonction de poids, tel que :

$$\theta = \theta(\theta_k, \theta_p) = (a_0, a_1, a_2, b_0, b_1) \tag{3.44}$$

### Test de l'apprentissage des paramètres

L'apprentissage des paramètres est réalisé à l'aide d'une bibliothèque d'optimisation Python (Scipy) et la fonction minimize. Avant, de lancer l'algorithme sur toutes les données, un jeu de données tests est utilisé pour valider et détecter les effets non souhaités. Des paramètres de bases sont estimés et testés afin de valider l'initialisation des optimisations futures, avec les paramètres $\theta$ suivants :

$$\theta_0 = (0.5,\ 0.1,\ 0.5,\ -0.5,\ -0.6).$$




**Graph. 3.28** – Fonction de poids $w(u, \theta, \Delta H)$ en fonction de la hauteur au-dessus du sol $\Delta H$, pour $Z_{\text{agl}}^{\text{cible}} = 350\,\text{m}$ et le vecteur de paramètres $\theta_0$ et $DH_{\text{ref}} = 400\,\text{m}$.

La fonction de poids $w$ rempli bien son travail, graph. 3.28 , une perte rapide proche du sol et ensuite la courbe fléchie jusqu'à atteindre la valeur 1 quand $\Delta H = Z_{\text{agl}}^{\text{cible}}$.

#### 3.6.4.3 Fonction de coût et apprentissage des paramètres (implémentation Python)

Les diverses fonctions outils qui vont être présentées ci-dessous sont en relation avec l'optimisation des paramètres et des fonctions d'ajustement permettant de minimiser les résidus. La fonction de coût peut être apparentée à un modèle des moindres carrés dont le but est d'ajuster les paramètres recherchés afin que les résidus soient minimum.

Cette partie faisant appel à des notions de stratégies de modélisation de l'apprentissage du modèle afin de prédire au mieux l'effet sol, il est fait le choix de décrire les démarches de l'implémentation du code afin d'arriver à une cohérence de perte de température physiquement acceptable, pour ce projet exploratoire de la modélisation d'un champ de température quadridimensionnel. L'estimation des paramètres $\theta = (a_0, a_1, a_2, b_0, b_1)$ est réalisée par optimisation à l'aide de la fonction `minimize` de la bibliothèque `scipy.optimize`, avec l'algorithme `L-BFGS-B` (gestion des bornes). Cette optimisation est effectuée *par pas de temps*, sur un sous-ensemble d'échantillons spatialement réparti sur tout le site, ici 6 000 points. Afin de limiter la fluctuation des paramètres entre deux pas de temps, l'estimation est réalisée sur une fenêtre glissante de 10 min.

### Rappel du modèle de pondération

Dans le script, la fonction de poids est définie par :

$$w(u, \theta, Z_{\text{agl}}^{\text{cible}}) = \frac{1 - \exp\Big(-k(Z_{\text{agl}}^{\text{cible}}, \theta_k)\, u^{\,p(Z_{\text{agl}}^{\text{cible}}, \theta_p)}\Big)}{1 - \exp\Big(-k(Z_{\text{agl}}^{\text{cible}}, \theta_k)\Big)}, \qquad w \in [0, 1], \tag{3.45}$$

avec un bornage explicite de $u \leftarrow \text{clip}(u, 0, 1)$ et $w \leftarrow \text{clip}(w, 0, 1)$ afin de garantir une stabilité numérique.

Les paramètres $k$ et $p$ sont calculés comme suit (avec $\varepsilon = e^{-6}$ pour éviter ln(0) et une division nul) :

$$k(Z_{\text{agl}}^{\text{cible}}, \theta_k) = \exp\left(a_0 + a_1 \ln(Z_{\text{agl}}^{\text{cible}} + \varepsilon) + a_2 \left(\frac{DH_{\text{ref}}}{Z_{\text{agl}}^{\text{cible}} + \varepsilon} - 1\right)\right) \tag{3.46}$$

$$p(Z_{\text{agl}}^{\text{cible}}, \theta_p) = 1 + \exp\big(b_0 + b_1 \ln(Z_{\text{agl}}^{\text{cible}} + \varepsilon)\big)\,. \tag{3.47}$$

Dans l'implémentation, comme valeur moyenne de la surface cible la constante $DH_{\text{ref}}$ est fixée à 400 m.

**Principe de la contrainte utilisée pour calibrer $\theta$.**

La fonction de coût ne compare pas directement $T_{\text{pred}}$ à une vérité terrain de $T_{\text{air}}$ (non disponible). Elle impose plutôt une contrainte physique : *loin du sol*, le profil reconstruit doit suivre un profil de type "air libre" (free) défini par un gradient atmosphérique de référence.

On considère une liste fixée de niveaux normalisés, le choix a été fait suite à divers tests, les valeurs considérées empiriquement sont :

$$u_i \in \{0.50,\ 0.75,\ 0.90,\ 0.97\}, \tag{3.48}$$

Les niveaux normalisées sont associés à des poids, le but est de donner plus d'importance à $w$ loin du sol, car il est mieux définit par les paramètres $\theta$que proches du sol :

$$c_i \in \{0.20,\ 0.60,\ 1.00,\ 1.40\} \tag{3.49}$$

Pour un échantillon spatial donné, la prédiction associée à un niveau $u_i$ s'écrit :

$$T_{\text{pred}}(w) = T_{\text{sol}} + w(u_i, \theta, Z_{\text{agl}}^{\text{cible}})\,\big(T_{\text{cible}} - T_{\text{sol}}\big) \tag{3.50}$$

où $T_{\text{sol}}$ et $T_{\text{cible}}$ sont connus (issus des données en entrée), et $Z_{\text{agl}}^{\text{cible}}$ est la hauteur au-dessus du sol (exprimée en mètres) de la surface cible.

Le profil "air libre" de référence utilisé dans la fonction de perte est défini par :

$$T_{\text{free}}(\Delta H) = T_{\text{cible}} + \Gamma\,(\Delta H - Z_{\text{agl}}^{\text{cible}}), \qquad \Delta H = u_i \cdot Z_{\text{agl}}^{\text{cible}}, \tag{3.51}$$

où $\Gamma$ est le gradient atmosphérique (en [°C/m]), fourni par les données atmosphériques des calculs avec les données MétéoSuisse. Le comportement de cette formule permet bien une augmentation de la température en passant sous la surface de référence.

**Terme principal de la fonction de coût**

La fonction de coût principale mesure l'écart entre la température de l'air estimée par le modèle $T_{\text{pred}}$ et une température de référence basée sur un gradient atmosphérique standard $T_{\text{free}}$. Ces écarts sont élevés au carré et pondérés afin de donner plus d'importance aux niveaux proches de la surface cible :

$$\mathcal{L}_{\text{grad}}(\theta) = \sum_i c_i \sum_{n=1}^{N} \Big[T_{\text{pred}}^{(n)}(u_i, \theta, Z_{\text{agl}}^{\text{cible}}) - T_{\text{free}}^{(n)}(u_i)\Big]^2 \tag{3.52}$$

avec $n$ indexe des $N$ échantillons spatiaux utilisés pour la calibration locale au pas de temps considéré.

**Régularisation (pénalités douces) appliquée dans la prédiction**

Dans la fonction de coût principal, la variation des paramètres ou les valeurs excessives n'est pour l'instant pas contrôlée, notamment pour le paramètre $a_2$, il faut donc introduire une régularisation afin de limiter l'amplitude des paramètres mais sans définir des bornes strictes.

Ici on ne souhaite pas contraindre de manière brutale les paramètres mais trouver une optimisation qui va permettre de minimiser l'impact des paramètres proche du sol, tout en gardant leur fonction. Typiquement pour $a_2$ qui garanti une perte rapide de température proche du sol, mais perd son effet avec l'augmentation de $\Delta H$ puis la fonction $w$ s'approchant d'une droite jusqu'à atteindre $T_{\text{cible}}$.

En méthode d'optimisation, cette méthode s'appelle la pénalisation quadratique ou "ridge regression" qui permet d'introduire une fonction quadratique. La pénalisation quadratique introduite dans l'équation (3.53) correspond à une forme de régularisation connue sous le nom de régularisation de Tikhonov ou ridge regression dans la littérature statistique. Ce principe vise à stabiliser l'estimation des paramètres en ajoutant une pénalité sur la norme au carré des coefficients, ce qui est une méthode bien établie pour traiter des problèmes mal posés et réduire le sur-apprentissage (Tikhonov et Arsenin, 1977),Golub et al., 1999),« Ridge Regression (Tikhonov Regularization) », s. d.), « Tikhonov Regularization », 2026).)

**Développement mathématique pour atteindre la fonction de régularisation :**

A la fonction de coût initial on va rajouter la régularisation de Tikhonov qui est de la forme :

$$\mathcal{L}_{\text{reg}}(\theta) = \lambda \parallel \mathbf{L}\theta \parallel_2^2 \tag{3.53}$$

Avec :

- $\theta$ : le vecteur des paramètres
- $\mathbf{L}$ : la matrice de régularisation
- $\lambda$ : intensité de la pénalisation, dans le suite $\lambda = 1$

Donc la norme peut s'écrire :

$$\parallel \mathbf{L}\theta \parallel_2^2 = (\mathbf{L}\theta)^\top (\mathbf{L}\theta)^\top = \theta^\top \mathbf{L}^\top \mathbf{L}\theta \tag{3.54}$$

Et en posant :

$$\mathbf{R} = \mathbf{L}^\top \mathbf{L} \tag{3.55}$$

On obtient :

$$\mathcal{L}_{\text{reg}}(\theta) = \theta^\top \mathbf{R}\theta \tag{3.56}$$

Dans le cas de l'optimisation de nos paramètres sensibles, on choisit une matrice diagonale de cette manière, chaque paramètre est traité individuellement, il n'y a pas de corélation entre les paramètres. Les paramètres de la matrice $\mathbf{R}$ ne sont pas implicites, ils doivent être pré-estimés en fonction de l'impact que l'on souhaite.

On choisit des coefficients de régulation faibles afin qu'ils n'influencent pas la fonction du coût initial. Le paramètre $a_2$ sera pénalisé plus rapidement que les autres, le tableau 3.13 met en évidence l'impact des paramètres et les pénalisations mises en place.

| **Param.** | **Val. typiques** | **Terme associé** | **Impact numérique** | **Décision** |
|---|---|---|---|---|
| $a_0$ | $\mathcal{O}(1)$ | $\exp(a_0)$ | Décalage global du niveau de transition | Aucune pénalisation |
| $a_1$ ($\sim 0.2$ à $0.6$) | $\mathcal{O}(10^{-1})$ ($5 \times 10^{-4} a_1^2$) | $a_1 \ln(Z_{\text{agl}}^{\text{cible}})$ | Variation progressive sur $0 < Z_{\text{agl}}^{\text{cible}} < 400$ m | Pénalisation faible |
| $a_2$ | $\mathcal{O}(10^{-1})$ à $\mathcal{O}(1)$ | $a_2 \left( \frac{DH_{\text{ref}}}{Z_{\text{agl}}^{\text{cible}}} - 1 \right)$ | Effet amplifié pour faibles $Z_{\text{agl}}^{\text{cible}}$ (ex. si $Z_{\text{agl}}^{\text{cible}} = 20$ m $\Rightarrow$ facteur $\sim 19$) | **Pénalisation renforcée** ($10^{-3} a_2^2$) |
| $b_0$ | $\mathcal{O}(1)$ | $\exp(b_0)$ | Décalage global de la courbure | Aucune pénalisation |
| $b_1$ | $\mathcal{O}(10^{-1})$ | $b_1 \ln(Z_{\text{agl}}^{\text{cible}})$ | Variation progressive de la courbure (similaire à $a_1$) | Pénalisation faible ($5 \times 10^{-4} b_1^2$) |

**Tab. 3.13** – Ordres de grandeur numériques et impact des paramètres du modèle sur la fonction de coût et la stabilité de l'optimisation.

La matrice de régulation $\mathbf{R}$ prend alors la forme diagonale suivante :

$$\mathbf{R} = \mathrm{diag}(0, 5 \times 10^{-4}, 10^{-3}, 0, 5 \times 10^{-4}) \tag{3.57}$$

On peut maintenant développer la pénalisation , equation 3.56, sous sa forme quadratique :

avec le vecteur de paramètres :

$$\theta = \begin{pmatrix} a_0 & a_1 & a_2 & b_0 & b_1 \end{pmatrix}^\top \tag{3.58}$$

et la matrice de régularisation diagonale :

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 \times 10^{-4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5 \times 10^{-4} \end{pmatrix}. \tag{3.59}$$

Le développement donne alors :

$$\mathcal{L}_{\mathrm{reg}}(\theta) = 10^{-3}\, a_2^2 + 5 \times 10^{-4}\, (a_1^2 + b_1^2). \tag{3.60}$$

**Fonction de coût final.**

La fonction minimisée dans `scipy.optimize.minimize` correspond donc à :

$$\mathcal{J}(\theta) = \mathcal{L}_{\mathrm{grad}}(\theta) + \mathcal{L}_{\mathrm{reg}}(\theta). \tag{3.61}$$

**Bornes et méthode d'optimisation**

L'optimisation est effectuée avec la méthode `L-BFGS-B` avec les bornes suivantes :

$$\begin{aligned} &a_0 \in [-3,\ 3], \quad a_1 \in [-2,\ 2], \quad a_2 \in [-2,\ 2], \\ &b_0 \in [-3,\ 3], \quad b_1 \in [-2,\ 2]. \end{aligned} \tag{3.62}$$

Ces contraintes permettent de limiter de contenir les paramètres en cas de déviation du modèle.

**Lissage temporel des paramètres**

Après optimisation à chaque pas de temps, les paramètres estimés $\hat{\theta}$ sont lissés temporellement selon :

$$\hat{\theta}_t = \beta \cdot \hat{\theta}_{t-1} + (1 - \beta) \cdot \hat{\theta}_t \tag{3.63}$$

avec $\beta = 0.5$. Ce lissage permet de tenir compte à 50 % de l'optimisation précédente afin d'éviter les sauts rapides et stabilise la prédiction.

#### 3.6.4.4 Implémentation dans un script des éléments d'optimisation

Les différents éléments théoriques détaillés précédemment sont implémentés dans un script Python afin de générer ce modèle quadridimensionnel météo de la partie air, un organigramme de l'implémentation est visible à l'annexe H page A-27. D'un point de vue théorique, il est possible avec ces différents paramètres de calculer en tout point la température de l'air, mais le stockage des variables et les différents pré traitements nécessaires aux calculs d'une température sont trop gourmand en stockage et ressources machine.

Il est décidé de calculer des surfaces de température cible à plusieurs $\Delta H$, puis de réaliser une interpolation entre ces surfaces de températures afin d'en déduire la température de l'air. Les surfaces de référence sont choisies

ainsi :

$$\Delta H = [0,\ 5,\ 10,\ 20,\ 50,\ 100,\ 200,\ 300,\ 500,\ 700] \tag{3.64}$$

**Format d'enregistrement des données**

Le volume de données généré par cette implémentation est conséquent, il faut une structure en base de données adéquate afin de rechercher rapidement les bonnes données de température au bon pas du temps. Le choix se porte sur un format binaire de type *Zarr* multidimensionnel.

**Structure générale**

Le dataset contient deux variables principales :

- `temp(time, z, y, x)` : température de l'air
- `params(time, param)` : paramètres du modèle vertical $\theta$

Les dimensions sont définies comme suit :

- `time` : axe temporel
- `z` : niveaux verticaux (mètres AGL)
- `x`, `y` : grille spatiale raster

**Interprétation de la température**

Pour chaque pixel $(x, y)$ et chaque date $t$ :

- à $z = 0$, la température correspond à la température de surface
- à $z = \Delta H(x, y)$, elle correspond à la température d'air libre
- entre les deux, une interpolation verticale non linéaire est appliquée

Un schéma conceptuel du script de génération du modèle 4D est disponible à l'annexe H page A-27.

#### 3.6.4.5 Résultats de l'optimisation et prédiction d'une température air

Avec l'optimisation des paramètres $\theta$ on possède un modèle de transfert de la température sol jusqu'à la surface cible à $Z^{400}_{\text{agl}}$, puis dans les couches supérieures à l'aide du gradient de température définit par radiosondage. Le modèle final se présente sous la forme :

- Si $\Delta H < Z^{\text{cible}}_{\text{agl}}$ :

$$\hat{T}_{\text{air}}(t, E, N, H) = T_{\text{sol}} + w(u, \hat{\theta}, Z^{\text{cible}}_{\text{agl}}) \cdot \Delta T^{\text{sol}}_{\text{cible}} \quad [\text{°C}] \tag{3.65}$$

  avec $u$ :

$$u(H) = \frac{H - H_{\text{sol}}}{Z^{\text{cible}}_{\text{agl}} + \varepsilon} \tag{3.66}$$

- Et si : $\Delta H > Z^{\text{cible}}_{\text{agl}}$ :

$$\hat{T}_{\text{air}}(t, E, N, H) = T^{\text{MCH}}_{400\text{sol}} + \Gamma^{\text{MCH}}_{\text{sonde}}(H - H_{400\text{sol}}) \quad [\text{°C}] \tag{3.67}$$

Les représentations 3.29 et 3.29 mettent avant les résultats du transfert de la température sol jusqu'à une altitude cible, 1 900 m, à une date donnée : 19.08.2025 à 18 :06. La visualisation montre bien la perte de température au centre en bleu l'air est plus froid que au sol. Le fond de la vallée est environ 500 m plus bas que la surface calculée.

Par conséquent on est proche de la température de la surface cible qui est à 5.6 °C, indication sur la figure 3.29, pour rappel la température $T^{\text{MCH}}_{400\text{sol}}$ vient du transfert de la température à 3 000 m qui a été transférée avec le gradient air libre calculé avec le radiosondage.

Le graphique 3.29 montre la perte de température plus rapide porche du sol jusqu'à environ 100 mAGL et ensuite moins rapide, les 7 profils montrés sont pris aléatoirement sur le site.

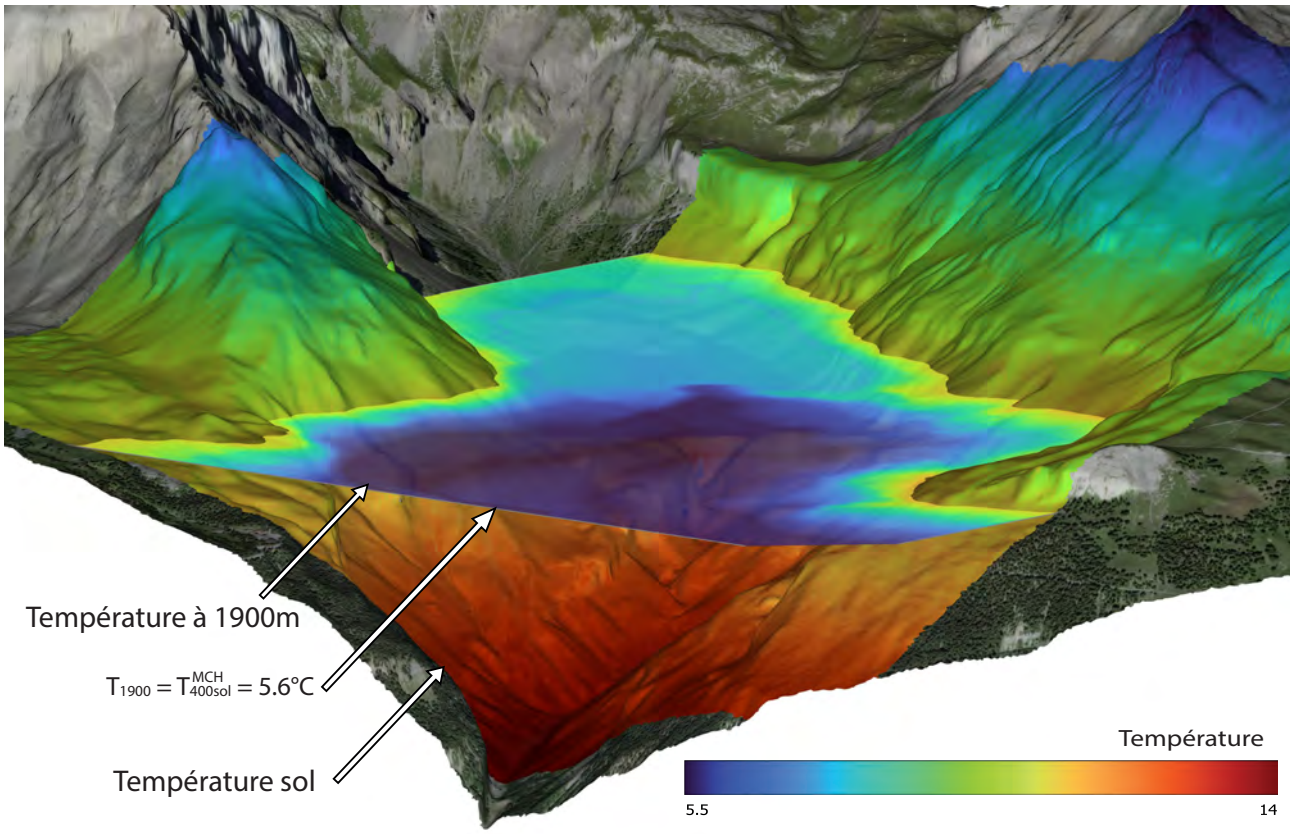
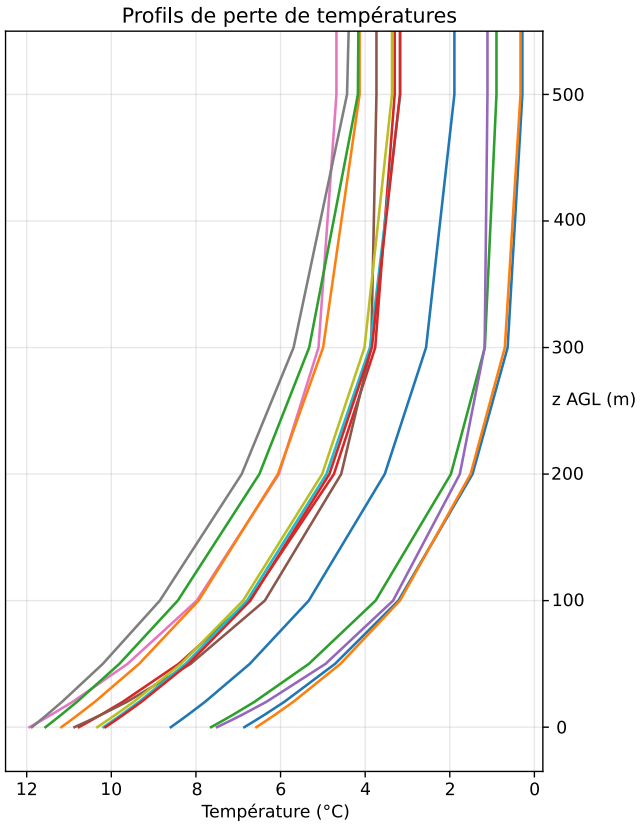



**Fig. 3.29** – Représentation de la température interpolé à 1 900 m le 18 septembre à 18 : 06. Avec la température sol au même moment.




**Graph. 3.29** – Représentation de 7 profils de perte de température pour le 18 septembre à 18 : 06.

#### 3.6.4.6 Analyse de la qualité du modèle air

La définition du modèle telle que posé possède une grande faiblesse, elle est difficilement contrôlable par des moyens simples. Les conditions aux bornes des prédictions étant définies et contraintes il n'y a pas de résidus exploitables quand $w = 0$ température sol ou $w = 1$. Plusieurs pistes sont à explorer pour valider ce type de modèle :

- mesures de profils verticaux sur le site avec radiosondage, afin de valider les profils de température
- analyse de sensibilité des paramètres $\hat{\theta}$
- réaliser plusieurs prédictions et comparer les résultats, faire varier le nombre de points d'analyses, etc

Il également possible d'évaluer l'efficacité du modèle de température, de créer des profils de température égal (isotherme) en fonction de l'altitude. Le graphique 3.30, montre des courbes isothermes avec un pas de 1 °C depuis le sol jusqu'à l'altitude 2 600 m. Le profil est créé entre deux points A et B, figure 3.30, les points de début et fin sont à 2 200 m d'altitude et la situation du profil passe par des secteurs avec forte chaleur au sol et la gorge principale du barrage.

La représentation du profil met en avant la non homogénéité des températures au sol et leurs effets sur la prédiction des températures dans l'air. On remarque au niveau de la gorge un trou dans la température isotherme, c'est une zone beaucoup plus froide dans la falaise, figure 3.30 qui est complètement à l'ombre presque toute la journée. Cet effet de trou froid est difficilement éliminé par le modèle. Pour rappel, le modèle de transfert possède des paramètres qui sont ajustés pour tout le site, donc ce type d'artefact peut subsister. Cependant, l'impact diminue en prenant de la hauteur par rapport au sol.

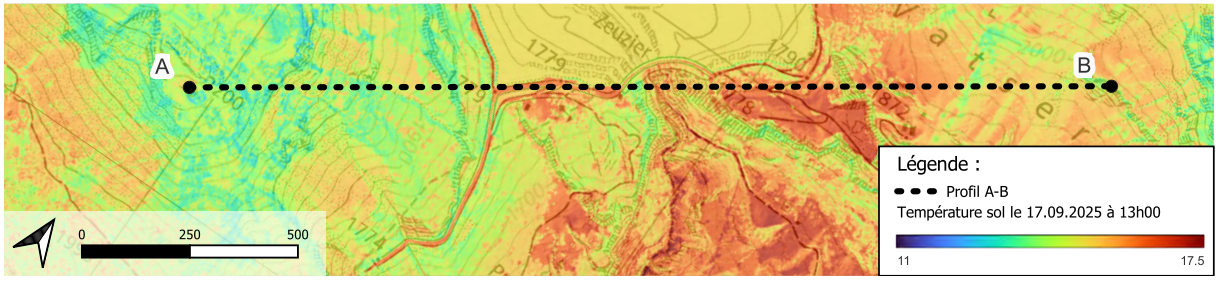
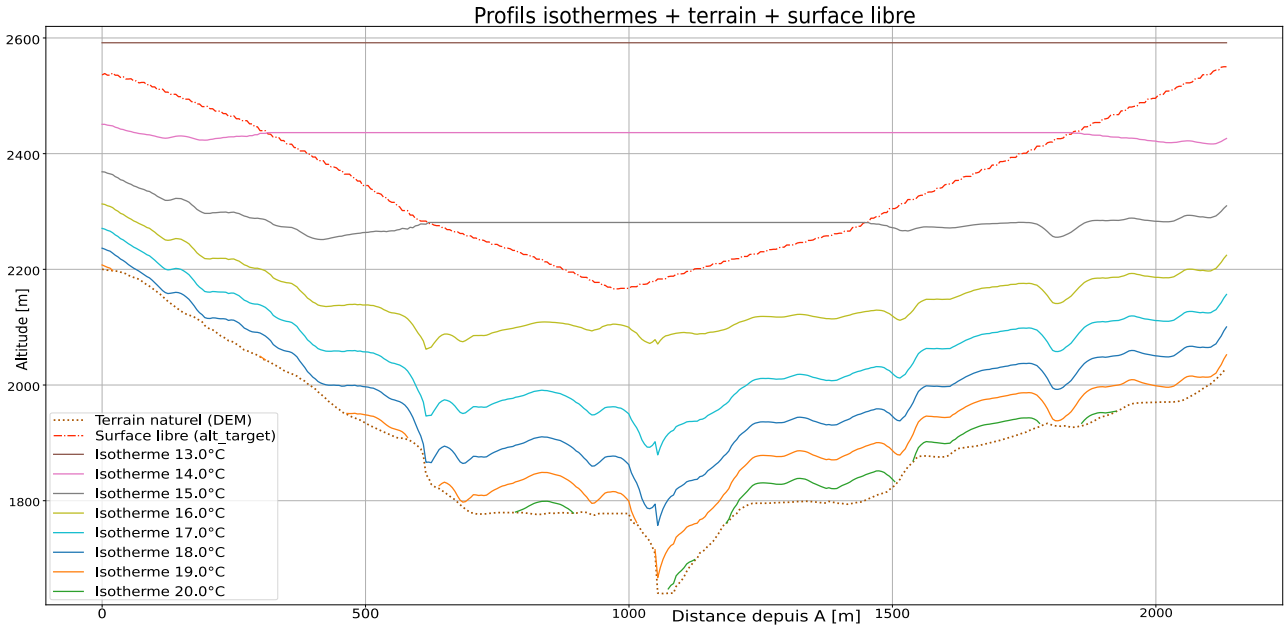



**Fig. 3.30** – Situation du profil pour le graphique des courbes isothermes, avec la température au sol à la date du 17.09.2025 à 13h00




**Graph. 3.30** – Profils de température constante en fonction de l'altitude, le 18.09.2025 à 13 h 00

Afin de ne pas perdre les objectifs de ce travail, il est choisi de ne pas plus approfondir dans la qualité du modèle, ces étapes pouvant être très chronophages. La qualité du modèle va être évalué à l'aide d'observation ne dépendant pas de l'atmosphère telles que les déterminations réalisées avec le GNSS. De plus aucune observation indépendante, n'a été réalisé afin de valider les profils de température par conséquent, les évaluations seraient purement visuel ou de sensibilité personnel.

### 3.6.5 Modèle météo final

Les divers développements ci-dessus ont permis d'affiner les paramètres d'un modèle météo qui doit permettre de corriger les observations avec la meilleure précision possible. Les diverses analyses et contraintes permettent de corriger les observations, avec un modèle météorologique 4D, et ont dirigé les réflexions vers la mise en place d'un modèle RF pour la température au sol, et une optimisation de paramètres pour la prédiction de la partie air.

Comme démontré il est possible de séparer la partie pression et hydrométrie de la température, car leurs définitions et évolutions dans l'atmosphère est bien plus simple à prédire et réponds aux précisions recherchées, les formules retenues sont les suivantes, pour la détermination des paramètres atmosphériques pour un point quelconque $A(E, N, H)$, depuis les station $i(E, N, H)$ au temps $t$ et en considérant que $d(A, i)$ distance 3D entre les points :

- **Interpolation de la pression :**

$$\hat{P}(A,t) = \frac{\sum_{i=1}^{N} \frac{p_{\mathrm{i,t}} \left(1 - \frac{0.0065 \cdot (z_i - z_A)}{T_{\mathrm{i,t}}}\right)^{5.255}}{d(x_A, x_i)^2}}{\sum_{i=1}^{N} \frac{1}{d(x_A, x_i)^2}} \quad [mbar] \tag{3.68}$$

- **Interpolation de l'hydrométrie :**

$$\hat{H}_{\mathrm{hydro}}(A,t) = \frac{\sum_{i=1}^{N} \frac{H_{i,t}}{d(x_A, x_i)^2}}{\sum_{i=1}^{N} \frac{1}{d(x_A, x_i)^2}} \quad [\%] \tag{3.69}$$

#### 3.6.5.1 Modèles de températures

Concernant la température ce point est plus délicat, actuellement trois définitions d'interpolation de la température ont été mises en place, avec chacun leur degré de complexité, et de précision. Les différentes formules posées et qui seront évaluées sont les suivantes :

- **Modèle simple par IDW**

$$\hat{T}(A,t) = \frac{\sum_{i=1}^{N} \frac{T_{A_i}}{d(x_A, x_i)^2}}{\sum_{i=1}^{N} \frac{1}{d(x_A, x_i)^2}} \quad [\mathrm{°C}] \tag{3.70}$$

tel que :

$$T(A,i) = T_i + \Gamma_{\mathrm{std}} \cdot (H_A - H_i), \quad \Gamma_{\mathrm{std}} = -0.0065\,\mathrm{°C}/m \tag{3.71}$$

- **Modèle par moindre carrés :**
  - Interpolation de la température au point A depuis une station de mesure :

$$\hat{T}(A,i,t) = \hat{t}_{\text{ref}} - \hat{\Gamma} \cdot (z_A - z_0) + \widehat{b}_i \cdot S_{i,t}^{eff} \quad [\text{°C}] \tag{3.72}$$

    Avec $\hat{t}_{\text{ref}}(t)$ et $\hat{\Gamma}$ issus du calcul d'estimation globale par époque avec $z_0 = 1\,800\,\text{m}$.
  - En Combinant toutes les stations :

$$\hat{T}(A,t) = \frac{\sum_{i=1}^{N} \frac{T_{A_i}}{d(x_A,x_i)^2}}{\sum_{i=1}^{N} \frac{1}{d(x_A,x_i)^2}} \quad [\text{°C}] \tag{3.73}$$

- **Modèle complexe par apprentissage et optimisation :**
  - Si $\Delta H < Z_{\text{agl}}^{\text{cible}}$ :

$$\hat{T}(A,t) = T_{\text{sol}} + w(u,\hat{\theta},Z_{\text{agl}}^{\text{cible}}) \cdot \Delta T_{\text{cible}}^{\text{sol}} \quad [\text{°C}] \tag{3.74}$$

    avec $u$ :

$$u(H_A) = \frac{H_A - H_{\text{sol}}}{Z_{\text{agl}}^{\text{cible}} + \varepsilon} \tag{3.75}$$

  - Et si : $\Delta H > Z_{\text{agl}}^{\text{cible}}$ :

$$\hat{T}(A,t) = T_{400\text{sol}}^{\text{MCH}} + \Gamma_{\text{sonde}}^{\text{MCH}}(H_A - H_{400\text{sol}}) \quad [\text{°C}] \tag{3.76}$$

Avec un modèle maintenant complet il est possible d'évaluer les apports d'une modélisation fine sur les observations d'un réseau géodésique.

## 3.7 Correction des observations

### 3.7.1 Paramètres atmosphériques

À partir des observations issues des stations météorologiques et de la définition d'une interpolation de la température en tout point et à tout instant sur le site, il est possible de mettre en place une stratégie de correction des observations brutes liées aux paramètres atmosphériques. Deux blocs indépendants sont distingués, les approches et les objectifs étant différents :

- **Correction des distances**, voir chapitre 2.1.1.3, page 24
- **Estimation du coefficient de réfraction**, voir chapitre 2.4.1, page 40

#### 3.7.1.1 Pré-traitement des mesures géodésiques

La correction des observations à l'aide des paramètres météorologiques nécessite un accès aux observations brutes issues du terrain, et non aux valeurs déjà moyennées des mesures de série. Pour ce faire, les données sont exportées au format XML. Toutefois, dans ce format, l'accès à la hiérarchie des données relatives aux mesures de série n'est pas direct et requiert un pré-traitement spécifique afin de regrouper les observations.

La complexité du format XML Leica réside dans sa structure hybride, composée de deux parties distinctes dont les clés primaires ne sont pas partagées de manière uniforme entre les différents modules des programmes. La première partie correspond à un format *LandXML* standard, tandis que la seconde relève du format *HexagonLandXML*, caractérisé par une architecture spécifique. Cette organisation particulière est illustrée par le diagramme à l'annexe I page A-29.

Le script mis en place permet de regrouper les observations par station avec les diverses informations pertinentes tel que le montre l'architecture finale ci-dessous 3.31, dont le plus important l'accès aux mesures brutes dernière ligne *RawObservations* :

```
Station
 ├─ id_stat
 ├─ coo_stat
 ├─ I
 ├─ Time
 ├─ sigma_serie
 │   ├─ hz
 │   ├─ vz
 │   └─ dist
 ├─ Res_Serie
 │   └─ point_visé
 │       ├─ hz
 │       ├─ vz
 │       └─ dist
 └─ RAW_Mesures_Sereies
     └─ point_visé
         ├─ ApplicationSetsOfAngles(résultats moyennés)
         └─ RawObservation(mesures brutes)
             ├─ S
             └─ RawObservations(Hz, Vz, d3d)
```

**Fig. 3.31** – Structure du dictionnaire après traitement du fichier XML

### 3.7.2 Correction des distances

La correction des distances doit être réalisée à l'aide d'une intégration le long de la ligne de visée entre la station de mesure et le point concerné avec un pas d'incrémentation défini à l'avance, illustration 3.32 :

- Détermination du vecteur 3D unitaire entre la station et le point visé
- Avec le pas défini à l'avance, calcul des coordonnées des $n$ points le long de la ligne de visée
- Ajout de la coordonnée du point visé

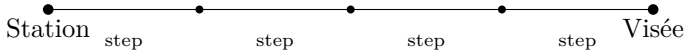



**Fig. 3.32** – Illustration de l'incrémentation des coordonnées

#### Interpolation de la correction

À partir de la liste des coordonnées le long de la visée, il devient possible de procéder à l'intégration numérique de la correction de distance liée aux effets atmosphériques, telle que définie par la formule 2.5. Cette intégration est réalisée selon une approche incrémentielle, fondée sur un pas régulier le long de la visée et une interpolation des paramètres atmosphériques, ci-dessous un pseudo-code, 3.3 résumant les étapes.

**Input :** Liste de coordonnées 3D le long de la visée $\mathcal{L} = \{\mathbf{X}_0, \ldots, \mathbf{X}_n\}$ (pas nominal *step*)
Fonctions d'interpolation atmosphérique InterpMeteo$(\mathbf{X}, t) \rightarrow (T, P, R_{\text{hydro}})$
Fonction de calcul PPM$(T, P, R_{\text{hydro}}) \rightarrow ppm$ (cf. 2.6)
**Output :** Correction totale $corr_{\text{d}}$ [m] (cf. 2.5)

Liste des facteurs $ppm$ évalués aux points de la liste
**for** $i \leftarrow 0$ **to** $n$ **do**
  $(T_i, P_i, R_{\text{hydro}_i}) \leftarrow \text{InterpMeteo}(\mathbf{X}_i, t)$
  $ppm_i \leftarrow \text{PPM}(T_i, P_i, RH_i)$
**end**
Intégration sur les segments (moyenne aux extrémités)
**for** $i \leftarrow 0$ **to** $n - 1$ **do**
  $ppm_{\text{mean},i} \leftarrow \dfrac{ppm_i + ppm_{i+1}}{2}$
  $\delta d_i \leftarrow step \cdot ppm_{\text{mean},i} \cdot 10^{-6}$ // cf. 2.7
  $corr_{\text{d}} \leftarrow \Delta d_{\text{atm}} + \delta d_i$
**end**
**return** $corr_{\text{d}}$

**Algorithme 3.3 :** Principe du calcul de la correction de la distance par intégration numérique

#### 3.7.2.1 Variation entre un modèle standard et une atmosphère 4D

L'évaluation de l'impact d'une correction avec une intégration le long de la ligne de visée, va être réalisée uniquement sur les observations de la station 11. Elle est centrale et combine des distances courtes, longues, proche du sol et au travers de la vallée, voir plan annexe X page A-111 et Y page A-115.

Les deux graphiques avec les répartitions sous forme de radar 3.34 montrent l'impact de l'application du modèle 4D sur les distances par rapport à une correction standard, au niveau moyen de la ligne de visée. On constate que les écarts en millimètres sont faibles, le graphique 3.34a avec les variations millimétriques, indique qu'au vu de la précision du distance mètre ($0.6\,\text{mm} + 1\,\text{ppm}$) les variations sont non significatives jusqu'à 700 m. Par contre au niveau des ppm, graphique 3.34b, la variation est plus importante, ce qui est logique, car à courte distance il faut une grande variation de ppm afin de générer des corrections de quelques dixièmes de millimètres sur les courtes distances. A l'annexe J page A-31 se trouve une comparaison avec toutes les distances du réseau confirmant un comportement similaire aux longues distances.

Regardons en détails la variation de −8 mm qui correspond à la distance 11–14, les graphiques 3.33 et 3.35 mettent en évidence l'évolution de la température et les couches isothermes de température sur cette ligne de visée au moment de la mesure le 17 septembre à 12h15.

La température à la station enregistrée par Geosat est de 17 °C et avec les formules de corrections standards la température au milieu de la ligne de visée est de 16.4 °C (point rouge dans le graphique 3.35). Alors que dans le modèle 4D il ferait que 8.5 °C, donc ici au vu de la topographie et de la variation de température les corrections sont significatives.

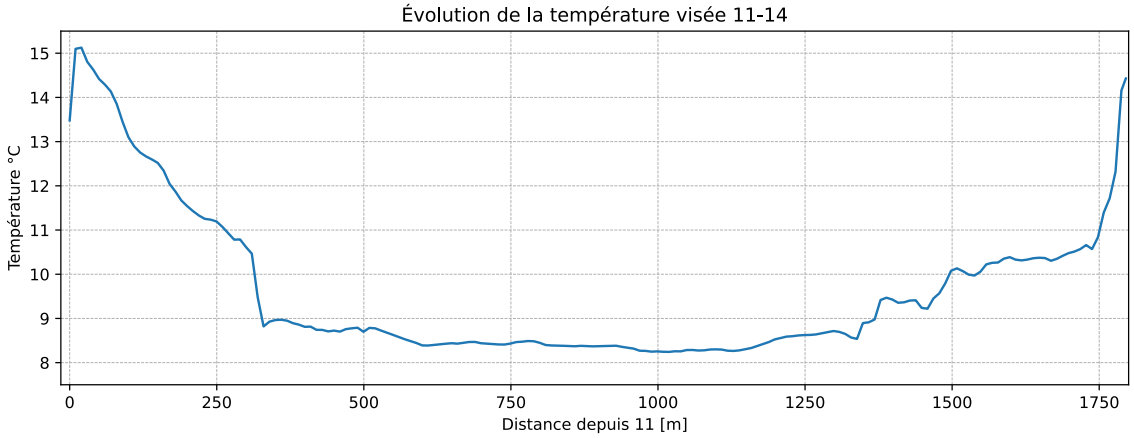
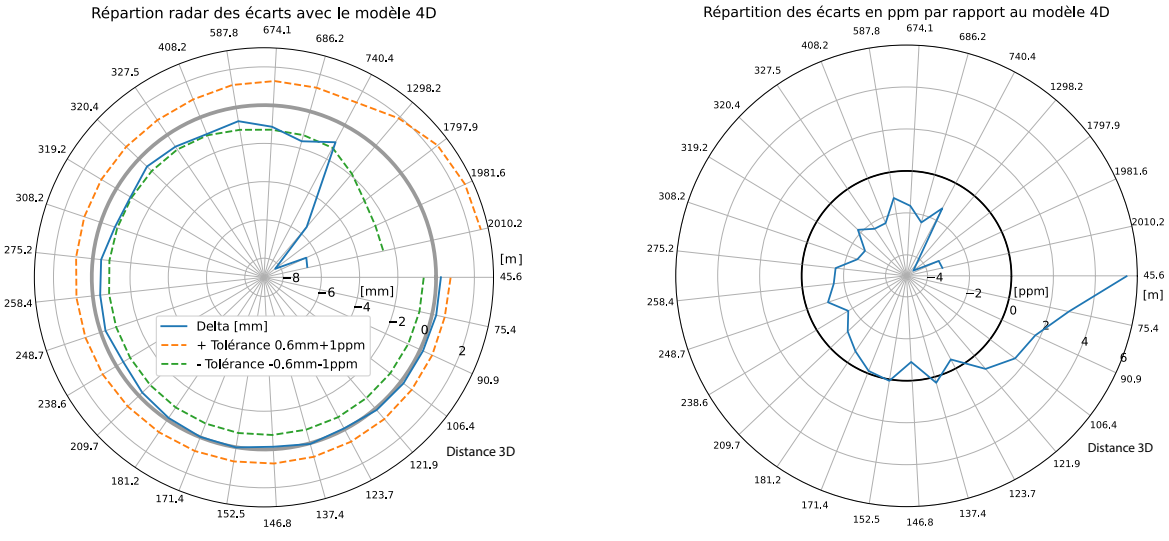



**Fig. 3.33** – Évolution de la température le long de la ligne de visée 11-14.




**(a)** Valeurs en [mm] **(b)** Valeurs en *ppm*

**Fig. 3.34** – Mise en évidence des écarts entre un modèle de correction des distances standard et le modèle 4D, pour les observations de la station 11

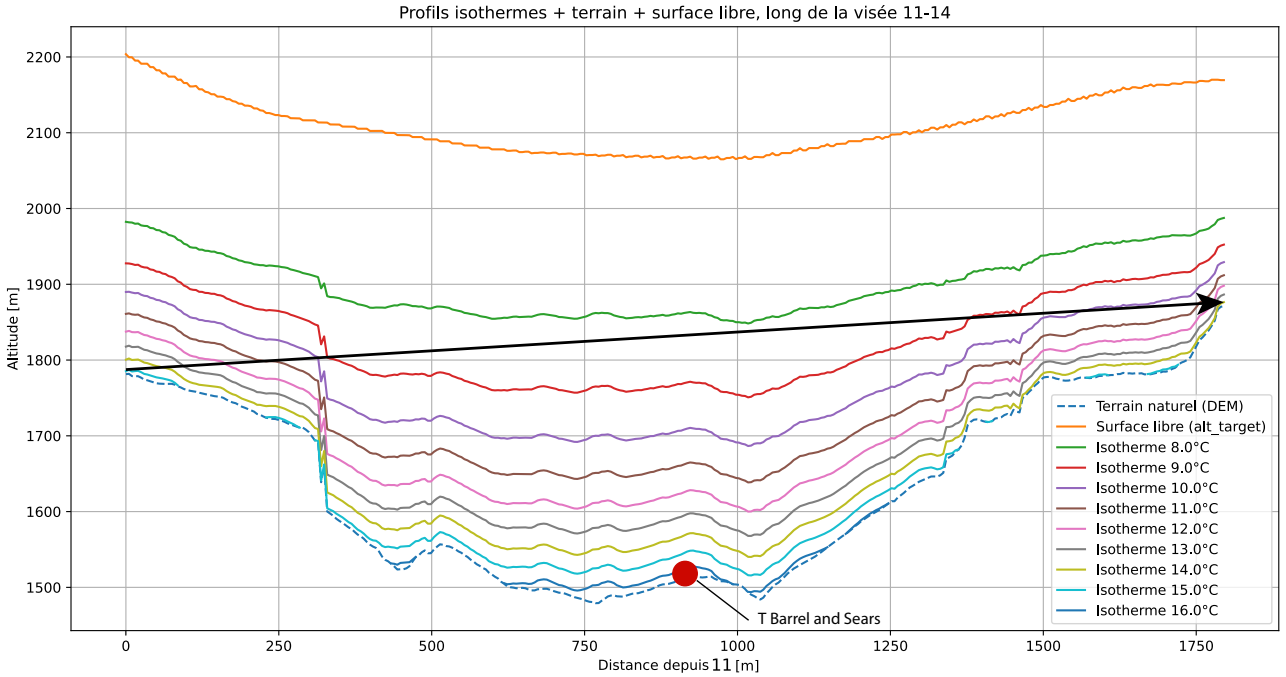



**Fig. 3.35** – Les profils de température au-dessus du sol le long de la ligne de visée 11-14, la flèche noire représente la ligne de visée.

### 3.7.3 Détermination de la réfraction

Avec le champ météo spatial mis en place, il est possible de déterminer en tout point de l'espace les données atmosphériques, l'angle de réfraction $\delta_{\text{refr}}$, afin de satisfaire l'équation 2.53.

L'implémentation du lancer de rayon afin de déterminer la réfraction s'est révélée délicate. La détermination des paramètres doit être réalisée rigoureusement afin de ne pas dériver. Un des points essentiels, est l'incrémentation par pas qui doit être aussi rigoureuse que possible. Les relations entre $\mathrm{d}\Delta h$ , $\mathrm{d}\Delta s$,$\mathrm{d}\Delta x$ doivent satisfaire au final la condition que $d_{\text{AB}}^{\text{lancer}} = d_{\text{AB}}^{\text{theorique}}$ , dans le cas contraire, la formule 2.48 fournira des valeurs anormales, ci-dessous le principe du programme de lancé de rayon 3.4 .

**Input :** Coordonnées station $\mathbf{A}(xyz)$, coordonnées point visé $\mathbf{B}(xyz)$, vect. unitaire$\mathbf{n}_{\mathrm{AB}}$
Dénivelé théorique $dh_{\mathrm{ori}}(AB)$ et distance $d_{3\mathrm{D}}(AB)$
Paramètres intiaux $\zeta_{\mathrm{init}}$, $ds$, $seuil_{\mathrm{interup}}$, $time = t$
**Output :** Réfraction moyenne $\overline{\delta}_{\mathrm{refr}}$

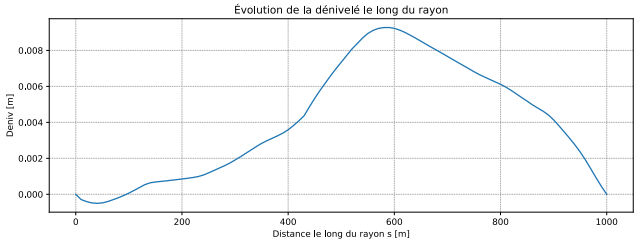
$t \leftarrow time$, $j \leftarrow 0$,$cor_{\mathrm{rad}} \leftarrow 0.0$
$deltaniv \leftarrow 10.0$ // initialisation pour entrer dans la boucle
**while** $|deltaniv| > seuil$ ***and*** $j < J_{\max}$ **do** // itération jusqu'à concordance du dénivelé
  $j \leftarrow j + 1$
  // Mise à jour de l'angle testé (correction incrémentale)
  $\zeta_{0,\mathrm{rad}} \leftarrow \zeta_{0,\mathrm{rad}} - cor_{\mathrm{rad}}$
  // Lancer de rayon avec la météo à l'époque $t$
  $(\zeta, \frac{dn}{dh}, \mathbf{n}, \Delta\boldsymbol{\zeta}, \mathbf{deniv}, \mathbf{d_{xy}}, i) \leftarrow$ ray_trace_zeta$(\mathbf{A}, \zeta_{0\mathrm{rad}}, ds, t, \mathbf{n})$
  // Erreur sur le dénivelé final (objectif : $\mathbf{deniv}[-1] \approx dh_{\mathrm{ori}}$)
  $deltaniv \leftarrow dh_{\mathrm{ori}} - \mathbf{deniv}[-1]$
  // Correction angulaire (approximation) pour l'itération suivante
  $cor_{\mathrm{rad}} \leftarrow \dfrac{deltaniv}{d_{3D}}$
**end**
// Angle final et réfraction estimée (écart à l'angle initial)
$\zeta_0 \leftarrow \zeta_{0\mathrm{rad}} \cdot$ `rad2grad`
$refr \leftarrow \zeta_{\mathrm{init}} - \zeta_0$

**Algorithme 3.4 :** Estimation itérative de la réfraction par lancer de rayon (`ray_trace_zeta`)

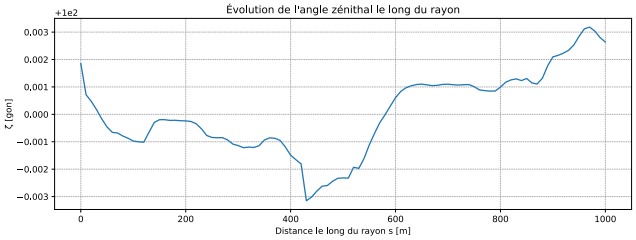
Le script fonctionne par itérations successives jusqu'à satisfaction des critères interruptions, ci-dessous, protocole 3.3 un exemple d'un lancer de rayon réalisé le 17.09.2025 à 13 :00 depuis le pilier 1 en direction du pilier 2, pour un angle zénithal de 100 gon. En complément aux protocoles, des graphiques sont générés afin de visualiser l'évolution dans l'air, graphique 3.31.

```
=== Itération 1 ===
Angle testé pour rayon à : 100.000000
Ray tracing: 100%|----------| 1000.0/1000.0 [02:16<00:00,  7.31m/s]
Nombre steps pour disthori target : 100.0
Dénivelé calculé [m] : 0.0291
Delta niv [m] : -0.0291
Correction de [cc] : -18.52
--------------------------
=== Itération 2 ===
Angle testé pour rayon à : 100.001852
Ray tracing: 100%|----------| 1000.0/1000.0 [02:46<00:00,  5.99m/s]
Nombre steps pour disthori target : 100.0
Dénivelé calculé [m] : 0.0000
Delta niv [m] : -0.0000
Correction de [cc] : -0.00
--------------------------
=== Résumé ===
Déniv théorique : -0.0000
Dénivelé calculé : 0.0000
Correction altimétrique de [m] : -0.0000
Angle zénithal topocentrique testé [gon] :100.000000
Angle zénithal topocentrique dernière itération [gon] :100.001852
Angle réfraction [cc] : -18.5
Seuil interuption [mm] : 0.5
```

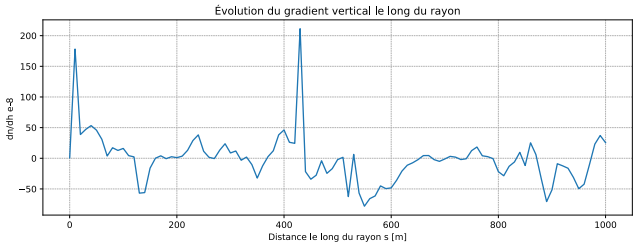
**Listing 3.3** – Résultat du programme de lancer de rayon avec l'évolution de $\delta_{\mathrm{refr}}$, pour un angle testé à 100 gon



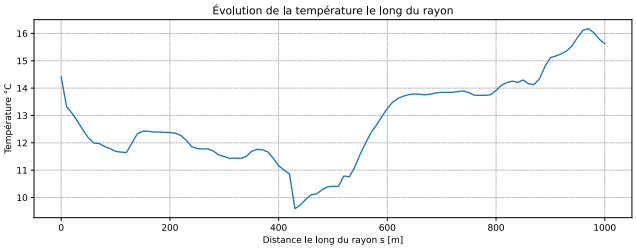

**(a)** Dénivelée




**(b)** Angle zénithal




**(c)** Gradient vertical




**(d)** Température

**Graph. 3.31** – Effet et comportement de l'atmosphère sur une ligne de visée, visualiation réalisée à l'aide du programme de lancer de rayon

### Validation du programme de lancer de rayon

Dans l'exemple présenté ci-dessus, résultat 3.3 et les graphiques 3.31, on constate que la réfraction est négative de $-18.5\,\text{cc}$, donc dans la formule de correction 2.54 le terme de correction, $-\delta_{\text{refr}} \cdot d_{\text{AB}}$ devient positif ce qui est contraire au principe de base et la correction par le coefficient $k$ standard.

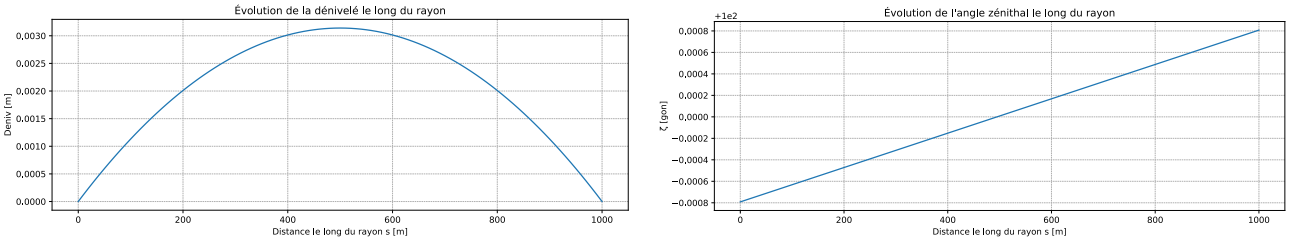
Il est possible de tester le script en se plaçant dans une situation avec atmosphère standard. Les paramètres d'une atmosphère standard sont les suivants (Guillaume, 2023) :

- $T(H) \approx 15 - 0.0065 \cdot H \quad [°\text{C}]$
- $P(H) \approx 759.81 - 0.086 \cdot H \quad [\text{mm Hg}]$
- $e(H) \approx 0 \quad [\text{mm Hg}]$
- Avec $H = 0$

Les résultats du calcul sont les suivants :

```
=== Itération 1 ===
Angle testé pour rayon à : 100.000000
Nombre steps pour disthori target : 100.0
Dénivelé calculé [m] : -0.0124
Delta niv [m] : 0.0124
Correction de [cc] : 7.92
--------------------------
=== Itération 2 ===
Angle testé pour rayon à : 99.999208
Nombre steps pour disthori target : 100.0
Dénivelé calculé [m] : -0.0000
Delta niv [m] : 0.0000
Correction de [cc] : 0.00
--------------------------
=== Résumé ===
Déniv théorique : -0.0000
Dénivelé calculé : -0.0000
Correction altimétrique de [m] : 0.0000
Angle zénithal topocentrique testé [gon] :100.000000
Angle zénithal topocentrique dernière itération [gon] :99.999208
Angle réfraction [cc] : 7.9
k calculé depuis réfraction : 0.159
Seuil intéruption [mm] : 0.5
```

**Listing 3.4** – Test d'un lancer de rayon en atmosphère standard, pour un angle testé à 100 gon




**(a)** Dénivelée **(b)** Angle zénithal

**Graph. 3.32** – Évolution de l'angle zénithal dans une atmosphère standard

Les résultats montrent que, dans une atmosphère standard, la trajectoire du rayon suit une courbe caractéristique en forme de cloche, figure 3.32. Lors de la première itération (listing 3.4), on observe que la dénivelée à corriger s'élève à 12.4 mm. En effectuant le calcul avec un coefficient de réfraction $k = 0.16$, correspondant à une atmosphère standard (Guillaume, 2023), on obtient une correction de réfraction $R = 12.5$ mm ainsi qu'un angle de réfraction de 7.9 cc. Les valeurs issues du lancer de rayons sont identiques, ce qui permet de conclure que l'algorithme est correct.

Les étapes suivantes vont consister à tester cet algorithme dans les conditions réelles des mesures et évaluer l'impact, dans le réseau d'auscultation.

### 3.7.4 Géoïde et déviation de la verticale

Les observations de déviation de la verticale ont été traitées dans le cadre du travail de master de (Casto, 2026). Les différentes implémentations méthodologiques et les traitements des données ont permis d'aboutir à l'élaboration d'un modèle de géoïde local, dont la forme est déterminée avec une très grande précision.

La figure 3.38 illustre les précisions obtenues à partir des 18 déterminations de déviation de la verticale. Les isolignes de précision du géoïde, représentées avec un espacement de 0.5 mm, mettent en évidence une excellente résolution spatiale du modèle. Les cotes du géoïde ainsi déterminées présentent une précision meilleure que le millimètre, ce qui peut être qualifié d'excellent au regard des précisions recherchées dans les réseaux d'auscultation.

Lors de leur prise en compte dans les formules de correction du nivellement géométrique, pour la transformation vers des altitudes ellipsoïdales (formule 2.58), les valeurs de cotes du géoïde n'introduisent pas d'incertitudes significatives dans la détermination des dénivelées.

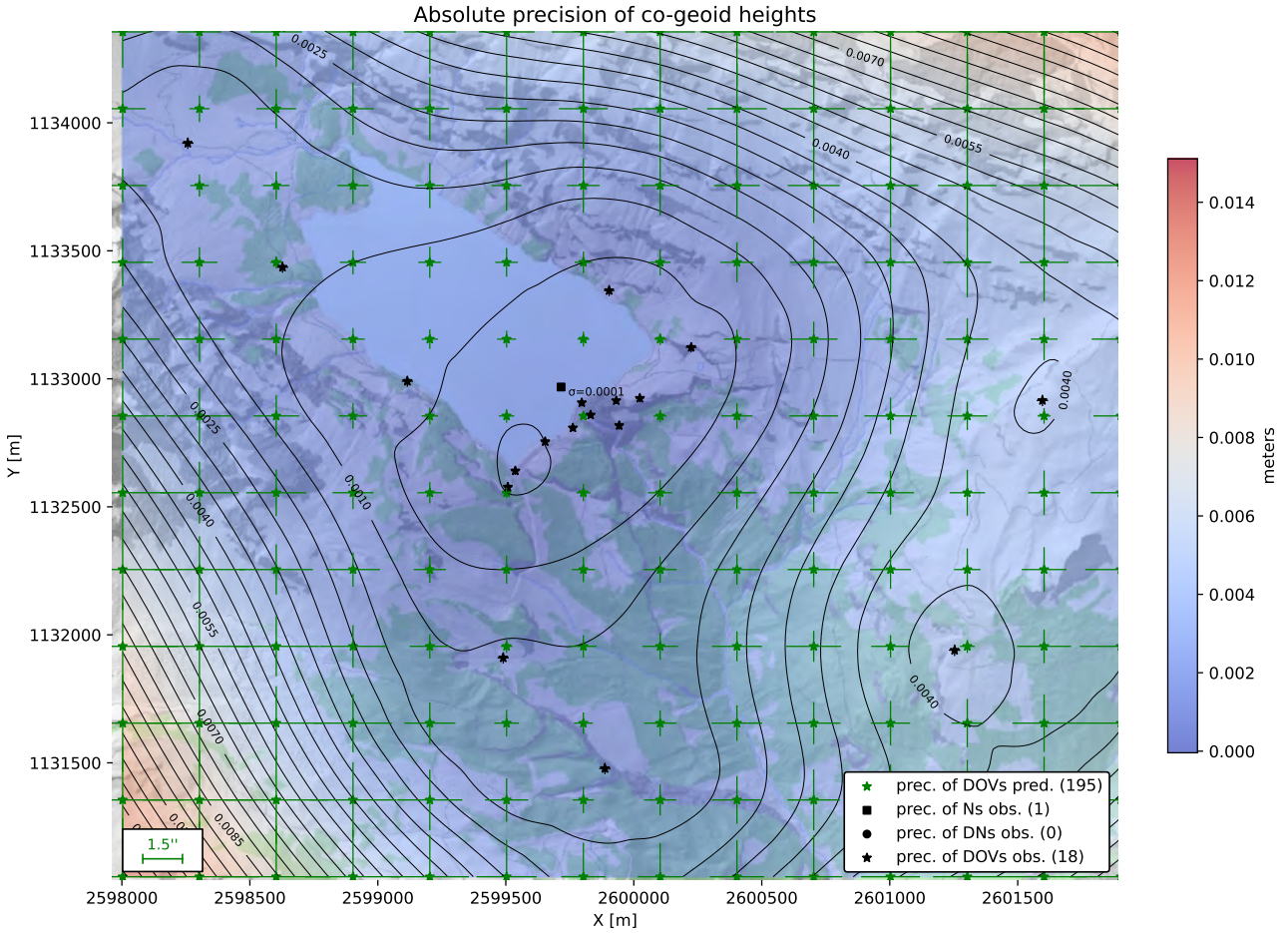



**Fig. 3.38** – Carte représentant la précision du co-géoïde et des déviations de la verticale sur le site d'étude. Source : (Casto, 2026)

La précision obtenue sur les déviations de la verticale est également très élevée, avec une incertitude moyenne inférieure à 0.2 ". Cette précision permet de corriger de manière fiable les directions horizontales ainsi que les angles zénithaux. Cet aspect est particulièrement important dans la mesure où les instruments utilisés présentent une précision angulaire interne de l'ordre de 0.5 ", et où la tolérance admise pour les mesures de série est fixée à 1 ". Les corrections appliquées ne doivent donc pas introduire de biais supplémentaires dans les observations, mais au contraire contribuer à leur cohérence et à leur fiabilité globale.

### Transformation directe des déviations de la verticale

Les formules et principes ci-dessous font référence au cours de géodésie de (Guillaume, 2024).

Les mesures astro-géodésiques ont permis de déterminer avec précision les coordonnées astronomiques d'un point $\Lambda_{\text{ITRS}}(x), \Phi_{\text{ITRS}}(x)$, les coordonnées ellipsoïdales de $\lambda_{\text{ITRS}}(x), \phi_{\text{ITRS}}(x)$ sont reliées avec les coordonnées astronomiques par la déviation de la verticale. Les coordonnées astronomiques sont définies par la direction locale du fil à plomb, alors que pour les coordonnées ellipsoïdales, la verticale est donnée par la normale à l'ellipsoïde.

Pour la suite du développement, on considère les transformations de coordonnées entre les cadres comme connus soit :

$$\begin{aligned} \Lambda_{\text{ITRS}}(x), \Phi_{\text{ITRS}}(x) &\rightarrow \Lambda_{\text{CH1903+}}(x), \Phi_{\text{CH1903+}}(x) \\ \lambda_{\text{ITRS}}(x), \phi_{\text{ITRS}}(x) &\rightarrow \lambda_{\text{CH1903+}}(x), \phi_{\text{CH1903+}}(x) \end{aligned} \tag{3.77}$$

### Relation entre les coordonnées astronomiques et ellipsoïdales

Les composantes de la déviation de la verticale $\eta(x), \xi(x)$ sont reliées aux coordonnées comme suit :

$$\begin{aligned} \Lambda(x) &= \lambda(x) + \frac{\eta(x)}{\cos\phi(x)} \\ \Phi(x) &= \phi(x) + \xi(x) \end{aligned} \tag{3.78}$$

En exprimant les deux composantes dans le système CH1903+ on trouve :

$$\begin{aligned} \eta_{\text{CH1903+}}(x) &= (\Lambda_{\text{CH1903+}}(x) - \lambda_{\text{CH1903+}}(x)) \cdot \cos\phi_{\text{CH1903+}}(x) \\ \xi_{\text{CH1903+}}(x) &= \Phi_{\text{ITRS}}(x) - \phi_{\text{ITRS}}(x) \end{aligned} \tag{3.79}$$

### Passage de CH1903+ à MN95

L'orientation des déviations de la verticale s'obtient par une rotation qui dépend de la convergence du méridien $\mu(E, N)$ :

$$\begin{pmatrix} \eta_{\text{MN95}}(E,N) \\ \zeta_{\text{MN95}}(E,N) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\mu(E,N) & -\sin\mu(E,N) \\ \sin\mu(E,N) & \cos\mu(E,N) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \eta_{\text{CH1903+}}(x) \\ \xi_{\text{CH1903+}}(x) \end{pmatrix} \tag{3.80}$$

Dans le cas particulier où seules des déviations de la verticale seraient utiles, il est alors possible de calculer directement les valeurs de $\eta, \xi$ à l'aide de ces formules sans calculer un co-géoïde complet. A la figure 3.39 il est possible d'observer les orientations et vecteurs des déviations de la verticale sur le site de Zeuzier entre les composantes ITRS et MN95 projetées.

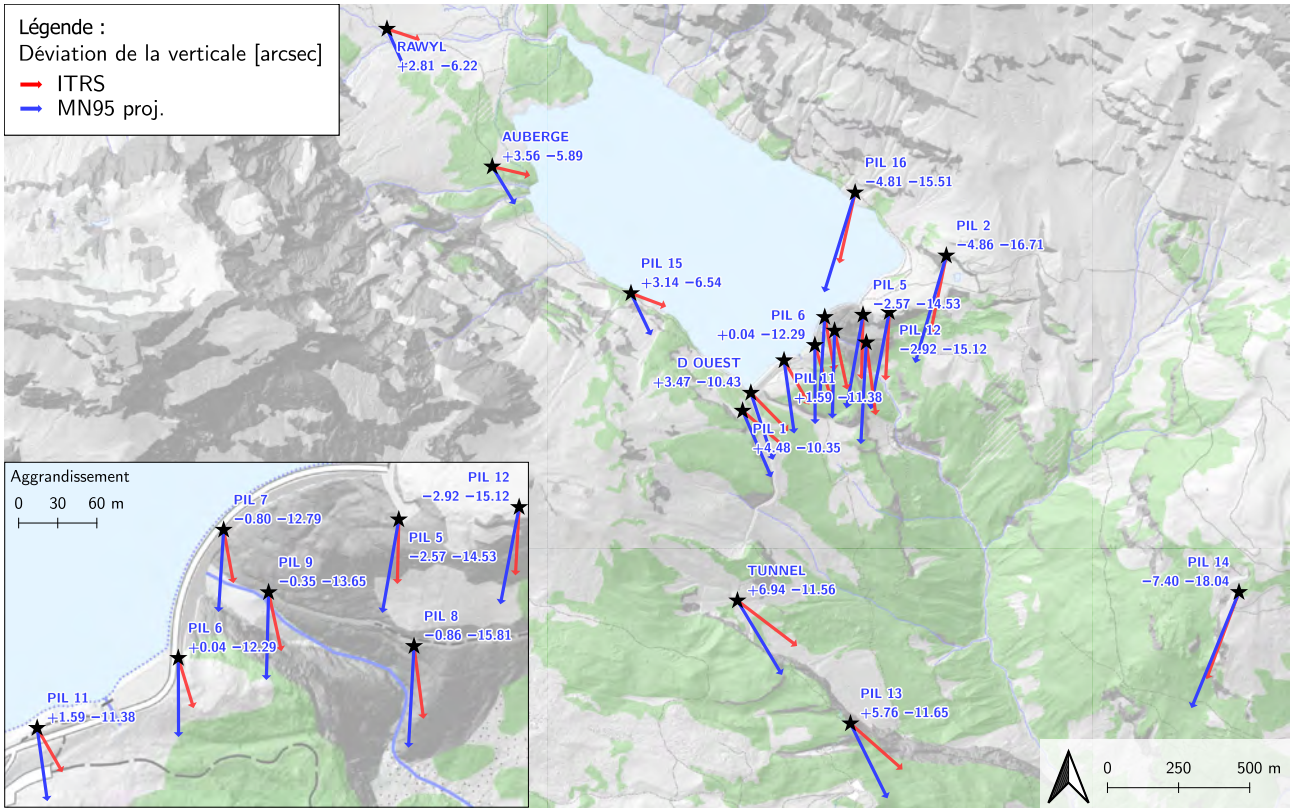



**Fig. 3.39** – Déviation de la verticale dans le système ITRS astronomique et en MN95. Source : (Casto, 2026)

#### 3.7.4.1 CHGEO2004 vs Géoïde local

Afin de limiter le nombre d'éléments la comparaison va être uniquement explicitée sur les points stationnés, voir tableau des différences (CHGEO2004 = CH, Géoïde Local = Loc) tableau 3.14.

| Points | Géoïde | | | Dev. Verticale | | | | Delta. | | Delta à 1000 m | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $N_{CH}$ [m] | $N_{Loc}$ [m] | $\Delta N$ [mm] | $\eta_{CH}$ [cc] | $\xi_{CH}$ [cc] | $\eta_{Loc}$ [cc] | $\xi_{Loc}$ [cc] | $\Delta\eta$ [cc] | $\Delta\xi$ [cc] | $\Delta\eta$ [mm] | $\Delta\xi$ [mm] |
| 1 | 1.0928 | 1.0924 | −0.4 | 15.3 | −35.3 | 14.89 | −31.81 | −0.4 | **3.5** | −0.6 | **5.5** |
| 2 | 1.1258 | 1.1245 | **−1.3** | −13.6 | −53.7 | −15.21 | −51.07 | **−1.6** | **2.6** | **−2.5** | **4.1** |
| 4 | 1.1061 | 1.1058 | −0.3 | 1.8 | −42.0 | 1.59 | −39.34 | −0.2 | **2.7** | −0.3 | **4.2** |
| 5 | 1.1125 | 1.1121 | −0.4 | −5.3 | −46.1 | −7.47 | −45.41 | **−2.2** | 0.7 | **−3.4** | 1.1 |
| 6 | 1.1059 | 1.1057 | −0.2 | 2.3 | −41.3 | 1.40 | −38.30 | −0.9 | **3.0** | −1.4 | **4.7** |
| 7 | 1.1102 | 1.1100 | −0.2 | −1.9 | −42.9 | −2.78 | −40.26 | −0.9 | **2.6** | −1.4 | **4.1** |
| 8 | 1.1089 | 1.1083 | −0.6 | −2.6 | −45.7 | −3.17 | −47.62 | −0.6 | **−1.9** | −0.9 | **−3.0** |
| 9 | 1.1078 | 1.1075 | −0.3 | 0.3 | −42.2 | −0.44 | −39.07 | −0.7 | **3.1** | −1.2 | **4.9** |
| 10 | 1.1108 | 1.1105 | −0.3 | −3.1 | −44.4 | −5.31 | −44.46 | **−2.2** | −0.1 | **−3.5** | −0.1 |
| 11 | 1.1022 | 1.1021 | −0.1 | 5.9 | −39.0 | 4.07 | −35.25 | −1.8 | **3.7** | −2.9 | **5.9** |
| 12 | 1.1145 | 1.1138 | −0.7 | −7.5 | −48.3 | −8.29 | −47.40 | −0.8 | 0.9 | −1.2 | 1.4 |
| 13 | 1.0483 | 1.0462 | **−2.1** | 19.4 | −36.6 | 17.83 | −35.94 | −1.6 | 0.7 | −2.5 | 1.0 |
| 14 | 1.0922 | 1.0864 | **−5.8** | −23.9 | −59.2 | −22.79 | −55.62 | 1.1 | **3.6** | 1.7 | **5.6** |
| 15 | 1.1041 | 1.1045 | 0.4 | 9.0 | −24.9 | 9.68 | −20.27 | 0.7 | **4.6** | 1.1 | **7.3** |
| 16 | 1.1294 | 1.1287 | −0.7 | −15.7 | −52.0 | −16.10 | −49.16 | −0.4 | **2.8** | −0.6 | **4.5** |

**Tab. 3.14** – Comparaison entre les valeurs de cotre du géoïde et déviation de la verticale issues du modèle CHGEO2004 et local. Sources des valeurs Local (Casto, 2026)

Le tableau précédent 3.14 met en évidence que le modèle du géoïde local apporte des corrections qui restent faibles, typiquement pour la cote du géoïde la variation maximale est de 5.8 mm au pilier 14. Les variations sur les valeurs du géoïde concernent essentiellement des piliers situés dans une topographie très accidentée, comme au bord d'une falaise pour les points 2, 8, 13, 14, 15 ; dans ces cas, le modèle global ne permet pas de correctement modéliser ces courtes longueurs d'ondes.

Concernant, les déviations de la verticale, le constat n'est pas tout à fait identique, l'amplitude de la composante $\xi$ est sous-estimé dans le modèle global (Nord-Sud), en moyenne de 2.5 cc, ce qui à 1 000 m crée un écart en distance de 4 mm. A très courte distance, l'ajustement des déviations de la verticale, a peu d'impact, mais dans les réseaux d'auscultation, les visées vers les points hors d'influence sont souvent longues, elles peuvent être significatives.

## 3.8 Traitement du Monitoring

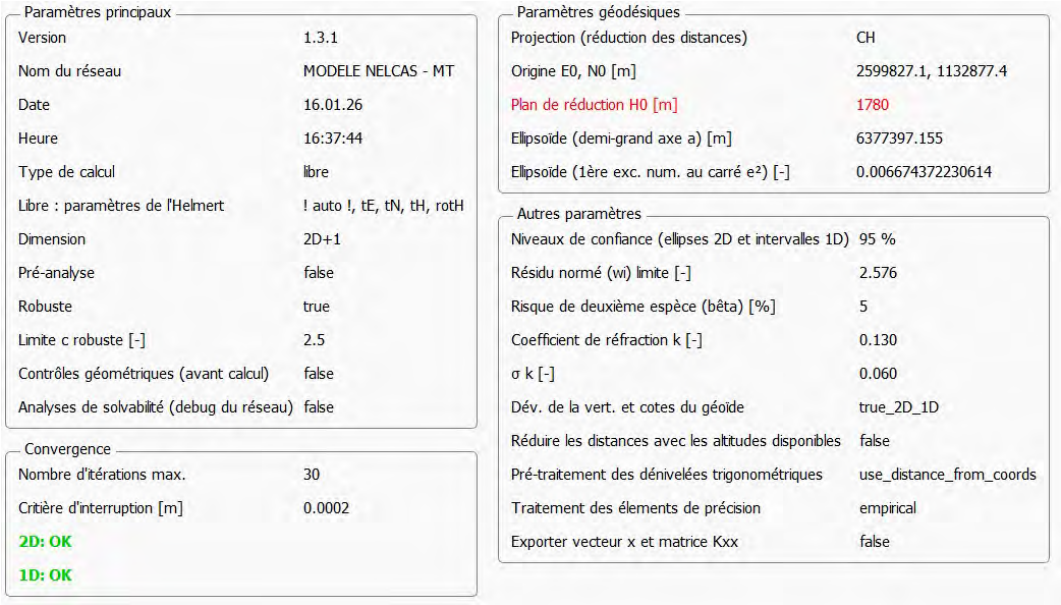
Dans le cadre de cette étude, le monitoring permet de suivre avec précision les mouvements de l'ouvrage et d'évaluer ses impacts sur les observations géodésiques.

### 3.8.1 Traitement des données du monitoring

Le monitoring a été fonctionnel durant toute la semaine de mesure et on dénombre un total de 1 180 cycles de mesures complets. L'algorithme intégré dans le logiciel d'acquisition réalise un calcul de la position de la station, et élimine les observations aberrantes sur les points de référence à l'aide de filtres statistiques.

Afin de maîtriser toute la chaîne d'analyse, il est choisi de recalculer la position de tous les points à l'aide d'une compensation par les moindres carrés et d'un modèle stochastique rigoureux et adapté aux observations ; ci-dessous la chaîne de traitement des observations du monitoring :

1. Export de la base de données, au format "json".
2. Extraction des observations moyennées pour chaque cycle de mesure, balise "average".
3. Correction des observations des paramètres atmosphériques :
   - Variante 1 : selon stratégie standard appliquée dans le monde professionnel. Utilisation des données de la station météo du pilier 4, et interpolation au niveau moyen de chaque visée avec les formules standard (Barrell & Sears, 1939).
   - Variante 2 : application des stratégies qui ont été mises en place dans ce travail, intégration des paramètres de pression, température, hydrométrie avec un pas de 10 m et basé sur la stratégie moindres carrés et 4D, formules section 3.6.5 et la stratégie décrite au chapitre 3.7.1.
4. Les numéros de station, ainsi que les points de surveillances sont incrémentés d'un numéro de cycle faisant référence au temps d'acquisition.
5. La stratégie de compensation mise en place est sous la forme d'un empilage d'états, les numéros des points de référence (O1 à O5) sont les mêmes à tous les cycles, seuls les numéros de station et l'indice des points surveillés évoluent. La stratégie d'ajustement est la suivante :
   - Utilisation du logiciel NelCas v1.3.1 (HEIG-VD, 2025), il ne présente aucune limitation au niveau du nombre d'observations ou d'inconnues il est donc parfaitement adapté à la situation.
   - Le calcul est configuré pour un ajustement avec datum minimum en mode libre, aucune contrainte sur les observations.
   - Le point d'origine est ramené au niveau du monitoring en planimétrie et altimétrie
   - Les points d'appuis pour la compensation libre sont les (O1 à O5), le mode calcul "robuste" est activé.
   - Le modèle stochastique est fixé comme suit :
     - $\sigma_{\text{dist}} = 0.6 + 1\,ppm$
     - $\sigma_r = \sigma_\zeta = 3\,cc$
     - $\sigma_{\text{cent.stat}} = \sigma_I = 0.1\,mm$
     - $\sigma_{\text{cent.cible}} = \sigma_S = 0.3\,mm$
   - Récapitulatif des paramètres généraux utilisés pour le calcul dans la figure ci-dessous 3.40. Le calcul prend 15 min il converge et se termine normalement malgré 22478 inconnues planimétriques et 10647 pour l'altimétrie.



Paramètres principaux

| | |
|---|---|
| Version | 1.3.1 |
| Nom du réseau | MODELE NELCAS - MT |
| Date | 16.01.26 |
| Heure | 16:37:44 |
| Type de calcul | libre |
| Libre : paramètres de l'Helmert | ! auto !, tE, tN, tH, rotH |
| Dimension | 2D+1 |
| Pré-analyse | false |
| Robuste | true |
| Limite c robuste [-] | 2.5 |
| Contrôles géométriques (avant calcul) | false |
| Analyses de solvabilité (debug du réseau) | false |

Convergence

| | |
|---|---|
| Nombre d'itérations max. | 30 |
| Critère d'interruption [m] | 0.0002 |
| 2D: OK | |
| 1D: OK | |

Paramètres géodésiques

| | |
|---|---|
| Projection (réduction des distances) | CH |
| Origine E0, N0 [m] | 2599827.1, 1132877.4 |
| Plan de réduction H0 [m] | 1780 |
| Ellipsoïde (demi-grand axe a) [m] | 6377397.155 |
| Ellipsoïde (1ère exc. num. au carré e²) [-] | 0.006674372230614 |

Autres paramètres

| | |
|---|---|
| Niveaux de confiance (ellipses 2D et intervalles 1D) | 95 % |
| Résidu normé (wi) limite [-] | 2.576 |
| Risque de deuxième espèce (bêta) [%] | 5 |
| Coefficient de réfraction k [-] | 0.130 |
| σ k [-] | 0.060 |
| Dév. de la vert. et cotes du géoïde | true_2D_1D |
| Réduire les distances avec les altitudes disponibles | false |
| Pré-traitement des dénivelées trigonométriques | use_distance_from_coords |
| Traitement des élements de précision | empirical |
| Exporter vecteur x et matrice Kxx | false |

**Fig. 3.40** – Résumé des paramètres importants de la compensation libre du monitoring dans NelCas

- Après épuration, on dénombre un total de 57 observations planimétriques éliminées toutes sur le point O2, qui est le plus proche, les écarts latéraux sur les résidus sont hors tolérance en moyenne de 5 mm, et 4 observations pour l'altimétrie également sur le point O2. Cela représente un pourcentage de mauvais pointés inférieur à 5 %.
- Les erreurs de moyennes de groupe sont excellentes 0.3 mm pour les distances, 2.7 cc pour les directions horizontales, 0.4 mm pour les dénivelées.

6. La précision finale sur les points de surveillance M1 à M8, avec intervalle de confiance à 95 % est inférieure à 1 mm pour tous les points. On devrait considérer un déplacement comme significatif s'il est plus grand que 1.4 mm entre deux cycles avec un intervalle de confiance à 95 %.

Les observations du monitoring ont été réalisées sans correction atmosphérique, et confrontées dans le graphique 3.33 afin de quantifier l'impact des paramètres météos sur les observations, les courbes suivantes sont représentées :

1. brutes sans correction atmosphérique, courbe : **RAW**
2. correction des distances avec les paramètres au niveau moyen de la ligne de visée, courbe : **Barrel**
3. application de la stratégie moindre carré pour la correction des distances, courbe : **IDW**
4. correction avec le modèle 4D, courbe : **4D**

A la suite des calculs de compensation dans le logiciel NelCas, voir résumé du calcul à l'annexe K page A-33. Les coordonnées sont toutes dans le même cadre de référence, les déplacements sont donc difficilement interprétables.

Afin de pouvoir évaluer les amplitudes de l'ouvrage et les comparer au pendule , il convient de mettre en place des systèmes de coordonnées tangentielles radiales ($uv$), orientées à la forme de l'ouvrage tel que l'axe $u$ (abscisse) tangentiel au bord de l'ouvrage et $v$ radial afin qu'un déplacement positif représente un déplacement vers l'aval. La situation des repères est représentée à la figure 3.41, de même que la situation des points de surveillance et de référence.

Le passage des coordonnées globales au système local est réalisé par une transformation de coordonnée, translation et rotation. Pour chaque système de coordonnées il faut définir le point d'origine, pour la coordonnée du point concerné M# et le gisement dans le système global de l'axe $v$ de sorte que la matrice de transformation pour tout point $i$ est la suivante, avec comme coordonnée planimétrique à l'origine dans le système $uv$ $(1000.0, 2000.0)$ :

$$\begin{pmatrix} u_i \\ v_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\varphi_u^{\text{global}} & \sin\varphi_u^{\text{global}} \\ -\sin\varphi_u^{\text{global}} & \cos\varphi_u^{\text{global}} \end{pmatrix} \cdot \left( \begin{pmatrix} E_i \\ N_i \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} E_{\text{ori uv}} \\ N_{\text{ori uv}} \end{pmatrix} \right) + \begin{pmatrix} 1000.0 \\ 2000.0 \end{pmatrix} \quad [m] \tag{3.81}$$

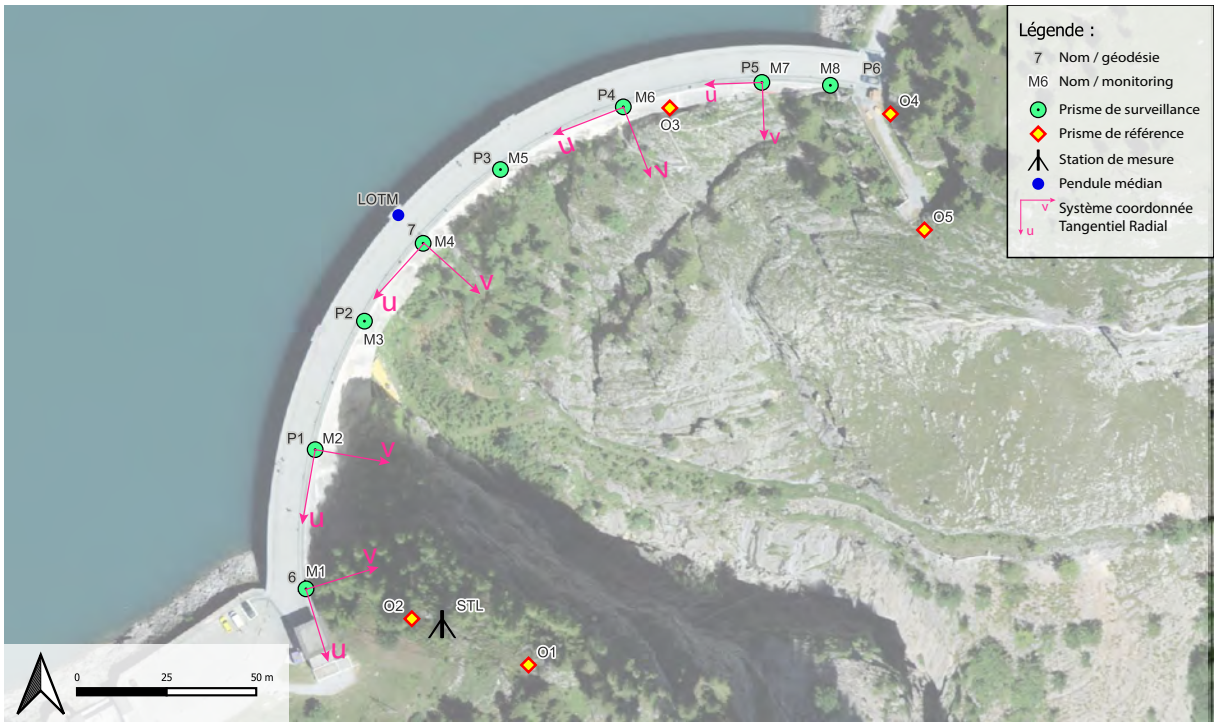



**Fig. 3.41** – Situation des points auscultés par le monitoring.

### 3.8.2 Impact sur les mesures géodésiques

Dans une première phase d'analyse, les déplacements du point **M4** sont étudiés en comparaison avec ceux du pendule médian (LOTM). Les mouvements observés sont présentés dans le graphique 3.33. La stratégie de représentation est identique pour l'ensemble des courbes : la référence est fixée à la première mesure, effectuée le 15.09.2025 à 17 h.

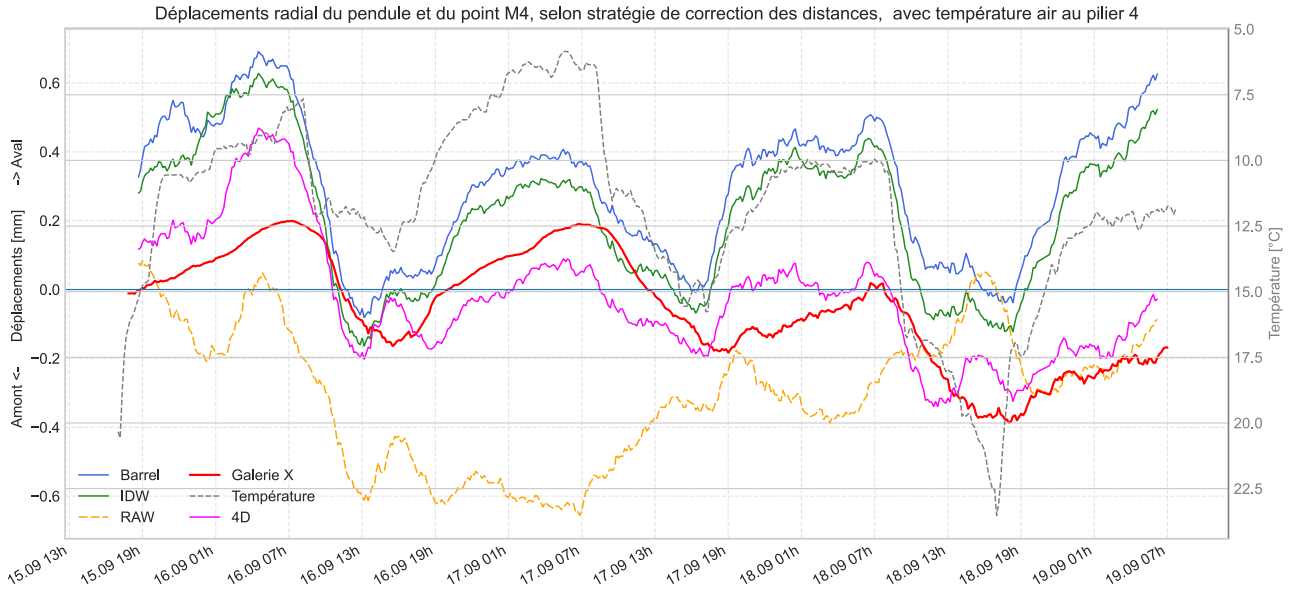
La courbe de température a volontairement été inversée afin de faciliter l'interprétation conjointe des phénomènes observés : un refroidissement de l'atmosphère correspond à un déplacement vers l'aval, tandis qu'une augmentation de la température est associée à un déplacement vers l'amont. L'évolution des déplacements est ensuite exprimée relativement à cette première détermination, ce qui permet une comparaison directe entre les différentes courbes. Les observations suivantes peuvent alors être faites :

- Les déplacements mesurés par le pendule, représentés par la courbe rouge, peuvent être considérés comme les valeurs doit. La précision de lecture du système électronique est de l'ordre du centième de millimètre ; le dispositif est installé en galerie X et protégé des influences extérieures.
- Une première constatation globale montre que les résultats du monitoring, représentés par les courbes verte (IDW) et bleue (Barrel), présentent une forme générale similaire à celle du pendule, bien que les amplitudes diffèrent. La courbe orange-trait tillé, représente les mesures brutes non corrigées des paramètres atmosphériques.
- Les deux courbes issues du monitoring montrent toutefois une très forte corrélation avec la température. Les mouvements sont particulièrement bien synchronisés avec la courbe de température (courbe grise), notamment entre le 17.09 à 13 h et le 18.09 à 7 h.
- L'amplitude (amont-aval) des déplacements mesurés par le monitoring entre la nuit du 15.09 et le 16.09 à 13 h atteint environ 0.8 mm, alors que celle observée au pendule est de l'ordre de 0.4 mm.
- La stratégie de correction des distances, illustrée par les courbes bleue et verte, met en évidence un léger décalage d'amplitude. En moyenne, les valeurs diffèrent d'environ 0.1 mm. Bien que cette différence soit faible, l'évolution temporelle des déplacements permet de la distinguer clairement.
- La courbe verte, correspondant à la compensation des distances par une méthode linéaire associée à une interpolation IDW, montre que l'intégration de la température le long de la ligne de visée améliore

légèrement les résultats par rapport à la méthode standard. Un décalage moyen d'environ 0.3 mm subsiste toutefois par rapport au pendule.

- La courbe magenta représente les distances traitées **à l'aide du modèle 4D.** Cette stratégie fournit des déplacements très proches de ceux mesurés par le pendule, avec un offset moyen de **0.1** mm, ce qui peut être considéré comme un excellent résultat. Des variations plus importantes sont observées durant la nuit du 16 septembre ; cette période correspond à des conditions météorologiques défavorables (pluie), susceptibles d'expliquer les écarts plus marqués.

Comme l'illustre le graphique 3.33, la correction des paramètres atmosphériques est indispensable pour l'interprétation des déplacements. Toutefois, dans la configuration particulière du site, la station de mesure étant située en bord de gorge, les paramètres météorologiques influencent fortement les résultats. La prise en compte de la topographie locale, ainsi que l'estimation de la température de l'air au centre de la vallée à environ 140 m au-dessus du sol, apporte une plus-value significative. Cette approche permet d'obtenir des déplacements nettement plus proches de ceux mesurés par le pendule. Pour la suite des analyses des mouvements de l'ouvrage pendant les mesures, la variante de traitement avec le modèle 4D est retenue.




**Graph. 3.33** – Évolution du couronnement au niveau du point M4 avec le pendule, visualisation des déplacements radiaux, si positif déplacement vers l'aval si négatif déplacement vers l'amont.

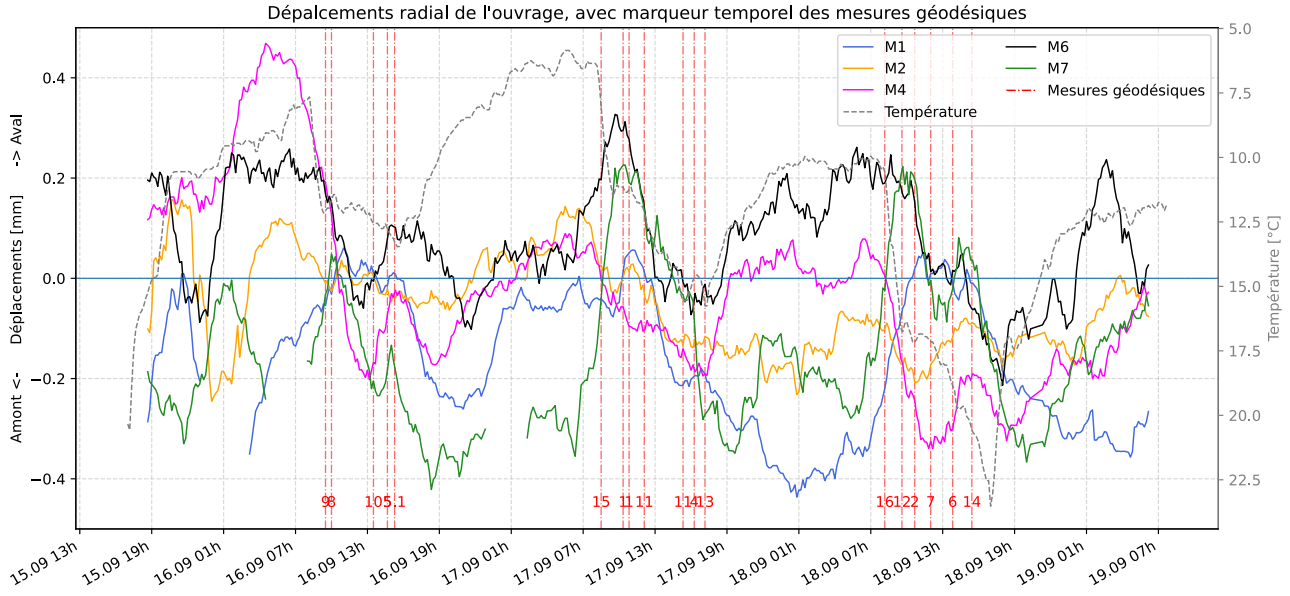
Dans la stratégie d'acquisition des observations d'un réseau géodésique, il est généralement supposé que les points de surveillance situés sur l'ouvrage sont stables durant la période de mesure. Toutefois, ces points ne sont pas observés simultanément depuis l'ensemble des stations. Par conséquent, en cas de mouvement de l'ouvrage, les points observés ne se trouvent plus exactement à la même position au moment des différentes observations. Lors de la compensation des observations, cette non-stabilité peut alors engendrer des résidus qui ne sont pas liés à une imprécision de mesure, mais bien à la déformation réelle de l'ouvrage.

Les graphiques 3.34 et 3.35 présentent l'évolution des déplacements des points M1, M2, M4, M6 et M7 durant la période des mesures. Une ligne verticale rouge indique le moment des observations réalisées depuis les piliers géodésiques en direction de l'ouvrage. Les amplitudes de déplacement les plus importantes sont observées au centre de la voûte, au niveau du point M4, ce qui est cohérent avec le comportement attendu de la structure.

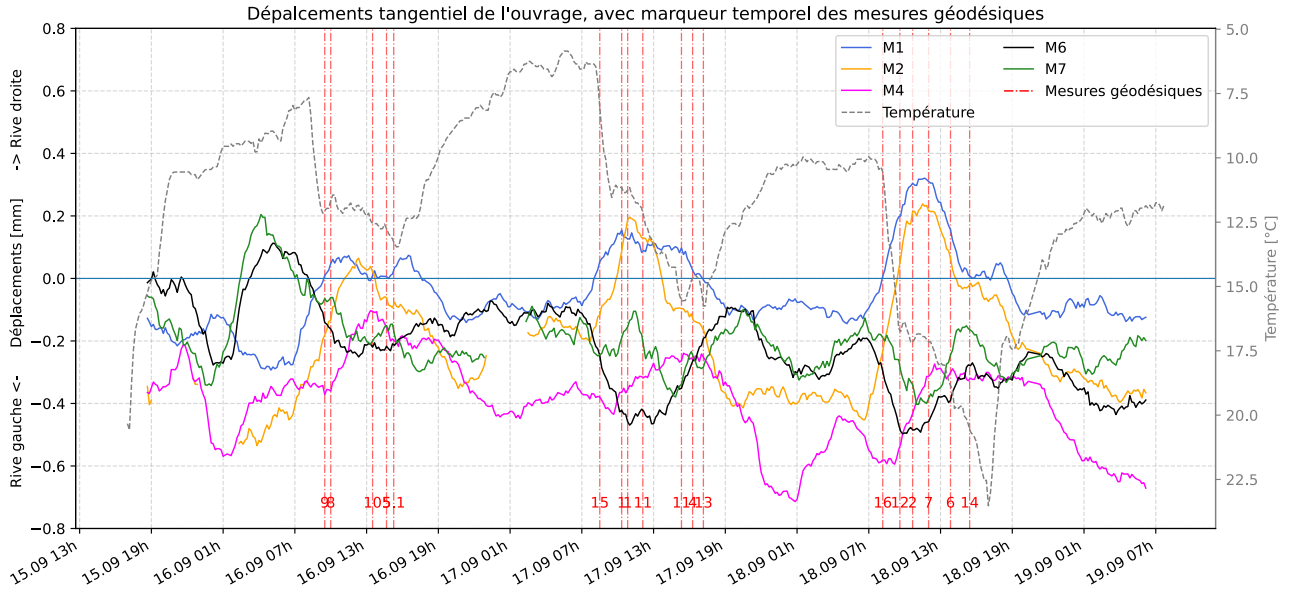
Les mesures ont été effectuées durant la journée, entre 8 h et 18 h. Cette stratégie permet de limiter les observations réalisées sous de forts gradients de température, à l'exception de la journée du 18 septembre, qui présente la variation thermique la plus marquée entre le matin et le soir.

Entre deux périodes de mesure, la variation maximale de position des points atteint environ 0.4 mm. En considérant une station de mesure située à une distance d'environ 100 m, cette variation correspond à une différence angulaire de l'ordre de 2.5 cc. Étant donné que la précision introduite dans le modèle stochastique

de la compensation est fixée à 3 cc, cette variation peut être considérée comme non significative au regard des incertitudes de mesure.




**Graph. 3.34** – Déplacements radiaux enregistrés à l'aide du monitoring, sur les points M1, M2, M4, M6, M7. Avec marqueurs temporels des instants de mesures aux piliers géodésiques vers l'ouvrage.




**Graph. 3.35** – Déplacements tangentiels enregistrés à l'aide du monitoring, sur les points M1, M2, M4, M6, M7. Avec marqueurs temporels des instants de mesures aux piliers géodésiques vers l'ouvrage.

# CHAPITRE 4

# VALIDATION AVEC LE RÉSEAU GÉODÉSIQUE DE ZEUZIER

Les développements réalisés aux chapitres précédents vont être appliqués et testés sur les observations du réseau géodésique de Zeuzier acquises par le bureau Geosat SA.

## 4.1 Positionnement global par GNSS

Le positionnement par GNSS permet de définir un cadre de référence homogène et indépendant des problématiques géophysiques locales. La cote du géoïde est exploitée uniquement lors de la transformation des altitudes ellipsoïdales en altitudes orthométriques. Le réseau de stations permanentes AGNES permet de rattacher les mesures GNSS locales à des points de référence situés à distance du site étudié, dans des secteurs supposés stables. Toutefois, comme présenté à la section 2.5.2.3, la croûte terrestre est en mouvement, en particulier dans le contexte alpin.

Dans la suite de ce développement, la faisabilité du calage d'un réseau de surveillance géodésique sur les stations AGNES est évaluée. Les données GNSS mises à disposition par (**OIKEN_Official**) et (Swisstopo-PNAC, 2024) permettent de tester cette stratégie sur quatre états temporels couvrant la période de 2010 à 2025.

### 4.1.1 Post-traitement des mesures GNSS

Les stations AGNES étant situées à grande distance du site d'auscultation (annexe C page A-9), les lignes de base associées doivent être traitées à l'aide de logiciels adaptés aux longues distances. Afin d'évaluer la faisabilité d'un post-traitement réalisé par un bureau privé, deux stratégies ont été mises en œuvre :

- post-traitement des lignes de base par le service PNAC à l'aide du logiciel Bernese (Dach et al., 2015) ;
- post-traitement réalisé à l'aide du logiciel Leica Infinity V5.0 (AG, 2025).

#### 4.1.1.1 Traitement avec Bernese, état 2025

Le logiciel *Bernese GNSS Software* est une suite logicielle de référence dédiée au traitement scientifique des observations GNSS de haute précision. Développé par l'Institut d'astronomie de l'Université de Berne (AIUB), il est largement utilisé dans les domaines de la géodésie, de la géodynamique, de la surveillance des déformations ainsi que pour l'établissement et l'entretien de réseaux de référence nationaux et internationaux.

Bernese repose sur des modèles physiques rigoureux et des méthodes de traitement avancées permettant l'exploitation d'observations GNSS en mode statique, statique rapide ou cinématique. Il intègre notamment une modélisation précise des orbites satellitaires et des horloges, la correction des délais ionosphériques et troposphériques, ainsi que la prise en compte du champ de pesanteur et des effets relativistes. Ces caractéristiques en font un outil particulièrement adapté aux applications nécessitant une précision millimétrique.

Dans le cadre de ce travail, le logiciel Bernese est utilisé pour le traitement des observations GNSS statiques acquises sur le site d'étude. Les résultats obtenus permettent de déterminer les coordonnées des points avec une grande précision et servent de référence pour l'analyse géodésique globale.

Le traitement des observations avec ce logiciel étant complexe et exigeant, il a été sous-traité au service PNAC. Les observations GNSS acquises sur le terrain ont été transmises au format RINEX, accompagnées de l'ensemble des métadonnées nécessaires à un post-traitement rigoureux des lignes de base GNSS. Un extrait du fichier de résultats très détaillé, est présenté en annexe L, page A-47.

Les principales caractéristiques du calcul sont les suivantes :

- intégration des observations locales dans le calcul des lignes de base du réseau AGNES pour les quatre nuits d'observation, comme illustré à la figure 4.1 par la répartition des lignes de base ;

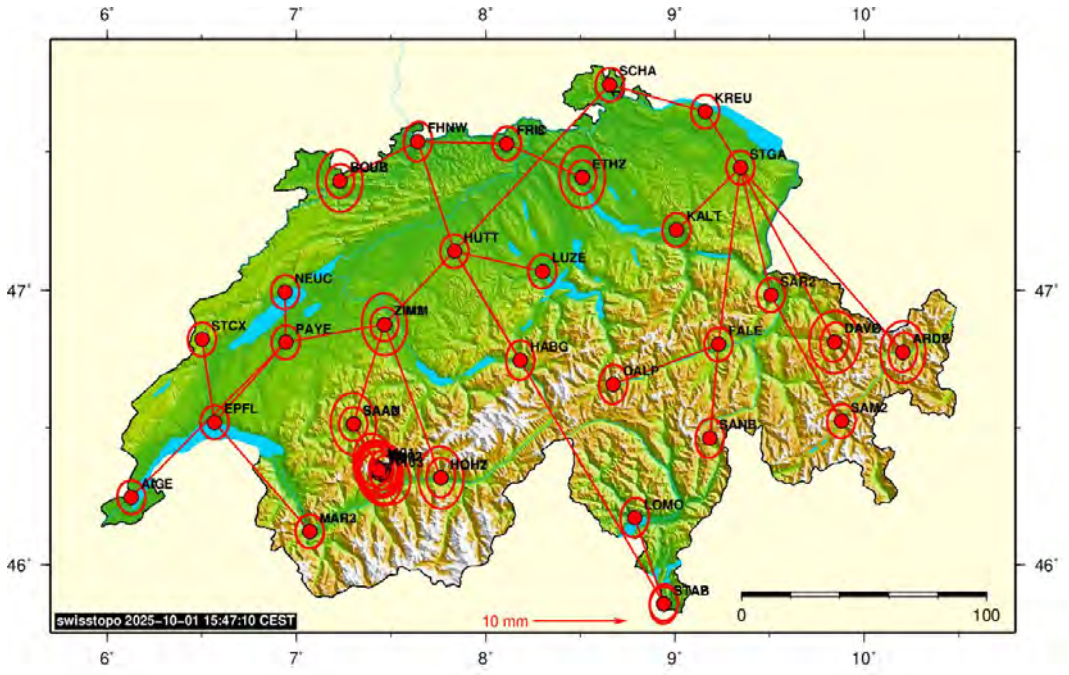
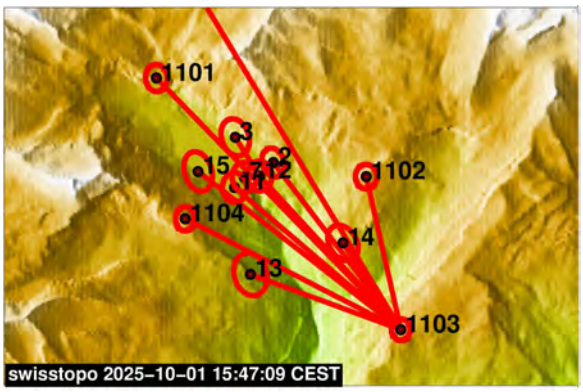
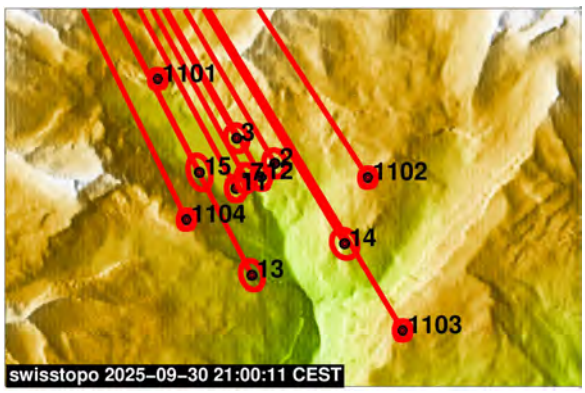



**Fig. 4.1** – Lignes de base calculées par le logiciel Bernese. Source : (Swisstopo-PNAC, 2024)

- calcul multi-constellation ;
- contrôle interne de la qualité des observations et assemblage des quatre sessions de mesures ;
- diffusion des coordonnées, soit sous forme ajustée des quatre sessions combinées, soit par session individuelle, dans les cadres de référence ETRS89 ou CH1903+, avec des altitudes ellipsoïdales ;
- mise en œuvre de deux stratégies de calculs distinctes :
  - une seconde stratégie utilisant le point 1103 du réseau local comme pivot, avec un calcul des lignes de base en configuration locale (figure 4.2a) ;
  - une première stratégie dans laquelle les points du site de Zeuzier sont calculés à partir d'une station AGNES externe, (figure 4.2b).




**(a)** Point 1103 utilisé comme pivot




**(b)** Lignes de base vers Zeuzier

**Fig. 4.2** – Deux variantes de calculs Bernese pour les points du site d'étude. Source : (Swisstopo-PNAC, 2024)

### Validation et qualification des calculs Bernese

La première étape de l'analyse consiste à comparer ces deux variantes et à qualifier la qualité globale des traitements réalisés avec le logiciel Bernese.

La stratégie de compensation est strictement identique pour les deux variantes et se décline comme suit :

- post-traitement des résultats Bernese, session par session, dans le logiciel de compensation tridimensionnelle Trinet+ (Sébastien Guillaume, 2010) ;
- la variante calculée avec le point *pivot 1103* est retenue comme référence pour la comparaison ;
- modèle stochastique défini comme suit :
  - $\sigma_{\mathbf{x,y}} = 1.5\,\text{mm} \quad \sigma_z = 3.0\,\text{mm} \quad \sigma_{\text{I-centr.}} = 0.5\,\text{mm}$ ;
- la variante avec le point *pivot 1103* est ajustée en compensation libre, avec uniquement trois translations comme degrés de liberté communs aux quatre sessions ;
  - deux observations ont été éliminées sur une session, sur la coordonnée $Y$ des points MAR2 et MAR3 pour la journée du 17 septembre ($260^{\text{e}}$ jour de l'année) ;
- ajustement de la variante de calcul rattachée à SAA2 :
  - en compensation libre : élimination des deux mêmes observations sur la coordonnée $Y$ des points MAR2 et MAR3 pour la journée du 17 septembre ($260^{\text{e}}$ jour de l'année) ;
  - en compensation contrainte : contraintes appliquées sur les coordonnées issues du calcul avec le pivot 1103, tous les points étant considérés comme fixes à l'exception du site d'étude.

Les remarques générales suivantes peuvent être formulées à propos des compensations réalisées :

- les différentes sessions présentent entre elles une très bonne homogénéité ; il n'a pas été nécessaire d'introduire des paramètres de rotation inter-sessions, seules des translations ont été estimées. **Ce résultat constitue un indicateur fort de la très bonne qualité globale des calculs Bernese** ;
- l'erreur moyenne de groupe a posteriori sur les observations GNSS est très satisfaisante, avec des valeurs inférieures à 1.6 mm en planimétrie et à 2.9 mm en altimétrie ;
- la précision planimétrique des points est de l'ordre de 0.7 mm, tandis que la précision altimétrique atteint au maximum 1.5 mm, ce qui peut être considéré comme très bon pour une solution GNSS ;
- un résumé détaillé de la compensation libre avec le *pivot 1103* est présenté en annexe M page A-57.

En considérant l'état *pivot 1103* comme référence, il est alors possible de calculer les écarts (*deltas*) sur le site d'étude entre les deux variantes de calcul (figure 4.1).

| **Point** | **DY** [mm] | **DX** [mm] | **DZ** [mm] |
|---|---|---|---|
| 11 | 0.237 | −0.015 | 0.600 |
| 1101 | −0.013 | −0.015 | −0.139 |
| 1102 | −0.013 | −0.015 | −0.638 |
| 1103 | −0.012 | −0.265 | −0.388 |
| 1104 | −0.264 | −0.015 | 0.365 |
| 12 | −0.013 | 0.235 | −0.149 |
| 13 | −0.763 | −0.514 | −4.401 |
| 14 | 0.237 | −0.015 | 0.353 |
| 15 | −0.763 | −0.516 | −1.650 |
| 2 | −0.262 | −0.265 | 1.353 |
| 3 | 0.237 | 0.236 | 1.101 |
| 7 | 0.238 | −0.516 | −0.150 |

**Tab. 4.1** – Variations des coordonnées sur le site d'étude entre deux variantes de calcul

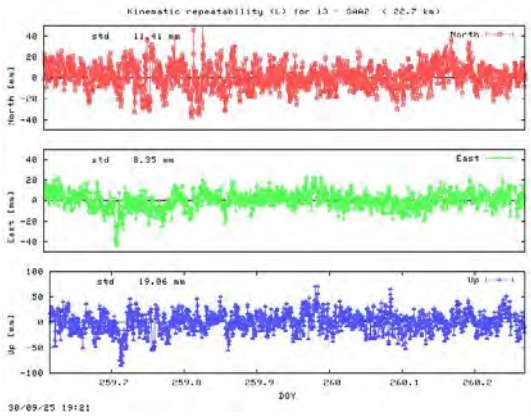
À partir du tableau 4.1, les remarques suivantes peuvent être formulées :

- les variations planimétriques sont très faibles, comprises entre environ $-0.8$ mm et 0.2 mm, et peuvent être considérées comme non significatives au regard de la précision des observations GNSS ;
- les variations altimétriques sont comprises entre $-4.4$ mm et 1.3 mm ; elles restent globalement faibles, bien que la valeur observée pour le point 13 se situe à la limite de la significativité ;
- le point 13 présente une différence altimétrique maximale de 4.4 mm entre les deux stratégies, en défaveur de la stratégie rattachée à la station SAA2.

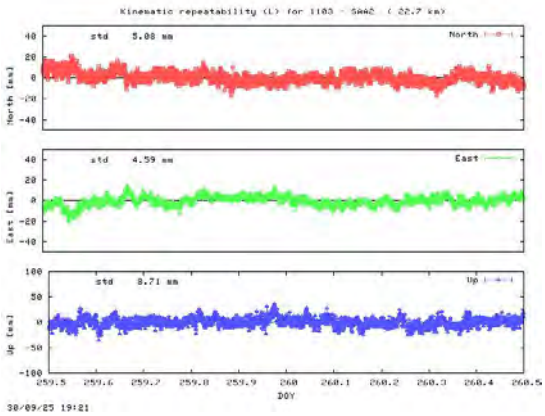
Comme rappelé dans la partie théorique (section 2.1.3), le calcul de lignes de base GNSS courtes permet de réduire significativement les effets ionosphériques et troposphériques. Il a également été montré que le calcul des lignes de base repose sur l'utilisation de couples de satellites communs entre deux récepteurs. La configuration topographique du point 13 est moins favorable aux observations GNSS, comme le confirment les analyses des lignes de base et les rapports de qualité, notamment en comparaison avec le point 1102.

Les graphiques des solutions cinématiques (figure 4.1) mettent en évidence une détermination de moindre précision pour le point 13, avec des erreurs moyennes supérieures, pouvant atteindre environ 0.1 mm de plus que la stratégie utilisant le point 1103 comme pivot. L'analyse détaillée des fichiers RINEX des observations acquises sur la station 13 (annexe O pageA-67) et sur la station 1103 (annexe N page A-61) montre que la qualité du suivi des satellites, les effets de multitrajets ainsi que les indicateurs de DOP sont nettement moins favorables au point 13 qu'au point 1103.

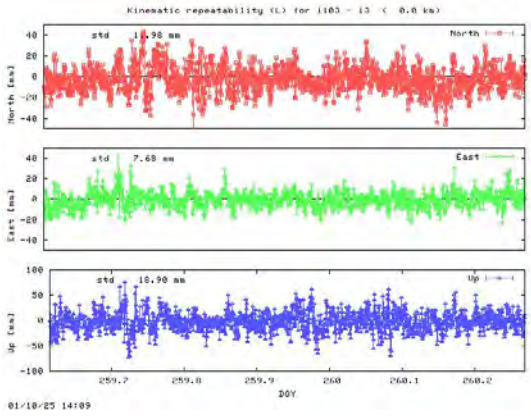
Il est délicat de désigner de manière absolue une solution comme étant la meilleure. Néanmoins, la stratégie utilisant le point 1103 comme pivot est privilégiée, car elle permet de limiter les effets liés à la modélisation atmosphérique en favorisant des lignes de base plus courtes et une géométrie d'observation plus robuste. Il est à noter que, pour les stations du réseau AGNES, aucune différence significative n'est observée entre les deux stratégies de calcul.



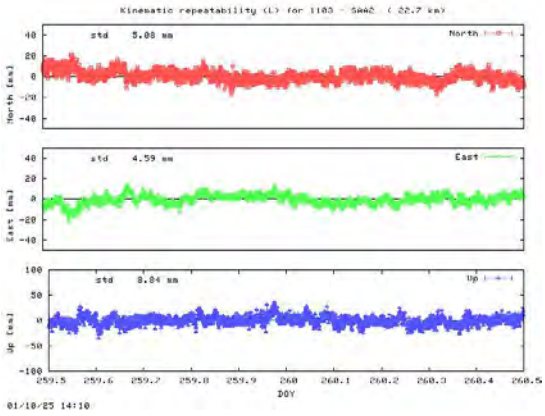
**(a)** Ligne de base 13–SAA2, stratégie rattachée au site



**(b)** Ligne de base 1103–SAA2, stratégie rattachée au site



**(c)** Ligne de base 1103–13, stratégie avec pivot



**(d)** Ligne de base 1103–SAA2, stratégie avec pivot

**Graph. 4.1** – Analyses des coordonnées en mode cinématique en fonction de la stratégie de calcul

#### 4.1.1.2 Traitement des états de 2010 à 2025 avec Leica Infinity

Le recalcul des états historiques à l'aide du logiciel Bernese s'est avéré trop complexe à mettre en œuvre dans le cadre de ce travail. Afin de valider une stratégie de surveillance GNSS à long terme basée sur le réseau AGNES, il a donc été choisi de traiter les différents états temporels à l'aide du logiciel Leica Infinity.

Le logiciel Leica Infinity permet un paramétrage complet des options nécessaires au calcul des lignes de base GNSS en mode statique, notamment l'utilisation d'éphémérides précises, la prise en compte des calibrations d'antenne, ainsi que la modélisation des effets troposphériques et ionosphériques. Ces fonctionnalités en font un outil adapté à l'analyse comparative de séries temporelles GNSS multi-époques.

Historiquement, les observations GNSS étaient principalement réalisées sur les points de la série 1100 ainsi que sur trois points du réseau géodésique situé à proximité immédiate de l'ouvrage. Afin d'évaluer la pertinence d'une stratégie de calage à long terme, le service PNAC a fourni les données des stations AGNES correspondantes à l'ensemble des époques considérées. La liste des points et des états GNSS traités est présentée dans le tableau récapitulatif 4.2.

| État | 1101 | 1102 | 1103 | 1104 | 2 | 3 | 7 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | EPFL | HABG | ZIM2 | ZERM | SAA2 | MAR2–3 | PAYE | HOH2 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2010 | × | × | × | × | | | | × | × | | × | | × | × | × | × | × | | × | × |
| 2015 | × | × | × | × | × | | | × | × | | × | | × | × | × | × | × | × | × | × |
| 2020 | × | × | × | × | × | | | × | × | | × | | × | × | × | × | × | × | × | × |
| 2025 | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × |

**Tab. 4.2** – Liste des points mesurés pour chaque état

Les calculs des différents états de mesures GNSS se sont déroulés correctement, avec des indicateurs de qualité annoncés comme très bons et des taux de fixation des ambiguïtés supérieurs à 95 % en moyenne. Un extrait représentatif d'un rapport de calcul est présenté en annexe P, page A-73.

La méthode de calcul mise en œuvre par ce logiciel génère un nombre important de lignes de base, selon une stratégie de rayonnement depuis chaque point en fonction de la durée d'acquisition. Chaque point dispose ainsi de plusieurs déterminations indépendantes (voir figure C.1 en annexe C page A-9). Un ajustement interne est donc nécessaire afin de valider la qualité des lignes de base et d'assurer la cohérence globale des résultats.

**Ajustement des lignes de base**

Le logiciel Leica Infinity dispose d'un module de compensation intégré. Le modèle de calcul par la méthode des moindres carrés implémenté permet de réaliser une compensation tridimensionnelle dans le système de coordonnées géocentriques WGS84. De nombreuses options statistiques peuvent être paramétrées ; toutefois, lorsqu'un vecteur est affecté par une erreur significative, il n'est pas possible d'éliminer uniquement la composante fautive sans rejeter l'ensemble du vecteur.

Afin de faciliter l'analyse, d'améliorer le contrôle qualité et de garantir un ajustement optimal, il a été choisi de réaliser la compensation des vecteurs GNSS à l'aide du logiciel Trinet+. Cette approche nécessite au préalable la transformation des composantes géocentriques WGS84 en composantes topocentriques.

#### 4.1.1.3 Compensation dans un modèle topocentrique

Les lignes de base GNSS sont initialement exprimées sous forme de vecteurs tridimensionnels dans le système géocentrique WGS84. La transformation vers un système topocentrique local repose sur l'application d'une matrice de rotation permettant d'orienter ces vecteurs dans le repère cible.

La relation de transformation entre les vecteurs 3D géocentriques et le système topocentrique centré sur le site de Zeuzier est établie à l'aide d'une matrice de rotation classique, telle que présentée dans le cours de géodésie de (Guillaume, 2024).

$$\begin{pmatrix} dx^{\mathbf{topo}} \\ dy^{\mathbf{topo}} \\ dz^{\mathbf{topo}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin\varphi\cdot\cos\lambda & -\sin\varphi\cdot\sin\lambda & \cos\varphi \\ -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ \cos\varphi\cdot\cos\lambda & \cos\varphi\cdot\sin\lambda & \sin\varphi \end{pmatrix} . \begin{pmatrix} dX^{\mathbf{wgs}} \\ dY^{\mathbf{wgs}} \\ dZ^{\mathbf{wgs}} \end{pmatrix} \tag{4.1}$$

Le système topocentrique est défini sur un point situé au centre du réseau GNSS avec les coordonnées suivantes :

$$\text{Topo}^{\mathbf{MN95}} = \begin{pmatrix} E = 2\,599\,800.00\,\text{m} \\ N = 1\,133\,000.00\,\text{m} \\ h = 1\,780.00\,\text{m} \end{pmatrix} \qquad \text{Topo}^{\mathbf{ell}} = \begin{pmatrix} \lambda = 7.436984880° \\ \varphi = 46.349636291° \\ h = 1\,780.00\,\text{m} \end{pmatrix} \tag{4.2}$$

Le modèle stochastique des observations est défini comme suit :

- la précision d'une ligne de base GNSS (vecteur 3D) peut être estimée à $2\,\text{mm} + 0.5\,\text{ppm}$ ;
- de manière empirique, la précision de la composante altimétrique est considérée comme environ 1.5 fois moins bonne que celle des composantes planimétriques ;
- la propagation des erreurs pour une ligne de base GNSS peut alors s'écrire comme suit afin d'estimer la précision de chacune des composantes :

$$\sigma_{3\text{D}}^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 \tag{4.3}$$

En posant l'hypothèse d'une précision identique pour les composantes planimétriques,

$$\sigma_x = \sigma_y \tag{4.4}$$

et en considérant que la composante altimétrique est dégradée d'un facteur 1.5, soit

$$\sigma_z = \frac{3}{2}\,\sigma_x \tag{4.5}$$

l'expression précédente devient :

$$\sigma_{3\text{D}}^2 = \sigma_x^2 + \sigma_x^2 + \left(\frac{3}{2}\sigma_x\right)^2 \tag{4.6}$$

En simplifiant, on obtient :

$$\begin{aligned} \sigma_{3\text{D}}^2 &= \frac{17}{4}\,\sigma_x^2 \\ \sigma_x &= \frac{2}{\sqrt{17}}\,\sigma_{3\text{D}} \end{aligned} \tag{4.7}$$

Cette formulation permet d'attribuer des poids distincts aux composantes planimétriques et altimétriques des vecteurs topocentriques lors de la compensation.

Cette stratégie de calcul et de compensation des lignes de base s'avère particulièrement pertinente, car elle permet une analyse détaillée de chaque composante du vecteur et une épuration optimale des observations GNSS. Dans le logiciel Trinet+, la compensation est réalisée en mode libre, avec les stations AGNES utilisées comme points d'appui.

Le calcul aboutit à un bloc de coordonnées homogène, accompagné des premiers indicateurs de précision pour chaque point. Un extrait du listing de résultats est présenté au tableau 4.1. Pour la session 2025, les premières constatations montrent que les précisions obtenues sur les composantes planimétriques et altimétriques sont très bonnes, avec des valeurs inférieures à 2.0 mm.

| Point Nr. | Y [m] | X [m] | Z [m] | emY [mm] | emX [mm] | emZ [mm] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 11 | 99853.6540 | 199754.6349 | 3004.2220 | 0.586 | 0.586 | 0.838 |
| 1101 | 98700.2986 | 201366.0010 | 3342.0594 | 0.597 | 0.597 | 0.858 |
| 1102 | 101796.9308 | 199915.6156 | 3356.7834 | 0.591 | 0.591 | 0.850 |
| 1103 | 102309.3109 | 197664.4287 | 3325.8281 | 0.599 | 0.599 | 0.881 |
| 1104 | 99122.6850 | 199296.6518 | 3433.9977 | 0.592 | 0.592 | 0.861 |
| 12 | 100223.7450 | 199924.2520 | 3033.7216 | 0.586 | 0.586 | 0.837 |
| 13 | 100087.3172 | 198477.6789 | 2991.5871 | 0.597 | 0.597 | 0.856 |
| 14 | 101453.7985 | 198939.8470 | 3093.8754 | 0.594 | 0.594 | 0.847 |
| 15 | 99315.3081 | 199990.5297 | 3009.7424 | 0.592 | 0.592 | 0.844 |
| 2 | 100424.4172 | 200123.0492 | 3101.0599 | 0.591 | 0.591 | 0.840 |
| 3 | 99862.3258 | 200494.3825 | 3032.8519 | 0.595 | 0.595 | 0.844 |
| 7 | 99997.7282 | 199907.0258 | 3000.6455 | 0.586 | 0.586 | 0.836 |
| EPFL | 33385.9284 | 219607.6760 | 1250.3809 | 1.362 | 1.362 | 2.058 |
| HABG | 157069.5115 | 244637.6078 | 1907.2098 | 1.370 | 1.370 | 2.101 |
| HOH2 | 125166.1204 | 196829.0379 | 2104.5365 | 0.866 | 0.866 | 1.344 |
| MAR3 | 71757.8238 | 174923.1374 | 1701.3493 | 1.071 | 1.071 | 1.676 |
| PAYE | 62439.2500 | 251673.1197 | 1398.2585 | 1.360 | 1.360 | 1.972 |
| SAA2 | 89657.8676 | 218591.8604 | 2553.2408 | 0.817 | 0.817 | 1.223 |
| ZERM | 122930.9300 | 161466.6709 | 2941.8540 | 1.113 | 1.113 | 1.757 |
| ZIM2 | 102210.3470 | 258780.9727 | 1855.0223 | 1.362 | 1.362 | 2.005 |

**Listing 4.1** – Listing des résultats de la compensation de la session 2025 en GPS seul

### Choix d'une stratégie de calcul des sessions GNSS

Les mesures GNSS s'étendent sur une période de plus de 15 ans. Sur une telle durée, les technologies GNSS, tout comme les constellations satellitaires disponibles, ont évolué de manière significative. Afin de ne pas introduire de biais entre les différentes époques et de garantir la comparabilité des résultats dans le temps, il a été choisi de traiter l'ensemble des états de mesures selon une stratégie unique : utilisation exclusive de la constellation GPS et sélection des observations acquises durant la nuit.

Divers tests préliminaires, réalisés notamment sur les observations de l'état 2025, ainsi que les compensations associées, confirment la pertinence de ce choix. Le tableau 4.3 présente une comparaison des différentes stratégies testées. La solution la plus robuste correspond au post-traitement utilisant uniquement la constellation GPS et les observations nocturnes, entre 19 h et 8 h.

| Stratégie | GNSS | GNSS 19–8 | GPS–GLONASS | GPS–GLONASS 19–8 | GPS | GPS 19–8 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| nb $D_y$ | 6 | 16 | 8 | 11 | 4 | 8 |
| nb $D_x$ | 11 | 14 | 11 | 16 | 11 | 6 |
| nb $D_z$ | 18 | 19 | 20 | 23 | 21 | 17 |
| TOTAL | 52 | 79 | 58 | 77 | 51 | 45 |

**Tab. 4.3** – Nombre d'observations éliminées en fonction de la stratégie de calcul. La mention 19–8 correspond à la sélection des observations acquises uniquement durant la nuit.

### Compensation des observations des époques 2010 à 2025

L'ensemble des époques ont été post-traités selon les mêmes paramètres de calcul, puis compensé dans le logiciel Trinet+. La chaîne de traitement appliquée est la suivante :

- post-traitement des observations GNSS dans le logiciel Leica Infinity ;
- transformation des lignes de base exprimées en coordonnées géocentriques vers un système topocentrique ;
- ajustement des lignes de base dans Trinet+ et export des coordonnées pour chaque session ;
- ajustement global des sessions d'une même époque dans Trinet+ : compensation libre, avec les stations AGNES utilisées comme points d'appui et une session fixée.

Les résultats des précisions obtenues après ajustement des sessions sont présentés dans le tableau 4.4. On constate que les erreurs moyennes a posteriori sur les composantes sont comparables pour l'ensemble des époques considérées, ce qui témoigne d'une très bonne homogénéité des traitements GNSS sur la période 2010–2025.

| **État** | $\sigma_y^{\text{post}}$ [mm] | $\sigma_x^{\text{post}}$ [mm] | $\sigma_z^{\text{post}}$ [mm] | $em_y$ [mm] | $em_x$ [mm] | $em_z$ [mm] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2010 | 0.8 | 0.6 | 3.4 | 0.6 | 0.6 | 2.3 |
| 2015 | 0.9 | 1.2 | 4.5 | 0.7 | 0.8 | 2.9 |
| 2020 | 1.8 | 1.8 | 3.9 | 1.1 | 1.1 | 2.4 |
| 2025 | 1.9 | 1.5 | 5.1 | 1.0 | 1.0 | 2.4 |

**Tab. 4.4** – Erreurs moyennes a posteriori sur les observations et précisions des composantes topocentriques $(y, x, z)$ après ajustement des sessions GNSS pour chaque état

### Test de cohérence multi-époques avec Leica Infinity

Les sessions GNSS ont été ajustées indépendamment les unes des autres. Afin d'évaluer la cohérence globale des résultats sur l'ensemble des époques, deux tests distincts ont été menés :

1. les stations du réseau AGNES sont considérées comme références communes à toutes les époques, tandis que les points du site d'étude sont libres (numérotation des points incrémentée selon l'époque) ;
2. les points du site d'étude sont considérés comme comparables entre les époques, tandis que les stations du réseau AGNES sont laissées libres (numérotation des points incrémentée selon l'époque).

Les ajustements sont réalisés en compensation libre. Aucune rotation n'est activée, seules des translations sont estimées.

- **Test 1** : lorsque les stations AGNES sont considérées comme invariantes entre les époques, les résultats montrent une très mauvaise cohérence interne du réseau. De nombreux indicateurs de contrôle $(w_i)$ apparaissent sur les composantes altimétriques, avec des valeurs de $g_i$ atteignant jusqu'à 60 mm. La précision a posteriori, sur la composante $Z$ atteint alors environ 20 mm, ce qui est incompatible avec les attentes. Les accroissements sur les coordonnées approchées issues du calcul Bernese 2025, appliqués aux stations AGNES, mettent clairement en évidence des tensions altimétriques significatives. Un extrait des résultats est présenté ci-dessous, listing 4.2.

```
Nouveaux points:
================
Point Nr.         Y             X             Z            DY          DX          DZ
                [m]           [m]           [m]          [mm]        [mm]        [mm]
    EPFL    33385.9311  219607.6781   1250.4004     2.143       1.061       6.662
    HABG   157069.5163  244637.6080   1907.1900     1.372      -1.215      -4.221
    HOH2   125166.1214  196829.0360   2104.5166     1.507       0.044     -10.889
    MAR3    71757.8212  174923.1369   1701.3469    -2.140       0.847      16.371
    PAYE    62439.2464  251673.1218   1398.2901    -7.253       2.624       3.296
    SAA2    89657.8698  218591.8576   2553.2398     4.739      -0.710      10.041
    ZERM   122930.9291  161466.6716   2941.8361    -0.506      -2.061     -20.475
    ZIM2   102210.3433  258780.9728   1855.0321     0.138      -0.591      -0.785
```

**Listing 4.2** – Accroissements sur les stations AGNES – calcul multi-époques avec stations AGNES considérées comme invariantes

- **Test 2** : les points considérés comme invariants sont les points du site d'étude, seul le point 1104 à l'état 2025 enregistre un *wi*. Il est éliminé. Les résidus sur les observations des points du site sont tous faibles au maximum de 4 mm. La cohérence entre les époques des points du site est excellente, les erreurs moyennes à posteriori sur les observations GNSS sont inférieures à 2.1 mm, et les erreurs moyennes sur les coordonnées inférieures à 1.5 mm en planimétrie et 3.0 mm en altimétrie, voir extraits ci-dessous listing 4.3 et 4.2.

```
Nouveaux points:                                Em  observations :   em a posteriori
================                                =================
Point Nr.    emY        emX        emZ          Observation GNSS Y:     2.04 mm
              [mm]       [mm]       [mm]
       11    0.783      0.783      1.563        Observation GNSS X:     1.44 mm
     1101    0.783      0.783      1.563
     1102    0.783      0.783      1.563        Observation GNSS Z:     2.13 mm
     1103    0.783      0.783      1.563
     1104    0.926      0.926      1.849
       12    0.783      0.783      1.563
       13    1.472      1.472      2.941
       14    0.783      0.783      1.563
       15    1.472      1.472      2.941
        2    0.883      0.883      1.763
        3    1.472      1.472      2.941
        7    1.472      1.472      2.941
```

**Listing 4.3** – Erreurs moyennes sur les coordonnées et observations, sur un ajustement entre époque des points du site.

Un second ajustement a été réalisé en activant les rotations autour des axes $X$ et $Y$. Dans ce cas, les résidus sur les stations AGNES deviennent faibles et les indicateurs de qualité sont satisfaisants. En revanche, cette amélioration se traduit par un report des écarts directement sur les coordonnées, générant des accroissements artificiels de plusieurs centimètres entre les époques.

Ces variations ne sont pas réalistes d'un point de vue géologique. Le tableau 4.5 montre en particulier que les accroissements altimétriques entre les époques atteignent des amplitudes centimétriques, ce qui confirme que cette stratégie de compensation n'est pas physiquement cohérente.

| **Point** | **Périodes** | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 2015–2010 | | | 2020–2015 | | | 2025–2020 | | |
| | *dE* | *dN* | *dh* | *dE* | *dN* | *dh* | *dE* | *dN* | *dh* |
| | [mm] | | | | | | | | |
| 11 | −0,9 | 2,2 | 12,4 | 2,1 | 1,8 | −20,4 | 0,0 | 3,4 | 14,9 |
| 12 | −3,9 | 0,2 | 13,1 | 3,0 | 0,9 | −19,2 | −1,0 | 2,4 | 15,0 |
| 14 | −0,9 | 3,2 | 6,6 | 0,9 | −2,0 | −16,9 | −2,9 | 0,3 | 13,6 |
| 1101 | −1,7 | 0,0 | 17,2 | 0,6 | 1,0 | −20,9 | 5,3 | 0,2 | 21,8 |
| 1102 | −1,7 | 0,0 | 8,5 | 2,6 | 2,1 | −18,7 | −6,6 | 3,2 | 19,4 |
| 1103 | 0,2 | −0,9 | 12,4 | −0,2 | 3,1 | −23,6 | 0,2 | 1,2 | 19,6 |
| 1104 | 2,2 | −0,9 | 11,6 | 3,6 | 3,1 | −18,9 | 4,4 | −2,7 | 37,4 |

**Tab. 4.5** – Déplacements planimétriques et altimétriques entre les époques, stations AGNES communes et rotations activées.

Cet ajustement met en évidence une très bonne cohérence locale des points entre eux. En revanche, la problématique principale réside dans la cohésion avec des points de référence situés hors du site d'étude. La variabilité observée lors du post-traitement de longues lignes de base ne permet pas de s'appuyer de manière fiable sur des calculs issus d'un logiciel grand public pour une analyse multi-époques rigoureuse.

Afin de valider l'apport du logiciel Bernese, une analyse de cohérence est réalisée pour l'époque 2025 en comparant directement les deux méthodes de calculs.

### 4.1.2 Comparaison Bernese – Leica Infinity

L'état 2025 a été calculé et ajusté une première fois à l'aide du logiciel Bernese, puis une seconde fois avec le logiciel Leica Infinity. Bernese constitue un outil scientifique de référence, rarement déployé dans les bureaux privés, tandis que Leica Infinity représente une solution commerciale largement utilisée. L'objectif de cette comparaison est d'évaluer les écarts entre une solution scientifique et une solution commerciale dans le cadre d'un réseau GNSS de surveillance.

La comparaison est réalisée selon les paramètres suivants :

- compensation libre, avec le réseau AGNES utilisé comme point d'appui ;
- la session issue de Bernese est considérée comme fixe, tandis que la solution Leica Infinity est ajustée uniquement par translations ;
- l'ensemble des points conserve une numérotation identique entre les deux solutions.

Les résultats détaillés de l'ajustement sont présentés en annexe Q page A-79. La précision altimétrique a été fixée à 5 mm. Des résidus significatifs sont observés sur la composante altimétrique des stations AGNES dans la variante issue de Leica Infinity. En particulier, des résidus de l'ordre de 20 mm sont enregistrés sur les stations MAR3 et SAA2. Les autres stations satisfont globalement les critères de qualité.

Il est à noter que les résidus observés sur les points du site d'étude sont faibles et non significatifs entre les deux stratégies de calculs, ce qui confirme la bonne cohérence locale des solutions.

Il est ainsi possible de conclure que la stratégie de calcul basée sur Leica Infinity fournit des résultats globalement satisfaisants, mais que la précision altimétrique finale est environ deux fois moins bonne que celle obtenue avec Bernese (voir tableau 4.4). Par ailleurs, des tensions centimétriques sont identifiées sur les points éloignés en altimétrie entre les deux stratégies. Ces écarts proviennent très probablement des différences de modélisation atmosphérique, en particulier de la troposphère, qui est traitée de manière moins fine dans Leica Infinity.

Dans la suite des analyses, notamment pour la confrontation avec les observations terrestres, la stratégie basée sur le logiciel *Bernese* est donc retenue.

### 4.1.3 Auscultation GNSS à long terme

À la section 2.5.3, une stratégie de surveillance à long terme intégrant les vitesses tectoniques a été évoquée. Afin de valider les vitesses estimées et les hypothèses associées, des données complémentaires ont été demandées au service PNAC. Ces données concernent les coordonnées des stations du réseau AGNES exprimées dans le cadre de référence **IGB14** pour les différentes époques de mesure : 2010, 2015, 2020 et 2025.

#### 4.1.3.1 Conversion des coordonnées IGB14 vers le cadre $CH1903+(2014.70)$

Afin de pouvoir exploiter ces coordonnées dans le contexte du système de référence suisse, une transformation vers le cadre CH1903+ est nécessaire. Pour ce faire, le service de transformation proposé par la plateforme EUREF, *ETRF/ITRF Coordinate Transformation Tool (ECTT)* (EUREF, 2025) [1], est utilisé. Ce service permet de transformer les coordonnées du cadre ITRS vers ETRS, puis, via les formules de projection usuelles, d'obtenir des coordonnées dans le système MN95.

Le service de transformation requiert les paramètres suivants :

- référentiel de départ : **IGB14**, équivalent à **ITRF2014** ;
- référentiel cible : dernier cadre EUREF officiellement en vigueur, à savoir ETRF2014 (le cadre ETRF2020 n'étant pas encore officiellement adopté) ;
- époque de départ et époque cible identiques, exprimées en année décimale ou en semaine GPS ;
- vitesse de la station Zimmerwald 2 (ZIMM200CHE, 14001M008 dans IGB14) (EUREF, 2025) :
  - $V_x = -0.014\,3\,\text{mm/an}$
  - $V_y = 0.018\,2\,\text{mm/an}$
  - $V_z = 0.011\,3\,\text{mm/an}$

1. Lien vers le service de transformation : https://www.epncb.oma.be/_productsservices/coord_trans/

Le cadre de référence suisse est défini par le système CHTRS95. Des campagnes de mesures sont régulièrement réalisées afin de contrôler ou d'actualiser ce cadre. Toutefois, les formules rigoureuses permettant une transformation directe entre un cadre ETRS récent (tel que ETRF2014) et une réalisation plus récente du CHTRS ne sont pas disponibles à ce jour.

En l'absence de relations de transformation officielles entre le cadre européen ETRF2014 et le cadre suisse CHTRS, il a été décidé de définir un cadre de travail intermédiaire noté $CH1903+(2014.70)$. Ce cadre est obtenu en appliquant les paramètres de transformation officiels CHTRS95/ETRS89 vers CH1903+ (Swisstopo-Geodesie, 2016), soit :

$$\begin{aligned} X^{2014.70}_{\text{CH1903+}} &= X_{\text{ETRF2014}} - 674.374\,\text{m} \\ Y^{2014.70}_{\text{CH1903+}} &= Y_{\text{ETRF2014}} - 15.056\,\text{m} \\ Z^{2014.70}_{\text{CH1903+}} &= Z_{\text{ETRF2014}} - 405.346\,\text{m} \end{aligned} \tag{4.8}$$

La définition de ce cadre $CH1903+(2014.70)$ permet de conserver la meilleure précision possible pour l'analyse de l'évolution temporelle des coordonnées, tout en assurant une cohérence avec le système de référence suisse.

#### 4.1.3.2 Détermination des vitesses

Une fois les coordonnées MN95 obtenues pour chaque époque, il est possible de déterminer les vitesses moyennes d'évolution des coordonnées pour chaque station du réseau.

Les vitesses linéaires sont estimées par la méthode des moindres carrés, en utilisant le modèle fonctionnel suivant :

$$y_i = a\,t_i + b, \tag{4.9}$$

où $y_i$ représente la coordonnée observée à l'époque $t_i$, $a$ la vitesse linéaire recherchée et $b$ la coordonnée à l'époque de référence.

Dans notre cas, les équations suivantes sont considérées pour les trois composantes topocentriques et pour le vecteur de vitesse tridimensionnel $\mathbf{v}$, pour chaque point :

$$\begin{cases} E(t) = a_E \cdot t + b_E \\ N(t) = a_N \cdot t + b_N \\ H(t) = a_H \cdot t + b_H \end{cases} \qquad \mathbf{v} = \begin{pmatrix} a_E \\ a_N \\ a_H \end{pmatrix} \tag{4.10}$$

Après ajustement par la méthode des moindres carrés, les vecteurs de vitesse obtenus pour les huit stations considérées sont présentés dans le tableau 4.6. Ces vitesses peuvent être directement comparées aux valeurs officielles diffusées par le service PNAC.

Globalement, en planimétrie, les différences entre les deux solutions restent faibles. Toutefois, certaines stations, notamment HOH2, PAYE et SAA2, présentent des écarts significatifs compris entre 0.55 mm/an et 1.24 mm/an. Sur une période de 15 ans, ces différences peuvent engendrer des écarts cumulés atteignant jusqu'à 18.6 mm entre les deux solutions.

Pour la composante altimétrique, un constat similaire peut être dressé. La majorité des stations présente un écart moyen significatif de l'ordre de 1.4 mm/an, à l'exception des stations PAYE et EPFL. L'origine précise de ces différences ne peut être clairement identifiée. Elle pourrait être liée à la durée relativement courte des séries temporelles utilisées dans ce travail. En effet, les vitesses ont été estimées à partir de seulement quatre états de mesure répartis sur 15 ans. Bien que cette configuration permette théoriquement de mettre en évidence une tendance linéaire, elle reste plus sensible aux effets résiduels de modélisation et aux incertitudes sur les coordonnées individuelles.

| | $CH1903+(2014.70)$ [mm/an] | | | **PNAC** [mm/an] | | | **Deltas** [mm/an] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Point** | $v_E$ | $v_N$ | $v_H$ | $v_E$ | $v_N$ | $v_H$ | $\Delta v_E$ | $\Delta v_N$ | $\Delta v_H$ |
| EPFL | -0.21 | 0.18 | -0.48 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.21 | -0.18 | 0.48 |
| HABG | -0.26 | 0.50 | -0.42 | 0.20 | -0.10 | 1.50 | 0.46 | -0.60 | 1.92 |
| HOH2 | -0.30 | 0.43 | 1.20 | 0.10 | -0.40 | 2.50 | 0.40 | -0.83 | 1.30 |
| MAR3 | -0.20 | -0.42 | 0.59 | 0.00 | -0.50 | 2.00 | 0.20 | -0.08 | 1.41 |
| PAYE | 0.54 | -0.40 | -0.13 | -0.70 | 0.30 | 0.20 | -1.24 | 0.70 | 0.33 |
| SAA2 | -0.65 | -0.04 | -0.11 | -0.10 | -0.30 | 1.20 | 0.55 | -0.26 | 1.31 |
| ZERM | -0.47 | -0.18 | 1.27 | -0.20 | -0.60 | 2.30 | 0.27 | -0.42 | 1.03 |
| ZIM2 | -0.28 | -0.18 | -0.29 | 0.10 | 0.00 | 0.90 | 0.38 | 0.18 | 1.19 |

**Tab. 4.6** – Vitesses des stations AGNES recalculées dans le cadre $CH1903+(2014.70)$ et comparaison avec les valeurs officielles PNAC.

### Application des vitesses

Le tableau 4.7 présente l'application des vitesses et les écarts obtenus entre les deux sources de données considérées. L'époque 2025 est prise comme référence, et les époques antérieures sont ramenées à cette date par interpolation temporelle. Afin de limiter la quantité d'information présentée, seuls les écarts entre l'époque 2025 et l'époque interpolée sont analysés, selon la relation suivante :

$$d\boldsymbol{x}_{2025}(t) = \boldsymbol{x}_{2025} - [\boldsymbol{x}_t - \mathbf{v}(\boldsymbol{x}) \cdot (t - 2025)]\,. \tag{4.11}$$

Les écarts observés dans le tableau 4.7 mettent en évidence l'intérêt de déterminer les vitesses directement à partir des observations disponibles aux différentes époques, plutôt que d'utiliser des vitesses globales issues de modèles externes.

Pour les époques 2010 et 2015, la variante utilisant les vitesses PNAC présente des résidus altimétriques élevés, avec des valeurs moyennes de l'ordre de 10 mm. Les précisions altimétriques atteignent respectivement 8.2 mm et 12.4 mm pour ces deux époques. À l'inverse, la variante basée sur les vitesses issues du cadre $CH1903+(2014.70)$ montre des performances nettement supérieures, avec des valeurs RMS de 2.3 mm et 3.9 mm sur la même période.

Il est toutefois à noter que, pour l'époque 2020, la correction altimétrique fondée sur les vitesses PNAC est sensiblement plus performante. Les résidus altimétriques sont alors faibles, avec des valeurs moyennes inférieures à 1.8 mm, soit environ trois fois meilleures que celles obtenues avec la stratégie $CH1903+(2014.70)$.

En planimétrie, un constat similaire peut être dressé. La variante $CH1903+(2014.70)$ présente globalement un léger avantage, mais les deux stratégies restent comparables. Les résidus planimétriques sont répartis de manière relativement homogène entre les époques, sans tendance marquée en faveur d'une solution unique.

Afin de valider la faisabilité de l'application des vitesses à l'ensemble des états calculés, la stratégie $CH1903+(2020)$ sera appliquée aux époques traitées avec le logiciel Leica Infinity. Les vitesses seront interpolées au niveau du site d'étude à l'aide de la méthode de krigeage décrite à la section 2.5.2.3.

| Année | Pts | $CH1903+(2014.70)$ | | | PNAC | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $dE$ | $dN$ | $dH$ | $dE$ | $dN$ | $dH$ |
| | | [mm] | | | | | |
| 2010 | EPFL | 0.6 | 0.1 | 3.6 | -2.1 | -7.5 | -4.0 |
| | HABG | 0.7 | 0.0 | 2.3 | 0.6 | -7.6 | 13.3 |
| | HOH2 | 0.1 | 0.8 | 1.5 | 3.1 | -11.2 | 5.8 |
| | PAYE | -1.0 | 0.8 | 3.3 | -2.0 | -3.1 | -8.7 |
| | SAA2 | 0.9 | 0.1 | 1.2 | 0.0 | -2.7 | 8.8 |
| | ZERM | 0.8 | -1.3 | 0.3 | 2.5 | -2.3 | 8.6 |
| | ZIM2 | 0.6 | -0.3 | 2.0 | 3.2 | 1.7 | 3.5 |
| | **RMS** | **0.7** | **0.7** | **2.3** | **2.2** | **6.1** | **8.2** |
| 2015 | EPFL | -2.6 | -6.5 | -2.8 | 2.8 | -0.5 | 13.2 |
| | HABG | -1.1 | -4.5 | 6.1 | 4.3 | -2.9 | 16.6 |
| | HOH2 | 1.3 | -6.2 | 0.9 | 2.4 | -1.7 | 11.1 |
| | MAR3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1.1 | -0.4 | 15.7 |
| | PAYE | 3.2 | -5.8 | -7.0 | -9.2 | 5.8 | 11.5 |
| | SAA2 | -1.9 | -1.3 | 3.5 | 5.5 | -1.1 | 10.2 |
| | ZERM | 1.9 | -1.5 | 3.8 | 3.8 | -6.0 | 6.0 |
| | ZIM2 | 1.9 | 0.4 | -0.5 | 3.7 | -0.1 | 12.0 |
| | **RMS** | **2.0** | **4.2** | **3.9** | **4.7** | **3.2** | **12.4** |
| 2020 | EPFL | -0.8 | -6.1 | 8.0 | 1.9 | 5.2 | -5.6 |
| | HABG | 0.9 | -4.4 | 13.1 | 1.4 | 1.4 | -3.5 |
| | HOH2 | 1.7 | -3.8 | 5.5 | 0.3 | -0.4 | 1.0 |
| | MAR3 | 0.1 | 0.0 | 8.6 | 0.9 | -0.4 | -1.6 |
| | PAYE | 0.2 | -3.5 | 2.8 | -6.4 | 7.0 | -1.2 |
| | SAA2 | 0.9 | -1.1 | 7.1 | 1.9 | -0.2 | -0.6 |
| | ZERM | 4.4 | -5.4 | 4.6 | -3.0 | 3.3 | 0.5 |
| | ZIM2 | 3.7 | -0.6 | 5.6 | -1.8 | 1.5 | 0.4 |
| | **RMS** | **2.2** | **3.8** | **7.5** | **2.8** | **3.4** | **2.5** |

**Tab. 4.7** – Comparaison des résidus issus des stratégies $CH1903+(2014.70)$ et PNAC pour les époques 2010, 2015 et 2020 ; après transfert à l'époque 2025. Les valeurs RMS sont calculées pour chaque composante.

#### 4.1.3.3 Validation de l'application des vitesses

Afin de valider l'application des vitesses estimées, les différentes époques de mesures sont considérées comme des sessions GNSS indépendantes et ajustées conjointement. L'ajustement est réalisé en compensation libre, avec uniquement les paramètres de translation activés, et l'époque 2025 prise comme référence temporelle.

Aucun ajustement multi-époques n'est réalisé à partir des états calculés avec le logiciel Leica Infinity. Comme démontré précédemment, la cohérence altimétrique des stations AGNES obtenue avec cette solution ne satisfait pas les critères de précision requis pour une analyse multi-époques intégrant des vitesses.

**Analyse des résultats**

Les remarques suivantes peuvent être formulées à l'issue des ajustements réalisés :

- la prédiction fondée sur les vitesses officielles PNAC met en évidence deux indicateurs de contrôle ($w_i$) sur la station PAYE, avec des résidus de 5 mm et 8 mm sur la composante $Y$ aux époques 2015 et 2025 ;
- les erreurs moyennes a posteriori sont, en moyenne, environ 1.8 fois plus faibles avec la variante basée sur le cadre $CH1903+(2014.70)$ ;

- les précisions obtenues sur les coordonnées se répartissent comme suit :

| | $em_Y$ [mm] | $em_X$ [mm] | $em_Z$ [mm] |
|---|---|---|---|
| $CH1903+(2014.70)$ | 0.9 | 0.9 | 1.7 |
| PNAC | 1.6 | 1.6 | 3.1 |

À partir de ces résultats, il est possible de conclure que la variante utilisant des vitesses estimées directement à partir des coordonnées observées aux différentes époques permet d'atteindre les précisions requises pour l'auscultation d'un ouvrage. Cette approche se révèle plus performante que l'utilisation des vitesses globales PNAC dans le cadre d'un ajustement multi-époques.

Toutefois, cette validation a été réalisée uniquement sur les stations du réseau AGNES. Une extension de l'analyse aux points du site d'étude est nécessaire avant de valider définitivement cette stratégie. Les listings 4.4 et 4.5 présentent les résultats détaillés des deux variantes, incluant les erreurs moyennes a posteriori sur les observations GNSS et sur les composantes des coordonnées. Ils mettent en évidence un gain de précision significatif en faveur des vitesses estimées dans le cadre semi-local $CH1903+(2014.70)$.

```
Nouveaux points:                              Em observations : em a posteriori
================                              ================================
Point Nr.     emY         emX         emZ     Observation GNSS Y:    1.27 mm
              [mm]        [mm]        [mm]    Observation GNSS X:    1.74 mm
    EPFL     0.849       0.849       1.696    Observation GNSS Z:    2.53 mm
    HABG     0.849       0.849       1.696
    HOH2     0.849       0.849       1.696
    MAR3     0.933       0.933       1.864
    PAYE     0.849       0.849       1.696
    SAA2     0.849       0.849       1.696
    ZERM     0.849       0.849       1.696
    ZIM2     0.849       0.849       1.696
```

**Listing 4.4** – Résultats de l'ajustement avec prédiction à l'époque cible 2025 à partir des vitesses estimées dans le cadre $CH1903+(2014.70)$

```
Nouveaux points:                              Em observations : em a posteriori
================                              ================================
Point Nr.      emY         emX         emZ    Observation GNSS Y:     3.03 mm
               [mm]        [mm]        [mm]   Observation GNSS X:     2.80 mm
   EPFL       1.572       1.572       3.139   Observation GNSS Z:     4.22 mm
    HABG      1.572       1.572       3.139
    HOH2      1.572       1.572       3.139
    MAR3      1.726       1.726       3.449
    PAYE      1.572       1.572       3.139
    SAA2      1.572       1.572       3.139
    ZERM      1.572       1.572       3.139
    ZIM2      1.572       1.572       3.139
```

**Listing 4.5** – Résultats de l'ajustement avec prédiction à l'époque cible 2025 à partir des vitesses officielles PNAC

Les mesures GNSS, étant indépendantes des phénomènes géophysiques locaux et moins sensibles aux effets atmosphériques, constituent un cadre de référence idéal. La variante de calcul de l'époque 2025 obtenue à l'aide du logiciel Bernese et ajustée dans Trinet+ est retenue comme solution de référence, pour les analyses futures et la confrontation avec les mesures terrestres.

## 4.2 Ajustement des observations géodésiques

L'entreprise Geosat SA a réalisé une campagne de mesures complète, voir annexe C page A-9, afin de qualifier les développements autour de la déviation de la verticale et du modèle météo 4D, ces mesures doivent être ajustées. Les observations vont être compensées avec un ajustement tridimentionnel dans le logiciel Trinet+(Sébastien Guillaume, 2010).

Afin de permettre une analyse comparative entre les variantes de correction des observations, les stratégies de compensation vont être identiques :

- Modèle stochastique :
  - Distance : 0.6 mm + 1 ppm
  - Direction horizontale 3 cc, angle zénithal 4 cc
  - Station : centrage et hauteur 0.2 mm
  - Points visés : centrage et hauteur 0.3 mm
- Prise en compte déviation de la verticale et cote du géoïde
- Coefficient de réfraction $k = 0.13$
- Compensation libre avec points d'ajustement : 1 à 16 et 1101 à 1104

Dans un premier temps uniquement, les observations réalisées par station totale vont être compensées. La combinaison de toutes les observations est testée dans un calcul final à la section 4.4.

### 4.2.1 Approche classique

Une première compensation dite classique va être réalisée avec comme données en entrée :

- Coordonnée approchée avec cote du géoïde et déviation de la verticale issue de CHGEO2004
- Distance corrigée à l'aide des paramètres météos mesurées manuellement à la station et au milieu de la ligne de visée avec les formules de Barrels and Sears (Barrell & Sears, 1939)

```
Erreurs moyennes des observations : Nombre em int Gr. em a priori em a posteriori Quot
=================================
Distance (err. moy. sur 1 km):        276    1.60 mm      1.24 mm        0.85 mm  0.67

Direction:                            266     3.0 cc       3.8 cc        3.59 cc  0.77
                                       10  9999.0 cc    9999.0 cc       33.64 cc  0.00

Angle zénithal:                       265     4.0 cc       4.7 cc        4.85 cc  0.87
                                       11  9999.0 cc    9999.0 cc       15.89 cc  0.00
```

**Listing 4.6** – Résultats compensation libre, avec corrections classique des observations

### 4.2.2 Modèle locaux du géoïde et atmosphère 4D

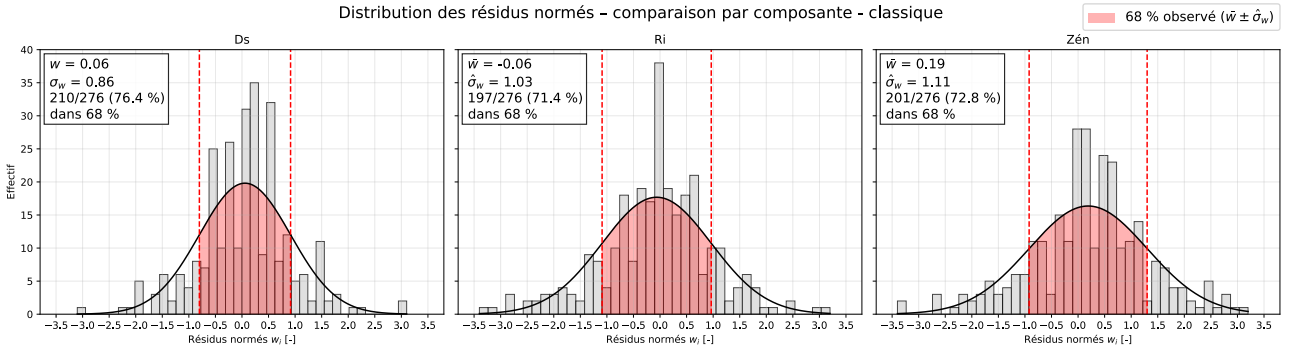
Dans ce travail et celui de (Casto, 2026) des modélisations de l'atmosphère de même qu'un géoïde local ont été développés. Le but ici est d'évaluer l'apport d'une cote du géoïde plus précise de même que la correction des distances avec l'atmosphère 4D ; l'application des corrections sont décrites aux sections 3.7.2 et 3.7.4.

```
Erreurs moyennes des observations : Nombre em int Gr. em a priori em a posteriori Quot
=================================
Distance (err. moy. sur 1 km):        276    1.60 mm      1.24 mm        0.82 mm  0.67

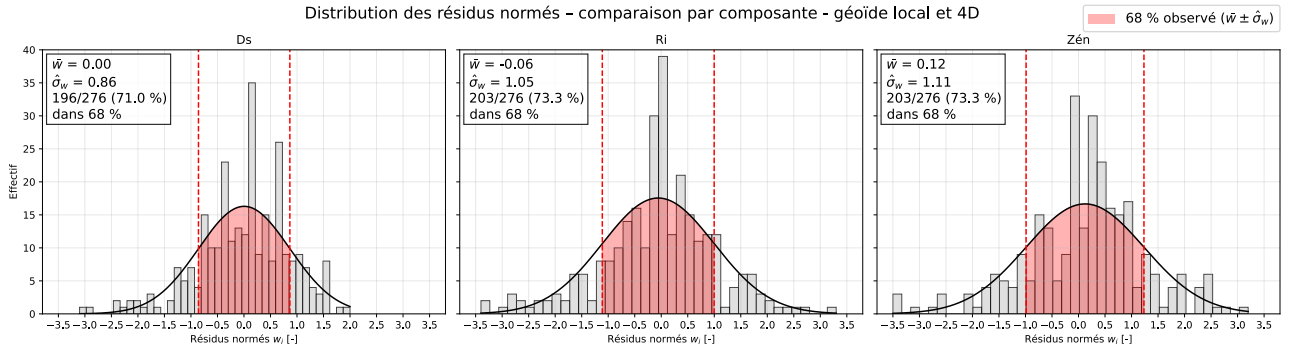
Direction:                            268     3.0 cc       3.8 cc        2.96 cc  0.77
                                        8  9999.0 cc    9999.0 cc       35.70 cc  0.00

Angle zénithal:                       268     4.0 cc       4.7 cc        3.98 cc  0.87
                                        8  9999.0 cc    9999.0 cc       15.69 cc  0.00
```

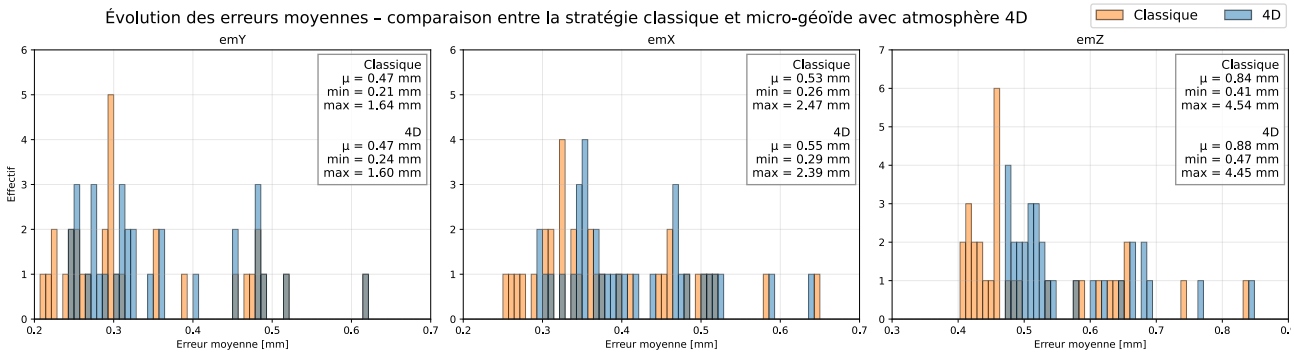
**Listing 4.7** – Résultats compensation libre, avec micro géoïde et atmophsère 4D




**(a)** Analyses statistiques sur la variante classique




**(b)** Analyses statistiques sur les observations entre la variante géoïde local et 4D




**(c)** Évolution des erreurs moyennes sur la précision entre les stratégies

**Fig. 4.4** – Analyses des performances entre les deux approches de corrections des observations géodésiques.

Le groupe de graphiques ci-dessus (fig. 4.4) montre les différences de la stratégie géoïde local et atmosphère 4D avec la variante dite classique. Les deux calculs sont très proches l'un de l'autre, le gain n'est pas significatif et ne montre pas que l'une ou l'autre des variantes soit la meilleure. Cependant les commentaires suivants peuvent être faits à l'aide des graphiques et des listings résultats 4.6 et 4.7 :

- l'analyse de l'évolution des résidus normés $w_i$ a été faite à l'aide d'histogramme statistique afin de mettre en valeur la répartition autour de la moyenne et dénombrer combien d'éléments sont dans les 68 % ;
- la répartition des $w_i$, pour les directions horizontales et angles zénithaux, met en avant que la variante 4D regroupe 1.9 % d'observations en plus dans les 68 % ;
- en analysant les erreurs moyennes à posteriori, on constate que les erreurs moyennes sur les valeurs angulaires sont meilleures de 0.7 cc en moyenne. Cette meilleure précision est directement liée à l'introduction de déviation de la verticale plus précise ;
- la précision sur les distances est identique, entre les stratégies. Les $w_i$ sont moins regroupés autour de la moyenne dans la variante avec le modèle 4D, 5 % de moins, démontrant une moins bonne homogénéité autour de la moyenne tout en satisfaisant le modèle stochastique ;

- l'évolution de la précision (graphique 4.4c), met en évidence que la variante classique est plus étalé de quelques centièmes que la variante 4D.

### Analyse des distances 3D

A ce stade, il est maintenant possible d'analyser l'apport d'une correction atmosphérique 4D sur la géométrie globale du réseau par rapport aux mesures GNSS. Le tableau ci-dessous 4.8 présente les écarts entre les distances 3D calculées depuis le GNSS confronté aux résultats des deux variantes de compensations avec les résidus et l'imprécision du distance mètre sur la distance. La géométrie est testée depuis le pilier 11.

| **Point** Ref.11 | $d_{3D}$ **GNSS** [m] | $\Delta d_{3D}$ **classique** [mm] | $\Delta d_{3D}$ **4D** [mm] | **Δ4D-clasique** [mm] | $\sigma$ **(0.6 + 1 ppm)** [mm] |
|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 686.0576 | −3.4 | −2.5 | 0.9 | 1.3 |
| 3 | 740.1322 | −4.6 | −3.6 | 1.0 | 1.3 |
| 7 | 209.6999 | 0.7 | 1.1 | 0.4 | 0.8 |
| 12 | 408.0872 | 1.4 | 2.0 | 0.6 | 1.0 |
| 13 | 1297.9397 | −8.4 | −3.8 | 4.6 | 1.9 |
| 14 | 1797.4776 | −4.9 | 1.5 | **6.4** | 2.4 |
| 15 | 587.6566 | −3.8 | −3.8 | 0.0 | 1.2 |
| 1101 | 2009.6993 | **−8.1** | −4.1 | 4.0 | 2.6 |
| 1102 | 1981.0734 | −4.3 | −1.0 | 3.3 | 2.6 |
| 1104 | 963.5345 | 3.9 | 2.7 | −1.2 | 1.6 |
| Moyenne abs. | | 4.4 | 2.6 | 2.2 | |

**Tab. 4.8** – Comparaison des distances GNSS 3D depuis le pilier 11, comparée aux résultats des variantes de compensation.

Comme le montrent les écarts présentés ci-dessus (Tab. 4.8), l'application d'une correction des distances à l'aide d'un modèle atmosphérique 4D apporte un gain significatif, tant sur les distances que sur la concordance entre les mesures GNSS et celles issues de la station totale.

La moyenne des résidus est de 2.6 mm avec les distances corrigées selon le modèle 4D, contre 4.4 mm avec une correction classique. Les écarts les plus importants sont observés sur les longues distances, supérieures à 1 000 m, avec des différences entre les deux stratégies pouvant atteindre 6.4 mm sur la ligne 11–14.

### Bilan des variantes de compensation

Il ne ressort pas de net avantage en faveur de l'une ou l'autre des variantes de compensation. Toutefois, l'introduction conjointe des déviations locales de la verticale et de distances corrigées à l'aide d'un modèle atmosphérique 4D conduit à un bloc de coordonnées présentant des précisions plus homogènes. L'apport reste modéré, mais la cohérence globale des observations angulaires s'en trouve améliorée.

L'influence du modèle atmosphérique 4D se manifeste principalement sur la géométrie globale du réseau. Les distances s'intègrent de manière plus cohérente aux observations GNSS, garantissant ainsi une meilleure homogénéité et un meilleur calage des observations par station totale dans le référentiel GNSS.

Pour la suite des traitements, la variante intégrant un géoïde local et un modèle atmosphérique 4D est retenue ; elle est désignée par la suite comme le traitement 4D. Il s'agit désormais de qualifier l'apport respectif des différents développements pour la composante altimétrique.

## 4.3 Déterminations altimétriques

La composante altimétrique est délicate à obtenir et garantir. Comme vu précédemment, plusieurs méthodes permettent de déterminer une altitude, mais une seule permet une détermination directe : le GNSS. Les autres techniques d'acquisition nivellement géométrique et trigonométrique permettent de déterminer uniquement des dénivelées entre les points.

### 4.3.1 Les dénivelées via le GNSS

Les analyses comparatives de cette section se porteront exclusivement depuis le pilier 11, voir plan annexe X page A-111. Il est fait le choix de travailler sur ce pilier, car il présente la meilleure configuration pour la combinaison des observations et les caractéristiques géographiques.

Les dénivelées ellipsoïdales de références sont calculées depuis les résultats de l'ajustement 2025 du calcul Bernese avec point 1103 comme pivot, tableau 4.9 ci-contre.

| **Pilier 11** | |
|---|---|
| Point | $\Delta h^{ellips}$ [m] |
| 1101 | 338.3663 |
| 1102 | 353.0610 |
| 1103 | 322.4555 |
| 1104 | 430.1130 |
| 12 | 29.5005 |
| 13 | -12.4700 |
| 14 | 89.9028 |
| 15 | 5.5617 |
| 2 | 96.8538 |
| 3 | 28.6457 |
| 7 | -3.5780 |

**Tab. 4.9** – Dénivelée de référence depuis le pilier 11

*Précision des dénivelées :* $\sigma = 2.0\,mm$.

### 4.3.2 Nivellement géométrique

Le nivellement géométrique est la méthode présentant la meilleure efficience au regard des moyens à mettre en œuvre et de la précision obtenue. Toutefois, le nivellement doit être rattaché à des points de référence supposés stables dans le temps, ce qui nécessite la réalisation de cheminements parfois longs (voir annexe C page A-9).

Dans un concept de surveillance, s'appuyant sur des observations GNSS et une combinaison des technologies ; les dénivelées usuelles acquises par nivellement géométrique doivent être transformées en dénivelées ellipsoïdales, afin d'être comparables à celles issues du GNSS et du nivellement trigonométrique.

Donc, les dénivelées usuelles acquises sur le terrain doivent faire l'objet d'une correction rigoureuse afin d'être converties en dénivelées ellipsoïdales, conformément à la méthodologie décrite à la section 2.4.2.

Les corrections orthométriques ont ensuite été réparties le long des lignes de nivellement pour des sections données, comme présenté au tableau 4.10, et selon le plan figurant en annexe W page A-107.

| Cheminement 11–12 | | Cheminement 11–13 | | Cheminement 11–15 | |
|---|---|---|---|---|---|
| Liaison | $E^{\text{orth}}$ [mm] | Liaison | $E^{\text{orth}}$ [mm] | Liaison | $E^{\text{orth}}$ [mm] |
| 11–N13.1 | 1.78 | 11–NBU | 1.81 | 11–NBU | 1.81 |
| N13.1–N171 | −2.07 | NBU–N2 | −5.80 | NBU–N138 | 11.90 |
| | | N2–N116 | −15.65 | | |
| | | N116–N121 | −3.54 | | |
| **Corr. totale** | **−0.29** | **Corr. totale** | **−23.18** | **Corr. totale** | **13.71** |

**Tab. 4.10** – Corrections orthométriques pour les cheminements du site d'étude. Source des corrections (Casto, 2026)

#### 4.3.2.1 Validation de l'apport des corrections orthométriques

Afin de valider les corrections orthométriques, il faut obtenir des dénivelées ellipsoïdales issues d'un calcul de compensation du nivellement géométrique. Afin de garantir la précision des transformations et calculs rigoureux tenant compte des cotes du géoïde, il est fait le choix de compenser le nivellement dans le logiciel Trinet+.

Les coordonnées 3D de tous les points du site d'étude, sont introduites avec les cotes du géoïde issues du modèle local. A l'importation des dénivelées usuels, le logiciel applique rigoureusement les corrections des cotes du géoïde. Une compensation libre est réalisée afin d'exporter des coordonnées avec altitude ellipsoïdale de tous les points nivelés. La précision sur les points nivelés est conforme aux exigences d'un réseau de surveillance en moyenne inférieur à 0.2 mm.

A ce stade les corrections orthométriques ne sont pas encore appliquées. Les dénivelées sur les lignes de cheminement testées sont issues des coordonnées compensées.

**Évaluation de l'apport de la correction orthométrique :**

| Cheminements | $h_{x1}$ [m] | $h_{x2}$ [m] | $\Delta h^{\text{ellips}}_{x1x2}$ [m] | $E^{\text{orth}}$ [m] | $\Delta \check{h}^{\text{ellips}}_{\text{corr. } E}$ [m] |
|---|---|---|---|---|---|
| 11–12 | 1784.0719 | 1813.5706 | 29.4988 | −0.0003 | **29.4985** |
| 11–13 | 1784.0719 | 1771.6124 | −12.4594 | −0.0232 | **−12.4826** |
| 11–15 | 1784.0719 | 1789.5980 | 5.5262 | 0.0137 | **5.5399** |

**Tab. 4.11** – Dénivelées ellipsoïdales corrigées de la cote orthométrique

Ces dénivelées vont être comparées aux dénivelées GNSS, de même que celles déterminées par l'ajustement des observations réalisées par station totale :

| Cheminements | $\Delta \check{h}^{\text{ellips}}_{\text{niv. corr. } E}$ [m] | $\Delta h^{\text{ellips}}_{\text{GNSS}}$ [m] | $\Delta h^{\text{ellips}}_{\text{trigo.}}$ [m] | $dh^{\text{GNSS}}_{\text{niv. corr. } E}$ [mm] | $dh^{\text{trigo.}}_{\text{niv. corr. } E}$ [mm] | $\delta\zeta^{\text{trigo.}}(d')$ [cc] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 11–12 | 29.4985 | 29.5005 | 29.4992 | **−2.0** | **−0.7** | 1.1 |
| 11–13 | −12.4826 | −12.4700 | −12.4902 | **−12.6** | **7.6** | 3.7 |
| 11–15 | 5.5399 | 5.5617 | 5.5424 | **−21.8** | **−1.7** | 1.8 |

**Tab. 4.12** – Comparaison des dénivelées ellipsoïdales **corrigées** des cotes orthométriques avec les autres méthodes d'acquisition.

Le tableau 4.12 met en évidence l'apport de la correction orthométrique des observations du nivellement géométrique, lors de la transformation en dénivelée ellipsoïdale. La dénivelée 11–12 montre une très bonne cohérence avec des écarts non significatifs $-2.0\,\text{mm}$ et $-0.7\,\text{mm}$ pour la GNSS, respectivement le nivellement trigonométrique.

Pour les dénivelées vers les points 13 et 15, la solution GNSS montre des résidus plus importants jusqu'à $-21.8\,\text{mm}$ sur le point 15. Les masques d'observations sur ces deux piliers peuvent directement impacter la précision de la coordonnée GNSS. Les écarts observées peuvent par conséquent provenir d'une incertitude de la détermination GNSS.

La comparaisons avec les mesures trigonométriques montrent une très bonne intégration, les résidus sont faibles et non significatifs ; comme le montre l'écart angulaire qui est au maximum de 3.7 cc sur la visée 11-13, et dont la ligne de cheminement géométrique fait 1.8 km.

**Sans corrections orthométrique**

A titre de comparaison, si les corrections orthométriques ne sont **pas** appliquées, les écarts deviennent significatifs pour les observations de nivellement trigonométrique, 30 mm pour la visée 11–13, tableau 4.13. La conversion des résidus altimétriques en angle, met en évidence que l'observation 11–15 devrait être éliminée avec 23.6 cc, elle ne satisfait plus les précisions.

| Cheminements | $\Delta h^{\text{ellips}}_{\text{niv.}}$ [m] | $\Delta h^{\text{ellips}}_{\text{GNSS}}$ [m] | $\Delta h^{\text{ellips}}_{\text{trigo.}}$ [m] | $dh^{\text{GNSS}}_{\text{niv.}}$ [mm] | $dh^{\text{trigo.}}_{\text{niv.}}$ [mm] | $\delta\zeta^{\text{trigo.}}(d')$ [cc] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 11–12 | 29.4988 | 29.5005 | 29.4992 | −1.7 | −0.4 | 2.7 |
| 11–13 | −12.4595 | −12.4700 | −12.4902 | 10.5 | 30.7 | 5.1 |
| 11–15 | 5.5262 | 5.5617 | 5.5424 | −35.5 | −15.4 | 16.7 |

**Tab. 4.13** – Comparaison des dénivelées ellipsoïdales **non corrigées** des cotes orthométriques avec les autres méthodes d'acquisition.

**Bilan**

La correction de la cote orthométrique du nivellement géométrique en vue d'une intégration dans un calcul ellipsoïdal est significative et doit être prise en compte. Les corrections à appliquer sur les dénivelées peuvent être significatives et assurent une meilleure intégration avec les observations du nivellement trigonométrique.

### 4.3.3 Nivellement trigonométrique réciproque simultané

La détermination des dénivelées par nivellement trigonométrique est fortement influencée par les conditions atmosphériques. Les développements présentés ci-dessous visent à évaluer l'apport de la technique du nivellement trigonométrique réciproque simultané pour l'estimation précise des dénivelées.

Comme démontré dans la partie théorique (section 2.4.1), en considérant une atmosphère symétrique, les erreurs dues à la réfraction s'annulent. Dans le cadre de ce travail, deux systèmes de mesures ont été mis en place (voir section 3.2.2). L'objectif est d'exploiter les observations acquises afin de mettre en évidence le potentiel de cette méthode et de fournir une première estimation du comportement de la réfraction sur le site d'étude.

Les données enregistrées sur le terrain sont brutes et aucune correction n'a été appliquée lors de l'acquisition. La première étape du traitement consiste donc à corriger ces observations :

- application des paramètres atmosphériques aux mesures de distance, selon la méthode décrite à la section 3.7.2 ;
- prise en compte de la déviation de la verticale locale aux points de station, fournie par (Casto, 2026). Les formules 2.2.2.1 sont appliquées afin de corriger les observations d'angles zénithaux.

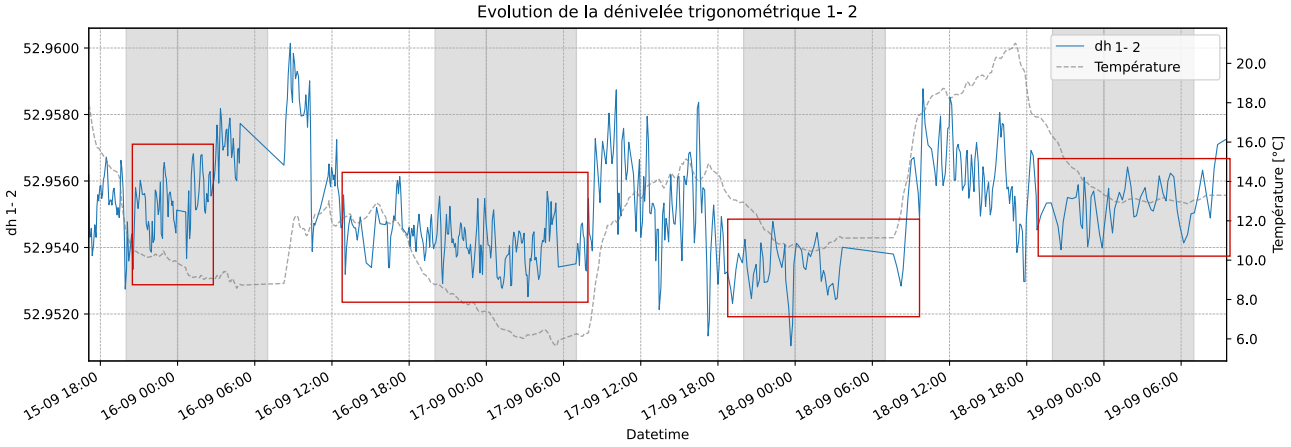
**Remarque :** l'application des déviations de la verticale aux stations de mesure permet d'obtenir des dénivelées ellipsoïdales, telles que définies par la formule 2.54.

Les étapes de traitement et de qualification des deux nivellements trigonométriques réciproques, pilier 1 vers pilier 2 (1-2) et pilier 1 vers pilier 14 (1-14), se déroulent selon la procédure suivante :

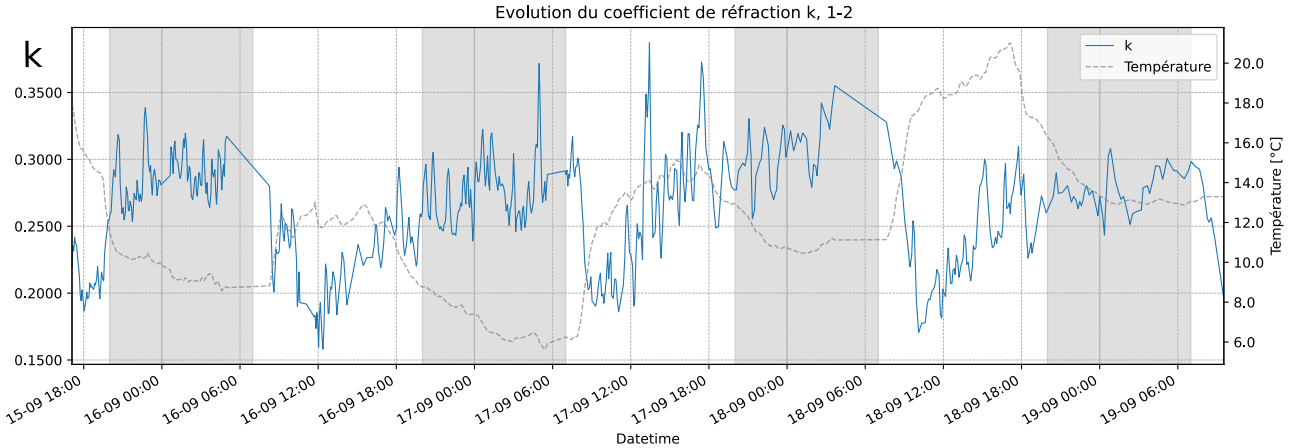
1. traitement de l'ensemble des données acquises et mise en valeur des résultats :
   - graphiques 4.2 et 4.5 : dénivelées moyennées lissées issues des observations ;
   - graphiques 4.3 et 4.6 : évolution du coefficient de réfraction $k$ ;
   - graphiques 4.4 et 4.7 : résidus par rapport à la moyenne hebdomadaire des dénivelées.
2. identification, dans les graphiques d'évolution temporelle des dénivelées, les périodes présentant de faibles variations, traduisant des conditions atmosphériques proches d'une symétrie ;
3. recalcul des dénivelées en ne conservant que les périodes temporelles sélectionnées ;
4. comparaison des résultats obtenus avec ceux issus d'autres méthodes, à savoir le nivellement géométrique et le GNSS.

Les résultats du calcul du nivellement trigonométrique 1-2 montrent des performances très satisfaisantes. Le graphique 4.4 met en évidence que les résidus par rapport à la moyenne hebdomadaire sont faibles et restent inférieurs à 5 mm. Le coefficient de réfraction $k$ varie entre 0.15 et 0.35, valeurs supérieures à la valeur standard généralement admise de 0.13. Le graphique 4.3 montre par ailleurs un comportement différencié du coefficient $k$ entre les périodes diurnes et nocturnes : durant la nuit, $k$ oscille principalement entre 0.25 et 0.30, tandis que durant la journée il varie entre 0.15 et 0.35. Les encadrés rouges du graphique 4.2 indiquent les périodes retenues pour le calcul final.

### Résultats du traitement de toutes les données pour le système 1-2




**Graph. 4.2** – Dénivelée sur la semaine, 1-2, avec filtrage par moyenne glissante sur 10 min avec recouvrement 5 min

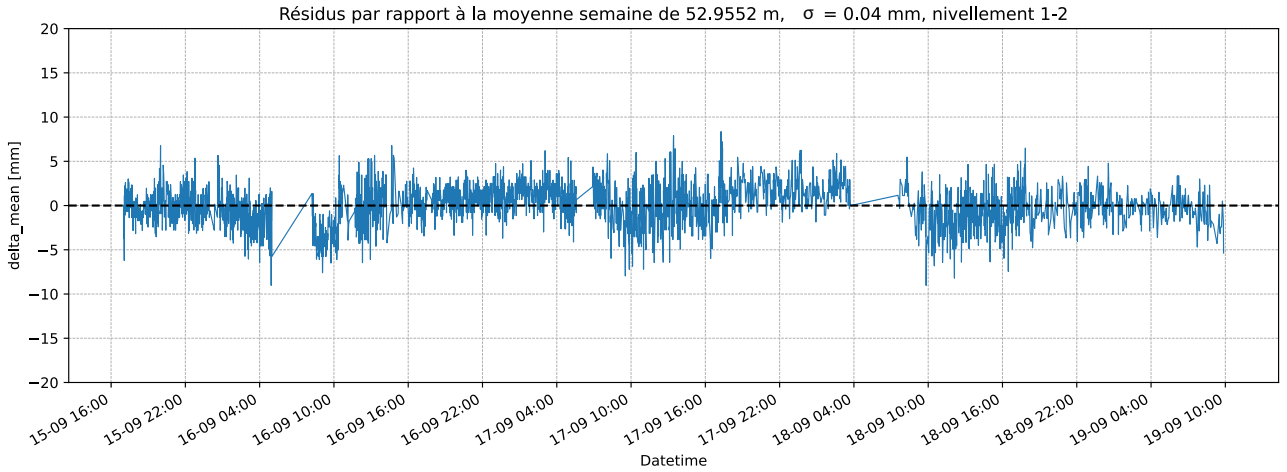



**Graph. 4.3** – Valeur du coefficient de réfraction "k", 1-2, avec filtrage par moyenne glissante sur 10 min avec recouvrement 5 min

### Résultats du post-traitement pour la mesure 1–2

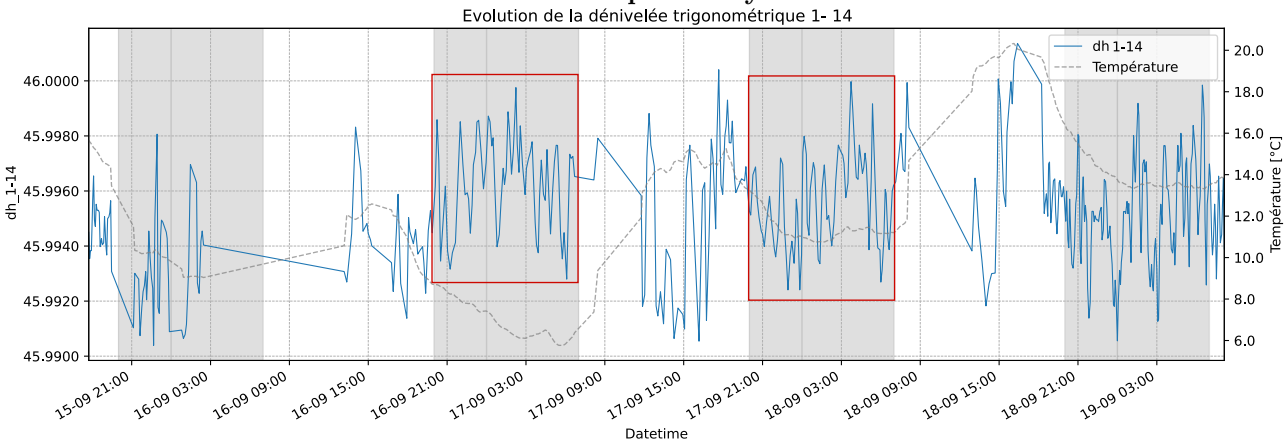
En ne conservant que les mesures correspondant aux périodes supposées avec une atmosphère symétrique, les résultats obtenus sont les suivants :

- dénivelée entre le pilier 1 et le pilier 2 : **52.9545 m** avec un $\sigma < \mathbf{0.1\,mm}$ ;
- coefficient de réfraction moyen $k$ : 0.27 avec un $\sigma < \mathbf{0.1}$

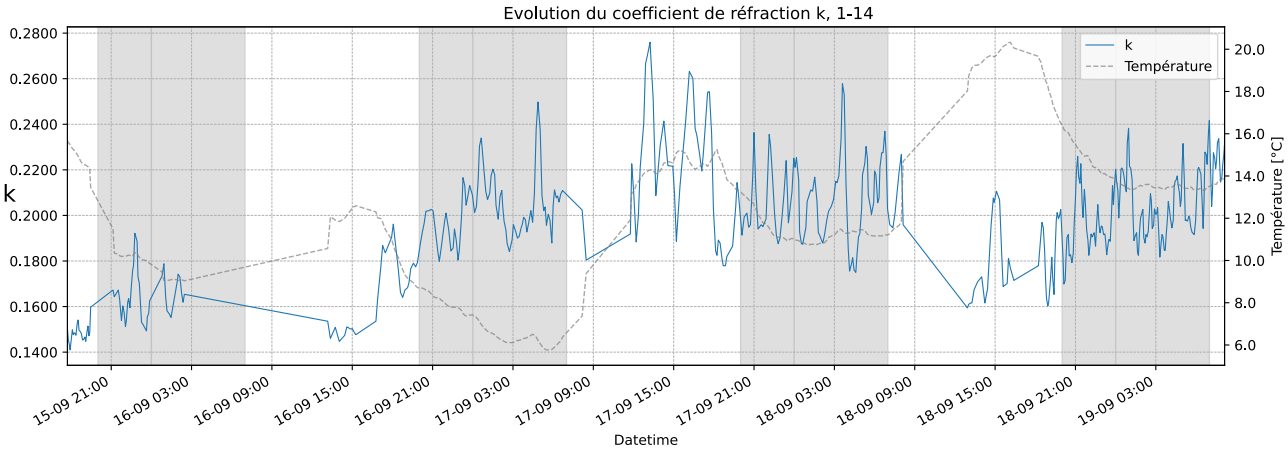



**Graph. 4.4** – Résidus par rapport à la moyenne de la semaine sur toutes les mesures, nivellement 1-2

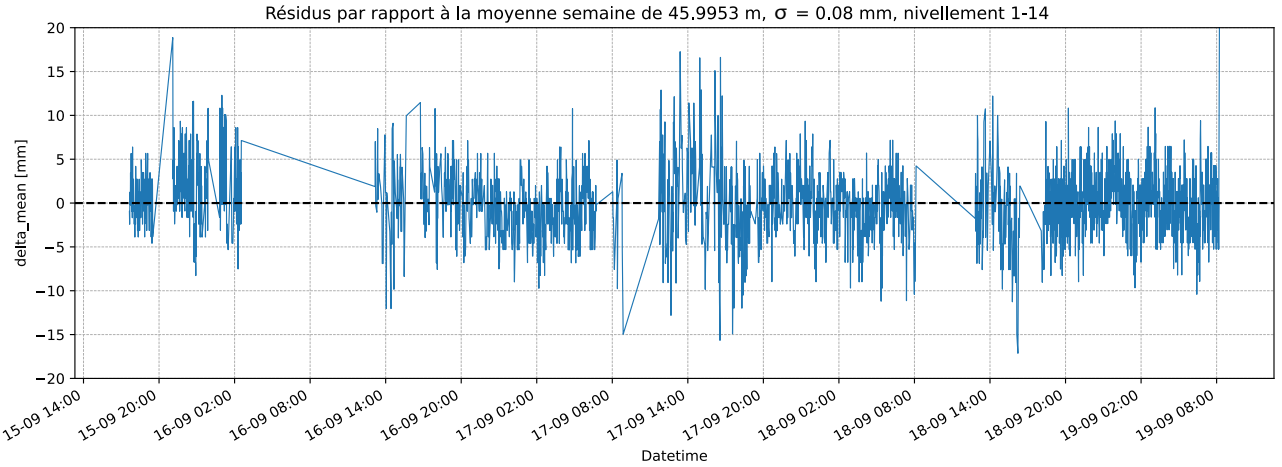
### Résultats du traitement de toutes les données pour le système 1-14




**Graph. 4.5** – Dénivelée sur la semaine, 1-14, avec filtrage par moyenne glissante sur 10 min avec recouvrement 5 min




**Graph. 4.6** – Valeur du coefficient de réfraction "k", 1-14, avec filtrage par moyenne glissante sur 10 min avec recouvrement 5 min




**Graph. 4.7** – Résidus par rapport à la moyenne de la semaine sur toutes les mesures, nivellement 1-14

Le nivellement trigonométrique 1-14 présente une portée de 1 870 m. Malgré cette distance importante, les variations de la dénivelée trigonométrique moyennée et lissée restent faibles, de l'ordre de 1 cm sur l'ensemble de la semaine, comme l'illustre le graphique 4.5. Le coefficient de réfraction $k$ évolue entre 0.16 et 0.28 (graphique 4.6). Contrairement au système 1-2, les variations jour-nuit sont ici moins marquées. Les analyses sont réalisées sur les nuits des 17 et 18 septembre, périodes présentant les variations les plus faibles dans les déterminations. Ces intervalles temporels sont indiqués en rouge sur le graphique 4.5.

**Résultats du post-traitement pour la mesure 1–14**

En conservant uniquement les mesures acquises durant les périodes nocturnes, les résultats sont les suivants :

- dénivelée entre le pilier 1 et le pilier 14 : **45.9960 m** avec un $\sigma < \mathbf{0.1\,mm}$ ;
- coefficient de réfraction moyen $k$ : 0.20 avec un $\sigma <$ **0.1**

#### 4.3.3.1 Évaluation des dénivelées trigonométriques

Le nivellement trigonométrique réciproque simultané permet d'éliminer en grande partie les effets de la réfraction atmosphérique. La sélection des observations acquises durant des périodes caractérisées avec une atmosphère supposée stable, contribue à améliorer significativement la précision des dénivelées déterminées.

| Méthode | $\Delta h$ [m] | $dh$ [mm] |
|---|---|---|
| **Trigonométrique (référence)** | **52.9545** | |
| Nivellement géométrique | 52.9511 | 3.3 |
| GNSS | 52.9566 | −2.1 |

**Tab. 4.14** – Comparaison des dénivelées entre les points 1 et 2

Les écarts observés entre les différentes méthodes sont faibles et non significatifs, avec une différence maximale de 3.3 mm avec le nivellement géométrique. La détermination par GNSS présente également une excellente cohérence avec la valeur de référence issue du nivellement trigonométrique réciproque de même que le nivellement géométrique.

| Méthode | $\Delta h$ [m] | $dh$ [mm] |
|---|---|---|
| **Trigonométrique (référence)** | **45.9960** | |
| GNSS | 46.0056 | −9.6 |

**Tab. 4.15** – Comparaison des dénivelées entre les points 1 et 14

Les écarts avec la détermination GNSS sont ici plus importants, atteignant 9.6 mm. Toutefois, il convient de rappeler que la portée de la ligne de visée est de 1 870 m. Cet écart correspond à une variation angulaire d'environ 3.3 cc. En considérant que les instruments utilisés sont des Leica Geosystems MS60, présentant une précision angulaire interne de 1" soit environ 3 cc, la différence observée entre les deux méthodes peut être considérée comme non significative au regard des performances instrumentales.

**Bilan**

Le nivellement trigonométrique réciproque simultané présente d'excellentes performances pour le transfert de dénivelées entre deux points, avec une précision de l'ordre du millimètre. Il est ainsi possible d'affirmer que cette méthode constitue une alternative crédible au nivellement géométrique classique pour la détermination de grandes dénivelées.

### 4.3.4 Le coefficient de réfraction

L'estimation du coefficient de réfraction, ou de l'angle de réfraction, constitue un exercice délicat. Dans le cadre de ce travail, il est possible d'estimer ce coefficient à partir de plusieurs sources, notamment le nivellement trigonométrique et le calcul par lancer de rayon. L'objectif de cette section est d'évaluer l'apport respectif de ces deux méthodes.

#### 4.3.4.1 À partir du nivellement trigonométrique

Les coefficients de réfraction déterminés avec les deux configurations de mesures présentent des valeurs proches, bien que les contextes topographiques soient différents, graphiques 4.3 et 4.6. Il a été décidé de les moyenner afin d'obtenir une valeur globale représentative du site d'étude.

- coefficient de réfraction moyen : $\overline{k} = 0.235$ ;
- un résidu de 0.023 5 par rapport à cette valeur moyenne engendre, pour une portée de 1 000 m, une variation de dénivelée de l'ordre de 3 mm, correspondant à une imprécision angulaire d'environ 1.7 cc. Cette valeur est considérée comme négligeable au regard des précisions instrumentales ;
- impact de la valeur moyenne du coefficient $k$ sur la correction du dénivelée pour une portée de 1 000 m :
  - pour $k = 0.235$ : correction de 19.6 mm ;
  - pour la valeur standard $k = 0.130$ : correction de 10.2 mm.
  - la différence entre les deux coefficients est significative à longue portée

**Test de compensation avec un coefficient $k = 0.235$**

Les résultats ne donnent pas de bons résultats, l'erreur moyenne à posteriori sur les angles zénithaux passe à 5.03 cc et des $w_i$ apparaissent sur les observations avec des longues lignes de visées. Un coefficient global qui améliore légèrement l'erreur moyenne à posteriori des angles zénithaux et la précision des coordonnées ($< 0.1\,[mm]$ en altimétrie) à une valeur de $k = 0.16$, mais c'est une recherche purement empirique et itérative.

L'adaptation du coefficient standard n'apporte pas de réduction significative des résidus. Le calcul via le nivellement trigonométrique apporte une information pour des conditions particulières, mais pas pour des conditions globales applicables à tout le site. Cette variante n'est ni approfondie, ni retenue.

#### 4.3.4.2 Lancer de rayon

La réfraction constitue la composante la plus délicate à modéliser. Les concepts mathématiques et algorithmiques ont été définis et testés aux sections 2.53 et 3.7.3 ; toutefois, les résultats obtenus ne répondent pas aux attentes.

Le calcul de lancer de rayons a été effectué pour l'ensemble des observations. Les dénivelées topocentriques issues du calcul validé à la section 4.2.2 ont été utilisées comme valeurs de référence afin de déterminer, pour chaque visée et à chaque instant $t$, les corrections individuelles de réfraction $\delta_{\text{refr}}$. Le modèle atmosphérique 4D permet une amélioration notable de la correction des distances, il ne permet pas d'obtenir une correction satisfaisante de l'effet de la réfraction.

À titre d'exemple, les résultats obtenus pour la station 11 sont présentés dans le tableau 4.16. Les analyses sont réalisées sur la base des dénivelées topocentriques.

| **11 vers** | $\Delta h$ **GNSS** [m] | $\Delta$ **coef.** $k = 0.13$ [mm] | $\Delta$ **lancer de rayon** [mm] | $\Delta$ **sans réfraction** [mm] |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 96.814 70 | 8.0 | 1.3 | 3.4 |
| 3 | 27.217 30 | −1.0 | −13.0 | −6.6 |
| 7 | −3.584 00 | 5.2 | 2.4 | 4.9 |
| 12 | 29.487 80 | −0.1 | −0.5 | −1.7 |
| 13 | −12.559 80 | 13.6 | **51.5** | −3.5 |
| 14 | 89.698 80 | 23.6 | **49.0** | −9.2 |
| 15 | 5.519 50 | 15.8 | 5.6 | 12.3 |
| 1101 | 337.750 34 | −6.9 | **−70.7** | −46.8 |
| 1102 | 352.545 44 | −7.9 | **−68.5** | −46.6 |

**Tab. 4.16** – Écarts entre la dénivelée mesurée par GNSS depuis le point 11 ; par rapport à la station totale, avec diverses stratégies de prise en compte de $\delta_{\text{refr}}$.

Le tableau précédent montre que la détermination de $\delta_{\text{refr}}$ par lancer de rayons ne permet pas d'améliorer l'estimation des dénivelées. Au contraire, les résultats sont dégradés, avec des écarts atteignant jusqu'à 7 cm sur les points 1101 et 1102. En revanche, les observations corrigées à l'aide du coefficient standard $k = 0.13$ fournissent de bons résultats, y compris pour les grandes dénivelées. Les exceptions concernent les points 13, 14 et 15, pour lesquels les écarts observés peuvent être imputés à la détermination altimétrique du GNSS elle-même, vraisemblablement influencée par le masque d'obstruction.

Il est également possible de comparer l'influence des différentes stratégies de prise en compte de $\delta_{\text{refr}}$ par rapport aux valeurs issues du nivellement géométrique (Tab. 4.17). Les données sont classées en fonction de l'éloignement à la station.

Le tableau 4.18 présente une synthèse statistique des écarts observés. Il apparaît clairement que le modèle standard, avec un coefficient de réfraction $k = 0.13$, fournit les meilleures performances. La moyenne des écarts s'élève à 1.6 mm, contre 6.0 mm pour les calculs basés sur le lancer de rayons. Pour les écarts maximaux, le modèle standard présente un écart maximal de −6.0 mm sur 15 points, tandis que la méthode par lancer de rayons atteint −16.2 mm, avec un maximum absolu de 38.8 mm observé sur le point 13.

Il est utile de souligner que la méthode par lancer de rayons montre des résultats satisfaisants à courte distance. Jusqu'à une distance d'environ 200 m (point 7), les écarts restent inférieurs ou égaux à 2 mm, valeur considérée comme tolérable. Au-delà de cette distance, la qualité des résultats se dégrade fortement.

Un calcul global intégrant la stratégie du lancer de rayons a par ailleurs été entrepris afin d'évaluer son impact global. Dans ce cas, l'option de prise en compte de la réfraction dans le calcul est désactivée. Les résultats obtenus ne sont pas satisfaisants :

- nombre de $w_i = 84$ ;
- écarts verticaux atteignant jusqu'à 12 cm ;
- précision a posteriori sur les angles zénithaux de 23.6 cc ;
- précision sur la composante altimétrique fortement dégradée, passant de 0.8 mm à 2.5 mm ;

### Bilan

À ce stade du développement et aux vues des différents tests réalisés, aucune solution satisfaisante n'a pu être mise en évidence pour exploiter le modèle atmosphérique 4D ayant pour but une détermination plus fine de l'angle de réfraction $\delta_{\text{refr}}$. En conséquence, les derniers traitements ainsi que la mise en valeur des résultats seront réalisés en adoptant les valeurs standards, avec un coefficient de réfraction fixé à $k = 0.13$.

| | $\Delta h$ | $\Delta k = 0.13$ | | $\Delta$ lancer de rayon | | $\Delta$ sans corr. | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **11 vers** | [m] | [mm] | | [mm] | | [mm] | |
| 522 | −3.4714 | 1.6 | ● | 2.3 | ● | 1.7 | ● |
| 523 | −3.2929 | 1.7 | ● | −0.4 | ● | 1.7 | ● |
| 525 | −3.2630 | 2.2 | ● | −0.8 | ● | 2.2 | ● |
| 526 | −3.3066 | 2.2 | ● | −1.4 | ● | 2.1 | ● |
| 6 | −3.5806 | 1.3 | ● | −1.2 | ● | 1.2 | ● |
| 527 | −3.4071 | 3.0 | ● | −1.1 | ● | 2.9 | ● |
| C1 | −3.5393 | 1.0 | ● | −0.6 | ● | 0.8 | ● |
| 528 | −3.5977 | 3.7 | ● | −0.8 | ● | 3.5 | ● |
| KROR | −5.0398 | 1.4 | ● | −0.4 | ● | 1.1 | ● |
| C2 | −3.5418 | −0.4 | ● | −2.2 | ● | −0.6 | ● |
| 7 | −3.5886 | 0.6 | ● | −2.2 | ● | 0.3 | ● |
| C3 | −3.5448 | 3.4 | ● | 3.1 | ● | 2.9 | ● |
| KROL | −5.0107 | 0.5 | ● | −2.4 | ● | −0.1 | ● |
| C4 | −3.5409 | 0.2 | ● | 2.7 | ● | −0.5 | ● |
| C5 | −3.5540 | 2.0 | ● | 5.2 | ● | 1.1 | ● |
| 5 | −3.6454 | 0.4 | ● | 3.2 | ● | −0.6 | ● |
| 5.1 | −3.6813 | 0.6 | ● | 3.7 | ● | −0.3 | ● |
| C6 | −3.5612 | −1.4 | ● | 1.8 | ● | −2.4 | ● |
| 12 | 29.4857 | −2.2 | ● | −2.6 | ● | −3.8 | ● |
| 13 | −12.5725 | 0.9 | ● | **38.8** | ● | −16.2 | ● |
| 15 | 5.4977 | −6.0 | ● | **−16.2** | ● | −9.5 | ● |

● $|\Delta| \leq 2\,\text{mm}$ (bon)
● $2 < |\Delta| \leq 5\,\text{mm}$ (acceptable)
● $|\Delta| > 5\,\text{mm}$ (dégradé)

**Tab. 4.17** – Comparaison des dénivelées (nivellement géométrique) et effets de $\delta_{\text{refr}}$, pris en compte dans le nivellement des corrections orthométriques, avec indicateur visuel de qualité.

| **Méthode** | Moy. $\lvert\Delta\rvert$ [mm] | $\lvert\Delta\rvert_{\max}$ [mm] | $\lvert\Delta\rvert \leq 2$ mm [%] |
|---|---|---|---|
| $k = 0.13$ | **1.6** | **6.0** | **66** |
| Lancer de rayon | 4.2 | 38.8 | 43 |
| Sans correction | 2.5 | 16.2 | 60 |

**Tab. 4.18** – Synthèse des performances des différentes corrections de nivellement

## 4.4 Compensation complète

Afin de valoriser les différents développements réalisés ainsi que les concepts analysés, deux compensations complètes des mesures géodésiques sont présentées :

1. **Compensation classique** : correction des paramètres atmosphériques usuels (température mesurée à la station et correction au milieu de la ligne de visée), prise en compte de la cote du géoïde et de la déviation de la verticale issues du modèle CHGEO2004 ; le nivellement géométrique n'a pas été corrigé des cotes orthométriques.
2. **Géoïde local et atmosphère 4D** : correction des distances à l'aide du modèle atmosphérique 4D, prise en compte de la cote du géoïde et de la déviation de la verticale issues du modèle local, intégration des cotes orthométriques dans le nivellement géométrique ; cette variante est désignée par la suite sous l'appellation 4D.

Les stratégies de calcul ainsi que les observations introduites sont strictement identiques pour les deux compensations. Elles se définissent comme suit :

- **Observations** :
  - solutions GNSS Bernese 2025, avec le point 1103 utilisé comme pivot ;
  - observations de station totale ;
  - observations de nivellement géométrique.
- **Paramètres** :
  - compensation libre ;
  - points d'appui : ensemble des stations du réseau AGNES ;
  - coefficient de réfraction fixé à $k = 0.13$ ;
  - une session GNSS fixée.

**Remarques relatives au déroulement du calcul pour la variante « compensation classique » :**

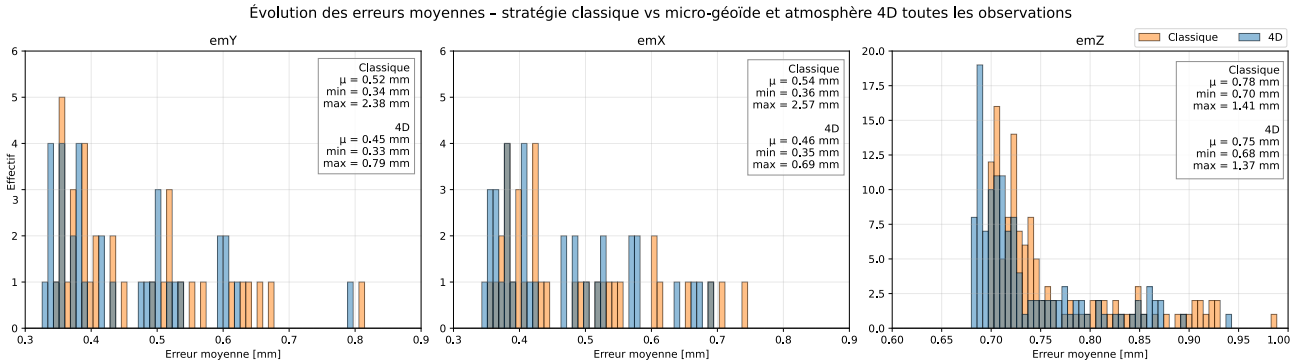
- l'erreur moyenne sur les observations $I$ et $S$ des stations 13 et 15 a été augmentée à 30 mm afin de permettre l'intégration du nivellement géométrique dans l'ensemble des observations de station totale ; un extrait du protocole de calcul avant adaptation des erreurs moyennes est présenté à l'annexe R page A-85, montrant les résidus et $w_i$ sur les observations ;
- sept observations supplémentaires ont été éliminées par rapport à la variante « géoïde local et atmosphère 4D ».

#### Analyse des résultats entre les deux stratégies

Les résumés détaillés ainsi que les analyses statistiques des calculs sont présentés dans les annexes suivantes :

- annexe **S** page A-87 : compensation classique ;
- annexe **T** page A-95 : géoïde local et atmosphère 4D ;
- annexe **U** page A-103 : graphiques statistiques des $w_i$ pour les observations terrestres, comparaison entre les deux stratégies ;
- annexe **V** page A-105 : graphiques statistiques des $w_i$ pour les observations GNSS, comparaison entre les deux stratégies.

La figure 4.8 présente la répartition des erreurs moyennes a posteriori pour l'ensemble des observations, pour les deux variantes de calcul.




**Graph. 4.8** – Comparaison des erreurs moyennes finales entre les deux stratégies de compensation.

Les éléments suivants peuvent être dégagés à partir des documents en annexe et du graphique 4.8 :

- aucune des deux stratégies ne présente un avantage net et généralisé ; la compensation 4D montre toutefois des performances légèrement supérieures, sans que celles-ci soient systématiquement significatives ;
- la différence la plus marquée concerne l'erreur moyenne a posteriori sur les angles zénithaux, avec un gain de 2.3 cc en faveur de la variante 4D, ce qui tend à démontrer une meilleure intégration entre le nivellement géométrique et les observations terrestres ;
- les précisions a posteriori sur les distances, les directions horizontales ainsi que sur les observations GNSS sont pratiquement identiques pour les deux stratégies ;
- l'analyse des graphiques de répartition des $w_i$ met en évidence une différence notable pour les observations $CdZ$, correspondant au nivellement géométrique : la variante 4D présente un étalement plus important, avec seulement 72 % des observations comprises dans l'intervalle des 68 %, contre 82 % pour la variante classique. Cette différence peut s'expliquer par la dégradation volontaire des erreurs moyennes sur les hauteurs d'instrument et de signal aux points 13 et 15, dans la compensation classique. Les observations d'angles zénithaux depuis et vers ces points n'ayant dès lors plus de poids significatif, les observations de nivellement ne sont plus contraintes ni contrôlées par ces mesures ;
- pour le reste, la répartition des $w_i$ est très similaire entre les deux variantes, à l'exception des angles zénithaux de la variante 4D, pour lesquels 3 % d'observations supplémentaires sont concentrées dans l'intervalle des 68 % autour de zéro ;
- un constat analogue s'applique aux observations GNSS : aucune des deux stratégies ne montre d'amélioration significative des $w_i$ par rapport à l'autre.

Les résultats ont été analysés dans leur globalité. Il est toutefois également pertinent de comparer les précisions relatives internes au réseau, lesquelles fournissent des informations sur la qualité interne des observations et sur la cohérence spatiale et altimétrique entre les points (Tab. 4.19). Le choix des couples de points permet de valider à la fois des relations spatiales et verticales, notamment pour le couple 7–9. Le couple 15–13, bien qu'il ne présente pas de liaison directe, a été conservé afin d'évaluer la qualité interne du réseau et la robustesse des relations indirectes entre les points.

D'un point de vue quantitatif, les variations observées restent modestes. Il a dès lors été choisi de quantifier l'apport de la variante 4D en calculant le gain relatif sur la norme de l'ellipsoïde 3D pour chaque couple de points. Comme présenté dans le tableau 4.19, le gain moyen atteint 7 % entre les deux stratégies, avec un maximum de 12.7 % observé pour la relation 13–14. Ce couple correspond à deux piliers se faisant face dans la vallée, configuration particulièrement favorable à la mise en évidence d'une amélioration de la qualité interne du réseau et sa géométrie (plan en annexe X page A-111).

**Tab. 4.19** – Ellipsoïdes d'erreur moyenne relative 3D avec gain global de la solution 4D par rapport à la versions classique, avec l'orientation des axes A et B de l'ellipsoïde.

| Point 1 | Point 2 | **Solution 4D** | | | **Gain global** | | **Solution classique** | | | **Ori. A - B** | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | A [mm] | B [mm] | C [mm] | [%] | | A [mm] | B [mm] | C [mm] | Z(A) | Z(B) |
| 1 | 2 | 0.55 | 0.52 | 0.23 | 7.3 | △ | 0.58 | 0.55 | 0.24 | H | V |
| 11 | 12 | 0.30 | 0.29 | 0.18 | 5.9 | △ | 0.31 | 0.29 | 0.19 | H | V |
| 11 | 13 | 0.62 | 0.56 | 0.38 | 9.8 | △ | 0.66 | 0.62 | 0.43 | H | V |
| 11 | 15 | 0.56 | 0.38 | 0.24 | 11.5 | ▲ | 0.63 | 0.45 | 0.26 | H | V |
| 11 | 7 | 0.19 | 0.18 | 0.14 | 4.2 | – | 0.20 | 0.17 | 0.14 | H | V |
| 1101 | 1102 | 1.73 | 0.89 | 0.77 | 6.1 | △ | 1.79 | 0.95 | 0.83 | V | H |
| 1102 | 1104 | 1.71 | 0.91 | 0.79 | 4.5 | – | 1.75 | 0.94 | 0.82 | V | H |
| 13 | 14 | 1.21 | 0.71 | 0.62 | 12.7 | ▲ | 1.40 | 0.83 | 0.65 | V | H |
| 15 | 13 | 0.72 | 0.63 | 0.62 | 10.4 | ▲ | 0.81 | 0.70 | 0.67 | H | V |
| 15 | 14 | 1.15 | 0.89 | 0.43 | 13.9 | ▲ | 1.34 | 0.99 | 0.47 | V | H |
| 7 | 9 | 0.25 | 0.24 | 0.21 | 2.1 | – | 0.26 | 0.25 | 0.21 | H | H |
| NBU | N13 | Niv. Geom. | | 0.25 | 10.7 | ▲ | Niv. Geom. | | 0.28 | V | |

▲ gain $\geq 10\,\%$ (amélioration significative)
△ $5 \leq$ gain $< 10\,\%$ (amélioration modérée)
– gain $< 5\,\%$ (quasi équivalent)

### Bilan

Le modèle 4D ne met pas en évidence d'apport quantitativement significatif par rapport à la méthode classique. Il est toutefois possible d'affirmer que cette approche améliore la cohérence globale des observations et permet leur intégration conjointe dans une compensation unique, sans dégrader l'une ou l'autre des composantes.

Cette cohérence accrue implique également une amélioration de la fiabilité du réseau et du contrôle interne, l'ensemble des observations sont directement comparables et peuvent être compensées de manière homogène.

# CHAPITRE 5

# DISCUSSION

## 5.1 Validation des résultats

Les résultats de ce travail montrent que les différentes modélisations mises en œuvre, au niveau physique de la Terre ou de l'atmosphère, n'apportent pas un gain aussi significatif qu'initialement espéré. Le niveau de précision atteint dès l'acquisition des observations, renforcé par la prise en compte des paramètres atmosphériques et géophysiques standard, permet déjà d'atteindre un degré de précision très élevé. Dans ce contexte, l'introduction de modélisations physiques plus complexes ne laisse que peu de marges d'améliorations significatives. L'impact sur la précision absolue des points surveillés ou sur la réduction des erreurs moyennes a posteriori devient difficilement dissociable des limites techniques et de la précision des instruments.

Néanmoins, il a été démontré qu'une compensation globale, intégrant la précision réelle des différentes techniques d'acquisition, est réalisable. Ce point constitue un élément essentiel dans la combinaison des technologies d'auscultation. Les deux facteurs principaux permettant de satisfaire les conditions d'un ajustement global des observations sont la modélisation d'un géoïde local et le calcul rigoureux des cotes orthométriques. La correction orthométrique le long des lignes de nivellement garantit l'ajustement cohérent des observations dans un référentiel ellipsoïdal. Il convient toutefois de souligner que cette approche repose sur les modèles développés pour le site d'étude et qu'elle devra être testée et validée sur d'autres sites afin d'en confirmer la robustesse et la généralisation possible.

Les problématiques liées à la modélisation de l'atmosphère demeurent un champ de recherche délicat et ne sont pas encore entièrement abouties. Face à la complexité des phénomènes atmosphériques, le choix s'est porté sur l'utilisation d'outils d'apprentissages profonds couplés à des méthodes d'optimisation intégrant un grand nombre de paramètres. Ceux-ci ne sont pas toujours reliés par des relations mathématiques explicites, ce qui rend leur modélisation particulièrement délicate. Cette approche a permis de construire un modèle atmosphérique 4D cohérent. Les premiers résultats obtenus apparaissent prometteurs et ouvrent des perspectives intéressantes pour la suite des travaux. Le principal bénéfice de cette modélisation réside dans une correction plus fine des distances, lesquelles s'intègrent de manière plus cohérente entre elles et avec les observations GNSS.

Le post-traitement des observations GNSS a tout d'abord été réalisé à l'aide d'un logiciel grand public, puis comparé aux résultats obtenus avec le logiciel scientifique Bernese. Cette comparaison met en évidence la nécessité de recourir à un logiciel scientifique pour le calcul des lignes de base lorsque les distances dépassent 10 km, les modèles mathématiques de ce type de logiciel permet d'atteindre les niveaux de précision requis. En particulier, la solution fournie par Bernese permet d'obtenir une qualité altimétrique inférieure à 1.5 mm, une performance qui peut être considérée comme excellente pour des déterminations GNSS.

La détermination de l'angle de réfraction à partir du modèle atmosphérique 4D a donné lieu à de nombreux tests, analyses et variantes méthodologiques. Malgré ces investigations approfondies, aucune des solutions ou stratégies évaluées n'a permis d'obtenir des résultats satisfaisants. Dans ce contexte, et à ce stade des travaux, le recours à des coefficients standards, éventuellement ajustés de manière empirique, demeure l'option la plus fiable. Ces constats suggèrent que la modélisation fine de la réfraction pourrait atteindre une limite pratique, indépendante de la sophistication des modèles atmosphériques, lorsque les gradients thermiques locaux ne sont pas directement observables. Dans ce contexte, l'utilisation de coefficients standards apparaît non seulement comme une solution pragmatique, mais également comme un compromis méthodologique cohérent au regard des niveaux de précisions actuellement accessibles.

Les développements et recherches menés au cours de ce travail montrent que l'introduction de modélisations physiques plus complexes n'entraîne pas d'amélioration significative de la précision globale du réseau. Leur apport se mesure principalement par un renforcement de la qualité interne du réseau, avec un gain compris entre

5 % et 10 % sur les ellipsoïdes relatives entre deux points.

Ces résultats soulignent que l'apport principal des approches développées réside davantage dans le renforcement de la cohérence interne et du contrôle relatif des observations que dans l'amélioration de la précision absolue du réseau. Ils permettent ainsi d'identifier plus clairement les axes selon lesquels des améliorations futures pourraient être envisagées.

## 5.2 Perspectives – Réfraction

La modélisation du trajet d'un rayon lumineux dans l'atmosphère repose sur la connaissance d'un champ atmosphérique aussi fidèle que possible. Comme cela a été mis en évidence dans ce travail, les simulations développées permettent de satisfaire les exigences de précision pour des distances courtes. En revanche, lorsque les distances augmentent, ces performances ne sont plus systématiquement garanties. Un approfondissement de cette thématique apparaît dès lors pertinent, en particulier afin de valider le concept d'évolution du gradient thermique, qui constitue l'un des paramètres les plus sensibles dans la modélisation de la réfraction.

En supposant la disponibilité d'un modèle atmosphérique contrôlé et validé, des simulations complémentaires pourraient être envisagées afin d'évaluer plus précisément l'apport réel de ces corrections et d'en estimer les incertitudes résiduelles. Il convient toutefois de replacer ces perspectives dans leur contexte opérationnel : les précisions actuellement atteintes après compensation sont de l'ordre de 4 cc, soit environ 6 mm à 1 000 m. Ce niveau de performance, peut être considéré comme très bon au regard des exigences finales du projet.

## 5.3 Perspectives – GNSS

Le positionnement GNSS constitue une solution d'avenir majeure pour la mesure de surveillance. Il s'agit en effet de la seule technologie permettant de déterminer une position absolue sur Terre, indépendamment de l'environnement local immédiat. Les solutions commerciales de post-traitement offrent des performances satisfaisantes à courte distance, inférieure à 10 km, mais montrent leurs limites lorsqu'il s'agit d'assurer un rattachement précis aux réseaux de stations permanentes AGNES.

Dans ce contexte, la mise en place d'un service de calcul basé sur le logiciel Bernese apparaîtrait comme une évolution particulièrement pertinente. Pour des ouvrages d'importance nationale, les post-traitements pourraient ainsi être réalisés à l'aide d'un logiciel scientifique, garantissant un rattachement de haute précision au réseau global. Dans ce contexte, le service fédéral de la géodésie joue un rôle central, en disposant de toutes les données nécessaires à l'intégration des observations GNSS dans le cadre de référence le plus récent, ainsi qu'à la prise en compte des vitesses des mouvements tectoniques.

Une telle approche permettrait non seulement d'assurer un suivi cohérent à long terme en intégrant les vitesses des mouvements terrestres, mais également, à l'échelle locale, de s'affranchir de certaines contraintes opérationnelles ou de contrôler avec une grande précision la stabilité des points de référence locaux. Les états de contrôle pourraient alors être compensés conjointement dans des ajustements multi-époques, tenant compte des dynamiques globales, tout en conservant une analyse fine et relative des mouvements au sein du réseau de surveillance local.

## 5.4 Commentaires personnels

Ce travail a permis d'aborder en profondeur la problématique de la mise en commun des observations issues de différentes techniques de mesures. L'avancée principale, à mon sens, réside dans la démonstration qu'il est possible de compenser l'ensemble des observations au sein d'un ajustement global, tout en conservant la précision intrinsèque de chaque mesure. Cette possibilité est rendue effective grâce à l'introduction rigoureuse de la cote orthométrique dans la transformation des dénivelées usuelles du nivellement géométrique en composantes ellipsoïdales.

Ce résultat constitue un point fondamental. En effet, la réalisation d'une acquisition gravimétrique locale et de mesures de déviation de la verticale permettraient ensuite d'exploiter les observations sans les déformer. La modélisation du champ de gravité local représente ainsi une base saine et pérenne pour toute la durée de vie de

l'ouvrage. Elle permet d'ajouter, de déplacer ou de faire évoluer les dispositifs de mesures en fonction des besoins, sans introduire de biais liés à des approximations ou à des incertitudes issues de modèles globaux moins précis.

La problématique atmosphérique demeure la pierre angulaire des mesures de haute précision. Toutefois, des niveaux de précision déjà très satisfaisants peuvent être atteints à l'aide d'un modèle atmosphérique 4D théorique, permettant une prédiction plus fine de la température, en vue de la correction des distances. Le cas spécifique de la réfraction reste nettement plus complexe, en particulier au regard des niveaux de précision très élevés recherchés dans le cadre de l'auscultation d'ouvrages.

Le calcul GNSS constitue personnellement l'un des domaines dans lesquels une évolution des pratiques apparaît indispensable. La mise à disposition d'un service de calcul basé sur le logiciel Bernese, permettant une intégration rigoureuse des observations GNSS dans le réseau AGNES, est selon moi essentielle pour garantir la précision attendue.

La qualité du matériel désormais accessible aux bureaux privés dépasse largement les capacités exploitées par les moteurs de calcul commerciaux. L'exploitation complète du potentiel du GNSS doit reposer sur un service de calcul scientifique, adapté aux nouvelles technologies et aux exigences actuelles de précision.

Ces éléments confirment l'intérêt d'une approche intégrée et rigoureuse de l'auscultation, dans laquelle la cohérence géodésique et la qualité des modèles physiques constituent des conditions essentielles à l'interprétation fiable des déformations des ouvrages à long terme.

# CHAPITRE 6

# CONCLUSION

Les travaux présentés dans ce mémoire ont permis d'explorer les possibilités et les limites de l'intégration de modèles avancés dans le cadre de la compensation géodésique. L'objectif principal était d'évaluer l'apport de modèles locaux de géodésie physique afin de combiner, dans une compensation commune et cohérente, l'ensemble des observations, sans recourir à des artifices de calcul.

Les observations locales, l'astro-géodésie et les mesures de gravimétrie, ont permis l'établissement d'un modèle du géoïde et de la forme de la Terre d'une très grande qualité. La composante atmosphérique a été mesurée et quantifiée à l'aide de deux nivellements trigonométriques réciproques simultanés automatiques, complétés par l'enregistrement des paramètres atmosphériques en neuf points répartis autour du site d'étude.

Une part importante de ce travail a été consacrée à l'étude de l'atmosphère, avec un modèle de température du sol à haute résolution spatiale, basée sur une approche d'apprentissage profond de type Random Forest. Ce modèle a ensuite été étendu à la création d'un champ atmosphérique 4D, en intégrant des données complémentaires issues de l'Office fédéral de météorologie suisse. La fonction de perte spécifique mise en place permet le transfert thermique entre une température sol et l'air. Les performances obtenues pour la modélisation du sol se révèlent très satisfaisantes, la modélisation de la température de l'air demeure limitée, en raison de l'absence de mesures locales directes des gradients verticaux. L'évaluation de la qualité du modèle repose principalement sur des tests empiriques, fondés sur la correction des observations et leur confrontation à des valeurs de référence terrain.

La surveillance géodésique d'ouvrages repose sur la définition d'un cadre de référence stable et pérenne dans le temps. Le GNSS constitue la solution la plus adaptée, car il est indépendant des contraintes locales et s'inscrit dans un cadre de référence international. En raison des mouvements tectoniques, la mise en place d'un cadre fixe doit tenir compte des dynamiques terrestres afin d'être pérenne dans le temps. Les concepts de bases ont été posés et testés sur des données non exhaustives, une généralisation de la méthode doit être envisagée afin de valider la méthode et les concepts.

La modélisation fine du champ de pesanteur et de la gravité permet, d'améliorer significativement la qualité des déterminations altimétriques. Elle renforce également la cohérence entre les observations d'angles zénithaux et le nivellement géométrique, confirmant que la prise en compte des cotes orthométriques le long des lignes de nivellement est indispensable dans le cadre de réseaux géodésiques de grande ampleur. Les premiers essais ont mis en évidence la forte complexité, et parfois l'instabilité locale, des phénomènes atmosphériques. Ces résultats suggèrent que des améliorations pourraient être envisagées, tant dans les modèles de propagation que dans la représentation de l'atmosphère, en particulier en milieu alpin. À ce stade, le modèle standard de réfraction reste toutefois une solution robuste, cohérente et d'une précision jugée acceptable pour les réseaux géodésiques.

L'ensemble des développements réalisés ont été testés et validés dans le cadre d'une compensation globale. Les précisions internes propres à chaque type d'observations ont été intégrées sans adaptations spécifiques. Les gains, en terme de précision finale du réseau restent limités. Cependant, la prise en compte des phénomènes de géodésie physique et la modélisation fine de l'atmosphère améliorent la cohérence, le contrôle interne et l'homogénéité des observations.

# Bibliographie


AG, L. G. (2025). *Leica Infinity – Geospatial Office Software* (Version Dernière version (2025)) [Consulté le 25 octobre 2025]. https://leica-geosystems.com/products/gnss-systems/software/leica-infinity

Allorant, P. (2025). Pareto Solutions [Consulté le 2025-10-01]. *Pareto Solutions SARL*.

Altamimi, Z., Rebischung, P., Collilieux, X., Métivier, L., & Chanard, K. (2023). ITRF2020 : an augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions. *Journal of Geodesy*, *97*. https://doi.org/10.1007/s00190-023-01738-w.

Barrell, H., & Sears, J. E. (1939). The refraction and dispersion of air for the visible spectrum. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, *238*(786), 1-64.

Bouët, M. (1985). *Climat et météorologie de la Suisse romande* (2e). Payot.

Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, *45*(1), 5-32.

Casto, M. (2026). *Développement d'outils pour la détermination et la qualification de champs de gravité locaux* [Mémoire de Master]. Master conjoint UNIGE-HES-SO en développement territorial, orientation Ingénierie géomatique.

Cressie, N. A. C. (1993). *Statistics for Spatial Data*. Wiley-Interscience.

D. Willi, S. G. (2022). Système de positionnement global par satellites GNSS.

Dach, R., Lutz, S., Walser, P., & Fridez, P. (2015). *Bernese GNSS Software Version 5.2* [User manual and technical description of the Bernese GNSS Software.]. Astronomical Institute, University of Bern. Bern, Switzerland, AIUB. https://www.aiub.unibe.ch/download/bernese

Délèze, F. (2024, juillet). *Développement d'un système de mesures astro-géodésiques* [Mémoire de Master]. Master conjoint UNIGE-HES-SO en développement territorial, orientation Ingénierie géomatique.

Eeckman, J., Fallot, J.-M., & Broennimann, O. (2022). Air temperature estimation at very high resolution in mountainous areas. *Dynamiques environnementales*, *49-50*, 85-97.

Electricité de la Lienne. (2025). Electricité de la Lienne — Fournisseur d'électricité [Sion, Valais, Suisse ; consulté le 31 décembre 2025].

EUMETSAT. (2026). European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites [Consulté le 18 janvier 2026].

EUREF. (2025). EUREF Permanent Network (EPN) [Page officielle du réseau GNSS de référence européenne ; consultée le 30 octobre 2025.].

Geo++ GmbH. (2025). Geo++ GmbH [Entreprise spécialisée en solutions GNSS de haute précision]. http://www.geopp.de

Geocat. (2024). geocat.ch – Catalogue suisse de géométadonnées [Consulté le 18 janvier 2026].

Geosat SA. (2025). Innovation et savoir-faire [Basée à Sion, Suisse]. http://www.geosat.ch

Geosystems-MS60, L. (2025). Leica Nova MS60 — Station totale [Consulté le 26 septembre 2025]. https://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/datasheets/leica_nova_ms60_ds.ashx?sc_lang=fr-ch&hash=98D0891D22E66580FF62E71D3B40378B

Geosystems-TS60, L. (2025). Leica Nova TS60 — Station totale [Consulté le 26 septembre 2025]. https://leica-geosystems.com/en-us/products/total-stations/robotic-total-stations/leica-nova-ts60

Golub, G. H., Heath, M., & Wahba, G. (1999). Tikhonov Regularization and Total Least Squares. *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications*.

Guillaume, S. (2023). *Nivellement trigonométrique* [Notes de cours, HEIG-VD, INSIT].

Guillaume, S. (2024). *Éléments de géodésie* [Notes de cours, HEIG-VD, INSIT].

Guo, L., Sun, W., Wu, Y., Xiong, J., & Jiang, J. (2025). Investigation of Thermal Effects of Lakes on Their Adjacent Lands Across Tibetan Plateau Using Satellite Observation During 2000 to 2022. *Remote Sensing*, *17*(19), 3314.

HEIG-VD. (2025). NELCAS : logiciel d'ajustement par moindres carrés pour calcul de coordonnées et altitudes [Programme pour le calcul de coordonnées et d'altitudes selon l'ajustement par moindres carrés]. https://nelcas.heig-vd.ch/

Holmgren, W. F., Hansen, C. W., & Mikofski, M. A. (2025). *pvlib-python : A Python package for modeling solar energy systems* (Version 0.10.5) [Module `solarposition` utilisé pour le calcul de la position du soleil].

Horn, B. (1981). Hill shading and the reflectance map. *Proceedings of the IEEE*, *69*, 14-47.

IERS. (2025). *IERS — Home* [Consulté le 21 décembre 2025]. International Earth Rotation et Reference Systems Service (IERS). https://www.iers.org/IERS/EN/Home

Leica Geosystems AG. (2021). Leica LS15 and LS10 Digital Levels – Product Brochure [Consulté le 17 novembre 2025].

Marti, U. (2004). *The Geoid Model of Switzerland CHGeo2004* (rapp. tech.). swisstopo. Wabern.

Marti, U. (2016). swisstopo : Le géoïde de la Suisse 2004 «CHGeo2004». *Définition de la nouvelle mensuration nationale de la Suisse 'MN95', 14ème partie*.

METAS. (2025). Institut fédéral de métrologie METAS. https://www.metas.ch/

MeteoSwiss. (2025). MétéoSuisse – Office fédéral de météorologie et climatologie [Consulté le 2025-12-10]. *MétéoSuisse*.

Murphy, D. J. (2018). PyKrige : A Python Library for Kriging. *Journal of Open Source Software*, *3*(28), 796.

NIST/SEMATECH. (2024). e-Handbook of Statistical Methods – Weibull Distribution [Consulté en 2025].

OACI. (1993). *Manual of the ICAO Standard Atmosphere*. ICAO.

OIKEN. (2025). OIKEN — Bureau d'ingénierie et services [Sion, Valais, Suisse ; consulté le 31 décembre 2025].

Reference Frame Sub-Commission for Europe (EUREF). (2025). EUREF — European Reference Frame [Consulté le 2025-12-27].

Ridge Regression (Tikhonov Regularization) [Accessed Month Year]. (s. d.).

Roedel, W., & Wagner, T. (2000, juillet). *Physik unserer Umwelt : Die Atmosphäre* (3e éd.). Springer.

Scikit-Learn Developers. (2025). sklearn.ensemble.RandomForestRegressor — scikit-learn 1.4.2 documentation [Consulté le 21 janvier 2026].

Scintrex Ltd. (2025). CG-6 Autograv™ Gravity Meter – Product Brochure [Consulté le 17 novembre 2025].

Sébastien Guillaume, P.-H. C., Cyril Muller. (2010). *Tinet+, Mode d'emploi, Version 6.1* [User manual and technical description of the Trinet+ Software.]. Hes-So, Heig-Vd. Yverdon, Switzerland.

Shepard, D. (1968). A Two-Dimensional Interpolation Function for Irregularly Spaced Data. *Proceedings of the 23rd ACM National Conference*, 517-524.

Sobel, I., & Feldman, G. (1968). Isotropic 3×3 Image Gradient Operator [Described as the standard 3×3 convolution kernels for image gradient estimation (horizontal and vertical).].

Specifications, A.-2. G. R. T. (2025). *JAVAD GNSS Inc.* [Documentation technique officielle du récepteur Alpha-2]. https://download.javad.com/sheets/ALPHA_Datasheet.pdf

Stonex. (2024). SA1100 Multi-Constellation GNSS Antenna – Brochure (English) [Consulté le 17 novembre 2025].

Swisstopo. (2025). swisstopo – Mesurer la Suisse & disposer des géodonnées : institution et mission [Dernière consultation : 21 novembre 2025].

Swisstopo-AGNES. (2025). Automated GNSS Network for Switzerland (AGNES) [Consulté le 30 octobre 2025.].

swisstopo-Applications. (2025). Modèles et applications [Consulté le 11 novembre 2025.].

Swisstopo-Cadastre-28. (2018, décembre). cadastre. Revue spécialisée no 28 – décembre 2018 [Revue spécialisée du système cadastral suisse].

Swisstopo-Cadastre-48. (2025, août). cadastre. Revue spécialisée no 48 – août 2025 [Revue spécialisée du système cadastral suisse].

Swisstopo-Geodesie. (2016). *Formules et constantes pour le calcul de la projection cylindrique à axe oblique et pour la transformation entre des systèmes de référence* (rapp. tech. No LV95/CH1903+) (Document technique, disponible sur le site de swisstopo). swisstopo. Wabern, Suisse. Récupérée novembre 10, 2025, à partir de https://www.swisstopo.admin.ch/content/dam/swisstopo/EN/swisstopo/downloads/products/geo-ref-sys/lv95/formules_constantes_lv95_fr.pdf

Swisstopo-Geoide. (2024). *Géoïde : le modèle suisse de géoïde CHGeo2004*. Récupérée décembre 1, 2025- 31, à partir de https://www.swisstopo.admin.ch/fr/geoid-fr

Swisstopo-PNAC. (2024). Permanent Network Analysis Center (PNAC) [Service officiel de swisstopo chargé de l'analyse et de la gestion du réseau GNSS permanent suisse (AGNES).].

Tikhonov, A. N., & Arsenin, V. Y. (1977). *Solutions of Ill-Posed Problems*. Wiley.

Tikhonov Regularization [Ajouter une pénalité à une fonction de coût pour intégrer des connaissances a priori et contrôler le compromis entre fidélité aux données et énergie de la solution]. (2026). https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/tikhonov-regularization

University of Wyoming. (2025). Weather Upper Air Soundings [Consulté le 2025-12-20]. *University of Wyoming Department of Atmospheric Science*.

Weibull, W. (1951). A Statistical Distribution Function of Wide Applicability. *Journal of Applied Mechanics*, *18*, 293-297.

Wikipédia. (2025). Loi de Weibull — Wikipédia, l'encyclopédie libre [[En ligne ; Page disponible le 25-octobre-2025]]. http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Loi_de_Weibull&oldid=230060239

Wikipédia. (2026). Forêt d'arbres décisionnels — Wikipédia, l'encyclopédie libre [[En ligne ; Page disponible le 5-janvier-2026]]. http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=For%C3%AAt_d%27arbres_d%C3%A9cisionnels&oldid=232160071

Wikipedia contributors. (2024). *Antoine equation*.



# Modélisations géodésiques/physiques avancées dans les réseaux géodésiques de surveillance

# ANNEXES


## Franck Schmidt


**Février 2026**

Domaine Ingénierie et Architecture

Master conjoint UNIGE-HES-SO en développement territorial

Orientation Ingénierie géomatique

Directeur : Prof. Dr. Sébastien Guillaume

Expert : Dr. Daniel Willi

Mémoire n° : 1130

UNIVERSITÉ DE GENÈVE

Hes·so
Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale

# Sommaire des annexes


**A Fiche signalétique VSF15** **A-5**

**B Fichier mesures CG-6** **A-7**

**C Acquisitions du réseau géodésique** **A-9**

**D Base de donnée json du monitoring** **A-15**

**E Calibration des capteurs météos** **A-17**

**F Les indicateurs d'analyses et qualités** **A-23**

**G Mise en valeur du modèle Random Forest** **A-25**

**H Modèle conceptuel du script d'optimisation du modèle météo 4D** **A-27**

**I Architecture du fichier LandXML Leica** **A-29**

**J Deltas distances avec le modèle 4D** **A-31**

**K Compensation NelCas Monitoring** **A-33**

**L Résumé calcul Bernese** **A-47**

**M Résultat compensation session Bernese avec point 1103 comme pivot** **A-57**

**N Analyse du fichier Rinex points 1103** **A-61**

**O Analyse du fichier Rinex points 13** **A-67**

**P Rapport ligne de base calcul Leica Infinity** **A-73**

**Q Comparaison Bernese VS Leica Infinity** **A-79**

**R Compensation : Classique problématique stations 13 et 15** **A-85**

**S Compensation : Classique** **A-87**

**T Compensation : Géoïde local et atmosphère 4D** **A-95**

**U Statistique des résultats finaux : terrestres** **A-103**

**V Statistique des résultats finaux : GNSS** **A-105**

**W Situation des points et cheminements du nivellement géométrique** **A-107**

**X Situation du réseau trigonométrique, vue d'ensemble** **A-111**

**Y Situation du réseau trigonométrique proche de l'ouvrage** **A-115**

# ANNEXE A

# FICHE SIGNALÉTIQUE VSF15

| PFA1 | E = 2 605 141.293 | N = 1 125 491.296 | $H_{NF02}$ = 527.353 | CN 1287 |
|---|---|---|---|---|
| | Précision (1σ) | Planimétrie = 0.100 [m] | Altimétrie = 0.003 [m] | **VSF 15** |
| | Fiabilité | Planimétrie = non | Altimétrie = oui | IdentDN CH0200000VSF |

Rue de Plantassage 2, café des Voyageurs, façade côté route, soubassement: à 0.68 m de l'angle nord-est et 0.12 m au-dessus du sol.




**Matérialisation** **T4H**
cheville S+T, horizontal

**Inscription** **B**

**Remarque**

**Point RGN** 3213
3ème ordre

**Pesanteur** 980450.162
**Mesure gravimétrique** 2020




**Mise à jour**

| Provenance | Date | |
|---|---|---|
| NF | 1927 | Nouvelle cote:- 7 mm depuis 1916 |
| NF | 1947 | Nouvelle cote:+11 mm depuis 1927 |
| NF | 1993 | Nouvelle cote:- 1 mm depuis 1947 |
| S+T | 1994 | Nouvelle édition RNF |
| S+T | 2009 | Coordonnées MO93 |
| S+T | 2011 | Point en ordre |

| **Ct.** | **District** | **Commune** | **Lieu** |
|---|---|---|---|
| VS | Sierre | Sierre | Noës |

**Etabli le** NF 1916
**Identité** id. au no. d'ordre 63, édition 1936

**Repère Pierre du Niton 373.600 m.ü.M**

Office fédéral de topographie swisstopo
CH-3084 Wabern

Pdf generated 06.01.2025

# ANNEXE B

# FICHIER MESURES CG-6

CG-6 Calibration

| Parmètres | Valeur |
|---|---|
| Operator : | FS |
| Gcal1 [mGal] : | 9176.474 |
| Goff [ADU] : | -8388608 |
| Gref [mGal] : | 0 |
| X Scale [arc-sec/ADU] : | 0.030697 |
| Y Scale [arc-sec/ADU] : | 0.03152 |
| X Offset [ADU] : | -230964.9777 |
| Y Offset [ADU] : | -39560.19389 |
| Temperature Coefficient [mGal/mK] : | -0.13 |
| Temperature Scale [mK/ADU] : | -0.000111 |
| Drift Rate [mGal/day] : | 0 |
| Drift Zero Time : | 09.07.2025 08:59 |
| Firmware Version : | CG6_2_20220815 |

Mesures

| Station | Date | Time | Line | StdDev | StdErr | RawGrav | SensorTemp | TideCorr | TiltCorr | MeasurDur | LatGPS | LonGPS | ElevGPS |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | [mGal] | [mGal] | [mGal] | [°C] | [°] | [°] | [s] | | | |
| 2000 | 01.10.2025 | 16:15:09 | 1 | 0.0232 | 0.0042 | 5137.2996 | 48.0445 | 0.0318 | 0.0002 | 30 | 46.28096 | 7.50539 | 531.9 |
| 2000 | 01.10.2025 | 16:15:39 | 1 | 0.0308 | 0.0056 | 5137.2976 | 48.0450 | 0.0316 | 0.0003 | 30 | 46.28097 | 7.50538 | 531.6 |
| 2000 | 01.10.2025 | 16:16:09 | 1 | 0.0321 | 0.0059 | 5137.2973 | 48.0417 | 0.0314 | 0.0002 | 30 | 46.28096 | 7.50537 | 532.1 |
| 2000 | 01.10.2025 | 16:16:39 | 1 | 0.0562 | 0.0103 | 5137.2956 | 48.0436 | 0.0311 | 0.0001 | 30 | 46.28100 | 7.50535 | 534.1 |
| 2000 | 01.10.2025 | 16:17:09 | 1 | 0.0232 | 0.0042 | 5137.2975 | 48.0445 | 0.0309 | 0.0002 | 30 | 46.28100 | 7.50535 | 535.8 |
| 2001 | 01.10.2025 | 17:03:27 | 1 | 0.0107 | 0.0019 | 4917.1915 | 48.0206 | 0.0083 | 0.0003 | 30 | 46.34613 | 7.43414 | 1775.0 |
| 2001 | 01.10.2025 | 17:03:57 | 1 | 0.0126 | 0.0023 | 4917.1891 | 48.0220 | 0.0080 | 0.0004 | 30 | 46.34613 | 7.43415 | 1774.8 |
| 2001 | 01.10.2025 | 17:04:27 | 1 | 0.0179 | 0.0033 | 4917.1869 | 48.0178 | 0.0078 | 0.0003 | 30 | 46.34613 | 7.43414 | 1774.8 |
| 2001 | 01.10.2025 | 17:04:57 | 1 | 0.0154 | 0.0028 | 4917.1879 | 48.0260 | 0.0075 | 0.0003 | 30 | 46.34612 | 7.43414 | 1778.9 |
| 2001 | 01.10.2025 | 17:05:27 | 1 | 0.0121 | 0.0022 | 4917.1879 | 48.0217 | 0.0073 | 0.0003 | 30 | 46.34609 | 7.43416 | 1782.0 |
| 2002 | 01.10.2025 | 17:50:49 | 1 | 0.0278 | 0.0051 | 5137.2844 | 48.0224 | -0.0158 | 0.0004 | 30 | 46.28096 | 7.50544 | 554.9 |
| 2002 | 01.10.2025 | 17:51:19 | 1 | 0.0196 | 0.0036 | 5137.2866 | 48.0251 | -0.0161 | 0.0009 | 30 | 46.28096 | 7.50544 | 554.9 |
| 2002 | 01.10.2025 | 17:51:49 | 1 | 0.0145 | 0.0026 | 5137.2864 | 48.0146 | -0.0163 | 0.0007 | 30 | 46.28096 | 7.50543 | 554.8 |
| 2002 | 01.10.2025 | 17:52:19 | 1 | 0.0231 | 0.0042 | 5137.2874 | 48.0230 | -0.0166 | 0.0008 | 30 | 46.28096 | 7.50542 | 554.8 |
| 2002 | 01.10.2025 | 17:52:49 | 1 | 0.0119 | 0.0022 | 5137.2882 | 48.0099 | -0.0168 | 0.0010 | 30 | 46.28096 | 7.50542 | 554.8 |

# ANNEXE C

# ACQUISITIONS DU RÉSEAU GÉODÉSIQUE

## GNSS

Les mesures GNSS sont réparties dans toute la vallée, afin d'obtenir un bloc de coordonnées homogène précis et fiable, afin de caler les observations terrestres et fournir un cadre de référence.

Le réseau GNSS est composé de trois niveaux :

- **Grande maille** : les stations AGNES afin d'assurer un calage dans le cadre de référence CHTRF avec : EPFL - HABG - HOH2 - MAR3 - PAYE - SAA2 - ZERM - ZIM2, répartition figure C.1,

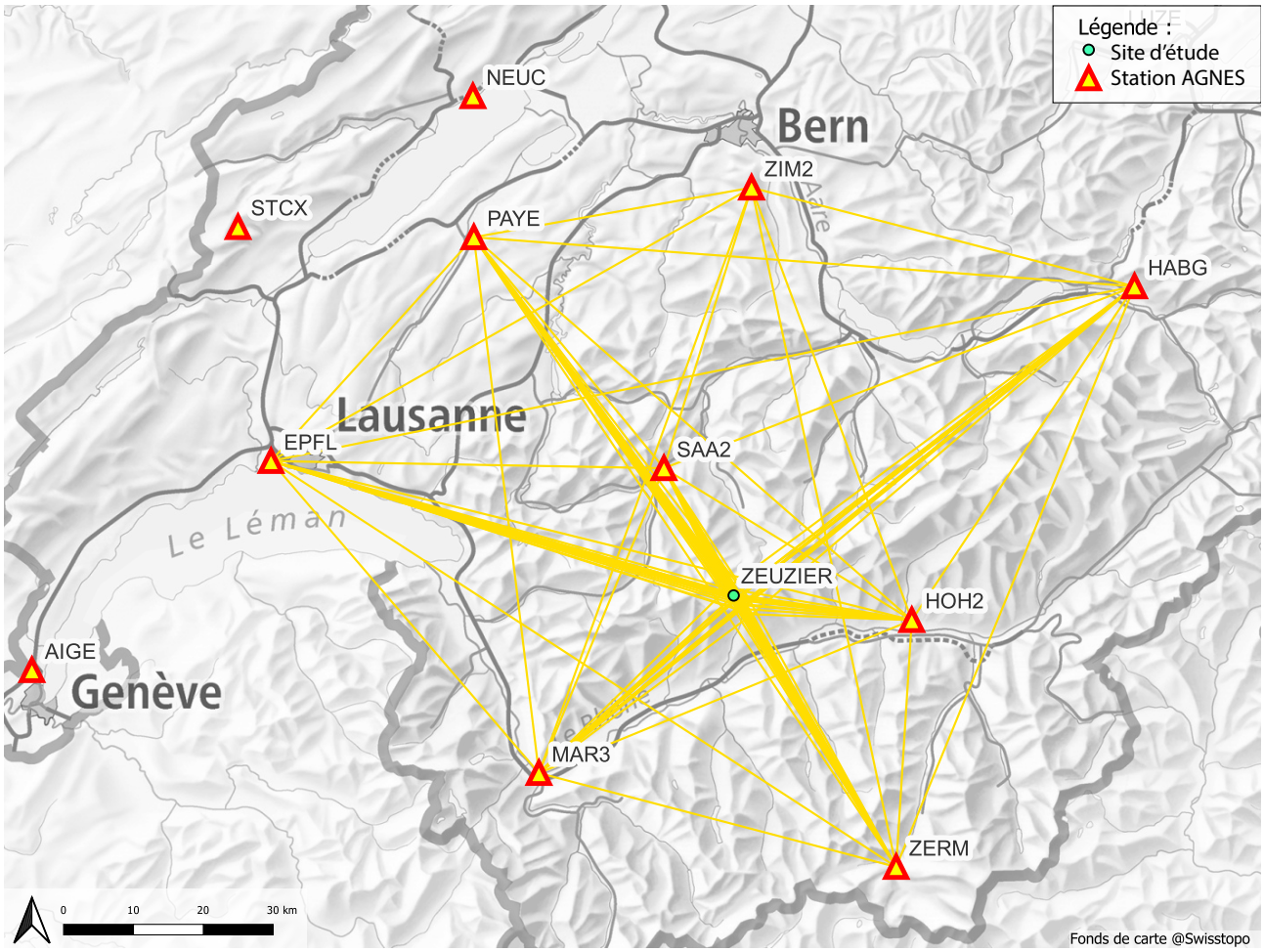



**Fig. C.1** – Stations AGNES prises en compte dans le réseau de surveillance

- **Petite maille** : points de références répartis dans la vallée hors de la zone d'influence de l'ouvrage, figure C.2 points 1101 à 1104, 3-13- 14-15 en bleu,

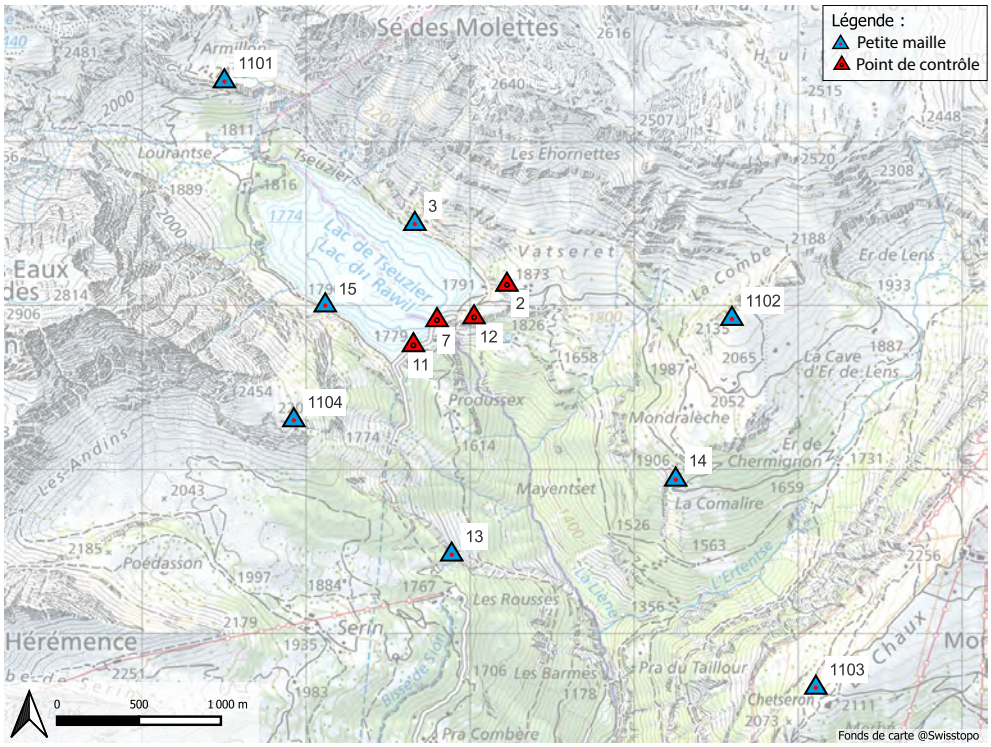



**Fig. C.2** – Répartition des points mesurés par GNSS autour de l'ouvrage

- **Points de contrôle** : situés proches de l'ouvrage et permettant de faire la liaison entre le réseau de petite maille et les mesures par station totale, point 2-7-11-12, en rouge sur la figure C.2

Les observations GNSS sont réalisées avec le matériel et la matérialisation suivante :

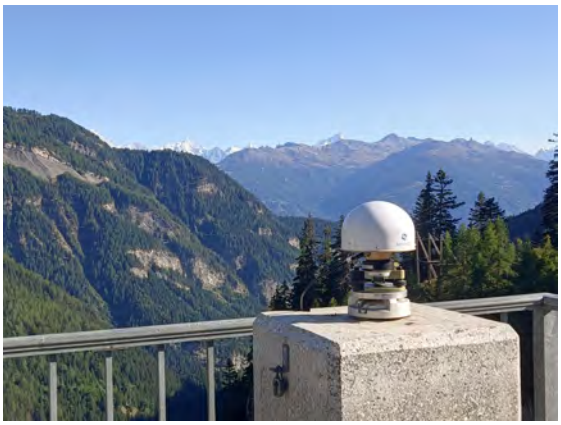
- **Matériel :**

| | |
|---|---|
| Récepteur GNSS | : Javad Alpha 2 configuré en mode statique SPECIFICATIONS, 2025 |
| Constellation | : GPS, Galileo, GLONASS |
| Fréquence d'acquisition | : 15 s |
| Mesures de nuit | : durée minimum 12 h |
| Antenne | : Mini Choke Ring SA1100 STONEX, 2024 , calibration NGS/IGS Geo++GEO++ GMBI |

- **Matérialisation :**
  - Pilier béton centrage forcé, précision de centrage $\sigma_c = 0.2\,mm$
  - Trépied avec centrage à la lunette nadirale, précision de centrage $\sigma_c = 0.3\,mm$



**(a)** Matérialisation du point 3 (Photo : K. Délèze, 2025)



**(b)** Matérialisation sur le pilier 7 (photo de l'auteur, 2025)

**Fig. C.3** – Images des deux matérialisations mises en place durant les mesures

- **Répartition des temps de mesure :**
  - Piliers 1001 à 1004 : mesures continues sur 5 jours du lundi au vendredi soit 95 h
  - 4 sessions de nuits de 12h minimum sur les points : 2, 3, 7, 11, 12 , 13, 14, 15.

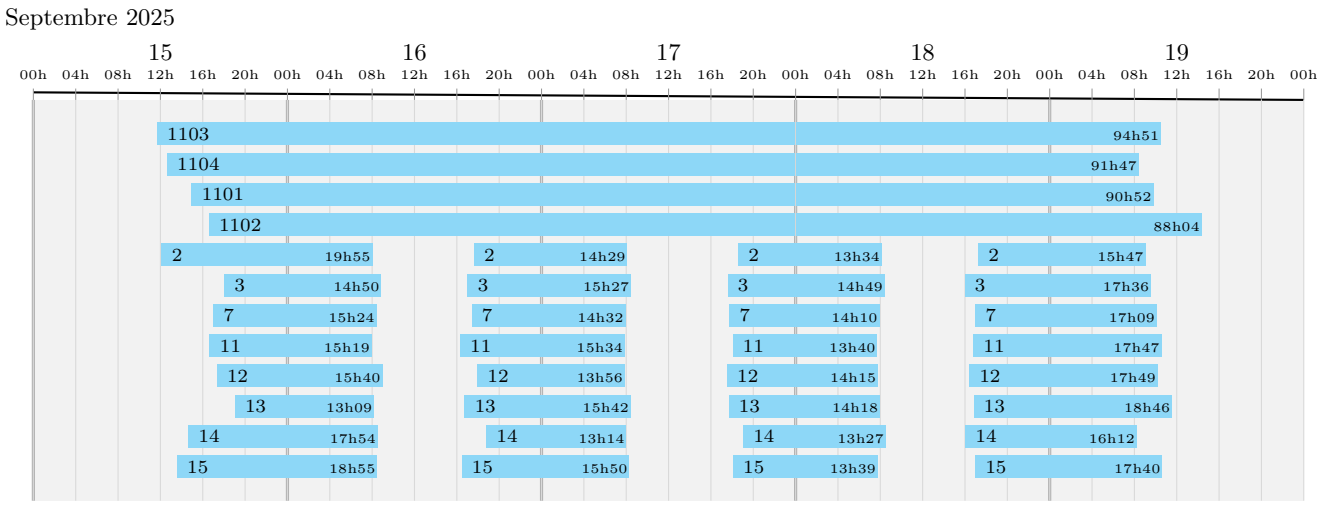



**Fig. C.4** – Visualisation de la répartition temporelle des mesures GNSS

Les différentes nuits de mesures seront ensuite post-traités à l'aide du module de calcul de Leica Infinity AG, 2025, voir les divers développements et ajustements au chapitre 4.1 page 139.

## Nivellement géométrique

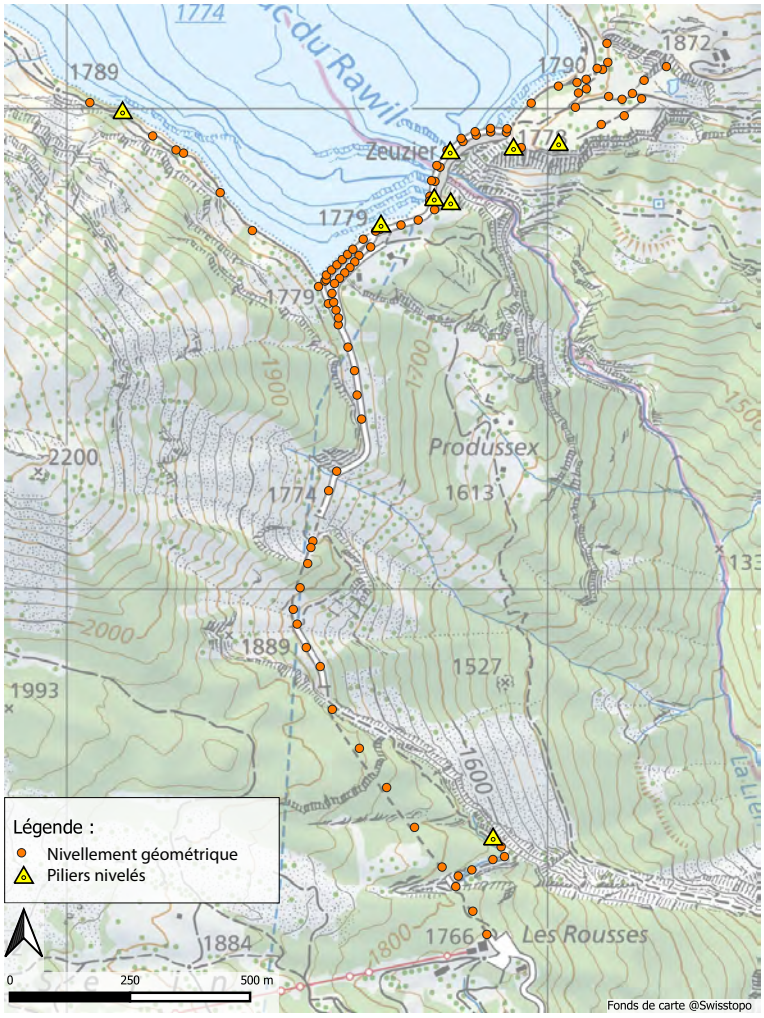
Le nivellement géométrique reste encore aujourd'hui une des méthodes les plus précises et les plus efficientes que le monde de la géomatique possède. La précision atteignable avec un nivellement de précision double est de 0.2 mm/km. Ce type d'observation reste indispensable afin de détecter avec une très haute précision et fiabilité de petits mouvements altimétriques.

Le réseau de nivellement de précision du site de Zeuzier s'étend sur deux kilomètres en rive droite de la vallée, traverse la vallée et remonte sur l'autre rive. Les différents cheminements sont reliés aux observations GNSS ou stations totales via les piliers de mesures, figure C.5b, qui sont également mesurés par le nivellement géométrique. La répartition des points de nivellement est visible à la figure C.5a.

L'instrument utilisé est un niveau numérique Leica LS15, à 0.3 mm/km de Leica Geosystems (Leica Geosystems

AG, 2021), agrémenté de ses mires à code de barres. Afin de garantir la précision, une calibration et/ou contrôle de l'instrument est réalisé tous les jours.

Les observations de nivellement transmises pour ce travail sont corrigées pour les différents type de matérialisations et constantes de lattes. Un calcul libre a également été réalisé par le bureau *Geosat SA* afin d'éliminer les fautes grossières. Il est donc possible de considérer les observations comme exemptes de fautes et il ne reste que les imprécisions et les corrections liées à la modélisation physique du site.




**(a)** Les points du nivellement géométrique



**(b)** Liaison nivellement - pilier (photo de l'auteur, 2016)

**Fig. C.5** – Les mesures par nivellement géométrique de précision

Au total c'est 90 cheminements qui ont été mesurés en mode "aller-retour" afin de déterminer la dénivelée géométrique entre les points du réseau. Ce qui représente 11 km de portée de nivellement. L'écart de fermeture le plus grand est de 0.4 mm d'un cheminement aller-retour, ce qui peut être considéré comme très bon.

## Station totale

Les mesures réalisées à la station totale constituent la clef de voûte de nombreux réseaux géodésiques. Les observations angulaires et de distances permettent de déterminer avec une grande précision les points de surveillances nécessaires à l'analyse du comportement des ouvrages. Les différentes méthodes de mesures garantissent une détermination fiable des points de contrôle, quelles que soient les situations rencontrées ou les matérialisations utilisées.

Les observations sont effectuées depuis les piliers de mesure du réseau, une visualisation du maillage des observations est visible à la figure C.6. Le temps requis pour l'acquisition complète de l'ensemble des observations

est de trois jours. La technique utilisée sur chaque pilier repose sur l'acquisition par séries de mesures, avec un minimum de deux séries. L'instrument utilisé est un Leica TS60 0.5" l'appareil a préalablement été calibré et contrôlé avant la campagne de mesures.

Les mesures issues de la station totale sont particulièrement sensibles aux phénomènes physiques, qu'ils proviennent de l'atmosphère ou du sous-sol. Les observations angulaires et de distances sont directement influencées par l'indice de réfraction de l'air, noté "n", dont elles doivent corrigées en post-traitement, voir chapitre 3.7.1 et suivants.

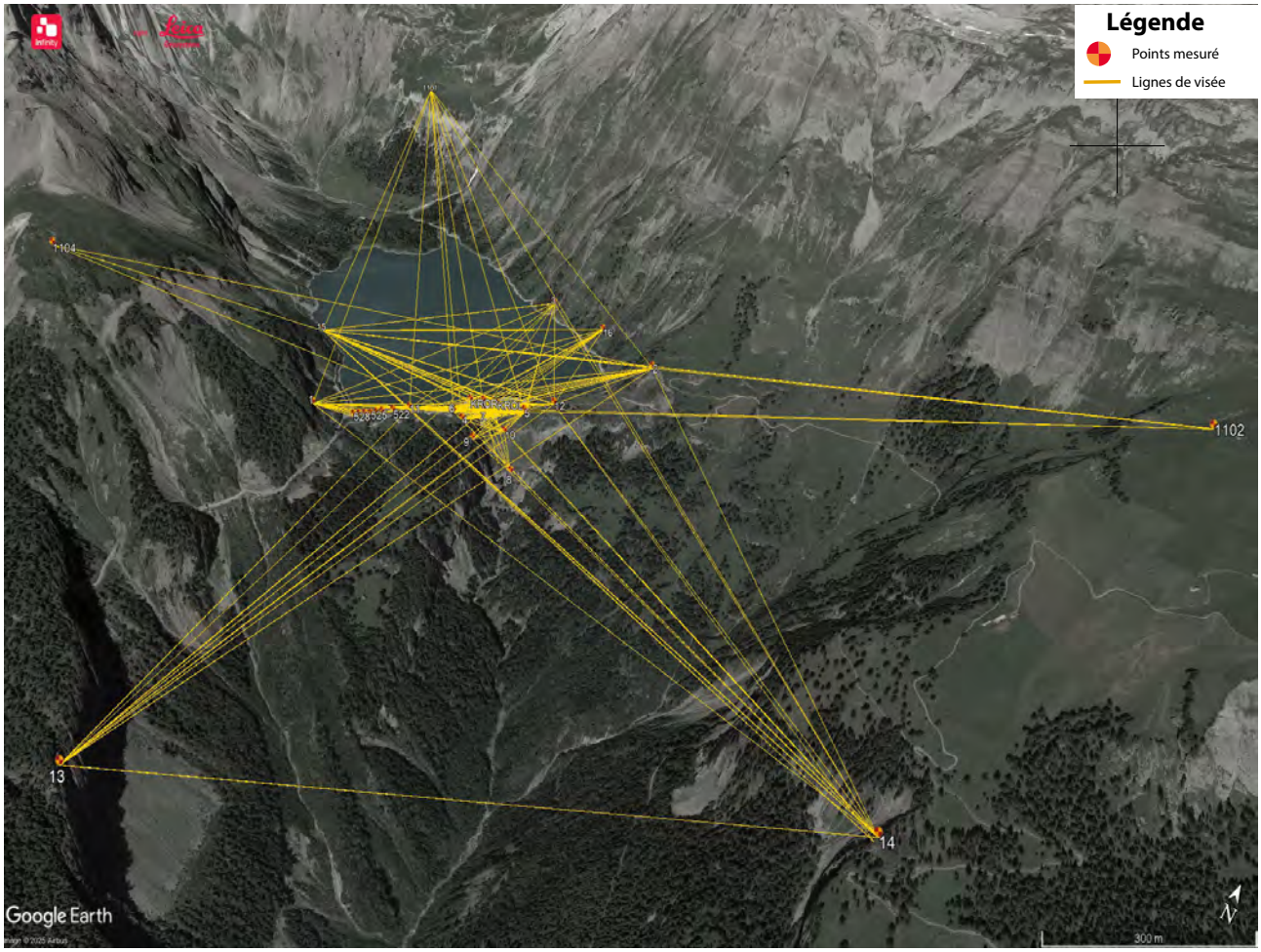



**Fig. C.6** – Vue isométrique des mesures réalisées par station totale [1]

### Précisions des observations

Les mesures ont été réalisées avec la technique des mesures de série, le seuil de validation de qualité des observations est fixé à 3 cc pour les directions horizontales et angles zénithaux. Comme le montre le tableau ci-dessous C.1 la précision a été respectée pour toutes les stations. La valeur de $\sigma r_s$ est inférieure à 3 cc, une imprécision de 3 cc représente un écart de 0.5 mm à 100 m. Pour les angles zénithaux, des stations dépassent le seuil, ceci est dû à la "vibration" de l'atmosphère rendant les mesures éloignées moins précises. La précision sur la moyenne des distances est excellente, toutes les séries sont à 0.1 mm.

Toutes les observations ont été enregistrées sans correction supplémentaire : les données disponibles correspondent donc aux mesures brutes.

1. Visuel réalisé à l'aide de Leica Infinity et Google Earth Pro

| Stations | Nb Points | Nb Tour | $\sigma r_s$[cc] | $\sigma r_r$[cc] | $\sigma d$[mm] | $\sigma \zeta_s$[cc] | $\sigma \zeta_r$[cc] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 15 | 2 | 1.5 | 1.7 | 0.1 | 2.2 | 2.4 |
| 1 | 18 | 2 | 2.5 | 2.0 | 0.1 | 3.5 | 2.9 |
| 2 | 19 | 3 | 1.8 | 1.6 | 0.1 | 3.2 | 2.8 |
| 4 | 19 | 3 | 0.7 | 0.7 | 0.1 | 1.2 | 1.2 |
| 5 | 27 | 3 | 1.3 | 1.0 | 0.1 | 2.2 | 1.8 |
| 5.1 | 27 | 3 | 1.5 | 1.5 | 0.1 | 2.6 | 2.5 |
| 6 | 27 | 3 | 1.6 | 2.4 | 0.1 | 2.7 | 4.1 |
| 7 | 28 | 3 | 1.2 | 1.6 | 0.1 | 2.1 | 2.8 |
| 8 | 7 | 3 | 0.8 | 0.9 | 0.1 | 1.4 | 1.5 |
| 9 | 7 | 3 | 0.7 | 0.5 | 0.1 | 1.2 | 0.9 |
| 10 | 10 | 3 | 1.8 | 1.4 | 0.1 | 3.1 | 2.4 |
| 11 | 25 | 2 | 1.4 | 2.3 | 0.1 | 2.0 | 3.2 |
| 11 | 19 | 3 | 2.0 | 1.7 | 0.1 | 3.4 | 2.9 |
| 12 | 19 | 3 | 1.5 | 2.2 | 0.1 | 2.6 | 3.9 |
| 13 | 13 | 3 | 1.1 | 1.8 | 0.1 | 1.9 | 3.2 |
| 14 | 10 | 3 | 2.0 | 1.8 | 0.1 | 3.4 | 3.2 |
| 15 | 25 | 2 | 2.9 | 4.9 | 0.1 | 4.1 | 6.9 |
| 16 | 12 | 3 | 1.0 | 3.2 | 0.1 | 1.8 | 5.6 |

**Tab. C.1** – Résumé des stations de mesures avec les précisions des mesures de séries [2]

2. $\sigma_s$ : précision pour une observation moyennée ; $\sigma_r$ : précision pour une observation mesurée

# ANNEXE D

# BASE DE DONNÉE JSON DU MONITORING

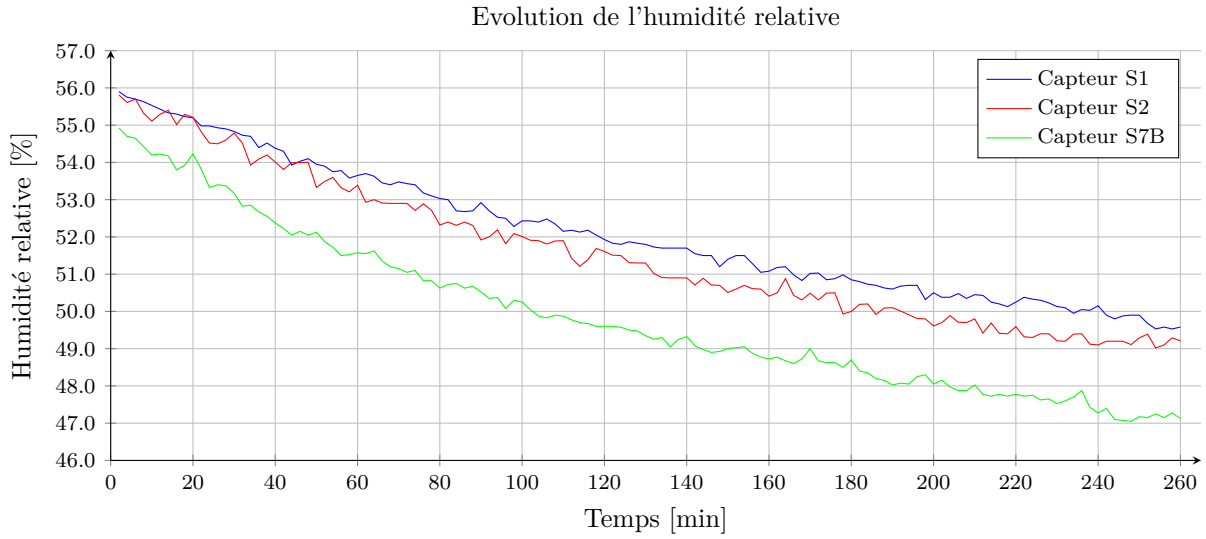

```
{
        "correctedfrommeteo": false,
        "correctedfromprismconstants": true,
        "stationname": "STL1",
        "stationheight": 0,
        "instrumentused": "Leica TS60 I 0.5 R1000 892183",
        "startdate": "2025-09-15T10:24:34.954",
        "usedsequence": "ABCDDCBA",
        "meteocorrection": {
                "dateofmeasurement": "0001-01-01T00:00:00",
                "measurementid": "00000000-0000-0000-0000-000000000000",
                "locationheight": 0,
                "resultingppm": 0,
                "temperature": 0,
                "qfepressure": 0,
                "humidity": 0
        },
        "measurements": [
        {
                "aimedpointid": "b76017ba-e002-4008-b099-d857fe887257",
                "aimedpointname": "M1",
                "pointheight": 0,
                "appliedprismconstant": 17.5,
                "appliedprismname": "GMP104",
                "f1": {
                        "dateofmeasurement": "2025-09-15T10:25:11.268",
                        "success": true,
                        "nboftrials": 0,
                        "inclon": -0.00787,
                        "inclat": -0.00098,
                        "hz": 368.16165,
                        "v": 87.56409,
                        "d3d": 39.9884
                },
                "f2": {
                        "dateofmeasurement": "2025-09-15T10:26:41.992",
                        "success": true,
                        "nboftrials": 0,
                        "inclon": 0.0061,
                        "inclat": 6E-05,
                        "hz": 168.16171,
                        "v": 312.43937,
                        "d3d": 39.9886
                },
                "average": {
                        "dateofmeasurement": "2025-09-15T10:25:56.63",
                        "success": true,
                        "nboftrials": 0,
                        "inclon": 0,
                        "inclat": 0,
                        "hz": 368.161605,
                        "v": 87.56236,
                        "d3d": 39.9885
                }
        },]}
```


**Listing D.1** – Extrait du format du fichier JSON de la base de données du monitoring, pour une mesure complète d'un point. Source : Pareto Solutions Sàrl

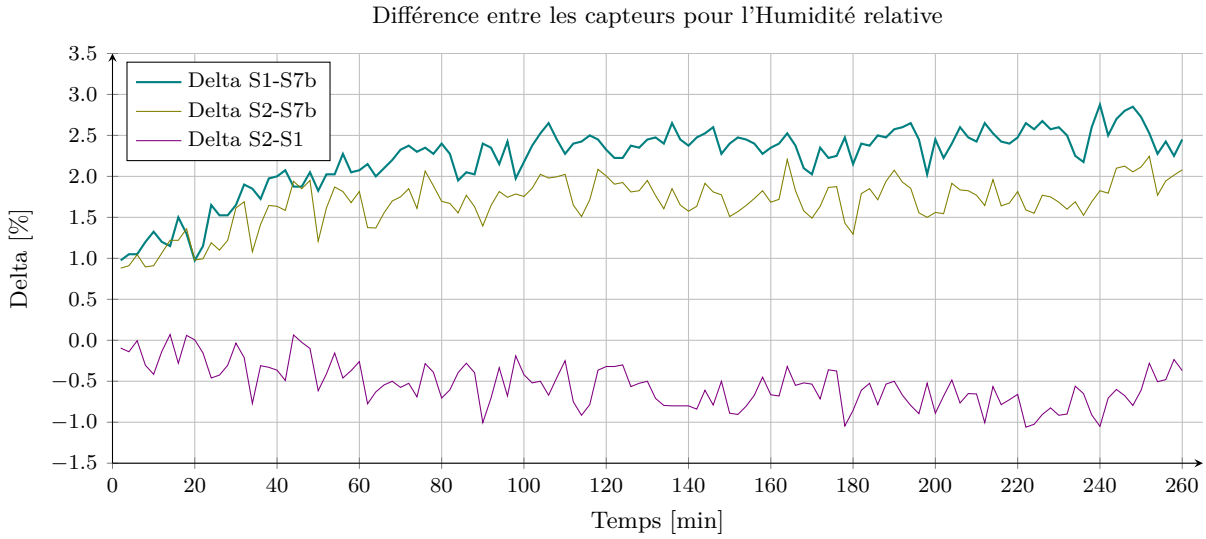
# ANNEXE E

# CALIBRATION DES CAPTEURS MÉTÉOS

## Humidité relative




**Graph. E.1** – Comparaison des capteurs de référence-Humidité relative



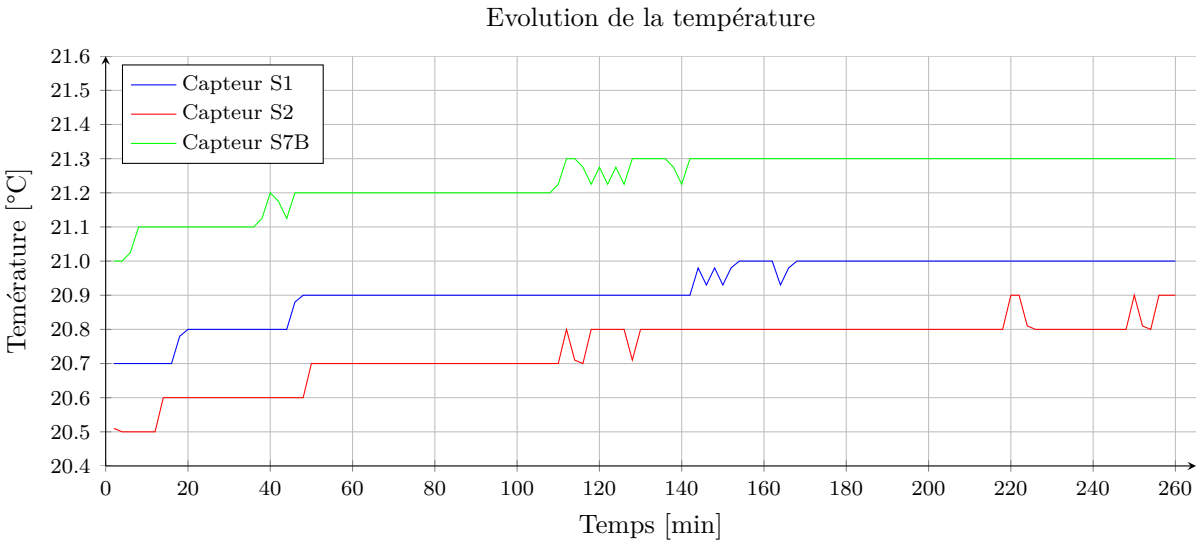

**Graph. E.2** – Delta entre les capteurs de référence-Humidité relative

D'après les graphiques ci-dessus, on constate que le capteur S7b montre un offset et une dérive dans le temps non similaire aux 2 autres, graph. E.1 page A-17. On constate, que lorsque l'humidité change rapidement en 20 min, elle revient proche des valeurs de S1 et S2. Dès que l'humidité redescend, elle ne suit pas la courbe des deux autres.

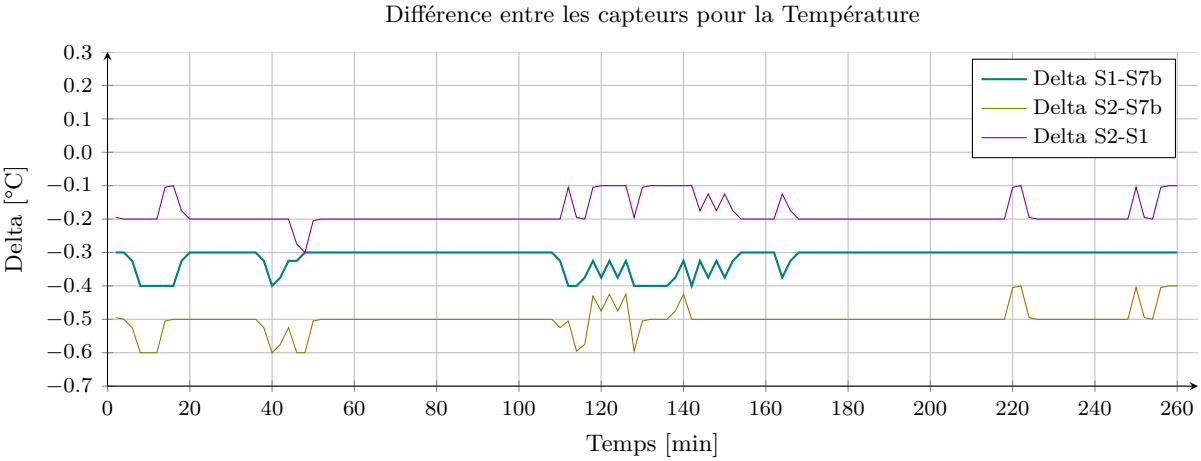
Au démarrage du capteur S7b, la différence est faible 1 % avec S1 et S2 mais s'accentue et se stabilise après

60 min à une moyenne de 2 %, graph. E.2 page A-17. Le Delta entre les capteurs S1 et S2 est compris entre 0.5 et −1 %.

## Température



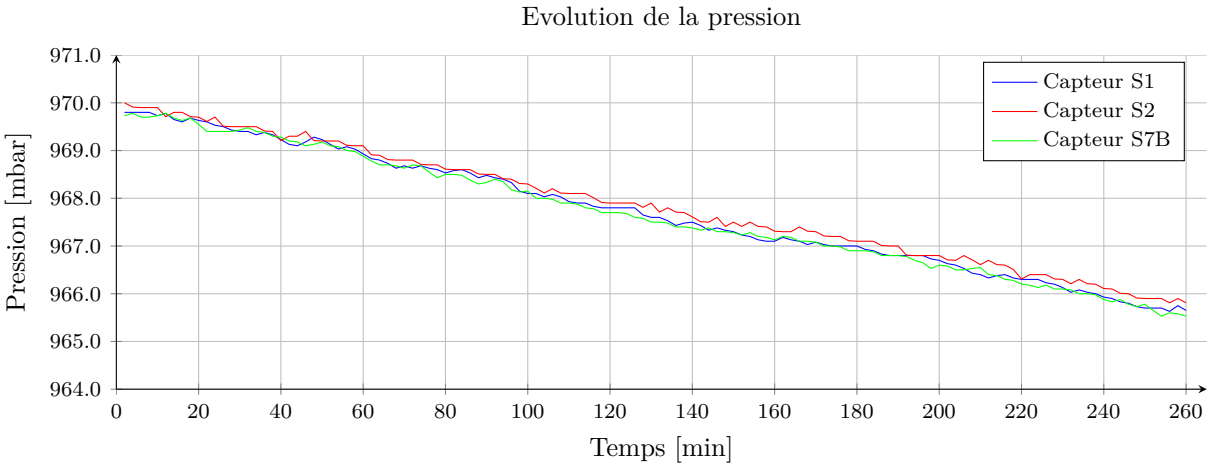

**Graph. E.3** – Comparaison des capteurs de référence - Température



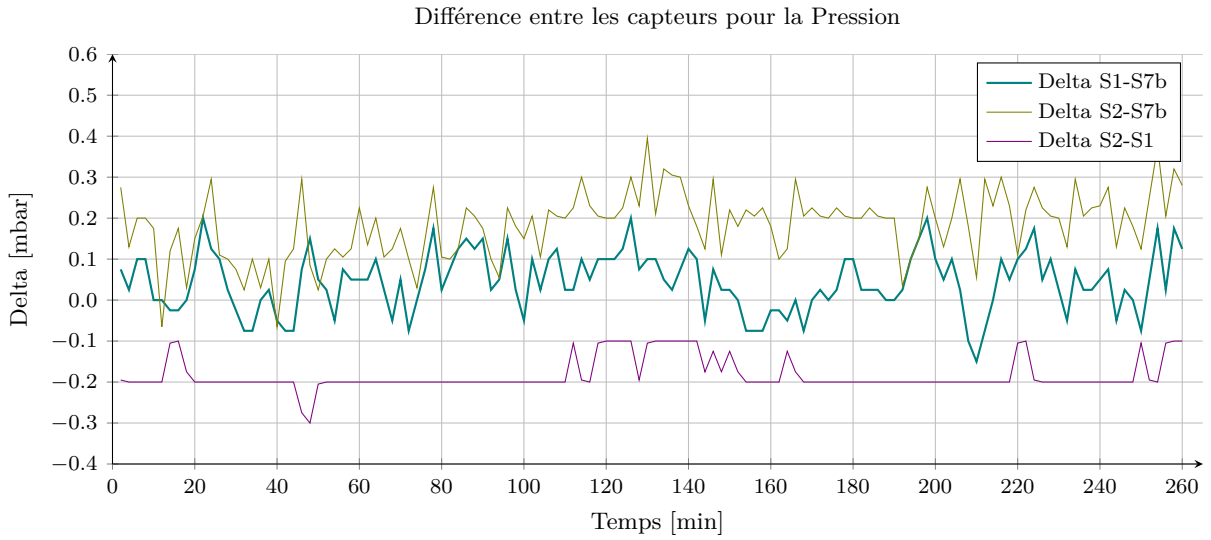

**Graph. E.4** – Delta entre les capteurs de référence - Température

Pour la température une constatation similaire peut être faite, le capteur S7b montre une différence tout juste significative avec S1 et S2. La différence avec S7b est de −0.4 °C en moyenne, soit −0.4 mm à 1 000 m ce qui est non significatif par rapport à la précision du distancemètre qui est de 0.6 mm + 1 ppm. Les capteurs S1 et S2 montrent une très bonne homogénéité entre eux avec une variation non significative de −0.2 °C en moyenne.

## Pression atmosphérique




**Graph. E.5** – Comparaison des capteurs de référence - Pression




**Graph. E.6** – Delta entre les capteurs de référence - Pression

L'imprécision de la mesure de la pression des EASYLog 80 est de ± 1 mbar, la différence entre les trois capteurs est non significative. Les différences maximums enregistrées sont de 0.4 mbar. Même si les écarts sont non significatifs, on constate également que les capteurs S1 et S2 sont très homogènes entre eux et plus stables dans le temps, avec un delta entre ces capteurs de 0.2 mbar.

## Détermination des constantes de calibrations

Au vu des analyses précédentes, on constate que le capteur S7b montre une légère différence avec S1 et S2. Les écarts ne sont pas significatifs, au vu de la précision interne des capteurs. Les écarts les plus significatifs sont sur la température et l'hydrométrie, l'hydrométrie est une composante plus sensible que les autres, il est donc délicat d'affirmer que ce capteur possède un biais par rapport aux deux autres.

Les graphiques des deltas, cf. E.2 - E.4 - E.6 page A-17 - A-18 - A-19, montrent que les pentes sont faibles voir nulles, il y a une bonne cohérence dans le temps entre les capteurs et ils ne dérivent pas dans le temps.

Il est envisageable de calculer les valeurs de référence pour chacun de ces capteurs à l'aide des moyennes sur la durée des observations, puis d'extraire une moyenne globale pour chaque grandeur physique observée.

## Humidité

Les valeurs pour l'humidité sont les suivantes :

| | |
|---|---|
| S1 : | 52.10 % — StDev 1.78 % résidus à la valeur de référence : -0.92 |
| S2 : | 49.88 % — StDev 2.12 % résidus à la valeur de référence : 1.30 |
| S7b : | 51.56 % — StDev 1.94 % résidus à la valeur de référence : -0.38 |
| **Valeur de référence :** | **51.18** % — **StDev 1.16** % |

## Température

Les valeurs pour la température sont les suivantes :

| | |
|---|---|
| S1 : | 20.91 °C StDev 0.09 °C résidus à la valeur de référence : 0.08 |
| S2 : | 20.73 °C StDev 0.09 °C résidus à la valeur de référence : 0.26 |
| S7b : | 21.23 °C StDev 0.08 °C résidus à la valeur de référence : -0.24 |
| **Valeur de référence :** | **20.99** °C **StDev 0.25** °C |

## Pression

Les valeurs pour la pression sont les suivantes :

| | |
|---|---|
| S1 : | 967.71 hPa StDev 1.24 hPa résidus à la valeur de référence : 0.04 |
| S2 : | 967.85 hPa StDev 1.21 hPa résidus à la valeur de référence : -0.10 |
| S7b : | 967.67 hPa StDev 1.24 hPa résidus à la valeur de référence : 0.08 |
| **Valeur de référence :** | **967.75** hPa **StDev 0.09** hPa |

Les 6 autres capteurs qui ont étés mesurés en même temps vont être calés sur les différentes valeurs afin de les rendre tous homogènes entre eux et pouvoir établir un modèle météo cohérent.

## Résultats du calage des capteurs

Le tableau ci-dessous, met en avant les valeurs mesurées durant la calibration. Les deltas montrent une excellente cohérence entre tous les capteurs, ils sont non significatifs, les écarts les plus importants sont sur l'humidité de 2.87 % sur le capteur 3.

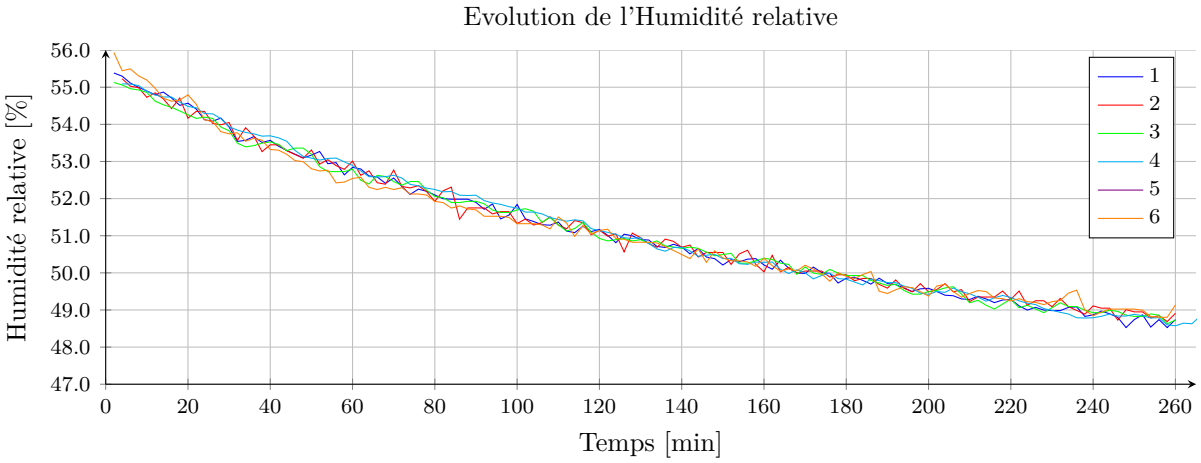
Les différents deltas vont être appliqués aux observations du terrain afin d'assurer la meilleure homogénéité possible entre les capteurs.

| Modèle | Numéro | HR [%] | T [°C] | P [mbar] | $d_{\mathrm{HR}}$ [%] | $d_T$ [°C] | $d_{\mathrm{P}}$ [mbar] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| EASYLog 80 | 1 | 53.90 | 21.01 | 966.31 | -2.72 | -0.02 | 1.44 |
| EASYLog 80 | 2 | 53.23 | 20.96 | 966.24 | -2.05 | 0.03 | 1.51 |
| EASYLog 80 | 3 | 54.05 | 21.42 | 966.32 | -2.87 | -0.43 | 1.43 |
| EASYLog 80 | 4 | 52.44 | 21.18 | 966.31 | -1.26 | -0.19 | 1.44 |
| El-SIE-6+ | 5 | 51.17 | 21.22 | 967.61 | 0.01 | -0.23 | 0.14 |
| Extec Sd700 | 6 | 50.96 | 21.14 | 968.46 | 0.22 | -0.15 | -0.71 |

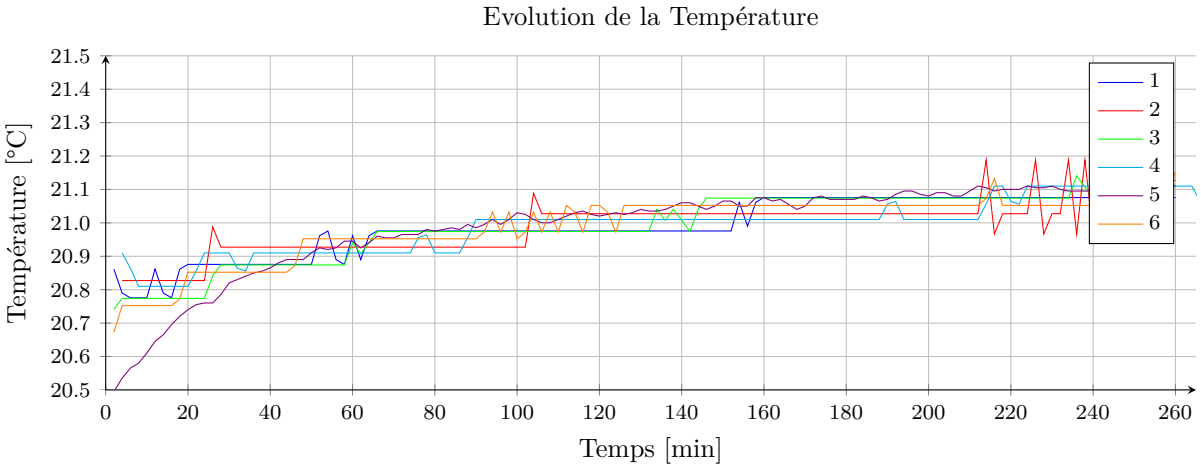
**Tab. E.1** – Valeurs de référence des capteurs sur le site test

Les graphiques ci-dessous mettent en évidence les résultats du calage des capteurs entre eux.

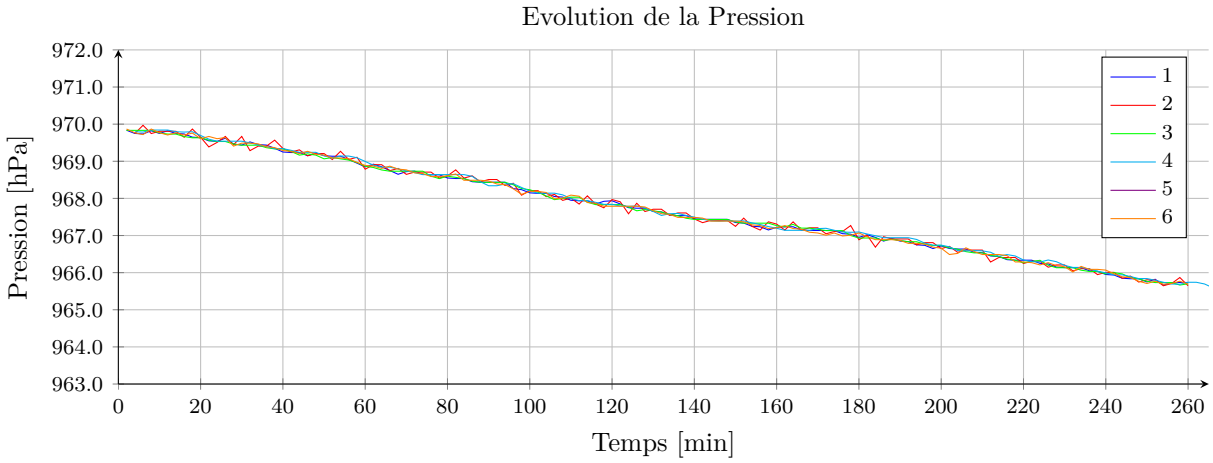
## Visualisation de l'homogénéité des capteurs




**Graph. E.7** – Comparaison des capteurs Humidité relative




**Graph. E.8** – Comparaison des capteurs Température




**Graph. E.9** – Comparaison des capteurs Pression

Les différents graphiques ci-dessus mettent en avant la bonne cohérence entre les différents capteurs. Il est maintenant possible de s'intéresser à l'acquisition des évolutions météorologiques durant la période de mesures.

# ANNEXE F

# LES INDICATEURS D'ANALYSES ET QUALITÉS

- **Sigma 0 global du calcul multi-époque :**

$$\hat{\sigma_0} = \sqrt{\frac{\hat{\mathbf{v}}^T \mathbf{P}\, \hat{\mathbf{v}}}{n-u}} \tag{F.1}$$

Avec :

$n$ : nombre total d'observations
$u$ : nombre total d'inconnues du calcul multi-époque

- **Résidus normalisés**

$$\hat{w_i} = \frac{\hat{v}_i}{\sigma_0 \cdot \sqrt{q_{\hat{v}\hat{v}_{ii}}}} \tag{F.2}$$

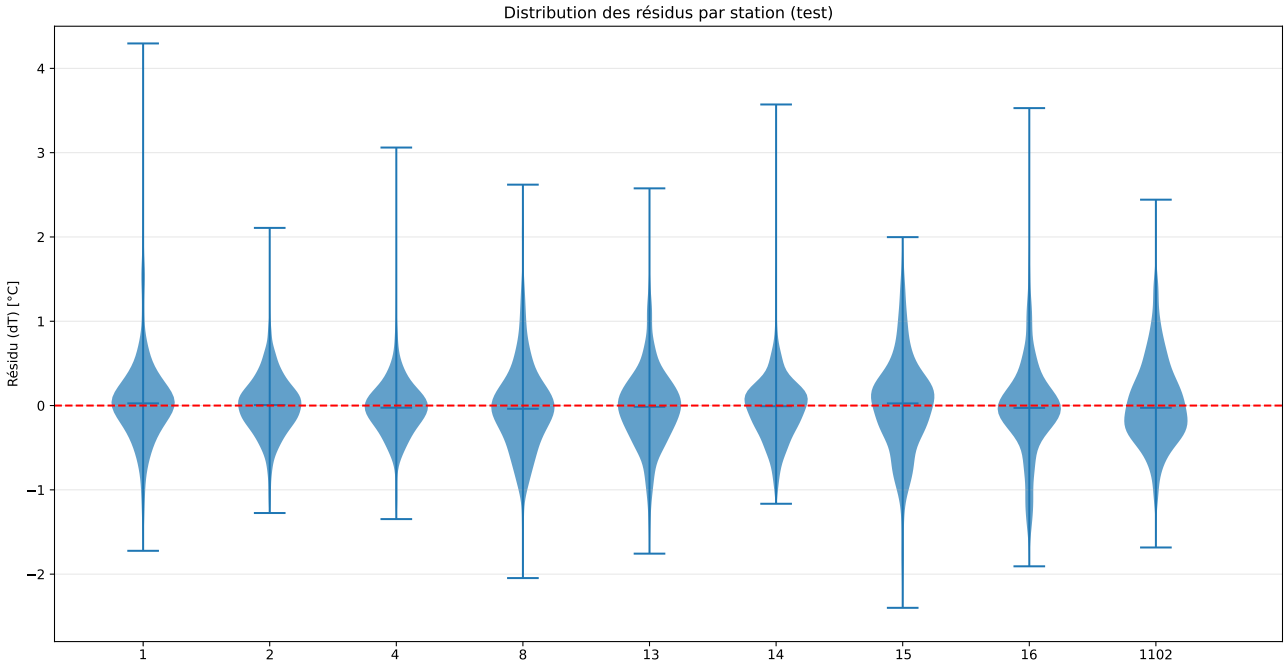
- **Écart-type empirique de chaque époque :**

$$s_{0,j} = \sqrt{\frac{\hat{\mathbf{v}}_j^{\mathrm{T}}\, \mathbf{P}_j\, \hat{\mathbf{v}}_j}{\sum_{\forall j} z_i}} \tag{F.3}$$

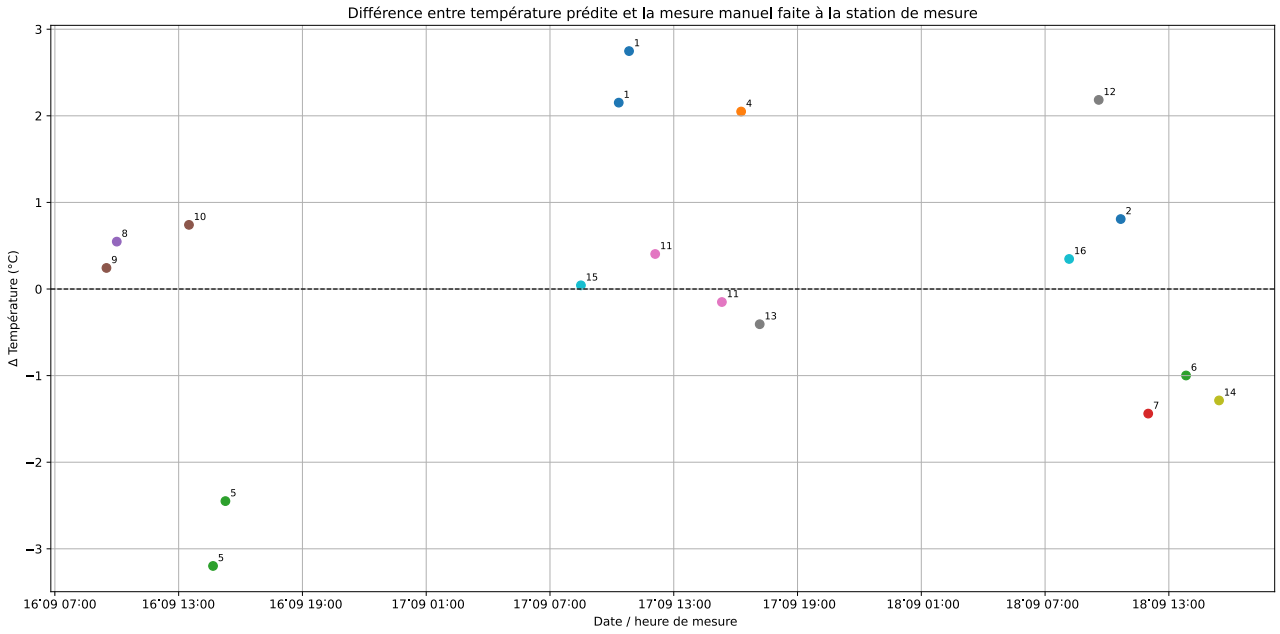
Avec "$j$" l'époque prise en compte.

# ANNEXE G

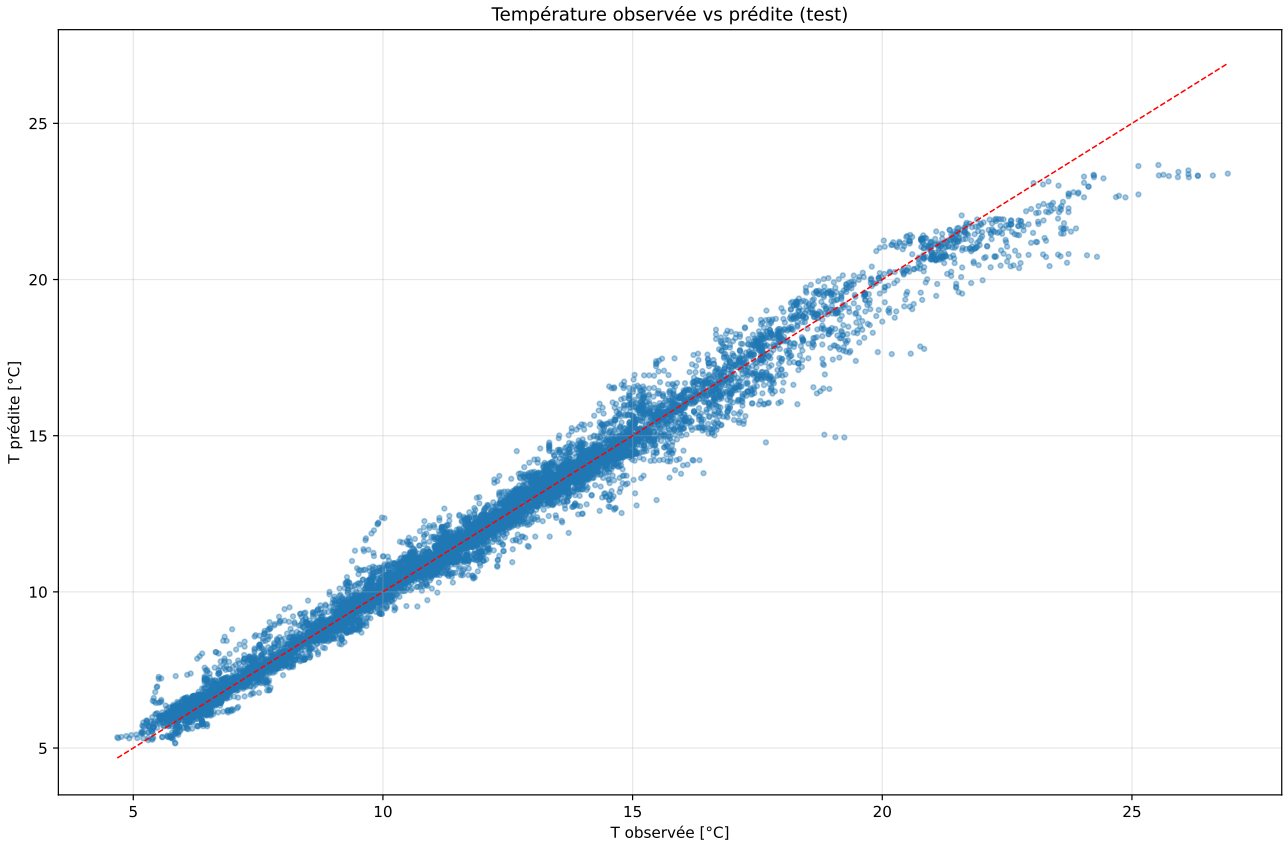
# MISE EN VALEUR DU MODÈLE RANDOM FOREST




**Graph. G.1** – Répartition des écarts entre les valeurs mesurées et prédites à chaque station de mesure, avec information de densité



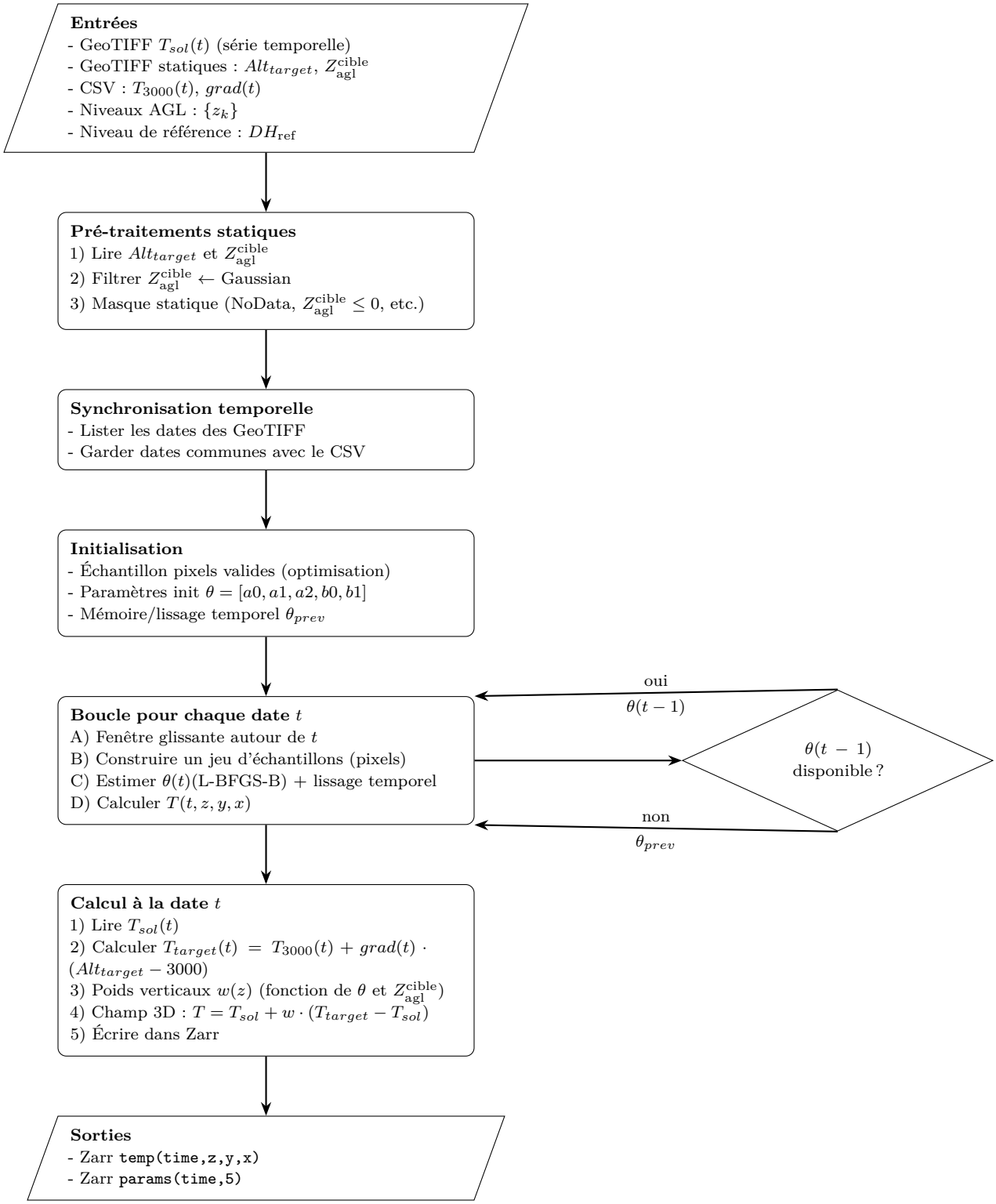

**Graph. G.2** – Résidus entre les mesures aux piliers par Geosat SA et le modèle RF




**Graph. G.3** – Évolution des écarts entre température prédite, mesurée et l'évolution globale de la température

# ANNEXE H

# MODÈLE CONCEPTUEL DU SCRIPT D'OPTIMISATION DU MODÈLE MÉTÉO 4D



# ANNEXE I

# ARCHITECTURE DU FICHIER LANDXML LEICA

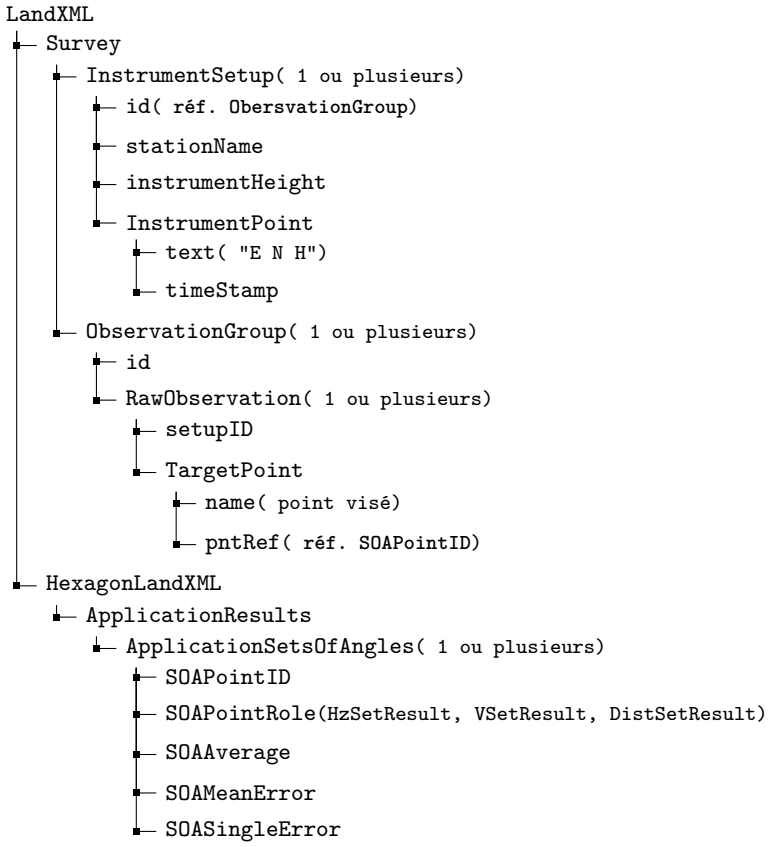
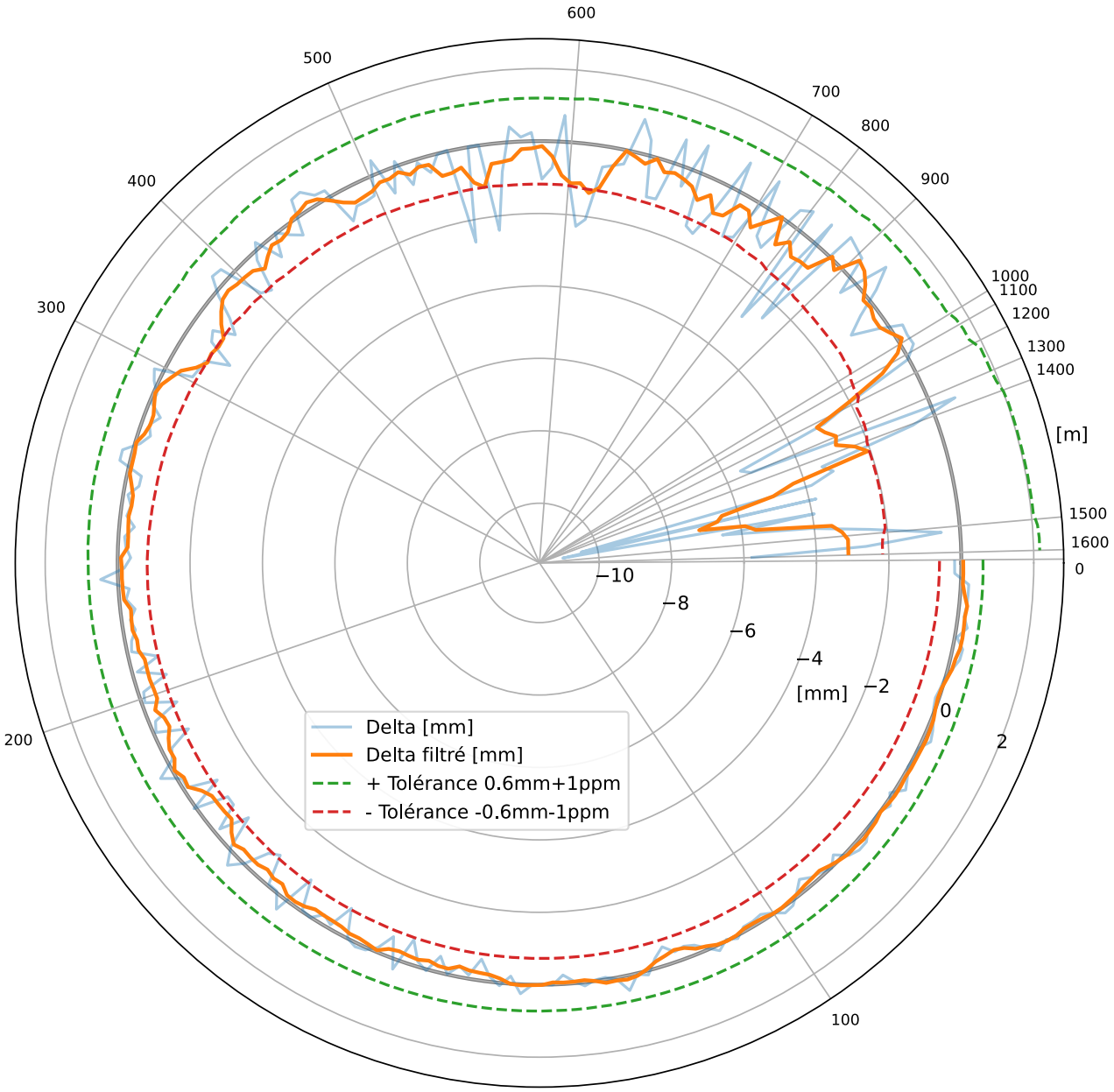



**Fig. I.1** – Architecture du fichier XML de Leica Geosystems avec les clefs relationnelles

# ANNEXE J

# DELTAS DISTANCES AVEC LE MODÈLE 4D

Répartitions des écarts avec le modèle 4D pour toutes les distances avec tolérance.



# ANNEXE K

# COMPENSATION NELCAS MONITORING

# NELCAS

V 1.3.1

Logiciel de traitement d'observations et de contraintes géométriques

---

Rapport du calcul libre 2D+1

MODELE NELCAS - MT

17.01.26 13:01:46

HEIG VD | INSIT Institut d'Ingénierie du territoire

---

# Table des matières


**1 Paramètres globaux** **3**
- 1.1 Fichiers de calcul . . . 3
- 1.2 Paramètres de calcul . . . 3
- 1.3 Modèle stochastique . . . 4

**2 Résultats globaux** **6**
- 2.1 Planimétrie . . . 6
  - 2.1.1 Déroulement du calcul . . . 6
  - 2.1.2 Dénombrement . . . 6
  - 2.1.3 Quotients et écarts-types moyens . . . 7
  - 2.1.4 Graphiques d'indicateurs . . . 8
  - 2.1.5 Liste des plus grands résidus normés $w_i$ . . . 11
  - 2.1.6 Observations écartées . . . 12
  - 2.1.7 Rattachement . . . 13
- 2.2 Altimétrie . . . 14
  - 2.2.1 Déroulement du calcul . . . 14
  - 2.2.2 Dénombrement . . . 14
  - 2.2.3 Quotients et écarts-types moyens . . . 15
  - 2.2.4 Graphiques d'indicateurs . . . 16
  - 2.2.5 Liste des plus grands résidus normés $w_i$ . . . 17
  - 2.2.6 Observations supprimées . . . 18
  - 2.2.7 Rattachement . . . 19

**3 Indicateurs relatifs** **20**
- 3.1 Planimétrie . . . 20
- 3.2 Altimétrie . . . 20

# 1 Paramètres globaux

## 1.1 Fichiers de calcul

| | |
|---|---|
| Fichier des observations | file://D:/_MDT/TM/7_MONITORING/COMPENSATION/MES_MONITO_DW.oxml |
| Fichier des paramètres | file://D:/_MDT/TM/7_MONITORING/COMPENSATION/PARAM.sxml |
| Fichier des points | file://D:/_MDT/TM/7_MONITORING/COMPENSATION/COO_ALL.pxml |
| Fichier résultats | file://D:/_MDT/TM/7_MONITORING/COMPENSATION_DW |

## 1.2 Paramètres de calcul

| | |
|---|---|
| Nom du réseau | MODELE NELCAS - MT |
| Type de détermination | libre |
| Libre : paramètres de Helmert | ! auto !, tE, tN, tH, rotH |
| Modèle mathématique | 2D+1 |
| Nombre d'itérations max. | 30 |
| Condition de convergence [m] | 0.0002 |
| Pré-analyse | non |
| Ajustement robuste | oui |
| Limite $c$ robuste [-] | 2.5 |
| Niveaux de confiance | 95% |
| Résidu normé (wi) limite [-] | 2.576 |
| Risque de deuxième espèce ($\beta$) [%] | 5 |
| Coefficient de réfraction $k$ [-] | 0.130 |
| $\sigma k$ [-] | 0.060 |
| Dev. de la verticale et cotes du géoïde | oui en 2D et en 1D |
| Réduction des distances avec altitudes disponibles uniquement | non |
| Pré-traitement des dénivelées trigo. | Utiliser les coordonnées finales |
| Projection (réduction des distances) | CH |
| Origine E0, N0 [m] | 2599827.1, 1132877.4 |
| Plan de réduction H0 [m] | 1780 |
| Ellipsoïde (demi-grand axe $a$) [m] | 6377397.155 |
| Ellipsoïde (1ère exc. num. au carré $e^2$) [-] | 0.006674372230614 |
| Contrôle de cohérences (avant calcul) | non |
| Analyse de solvabilité | non |
| Traitement des élements de précision | empirique |
| Export vecteur x et matrice Kxx | non |

## 1.3 Modèle stochastique

**Groupes de distances (et ev. inconnues supplémentaires)**

| **dist** | |
|---|---|
| EM d'une distance inclinée | 0.6mm + 1ppm |
| Facteur d'échelle estimé | - |
| Constante d'addition estimée | - |

**Groupes de directions**

| **dir** | |
|---|---|
| EM d'une direction horizontale | 3 cc |
| EM d'un angle zénithal | 3 cc |

**Groupes de centrage**

| **centr** | |
|---|---|
| EM de centrage plani. à la station | 0.1 mm |
| EM de centrage plani. au point visé | 0.5 mm |
| EM l | 0.1 mm |
| EM S | 0.5 mm |

# 2 Résultats globaux

## 2.1 Planimétrie

### 2.1.1 Déroulement du calcul

| | |
|---|---|
| Durée de calcul [s] | 816.0 |
| Nombre d'itérations | 3 |
| Quotient global [-] | 0.34 |

### 2.1.2 Dénombrement

**Observations**

| | conservées | écartées |
|---|---|---|
| Directions polaires | 15312 | 55 |
| Distances projetées | 15363 | 4 |
| Coordonnées GNSS | 0 | 0 |
| Coordonnées systèmes locaux | 0 | 0 |
| Distances simples | 0 | 0 |
| Gisements simples | 0 | 0 |
| Coordonnées simples | 0 | 0 |
| Différences de coord. simples | 0 | 0 |
| Total | 30675 | 59 |

**Contraintes**

| | |
|---|---|
| Alignements | 0 |
| Perpendiculaires | 0 |
| Arcs de cercle | 0 |
| Coordonnées identiques | 0 |
| Total | 3 |

**Inconnues**

| | |
|---|---|
| Coordonnées (E/N) | 21294 |
| Inconnues d'orientation | 1184 |
| Facteurs d'échelle sur les dist. | 0 |
| Constantes d'add. sur les dist. | 0 |
| Translations horiz. de sessions/sys. | 0 |
| Fact. d'éch. horiz. de sessions/sys. | 0 |
| Rot. horiz. de sessions/sys. | 0 |
| Total | 22478 |

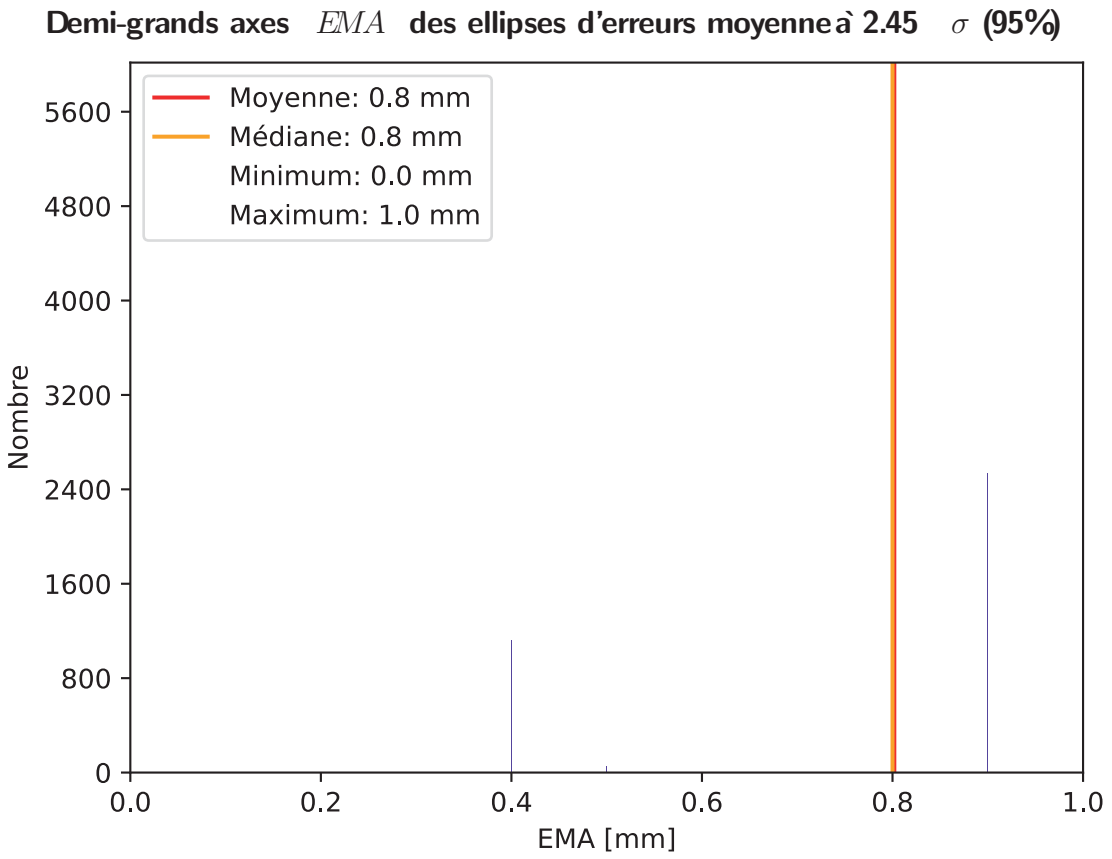
**Réseau**

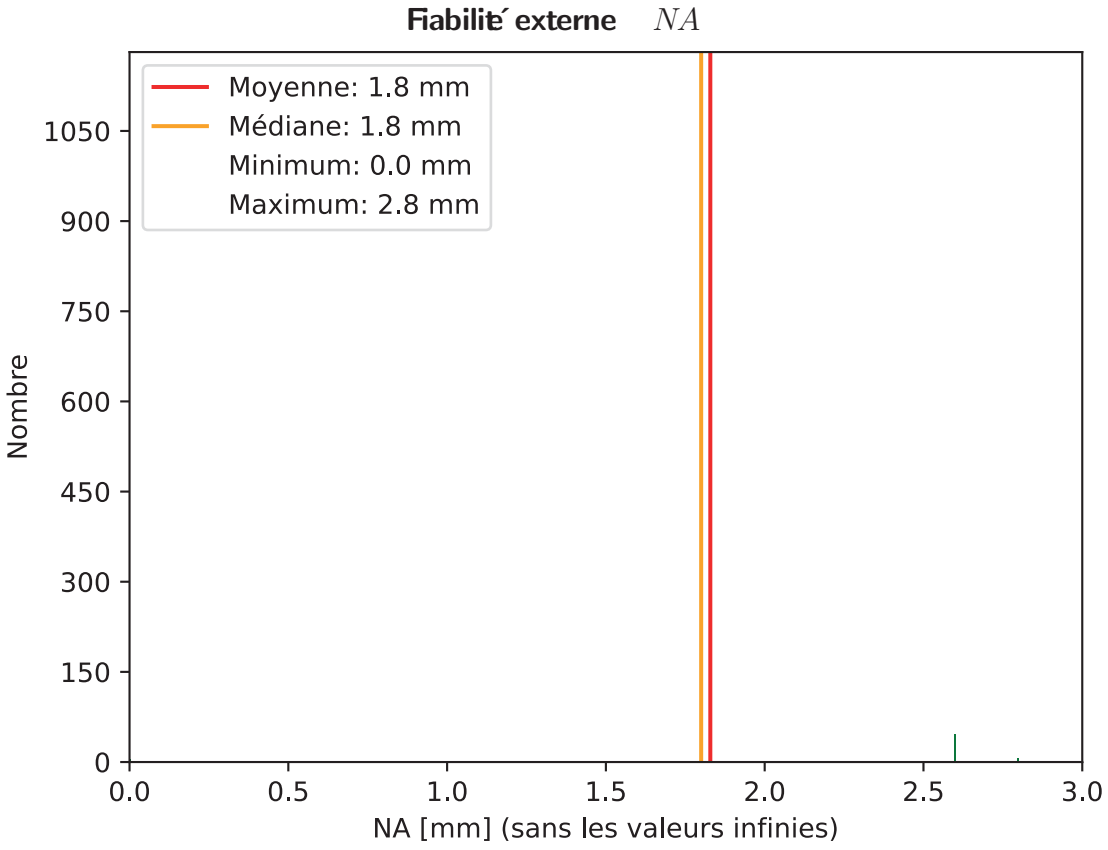
| | |
|---|---|
| Observations | 30675 |
| Contraintes | 3 |
| Inconnues | 22478 |
| Surabondance totale du réseau | 8200 |

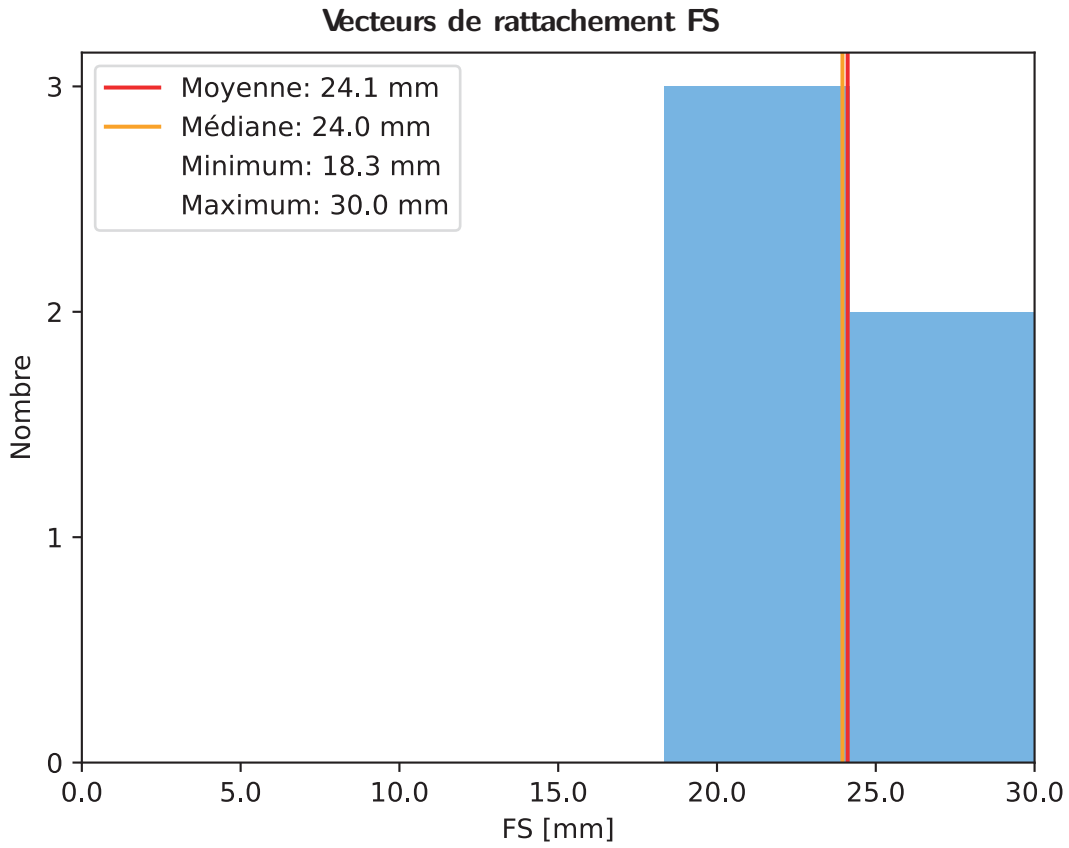
### 2.1.3 Quotients et écarts-types moyens

| Nom du groupe | $\sigma_{moy}$ théorique [cc][mm] | $\sigma_{moy}$ empirique [cc][mm] | quotient [-] | redond. [-] | nb obs. [-] |
|---|---|---|---|---|---|
| **Distances horizontales projetées DP** | | | | | |
| dist | 0.9 | 0.3 | 0.32 | 4486.13 | 15363 |
| **Directions horizontales RI** | | | | | |
| dir | 7.6 | 2.7 | 0.36 | 3713.87 | 15312 |
| **Global** | | | | | |
| toutes les observations planimétriques | - | - | 0.34 | - | - |

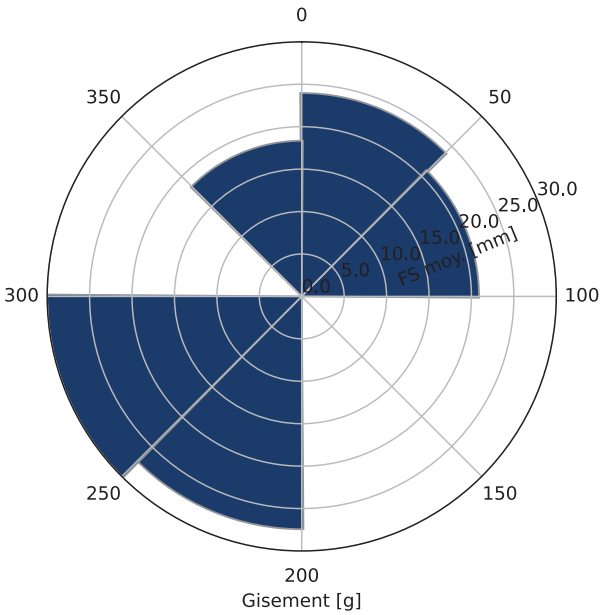
### 2.1.4 Graphiques d'indicateurs



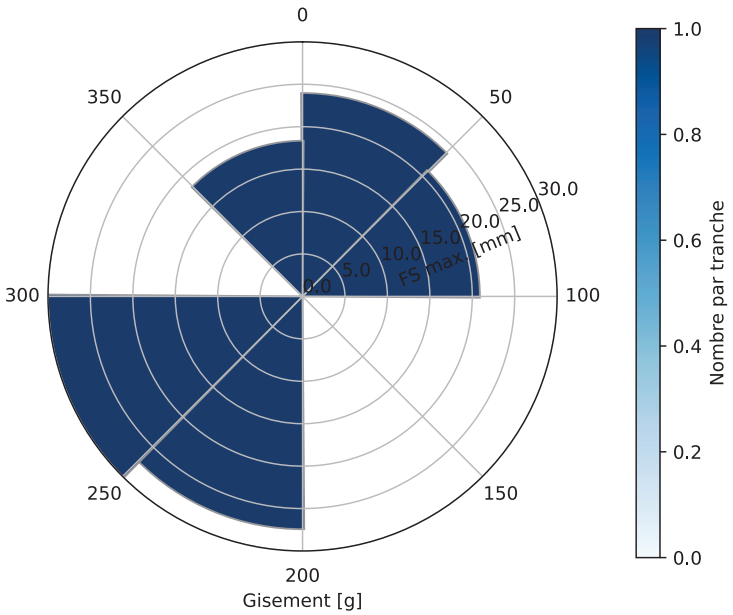



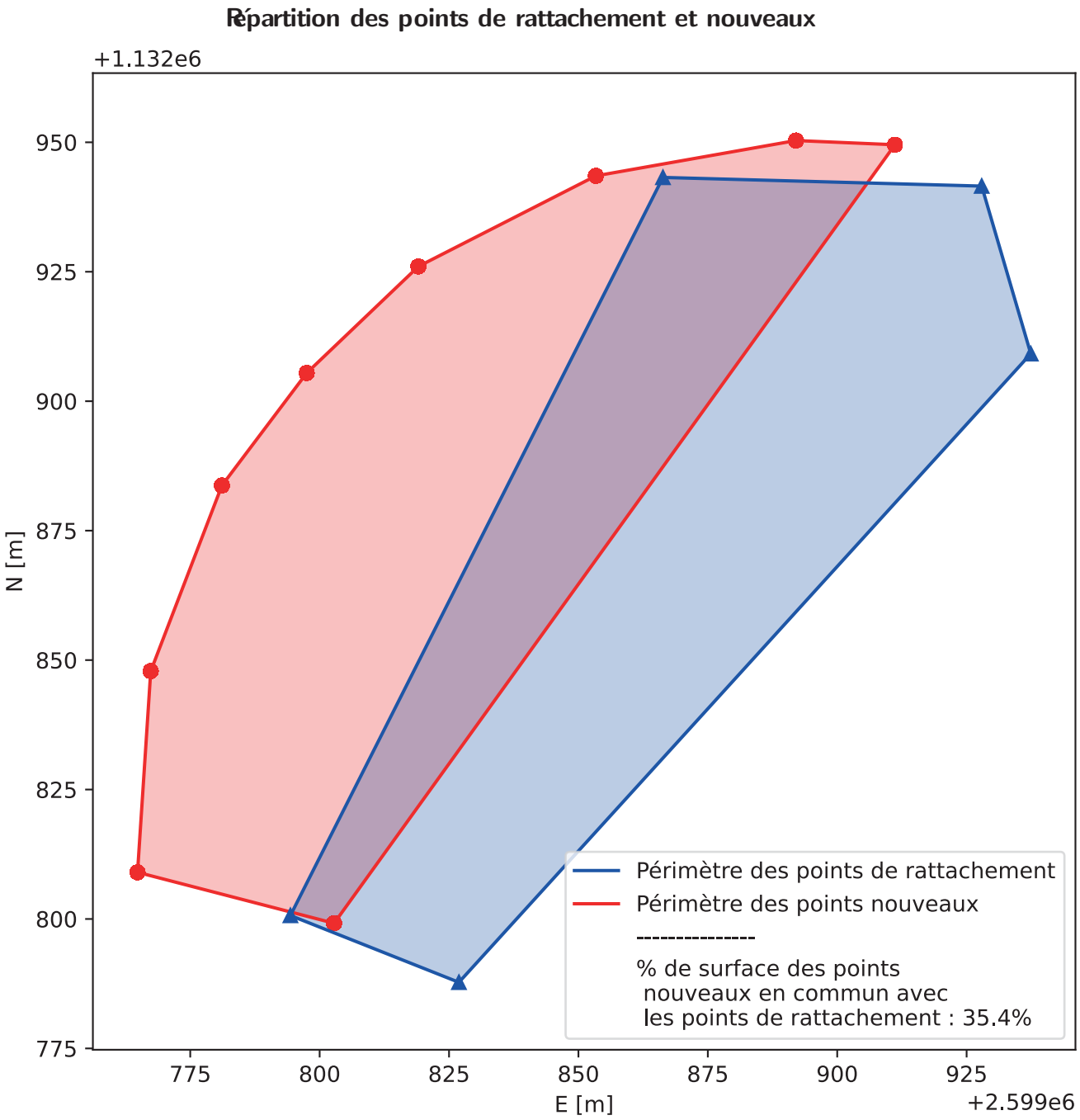



**Directions des vecteurs de rattachement $d_E/d_N$ (normes moyennes par tranches de gisement)**




**Directions des vecteurs de rattachement $d_E/d_N$ (normes maximales par tranches de gisement)**




Répartition des points de rattachement et nouveaux
+1.132e6
950
925
900
875
850
825
800
775
N [m]
775
800
825
850
875
900
925
E [m]
+2.599e6
Périmètre des points de rattachement
Périmètre des points nouveaux
---
% de surface des points
nouveaux en commun avec
les points de rattachement : 35.4%

### 2.1.5 Liste des plus grands résidus normés $w_i$

Nombre de $|w_i| > 2.6$ : 0

| nom parent | type parent | nom de point | type obs. | id obs. [-] | valeur [g] [m] | $\sigma$ [cc] [mm] | $v_i$ [cc] [mm] | $w_i$ [-] | $z_i$ [-] | $l_i$ [cc] [mm] | $g_i$ [cc] [mm] | $v_{i_{lat}}$ [mm] | dist. [m] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 295 | Station | 03 | RI | 7475 | 78.42843 | 3.6 | 5.8 | **2.3** | 0.51 | 21.3 | -11.4 | 1.4 | 157.435 |
| 295 | Station | 05 | RI | 7459 | 108.36805 | 3.5 | -5.4 | **2.2** | 0.51 | 20.8 | 10.6 | -1.5 | 173.829 |
| 1188 | Station | 01 | RI | 30653 | 180.10833 | 12.5 | 18.7 | **1.8** | 0.66 | 65.1 | -28.5 | 0.8 | 26.678 |
| 1187 | Station | 01 | RI | 30627 | 180.10916 | 12.5 | 18.3 | **1.8** | 0.66 | 65.1 | -27.9 | 0.8 | 26.679 |
| 826 | Station | 04 | RI | 21238 | 97.87455 | 3.5 | 5.2 | **1.8** | 0.67 | 18.1 | -7.7 | 1.5 | 189.540 |
| 1184 | Station | 01 | RI | 30549 | 180.10781 | 12.5 | 17.8 | **1.8** | 0.66 | 65.1 | -27.2 | 0.8 | 26.679 |
| 1179 | Station | 01 | RI | 30419 | 180.10835 | 12.5 | 17.3 | **1.7** | 0.66 | 65.1 | -26.4 | 0.7 | 26.678 |
| 585 | Station | 03 | RI | 15011 | 78.42769 | 3.6 | -5.0 | **1.7** | 0.67 | 18.6 | 7.5 | -1.2 | 157.435 |
| 1185 | Station | 01 | RI | 30575 | 180.10840 | 12.5 | 16.9 | **1.7** | 0.66 | 65.1 | -25.7 | 0.7 | 26.679 |
| 1178 | Station | 01 | RI | 30393 | 180.10887 | 12.5 | 16.8 | **1.7** | 0.66 | 65.1 | -25.7 | 0.7 | 26.679 |
| 542 | Station | 04 | RI | 13873 | 97.87112 | 3.5 | 4.7 | **1.6** | 0.67 | 18.1 | -7.0 | 1.4 | 189.540 |
| 1182 | Station | 01 | RI | 30497 | 180.10795 | 12.5 | 16.4 | **1.6** | 0.66 | 65.1 | -25.0 | 0.7 | 26.678 |
| 6 | Station | 03 | RI | 46 | 78.47085 | 3.6 | -4.8 | **1.6** | 0.67 | 18.6 | 7.1 | -1.2 | 157.436 |
| 1183 | Station | 01 | RI | 30523 | 180.10809 | 12.5 | 16.2 | **1.6** | 0.66 | 65.1 | -24.7 | 0.7 | 26.679 |
| 1180 | Station | 01 | RI | 30445 | 180.10813 | 12.5 | 16.1 | **1.6** | 0.66 | 65.1 | -24.6 | 0.7 | 26.678 |
| 1186 | Station | 04 | DP | 30598 | 189.5380 | 0.9 | 1.3 | **1.5** | 0.88 | 4.1 | -1.5 | | |
| 1172 | Station | 05 | RI | 30235 | 108.37377 | 3.5 | -4.4 | **1.5** | 0.67 | 18.1 | 6.6 | -1.2 | 173.828 |
| 1185 | Station | 04 | DP | 30572 | 189.5380 | 0.9 | 1.3 | **1.5** | 0.88 | 4.1 | -1.5 | | |
| 212 | Station | 04 | RI | 5331 | 97.88563 | 3.5 | -4.3 | **1.5** | 0.67 | 18.1 | 6.5 | -1.3 | 189.540 |

### 2.1.6 Observations écartées

| nom parent | type parent | nom de point | type obs. | valeur [g] [m] | $\sigma$ [cc] [mm] | $v_i$ [cc] [mm] | $v_{i_{lat}}$ [mm] | dist. [m] | écarté auto. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 43 | Station | O2 | RI | 363.24650 | 38.0 | -231.1 | -3.1 | 8.572 | |
| 70 | Station | O2 | DP | 8.5722 | 0.8 | -0.3 | | | oui |
| 108 | Station | O2 | RI | 363.16920 | 38.0 | 472.3 | 6.4 | 8.572 | |
| 109 | Station | O2 | RI | 363.16480 | 38.0 | 496.4 | 6.7 | 8.572 | |
| 110 | Station | O2 | RI | 363.18930 | 38.0 | 238.1 | 3.2 | 8.572 | |
| 111 | Station | O2 | RI | 363.18760 | 38.0 | 252.5 | 3.4 | 8.572 | |
| 115 | Station | O2 | RI | 363.23330 | 38.0 | -215.9 | -2.9 | 8.572 | |
| 116 | Station | O2 | RI | 363.26210 | 38.0 | -512.6 | -6.9 | 8.572 | |
| 117 | Station | O2 | RI | 363.26090 | 38.0 | -507.6 | -6.8 | 8.572 | |
| 118 | Station | O2 | RI | 363.23640 | 38.0 | -276.9 | -3.7 | 8.572 | |
| 119 | Station | O2 | RI | 363.26020 | 38.0 | -499.6 | -6.7 | 8.572 | |
| 120 | Station | O2 | RI | 363.25890 | 38.0 | -488.4 | -6.6 | 8.572 | |
| 121 | Station | O2 | RI | 363.26180 | 38.0 | -543.6 | -7.3 | 8.572 | |
| 122 | Station | O2 | RI | 363.26190 | 38.0 | -523.8 | -7.1 | 8.572 | |
| 123 | Station | O2 | RI | 363.25970 | 38.0 | -511.9 | -6.9 | 8.572 | |
| 125 | Station | O2 | RI | 363.17940 | 38.0 | 271.6 | 3.7 | 8.572 | |
| 131 | Station | O2 | RI | 363.22800 | 38.0 | -214.7 | -2.9 | 8.572 | |
| 132 | Station | O2 | RI | 363.22840 | 38.0 | -232.4 | -3.1 | 8.572 | |
| 134 | Station | O2 | RI | 363.22680 | 38.0 | -217.8 | -2.9 | 8.572 | |
| 135 | Station | O2 | RI | 363.22650 | 38.0 | -215.2 | -2.9 | 8.572 | |
| 136 | Station | O2 | RI | 363.22690 | 38.0 | -218.8 | -2.9 | 8.572 | |
| 137 | Station | O2 | RI | 363.24800 | 38.0 | -429.3 | -5.8 | 8.572 | |
| 139 | Station | O2 | RI | 363.22640 | 38.0 | -214.3 | -2.9 | 8.572 | |
| 161 | Station | O2 | RI | 363.15600 | 38.0 | 435.9 | 5.9 | 8.572 | |
| 162 | Station | O2 | RI | 363.15190 | 38.0 | 478.6 | 6.4 | 8.572 | |
| 163 | Station | O2 | RI | 363.14760 | 38.0 | 526.0 | 7.1 | 8.572 | |
| 164 | Station | O2 | RI | 363.14570 | 38.0 | 539.1 | 7.3 | 8.572 | |
| 165 | Station | O2 | RI | 363.17100 | 38.0 | 295.6 | 4.0 | 8.572 | |
| 166 | Station | O2 | RI | 363.17070 | 38.0 | 282.9 | 3.8 | 8.572 | |
| 167 | Station | O2 | RI | 363.14300 | 38.0 | 554.0 | 7.5 | 8.572 | |
| 168 | Station | O2 | RI | 363.17230 | 38.0 | 265.3 | 3.6 | 8.572 | |
| 169 | Station | O2 | RI | 363.17020 | 38.0 | 276.2 | 3.7 | 8.572 | |
| 170 | Station | O2 | RI | 363.17110 | 38.0 | 258.0 | 3.5 | 8.572 | |
| 171 | Station | O2 | RI | 363.14730 | 38.0 | 502.5 | 6.8 | 8.572 | |
| 172 | Station | O2 | RI | 363.14730 | 38.0 | 481.0 | 6.5 | 8.572 | |
| 173 | Station | O2 | RI | 363.14750 | 38.0 | 488.8 | 6.6 | 8.572 | |
| 174 | Station | O2 | RI | 363.14760 | 38.0 | 484.6 | 6.5 | 8.572 | |
| 175 | Station | O2 | RI | 363.17150 | 38.0 | 236.4 | 3.2 | 8.572 | |
| 176 | Station | O2 | RI | 363.16680 | 38.0 | 276.6 | 3.7 | 8.572 | |
| 718 | Station | O2 | RI | 363.14990 | 38.0 | 232.1 | 3.1 | 8.572 | |
| 719 | Station | O2 | RI | 363.12510 | 38.0 | 476.5 | 6.4 | 8.572 | |
| 720 | Station | O2 | RI | 363.12410 | 38.0 | 488.8 | 6.6 | 8.572 | |
| 721 | Station | O2 | RI | 363.12460 | 38.0 | 480.0 | 6.5 | 8.572 | |
| 722 | Station | O2 | RI | 363.12370 | 38.0 | 495.7 | 6.7 | 8.572 | |
| 723 | Station | O2 | RI | 363.12340 | 38.0 | 487.3 | 6.6 | 8.572 | |
| 724 | Station | O2 | RI | 363.12830 | 38.0 | 453.4 | 6.1 | 8.572 | |
| 724 | Station | O2 | DP | 8.5721 | 0.8 | 0.3 | | | oui |
| 725 | Station | O2 | RI | 363.13180 | 38.0 | 411.5 | 5.5 | 8.572 | |
| 725 | Station | O2 | DP | 8.5719 | 0.8 | 0.2 | | | oui |
| 726 | Station | O2 | RI | 363.13460 | 38.0 | 388.5 | 5.2 | 8.572 | |
| 726 | Station | O2 | DP | 8.5721 | 0.8 | 0.2 | | | oui |
| 754 | Station | O2 | RI | 363.12380 | 38.0 | 493.9 | 6.7 | 8.572 | |
| 755 | Station | O2 | RI | 363.12380 | 38.0 | 490.8 | 6.6 | 8.572 | |
| 756 | Station | O2 | RI | 363.12400 | 38.0 | 483.8 | 6.5 | 8.572 | |
| 757 | Station | O2 | RI | 363.12420 | 38.0 | 491.4 | 6.6 | 8.572 | |
| 758 | Station | O2 | RI | 363.12400 | 38.0 | 491.5 | 6.6 | 8.572 | |
| 759 | Station | O2 | RI | 363.12340 | 38.0 | 502.6 | 6.8 | 8.572 | |
| 763 | Station | O2 | RI | 363.14980 | 38.0 | 238.6 | 3.2 | 8.572 | |
| 1050 | Station | O2 | RI | 363.15300 | 38.0 | 219.7 | 3.0 | 8.572 | |

### 2.1.7 Rattachement

Type de détermination : libre
Libre : paramètres de Helmert 2D : ! auto !, tE, tN, rotH

| nom du point | elem. plani. [-] | FS [mm] | E réf. [m] | N réf. [m] | E libre [m] | N libre [m] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| O1 | 2368 | 27.4 | 2599826.9210 | 1132787.7910 | 2599826.9091 | 1132787.7663 |
| O2 | 2309 | 30.0 | 2599794.3730 | 1132800.6940 | 2599794.3515 | 1132800.6731 |
| O3 | 2354 | 18.3 | 2599866.3310 | 1132943.1980 | 2599866.3299 | 1132943.2163 |
| O4 | 2364 | 24.0 | 2599927.9000 | 1132941.5240 | 2599927.9158 | 1132941.5420 |
| O5 | 2364 | 20.8 | 2599937.3790 | 1132909.1520 | 2599937.3977 | 1132909.1613 |

## 2.2 Altimétrie

### 2.2.1 Déroulement du calcul

| | |
|---|---|
| Durée de calcul [s] | 118.2 |
| Nombre d'itérations | 3 |
| Quotient global [-] | 0.49 |

### 2.2.2 Dénombrement

**Observations**

| | conservées | *écartées* |
|---|---|---|
| Dénivelées | 15363 | 4 |
| Altitudes GNSS | 0 | 0 |
| Altitudes systèmes locaux | 0 | 0 |
| Dénivelées simples | 0 | 0 |
| Altitudes simples | 0 | 0 |
| Total | 15363 | 4 |

**Contraintes**

| | | |
|---|---|---|
| Altitudes identiques | 0 | 0 |
| Total | 0 | 0 |

**Inconnues**

| | |
|---|---|
| Altitudes (H) | 10647 |
| Translations vert. de sessions/sys. | 0 |
| Fact. déch. vert. de sessions/sys. | 0 |
| Total | 10647 |

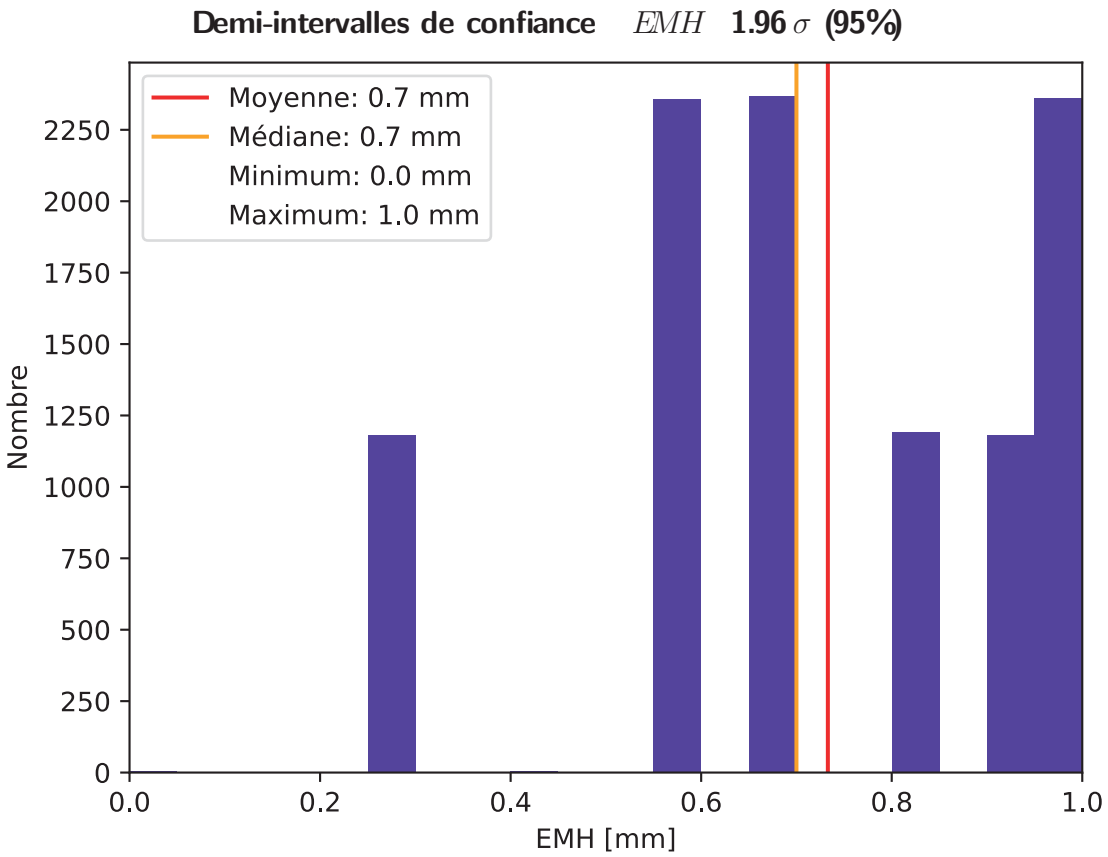
**Réseau**

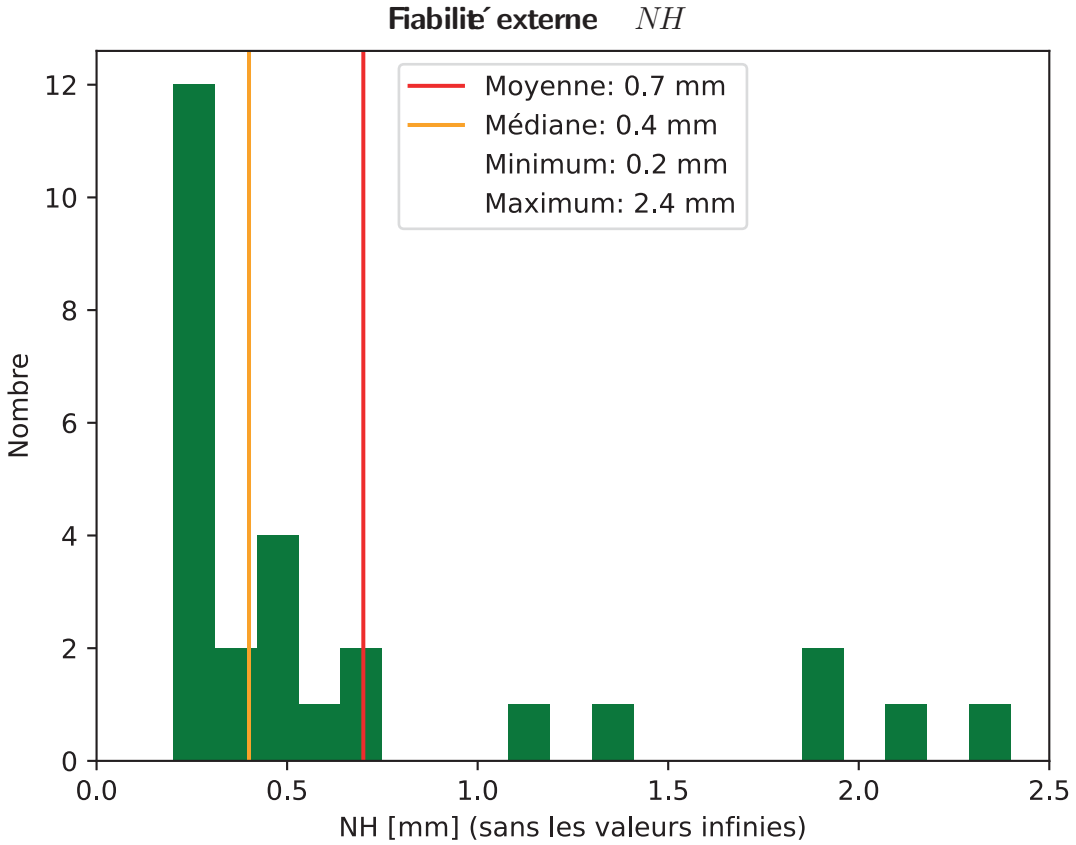
| | |
|---|---|
| Observations | 15363 |
| Contraintes | 0 |
| Inconnues | 10647 |
| Surabondance totale du réseau | 4717 |

### 2.2.3 Quotients et écarts-types moyens

| Nom du groupe lié | $\sigma_{moy}$ a priori [cc][mm] | $\sigma_{moy}$ empirique [cc][mm] | quotient [-] | redond. [-] | nb obs. [-] |
|---|---|---|---|---|---|
| **Dénivelées DH** | | | | | |
| dir | 0.8 | 0.4 | 0.49 | 4717.00 | 15363 |
| **Global** | | | | | |
| toutes les observations altimétriques | - | - | 0.49 | - | - |

### 2.2.4 Graphiques d'indicateurs



### 2.2.5 Liste des plus grands résidus normés $w_i$

Nombre de $|w_i| >$ **2.6** : 0

| nom parent | type parent | nom de point | type obs. | id obs. [+10 $^6$] | valeur [m] | $\sigma$ [mm] | $v_i$ [mm] | $w_i$ [-] | $z_i$ [-] | $l_i$ [mm] | $g_i$ [mm] | dist. [m] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 69 | Station | 04 | DH | 832 | 10.8761 | 1.0 | 2.3 | **2.4** | 0.91 | 4.4 | -2.5 | 189.540 |
| 70 | Station | 04 | DH | 845 | 10.8760 | 1.0 | 2.2 | **2.4** | 0.86 | 4.5 | -2.6 | 189.540 |
| 303 | Station | 04 | DH | 3848 | 10.8762 | 1.0 | 2.2 | **2.3** | 0.91 | 4.4 | -2.4 | 189.540 |
| 304 | Station | 04 | DH | 3861 | 10.8763 | 1.0 | 2.2 | **2.3** | 0.91 | 4.4 | -2.4 | 189.540 |
| 295 | Station | 03 | DH | 3756 | -28.6833 | 0.9 | -1.9 | **2.3** | 0.88 | 4.1 | 2.2 | 157.435 |
| 116 | Station | 02 | DH | 1445 | 0.3758 | 0.5 | 0.9 | **2.2** | 0.64 | 2.6 | -1.4 | 8.572 |
| 579 | Station | 04 | DH | 7436 | 10.8765 | 1.0 | 2.1 | **2.2** | 0.91 | 4.4 | -2.3 | 189.540 |
| 1151 | Station | 04 | DH | 14869 | 10.8765 | 1.0 | 2.0 | **2.1** | 0.91 | 4.4 | -2.2 | 189.539 |
| 572 | Station | 05 | DH | 7346 | 9.7678 | 1.0 | -2.0 | **2.1** | 0.91 | 4.4 | 2.2 | 173.829 |
| 301 | Station | 04 | DH | 3822 | 10.8764 | 1.0 | 2.0 | **2.1** | 0.91 | 4.4 | -2.2 | 189.540 |
| 1156 | Station | 04 | DH | 14934 | 10.8768 | 1.0 | 2.0 | **2.1** | 0.91 | 4.4 | -2.2 | 189.539 |
| 573 | Station | 04 | DH | 7358 | 10.8765 | 1.0 | 2.0 | **2.1** | 0.91 | 4.4 | -2.2 | 189.540 |
| 856 | Station | 04 | DH | 11034 | 10.8767 | 1.0 | 2.0 | **2.1** | 0.91 | 4.4 | -2.2 | 189.540 |
| 300 | Station | 04 | DH | 3809 | 10.8766 | 1.0 | 1.9 | **2.0** | 0.91 | 4.4 | -2.1 | 189.540 |
| 1157 | Station | 04 | DH | 14947 | 10.8767 | 1.0 | 1.9 | **2.0** | 0.91 | 4.4 | -2.1 | 189.539 |
| 754 | Station | 02 | DH | 9711 | 0.3787 | 0.5 | -0.8 | **2.0** | 0.64 | 2.6 | 1.3 | 8.572 |
| 1148 | Station | 04 | DH | 14830 | 10.8767 | 1.0 | 1.9 | **2.0** | 0.91 | 4.4 | -2.1 | 189.539 |
| 126 | Station | 03 | DH | 1581 | -28.6837 | 0.9 | -1.7 | **2.0** | 0.89 | 4.0 | 1.9 | 157.435 |
| 922 | Station | 04 | DH | 11892 | 10.8767 | 1.0 | 1.9 | **1.9** | 0.91 | 4.4 | -2.0 | 189.540 |

### 2.2.6 Observations supprimées

| nom parent | type parent | nom de point | type obs. | valeur [m] | $\sigma$ [mm] | $v_i$ [mm] | dist. [m] | écarté auto. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 70 | Station | 02 | DH | 0.3770 | 0.5 | 0.6 | 8.572 | |
| 724 | Station | 02 | DH | 0.3795 | 0.5 | 2.1 | 8.572 | |
| 725 | Station | 02 | DH | 0.3798 | 0.5 | 2.4 | 8.572 | |
| 726 | Station | 02 | DH | 0.3801 | 0.5 | 2.6 | 8.572 | |

### 2.2.7 Rattachement

Type de détermination : libre
Libre : paramètres de Helmert 1D :! auto !, tH

| nom du point | elem. alti. [-] | DH [mm] | H réf. [m] | H libre [m] |
|---|---|---|---|---|
| 01 | 1184 | -0.1 | 1766.1635 | 1766.1634 |
| 02 | 1180 | 0.1 | 1770.6370 | 1770.6371 |
| 03 | 1177 | -1.4 | 1741.5759 | 1741.5745 |
| 04 | 1182 | 0.7 | 1781.1382 | 1781.1389 |
| 05 | 1182 | 0.6 | 1780.0249 | 1780.0255 |

# ANNEXE L

# RÉSUMÉ CALCUL BERNESE

# GNSS analysis of campaign HEIGVD25

## Content of extended summary

**Protocol version 2.9**

**Information generated at: 30-Sep-2025 21:01:49**

[Processing options](#)

[Rinex overview: Original format versions](#)

[Rinex overview: Observation type selection](#)

[Rinex overview: RNXSMT Statistics](#)

[Rinex overview: Receiver and antenna types](#)

[Rinex overview: Antenna eccentricities](#)

[Rinex overview: Quality check using TEQC](#)

[Rinex overview: Skyplots](#)

[Orbit types](#)

[Orbit fits](#)

[Software version and general models](#)

[Antenna phase center model](#)

[Map (map.geo.admin)](#)

[Map (google)](#)

[Baseline selections and formal errors of horizontal positions](#)

[Station abbreviation table](#)

[Baseline properties](#)

[Summary of phase preprocessing (program MAUPRP)](#)

[Phase L3 residuals per baseline and satellite](#)

[Ambiguity resolution summary](#)

[Inter system biases](#)

[ADDNEQ output summary](#)

[GPSEST output files](#)

[Session results: Formal errors of horizontal positions](#)

[Session results: Protocol files](#)

[Session results: Kinematic coordinates](#)

[Session comparisons: Final solution, different sessions](#)

[Session comparisons: Solution type F1 - a priori coordinates](#)

[Session comparisons: Solution type F1 - F1S](#)

[Final results: Formal errors of horizontal positions (plot)](#)

[Final results: Unscaled formal 3D errors (table)](#)

[Coordinates: LV95 reference frame realisation](#)

[Coordinates: Cartesian coordinates](#)

[Coordinates: Projection coordinates (ellip. heights)](#)

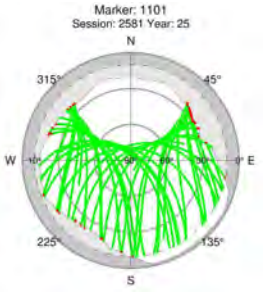
[Coordinates: Projection coordinates (orthometric heights)](#)

↓

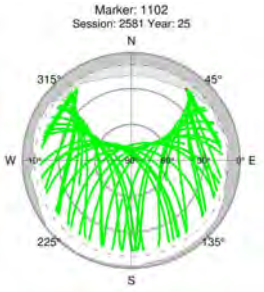
# Rinex overview: Skyplots

Skyplots (green: L1+L2 observations, red: L2 missing); click on the graphic in order to increase the size

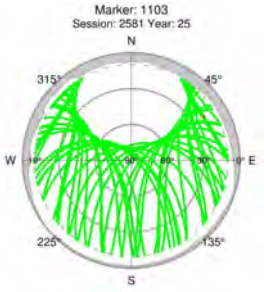
Session: 2580, Year: 25



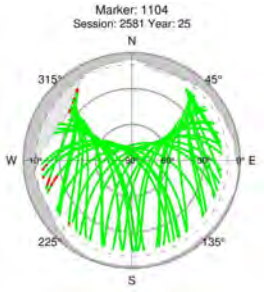
...more details



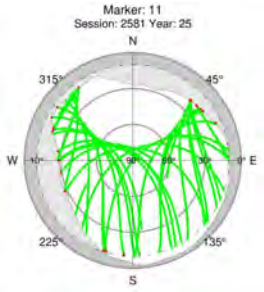
...more details



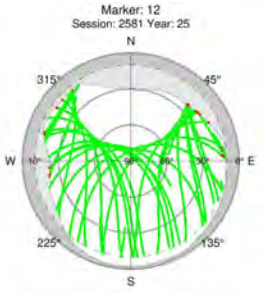
...more details



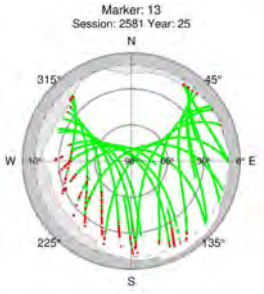
...more details



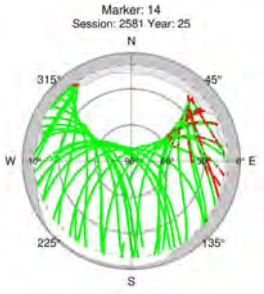
...more details



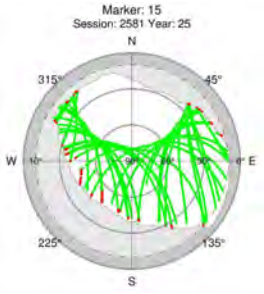
...more details



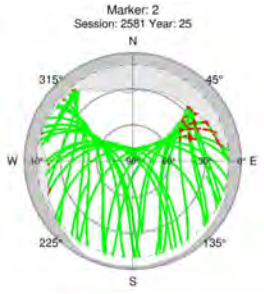
...more details



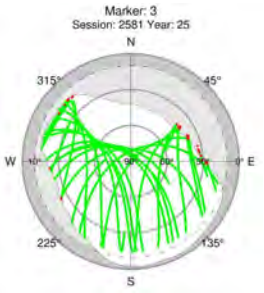
...more details



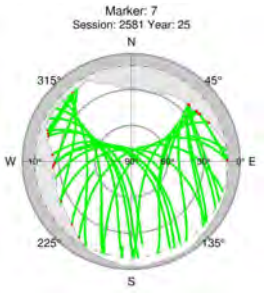
...more details



...more details

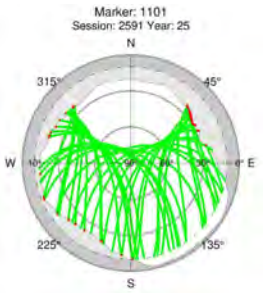


...more details

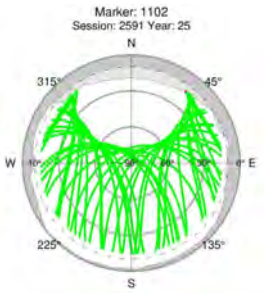


...more details

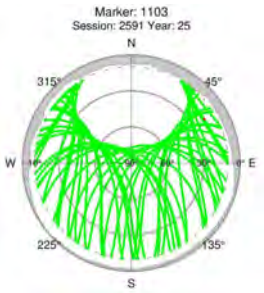
Session: 2590, Year: 25



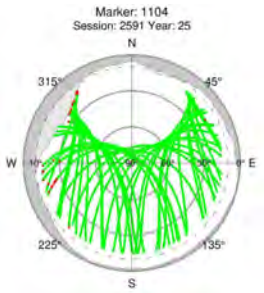
...more details



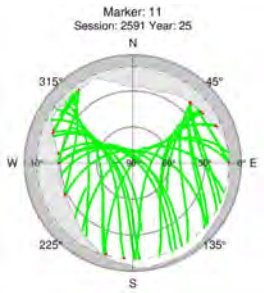
...more details



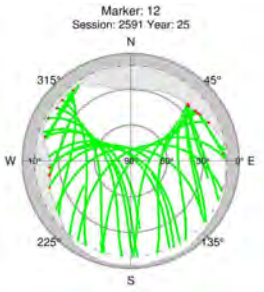
...more details



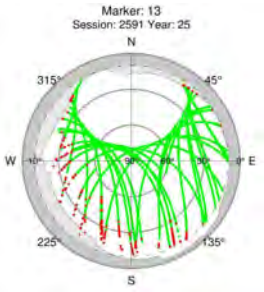
...more details



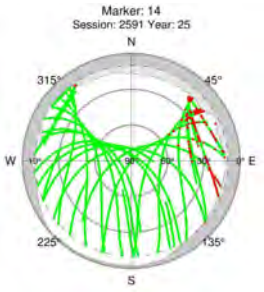
...more details



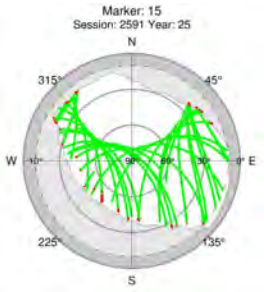
...more details



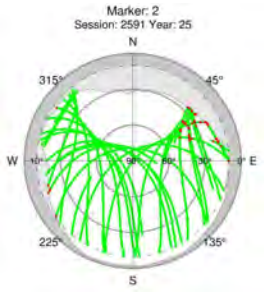
...more details



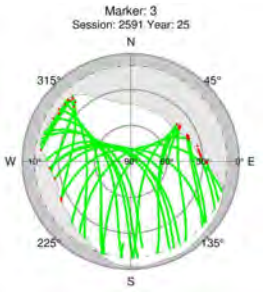
...more details



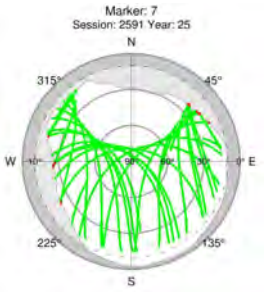
...more details



...more details



...more details



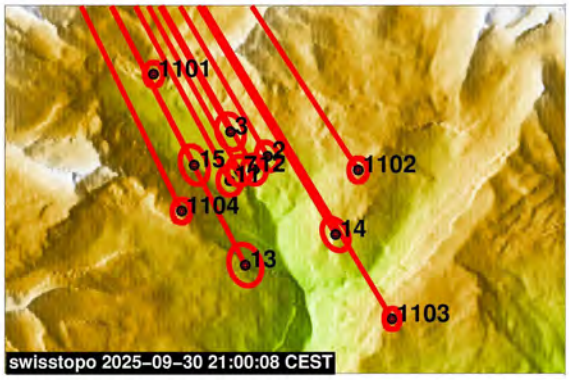
...more details

Session: 2600, Year: 25

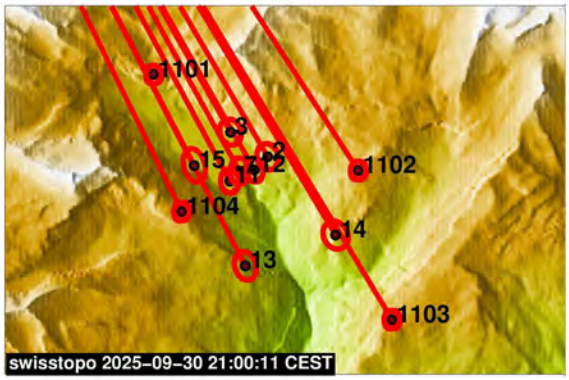
# Baseline selections and formal errors of horizontal positions

Local situation (errors scaled by a factor of 30.0 (1 sigma); click on the graphic in order to increase the size)

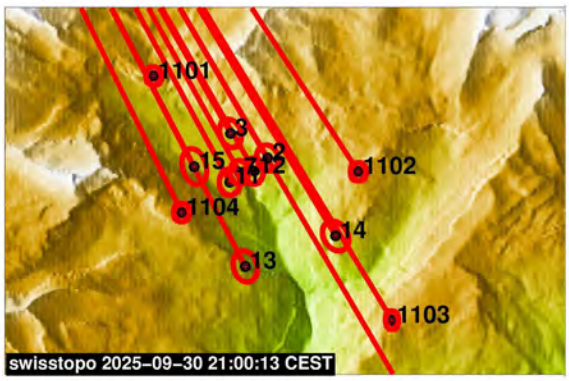
Session: 2580, Year: 25



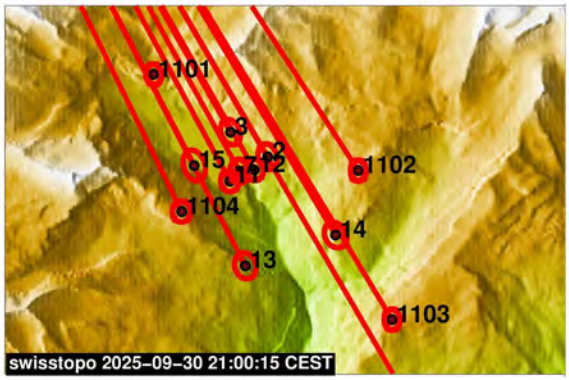

Session: 2590, Year: 25




Session: 2600, Year: 25

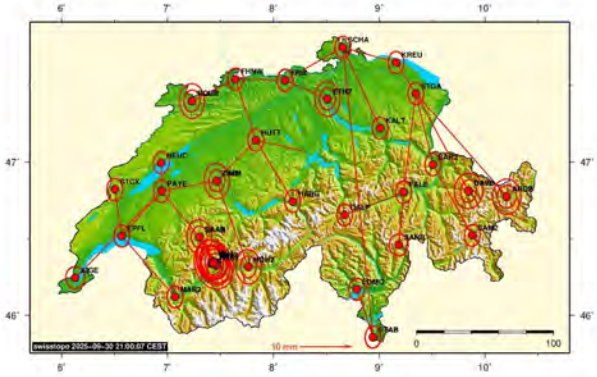


Session: 2610, Year: 25

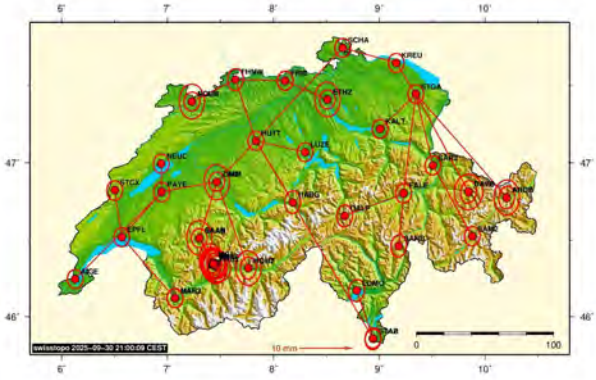



Location in Switzerland (errors scaled by a factor of 30.0 (1 sigma); click on the graphic in order to increase the size)

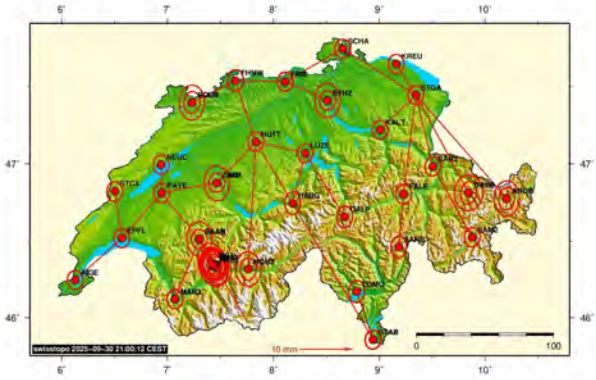
Session: 2580, Year: 25



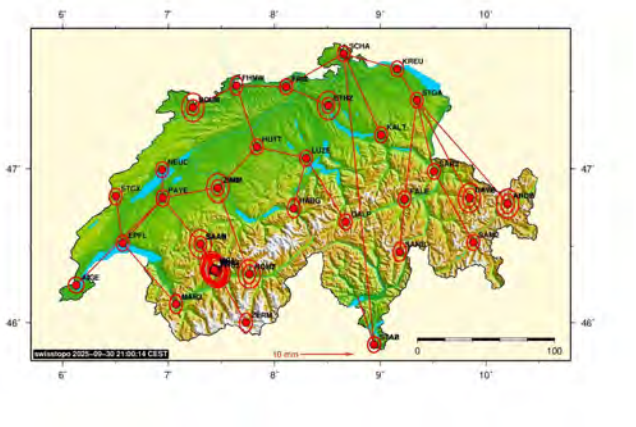
Session: 2590, Year: 25



Session: 2600, Year: 25



Session: 2610, Year: 25




# Station abbreviation table

| Station name | 4-ID | 2-ID |
|---|---|---|
| ********** | **** | ** |
| 11 | 11__ | 00 |
| 1101 | 1101 | 11 |
| 1102 | 1102 | 10 |
| 1103 | 1103 | 13 |
| 1104 | 1104 | 14 |
| 12 | 12__ | 12 |
| 13 | 13__ | 01 |
| 14 | 14__ | 20 |
| 15 | 15__ | 15 |
| 2 | 2___ | 2_ |
| 3 | 3___ | 3_ |
| 7 | 7___ | 7_ |
| AIGE | AIGE | AI |
| ARD2 | ARD2 | A2 |
| ARDE | ARDE | AR |
| BOU2 | BOU2 | B2 |
| BOUR | BOUR | BU |
| DAV2 | DAV2 | D2 |
| DAVO | DAVO | DA |
| EPFL | EPFL | EP |
| ETH2 | ETH2 | E2 |
| ETHZ | ETHZ | ET |
| FALE | FALE | FA |
| FHNW | FHNW | FW |
| FRI3 | FRI3 | F3 |
| FRIC | FRIC | FC |
| HABG | HABG | HA |
| HOH2 | HOH2 | H2 |
| HOHT | HOHT | HT |
| HUTT | HUTT | HU |
| KALT | KALT | KL |
| KREU | KREU | KR |
| LOMO | LOMO | LO |
| LUZE | LUZE | LU |
| MAR2 | MAR2 | M2 |
| MAR3 | MAR3 | MT |
| NEUC | NEUC | NE |
| OALP | OALP | OA |
| PAYE | PAYE | PY |
| SAA2 | SAA2 | SE |
| SAAN | SAAN | SN |
| SAM2 | SAM2 | AM |
| SANB | SANB | SB |
| SAR2 | SAR2 | SA |
| SCHA | SCHA | SH |
| STA2 | STA2 | S2 |
| STAB | STAB | ST |
| STCX | STCX | SX |
| STGA | STGA | SG |
| ZERM | ZERM | ZE |
| ZIM2 14001M008 | ZIM2 | Z2 |
| ZIMM 14001M004 | ZIMM | ZI |

# Baseline properties

Session: 2580, Year: 25

| BASELINE | #OBS. | #AMB | RMS(MM) | L(KM) | DHT(M) | DH(MM) | +- | DN(MM) | +- | DE(MM) | +- | DL(MM) | +- | DS(MM) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 00SE2580 | 65136 | 42 | 2.0 | 21.4 | -415.8 | 0.1 | 0.4 | 0.1 | 0.2 | -0.4 | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.4 |
| 01SE2580 | 42044 | 46 | 2.2 | 22.7 | -403.4 | 2.4 | 0.5 | -1.9 | 0.3 | -0.1 | 0.2 | -1.7 | 0.6 | 3.1 |
| 10SE2580 | 93268 | 36 | 1.6 | 22.3 | -768.9 | -3.4 | 0.2 | 1.2 | 0.1 | -2.8 | 0.1 | 2.6 | 0.3 | 4.6 |
| 11SE2580 | 90562 | 34 | 1.7 | 19.5 | -754.2 | -2.0 | 0.3 | 0.6 | 0.1 | -0.3 | 0.1 | 0.7 | 0.3 | 2.1 |
| 12SE2580 | 68584 | 42 | 1.9 | 21.5 | -445.3 | -0.9 | 0.3 | -0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | -0.2 | 0.4 | 1.0 |
| 13SE2580 | 129628 | 40 | 1.7 | 24.5 | -738.3 | -0.5 | 0.2 | 0.4 | 0.1 | 1.5 | 0.1 | -0.4 | 0.3 | 1.6 |
| 14SE2580 | 103912 | 44 | 1.9 | 21.5 | -846.0 | -2.7 | 0.3 | 1.0 | 0.1 | -0.8 | 0.1 | 1.4 | 0.3 | 3.0 |
| 15SE2580 | 51310 | 48 | 2.6 | 21.0 | -421.4 | 0.1 | 0.6 | 3.7 | 0.3 | 17.5 | 0.2 | -4.8 | 0.7 | 17.9 |
| 20SE2580 | 65962 | 84 | 2.3 | 22.9 | -505.7 | -6.8 | 0.4 | 1.9 | 0.2 | 8.1 | 0.2 | -2.4 | 0.5 | 10.7 |
| 2_SE2580 | 79708 | 56 | 2.1 | 21.4 | -512.7 | -4.5 | 0.3 | 1.0 | 0.2 | 6.3 | 0.1 | -2.2 | 0.4 | 7.8 |
| 3_SE2580 | 51148 | 34 | 2.0 | 20.8 | -444.5 | -5.5 | 0.5 | 1.2 | 0.2 | -3.7 | 0.2 | 3.0 | 0.5 | 6.7 |
| 7_SE2580 | 66330 | 44 | 1.9 | 21.4 | -412.2 | -1.0 | 0.3 | -0.1 | 0.2 | -2.0 | 0.1 | 0.9 | 0.4 | 2.2 |
| A2AR2580 | 58568 | 158 | 0.9 | 0.0 | 0.2 | 0.6 | 0.2 | -0.3 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | -0.1 | 0.2 | 0.6 |
| A2SG2580 | 181504 | 14 | 1.4 | 98.6 | -792.7 | -1.3 | 0.1 | 0.4 | 0.1 | 1.8 | 0.1 | -0.9 | 0.2 | 2.3 |
| AIPY2580 | 192478 | 50 | 1.7 | 88.6 | 74.9 | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | -1.2 | 0.1 | -0.7 | 0.2 | 1.2 |
| AMSA2580 | 184500 | 16 | 1.5 | 58.2 | -496.6 | 0.1 | 0.2 | -0.3 | 0.1 | -4.4 | 0.1 | 1.9 | 0.2 | 4.4 |
| B2BU2580 | 61944 | 168 | 1.2 | 0.0 | -1.9 | -0.4 | 0.2 | -0.0 | 0.1 | 5.1 | 0.1 | 4.0 | 0.3 | 5.1 |
| B2FW2580 | 192640 | 26 | 1.7 | 34.7 | -546.5 | 0.5 | 0.2 | -0.1 | 0.1 | -3.7 | 0.1 | -3.4 | 0.2 | 3.8 |
| D2DA2580 | 57536 | 154 | 0.9 | 0.0 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | -0.1 | 0.1 | 1.1 | 0.1 | -0.7 | 0.2 | 1.2 |
| D2SG2580 | 180868 | 28 | 1.4 | 79.5 | -891.6 | -1.7 | 0.2 | 0.6 | 0.1 | 3.1 | 0.1 | -1.0 | 0.2 | 3.6 |
| E2ET2580 | 65062 | 188 | 0.9 | 0.0 | -0.0 | 0.3 | 0.2 | -0.2 | 0.1 | 0.5 | 0.1 | -0.1 | 0.2 | 0.6 |
| E2F32580 | 193370 | 40 | 1.7 | 32.9 | 132.1 | -1.1 | 0.2 | 0.0 | 0.1 | -4.2 | 0.1 | 3.9 | 0.2 | 4.4 |
| EPM22580 | 181858 | 28 | 1.9 | 58.9 | 184.9 | 1.0 | 0.2 | -0.6 | 0.1 | -2.9 | 0.1 | -1.5 | 0.2 | 3.1 |
| EPPY2580 | 197318 | 48 | 1.5 | 43.3 | 89.5 | 1.0 | 0.2 | -0.4 | 0.1 | -0.9 | 0.1 | -0.9 | 0.2 | 1.4 |
| EPSX2580 | 193660 | 30 | 1.8 | 33.8 | 696.2 | 2.1 | 0.2 | -0.7 | 0.1 | -2.9 | 0.1 | -0.2 | 0.2 | 3.7 |
| F3FC2580 | 204156 | 478 | 1.1 | 0.0 | -1.2 | -0.4 | 0.1 | 0.7 | 0.1 | 2.8 | 0.1 | 2.8 | 0.1 | 2.9 |
| F3SH2580 | 199714 | 38 | 1.7 | 47.1 | -88.8 | 2.4 | 0.2 | -0.8 | 0.1 | 3.2 | 0.1 | 2.4 | 0.2 | 4.1 |
| FAOA2580 | 174852 | 24 | 1.7 | 45.5 | 795.3 | -1.3 | 0.2 | 0.8 | 0.1 | 0.7 | 0.1 | -0.9 | 0.2 | 1.6 |
| FASB2580 | 165426 | 32 | 1.5 | 38.0 | 358.0 | -0.5 | 0.2 | 0.4 | 0.1 | 1.3 | 0.1 | -0.5 | 0.2 | 1.4 |
| FASG2580 | 190290 | 44 | 1.5 | 71.4 | -590.5 | -1.5 | 0.2 | 0.6 | 0.1 | 1.9 | 0.1 | 0.9 | 0.2 | 2.5 |
| FWF32580 | 197482 | 38 | 1.8 | 35.4 | 331.4 | -2.2 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | -3.9 | 0.1 | -3.9 | 0.2 | 4.5 |
| FWHU2580 | 199792 | 20 | 1.6 | 46.1 | 383.5 | -1.4 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | -0.0 | 0.1 | -0.1 | 0.2 | 1.4 |
| H2HT2580 | 57626 | 144 | 0.9 | 0.0 | -0.0 | -0.7 | 0.2 | 0.3 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | -0.0 | 0.2 | 0.7 |
| HZZ22580 | 172638 | 16 | 1.6 | 66.1 | -29.3 | 1.1 | 0.2 | -0.3 | 0.1 | 1.6 | 0.1 | -0.8 | 0.2 | 1.9 |
| HAHU2580 | 165850 | 34 | 1.6 | 51.2 | -368.8 | -0.9 | 0.2 | -0.1 | 0.1 | 0.8 | 0.1 | -0.5 | 0.2 | 1.2 |
| HULU2580 | 65280 | 52 | 5.8 | 36.3 | -236.8 | 74.1 | 1.1 | 5.8 | 0.6 | -3.5 | 0.5 | -5.0 | 1.4 | 74.4 |
| HUZ22580 | 201276 | 34 | 1.4 | 40.7 | 177.3 | 1.9 | 0.1 | -0.4 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 1.9 |
| KLSH2580 | 197140 | 54 | 1.6 | 63.6 | 161.1 | 1.2 | 0.2 | -0.5 | 0.1 | -1.3 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 1.9 |
| KRSG2580 | 202056 | 28 | 1.5 | 26.2 | 223.7 | -0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 6.0 | 0.1 | 3.1 | 0.2 | 6.0 |
| KRSH2580 | 200206 | 44 | 1.6 | 39.3 | 108.2 | 1.7 | 0.2 | -1.0 | 0.1 | 3.2 | 0.1 | -3.4 | 0.2 | 3.7 |
| LOS22580 | 189190 | 18 | 1.5 | 37.2 | -20.7 | 0.3 | 0.2 | -0.1 | 0.1 | -0.4 | 0.1 | 0.0 | 0.2 | 0.6 |
| M2MT2580 | 186570 | 418 | 0.8 | 0.0 | 1.0 | 0.9 | 0.1 | -0.4 | 0.0 | 0.8 | 0.0 | -0.3 | 0.1 | 1.2 |
| NEPY2580 | 192370 | 48 | 1.8 | 20.2 | 44.0 | 2.4 | 0.2 | -0.6 | 0.1 | -2.5 | 0.1 | 0.6 | 0.2 | 3.6 |
| PYSE2580 | 194800 | 30 | 1.7 | 42.9 | 870.9 | -0.8 | 0.2 | -0.0 | 0.1 | -0.7 | 0.1 | -0.4 | 0.2 | 1.0 |
| PYZ22580 | 195934 | 46 | 1.6 | 40.4 | 407.7 | 0.8 | 0.2 | -0.1 | 0.1 | 1.1 | 0.1 | 1.1 | 0.2 | 1.4 |
| S2ST2580 | 204302 | 454 | 0.9 | 0.0 | -0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.3 | 0.0 | -0.2 | 0.1 | 0.3 |
| SASG2580 | 198520 | 24 | 1.6 | 52.5 | -511.8 | -1.8 | 0.2 | 0.8 | 0.1 | 4.4 | 0.1 | -0.2 | 0.2 | 4.8 |
| SESN2580 | 64994 | 164 | 1.1 | 0.0 | -0.0 | 1.6 | 0.2 | -0.0 | 0.1 | -1.4 | 0.1 | 0.3 | 0.3 | 2.1 |
| SHS22580 | 199240 | 456 | 1.3 | 210.3 | -220.9 | -0.0 | 0.1 | 0.3 | 0.1 | 0.6 | 0.1 | -0.3 | 0.2 | 0.7 |

# Session results: Kinematic coordinates

S: Coordinates with short baseline options (L1 / L3, tropo estimation YES / NO); L: Coordinates with long baseline options (L3, tropo estimation YES); click on the graphic in order to increase the size or use mouse-over to see details of the involved stations

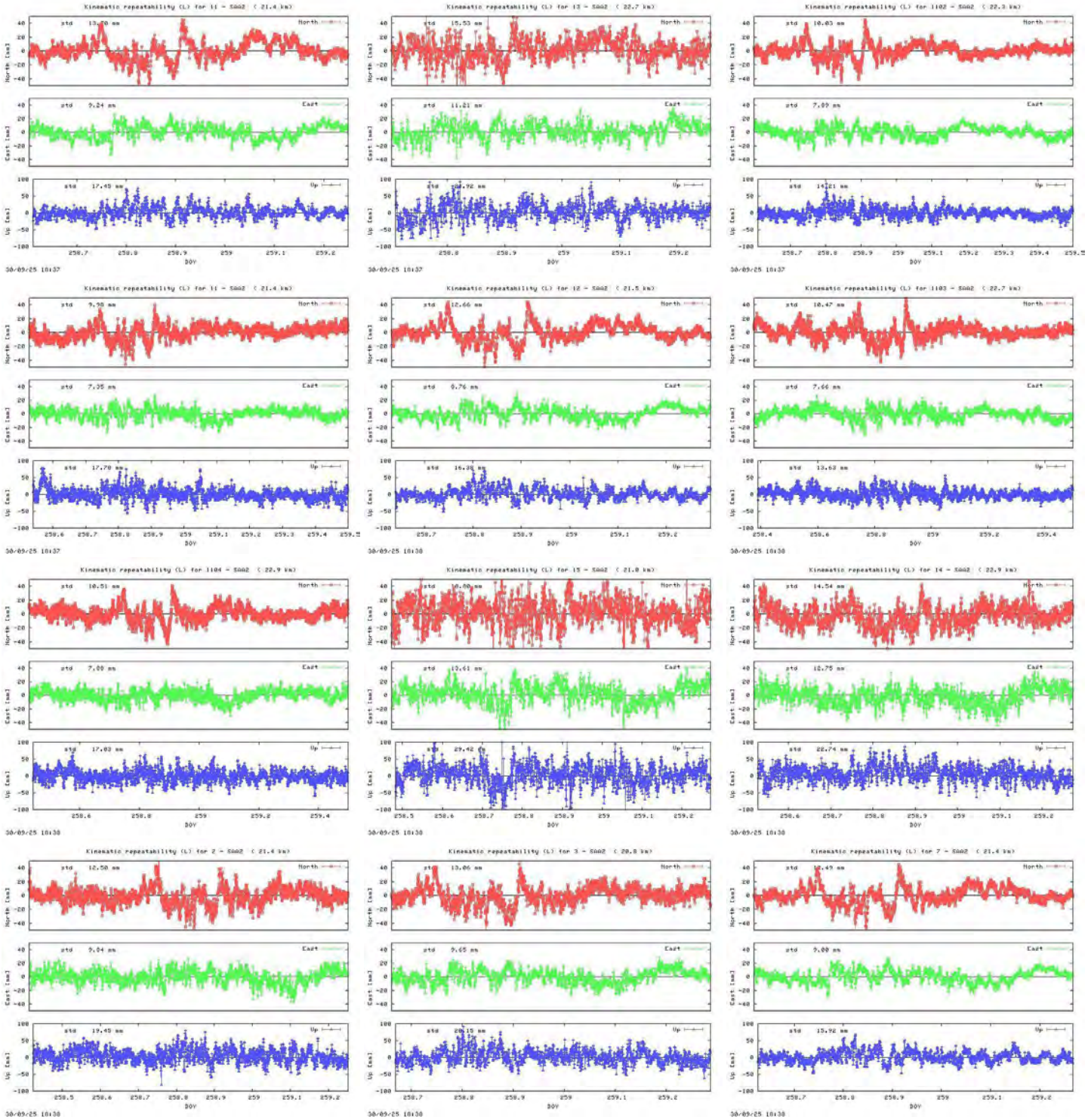
Session: 2580, Year: 25, Short kinematic baseline results

Session: 2590, Year: 25, Short kinematic baseline results

Session: 2600, Year: 25, Short kinematic baseline results

Session: 2610, Year: 25, Short kinematic baseline results

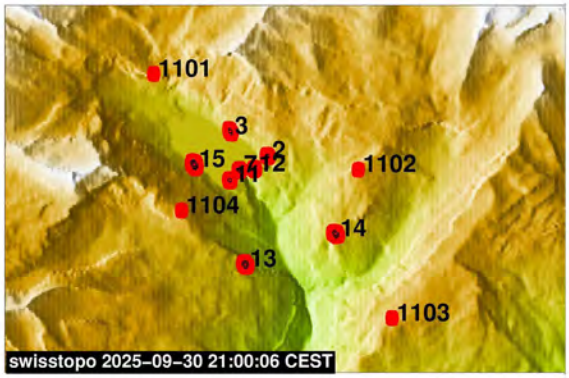
Session: 2580, Year: 25, Long kinematic baseline results

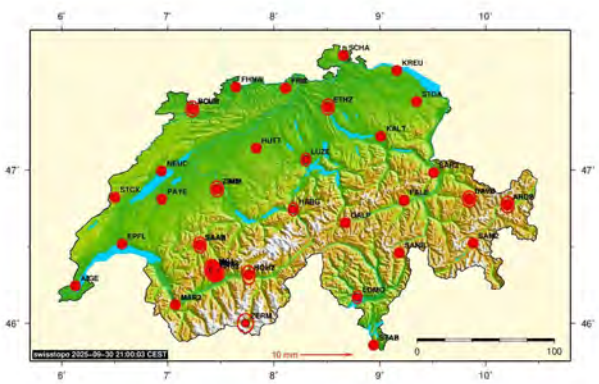


Session: 2590, Year: 25, Long kinematic baseline results

# Final results: Formal errors of horizontal positions (plot)

Errors scaled by a factor of 30.0 (1 sigma); click on the graphic in order to increase the size




# Final results: Unscaled formal 3D errors (table)

```
# ERROR ELLIPSES (FORMAL ACCURACIES, 1 SIGMA)
#   SITE              A & B AXIS   ALP(A)  HOR & UP/C AXIS ALP(C)
#                      (mm)      (deg)       (mm)       (deg)
11                  0.05   0.04  93.45    0.06   0.26  -0.30
1101                0.04   0.03  94.57    0.05   0.23  -0.12
1102                0.04   0.03  91.19    0.05   0.23  -0.08
1103                0.04   0.03  92.17    0.05   0.18  -0.02
1104                0.04   0.03  88.72    0.05   0.24  -0.42
12                  0.05   0.04  92.46    0.06   0.26   0.01
13                  0.06   0.05 107.90    0.08   0.29  -0.37
14                  0.06   0.05 120.77    0.07   0.27  -0.16
15                  0.07   0.05 106.92    0.08   0.33   0.52
2                   0.05   0.04 105.93    0.07   0.26  -0.39
3                   0.06   0.04 109.16    0.07   0.29  -0.38
7                   0.05   0.04  92.39    0.06   0.27  -0.14
AIGE                0.03   0.03  92.81    0.04   0.15  -0.19
ARD2                0.03   0.03  83.29    0.04   0.16  -0.14
ARDE                0.05   0.04  88.92    0.07   0.27  -0.58
BOU2                0.03   0.03  84.68    0.04   0.15  -0.21
BOUR                0.05   0.04  90.30    0.07   0.25   0.53
DAV2                0.03   0.03  82.42    0.04   0.16  -0.24
DAVO                0.05   0.04  87.44    0.07   0.26   0.22
EPFL                0.03   0.03  89.59    0.04   0.14  -0.18
ETH2                0.03   0.03  88.41    0.04   0.14  -0.11
ETHZ                0.05   0.04  92.21    0.07   0.24  -0.25
FALE                0.03   0.03  86.11    0.04   0.15  -0.08
FHNW                0.03   0.03  85.87    0.04   0.14  -0.05
FRI3                0.03   0.03  87.05    0.04   0.14  -0.05
FRIC                0.03   0.03  86.99    0.04   0.14  -0.07
HABG                0.04   0.03  89.10    0.05   0.17   0.15
HOH2                0.03   0.03  88.83    0.04   0.17   0.04
HOHT                0.06   0.04  93.18    0.07   0.27  -0.05
HUTT                0.03   0.03  86.70    0.04   0.14  -0.08
KALT                0.03   0.03  88.21    0.04   0.14  -0.03
KREU                0.03   0.03  90.24    0.04   0.14  -0.08
LOMO                0.04   0.03  84.67    0.05   0.18  -0.21
LUZE                0.04   0.03  86.47    0.05   0.17  -0.15
MAR2                0.03   0.03  91.98    0.04   0.15  -0.03
MAR3                0.03   0.03  92.05    0.04   0.16  -0.05
NEUC                0.03   0.03  85.89    0.04   0.14  -0.09
OALP                0.03   0.03  87.61    0.04   0.17  -0.02
PAYE                0.03   0.03  87.09    0.04   0.14  -0.10
SAA2                0.03   0.03  88.33    0.04   0.14  -0.06
SAAN                0.05   0.04  92.75    0.07   0.24  -0.32
SAM2                0.03   0.03  83.79    0.04   0.16  -0.01
SANB                0.03   0.03  84.60    0.04   0.18   0.19
SAR2                0.03   0.03  87.89    0.04   0.14  -0.06
SCHA                0.03   0.03  88.81    0.04   0.14  -0.06
STA2                0.03   0.03  85.13    0.04   0.14   0.05
STAB                0.03   0.03  84.71    0.04   0.14   0.02
STCX                0.03   0.03  87.04    0.04   0.15  -0.12
STGA                0.03   0.03  89.85    0.04   0.14  -0.07
ZERM                0.06   0.05  86.83    0.08   0.32  -0.31
ZIM2                0.03   0.03  87.16    0.04   0.14  -0.08
ZIMM                0.05   0.04  92.43    0.07   0.24  -0.23
```

# Coordinates: LV95 reference frame realisation

3-parameter transformation to official CHTRF95 coordinates of AGNES sites

```
================================================================================
Bernese GNSS Software, Version 5.5
--------------------------------------------------------------------------------
Program       : HELMR1
Purpose       : Helmert Transformation
--------------------------------------------------------------------------------
Campaign      : ${P}/HEIGVD25
Default session: 0440 year 2019
Date          : 30-Sep-2025 21:01:42
User name     : pnac
================================================================================


TRANSFORM COORDINATES TO OFFICIAL C SOLUTION (ETRS)
--------------------------------------------------


INPUT AND OUTPUT FILENAMES
--------------------------

--------------------------------------------------------------------------------
General constants             : ${MODEL}/CONST.BSW
Geodetic datum                : ${CONFIG}/DATUM.BSW
First coordinate file         : ${P}/HEIGVD25/STA/AGNES_EFb.CRD
Second coordinate file        : ${P}/HEIGVD25/STA/1027322_IN.CRD
Velocities for first file     :  ---
PSD corrections               :  ---
Annual/semiannual corrections (s:  ---
Coordinates                   : ...HEIGVD25/STA/1027322_EF_C.CRD
List of accepted stations     : ${P}/HEIGVD25/STA/HLM_EF_C.FIX
List of reference stations    : ${P}/HEIGVD25/STA/AGNES.FIX
Extra list of stations        :  ---
List of rejected stations     : ${P}/HEIGVD25/STA/HLM_EF_C.FIX
Program output                : ${P}/HEIGVD25/OUT/HLM_EF_C.OUT
Error message                 :  ---
Scratch file                  : ${U}/WORK/HELMR1.SCR
Session table                 : ${P}/HEIGVD25/GEN/SESSIONS.SES
--------------------------------------------------------------------------------
```

# Coordinates: LV95 reference frame realisation

```
### PG HELMR1: DIFFERENT GEODETIC DATES FOUND
            FIRST  DATUM: ETRF89
            SECOND DATUM: IGb14

FILE 1: AGNES_EFb.CRD: AGNES-KOORDINATEN AUS XLS-SHEET (C SOL, NUR AKT. WERTE)
FILE 2: 1027322_IN.CRD: AUTOCAMP: Final multi-session results

TRANSFORMATION IN EQUATORIAL SYSTEM (X, Y, Z):
RESIDUALS IN LOCAL SYSTEM (NORTH, EAST, UP)


LIST OF REMOVED STATIONS:

OUTLIER CRITERIA:                  10.00     10.00     25.00

   NO OUTLIER DETECTED



-------------------------------------------------------------------
| NUM |     NAME       | FLG |     RESIDUALS IN MILLIMETERS   |  |
-------------------------------------------------------------------
|     |                |     |                                |  |
|   1 | AIGE           | E W |      3.94      0.07     -4.15 |  |
|   2 | ARDE           | E W |     -3.99      0.54      1.65 |  |
|   3 | ARD2           | E W |     -2.92      0.26      1.19 |  |
|   4 | BOUR           | E W |      3.80     -1.76      0.53 |  |
|   5 | DAVO           | E W |     -2.89      0.29     -2.20 |  |
|   6 | DAV2           | E W |     -0.58     -1.10     -3.42 |  |
|   7 | EPFL           | E W |      4.65      0.69     -4.96 |  |
|   8 | ETHZ           | E W |     -0.20     -0.49      7.68 |  |
|   9 | ETH2           | E W |     -0.12     -0.14      5.80 |  |
|  10 | FALE           | E W |     -1.10     -0.11     -3.91 |  |
|  12 | FRIC           | E W |     -0.48      1.13      2.03 |  |
|  13 | FRI3           | E W |     -1.66      1.12      8.36 |  |
|  14 | HOHT           | E W |      1.56     -0.29    -15.03 |  |
|  15 | HOH2           | E W |      0.67      0.65    -16.56 |  |
|  16 | HUTT           | E W |     -1.71     -0.87      3.49 |  |
|  17 | KALT           | E W |     -2.30     -1.78      9.81 |  |
|  18 | LUZE           | E W |     -1.83     -0.28     -0.81 |  |
|  19 | MAR3           | E W |      1.05      1.09    -13.50 |  |
|  20 | NEUC           | E W |      3.91     -1.14     -0.80 |  |
|  21 | OALP           | E W |      1.50     -4.28     -6.04 |  |
|  22 | PAYE           | E W |      6.62     -4.07     -0.61 |  |
|  23 | SAAN           | E W |      1.41      0.15      1.48 |  |
|  24 | SAA2           | E W |      1.41      3.90     -1.57 |  |
|  25 | SAM2           | E W |     -3.63      2.43     -3.07 |  |
|  26 | SANB           | E W |     -0.60      3.25      0.60 |  |
|  27 | SAR2           | E W |     -4.90      2.69      6.00 |  |
|  28 | SCHA           | E W |      0.10      2.05     13.01 |  |
|  29 | STAB           | E W |      1.53     -1.02      0.66 |  |
|  30 | STA2           | E W |      0.23     -3.31     -0.40 |  |
|  31 | STGA           | E W |     -3.93      1.36      9.49 |  |
|  32 | ZIMM 14001M004 | E W |     -0.02     -0.35      3.54 |  |
|  33 | ZIM2 14001M008 | E W |     -0.85     -2.38      1.63 |  |
|     |                |     |                                |  |
-------------------------------------------------------------------
|     | RMS / COMPONENT |     |      2.70      1.91      6.72 |  |
|     | IQR             |     |      3.22      2.16      6.76 |  |
|     | MEAN            |     |     -0.04     -0.05     -0.00 |  |
|     | MEDIAN          |     |     -0.16     -0.02      0.57 |  |
|     | MIN             |     |     -4.90     -4.28    -16.56 |  |
|     | MAX             |     |      6.62      3.90     13.01 |  |
-------------------------------------------------------------------
       OVERALL RMS/IQR/MAX(3D)        4.32      3.25     16.59       HOH2              #SUM
-------------------------------------------------------------------
| ALL | RMS / COMPONENT |     |      2.70      1.91      6.72 |  |
| ALL | IQR             |     |      3.22      2.16      6.76 |  |
| ALL | MEAN            |     |     -0.04     -0.05     -0.00 |  |
| ALL | MEDIAN          |     |     -0.16     -0.02      0.57 |  |
| ALL | MIN             |     |     -4.90     -4.28    -16.56 |  |
| ALL | MAX             |     |      6.62      3.90     13.01 |  |
-------------------------------------------------------------------
  ALL   OVERALL RMS/IQR/MAX(3D)        4.32      3.25     16.59       HOH2              #SUM_ALL


NUMBER OF PARAMETERS :    3
NUMBER OF STATIONS   :   32
NUMBER OF COORDINATES :   96
RMS OF TRANSFORMATION :   4.32 MM


PARAMETERS:

TRANSLATION IN  X    :       571.06    +-  0.76    MM
TRANSLATION IN  Y    :      -611.66    +-  0.76    MM
TRANSLATION IN  Z    :      -451.15    +-  0.76    MM


NUMBER OF ITERATIONS :    2


ACCEPTED STATIONS    :   32
REJECTED STATIONS    :    0
VERIFIED STATIONS    :    0



-------------------------------------------------------------
>>> CPU/Real time for pgm "HELMR1": 0:00:00.008 / 0:00:00.049
>>> Program finished successfully
```

# Coordinates: Cartesian coordinates

## European reference system ETRS89 / Swiss reference system CHTRS95

```
$$3DCoordinates in ETRF (rounded to 1 mm in projection system) 30.09.2025 21:01
  1  11                  4374741.90574   570831.01606  4593221.76142    EF
  2  1101                4373966.47733   569566.65535  4594578.64765    EF
  3  1102                4374616.35739   572774.39366  4593588.16238    EF
  4  1103                4376143.86566   573490.51272  4592011.68995    EF
  5  1104                4375459.43943   570187.50250  4593216.78171    EF
  6  12                  4374592.49847   571184.74732  4593360.18437    EF
  7  13                  4375619.19812   571181.17079  4592331.17382    EF
  8  14                  4375180.74144   572502.02928  4592724.22306    EF
  9  15                  4374646.12442   570275.59515  4593388.58609    EF
 10  2                   4374469.98118   571371.13099  4593546.13680    EF
 11  3                   4374229.62676   570772.89257  4593753.09236    EF
 12  7                   4374611.47351   570959.28769  4593324.36403    EF
 13  AIGE                4393543.64026   471726.02098  4584678.46351    EF
 18  ARD2                4307656.24593   775438.20405  4625902.18798    EF
 19  ARDE                4307656.77917   775433.60747  4625902.69213    EF
 32  BOU2                4291781.18650   544494.51472  4672225.36774    EF
 33  BOUR                4291771.99686   544504.83467  4672230.03177    EF
 58  DAV2                4309598.04574   747779.51893  4628763.77976    EF
 59  DAVO                4309608.97766   747769.75851  4628755.57809    EF
 70  EPFL                4367900.65277   502906.39463  4605656.41647    EF
 73  ETH2                4277250.50365   640049.11426  4672957.49734    EF
 74  ETHZ                4277260.36977   640044.46891  4672949.14469    EF
 77  FALE                4317835.71096   701679.76568  4627894.60873    EF
 80  FHNW                4275978.71932   573720.29503  4682389.96136    EF
 86  FRI3                4271938.41779   608870.52047  4682093.34101    EF
 87  FRIC                4271934.86277   608891.89336  4682092.21956    EF
101  HABG                4334382.68594   623264.02995  4623408.71122    EF
112  HOH2                4372948.81903   596124.16342  4590551.34850    EF
113  HOHT                4372948.89369   596119.64573  4590551.85926    EF
115  HUTT                4306157.75776   592541.18655  4653017.83281    EF
122  KALT                4286723.04279   679595.56534  4658606.94754    EF
133  KREU                4250723.08533   685424.65534  4690488.02510    EF
145  LOMO                4372867.16852   675972.94646  4578866.89360    EF
```

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 148 | LUZE | 4306912.67274 | 628359.69942 | 4647329.52100 | EF |
| 155 | MAR2 | 4395307.21813 | 545181.56682 | 4575133.30005 | EF |
| 156 | MAR3 | 4395302.80642 | 545180.72580 | 4575138.93420 | EF |
| 183 | NEUC | 4326595.42905 | 526677.44437 | 4641665.77665 | EF |
| 188 | OALP | 4336547.46087 | 661549.57590 | 4617466.04383 | EF |
| 195 | PAYE | 4341235.07123 | 528725.43585 | 4627896.78548 | EF |
| 215 | SAA2 | 4362237.60835 | 558916.49798 | 4605897.92962 | EF |
| 216 | SAAN | 4362233.91446 | 558914.73052 | 4605901.60517 | EF |
| 217 | SAM2 | 4332065.38184 | 754464.75115 | 4606962.65110 | EF |
| 219 | SANB | 4345821.04851 | 702666.51084 | 4602145.73392 | EF |
| 222 | SAR2 | 4300072.03351 | 720154.65370 | 4641376.71662 | EF |
| 226 | SCHA | 4248835.84412 | 646812.52843 | 4697774.02181 | EF |
| 237 | STA2 | 4396042.05537 | 691679.13511 | 4554400.47570 | EF |
| 238 | STAB | 4396040.39011 | 691674.64755 | 4554402.71302 | EF |
| 239 | STCX | 4344778.57963 | 495114.81745 | 4629118.69220 | EF |
| 241 | STGA | 4264776.32469 | 701896.10876 | 4675676.47495 | EF |
| 286 | ZERM | 4399182.98091 | 597294.45473 | 4566748.13375 | EF |
| 287 | ZIM2 14001M008 | 4331300.15741 | 567537.08312 | 4633133.50874 | EF |
| 291 | ZIMM 14001M004 | 4331297.34555 | 567555.63885 | 4633133.72470 | EF |

Session results:

ETRF coordinates: File F1_252580.3D_EF2
ETRF coordinates: File F1_252590.3D_EF2
ETRF coordinates: File F1_252600.3D_EF2
ETRF coordinates: File F1_252610.3D_EF2

Full precision results:

ETRF coordinates: FM__ALL_EF_C.CRD
ETRF coordinates: File F1_252580_EF_C.CRD
ETRF coordinates: File F1_252590_EF_C.CRD
ETRF coordinates: File F1_252600_EF_C.CRD
ETRF coordinates: File F1_252610_EF_C.CRD

# Coordinates: Projection coordinates (ellip. heights)

Swiss reference system CH1903+, ellipsoidal heights

$$PECoordinates in LV95 (rounded to 1 mm) 30.09.2025 21:01

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 11 | 2599653.678 | 1132754.697 | 1784.245 | LV |
| 2 | 1101 | 2598500.705 | 1134365.666 | 2122.609 | LV |
| 3 | 1102 | 2601596.429 | 1132915.585 | 2137.304 | LV |
| 4 | 1103 | 2602108.612 | 1130664.993 | 2106.698 | LV |
| 5 | 1104 | 2598922.910 | 1132296.888 | 2214.356 | LV |
| 6 | 12 | 2600023.694 | 1132924.262 | 1813.743 | LV |
| 7 | 13 | 2599887.240 | 1131478.006 | 1771.769 | LV |
| 8 | 14 | 2601253.430 | 1131940.060 | 1874.146 | LV |
| 9 | 15 | 2599115.456 | 1132990.553 | 1789.803 | LV |
| 10 | 2 | 2600224.324 | 1133123.011 | 1881.098 | LV |
| 11 | 3 | 2599662.374 | 1133494.275 | 1812.890 | LV |
| 12 | 7 | 2599797.726 | 1132907.049 | 1780.665 | LV |
| 13 | AIGE | 2498943.440 | 1122661.165 | 421.469 | LV |
| 18 | ARD2 | 2811214.245 | 1184301.986 | 1499.311 | LV |
| 19 | ARDE | 2811209.611 | 1184302.379 | 1499.480 | LV |
| 32 | BOU2 | 2584282.324 | 1249269.015 | 893.386 | LV |
| 33 | BOUR | 2584293.741 | 1249277.895 | 891.527 | LV |
| 58 | DAV2 | 2783527.112 | 1187464.835 | 1597.870 | LV |
| 59 | DAVO | 2783516.010 | 1187452.242 | 1598.119 | LV |
| 70 | EPFL | 2533187.786 | 1152613.109 | 407.858 | LV |
| 73 | ETH2 | 2680910.112 | 1251259.201 | 547.413 | LV |
| 74 | ETHZ | 2680904.227 | 1251246.790 | 547.402 | LV |
| 77 | FALE | 2736752.180 | 1185264.162 | 1295.963 | LV |
| 80 | FHNW | 2615306.455 | 1264897.652 | 347.640 | LV |
| 86 | FRI3 | 2650681.667 | 1264293.531 | 679.468 | LV |
| 87 | FRIC | 2650703.329 | 1264293.331 | 678.301 | LV |
| 101 | HABG | 2656862.293 | 1177632.252 | 1098.473 | LV |
| 112 | HOH2 | 2624963.920 | 1129829.005 | 934.878 | LV |
| 113 | HOHT | 2624959.431 | 1129829.727 | 934.877 | LV |
| 115 | HUTT | 2630058.176 | 1221197.342 | 730.328 | LV |
| 122 | KALT | 2718899.565 | 1230858.765 | 429.623 | LV |
| 133 | KREU | 2729349.373 | 1278156.057 | 483.876 | LV |
| 145 | LOMO | 2704160.865 | 1114349.377 | 387.788 | LV |
| 148 | LUZE | 2665476.809 | 1213379.518 | 493.753 | LV |
| 155 | MAR2 | 2571556.838 | 1107917.897 | 592.168 | LV |
| 156 | MAR3 | 2571556.580 | 1107925.034 | 593.123 | LV |
| 183 | NEUC | 2562108.218 | 1204872.726 | 454.752 | LV |
| 188 | OALP | 2694527.611 | 1168390.747 | 2090.355 | LV |
| 195 | PAYE | 2562243.571 | 1184673.266 | 498.323 | LV |
| 215 | SAA2 | 2589460.394 | 1151589.088 | 1368.733 | LV |
| 216 | SAAN | 2589459.120 | 1151594.440 | 1368.724 | LV |
| 217 | SAM2 | 2787248.383 | 1155678.150 | 1713.942 | LV |
| 219 | SANB | 2734103.712 | 1147324.809 | 1653.125 | LV |
| 222 | SAR2 | 2757374.504 | 1205587.125 | 1218.009 | LV |
| 226 | SCHA | 2691301.266 | 1288150.118 | 591.782 | LV |
| 237 | STA2 | 2716747.135 | 1079361.438 | 366.470 | LV |
| 238 | STAB | 2716742.899 | 1079364.597 | 366.444 | LV |
| 239 | STCX | 2528465.162 | 1186121.142 | 1104.743 | LV |
| 241 | STGA | 2743855.632 | 1256300.797 | 707.263 | LV |
| 286 | ZERM | 2622726.094 | 1094473.900 | 1879.550 | LV |
| 287 | ZIM2 14001M008 | 2602011.979 | 1191774.601 | 906.660 | LV |
| 291 | ZIMM 14001M004 | 2602030.740 | 1191775.030 | 906.560 | LV |

Session results:

Projection coordinates (ellips. heights): File F1_252580.PE2
Projection coordinates (ellips. heights): File F1_252590.PE2
Projection coordinates (ellips. heights): File F1_252600.PE2
Projection coordinates (ellips. heights): File F1_252610.PE2

Full precision results:

Projection coordinates (ellips. heights): FM__ALL.PE
Projection coordinates (ellips. heights): File F1_252580.PE
Projection coordinates (ellips. heights): File F1_252590.PE
Projection coordinates (ellips. heights): File F1_252600.PE
Projection coordinates (ellips. heights): File F1_252610.PE

# Coordinates: Projection coordinates (orthometric heights)

Swiss reference system CH1903+, orthometric heights

# ANNEXE M

# RÉSULTAT COMPENSATION SESSION BERNESE AVEC POINT 1103 COMME PIVOT

Trinet+, Compensation 3D  Version 7.2

Projet : 2025_ZEUZIER_BERNESE
Réseau : 1103_PIVOT

Statistique :
==========
Observations : 609
Inconnues : 168
Conditions : 3
Surabondance : 444

Station. terr. : 0
Sessions GNSS : 4
Points fixes: 0 Réseau libre
Points nouveaux: 52

Réseau libre TY, TX, TZ

Itérations = 10 (2)

Test global
==========
Ecart type unitaire a priori = 1.00
Ecart type unitaire a post. = 0.95
Probabilité que Q soit plus petit que Q^ = 6.4 %

Delta: 5.1

| Erreurs moyennes des observations : | Nombre | em int Gr. | em a priori | em a posteriori | Quot | Part de redond. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Observation GNSS Y: | 201 | 1.5 mm | 1.5 mm | 1.32 mm | 0.86 | 146.00 |
| | 2 | 9999.0 mm | 9999.0 mm | 6.70 mm | 0.00 | 2.00 |
| Observation GNSS X: | 203 | 1.5 mm | 1.5 mm | 1.60 mm | 1.04 | 148.00 |
| Observation GNSS Z: | 203 | 3.0 mm | 3.0 mm | 2.89 mm | 0.95 | 148.00 |

Sessions GNSS
==========

| Paramètres : | TY | TX | TZ | RY | RX | RZ | EYX | EZ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| F00 | + | + | + | - | - | - | - | - |
| F10 | + | + | + | - | - | - | - | - |
| F80 | + | + | + | - | - | - | - | - |
| F90 | + | + | + | - | - | - | - | - |

Centre de gravité (coord) : Y = 146406.7635 X = 242087.1511 Z = 1361.4872
Centre de gravité (obs) : Y = 146406.7633 X = 242087.1512 Z = 1361.4878

| Nom session | Nbr Pts | TY [m] | TX [m] | TZ [m] |
|---|---|---|---|---|
| F00 | 51 | 0.0001 ± 0.2mm | 0.0004 ± 0.2mm | -0.0006 ± 0.4mm |
| F10 | 51 | 0.0000 ± 0.2mm | 0.0001 ± 0.2mm | 0.0006 ± 0.4mm |
| F80 | 50 | 0.0001 ± 0.2mm | -0.0004 ± 0.2mm | 0.0001 ± 0.4mm |
| F90 | 51 | 0.0001 ± 0.2mm | -0.0001 ± 0.2mm | -0.0001 ± 0.4mm |

| Nom session | Nbr Pts | RY [cc] | RX [cc] | RZ [cc] |
|---|---|---|---|---|
| F00 | 51 | - | - | - |
| F10 | 51 | - | - | - |
| F80 | 50 | - | - | - |
| F90 | 51 | - | - | - |

| Nom session | Nbr Pts | EYX [ppm] | EZ [ppm] |
|---|---|---|---|
| F00 | 51 | - | - |
| F10 | 51 | - | - |
| F80 | 50 | - | - |
| F90 | 51 | - | - |

Ellipsoïde d'erreur moy. :

==========

| Point Nr. | A [mm] | B [mm] | C [mm] | Gis(A) [gon] | Z(A) [gon] | Gis(B) [gon] | Z(B) [gon] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 11 | 1.46 | 0.74 | 0.74 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| 1101 | 1.46 | 0.74 | 0.74 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| 1102 | 1.46 | 0.74 | 0.74 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| 1103 | 1.46 | 0.74 | 0.74 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| 1104 | 1.46 | 0.74 | 0.74 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| 12 | 1.46 | 0.74 | 0.74 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| 13 | 1.46 | 0.74 | 0.74 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| 14 | 1.46 | 0.74 | 0.74 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| 15 | 1.46 | 0.74 | 0.74 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| 2 | 1.46 | 0.74 | 0.74 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| 3 | 1.46 | 0.74 | 0.74 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| 7 | 1.46 | 0.74 | 0.74 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| AIGE | 1.43 | 0.72 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| ARD2 | 1.43 | 0.72 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| ARDE | 1.43 | 0.72 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| BOU2 | 1.43 | 0.72 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| BOUR | 1.43 | 0.72 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| DAV2 | 1.43 | 0.72 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| DAVO | 1.43 | 0.72 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| EPFL | 1.43 | 0.72 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| ETH2 | 1.43 | 0.72 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| ETHZ | 1.43 | 0.72 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| FALE | 1.43 | 0.72 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| FHNW | 1.43 | 0.72 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| FRI3 | 1.43 | 0.72 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| FRIC | 1.43 | 0.72 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| HABG | 1.43 | 0.72 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| HOH2 | 1.43 | 0.72 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| HOHT | 1.43 | 0.72 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| HUTT | 1.43 | 0.72 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| KALT | 1.43 | 0.72 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| KREU | 1.43 | 0.72 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| LOMO | 1.65 | 0.83 | 0.83 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| LUZE | 1.64 | 0.83 | 0.83 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| MAR2 | 1.43 | 0.83 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| MAR3 | 1.43 | 0.83 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| NEUC | 1.43 | 0.72 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| OALP | 1.43 | 0.72 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| PAYE | 1.43 | 0.72 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| SAA2 | 1.43 | 0.72 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| SAAN | 1.43 | 0.72 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| SAM2 | 1.43 | 0.72 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| SANB | 1.43 | 0.72 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| SAR2 | 1.43 | 0.72 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| SCHA | 1.43 | 0.72 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| STA2 | 1.43 | 0.72 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| STAB | 1.43 | 0.72 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| STCX | 1.43 | 0.72 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| STGA | 1.43 | 0.72 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| ZERM | 2.84 | 1.44 | 1.44 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| ZIM2 | 1.43 | 0.72 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| ZIMM | 1.43 | 0.72 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |

# ANNEXE N

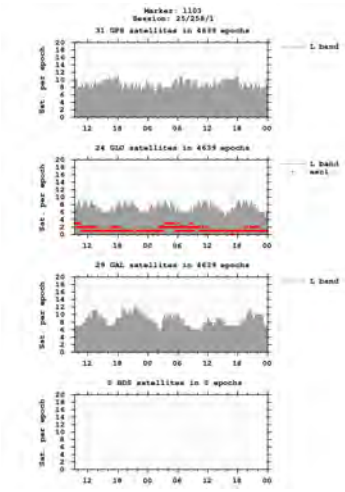
# ANALYSE DU FICHIER RINEX POINTS 1103

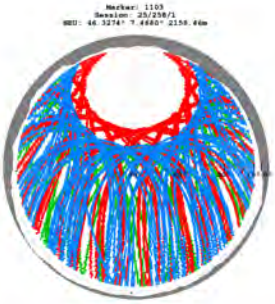
# GNSS observation file monitoring for 1103

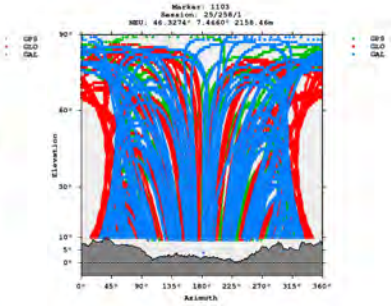
Last RINEX file: 11032581.25O
RINEX version: 3.05
Marker: 1103
Receiver: 1J1C7O7U JAVAD TR_3N ALPHA2 4.6
Antenna: STXSA1100 STXM

- "UseEp": The usable epoch is introduced if four or more satellites are observed with the minimum of two frequencies.
- Cycle slip detection algorithm is based on Melbourne-Wübbena and geometry-free LC.

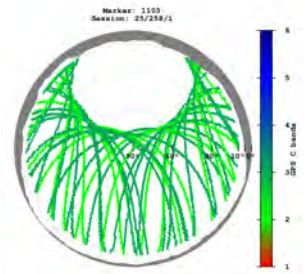
## Satellites

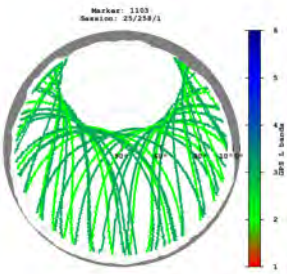


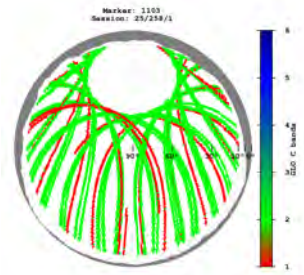


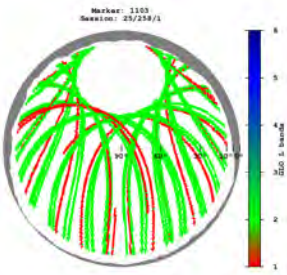


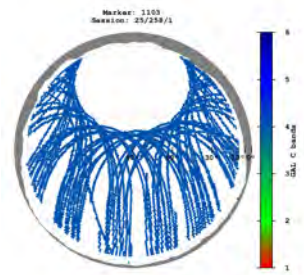
## Bands

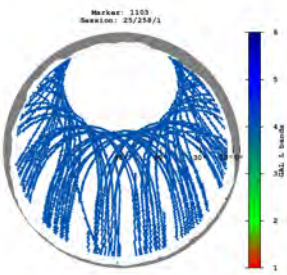


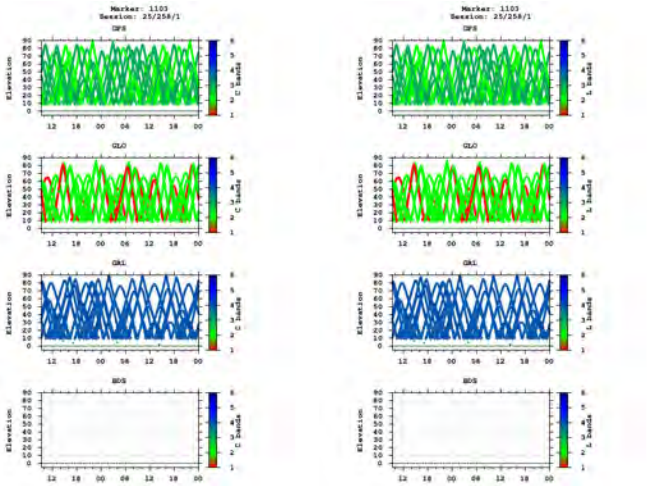


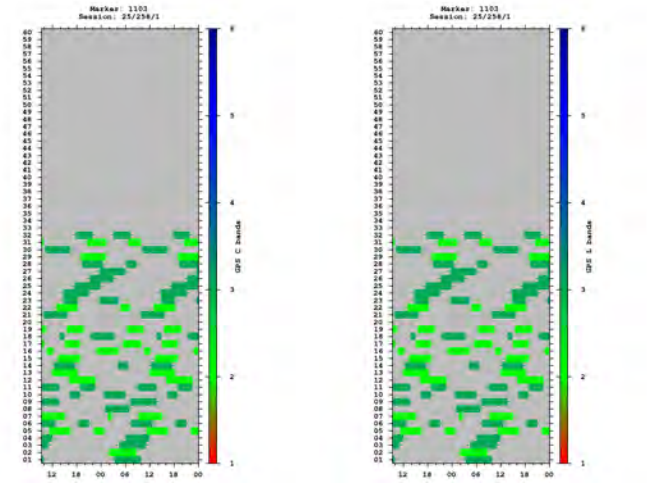


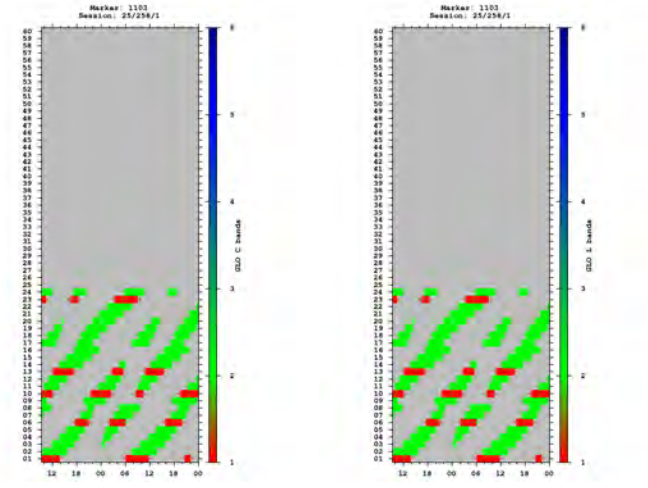


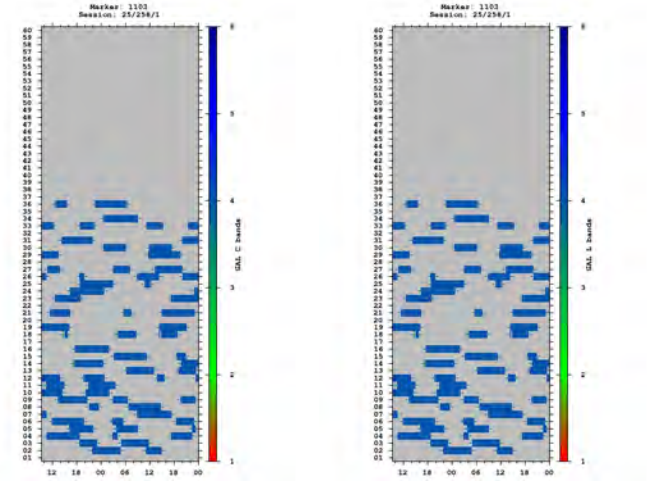




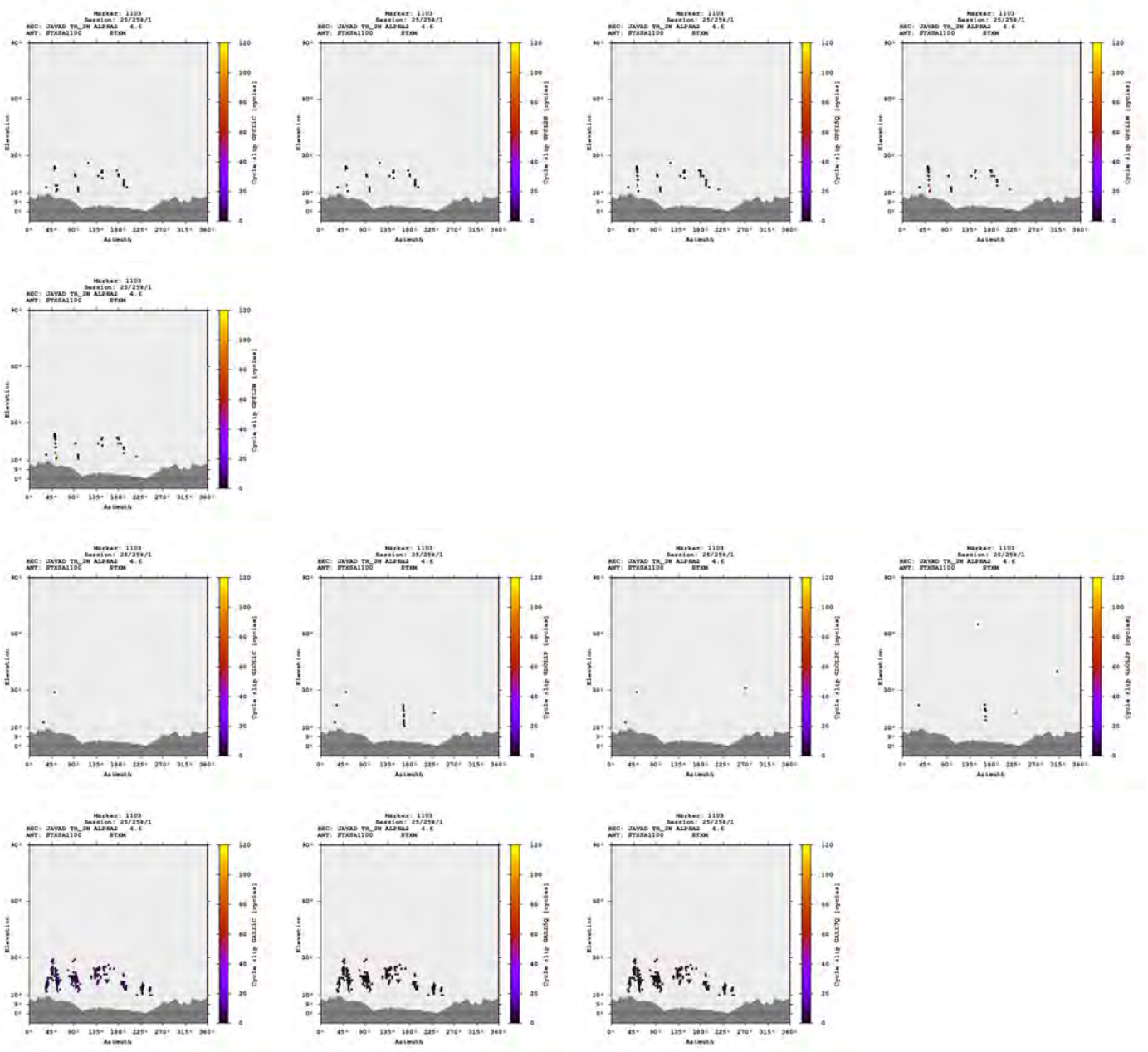




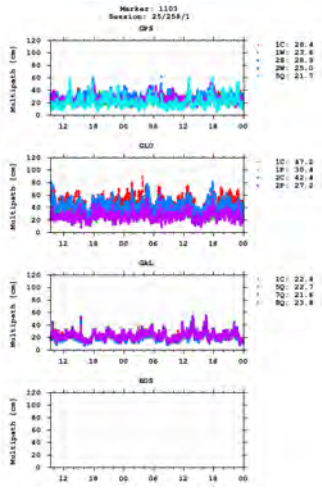


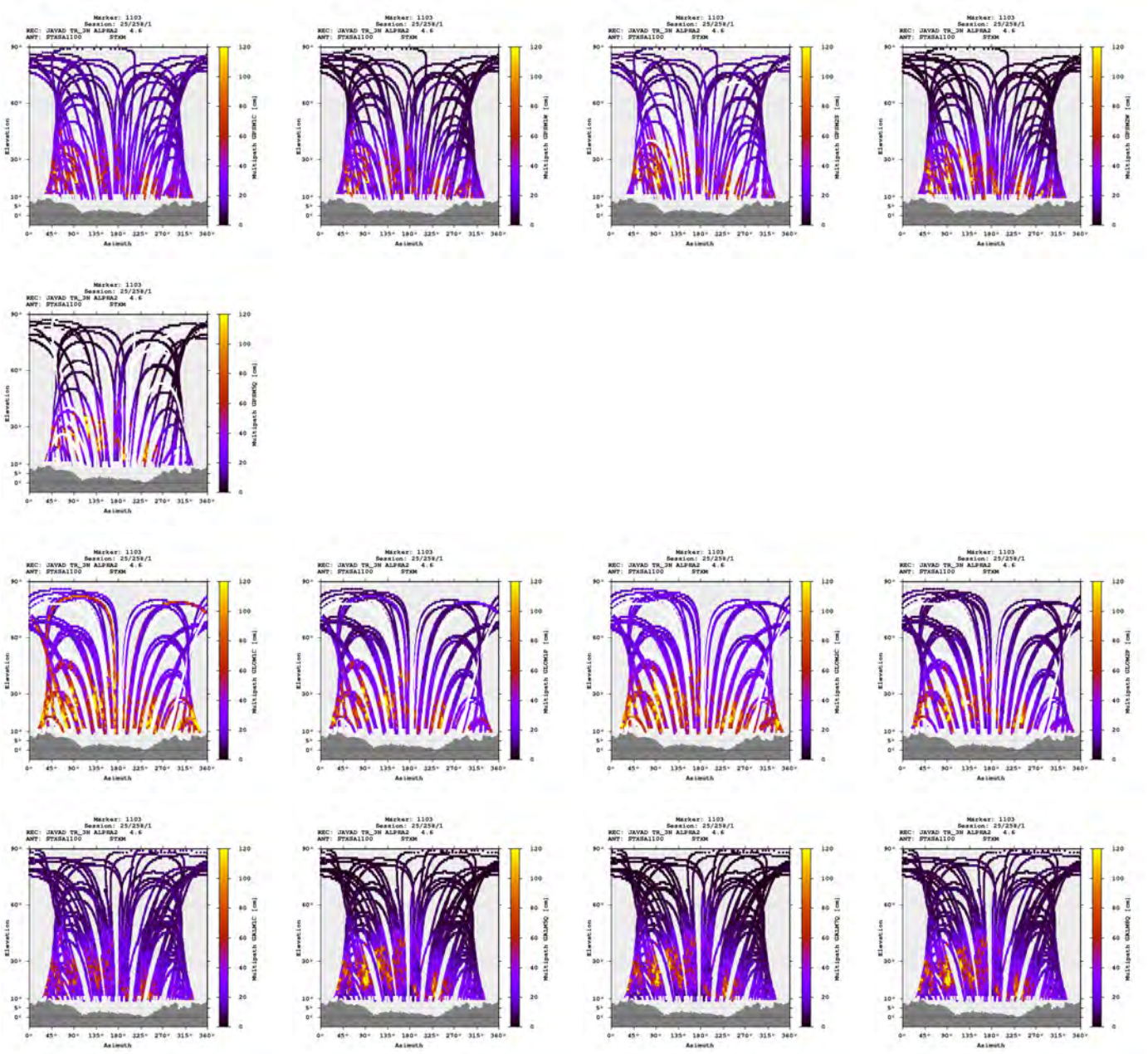


**Cycle slips**



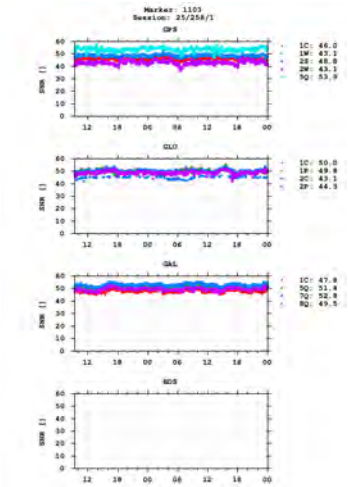
**Multipath**

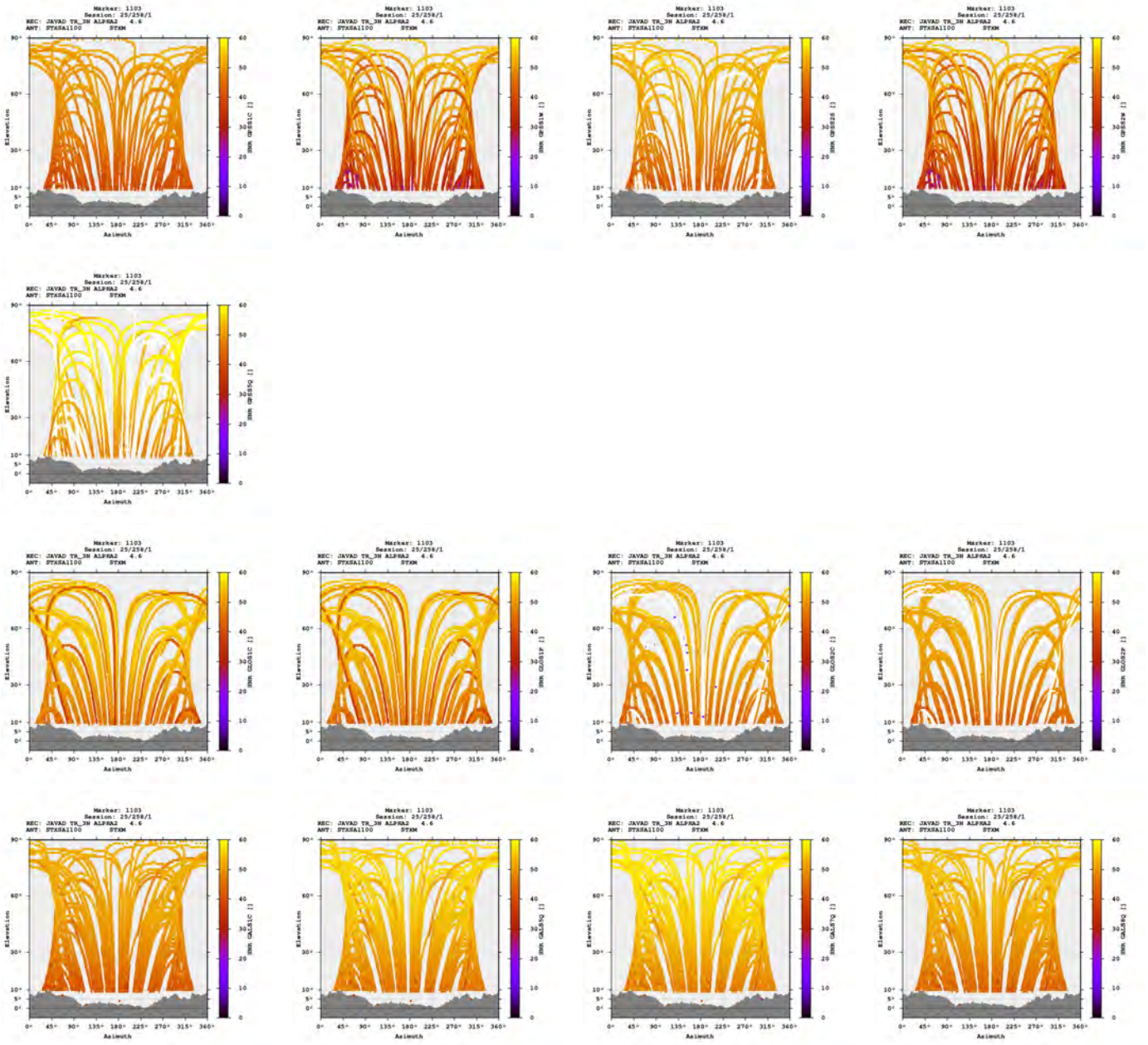




- The multipath is estimated as a standard deviation over a sequence of consecutive epochs.

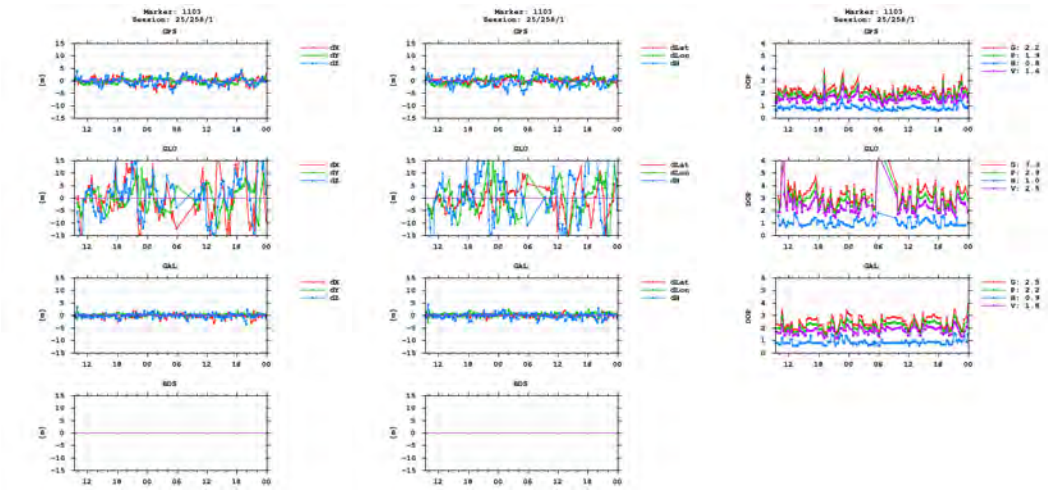
### Signal-to-noise ratio





## Estimates

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2025-09-15 09:20:30 | GPS | 4376143.6084 | 573490.8629 | 4592012.4640 | 46.327384197 | 7.466029432 | 2158.2670 |
| 2025-09-15 09:20:30 | GLO | 4376144.9708 | 573490.6473 | 4592013.1538 | 46.327380098 | 7.466024660 | 2159.9630 |
| 2025-09-15 09:20:30 | GAL | 4376143.6042 | 573491.1383 | 4592012.4819 | 46.327384103 | 7.466032983 | 2158.3017 |



## Program info

G-Nut/Anubis Free [3.10] Mar 19 2025 09:09:21 (Rev: 4538)

# ANNEXE O

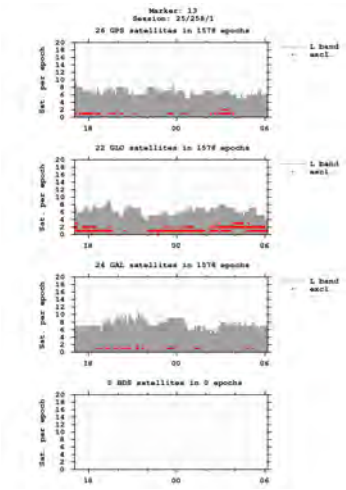
# ANALYSE DU FICHIER RINEX POINTS 13

# GNSS observation file monitoring for 13__

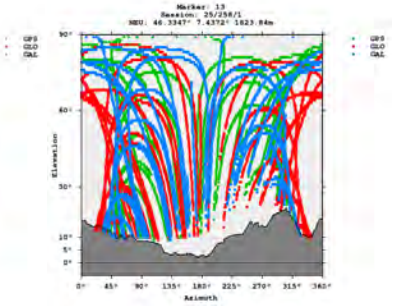
Last RINEX file: 13__2581.25O
RINEX version: 3.05
Marker: 13
Receiver: 0LDNLXAH JAVAD TR_3N ALPHA2 4.6
Antenna: STXSA1100 STXM

- "UseEp": The usable epoch is introduced if four or more satellites are observed with the minimum of two frequencies.
- Cycle slip detection algorithm is based on Melbourne-Wübbena and geometry-free LC.

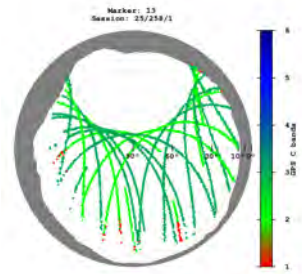
## Satellites

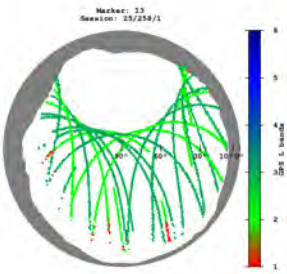


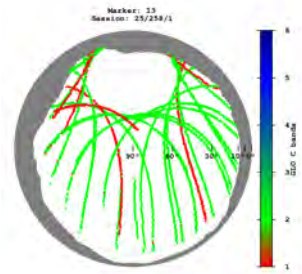


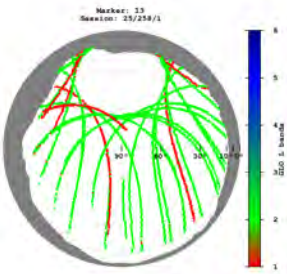


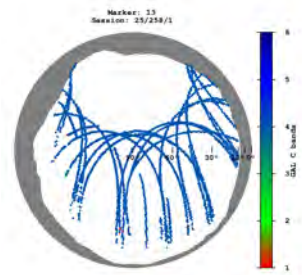
## Bands

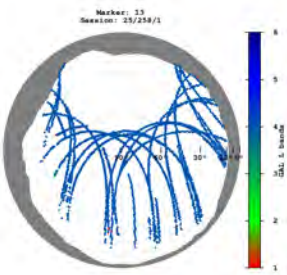


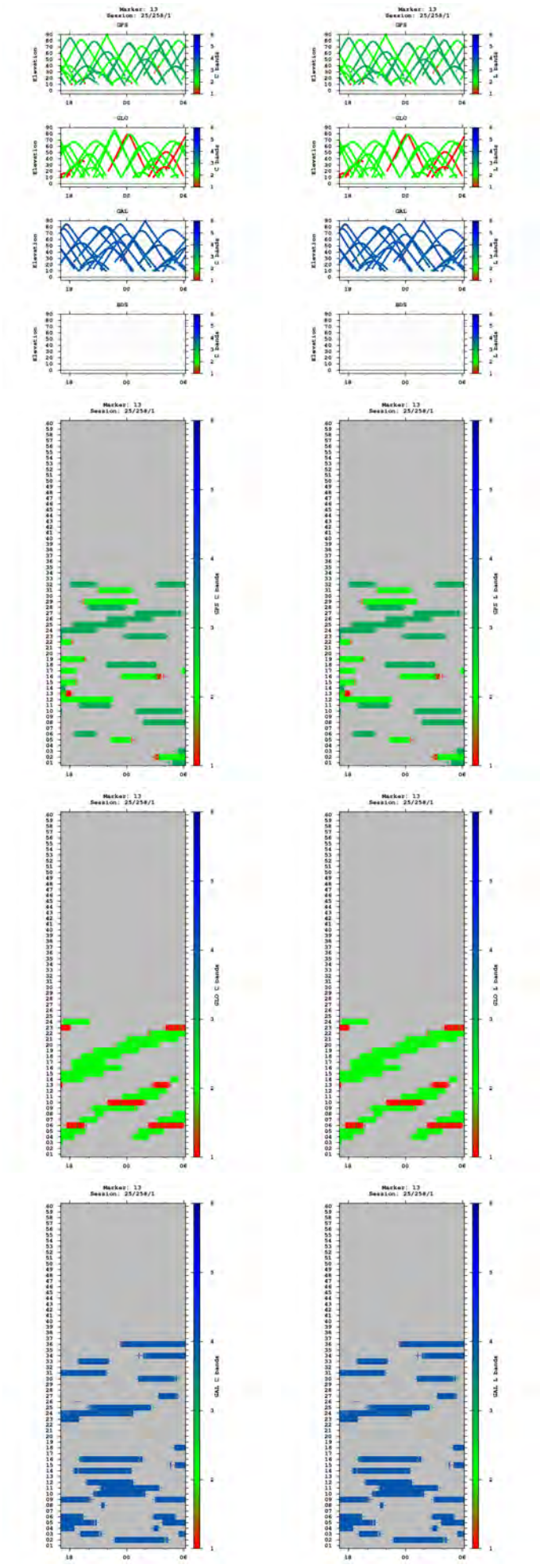




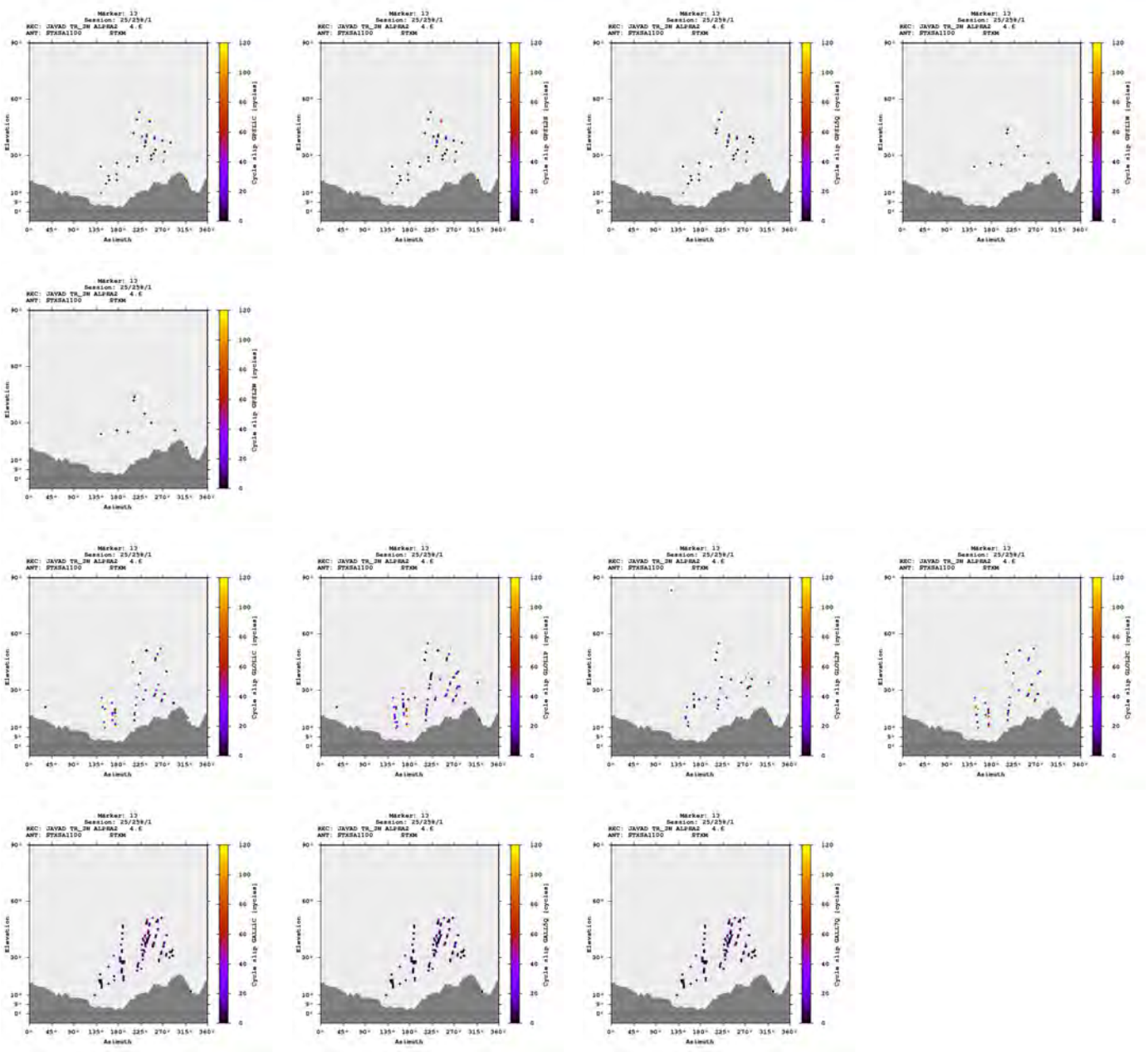




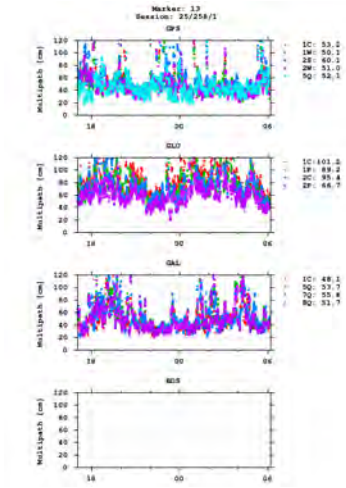


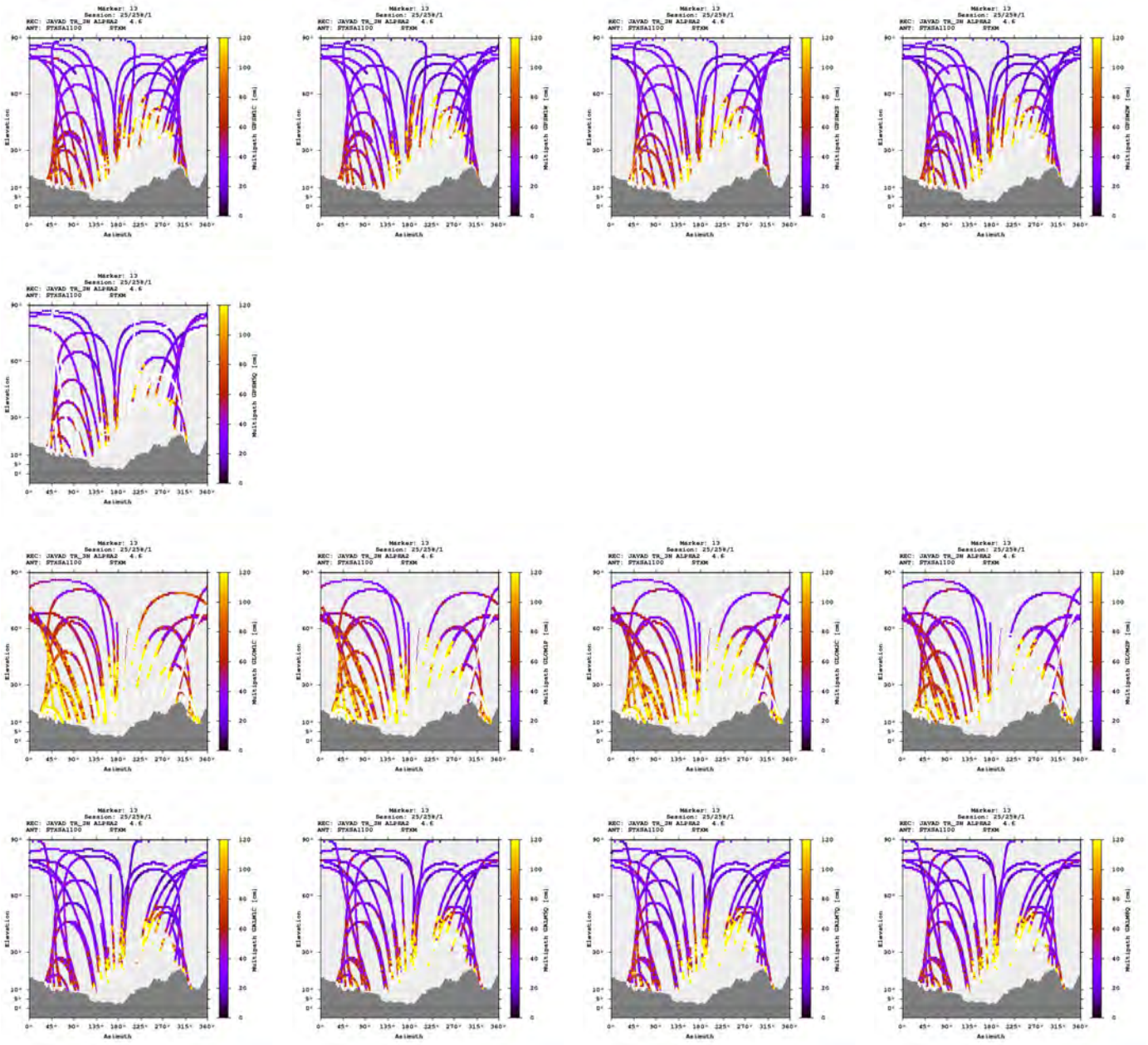


**Cycle slips**



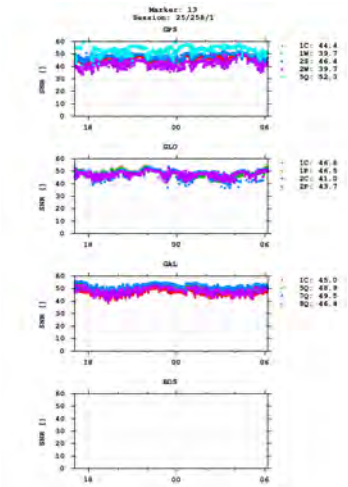
**Multipath**

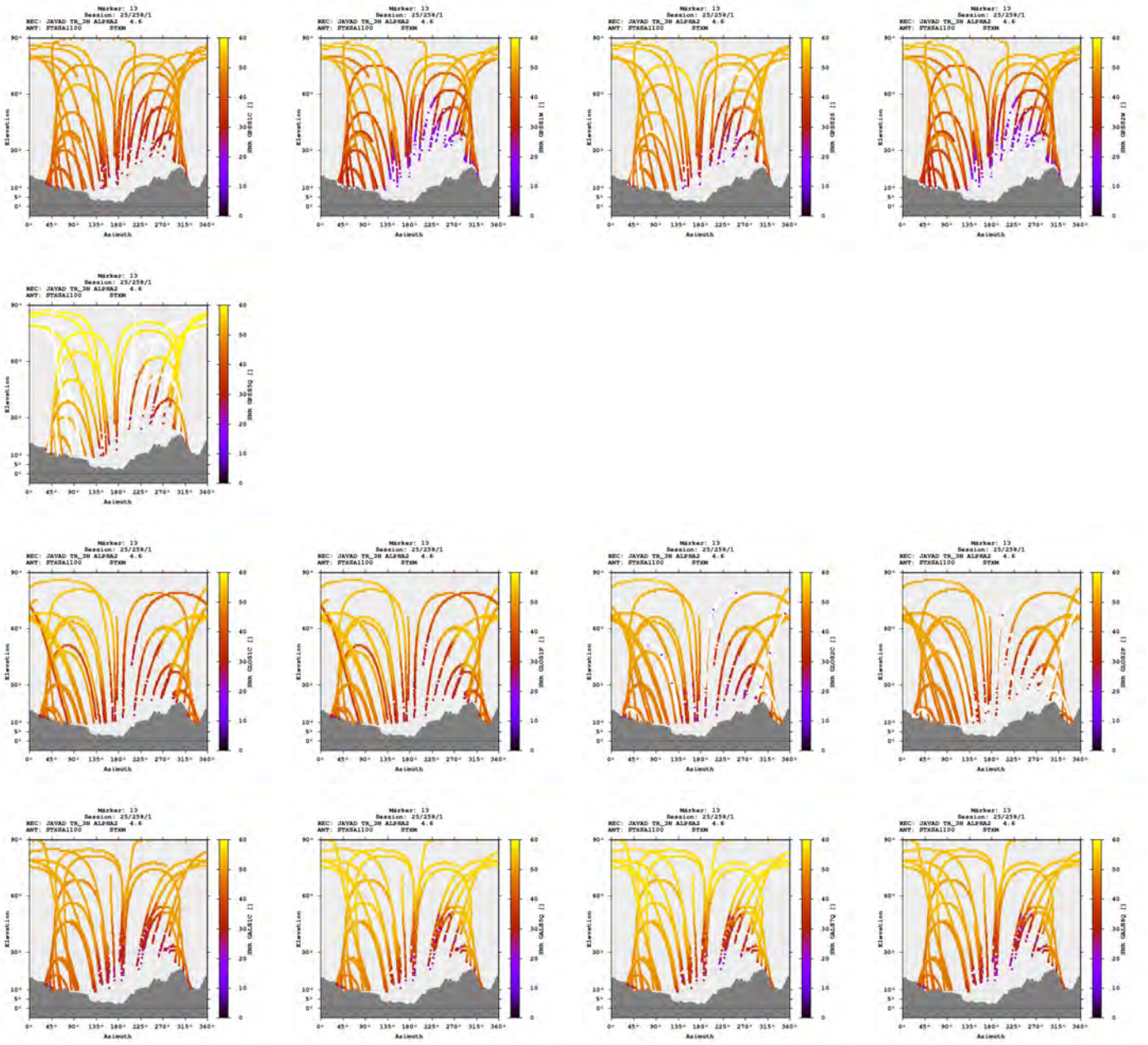




- The multipath is estimated as a standard deviation over a sequence of consecutive epochs.

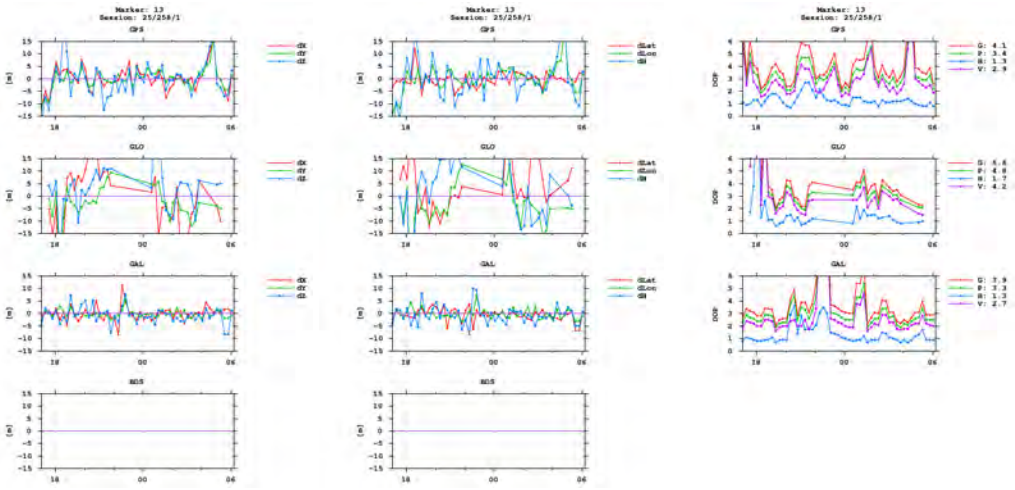
### Signal-to-noise ratio





## Estimates

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2025-09-15 17:03:00 | GPS | 4375618.7267 | 571181.8258 | 4592332.0547 | 46.334703101 | 7.437190613 | 1823.7473 |
| 2025-09-15 17:03:00 | GLO | 4375618.7519 | 571179.9941 | 4592337.2281 | 46.334736051 | 7.437164604 | 1826.8992 |
| 2025-09-15 17:03:00 | GAL | 4375618.9425 | 571181.8520 | 4592331.9052 | 46.334700204 | 7.437188204 | 1823.3452 |



## Program info

G-Nut/Anubis Free [3.10] Mar 19 2025 09:09:21 (Rev: 4538)

# ANNEXE P

# RAPPORT LIGNE DE BASE CALCUL LEICA INFINITY

**Leica Geosystems AG**
Heinrich Wild Strasse
CH-9435 Heerbrugg
St. Gallen, Switzerland

Phone: + 41 71 727 3131
Fax: + 41 71 727 4674

- when it has to be right

# Rapport Traitement GNSS

Rapport créé le : 21.01.2026 19:16:18

## Détails du projet

| Général | | Détails du client | | Système de coordonnées principal | |
|---|---|---|---|---|---|
| Nom du projet : | 2025_GNSS_S2 | Nom du client : | - | Nom de système de coordonnées : | LV95 |
| Propriétaire : | - | Contact : | - | Type de transformation : | Classique 3D |
| Géomètre référent : | - | N. : | - | Distribution des résidus : | Aucun |
| Créé le : | 17.11.2025 11:09:51 | E-mail : | - | Ellipsoïde : | Bessel |
| Dernier accès : | 21.01.2026 19:10:58 | Site Internet : | - | Type de projection : | Personnalisé |
| Logiciel d'application | Infinity 5.0.0.46612 | | | Modèle de géoïde : | CH1903+ |
| | | | | Modèle SCSP : | - |

| | |
|---|---|
| Chemin : | D:_MDT\TM\8_GNSS\2025\2025_GNSS_S2\2025_GNSS_S2.iprj |
| Taille : | 3 758.0 Mo |
| Commentaires : | - |

# Ligne de base 1104 - 12

## Paramètres de traitement (16.09.2025 17:56:27 - 17.09.2025 07:52:27)

| Données | Sélectionné | Utilisé | Commentaires |
|---|---|---|---|
| Angle de coupure: | 10° | 10° | |
| Fréquence: | Automatique | L1/E1/L2/L5/E5a/E5b/E5ab | |
| Fréquence d'échantillonnage: | Utiliser tout | 15.00 s | |
| Système satellitaire: | GPS/GLONASS/Galileo/Beidou | GPS/GLONASS/Galileo | |
| Type d'éphéméride: | Précises | Précises | |
| Jeu de calibration d'antennes: | Geo++ GmbH Absolu | Geo++ GmbH Absolu | |

**Stratégie de traitement**

| | | |
|---|---|---|
| Type de solution: | Fixé sur la phase | Fixé sur la phase |
| Optimisation de solution: | Automatique | Aucun |
| Fréquence à utiliser pour iono réduit: | Automatique | Automatique |
| Modèle troposphérique: | Automatique | VMF avec modèle GPT2 |
| Modèle ionosphérique: | Automatique | Calculé |

**Paramètres**

| | |
|---|---|
| Distance min. pour iono réduit: | 15 km |
| Levée d'ambiguïtés possible jusqu'à: | 300 km |
| Durée min. pour solution flottante (statique): | 00:05:00 |

**Paramètres de temps**

| | |
|---|---|
| Format de temps : | HH:mm:ss |
| Système de temps : | Heure locale |
| Secondes intercalaires : | 18 |

## Résultats Ligne de base: 1104 - 12

### Acquisition

| | |
|---|---|
| Heure de début - Heure de fin: | 16.09.2025 17:56:42 - 17.09.2025 07:52:27 |
| Durée: | 13:55:45 |

### Antennes

| | **Définir comme référence - 1104** | **Définir comme mobile - 12** |
|---|---|---|
| Nom de récepteur / NS: | JAVAD TR_3N ALPHA2 / 1IUPKFV6WHMWH0T4F2MW | JAVAD TR_3N ALPHA2 / 1IYFOHV48N2UP0T4F2MW |
| Nom d'Antenne / NS: | STXSA1100 STXM / - | STXSA1100 STXM / - |
| Décalage du porteur: | - | - |
| Lecture altimétrique: | 0.3353 m | 0.0935 m |
| Hauteur d'antenne: | 0.3353 m | 0.0935 m |

### Décalage de centre de phase

| | **Définir comme référence - STXSA1100 STXM** | | **Définir comme mobile - STXSA1100 STXM** | |
|---|---|---|---|---|
| **GPS** | **L1** | **L2** | **L1** | **L2** |
| Est | 0.0005 m | 0.0000 m | 0.0005 m | 0.0000 m |
| Nord | 0.0000 m | 0.0002 m | 0.0000 m | 0.0002 m |
| Haut | 0.0970 m | 0.0936 m | 0.0970 m | 0.0936 m |

| **GLONASS** | **L1** | **L2** | **L1** | **L2** |
|---|---|---|---|---|
| Est | 0.0005 m | 0.0002 m | 0.0005 m | 0.0002 m |
| Nord | -0.0002 m | 0.0002 m | -0.0002 m | 0.0002 m |
| Haut | 0.0974 m | 0.0939 m | 0.0974 m | 0.0939 m |

### Coordonnées

| | **Définir comme référence - 1104** | **Définir comme mobile - 12** | | **Définir comme référence - 1104** | **Définir comme mobile - 12** |
|---|---|---|---|---|---|
| Classe du point: | Navigué RTK | PT Fixé | | | |
| Latitude WGS84: | 46° 20' 31.48" N | 46° 20' 51.74" N | Est: | 2 598 924.2268 m | 2 600 023.6940 m |
| Longitude WGS84: | 7° 25' 28.81" E | 7° 26' 20.22" E | Nord: | 1 132 298.7538 m | 1 132 924.2649 m |
| Hauteur ellipsoïdale WGS84: | 2 259.5068 m | 1 864.8380 m | Altitude ortho: | 2 207.2742 m | 1 812.5953 m |
| X WGS84 Cartésien: | 4 375 453.8205 m | 4 374 592.4738 m | | | |
| Y WGS84 Cartésien: | 570 188.0981 m | 571 184.7441 m | | | |
| Z WGS84 Cartésien: | 4 593 213.7267 m | 4 593 360.1622 m | | | |

### Vecteur et Qualité de la ligne de base - WGS84

| | | | |
|---|---|---|---|
| ΔLatitude: | 0° 00' 20.26" | ET ΔLatitude: | 0.0001 m |
| ΔLongitude: | 0° 00' 51.41" | ET ΔLongitude: | 0.0000 m |
| ΔAltitude: | -394.6688 m | ET ΔAltitude: | 0.0001 m |
| ΔX: | -866.7864 m | ET ΔX: | 0.0001 m |
| ΔY: | 997.2606 m | ET ΔY: | 0.0000 m |
| ΔZ: | 143.5680 m | ET ΔZ: | 0.0001 m |
| Dist. pente: | 1 329.0821 m | ET Dist. pente: | 0.0001 m |

| | | | |
|---|---|---|---|
| M0: | 0.5050 m | CQ 1D: | 0.0001 m |
| Q11: | 0.00000003 | CQ 2D: | 0.0001 m |
| Q12: | 0.00000000 | CQ 3D: | 0.0001 m |
| Q22: | 0.00000001 | | |
| Q13: | 0.00000002 | | |
| Q23: | 0.00000000 | | |
| Q33: | 0.00000003 | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Fréquence: | L1/E1/L2/L5/E5a/E5b/E5ab | GDOP: | 1.6 - 4.9 | SV GPS: | 10/10 |
| Optimisation de solution: | Aucun | PDOP: | 1.1 - 3.0 | SV GLONASS: | 7/7 |
| Type de solution: | Fixé sur la phase | HDOP: | 0.5 - 1.3 | SV Beidou: | - |
| | | VDOP: | 0.9 - 2.7 | SV Galileo: | 10/10 |
| | | | | SV QZSS: | - |

Type d'éphéméride:

| | |
|---|---|
| GPS | Précises |
| GLONASS | Précises |
| Galileo | Précises |

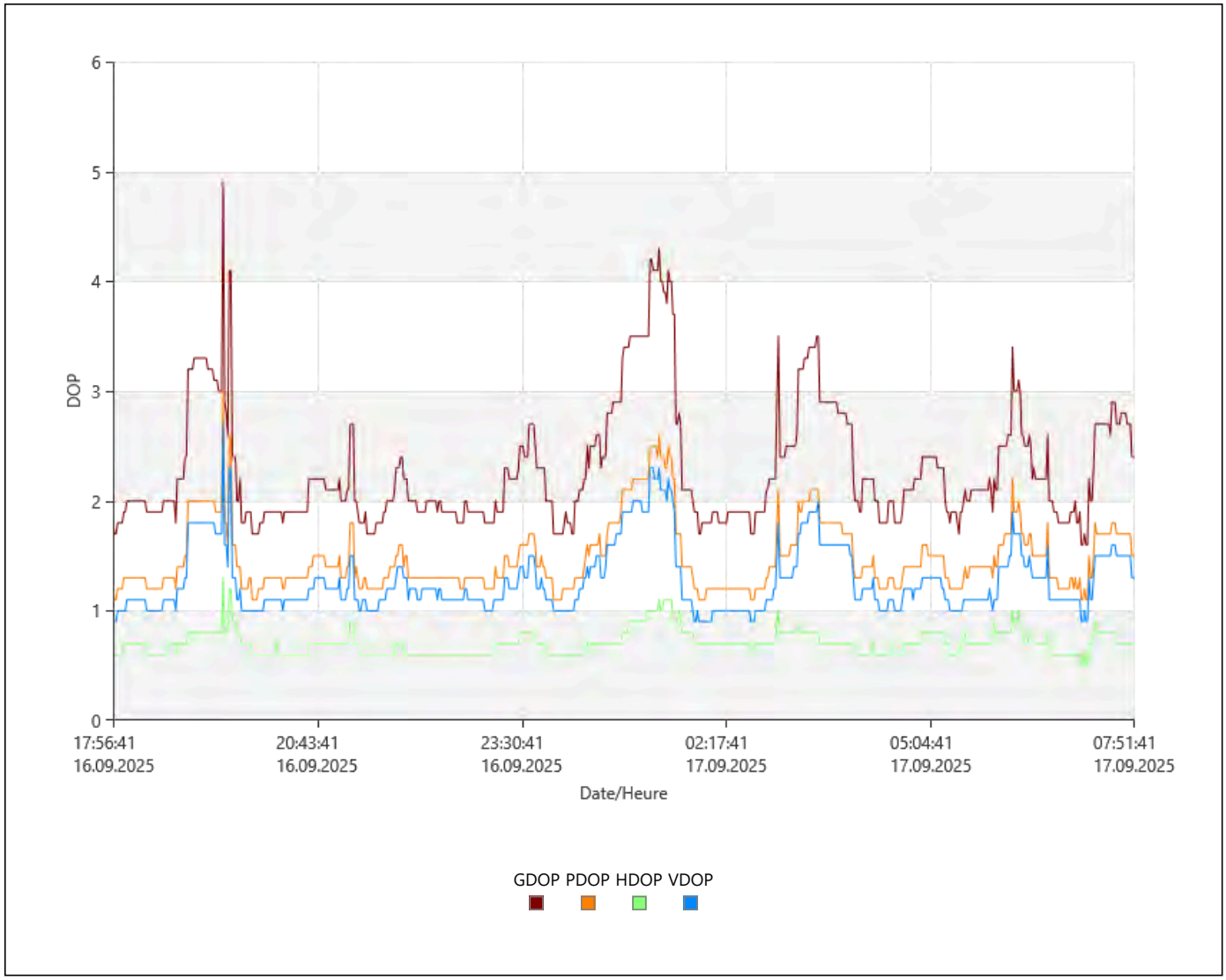
## Info sur le traitement (16.09.2025 17:56:27 - 17.09.2025 07:52:27)

| | |
|---|---|
| Date/Heure de traitement: | 18.11.2025 09:29:53 |

### Satellites

| Système satellitaire | Utilisé | Désactivés manuellement |
|---|---|---|
| GPS | G01 G02 G03 G05 G06 G08 G10 G11 G12 G13 G14 G15 G16 G17 G18 G19 G22 G23 G24 G25 G26 G27 G28 G29 G30 G31 G32 | - |
| GLONASS | R04 R05 R07 R08 R09 R11 R12 R14 R15 R16 R17 R18 R19 R20 R21 R22 R24 | - |
| Beidou | - | C02 C05 C06 C07 C08 C09 C10 C11 C12 C13 C14 C16 C19 C20 C21 C22 C23 C24 C25 C26 C27 C28 C29 C30 C32 C33 C34 C35 C36 C37 C38 C39 C40 C41 C42 C43 C44 C45 C47 C48 C49 C50 C58 C60 |
| Galileo | E02 E04 E06 E07 E09 E10 E11 E12 E13 E14 E16 E18 E19 E21 E23 E24 E25 E26 E27 E29 E30 E31 E33 E36 | - |

**SV poursuivis**




## Statistiques observation

Époques communes: 3344

**GPS observations**

| Fréquence | Utilisé | Rejeté |
|---|---|---|
| L1 | 22 300 | 52 |
| L2 | 22 224 | 108 |
| L5 | 12 845 | 906 |

**GLONASS observations**

| Fréquence | Utilisé | Rejeté |
|---|---|---|
| L1 | 14 853 | 70 |
| L2 | 14 854 | 68 |

**Galileo observations**

| Fréquence | Utilisé | Rejeté |
|---|---|---|
| E1 | 24 515 | 55 |
| E5a | 24 500 | 67 |
| E5b | 24 501 | 66 |
| E5ab | 24 445 | 65 |

## Statistiques Ambiguïtés

| Nombre d'ambiguïtés | GPS | GLONASS | Galileo |
|---|---|---|---|
| Fixés | 249 | 107 | 252 |
| Total | 313 | 145 | 319 |
| Fixé de façon indépendante | 1 669 | 1 669 | 1 669 |
| Fixation possible de façon indépendante | 1 675 | 1 675 | 1 675 |

Temps moyen entre fixations indépendantes: 00:00:15

| % d'époques | GPS | | | GLONASS | | Galileo | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | L1 [%] | L2 [%] | L5 [%] | L1 [%] | L2 [%] | E1 [%] | E5a [%] | E5b [%] | E5ab [%] |
| Fixés | 99.79 | 96.03 | 93.47 | 99.54 | 99.58 | 99.72 | 99.72 | 99.72 | 99.72 |
| Non fixé | 0.19 | 0.12 | 6.53 | 0.41 | 0.39 | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.28 |
| Non fixé - contradiction | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Non fixé - phase manquante | 0.00 | 3.84 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

| État | De l'époque | À l'époque | Durée |
|---|---|---|---|
| Fixés | 16.09.2025 17:56:42 | 17.09.2025 07:52:27 | 13:55:45 |

### Modèle ionosphérique calculé

| | |
|---|---|
| Modèles: | 4 |
| Fréquence d'échantillonnage: | 30 s |
| Hauteur de couche individuelle: | 350 km |

**Modèle 1**

| | | | |
|---|---|---|---|
| Latitude origine: | 46° 20' 31.42" N | Valide depuis l'époque: | 16.09.2025 10:27:25 |
| Longitude origine: | 7° 25' 28.75" E | Valide jusqu'à l'époque: | 16.09.2025 16:12:58 |
| Date/Heure origine: | 16.09.2025 10:27:25 | | |

| Latitude Deg. | Temps Deg. | Valeur | EMQ |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 1.6423823244 | 0.0068999468 |
| 0 | 1 | 0.2743885106 | 0.0062600464 |
| 0 | 2 | -0.0912091743 | 0.0018087998 |
| 1 | 0 | -0.3803276191 | 0.0044570053 |
| 1 | 1 | 0.0811634350 | 0.0024449059 |

**Modèle 2**

| | | | |
|---|---|---|---|
| Latitude origine: | 46° 20' 31.42" N | Valide depuis l'époque: | 16.09.2025 16:12:58 |
| Longitude origine: | 7° 25' 28.75" E | Valide jusqu'à l'époque: | 16.09.2025 21:58:30 |
| Date/Heure origine: | 16.09.2025 16:12:58 | | |

| Latitude Deg. | Temps Deg. | Valeur | EMQ |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 1.8569748143 | 0.0055721765 |
| 0 | 1 | 0.2078843817 | 0.0048562150 |
| 0 | 2 | -0.1498170685 | 0.0015616859 |
| 1 | 0 | -0.1986219004 | 0.0038357876 |
| 1 | 1 | -0.0037572081 | 0.0019690395 |

**Modèle 3**

| | | | |
|---|---|---|---|
| Latitude origine: | 46° 20' 31.42" N | Valide depuis l'époque: | 16.09.2025 21:58:30 |
| Longitude origine: | 7° 25' 28.75" E | Valide jusqu'à l'époque: | 17.09.2025 03:44:03 |
| Date/Heure origine: | 16.09.2025 21:58:30 | | |

| Latitude Deg. | Temps Deg. | Valeur | EMQ |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 1.1915166081 | 0.0045784401 |
| 0 | 1 | -0.4926841384 | 0.0041539438 |
| 0 | 2 | 0.0961662373 | 0.0013483279 |
| 1 | 0 | -0.0378061516 | 0.0033164148 |
| 1 | 1 | -0.0487656186 | 0.0019405486 |

**Modèle 4**

| | | | |
|---|---|---|---|
| Latitude origine: | 46° 20' 31.42" N | Valide depuis l'époque: | 17.09.2025 03:44:03 |
| Longitude origine: | 7° 25' 28.75" E | Valide jusqu'à l'époque: | 17.09.2025 09:29:36 |
| Date/Heure origine: | 17.09.2025 03:44:03 | | |

| Latitude Deg. | Temps Deg. | Valeur | EMQ |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 1.1238823125 | 0.0089993138 |
| 0 | 1 | -0.6937940984 | 0.0078005777 |
| 0 | 2 | 0.3416079333 | 0.0023740851 |
| 1 | 0 | 0.0535634501 | 0.0068100981 |
| 1 | 1 | -0.1017885405 | 0.0033784556 |

# ANNEXE Q

# COMPARAISON BERNESE VS LEICA INFINITY

Trinet+, Compensation 3D  Version 7.2

Projet : 2025_ZEUZIER_BERNESE
Réseau : BERVSLEICA

Statistique :
==========
Observations : 120
Inconnues : 63
Conditions : 0
Surabondance : 57

Station. terr. : 0
Sessions GNSS : 2
Points fixes: 0  Réseau libre
Points nouveaux: 20

Itérations = 10 (3)

Test global
==========
Ecart type unitaire a priori = 1.00
Ecart type unitaire a post. = 1.00
Probabilité que Q soit plus petit que Q^ = 52.2 %

Delta: 5.1

| Erreurs moyennes des observations : | Nombre | em int Gr. | em a priori | em a posteriori | Quot |
|---|---|---|---|---|---|
| Observation GNSS Y: | 40 | 2.5 mm | 2.5 mm | 2.30 mm | 0.91 |
| Observation GNSS X: | 40 | 2.5 mm | 2.5 mm | 2.03 mm | 0.80 |
| Observation GNSS Z: | 38 | 5.0 mm | 5.0 mm | 6.55 mm | 1.30 |
| | 2 | 9999.0 mm | 9999.0 mm | 22.92 mm | 0.00 |

Sessions GNSS
==========

| Paramètres : | TY | TX | TZ | RY | RX | RZ | EYX | EZ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| BERN2025 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| LEICA2025 | + | + | + | - | - | - | - | - |

Centre de gravité (coord) : Y = 98388.2101 X = 206118.1730 Z = 2671.5128
Centre de gravité (obs) : Y = 98388.2101 X = 206118.1733 Z = 2671.5084

| Nom session | Nbr Pts | TY [m] | TX [m] | TZ [m] |
|---|---|---|---|---|
| BERN2025 | 20 | - | - | - |
| LEICA2025 | 20 | -0.0001 ± 0.8mm | 0.0006 ± 0.8mm | -0.0110 ± 1.7mm |

| Nom session | Nbr Pts | RY [cc] | RX [cc] | RZ [cc] |
|---|---|---|---|---|
| BERN2025 | 20 | - | - | - |
| LEICA2025 | 20 | - | - | - |

| Nom session | Nbr Pts | EYX [ppm] | EZ [ppm] |
|---|---|---|---|
| BERN2025 | 20 | - | - |
| LEICA2025 | 20 | - | - |

Nouveaux points:
==========

| Point Nr. | Y [m] | X [m] | Z [m] | emY [mm] | emX [mm] | emZ [mm] | DY [mm] | DX [mm] | DZ [mm] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 11 | 99853.6551 | 199754.6354 | 3004.2576 | 1.828 | 1.828 | 3.648 | 0.252 | -0.265 | 3.234 |
| 1101 | 98700.2877 | 201366.0148 | 3342.0074 | 1.828 | 1.828 | 3.648 | -0.800 | -0.486 | 2.788 |
| 1102 | 101796.9373 | 199915.6574 | 3356.8013 | 1.828 | 1.828 | 3.648 | 0.183 | -0.499 | 1.578 |
| 1103 | 102309.3376 | 197664.4690 | 3325.9944 | 1.828 | 1.828 | 3.648 | 0.348 | 0.389 | -0.916 |
| 1104 | 99122.6900 | 199296.6749 | 3434.0768 | 1.828 | 1.828 | 3.648 | 1.884 | -0.497 | 6.235 |
| 12 | 100223.7477 | 199924.2569 | 3033.7443 | 1.828 | 1.828 | 3.648 | -0.999 | 0.435 | 2.133 |
| 13 | 100087.3273 | 198477.6748 | 2991.7020 | 1.828 | 1.828 | 3.648 | 3.602 | 2.887 | 7.384 |
| 14 | 101453.8153 | 198939.8693 | 3093.9537 | 1.828 | 1.828 | 3.648 | -3.151 | -3.465 | 0.485 |
| 15 | 99315.3051 | 199990.5253 | 3009.7735 | 1.828 | 1.828 | 3.648 | 1.754 | 1.985 | -0.466 |
| 2 | 100424.4205 | 200123.0631 | 3101.0698 | 1.828 | 1.828 | 3.648 | -1.449 | -1.916 | 0.684 |
| 3 | 99862.3217 | 200494.3847 | 3032.8389 | 1.828 | 1.828 | 3.648 | -0.198 | -0.115 | 4.184 |
| 7 | 99997.7292 | 199907.0275 | 3000.6717 | 1.828 | 1.828 | 3.648 | -0.298 | -0.515 | 1.334 |
| EPFL | 33385.7471 | 219606.9847 | 1249.5885 | 1.828 | 1.828 | 3.648 | 0.248 | -0.778 | 6.087 |
| HABG | 157069.1234 | 244638.0209 | 1903.6536 | 1.828 | 1.828 | 3.648 | -0.442 | -1.160 | 11.142 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| HOH2 | 125166.1401 | 196829.1909 | 2104.5511 | 1.828 | 1.828 | 3.648 | 0.255 | 1.485 | 11.033 |
| MAR3 | 71758.0265 | 174922.8057 | 1703.2977 | 1.828 | 1.828 | 5.022 | -2.511 | 1.214 | 4.386 |
| PAYE | 62438.7962 | 251672.6855 | 1395.0368 | 1.828 | 1.828 | 3.648 | -2.022 | -0.982 | 14.728 |
| SAA2 | 89657.7045 | 218591.7378 | 2552.0333 | 1.828 | 1.828 | 5.022 | 2.044 | -0.902 | 4.330 |
| ZERM | 122931.2598 | 161466.8637 | 2944.3301 | 1.828 | 1.828 | 3.648 | 1.104 | -1.853 | -1.247 |
| ZIM2 | 102209.8314 | 258780.9121 | 1850.9597 | 1.828 | 1.828 | 3.648 | 0.901 | -0.788 | 8.035 |

Points des conditions de Helmert / Avec mise à jour
==========

| Point Nr. | Y [m] | X [m] | Z [m] | RY [mm] | RX [mm] | RZ [mm] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| EPFL | 33385.7471 | 219606.9847 | 1249.5885 | -0.000 | 0.000 | -0.000 |
| HABG | 157069.1234 | 244638.0209 | 1903.6536 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| HOH2 | 125166.1401 | 196829.1909 | 2104.5511 | 0.000 | -0.000 | -0.000 |
| MAR3 | 71758.0265 | 174922.8057 | 1703.2977 | 0.000 | -0.000 | -0.000 |
| PAYE | 62438.7962 | 251672.6855 | 1395.0368 | 0.000 | -0.000 | 0.000 |
| SAA2 | 89657.7045 | 218591.7378 | 2552.0333 | -0.000 | -0.000 | 0.000 |
| ZERM | 122931.2598 | 161466.8637 | 2944.3301 | -0.000 | -0.000 | 0.000 |
| ZIM2 | 102209.8314 | 258780.9121 | 1850.9597 | 0.000 | -0.000 | -0.000 |

Ellipsoïde d'erreur moy. :
==========

| Point Nr. | A [mm] | B [mm] | C [mm] | Gis(A) [gon] | Z(A) [gon] | Gis(B) [gon] | Z(B) [gon] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 11 | 3.65 | 1.83 | 1.83 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| 1101 | 3.65 | 1.83 | 1.83 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| 1102 | 3.65 | 1.83 | 1.83 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| 1103 | 3.65 | 1.83 | 1.83 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| 1104 | 3.65 | 1.83 | 1.83 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| 12 | 3.65 | 1.83 | 1.83 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| 13 | 3.65 | 1.83 | 1.83 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| 14 | 3.65 | 1.83 | 1.83 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| 15 | 3.65 | 1.83 | 1.83 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| 2 | 3.65 | 1.83 | 1.83 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| 3 | 3.65 | 1.83 | 1.83 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| 7 | 3.65 | 1.83 | 1.83 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| EPFL | 3.65 | 1.83 | 1.83 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| HABG | 3.65 | 1.83 | 1.83 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| HOH2 | 3.65 | 1.83 | 1.83 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| MAR3 | 5.02 | 1.83 | 1.83 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| PAYE | 3.65 | 1.83 | 1.83 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| SAA2 | 5.02 | 1.83 | 1.83 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| ZERM | 3.65 | 1.83 | 1.83 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| ZIM2 | 3.65 | 1.83 | 1.83 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |

Fiabilité externe :
==========

| Point Nr. | NA [mm] | Gis(NA) [gon] | Z(NA) [gon] | Observation responsable Pt station | Pt visé | Type |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 11 | 19.67 | vertic. | 200.00 | 11 | BERN2025 | GNSSZ |
| 1101 | 19.67 | vertic. | 200.00 | 1101 | BERN2025 | GNSSZ |
| 1102 | 19.67 | vertic. | 200.00 | 1102 | BERN2025 | GNSSZ |
| 1103 | 19.67 | vertic. | 200.00 | 1103 | BERN2025 | GNSSZ |
| 1104 | 19.67 | vertic. | 200.00 | 1104 | BERN2025 | GNSSZ |
| 12 | 19.67 | vertic. | 200.00 | 12 | BERN2025 | GNSSZ |
| 13 | 19.67 | vertic. | 200.00 | 13 | BERN2025 | GNSSZ |
| 14 | 19.67 | vertic. | 200.00 | 14 | BERN2025 | GNSSZ |
| 15 | 19.67 | vertic. | 200.00 | 15 | BERN2025 | GNSSZ |
| 2 | 19.67 | vertic. | 200.00 | 2 | BERN2025 | GNSSZ |
| 3 | 19.67 | vertic. | 200.00 | 3 | BERN2025 | GNSSZ |
| 7 | 19.67 | vertic. | 200.00 | 7 | BERN2025 | GNSSZ |
| EPFL | 19.67 | vertic. | 200.00 | EPFL | BERN2025 | GNSSZ |
| HABG | 19.67 | vertic. | 200.00 | HABG | BERN2025 | GNSSZ |
| HOH2 | 19.67 | vertic. | 200.00 | HOH2 | BERN2025 | GNSSZ |
| MAR3 | 50962.08 | vertic. | 200.00 | MAR3 | BERN2025 | GNSSZ |
| PAYE | 19.67 | vertic. | 200.00 | PAYE | BERN2025 | GNSSZ |
| SAA2 | 50962.08 | vertic. | 200.00 | SAA2 | BERN2025 | GNSSZ |
| ZERM | 19.67 | vertic. | 200.00 | ZERM | BERN2025 | GNSSZ |
| ZIM2 | 19.67 | vertic. | 200.00 | ZIM2 | BERN2025 | GNSSZ |

Observations GNSS

| Point Nr. | No | Type | Observ. [m] | v [mm] | wi | gi [mm] | em mes. [mm] | em a priori [mm] | em observ [mm] | comp zi | Nabla [mm] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| BERN2025 | | | | | | | | | | | |
| 2 | 1 | Y | 100424.421 | -1.5 | -0.8 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 2 | X | 200123.065 | -1.6 | -0.9 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 3 | Z | 3101.0691 | -3.7 | -1.1 | | 5.0 | 5.0 | 3.6 | 0.47 | 37.3 |
| 3 | 4 | Y | 99862.3220 | -0.3 | -0.2 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 5 | X | 200494.384 | 0.2 | 0.1 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 6 | Z | 3032.8347 | -0.2 | -0.1 | | 5.0 | 5.0 | 3.6 | 0.47 | 37.3 |
| 7 | 7 | Y | 99997.7295 | -0.3 | -0.2 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 8 | X | 199907.028 | -0.2 | -0.1 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 9 | Z | 3000.6704 | -3.0 | -0.9 | | 5.0 | 5.0 | 3.6 | 0.47 | 37.3 |
| 11 | 10 | Y | 99853.6549 | 0.2 | 0.1 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 11 | X | 199754.635 | 0.0 | 0.0 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 12 | Z | 3004.2543 | -1.1 | -0.3 | | 5.0 | 5.0 | 3.6 | 0.47 | 37.3 |
| 12 | 13 | Y | 100223.748 | -1.0 | -0.6 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 14 | X | 199924.256 | 0.7 | 0.4 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 15 | Z | 3033.7421 | -2.2 | -0.6 | | 5.0 | 5.0 | 3.6 | 0.47 | 37.3 |
| 13 | 16 | Y | 100087.323 | 3.6 | 2.1 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 17 | X | 198477.671 | 3.2 | 1.8 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 18 | Z | 2991.6946 | 3.1 | 0.9 | | 5.0 | 5.0 | 3.6 | 0.47 | 37.3 |
| 14 | 19 | Y | 101453.818 | -3.2 | -1.9 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 20 | X | 198939.872 | -3.1 | -1.8 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 21 | Z | 3093.9532 | -3.9 | -1.1 | | 5.0 | 5.0 | 3.6 | 0.47 | 37.3 |
| 15 | 22 | Y | 99315.3034 | 1.7 | 1.0 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 23 | X | 199990.523 | 2.3 | 1.3 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 24 | Z | 3009.7740 | -4.8 | -1.4 | | 5.0 | 5.0 | 3.6 | 0.47 | 37.3 |
| 1101 | 25 | Y | 98700.2886 | -0.9 | -0.5 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 26 | X | 201366.015 | -0.1 | -0.1 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 27 | Z | 3342.0047 | -1.6 | -0.5 | | 5.0 | 5.0 | 3.6 | 0.47 | 37.3 |
| 1102 | 28 | Y | 101796.937 | 0.2 | 0.1 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 29 | X | 199915.658 | -0.3 | -0.2 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 30 | Z | 3356.7998 | -2.8 | -0.8 | | 5.0 | 5.0 | 3.6 | 0.47 | 37.3 |
| 1103 | 31 | Y | 102309.337 | 0.3 | 0.2 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 32 | X | 197664.468 | 0.7 | 0.4 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 33 | Z | 3325.9953 | -5.2 | -1.5 | | 5.0 | 5.0 | 3.6 | 0.47 | 37.3 |
| 1104 | 34 | Y | 99122.6882 | 1.8 | 1.0 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 35 | X | 199296.675 | -0.2 | -0.1 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 36 | Z | 3434.0705 | 1.9 | 0.6 | | 5.0 | 5.0 | 3.6 | 0.47 | 37.3 |
| EPFL | 37 | Y | 33385.7468 | 0.3 | 0.2 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 38 | X | 219606.985 | -0.5 | -0.3 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 39 | Z | 1249.5824 | 1.8 | 0.5 | | 5.0 | 5.0 | 3.6 | 0.47 | 37.3 |
| HABG | 40 | Y | 157069.123 | -0.5 | -0.3 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 41 | X | 244638.022 | -0.9 | -0.5 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 42 | Z | 1903.6424 | 6.8 | 2.0 | | 5.0 | 5.0 | 3.6 | 0.47 | 37.3 |
| HOH2 | 43 | Y | 125166.139 | 0.2 | 0.1 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 44 | X | 196829.189 | 1.8 | 1.0 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 45 | Z | 2104.5401 | 6.7 | 1.9 | | 5.0 | 5.0 | 3.6 | 0.47 | 37.3 |
| MAR3 | 46 | Y | 71758.0290 | -2.5 | -1.4 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 47 | X | 174922.804 | 1.5 | 0.9 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 48 | Z | 1703.2933 | 0.0 | 0.0 | | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 0.00 | 50962.1 |
| PAYE | 49 | Y | 62438.7982 | -2.0 | -1.2 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 50 | X | 251672.686 | -0.7 | -0.4 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 51 | Z | 1395.0221 | 10.3 | 3.0 | | 5.0 | 5.0 | 3.6 | 0.47 | 37.3 |
| SAA2 | 52 | Y | 89657.7024 | 2.1 | 1.2 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 53 | X | 218591.738 | -0.6 | -0.3 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 54 | Z | 2552.0289 | 0.0 | 0.0 | | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 0.00 | 50962.1 |
| ZERM | 55 | Y | 122931.258 | 1.0 | 0.6 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 56 | X | 161466.865 | -1.6 | -0.9 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 57 | Z | 2944.3313 | -5.6 | -1.6 | | 5.0 | 5.0 | 3.6 | 0.47 | 37.3 |
| ZIM2 | 58 | Y | 102209.830 | 0.8 | 0.5 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 59 | X | 258780.912 | -0.5 | -0.3 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 60 | Z | 1850.9516 | 3.7 | 1.1 | | 5.0 | 5.0 | 3.6 | 0.47 | 37.3 |
| LEICA2025 | | | | | | | | | | | |
| 2 | 61 | Y | 100424.418 | 1.5 | 0.8 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 62 | X | 200123.062 | 1.6 | 0.9 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 63 | Z | 3101.0507 | 3.7 | 1.1 | | 5.0 | 5.0 | 3.6 | 0.47 | 37.3 |
| 3 | 64 | Y | 99862.3214 | 0.3 | 0.2 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 65 | X | 200494.385 | -0.2 | -0.1 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 66 | Z | 3032.8233 | 0.2 | 0.1 | | 5.0 | 5.0 | 3.6 | 0.47 | 37.3 |
| 7 | 67 | Y | 99997.7288 | 0.3 | 0.2 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 68 | X | 199907.028 | 0.2 | 0.1 | | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 69 | Z | 3000.6534 | 3.0 | 0.9 | 5.0 | 5.0 | 3.6 | 0.47 | 37.3 |
| 11 | 70 | Y | 99853.6552 | -0.2 | -0.1 | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 71 | X | 199754.636 | -0.0 | -0.0 | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 72 | Z | 3004.2411 | 1.1 | 0.3 | 5.0 | 5.0 | 3.6 | 0.47 | 37.3 |
| 12 | 73 | Y | 100223.746 | 1.0 | 0.6 | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 74 | X | 199924.258 | -0.7 | -0.4 | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 75 | Z | 3033.7267 | 2.2 | 0.6 | 5.0 | 5.0 | 3.6 | 0.47 | 37.3 |
| 13 | 76 | Y | 100087.330 | -3.6 | -2.1 | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 77 | X | 198477.678 | -3.2 | -1.8 | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 78 | Z | 2991.6897 | -3.1 | -0.9 | 5.0 | 5.0 | 3.6 | 0.47 | 37.3 |
| 14 | 79 | Y | 101453.812 | 3.2 | 1.9 | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 80 | X | 198939.867 | 3.1 | 1.8 | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 81 | Z | 3093.9344 | 3.9 | 1.1 | 5.0 | 5.0 | 3.6 | 0.47 | 37.3 |
| 15 | 82 | Y | 99315.3067 | -1.7 | -1.0 | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 83 | X | 199990.528 | -2.3 | -1.3 | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 84 | Z | 3009.7533 | 4.8 | 1.4 | 5.0 | 5.0 | 3.6 | 0.47 | 37.3 |
| 1101 | 85 | Y | 98700.2868 | 0.9 | 0.5 | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 86 | X | 201366.015 | 0.1 | 0.1 | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 87 | Z | 3341.9905 | 1.6 | 0.5 | 5.0 | 5.0 | 3.6 | 0.47 | 37.3 |
| 1102 | 88 | Y | 101796.937 | -0.2 | -0.1 | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 89 | X | 199915.658 | 0.3 | 0.2 | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 90 | Z | 3356.7831 | 2.8 | 0.8 | 5.0 | 5.0 | 3.6 | 0.47 | 37.3 |
| 1103 | 91 | Y | 102309.337 | -0.3 | -0.2 | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 92 | X | 197664.470 | -0.7 | -0.4 | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 93 | Z | 3325.9738 | 5.2 | 1.5 | 5.0 | 5.0 | 3.6 | 0.47 | 37.3 |
| 1104 | 94 | Y | 99122.6917 | -1.8 | -1.0 | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 95 | X | 199296.675 | 0.2 | 0.1 | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 96 | Z | 3434.0633 | -1.9 | -0.6 | 5.0 | 5.0 | 3.6 | 0.47 | 37.3 |
| EPFL | 97 | Y | 33385.7473 | -0.3 | -0.2 | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 98 | X | 219606.985 | 0.5 | 0.3 | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 99 | Z | 1249.5749 | -1.8 | -0.5 | 5.0 | 5.0 | 3.6 | 0.47 | 37.3 |
| HABG | 100 | Y | 157069.122 | 0.5 | 0.3 | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 101 | X | 244638.020 | 0.9 | 0.5 | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 102 | Z | 1903.6451 | -6.8 | -2.0 | 5.0 | 5.0 | 3.6 | 0.47 | 37.3 |
| HOH2 | 103 | Y | 125166.140 | -0.2 | -0.1 | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 104 | X | 196829.193 | -1.8 | -1.0 | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 105 | Z | 2104.5425 | -6.7 | -1.9 | 5.0 | 5.0 | 3.6 | 0.47 | 37.3 |
| MAR3 | 106 | Y | 71758.0239 | 2.5 | 1.4 | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 107 | X | 174922.808 | -1.5 | -0.9 | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 108 | Z | 1703.3058 | -23.5 | -0.0 | 9999.0 | 9999.0 | 5.3 | 1.00 | 50962.1 |
| PAYE | 109 | Y | 62438.7941 | 2.0 | 1.2 | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 110 | X | 251672.685 | 0.7 | 0.4 | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 111 | Z | 1395.0318 | -10.3 | -3.0 | 5.0 | 5.0 | 3.6 | 0.47 | 37.3 |
| SAA2 | 112 | Y | 89657.7065 | -2.1 | -1.2 | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 113 | X | 218591.738 | 0.6 | 0.3 | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 114 | Z | 2552.0402 | -22.3 | -0.0 | 9999.0 | 9999.0 | 5.3 | 1.00 | 50962.1 |
| ZERM | 115 | Y | 122931.260 | -1.0 | -0.6 | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 116 | X | 161466.863 | 1.6 | 0.9 | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 117 | Z | 2944.3091 | 5.6 | 1.6 | 5.0 | 5.0 | 3.6 | 0.47 | 37.3 |
| ZIM2 | 118 | Y | 102209.832 | -0.8 | -0.5 | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 119 | X | 258780.912 | 0.5 | 0.3 | 2.5 | 2.5 | 1.8 | 0.48 | 18.7 |
| | 120 | Z | 1850.9479 | -3.7 | -1.1 | 5.0 | 5.0 | 3.6 | 0.47 | 37.3 |

0 wi >

---

# ANNEXE R

# COMPENSATION : CLASSIQUE PROBLÉMATIQUE STATIONS 13 ET 15

```
Abriss station :
================
Point Nr.  Stat  No Type   Observ.      v     wi       gi   em int Gr  Ecart trans.
                              [m]     [cc/mm]       [cc/mm] [cc/mm]        [mm]

      13     1
---------------
      11         283 Ds    1298.2349     2.3   1.4            0.6+1.0
                 284 Ri     209.2577     0.1   0.0              3.0          0.2
                 285 Zén     99.3828    16.3   4.6   -16.5      4.0         33.2
      12         286 Ds    1453.6197     2.1   1.2            0.6+1.0
                 287 Ri     226.7656    -0.5  -0.2              3.0         -1.2
                 288 Zén     98.1570    16.0   4.5   -16.2      4.0         36.5
      14         289 Ds    1446.1778    -2.9  -1.7            0.6+1.0
                 290 Ri     300.0151    -0.0  -0.0              3.0         -0.1
                 291 Zén     95.4943    11.1   3.2              4.0         25.3
      16         292 Ds    1898.3403     2.6   1.2            0.6+1.0
                 293 Ri     221.7154     0.9   0.4              3.0          2.8
                 294 Zén     98.6982    16.2   4.6   -16.3      4.0         48.2
       2         295 Ds    1683.1387     1.5   0.8            0.6+1.0
                 296 Ri     233.6442     0.2   0.1              3.0          0.4
                 297 Zén     95.8595    13.3   3.8   -13.5      4.0         35.2
       3         298 Ds    2029.6521     3.9   1.7            0.6+1.0
                 299 Ri     213.7062    -0.5  -0.2              3.0         -1.7
                 300 Zén     98.7082    15.7   4.5   -16.0      4.0         50.2
       5         301 Ds    1437.7772     1.3   0.7            0.6+1.0
                 302 Ri     222.6598    -0.6  -0.2              3.0         -1.4
                 303 Zén     99.6041    14.9   4.2   -15.1      4.0         33.8
     5.1         304 Ds    1433.8206     1.6   0.9            0.6+1.0
                 305 Ri     222.8289    -0.2  -0.1              3.0         -0.4
                 306 Zén     99.6054    13.9   3.9   -14.0      4.0         31.2
       7         307 Ds    1432.1961     2.7   1.5            0.6+1.0
                 308 Ri     216.7942     0.7   0.3              3.0          1.5
                 309 Zén     99.6000    15.1   4.3   -15.2      4.0         33.9

      15     1
---------------
      11         343 Ds     587.7928    -0.5  -0.5            0.6+1.0
                 344 Ri      73.6767    -3.0  -1.3              3.0         -2.7
                 345 Zén    100.5961   -19.3  -5.9    19.8      4.0        -17.8
    1101         346 Ds    1542.9344     1.3   0.8            0.6+1.0
                 347 Ri     320.6203     1.0   0.5              3.0          2.5
                 348 Zén     86.1821     3.5   1.1              4.0          8.6
    1102         349 Ds    2506.9102     2.3   0.9            0.6+1.0
                 350 Ri      49.3069    -0.1  -0.1              3.0         -0.5
                 351 Zén     91.1570    12.6   0.2             99.0         49.5
      12         352 Ds     911.1801     0.8   0.6            0.6+1.0
                 353 Ri      52.0220     0.7   0.3              3.0          1.1
                 354 Zén     98.3234    -4.7  -1.5              4.0         -6.8
      16         355 Ds     887.9554    -0.6  -0.5            0.6+1.0
                 356 Ri      18.8374     1.5   0.7              3.0          2.2
                 357 Zén     98.5140    -3.0  -0.9              4.0         -4.1
       2         358 Ds    1120.7489     0.6   0.5            0.6+1.0
                 359 Ri      39.8148    -0.8  -0.3              3.0         -1.4
                 360 Zén     94.8074    -3.4  -1.0              4.0         -6.0
```

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 56 | 3 | 361 | Ds | 744.0856 | -0.2 | -0.2 | | 0.6+1.0 | |
| 57 | | 362 | Ri | -0.0002 | 0.5 | 0.2 | | 3.0 | 0.5 |
| 58 | | 363 | Zén | 98.0244 | -5.9 | -1.9 | | 4.0 | -6.9 |
| 59 | 5 | 364 | Ds | 818.0509 | -0.1 | -0.1 | | 0.6+1.0 | |
| 60 | | 365 | Ri | 53.2893 | -0.4 | -0.2 | | 3.0 | -0.5 |
| 61 | | 366 | Zén | 100.7115 | -8.7 | -2.7 | | 4.0 | -11.2 |
| 62 | 5.1 | 367 | Ds | 822.1093 | 0.6 | 0.5 | | 0.6+1.0 | |
| 63 | | 368 | Ri | 53.5769 | -0.5 | -0.2 | | 3.0 | -0.7 |
| 64 | | 369 | Zén | 100.7119 | -8.7 | -2.7 | | 4.0 | -11.2 |
| 65 | 6 | 370 | Ds | 674.1617 | 0.3 | 0.3 | | 0.6+1.0 | |
| 66 | | 371 | Ri | 64.7164 | 0.2 | 0.1 | | 3.0 | 0.2 |
| 67 | | 372 | Zén | 100.8575 | -12.5 | -3.8 | 12.8 | 4.0 | -13.3 |
| 68 | 7 | 373 | Ds | 687.5807 | 0.5 | 0.5 | | 0.6+1.0 | |
| 69 | | 374 | Ri | 55.1369 | -0.7 | -0.3 | | 3.0 | -0.8 |
| 70 | | 375 | Zén | 100.8416 | -14.5 | -4.4 | 14.8 | 4.0 | -15.6 |
| 71 | KROL | 376 | Ds | 708.7094 | -0.2 | -0.2 | | 0.6+1.0 | |
| 72 | | 377 | Ri | 52.1429 | 0.5 | 0.2 | | 3.0 | 0.5 |
| 73 | | 378 | Zén | 100.8274 | -12.1 | -3.7 | 12.3 | 4.0 | -13.5 |
| 74 | KROM | 379 | Ds | 679.4132 | -0.1 | -0.1 | | 0.6+1.0 | |
| 75 | | 380 | Ri | 54.5985 | -4.4 | -1.9 | | 3.0 | -4.7 |
| 76 | | 381 | Zén | 100.8361 | -11.5 | -3.5 | 11.7 | 4.0 | -12.2 |
| 77 | KROR | 382 | Ds | 665.6364 | 0.4 | 0.4 | | 0.6+1.0 | |
| 78 | | 383 | Ri | 58.0917 | 5.4 | 2.3 | | 3.0 | 5.7 |
| 79 | | 384 | Zén | 100.8746 | -11.4 | -3.5 | | 4.0 | -12.0 |

# ANNEXE S

# COMPENSATION : CLASSIQUE

Trinet+, Compensation 3D  Version 7.2
Projet : 2025_ZEUZIER_XI_ETA
Réseau : FINAL_FULL

Statistique :
==========
Observations : 2145
Inconnues : 546
Conditions : 0
Surabondance : 1599

Station. terr. : 346
Sessions GNSS : 4
Points fixes: 0 Réseau libre
Points nouveaux: 173

Itérations = 10 (3)

Test global
==========
Ecart type unitaire a priori = 1.00
Ecart type unitaire a post. = 0.66
Probabilité que Q soit plus petit que Q^ = 0.0 %

Delta: 5.1

| Erreurs moyennes des observations : | Nombre | em int Gr. | em a priori | em a posteriori | Quot | Part de redond. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Distance (err. moy. sur 1 km): | 272 | 1.60 mm | 1.26 mm | 0.81 mm | 0.64 | 237.07 |
| | 4 | 10000.00 mm | 9999.00 mm | 142.44 mm | 0.01 | 4.00 |
| Direction: | 265 | 3.0 cc | 3.8 cc | 2.81 cc | 0.74 | 216.62 |
| | 12 | 9999.0 cc | 9999.0 cc | 31.78 cc | 0.00 | 12.00 |
| Angle zénithal: | 258 | 4.0 cc | 4.7 cc | 4.08 cc | 0.88 | 237.75 |
| | 19 | 9999.0 cc | 9999.0 cc | 25.16 cc | 0.00 | 19.00 |
| Diff. de coordonnées (planim.) | 452 | 99.00 mm | 99.00 mm | 16.89 mm | 0.17 | 262.00 |
| | 8 | 9999.00 mm | 9999.00 mm | 175.93 mm | 0.02 | 8.00 |
| Diff. de coordonnées (alti.): | 2 | 9999.00 mm | 9999.00 mm | 1.64 mm | 0.00 | 2.00 |
| | 179 | 0.20 mm | 0.20 mm | 0.12 mm | 0.58 | 102.28 |
| | 45 | 0.28 mm | 0.28 mm | 0.15 mm | 0.52 | 23.85 |
| | 7 | 0.40 mm | 0.40 mm | 0.23 mm | 0.57 | 3.71 |
| | 1 | 0.49 mm | 0.49 mm | 0.58 mm | 1.18 | 0.69 |
| | 2 | 0.45 mm | 0.45 mm | 0.51 mm | 1.14 | 1.23 |
| | 10 | 0.35 mm | 0.35 mm | 0.14 mm | 0.39 | 5.36 |
| Observation GNSS Y: | 194 | 2.0 mm | 2.0 mm | 1.31 mm | 0.65 | 145.19 |
| | 9 | 9999.0 mm | 9999.0 mm | 7.71 mm | 0.00 | 9.00 |
| Observation GNSS X: | 195 | 2.0 mm | 2.0 mm | 1.75 mm | 0.86 | 146.54 |
| | 8 | 9999.0 mm | 9999.0 mm | 10.15 mm | 0.00 | 8.00 |
| Observation GNSS Z: | 193 | 4.0 mm | 4.0 mm | 2.91 mm | 0.72 | 144.71 |
| | 10 | 9999.0 mm | 9999.0 mm | 14.34 mm | 0.00 | 10.00 |

Inconnues d'orientation:
==========

| Point Nr. | Stat | Orientation [gon] | emOri [cc] |
|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 11.1995 | 0.8 |
| 1 | 2 | 311.3261 | 0.7 |
| 10 | 1 | 77.0915 | 1.0 |
| 11 | 1 | 326.2891 | 0.7 |
| 11 | 2 | 326.2890 | 0.6 |
| 12 | 1 | 142.5717 | 0.6 |
| 13 | 1 | 179.2205 | 0.7 |
| 14 | 1 | 279.2344 | 0.7 |
| 15 | 1 | 52.6127 | 0.7 |
| 16 | 1 | 184.9724 | 0.8 |
| 2 | 1 | 84.8011 | 0.6 |
| 4 | 1 | 314.8389 | 0.7 |
| 5 | 1 | 254.4956 | 0.7 |
| 5.1 | 1 | 202.0495 | 0.7 |
| 6 | 1 | 251.8320 | 0.6 |
| 7 | 1 | 307.7495 | 0.6 |
| 8 | 1 | 137.5607 | 1.4 |
| 9 | 1 | 28.7046 | 1.5 |

Sessions GNSS
==========

| Paramètres : | TY | TX | TZ | RY | RX | RZ | EYX | EZ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| F00 | + | + | + | - | - | - | - | - |
| F10 | + | + | + | - | - | - | - | - |
| F80 | + | + | + | - | - | - | - | - |
| F90 | - | - | - | - | - | - | - | - |

Centre de gravité (coord) : Y = 146406.7633 X = 242087.1507 Z = 1361.4456
Centre de gravité (obs) : Y = 146406.7633 X = 242087.1512 Z = 1361.4467

| Nom session | Nbr Pts | TY [m] | TX [m] | TZ [m] |
|---|---|---|---|---|
| F00 | 51 | 0.0000 ± 0.3mm | 0.0005 ± 0.3mm | 0.0000 ± 0.5mm |
| F10 | 51 | 0.0001 ± 0.3mm | 0.0003 ± 0.3mm | 0.0005 ± 0.5mm |
| F80 | 50 | 0.0000 ± 0.3mm | -0.0003 ± 0.3mm | -0.0000 ± 0.5mm |
| F90 | 51 | - | - | - |

| Nom session | Nbr Pts | RY [cc] | RX [cc] | RZ [cc] |
|---|---|---|---|---|
| F00 | 51 | - | - | - |
| F10 | 51 | - | - | - |
| F80 | 50 | - | - | - |
| F90 | 51 | - | - | - |

| Nom session | Nbr Pts | EYX [ppm] | EZ [ppm] |
|---|---|---|---|
| F00 | 51 | - | - |
| F10 | 51 | - | - |
| F80 | 50 | - | - |
| F90 | 51 | - | - |

Nouveaux points:
==========

| Point Nr. | Y [m] | X [m] | Z [m] | emY [mm] | emX [mm] | emZ [mm] | DY [mm] | DX [mm] | DZ [mm] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 99695.3614 | 199555.1228 | 3048.1491 | 0.416 | 0.426 | 0.716 | -0.258 | -0.474 | -0.328 |
| 10 | 100073.0619 | 199893.4451 | 2934.9273 | 0.355 | 0.364 | 0.697 | -0.197 | -0.541 | -0.493 |
| 11 | 99853.6546 | 199754.6332 | 3004.2596 | 0.340 | 0.358 | 0.689 | -0.220 | -0.495 | 0.165 |
| 1101 | 98700.2878 | 201366.0159 | 3342.0050 | 0.596 | 0.575 | 1.219 | -0.166 | -0.398 | -1.055 |
| 1102 | 101796.9367 | 199915.6573 | 3356.7994 | 0.603 | 0.675 | 1.310 | -0.141 | -0.525 | -0.673 |
| 1103 | 102309.3384 | 197664.4680 | 3325.9947 | 0.790 | 0.691 | 1.371 | 1.256 | -0.512 | -0.562 |
| 1104 | 99122.6882 | 199296.6752 | 3434.0707 | 0.595 | 0.641 | 1.188 | -0.211 | -0.531 | -0.685 |
| 12 | 100223.7462 | 199924.2545 | 3033.7456 | 0.344 | 0.372 | 0.701 | -0.190 | -0.562 | -0.447 |
| 13 | 100087.3228 | 198477.6646 | 2991.6842 | 0.606 | 0.480 | 0.873 | 0.064 | -0.530 | -0.414 |
| 14 | 101453.8190 | 198939.8736 | 3093.9482 | 0.485 | 0.574 | 1.105 | -0.178 | -0.529 | -0.570 |
| 15 | 99315.2947 | 199990.5102 | 3009.7557 | 0.382 | 0.665 | 0.770 | -0.177 | -0.389 | -0.380 |
| 16 | 100115.2285 | 200375.4015 | 3030.4715 | 0.622 | 0.409 | 0.893 | -0.075 | -0.550 | -0.434 |
| 2 | 100424.4245 | 200123.0660 | 3101.0641 | 0.384 | 0.417 | 0.758 | -0.167 | -0.573 | -0.403 |
| 3 | 99862.3228 | 200494.3854 | 3031.4739 | 0.517 | 0.407 | 0.941 | -0.090 | -0.490 | -0.685 |
| 4 | 99998.8383 | 199801.1413 | 2991.6494 | 0.353 | 0.357 | 0.686 | -0.223 | -0.523 | -0.556 |
| 5 | 100129.7811 | 199914.7832 | 3000.6139 | 0.341 | 0.365 | 0.687 | -0.195 | -0.558 | -0.476 |
| 5.1 | 100133.4705 | 199910.7113 | 3000.5778 | 0.342 | 0.366 | 0.687 | -0.196 | -0.559 | -0.477 |
| 522 | 99820.6360 | 199723.4081 | 3000.7865 | 0.475 | 0.483 | 0.694 | -0.275 | -0.540 | -0.577 |
| 522L | 99831.6497 | 199711.6102 | 2994.5707 | 63.775 | 63.776 | 0.720 | -0.271 | -0.534 | -0.530 |
| 522S | 99816.0412 | 199727.7914 | 3000.6584 | 65.343 | 65.343 | 0.700 | -0.244 | -0.506 | -0.548 |
| 523 | 99799.1945 | 199702.5820 | 3000.9649 | 0.489 | 0.499 | 0.696 | -0.244 | -0.506 | -0.518 |
| 523L | 99807.3141 | 199693.7832 | 2993.4021 | 43.961 | 43.961 | 0.714 | -0.271 | -0.534 | -0.530 |
| 523S | 99794.5904 | 199706.8878 | 3000.6492 | 65.344 | 65.344 | 0.700 | -0.213 | -0.469 | -0.530 |
| 524 | 99788.0865 | 199691.7982 | 3000.9936 | 0.538 | 0.574 | 0.697 | -0.213 | -0.469 | -0.483 |
| 524L | 99798.4823 | 199680.6073 | 2991.8957 | 58.822 | 58.822 | 0.717 | -0.267 | -0.526 | -0.520 |
| 524S | 99783.4972 | 199696.1102 | 3000.6961 | 46.206 | 46.206 | 0.702 | -0.225 | -0.481 | -0.461 |
| 525 | 99776.9682 | 199681.0159 | 3000.9947 | 0.500 | 0.516 | 0.698 | -0.237 | -0.493 | -0.437 |
| 525L | 99788.4963 | 199668.7667 | 2991.4372 | 67.696 | 67.696 | 0.719 | -0.262 | -0.519 | -0.511 |
| 525S | 99772.3733 | 199685.3690 | 3000.7263 | 46.205 | 46.206 | 0.703 | -0.236 | -0.491 | -0.425 |
| 526 | 99765.8227 | 199670.1957 | 3000.9510 | 0.502 | 0.523 | 0.699 | -0.236 | -0.488 | -0.413 |
| 526L | 99777.6410 | 199657.6322 | 2991.1198 | 72.806 | 72.806 | 0.720 | -0.259 | -0.513 | -0.501 |
| 526S | 99761.2303 | 199674.4861 | 3000.6897 | 46.205 | 46.206 | 0.703 | -0.236 | -0.491 | -0.426 |
| 527 | 99754.7546 | 199659.3576 | 3000.8505 | 0.501 | 0.529 | 0.701 | -0.237 | -0.484 | -0.399 |
| 527L | 99766.9317 | 199646.4286 | 2990.9091 | 74.925 | 74.925 | 0.721 | -0.254 | -0.505 | -0.491 |
| 527S | 99750.1181 | 199663.6331 | 3000.5994 | 37.727 | 37.728 | 0.703 | -0.237 | -0.484 | -0.404 |
| 528 | 99743.8695 | 199648.8077 | 3000.6599 | 0.529 | 0.580 | 0.702 | -0.239 | -0.479 | -0.398 |
| 528L | 99756.3534 | 199635.5192 | 2990.7674 | 74.311 | 74.311 | 0.721 | -0.249 | -0.498 | -0.480 |
| 528S | 99739.2966 | 199653.0846 | 3000.5424 | 50.113 | 50.114 | 0.708 | -0.238 | -0.479 | -0.401 |
| 6 | 99964.5753 | 199809.2746 | 3000.6778 | 0.340 | 0.352 | 0.684 | -0.226 | -0.514 | -0.535 |
| 7 | 99997.7282 | 199907.0250 | 3000.6707 | 0.331 | 0.347 | 0.683 | -0.196 | -0.510 | -0.491 |
| 8 | 100143.0331 | 199817.5343 | 2875.0822 | 0.417 | 0.464 | 0.722 | -0.203 | -0.540 | -0.481 |
| 9 | 99995.7643 | 199845.1510 | 2864.1237 | 0.390 | 0.408 | 0.714 | -0.203 | -0.528 | -0.489 |
| AIGE | -851.1972 | 189648.4170 | 838.5642 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.563 |
| ARD2 | 311422.4557 | 251284.0272 | -990.9666 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.562 |
| ARDE | 311417.8293 | 251284.4236 | -990.6471 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.562 |
| BOU2 | 84475.7669 | 316276.1612 | 1025.1972 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.562 |
| BOUR | 84487.1889 | 316285.0071 | 1023.2044 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.562 |
| C1 | 99967.3251 | 199847.4449 | 3000.7190 | 0.356 | 0.384 | 0.699 | -0.224 | -0.508 | -0.484 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C2 | 99980.9880 | 199883.4474 | 3000.7176 | 0.358 | 0.381 | 0.699 | -0.211 | -0.514 | -0.483 |
| C3 | 100019.3660 | 199926.2424 | 3000.7148 | 0.377 | 0.384 | 0.706 | -0.190 | -0.534 | -0.503 |
| C4 | 100053.6860 | 199943.6498 | 3000.7182 | 0.380 | 0.382 | 0.709 | -0.180 | -0.549 | -0.481 |
| C5 | 100091.5947 | 199950.4060 | 3000.7052 | 0.380 | 0.389 | 0.708 | -0.178 | -0.561 | -0.481 |
| C6 | 100117.4712 | 199948.6397 | 3000.6981 | 0.374 | 0.410 | 0.707 | -0.180 | -0.573 | -0.478 |
| DAV2 | 283745.0830 | 254456.2645 | -62.4774 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.513 | -0.562 |
| DAVO | 283733.9893 | 254443.6739 | -61.8011 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.513 | -0.562 |
| EPFL | 33385.7466 | 219606.9850 | 1249.5819 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.563 |
| ETH2 | 181107.3084 | 318258.5544 | 145.7060 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.562 |
| ETHZ | 181101.4259 | 318246.1452 | 146.0013 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.563 |
| FALE | 236966.9073 | 252263.1078 | 828.6930 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.513 | -0.563 |
| FHNW | 115500.9571 | 331893.3245 | 173.7664 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.562 |
| FRI3 | 150878.4576 | 331295.7226 | 333.9657 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.513 | -0.562 |
| FRIC | 150900.1111 | 331295.4983 | 332.6309 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.513 | -0.562 |
| G4 | 100038.2552 | 199932.9131 | 2927.7636 | 0.437 | 0.470 | 0.773 | -0.192 | -0.534 | -0.529 |
| HABG | 157069.1236 | 244638.0215 | 1903.6419 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.513 | -0.563 |
| HOH2 | 125166.1396 | 196829.1889 | 2104.5395 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.513 | -0.563 |
| HOHT | 125161.6502 | 196829.9112 | 2104.5571 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.563 |
| HUTT | 130257.6618 | 288203.7526 | 1261.5596 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.562 |
| KALT | 219095.1742 | 297853.2286 | -220.0546 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.562 |
| KREU | 229534.4951 | 345142.6207 | -1274.7155 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.562 |
| KROL | 100021.9677 | 199937.6219 | 2999.2482 | 0.372 | 0.385 | 0.690 | -0.181 | -0.534 | -0.499 |
| KROM | 99990.2962 | 199913.7270 | 2999.5243 | 0.383 | 0.397 | 0.689 | -0.189 | -0.514 | -0.508 |
| KROR | 99971.4812 | 199879.1192 | 2999.2188 | 0.361 | 0.388 | 0.689 | -0.211 | -0.504 | -0.512 |
| LOMO | 204353.9097 | 181344.8379 | 728.6011 | 0.790 | 0.790 | 1.568 | -0.108 | -0.512 | -0.564 |
| LUZE | 165677.2138 | 280381.4131 | 862.8064 | 0.790 | 0.790 | 1.568 | -0.147 | -0.513 | -0.564 |
| MAR2 | 71758.2935 | 174915.6705 | 1702.3118 | 0.958 | 0.691 | 1.371 | 1.890 | -0.511 | -0.563 |
| MAR3 | 71758.0305 | 174922.8039 | 1703.2927 | 0.958 | 0.691 | 1.371 | 1.555 | -0.512 | -0.563 |
| N10 | 100023.8873 | 199931.2886 | 2999.3737 | 32.283 | 32.283 | 0.685 | -0.192 | -0.528 | -0.503 |
| N101 | 99760.9333 | 199244.5381 | 2997.4530 | 133.544 | 133.544 | 0.752 | -0.246 | -0.491 | -0.428 |
| N103 | 99700.5410 | 199052.1629 | 2995.7757 | 155.687 | 155.687 | 0.781 | -0.246 | -0.491 | -0.424 |
| N104 | 99684.7367 | 199001.8121 | 2995.3945 | 162.398 | 162.398 | 0.786 | -0.246 | -0.491 | -0.424 |
| N105 | 99670.8606 | 198956.6845 | 2995.2224 | 174.924 | 174.924 | 0.791 | 0.064 | -0.530 | -0.423 |
| N106.1 | 99698.0380 | 198877.3032 | 2994.1473 | 168.712 | 168.712 | 0.799 | 0.064 | -0.530 | -0.423 |
| N107 | 99736.0767 | 198774.6462 | 2993.0158 | 162.262 | 162.262 | 0.808 | 0.064 | -0.530 | -0.422 |
| N108 | 99752.2084 | 198748.3181 | 2993.1344 | 157.816 | 157.815 | 0.811 | 0.064 | -0.530 | -0.422 |
| N109 | 99808.6742 | 198667.1706 | 2992.3211 | 153.241 | 153.240 | 0.816 | 0.064 | -0.530 | -0.421 |
| N10A | 100020.0447 | 199937.8580 | 2999.5216 | 44.334 | 44.334 | 0.687 | -0.194 | -0.527 | -0.503 |
| N11 | 100051.4397 | 199944.5581 | 2999.3775 | 43.094 | 43.094 | 0.687 | -0.193 | -0.531 | -0.499 |
| N110 | 99865.4141 | 198585.5481 | 2991.1668 | 146.109 | 146.109 | 0.825 | 0.064 | -0.530 | -0.420 |
| N111 | 99923.5054 | 198502.5934 | 2990.2369 | 138.611 | 138.611 | 0.832 | 0.064 | -0.530 | -0.419 |
| N112 | 99980.9514 | 198419.9668 | 2989.4022 | 130.684 | 130.684 | 0.840 | 0.064 | -0.530 | -0.418 |
| N113 | 100009.4083 | 198379.2201 | 2989.1864 | 122.244 | 122.244 | 0.848 | 0.064 | -0.530 | -0.417 |
| N114 | 100065.8901 | 198297.9347 | 2988.3829 | 130.684 | 130.684 | 0.858 | 0.064 | -0.530 | -0.417 |
| N115 | 100074.1646 | 198279.6051 | 2988.3107 | 138.611 | 138.611 | 0.863 | 0.064 | -0.530 | -0.417 |
| N116 | 100014.5626 | 198401.1641 | 2988.9963 | 113.176 | 113.176 | 0.851 | 0.064 | -0.530 | -0.417 |
| N117 | 100042.8652 | 198414.0763 | 2987.9799 | 103.316 | 103.315 | 0.855 | 0.064 | -0.530 | -0.416 |
| N118 | 100086.8159 | 198435.5938 | 2988.2634 | 92.409 | 92.408 | 0.859 | 0.064 | -0.530 | -0.416 |
| N119 | 100110.9540 | 198441.6821 | 2988.1926 | 80.029 | 80.028 | 0.862 | 0.064 | -0.530 | -0.415 |
| N11A | 100049.1538 | 199951.7537 | 2999.5071 | 49.528 | 49.528 | 0.689 | -0.192 | -0.532 | -0.499 |
| N12 | 100081.7077 | 199951.2135 | 2999.3769 | 48.679 | 48.679 | 0.688 | -0.192 | -0.535 | -0.496 |
| N120 | 100103.9496 | 198462.1513 | 2988.2423 | 65.344 | 65.343 | 0.866 | 0.064 | -0.530 | -0.415 |
| N121 | 100087.0333 | 198477.4666 | 2990.2532 | 46.207 | 46.206 | 0.869 | 0.064 | -0.530 | -0.415 |
| N12A | 100081.1371 | 199958.6702 | 2999.5114 | 54.652 | 54.652 | 0.690 | -0.193 | -0.535 | -0.496 |
| N13 | 100114.3358 | 199950.5117 | 2999.3724 | 51.660 | 51.660 | 0.688 | -0.193 | -0.538 | -0.491 |
| N130 | 99585.2995 | 199745.7806 | 3001.1309 | 65.343 | 65.343 | 0.727 | -0.231 | -0.469 | -0.404 |
| N132E | 99518.2794 | 199824.7272 | 3001.9044 | 73.347 | 73.347 | 0.739 | -0.226 | -0.461 | -0.398 |
| N133 | 99441.8527 | 199907.0032 | 3003.7429 | 78.410 | 78.411 | 0.746 | -0.220 | -0.453 | -0.395 |
| N133A | 99426.3465 | 199913.6592 | 3005.8121 | 81.612 | 81.612 | 0.753 | -0.210 | -0.437 | -0.391 |
| N134 | 99414.2270 | 199920.4925 | 3006.2818 | 76.200 | 76.201 | 0.756 | -0.199 | -0.421 | -0.389 |
| N134.1 | 99377.9098 | 199942.7610 | 3006.2876 | 89.114 | 89.114 | 0.762 | -0.199 | -0.421 | -0.389 |
| N135 | 99368.2757 | 199947.3012 | 3007.4978 | 69.765 | 69.766 | 0.762 | -0.193 | -0.413 | -0.386 |
| N137 | 99246.9767 | 200012.2684 | 3010.3595 | 75.637 | 75.639 | 0.784 | -0.188 | -0.405 | -0.382 |
| N137.1 | 99251.0887 | 200007.3606 | 3010.4378 | 88.633 | 88.634 | 0.790 | -0.188 | -0.405 | -0.382 |
| N138 | 99315.3401 | 199990.9865 | 3008.2971 | 59.885 | 59.887 | 0.767 | -0.188 | -0.405 | -0.382 |
| N13A | 100115.8101 | 199957.8559 | 2999.5119 | 56.764 | 56.764 | 0.690 | -0.192 | -0.538 | -0.491 |
| N14 | 100145.2477 | 199918.7038 | 3000.4614 | 52.932 | 52.933 | 0.689 | -0.194 | -0.548 | -0.482 |
| N15 | 100129.4770 | 199915.1499 | 2999.3724 | 55.697 | 55.697 | 0.690 | -0.194 | -0.543 | -0.487 |
| N150 | 100280.7362 | 200060.9351 | 3009.7945 | 81.337 | 81.337 | 0.714 | -0.192 | -0.544 | -0.476 |
| N151 | 100303.5715 | 200083.6541 | 3011.9950 | 84.408 | 84.409 | 0.716 | -0.192 | -0.546 | -0.471 |
| N152 | 100281.3064 | 200041.1197 | 3015.2872 | 85.574 | 85.574 | 0.717 | -0.191 | -0.548 | -0.468 |
| N153 | 100314.9444 | 200081.3723 | 3016.8374 | 97.250 | 97.250 | 0.729 | -0.191 | -0.548 | -0.468 |
| N154 | 100325.8124 | 200096.1143 | 3019.6902 | 107.668 | 107.668 | 0.741 | -0.191 | -0.548 | -0.468 |
| N155 | 100324.0805 | 200135.6914 | 3021.5343 | 117.163 | 117.163 | 0.747 | -0.191 | -0.548 | -0.468 |
| N156 | 100258.2741 | 200002.6143 | 3021.7264 | 84.911 | 84.911 | 0.716 | -0.191 | -0.550 | -0.461 |
| N157 | 100377.1676 | 200031.4224 | 3032.8961 | 82.376 | 82.376 | 0.713 | -0.191 | -0.551 | -0.457 |
| N158 | 100447.9378 | 200105.5193 | 3033.4782 | 94.449 | 94.449 | 0.725 | -0.191 | -0.551 | -0.457 |
| N16 | 99964.6966 | 199789.2841 | 2999.6033 | 53.820 | 53.820 | 0.687 | -0.240 | -0.527 | -0.640 |
| N167 | 100396.2804 | 200020.3964 | 3032.6859 | 77.787 | 77.787 | 0.712 | -0.190 | -0.553 | -0.455 |
| N16A | 99841.9060 | 199744.6458 | 3001.1073 | 41.775 | 41.775 | 0.695 | -0.264 | -0.535 | -0.757 |
| N16B | 99850.6779 | 199748.0841 | 3001.4001 | 52.063 | 52.063 | 0.694 | -0.252 | -0.531 | -0.935 |
| N170 | 100257.1320 | 199942.5698 | 3035.2989 | 70.744 | 70.744 | 0.709 | -0.190 | -0.555 | -0.452 |
| N171 | 100223.5739 | 199924.7950 | 3032.3000 | 60.395 | 60.395 | 0.704 | -0.189 | -0.557 | -0.449 |
| N18 | 99738.9482 | 199643.5965 | 3000.5019 | 38.803 | 38.803 | 0.705 | -0.239 | -0.478 | -0.404 |
| N18A | 99743.4943 | 199593.4392 | 2999.9156 | 64.220 | 64.220 | 0.711 | -0.241 | -0.484 | -0.422 |
| N18B | 99764.1282 | 199549.6229 | 2998.6530 | 70.891 | 70.891 | 0.714 | -0.246 | -0.491 | -0.430 |
| N18C | 99784.4447 | 199502.9723 | 2998.2019 | 84.619 | 84.619 | 0.719 | -0.246 | -0.491 | -0.430 |
| N18D | 99797.9987 | 199453.9810 | 2998.0759 | 96.411 | 96.411 | 0.725 | -0.246 | -0.491 | -0.429 |
| N18E | 99803.4001 | 199403.1118 | 2997.8701 | 106.910 | 106.910 | 0.730 | -0.246 | -0.491 | -0.429 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| N19 | 99812.6843 | 199353.0801 | 2998.2153 | 116.467 | 116.467 | 0.736 | -0.246 | -0.491 | -0.429 |
| N2 | 99711.1944 | 199099.0127 | 2995.7777 | 141.311 | 141.311 | 0.772 | -0.246 | -0.491 | -0.425 |
| N2.1 | 99707.1851 | 199085.5866 | 2995.6847 | 148.673 | 148.673 | 0.777 | -0.246 | -0.491 | -0.425 |
| N4 | 100222.7865 | 200046.6143 | 3003.1522 | 68.296 | 68.296 | 0.705 | -0.192 | -0.540 | -0.484 |
| N4.1 | 99998.3383 | 199801.6413 | 2990.1431 | 65.342 | 65.342 | 0.693 | -0.223 | -0.523 | -0.556 |
| N5 | 100261.5030 | 200054.2027 | 3007.4634 | 76.128 | 76.129 | 0.710 | -0.192 | -0.542 | -0.479 |
| N6 | 99962.4115 | 199817.5635 | 2999.3848 | 40.352 | 40.352 | 0.685 | -0.221 | -0.519 | -0.554 |
| N6.1 | 99954.4056 | 199807.3398 | 2999.4154 | 47.991 | 47.991 | 0.686 | -0.228 | -0.522 | -0.587 |
| N6.1A | 99955.0146 | 199817.2736 | 2999.4707 | 61.685 | 61.685 | 0.691 | -0.225 | -0.521 | -0.571 |
| N6A | 99963.4426 | 199807.5717 | 2999.5226 | 49.523 | 49.523 | 0.687 | -0.221 | -0.520 | -0.558 |
| N7 | 99965.5835 | 199848.2282 | 2999.3784 | 39.652 | 39.652 | 0.685 | -0.214 | -0.518 | -0.538 |
| N7A | 99958.2850 | 199849.7832 | 2999.5209 | 47.063 | 47.063 | 0.687 | -0.214 | -0.519 | -0.539 |
| N8 | 99975.9611 | 199877.8848 | 2999.3792 | 35.721 | 35.721 | 0.685 | -0.207 | -0.518 | -0.522 |
| N8A | 99969.3845 | 199881.3292 | 2999.5076 | 33.641 | 33.641 | 0.686 | -0.209 | -0.514 | -0.519 |
| N9 | 99996.2412 | 199907.9333 | 2999.3857 | 34.142 | 34.142 | 0.684 | -0.198 | -0.521 | -0.507 |
| N9A | 99990.6871 | 199912.9663 | 2999.5237 | 32.729 | 32.730 | 0.685 | -0.196 | -0.520 | -0.509 |
| NBU | 99723.1149 | 199629.1698 | 3000.8635 | 53.086 | 53.086 | 0.708 | -0.237 | -0.477 | -0.412 |
| NBU2 | 99715.1498 | 199636.7231 | 3000.8726 | 70.376 | 70.377 | 0.714 | -0.237 | -0.477 | -0.412 |
| NBU3 | 99712.3893 | 199634.5425 | 3000.2019 | 84.188 | 84.188 | 0.720 | -0.237 | -0.477 | -0.412 |
| NBU4 | 99704.2476 | 199629.9611 | 3000.4491 | 96.033 | 96.033 | 0.726 | -0.237 | -0.477 | -0.412 |
| NEUC | 62302.7518 | 271872.2299 | 1153.3236 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.150 | -0.513 | -0.562 |
| OALP | 194752.4902 | 235397.6047 | 2506.3166 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.562 |
| PAYE | 62438.7980 | 251672.6860 | 1395.0215 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.513 | -0.562 |
| SAA2 | 89657.7022 | 218591.7381 | 2552.0284 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.562 |
| SAAN | 89656.4275 | 218597.0908 | 2552.0013 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.563 |
| SAM2 | 287466.2767 | 222662.0140 | 140.1822 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.150 | -0.512 | -0.563 |
| SANB | 234323.3797 | 214318.5207 | 1443.0460 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.150 | -0.513 | -0.562 |
| SAR2 | 257585.4556 | 272584.1259 | 74.5861 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.513 | -0.563 |
| SCHA | 191491.3758 | 355141.8146 | -744.6742 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.563 |
| STA2 | 216928.6135 | 146358.3750 | 293.1473 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.562 |
| STAB | 216924.3789 | 146361.5351 | 293.2253 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.563 |
| STCX | 28652.2521 | 253121.2638 | 1701.7801 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.513 | -0.562 |
| STGA | 244048.5868 | 323293.4752 | -900.0995 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.513 | -0.562 |
| ZERM | 122931.2583 | 161466.8650 | 2944.3310 | 1.368 | 1.368 | 2.715 | -0.274 | -0.512 | -0.558 |
| ZIM2 | 102209.8303 | 258780.9123 | 1850.9511 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.150 | -0.513 | -0.562 |
| ZIMM | 102228.5939 | 258781.3414 | 1850.8404 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.563 |

Points des conditions de Helmert / Avec mise à jour

| Point Nr. | Y [m] | X [m] | Z [m] | RY [mm] | RX [mm] | RZ [mm] |
|---|---|---|---|---|---|---|

TOUTES LES STATIONS AGNES

Ellipsoïde d'erreur moy. :

| Point Nr. | A [mm] | B [mm] | C [mm] | Gis(A) [gon] | Z(A) [gon] | Gis(B) [gon] | Z(B) [gon] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.72 | 0.48 | 0.36 | 93.94 | 0.91 | 352.81 | 99.45 |
| 10 | 0.70 | 0.37 | 0.35 | 142.75 | 0.45 | 36.12 | 99.95 |
| 11 | 0.69 | 0.36 | 0.34 | 140.05 | 0.57 | 383.25 | 99.56 |
| 1101 | 1.22 | 0.66 | 0.49 | 157.91 | 5.55 | 54.35 | 99.69 |
| 1102 | 1.31 | 0.68 | 0.60 | 294.70 | 2.85 | 394.43 | 100.01 |
| 1103 | 1.37 | 0.79 | 0.69 | 352.91 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| 1104 | 1.20 | 0.67 | 0.55 | 65.56 | 8.56 | 365.43 | 99.98 |
| 12 | 0.70 | 0.37 | 0.34 | 159.63 | 0.38 | 397.26 | 99.69 |
| 13 | 0.87 | 0.61 | 0.48 | 232.86 | 1.02 | 103.35 | 99.55 |
| 14 | 1.11 | 0.62 | 0.42 | 316.47 | 1.77 | 34.91 | 99.49 |
| 15 | 0.77 | 0.67 | 0.38 | 203.02 | 5.39 | 6.96 | 94.62 |
| 16 | 0.89 | 0.63 | 0.39 | 223.22 | 1.26 | 114.17 | 99.82 |
| 2 | 0.76 | 0.44 | 0.36 | 245.77 | 2.08 | 364.67 | 99.39 |
| 3 | 0.94 | 0.52 | 0.40 | 187.23 | 1.03 | 84.80 | 99.96 |
| 4 | 0.69 | 0.36 | 0.35 | 138.77 | 0.45 | 379.24 | 99.64 |
| 5 | 0.69 | 0.36 | 0.34 | 134.08 | 0.56 | 2.62 | 99.74 |
| 5.1 | 0.69 | 0.37 | 0.34 | 134.22 | 0.56 | 1.39 | 99.72 |
| 522 | 0.69 | 0.51 | 0.45 | 98.45 | 1.05 | 46.29 | 100.71 |
| 522L | 63.78 | 63.78 | 0.72 | 43.53 | 100.00 | 143.53 | 100.00 |
| 522S | 65.34 | 65.34 | 0.70 | 41.47 | 100.00 | 141.47 | 100.00 |
| 523 | 0.70 | 0.51 | 0.47 | 112.45 | 0.94 | 41.24 | 100.41 |
| 523L | 43.96 | 43.96 | 0.71 | 43.39 | 100.00 | 143.39 | 100.00 |
| 523S | 65.34 | 65.34 | 0.70 | 40.84 | 100.00 | 140.84 | 100.00 |
| 524 | 0.70 | 0.62 | 0.49 | 169.61 | 0.95 | 40.82 | 99.59 |
| 524L | 58.82 | 58.82 | 0.72 | 37.66 | 100.00 | 137.66 | 100.00 |
| 524S | 46.21 | 46.21 | 0.70 | 25.27 | 100.00 | 125.27 | 100.00 |
| 525 | 0.70 | 0.52 | 0.50 | 120.45 | 0.96 | 19.99 | 99.99 |
| 525L | 67.70 | 67.70 | 0.72 | 25.43 | 100.00 | 125.43 | 100.00 |
| 525S | 46.21 | 46.21 | 0.70 | 380.03 | 100.00 | 80.03 | 100.00 |
| 526 | 0.70 | 0.52 | 0.50 | 124.10 | 0.97 | 3.72 | 99.70 |
| 526L | 72.81 | 72.81 | 0.72 | 4.74 | 100.00 | 104.74 | 100.00 |
| 526S | 46.21 | 46.21 | 0.70 | 380.03 | 100.00 | 80.03 | 100.00 |
| 527 | 0.70 | 0.53 | 0.50 | 128.63 | 0.97 | 395.00 | 99.51 |
| 527L | 74.93 | 74.93 | 0.72 | 387.84 | 100.00 | 87.84 | 100.00 |
| 527S | 37.73 | 37.73 | 0.70 | 367.03 | 100.00 | 67.03 | 100.00 |
| 528 | 0.70 | 0.60 | 0.50 | 146.17 | 1.52 | 367.52 | 98.56 |
| 528L | 74.31 | 74.31 | 0.72 | 379.31 | 100.00 | 79.31 | 100.00 |
| 528S | 50.11 | 50.11 | 0.71 | 368.08 | 100.00 | 68.08 | 100.00 |
| 6 | 0.68 | 0.35 | 0.34 | 128.62 | 0.61 | 11.70 | 99.84 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | 0.68 | 0.35 | 0.33 | 136.52 | 0.53 | 20.68 | 99.87 |
| 8 | 0.72 | 0.49 | 0.39 | 127.78 | 2.02 | 34.24 | 100.20 |
| 9 | 0.71 | 0.41 | 0.39 | 230.17 | 1.14 | 384.02 | 99.15 |
| AIGE | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| ARD2 | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| ARDE | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| BOU2 | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| BOUR | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| C1 | 0.70 | 0.38 | 0.36 | 126.70 | 0.56 | 8.59 | 99.84 |
| C2 | 0.70 | 0.38 | 0.35 | 131.58 | 0.58 | 21.47 | 99.91 |
| C3 | 0.71 | 0.39 | 0.37 | 135.57 | 0.66 | 38.54 | 100.03 |
| C4 | 0.71 | 0.39 | 0.38 | 148.44 | 0.54 | 43.81 | 99.96 |
| C5 | 0.71 | 0.39 | 0.38 | 147.24 | 0.55 | 368.48 | 99.48 |
| C6 | 0.71 | 0.41 | 0.37 | 136.88 | 0.57 | 383.01 | 99.57 |
| DAV2 | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| DAVO | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| EPFL | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| ETH2 | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| ETHZ | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| FALE | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| FHNW | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| FRI3 | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| FRIC | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| G4 | 0.77 | 0.48 | 0.43 | 40.59 | 1.93 | 27.91 | 101.89 |
| HABG | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| HOH2 | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| HOHT | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| HUTT | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| KALT | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| KREU | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| KROL | 0.69 | 0.39 | 0.37 | 140.55 | 0.54 | 28.79 | 99.90 |
| KROM | 0.69 | 0.40 | 0.38 | 140.10 | 0.57 | 371.73 | 99.50 |
| KROR | 0.69 | 0.39 | 0.36 | 138.87 | 0.56 | 12.09 | 99.77 |
| LOMO | 1.57 | 0.79 | 0.79 | 352.84 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| LUZE | 1.57 | 0.79 | 0.79 | 352.61 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| MAR2 | 1.37 | 0.96 | 0.69 | 353.94 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| MAR3 | 1.37 | 0.96 | 0.69 | 353.94 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| N10 | 32.28 | 32.28 | 0.69 | 20.47 | 100.00 | 120.47 | 100.00 |
| N101 | 133.54 | 133.54 | 0.75 | 374.70 | 100.00 | 74.70 | 100.00 |
| N103 | 155.69 | 155.69 | 0.78 | 374.70 | 100.00 | 74.70 | 100.00 |
| N104 | 162.40 | 162.40 | 0.79 | 374.70 | 100.00 | 74.70 | 100.00 |
| N105 | 174.92 | 174.92 | 0.79 | 103.35 | 100.00 | 3.35 | 100.00 |
| N106.1 | 168.71 | 168.71 | 0.80 | 103.31 | 100.00 | 3.31 | 100.00 |
| N107 | 162.26 | 162.26 | 0.81 | 103.31 | 100.00 | 3.31 | 100.00 |
| N108 | 157.82 | 157.82 | 0.81 | 103.31 | 100.00 | 3.31 | 100.00 |
| N109 | 153.24 | 153.24 | 0.82 | 103.31 | 100.00 | 3.31 | 100.00 |
| N10A | 44.33 | 44.33 | 0.69 | 19.66 | 100.00 | 119.66 | 100.00 |
| N11 | 43.09 | 43.09 | 0.69 | 20.47 | 100.00 | 120.47 | 100.00 |
| N110 | 146.11 | 146.11 | 0.82 | 103.31 | 100.00 | 3.31 | 100.00 |
| N111 | 138.61 | 138.61 | 0.83 | 103.31 | 100.00 | 3.31 | 100.00 |
| N112 | 130.68 | 130.68 | 0.84 | 103.31 | 100.00 | 3.31 | 100.00 |
| N113 | 122.24 | 122.24 | 0.85 | 103.31 | 100.00 | 3.31 | 100.00 |
| N114 | 130.68 | 130.68 | 0.86 | 103.31 | 100.00 | 3.31 | 100.00 |
| N115 | 138.61 | 138.61 | 0.86 | 103.31 | 100.00 | 3.31 | 100.00 |
| N116 | 113.18 | 113.18 | 0.85 | 103.33 | 100.00 | 3.33 | 100.00 |
| N117 | 103.32 | 103.32 | 0.86 | 103.33 | 100.00 | 3.33 | 100.00 |
| N118 | 92.41 | 92.41 | 0.86 | 103.33 | 100.00 | 3.33 | 100.00 |
| N119 | 80.03 | 80.03 | 0.86 | 103.33 | 100.00 | 3.33 | 100.00 |
| N11A | 49.53 | 49.53 | 0.69 | 20.53 | 100.00 | 120.53 | 100.00 |
| N12 | 48.68 | 48.68 | 0.69 | 20.48 | 100.00 | 120.48 | 100.00 |
| N120 | 65.34 | 65.34 | 0.87 | 103.33 | 100.00 | 3.33 | 100.00 |
| N121 | 46.21 | 46.21 | 0.87 | 103.32 | 100.00 | 3.32 | 100.00 |
| N12A | 54.65 | 54.65 | 0.69 | 20.11 | 100.00 | 120.11 | 100.00 |
| N13 | 51.66 | 51.66 | 0.69 | 19.87 | 100.00 | 119.87 | 100.00 |
| N130 | 65.34 | 65.34 | 0.73 | 376.77 | 100.00 | 76.77 | 100.00 |
| N132E | 73.35 | 73.35 | 0.74 | 382.31 | 100.00 | 82.31 | 100.00 |
| N133 | 78.41 | 78.41 | 0.75 | 388.01 | 100.00 | 88.01 | 100.00 |
| N133A | 81.61 | 81.61 | 0.75 | 397.04 | 100.00 | 97.04 | 100.00 |
| N134 | 76.20 | 76.20 | 0.76 | 2.38 | 100.00 | 102.38 | 100.00 |
| N134.1 | 89.11 | 89.11 | 0.76 | 2.39 | 100.00 | 102.39 | 100.00 |
| N135 | 69.77 | 69.76 | 0.76 | 4.07 | 100.00 | 104.07 | 100.00 |
| N137 | 75.64 | 75.64 | 0.78 | 5.32 | 100.00 | 105.32 | 100.00 |
| N137.1 | 88.63 | 88.63 | 0.79 | 5.32 | 100.00 | 105.32 | 100.00 |
| N138 | 59.89 | 59.89 | 0.77 | 5.32 | 100.00 | 105.32 | 100.00 |
| N13A | 56.76 | 56.76 | 0.69 | 20.71 | 100.00 | 120.71 | 100.00 |
| N14 | 52.93 | 52.93 | 0.69 | 11.72 | 100.00 | 111.72 | 100.00 |
| N15 | 55.70 | 55.70 | 0.69 | 16.18 | 100.00 | 116.18 | 100.00 |
| N150 | 81.34 | 81.34 | 0.71 | 21.50 | 100.00 | 121.50 | 100.00 |
| N151 | 84.41 | 84.41 | 0.72 | 20.79 | 100.00 | 120.79 | 100.00 |
| N152 | 85.57 | 85.57 | 0.72 | 18.97 | 100.00 | 118.97 | 100.00 |
| N153 | 97.25 | 97.25 | 0.73 | 18.97 | 100.00 | 118.97 | 100.00 |
| N154 | 107.67 | 107.67 | 0.74 | 18.97 | 100.00 | 118.97 | 100.00 |
| N155 | 117.16 | 117.16 | 0.75 | 18.97 | 100.00 | 118.97 | 100.00 |
| N156 | 84.91 | 84.91 | 0.72 | 16.19 | 100.00 | 116.19 | 100.00 |
| N157 | 82.38 | 82.38 | 0.71 | 13.21 | 100.00 | 113.21 | 100.00 |
| N158 | 94.45 | 94.45 | 0.73 | 12.36 | 100.00 | 112.36 | 100.00 |
| N16 | 53.82 | 53.82 | 0.69 | 33.91 | 100.00 | 133.91 | 100.00 |
| N167 | 77.79 | 77.79 | 0.71 | 9.72 | 100.00 | 109.72 | 100.00 |
| N16A | 41.78 | 41.77 | 0.69 | 44.03 | 100.00 | 144.03 | 100.00 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| N16B | 52.06 | 52.06 | 0.69 | 40.23 | 100.00 | 140.23 | 100.00 |
| N170 | 70.74 | 70.74 | 0.71 | 6.13 | 100.00 | 106.13 | 100.00 |
| N171 | 60.39 | 60.39 | 0.70 | 2.86 | 100.00 | 102.86 | 100.00 |
| N18 | 38.80 | 38.80 | 0.70 | 368.90 | 100.00 | 68.90 | 100.00 |
| N18A | 64.22 | 64.22 | 0.71 | 373.22 | 100.00 | 73.22 | 100.00 |
| N18B | 70.89 | 70.89 | 0.71 | 375.29 | 100.00 | 75.29 | 100.00 |
| N18C | 84.62 | 84.62 | 0.72 | 375.48 | 100.00 | 75.48 | 100.00 |
| N18D | 96.41 | 96.41 | 0.73 | 375.48 | 100.00 | 75.48 | 100.00 |
| N18E | 106.91 | 106.91 | 0.73 | 375.48 | 100.00 | 75.48 | 100.00 |
| N19 | 116.47 | 116.47 | 0.74 | 375.48 | 100.00 | 75.48 | 100.00 |
| N2 | 141.31 | 141.31 | 0.77 | 374.70 | 100.00 | 74.70 | 100.00 |
| N2.1 | 148.67 | 148.67 | 0.78 | 374.70 | 100.00 | 74.70 | 100.00 |
| N4 | 68.30 | 68.30 | 0.70 | 21.81 | 100.00 | 121.81 | 100.00 |
| N4.1 | 65.34 | 65.34 | 0.69 | 380.56 | 100.00 | 80.56 | 100.00 |
| N5 | 76.13 | 76.13 | 0.71 | 22.60 | 100.00 | 122.60 | 100.00 |
| N6 | 40.35 | 40.35 | 0.68 | 19.62 | 100.00 | 119.62 | 100.00 |
| N6.1 | 47.99 | 47.99 | 0.69 | 24.60 | 100.00 | 124.60 | 100.00 |
| N6.1A | 61.69 | 61.68 | 0.69 | 21.98 | 100.00 | 121.98 | 100.00 |
| N6A | 49.52 | 49.52 | 0.69 | 20.22 | 100.00 | 120.22 | 100.00 |
| N7 | 39.65 | 39.65 | 0.69 | 17.78 | 100.00 | 117.78 | 100.00 |
| N7A | 47.06 | 47.06 | 0.69 | 17.83 | 100.00 | 117.83 | 100.00 |
| N8 | 35.72 | 35.72 | 0.68 | 16.02 | 100.00 | 116.02 | 100.00 |
| N8A | 33.64 | 33.64 | 0.69 | 15.26 | 100.00 | 115.26 | 100.00 |
| N9 | 34.14 | 34.14 | 0.68 | 15.89 | 100.00 | 115.89 | 100.00 |
| N9A | 32.73 | 32.73 | 0.69 | 5.46 | 100.00 | 105.46 | 100.00 |
| NBU | 53.09 | 53.09 | 0.71 | 372.33 | 100.00 | 72.33 | 100.00 |
| NBU2 | 70.38 | 70.38 | 0.71 | 372.40 | 100.00 | 72.40 | 100.00 |
| NBU3 | 84.19 | 84.19 | 0.72 | 372.40 | 100.00 | 72.40 | 100.00 |
| NBU4 | 96.03 | 96.03 | 0.73 | 372.12 | 100.00 | 72.12 | 100.00 |
| NEUC | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| OALP | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| PAYE | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| SAA2 | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| SAAN | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| SAM2 | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| SANB | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| SAR2 | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| SCHA | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| STA2 | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| STAB | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| STCX | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| STGA | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| ZERM | 2.72 | 1.37 | 1.37 | 352.71 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| ZIM2 | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| ZIMM | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |

Ellipsoïde d'err. relatif:
==========

| Point 1 | Point 2 | A [mm] | B [mm] | C [mm] | Gis(A) [gon] | Z(A) [gon] | Gis(B) [gon] | Z(B) [gon] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 0.55 | 0.52 | 0.23 | 356.82 | 96.82 | 230.47 | 7.86 |
| 11 | 12 | 0.30 | 0.29 | 0.18 | 371.84 | 100.97 | 283.10 | 5.47 |
| 11 | 13 | 0.62 | 0.56 | 0.38 | 99.42 | 103.63 | 130.49 | 4.11 |
| 11 | 15 | 0.56 | 0.38 | 0.24 | 11.60 | 102.22 | 15.11 | 2.23 |
| 11 | 7 | 0.19 | 0.18 | 0.14 | 353.87 | 99.58 | 84.31 | 0.92 |
| 1101 | 1102 | 1.73 | 0.89 | 0.77 | 198.34 | 2.52 | 37.67 | 97.94 |
| 1102 | 1104 | 1.71 | 0.91 | 0.79 | 45.98 | 2.90 | 377.71 | 101.39 |
| 13 | 14 | 1.21 | 0.71 | 0.62 | 302.94 | 3.04 | 50.94 | 97.92 |
| 15 | 13 | 0.72 | 0.63 | 0.62 | 40.42 | 105.63 | 117.45 | 15.66 |
| 15 | 14 | 1.15 | 0.89 | 0.43 | 295.27 | 2.53 | 21.96 | 98.97 |
| 7 | 9 | 0.25 | 0.24 | 0.21 | 364.67 | 103.92 | 268.82 | 48.28 |
| NBU | N13 | 74.07 | 74.07 | 0.25 | 366.96 | 100.00 | 66.96 | 100.00 |

# ANNEXE T

# COMPENSATION : GÉOÏDE LOCAL ET ATMOSPHÈRE 4D

Trinet+, Compensation 3D  Version 7.2
Projet : 2025_ZEUZIER_XI_ETA
Réseau : FINAL_FULL

Statistique :
==========
Observations : 2145
Inconnues : 546
Conditions : 0
Surabondance : 1599

Station. terr. : 346
Sessions GNSS : 4
Points fixes: 0 Réseau libre
Points nouveaux: 173

Itérations = 10 (3)

Test global
==========
Ecart type unitaire a priori = 1.00
Ecart type unitaire a post. = 0.66
Probabilité que Q soit plus petit que Q^ = 0.0 %

Delta: 5.1

| Erreurs moyennes des observations : | Nombre | em int Gr. | em a priori | em a posteriori | Quot | Part de redond. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Distance (err. moy. sur 1 km): | 272 | 1.60 mm | 1.26 mm | 0.81 mm | 0.64 | 237.07 |
| | 4 | 10000.00 mm | 9999.00 mm | 142.44 mm | 0.01 | 4.00 |
| Direction: | 265 | 3.0 cc | 3.8 cc | 2.81 cc | 0.74 | 216.62 |
| | 12 | 9999.0 cc | 9999.0 cc | 31.78 cc | 0.00 | 12.00 |
| Angle zénithal: | 258 | 4.0 cc | 4.7 cc | 4.08 cc | 0.88 | 237.75 |
| | 19 | 9999.0 cc | 9999.0 cc | 25.16 cc | 0.00 | 19.00 |
| Diff. de coordonnées (planim.) | 452 | 99.00 mm | 99.00 mm | 16.89 mm | 0.17 | 262.00 |
| | 8 | 9999.00 mm | 9999.00 mm | 175.93 mm | 0.02 | 8.00 |
| Diff. de coordonnées (alti.): | 2 | 9999.00 mm | 9999.00 mm | 1.64 mm | 0.00 | 2.00 |
| | 179 | 0.20 mm | 0.20 mm | 0.12 mm | 0.58 | 102.28 |
| | 45 | 0.28 mm | 0.28 mm | 0.15 mm | 0.52 | 23.85 |
| | 7 | 0.40 mm | 0.40 mm | 0.23 mm | 0.57 | 3.71 |
| | 1 | 0.49 mm | 0.49 mm | 0.58 mm | 1.18 | 0.69 |
| | 2 | 0.45 mm | 0.45 mm | 0.51 mm | 1.14 | 1.23 |
| | 10 | 0.35 mm | 0.35 mm | 0.14 mm | 0.39 | 5.36 |
| Observation GNSS Y: | 194 | 2.0 mm | 2.0 mm | 1.31 mm | 0.65 | 145.19 |
| | 9 | 9999.0 mm | 9999.0 mm | 7.71 mm | 0.00 | 9.00 |
| Observation GNSS X: | 195 | 2.0 mm | 2.0 mm | 1.75 mm | 0.86 | 146.54 |
| | 8 | 9999.0 mm | 9999.0 mm | 10.15 mm | 0.00 | 8.00 |
| Observation GNSS Z: | 193 | 4.0 mm | 4.0 mm | 2.91 mm | 0.72 | 144.71 |
| | 10 | 9999.0 mm | 9999.0 mm | 14.34 mm | 0.00 | 10.00 |

Inconnues d'orientation:
==========

| Point Nr. | Stat | Orientation [gon] | emOri [cc] |
|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 11.1995 | 0.8 |
| 1 | 2 | 311.3261 | 0.7 |
| 10 | 1 | 77.0915 | 1.0 |
| 11 | 1 | 326.2891 | 0.7 |
| 11 | 2 | 326.2890 | 0.6 |
| 12 | 1 | 142.5717 | 0.6 |
| 13 | 1 | 179.2205 | 0.7 |
| 14 | 1 | 279.2344 | 0.7 |
| 15 | 1 | 52.6127 | 0.7 |
| 16 | 1 | 184.9724 | 0.8 |
| 2 | 1 | 84.8011 | 0.6 |
| 4 | 1 | 314.8389 | 0.7 |
| 5 | 1 | 254.4956 | 0.7 |
| 5.1 | 1 | 202.0495 | 0.7 |
| 6 | 1 | 251.8320 | 0.6 |
| 7 | 1 | 307.7495 | 0.6 |
| 8 | 1 | 137.5607 | 1.4 |
| 9 | 1 | 28.7046 | 1.5 |

Sessions GNSS
==========

| Paramètres : | TY | TX | TZ | RY | RX | RZ | EYX | EZ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| F00 | + | + | + | - | - | - | - | - |
| F10 | + | + | + | - | - | - | - | - |
| F80 | + | + | + | - | - | - | - | - |
| F90 | - | - | - | - | - | - | - | - |

Centre de gravité (coord) : Y = 146406.7633 X = 242087.1507 Z = 1361.4456
Centre de gravité (obs) : Y = 146406.7633 X = 242087.1512 Z = 1361.4467

| Nom session | Nbr Pts | TY [m] | TX [m] | TZ [m] |
|---|---|---|---|---|
| F00 | 51 | 0.0000 ± 0.3mm | 0.0005 ± 0.3mm | 0.0000 ± 0.5mm |
| F10 | 51 | 0.0001 ± 0.3mm | 0.0003 ± 0.3mm | 0.0005 ± 0.5mm |
| F80 | 50 | 0.0000 ± 0.3mm | -0.0003 ± 0.3mm | -0.0000 ± 0.5mm |
| F90 | 51 | - | - | - |

| Nom session | Nbr Pts | RY [cc] | RX [cc] | RZ [cc] |
|---|---|---|---|---|
| F00 | 51 | - | - | - |
| F10 | 51 | - | - | - |
| F80 | 50 | - | - | - |
| F90 | 51 | - | - | - |

| Nom session | Nbr Pts | EYX [ppm] | EZ [ppm] |
|---|---|---|---|
| F00 | 51 | - | - |
| F10 | 51 | - | - |
| F80 | 50 | - | - |
| F90 | 51 | - | - |

Nouveaux points:
==========

| Point Nr. | Y [m] | X [m] | Z [m] | emY [mm] | emX [mm] | emZ [mm] | DY [mm] | DX [mm] | DZ [mm] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 99695.3614 | 199555.1228 | 3048.1491 | 0.416 | 0.426 | 0.716 | -0.258 | -0.474 | -0.328 |
| 10 | 100073.0619 | 199893.4451 | 2934.9273 | 0.355 | 0.364 | 0.697 | -0.197 | -0.541 | -0.493 |
| 11 | 99853.6546 | 199754.6332 | 3004.2596 | 0.340 | 0.358 | 0.689 | -0.220 | -0.495 | 0.165 |
| 1101 | 98700.2878 | 201366.0159 | 3342.0050 | 0.596 | 0.575 | 1.219 | -0.166 | -0.398 | -1.055 |
| 1102 | 101796.9367 | 199915.6573 | 3356.7994 | 0.603 | 0.675 | 1.310 | -0.141 | -0.525 | -0.673 |
| 1103 | 102309.3384 | 197664.4680 | 3325.9947 | 0.790 | 0.691 | 1.371 | 1.256 | -0.512 | -0.562 |
| 1104 | 99122.6882 | 199296.6752 | 3434.0707 | 0.595 | 0.641 | 1.188 | -0.211 | -0.531 | -0.685 |
| 12 | 100223.7462 | 199924.2545 | 3033.7456 | 0.344 | 0.372 | 0.701 | -0.190 | -0.562 | -0.447 |
| 13 | 100087.3228 | 198477.6646 | 2991.6842 | 0.606 | 0.480 | 0.873 | 0.064 | -0.530 | -0.414 |
| 14 | 101453.8190 | 198939.8736 | 3093.9482 | 0.485 | 0.574 | 1.105 | -0.178 | -0.529 | -0.570 |
| 15 | 99315.2947 | 199990.5102 | 3009.7557 | 0.382 | 0.665 | 0.770 | -0.177 | -0.389 | -0.380 |
| 16 | 100115.2285 | 200375.4015 | 3030.4715 | 0.622 | 0.409 | 0.893 | -0.075 | -0.550 | -0.434 |
| 2 | 100424.4245 | 200123.0660 | 3101.0641 | 0.384 | 0.417 | 0.758 | -0.167 | -0.573 | -0.403 |
| 3 | 99862.3228 | 200494.3854 | 3031.4739 | 0.517 | 0.407 | 0.941 | -0.090 | -0.490 | -0.685 |
| 4 | 99998.8383 | 199801.1413 | 2991.6494 | 0.353 | 0.357 | 0.686 | -0.223 | -0.523 | -0.556 |
| 5 | 100129.7811 | 199914.7832 | 3000.6139 | 0.341 | 0.365 | 0.687 | -0.195 | -0.558 | -0.476 |
| 5.1 | 100133.4705 | 199910.7113 | 3000.5778 | 0.342 | 0.366 | 0.687 | -0.196 | -0.559 | -0.477 |
| 522 | 99820.6360 | 199723.4081 | 3000.7865 | 0.475 | 0.483 | 0.694 | -0.275 | -0.540 | -0.577 |
| 522L | 99831.6497 | 199711.6102 | 2994.5707 | 63.775 | 63.776 | 0.720 | -0.271 | -0.534 | -0.530 |
| 522S | 99816.0412 | 199727.7914 | 3000.6584 | 65.343 | 65.343 | 0.700 | -0.244 | -0.506 | -0.548 |
| 523 | 99799.1945 | 199702.5820 | 3000.9649 | 0.489 | 0.499 | 0.696 | -0.244 | -0.506 | -0.518 |
| 523L | 99807.3141 | 199693.7832 | 2993.4021 | 43.961 | 43.961 | 0.714 | -0.271 | -0.534 | -0.530 |
| 523S | 99794.5904 | 199706.8878 | 3000.6492 | 65.344 | 65.344 | 0.700 | -0.213 | -0.469 | -0.530 |
| 524 | 99788.0865 | 199691.7982 | 3000.9936 | 0.538 | 0.574 | 0.697 | -0.213 | -0.469 | -0.483 |
| 524L | 99798.4823 | 199680.6073 | 2991.8957 | 58.822 | 58.822 | 0.717 | -0.267 | -0.526 | -0.520 |
| 524S | 99783.4972 | 199696.1102 | 3000.6961 | 46.206 | 46.206 | 0.702 | -0.225 | -0.481 | -0.461 |
| 525 | 99776.9682 | 199681.0159 | 3000.9947 | 0.500 | 0.516 | 0.698 | -0.237 | -0.493 | -0.437 |
| 525L | 99788.4963 | 199668.7667 | 2991.4372 | 67.696 | 67.696 | 0.719 | -0.262 | -0.519 | -0.511 |
| 525S | 99772.3733 | 199685.3690 | 3000.7263 | 46.205 | 46.206 | 0.703 | -0.236 | -0.491 | -0.425 |
| 526 | 99765.8227 | 199670.1957 | 3000.9510 | 0.502 | 0.523 | 0.699 | -0.236 | -0.488 | -0.413 |
| 526L | 99777.6410 | 199657.6322 | 2991.1198 | 72.806 | 72.806 | 0.720 | -0.259 | -0.513 | -0.501 |
| 526S | 99761.2303 | 199674.4861 | 3000.6897 | 46.205 | 46.206 | 0.703 | -0.236 | -0.491 | -0.426 |
| 527 | 99754.7546 | 199659.3576 | 3000.8505 | 0.501 | 0.529 | 0.701 | -0.237 | -0.484 | -0.399 |
| 527L | 99766.9317 | 199646.4286 | 2990.9091 | 74.925 | 74.925 | 0.721 | -0.254 | -0.505 | -0.491 |
| 527S | 99750.1181 | 199663.6331 | 3000.5994 | 37.727 | 37.728 | 0.703 | -0.237 | -0.484 | -0.404 |
| 528 | 99743.8695 | 199648.8077 | 3000.6599 | 0.529 | 0.580 | 0.702 | -0.239 | -0.479 | -0.398 |
| 528L | 99756.3534 | 199635.5192 | 2990.7674 | 74.311 | 74.311 | 0.721 | -0.249 | -0.498 | -0.480 |
| 528S | 99739.2966 | 199653.0846 | 3000.5424 | 50.113 | 50.114 | 0.708 | -0.238 | -0.479 | -0.401 |
| 6 | 99964.5753 | 199809.2746 | 3000.6778 | 0.340 | 0.352 | 0.684 | -0.226 | -0.514 | -0.535 |
| 7 | 99997.7282 | 199907.0250 | 3000.6707 | 0.331 | 0.347 | 0.683 | -0.196 | -0.510 | -0.491 |
| 8 | 100143.0331 | 199817.5343 | 2875.0822 | 0.417 | 0.464 | 0.722 | -0.203 | -0.540 | -0.481 |
| 9 | 99995.7643 | 199845.1510 | 2864.1237 | 0.390 | 0.408 | 0.714 | -0.203 | -0.528 | -0.489 |
| AIGE | -851.1972 | 189648.4170 | 838.5642 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.563 |
| ARD2 | 311422.4557 | 251284.0272 | -990.9666 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.562 |
| ARDE | 311417.8293 | 251284.4236 | -990.6471 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.562 |
| BOU2 | 84475.7669 | 316276.1612 | 1025.1972 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.562 |
| BOUR | 84487.1889 | 316285.0071 | 1023.2044 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.562 |
| C1 | 99967.3251 | 199847.4449 | 3000.7190 | 0.356 | 0.384 | 0.699 | -0.224 | -0.508 | -0.484 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C2 | 99980.9880 | 199883.4474 | 3000.7176 | 0.358 | 0.381 | 0.699 | -0.211 | -0.514 | -0.483 |
| C3 | 100019.3660 | 199926.2424 | 3000.7148 | 0.377 | 0.384 | 0.706 | -0.190 | -0.534 | -0.503 |
| C4 | 100053.6860 | 199943.6498 | 3000.7182 | 0.380 | 0.382 | 0.709 | -0.180 | -0.549 | -0.481 |
| C5 | 100091.5947 | 199950.4060 | 3000.7052 | 0.380 | 0.389 | 0.708 | -0.178 | -0.561 | -0.481 |
| C6 | 100117.4712 | 199948.6397 | 3000.6981 | 0.374 | 0.410 | 0.707 | -0.180 | -0.573 | -0.478 |
| DAV2 | 283745.0830 | 254456.2645 | -62.4774 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.513 | -0.562 |
| DAVO | 283733.9893 | 254443.6739 | -61.8011 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.513 | -0.562 |
| EPFL | 33385.7466 | 219606.9850 | 1249.5819 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.563 |
| ETH2 | 181107.3084 | 318258.5544 | 145.7060 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.562 |
| ETHZ | 181101.4259 | 318246.1452 | 146.0013 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.563 |
| FALE | 236966.9073 | 252263.1078 | 828.6930 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.513 | -0.563 |
| FHNW | 115500.9571 | 331893.3245 | 173.7664 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.562 |
| FRI3 | 150878.4576 | 331295.7226 | 333.9657 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.513 | -0.562 |
| FRIC | 150900.1111 | 331295.4983 | 332.6309 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.513 | -0.562 |
| G4 | 100038.2552 | 199932.9131 | 2927.7636 | 0.437 | 0.470 | 0.773 | -0.192 | -0.534 | -0.529 |
| HABG | 157069.1236 | 244638.0215 | 1903.6419 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.513 | -0.563 |
| HOH2 | 125166.1396 | 196829.1889 | 2104.5395 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.513 | -0.563 |
| HOHT | 125161.6502 | 196829.9112 | 2104.5571 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.563 |
| HUTT | 130257.6618 | 288203.7526 | 1261.5596 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.562 |
| KALT | 219095.1742 | 297853.2286 | -220.0546 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.562 |
| KREU | 229534.4951 | 345142.6207 | -1274.7155 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.562 |
| KROL | 100021.9677 | 199937.6219 | 2999.2482 | 0.372 | 0.385 | 0.690 | -0.181 | -0.534 | -0.499 |
| KROM | 99990.2962 | 199913.7270 | 2999.5243 | 0.383 | 0.397 | 0.689 | -0.189 | -0.514 | -0.508 |
| KROR | 99971.4812 | 199879.1192 | 2999.2188 | 0.361 | 0.388 | 0.689 | -0.211 | -0.504 | -0.512 |
| LOMO | 204353.9097 | 181344.8379 | 728.6011 | 0.790 | 0.790 | 1.568 | -0.108 | -0.512 | -0.564 |
| LUZE | 165677.2138 | 280381.4131 | 862.8064 | 0.790 | 0.790 | 1.568 | -0.147 | -0.513 | -0.564 |
| MAR2 | 71758.2935 | 174915.6705 | 1702.3118 | 0.958 | 0.691 | 1.371 | 1.890 | -0.511 | -0.563 |
| MAR3 | 71758.0305 | 174922.8039 | 1703.2927 | 0.958 | 0.691 | 1.371 | 1.555 | -0.512 | -0.563 |
| N10 | 100023.8873 | 199931.2886 | 2999.3737 | 32.283 | 32.283 | 0.685 | -0.192 | -0.528 | -0.503 |
| N101 | 99760.9333 | 199244.5381 | 2997.4530 | 133.544 | 133.544 | 0.752 | -0.246 | -0.491 | -0.428 |
| N103 | 99700.5410 | 199052.1629 | 2995.7757 | 155.687 | 155.687 | 0.781 | -0.246 | -0.491 | -0.424 |
| N104 | 99684.7367 | 199001.8121 | 2995.3945 | 162.398 | 162.398 | 0.786 | -0.246 | -0.491 | -0.424 |
| N105 | 99670.8606 | 198956.6845 | 2995.2224 | 174.924 | 174.924 | 0.791 | 0.064 | -0.530 | -0.423 |
| N106.1 | 99698.0380 | 198877.3032 | 2994.1473 | 168.712 | 168.712 | 0.799 | 0.064 | -0.530 | -0.423 |
| N107 | 99736.0767 | 198774.6462 | 2993.0158 | 162.262 | 162.262 | 0.808 | 0.064 | -0.530 | -0.422 |
| N108 | 99752.2084 | 198748.3181 | 2993.1344 | 157.816 | 157.815 | 0.811 | 0.064 | -0.530 | -0.422 |
| N109 | 99808.6742 | 198667.1706 | 2992.3211 | 153.241 | 153.240 | 0.816 | 0.064 | -0.530 | -0.421 |
| N10A | 100020.0447 | 199937.8580 | 2999.5216 | 44.334 | 44.334 | 0.687 | -0.194 | -0.527 | -0.503 |
| N11 | 100051.4397 | 199944.5581 | 2999.3775 | 43.094 | 43.094 | 0.687 | -0.193 | -0.531 | -0.499 |
| N110 | 99865.4141 | 198585.5481 | 2991.1668 | 146.109 | 146.109 | 0.825 | 0.064 | -0.530 | -0.420 |
| N111 | 99923.5054 | 198502.5934 | 2990.2369 | 138.611 | 138.611 | 0.832 | 0.064 | -0.530 | -0.419 |
| N112 | 99980.9514 | 198419.9668 | 2989.4022 | 130.684 | 130.684 | 0.840 | 0.064 | -0.530 | -0.418 |
| N113 | 100009.4083 | 198379.2201 | 2989.1864 | 122.244 | 122.244 | 0.848 | 0.064 | -0.530 | -0.417 |
| N114 | 100065.8901 | 198297.9347 | 2988.3829 | 130.684 | 130.684 | 0.858 | 0.064 | -0.530 | -0.417 |
| N115 | 100074.1646 | 198279.6051 | 2988.3107 | 138.611 | 138.611 | 0.863 | 0.064 | -0.530 | -0.417 |
| N116 | 100014.5626 | 198401.1641 | 2988.9963 | 113.176 | 113.176 | 0.851 | 0.064 | -0.530 | -0.417 |
| N117 | 100042.8652 | 198414.0763 | 2987.9799 | 103.316 | 103.315 | 0.855 | 0.064 | -0.530 | -0.416 |
| N118 | 100086.8159 | 198435.5938 | 2988.2634 | 92.409 | 92.408 | 0.859 | 0.064 | -0.530 | -0.416 |
| N119 | 100110.9540 | 198441.6821 | 2988.1926 | 80.029 | 80.028 | 0.862 | 0.064 | -0.530 | -0.415 |
| N11A | 100049.1538 | 199951.7537 | 2999.5071 | 49.528 | 49.528 | 0.689 | -0.192 | -0.532 | -0.499 |
| N12 | 100081.7077 | 199951.2135 | 2999.3769 | 48.679 | 48.679 | 0.688 | -0.192 | -0.535 | -0.496 |
| N120 | 100103.9496 | 198462.1513 | 2988.2423 | 65.344 | 65.343 | 0.866 | 0.064 | -0.530 | -0.415 |
| N121 | 100087.0333 | 198477.4666 | 2990.2532 | 46.207 | 46.206 | 0.869 | 0.064 | -0.530 | -0.415 |
| N12A | 100081.1371 | 199958.6702 | 2999.5114 | 54.652 | 54.652 | 0.690 | -0.193 | -0.535 | -0.496 |
| N13 | 100114.3358 | 199950.5117 | 2999.3724 | 51.660 | 51.660 | 0.688 | -0.193 | -0.538 | -0.491 |
| N130 | 99585.2995 | 199745.7806 | 3001.1309 | 65.343 | 65.343 | 0.727 | -0.231 | -0.469 | -0.404 |
| N132E | 99518.2794 | 199824.7272 | 3001.9044 | 73.347 | 73.347 | 0.739 | -0.226 | -0.461 | -0.398 |
| N133 | 99441.8527 | 199907.0032 | 3003.7429 | 78.410 | 78.411 | 0.746 | -0.220 | -0.453 | -0.395 |
| N133A | 99426.3465 | 199913.6592 | 3005.8121 | 81.612 | 81.612 | 0.753 | -0.210 | -0.437 | -0.391 |
| N134 | 99414.2270 | 199920.4925 | 3006.2818 | 76.200 | 76.201 | 0.756 | -0.199 | -0.421 | -0.389 |
| N134.1 | 99377.9098 | 199942.7610 | 3006.2876 | 89.114 | 89.114 | 0.762 | -0.199 | -0.421 | -0.389 |
| N135 | 99368.2757 | 199947.3012 | 3007.4978 | 69.765 | 69.766 | 0.762 | -0.193 | -0.413 | -0.386 |
| N137 | 99246.9767 | 200012.2684 | 3010.3595 | 75.637 | 75.639 | 0.784 | -0.188 | -0.405 | -0.382 |
| N137.1 | 99251.0887 | 200007.3606 | 3010.4378 | 88.633 | 88.634 | 0.790 | -0.188 | -0.405 | -0.382 |
| N138 | 99315.3401 | 199990.9865 | 3008.2971 | 59.885 | 59.887 | 0.767 | -0.188 | -0.405 | -0.382 |
| N13A | 100115.8101 | 199957.8559 | 2999.5119 | 56.764 | 56.764 | 0.690 | -0.192 | -0.538 | -0.491 |
| N14 | 100145.2477 | 199918.7038 | 3000.4614 | 52.932 | 52.933 | 0.689 | -0.194 | -0.548 | -0.482 |
| N15 | 100129.4770 | 199915.1499 | 2999.3724 | 55.697 | 55.697 | 0.690 | -0.194 | -0.543 | -0.487 |
| N150 | 100280.7362 | 200060.9351 | 3009.7945 | 81.337 | 81.337 | 0.714 | -0.192 | -0.544 | -0.476 |
| N151 | 100303.5715 | 200083.6541 | 3011.9950 | 84.408 | 84.409 | 0.716 | -0.192 | -0.546 | -0.471 |
| N152 | 100281.3064 | 200041.1197 | 3015.2872 | 85.574 | 85.574 | 0.717 | -0.191 | -0.548 | -0.468 |
| N153 | 100314.9444 | 200081.3723 | 3016.8374 | 97.250 | 97.250 | 0.729 | -0.191 | -0.548 | -0.468 |
| N154 | 100325.8124 | 200096.1143 | 3019.6902 | 107.668 | 107.668 | 0.741 | -0.191 | -0.548 | -0.468 |
| N155 | 100324.0805 | 200135.6914 | 3021.5343 | 117.163 | 117.163 | 0.747 | -0.191 | -0.548 | -0.468 |
| N156 | 100258.2741 | 200002.6143 | 3021.7264 | 84.911 | 84.911 | 0.716 | -0.191 | -0.550 | -0.461 |
| N157 | 100377.1676 | 200031.4224 | 3032.8961 | 82.376 | 82.376 | 0.713 | -0.191 | -0.551 | -0.457 |
| N158 | 100447.9378 | 200105.5193 | 3033.4782 | 94.449 | 94.449 | 0.725 | -0.191 | -0.551 | -0.457 |
| N16 | 99964.6966 | 199789.2841 | 2999.6033 | 53.820 | 53.820 | 0.687 | -0.240 | -0.527 | -0.640 |
| N167 | 100396.2804 | 200020.3964 | 3032.6859 | 77.787 | 77.787 | 0.712 | -0.190 | -0.553 | -0.455 |
| N16A | 99841.9060 | 199744.6458 | 3001.1073 | 41.775 | 41.775 | 0.695 | -0.264 | -0.535 | -0.757 |
| N16B | 99850.6779 | 199748.0841 | 3001.4001 | 52.063 | 52.063 | 0.694 | -0.252 | -0.531 | -0.935 |
| N170 | 100257.1320 | 199942.5698 | 3035.2989 | 70.744 | 70.744 | 0.709 | -0.190 | -0.555 | -0.452 |
| N171 | 100223.5739 | 199924.7950 | 3032.3000 | 60.395 | 60.395 | 0.704 | -0.189 | -0.557 | -0.449 |
| N18 | 99738.9482 | 199643.5965 | 3000.5019 | 38.803 | 38.803 | 0.705 | -0.239 | -0.478 | -0.404 |
| N18A | 99743.4943 | 199593.4392 | 2999.9156 | 64.220 | 64.220 | 0.711 | -0.241 | -0.484 | -0.422 |
| N18B | 99764.1282 | 199549.6229 | 2998.6530 | 70.891 | 70.891 | 0.714 | -0.246 | -0.491 | -0.430 |
| N18C | 99784.4447 | 199502.9723 | 2998.2019 | 84.619 | 84.619 | 0.719 | -0.246 | -0.491 | -0.430 |
| N18D | 99797.9987 | 199453.9810 | 2998.0759 | 96.411 | 96.411 | 0.725 | -0.246 | -0.491 | -0.429 |
| N18E | 99803.4001 | 199403.1118 | 2997.8701 | 106.910 | 106.910 | 0.730 | -0.246 | -0.491 | -0.429 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| N19 | 99812.6843 | 199353.0801 | 2998.2153 | 116.467 | 116.467 | 0.736 | -0.246 | -0.491 | -0.429 |
| N2 | 99711.1944 | 199099.0127 | 2995.7777 | 141.311 | 141.311 | 0.772 | -0.246 | -0.491 | -0.425 |
| N2.1 | 99707.1851 | 199085.5866 | 2995.6847 | 148.673 | 148.673 | 0.777 | -0.246 | -0.491 | -0.425 |
| N4 | 100222.7865 | 200046.6143 | 3003.1522 | 68.296 | 68.296 | 0.705 | -0.192 | -0.540 | -0.484 |
| N4.1 | 99998.3383 | 199801.6413 | 2990.1431 | 65.342 | 65.342 | 0.693 | -0.223 | -0.523 | -0.556 |
| N5 | 100261.5030 | 200054.2027 | 3007.4634 | 76.128 | 76.129 | 0.710 | -0.192 | -0.542 | -0.479 |
| N6 | 99962.4115 | 199817.5635 | 2999.3848 | 40.352 | 40.352 | 0.685 | -0.221 | -0.519 | -0.554 |
| N6.1 | 99954.4056 | 199807.3398 | 2999.4154 | 47.991 | 47.991 | 0.686 | -0.228 | -0.522 | -0.587 |
| N6.1A | 99955.0146 | 199817.2736 | 2999.4707 | 61.685 | 61.685 | 0.691 | -0.225 | -0.521 | -0.571 |
| N6A | 99963.4426 | 199807.5717 | 2999.5226 | 49.523 | 49.523 | 0.687 | -0.221 | -0.520 | -0.558 |
| N7 | 99965.5835 | 199848.2282 | 2999.3784 | 39.652 | 39.652 | 0.685 | -0.214 | -0.518 | -0.538 |
| N7A | 99958.2850 | 199849.7832 | 2999.5209 | 47.063 | 47.063 | 0.687 | -0.214 | -0.519 | -0.539 |
| N8 | 99975.9611 | 199877.8848 | 2999.3792 | 35.721 | 35.721 | 0.685 | -0.207 | -0.518 | -0.522 |
| N8A | 99969.3845 | 199881.3292 | 2999.5076 | 33.641 | 33.641 | 0.686 | -0.209 | -0.514 | -0.519 |
| N9 | 99996.2412 | 199907.9333 | 2999.3857 | 34.142 | 34.142 | 0.684 | -0.198 | -0.521 | -0.507 |
| N9A | 99990.6871 | 199912.9663 | 2999.5237 | 32.729 | 32.730 | 0.685 | -0.196 | -0.520 | -0.509 |
| NBU | 99723.1149 | 199629.1698 | 3000.8635 | 53.086 | 53.086 | 0.708 | -0.237 | -0.477 | -0.412 |
| NBU2 | 99715.1498 | 199636.7231 | 3000.8726 | 70.376 | 70.377 | 0.714 | -0.237 | -0.477 | -0.412 |
| NBU3 | 99712.3893 | 199634.5425 | 3000.2019 | 84.188 | 84.188 | 0.720 | -0.237 | -0.477 | -0.412 |
| NBU4 | 99704.2476 | 199629.9611 | 3000.4491 | 96.033 | 96.033 | 0.726 | -0.237 | -0.477 | -0.412 |
| NEUC | 62302.7518 | 271872.2299 | 1153.3236 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.150 | -0.513 | -0.562 |
| OALP | 194752.4902 | 235397.6047 | 2506.3166 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.562 |
| PAYE | 62438.7980 | 251672.6860 | 1395.0215 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.513 | -0.562 |
| SAA2 | 89657.7022 | 218591.7381 | 2552.0284 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.562 |
| SAAN | 89656.4275 | 218597.0908 | 2552.0013 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.563 |
| SAM2 | 287466.2767 | 222662.0140 | 140.1822 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.150 | -0.512 | -0.563 |
| SANB | 234323.3797 | 214318.5207 | 1443.0460 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.150 | -0.513 | -0.562 |
| SAR2 | 257585.4556 | 272584.1259 | 74.5861 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.513 | -0.563 |
| SCHA | 191491.3758 | 355141.8146 | -744.6742 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.563 |
| STA2 | 216928.6135 | 146358.3750 | 293.1473 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.562 |
| STAB | 216924.3789 | 146361.5351 | 293.2253 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.563 |
| STCX | 28652.2521 | 253121.2638 | 1701.7801 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.513 | -0.562 |
| STGA | 244048.5868 | 323293.4752 | -900.0995 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.513 | -0.562 |
| ZERM | 122931.2583 | 161466.8650 | 2944.3310 | 1.368 | 1.368 | 2.715 | -0.274 | -0.512 | -0.558 |
| ZIM2 | 102209.8303 | 258780.9123 | 1850.9511 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.150 | -0.513 | -0.562 |
| ZIMM | 102228.5939 | 258781.3414 | 1850.8404 | 0.690 | 0.691 | 1.371 | -0.149 | -0.512 | -0.563 |

Points des conditions de Helmert / Avec mise à jour

| Point Nr. | Y [m] | X [m] | Z [m] | RY [mm] | RX [mm] | RZ [mm] |
|---|---|---|---|---|---|---|

TOUTES LES STATIONS AGNES

Ellipsoïde d'erreur moy. :

| Point Nr. | A [mm] | B [mm] | C [mm] | Gis(A) [gon] | Z(A) [gon] | Gis(B) [gon] | Z(B) [gon] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.72 | 0.48 | 0.36 | 93.94 | 0.91 | 352.81 | 99.45 |
| 10 | 0.70 | 0.37 | 0.35 | 142.75 | 0.45 | 36.12 | 99.95 |
| 11 | 0.69 | 0.36 | 0.34 | 140.05 | 0.57 | 383.25 | 99.56 |
| 1101 | 1.22 | 0.66 | 0.49 | 157.91 | 5.55 | 54.35 | 99.69 |
| 1102 | 1.31 | 0.68 | 0.60 | 294.70 | 2.85 | 394.43 | 100.01 |
| 1103 | 1.37 | 0.79 | 0.69 | 352.91 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| 1104 | 1.20 | 0.67 | 0.55 | 65.56 | 8.56 | 365.43 | 99.98 |
| 12 | 0.70 | 0.37 | 0.34 | 159.63 | 0.38 | 397.26 | 99.69 |
| 13 | 0.87 | 0.61 | 0.48 | 232.86 | 1.02 | 103.35 | 99.55 |
| 14 | 1.11 | 0.62 | 0.42 | 316.47 | 1.77 | 34.91 | 99.49 |
| 15 | 0.77 | 0.67 | 0.38 | 203.02 | 5.39 | 6.96 | 94.62 |
| 16 | 0.89 | 0.63 | 0.39 | 223.22 | 1.26 | 114.17 | 99.82 |
| 2 | 0.76 | 0.44 | 0.36 | 245.77 | 2.08 | 364.67 | 99.39 |
| 3 | 0.94 | 0.52 | 0.40 | 187.23 | 1.03 | 84.80 | 99.96 |
| 4 | 0.69 | 0.36 | 0.35 | 138.77 | 0.45 | 379.24 | 99.64 |
| 5 | 0.69 | 0.36 | 0.34 | 134.08 | 0.56 | 2.62 | 99.74 |
| 5.1 | 0.69 | 0.37 | 0.34 | 134.22 | 0.56 | 1.39 | 99.72 |
| 522 | 0.69 | 0.51 | 0.45 | 98.45 | 1.05 | 46.29 | 100.71 |
| 522L | 63.78 | 63.78 | 0.72 | 43.53 | 100.00 | 143.53 | 100.00 |
| 522S | 65.34 | 65.34 | 0.70 | 41.47 | 100.00 | 141.47 | 100.00 |
| 523 | 0.70 | 0.51 | 0.47 | 112.45 | 0.94 | 41.24 | 100.41 |
| 523L | 43.96 | 43.96 | 0.71 | 43.39 | 100.00 | 143.39 | 100.00 |
| 523S | 65.34 | 65.34 | 0.70 | 40.84 | 100.00 | 140.84 | 100.00 |
| 524 | 0.70 | 0.62 | 0.49 | 169.61 | 0.95 | 40.82 | 99.59 |
| 524L | 58.82 | 58.82 | 0.72 | 37.66 | 100.00 | 137.66 | 100.00 |
| 524S | 46.21 | 46.21 | 0.70 | 25.27 | 100.00 | 125.27 | 100.00 |
| 525 | 0.70 | 0.52 | 0.50 | 120.45 | 0.96 | 19.99 | 99.99 |
| 525L | 67.70 | 67.70 | 0.72 | 25.43 | 100.00 | 125.43 | 100.00 |
| 525S | 46.21 | 46.21 | 0.70 | 380.03 | 100.00 | 80.03 | 100.00 |
| 526 | 0.70 | 0.52 | 0.50 | 124.10 | 0.97 | 3.72 | 99.70 |
| 526L | 72.81 | 72.81 | 0.72 | 4.74 | 100.00 | 104.74 | 100.00 |
| 526S | 46.21 | 46.21 | 0.70 | 380.03 | 100.00 | 80.03 | 100.00 |
| 527 | 0.70 | 0.53 | 0.50 | 128.63 | 0.97 | 395.00 | 99.51 |
| 527L | 74.93 | 74.93 | 0.72 | 387.84 | 100.00 | 87.84 | 100.00 |
| 527S | 37.73 | 37.73 | 0.70 | 367.03 | 100.00 | 67.03 | 100.00 |
| 528 | 0.70 | 0.60 | 0.50 | 146.17 | 1.52 | 367.52 | 98.56 |
| 528L | 74.31 | 74.31 | 0.72 | 379.31 | 100.00 | 79.31 | 100.00 |
| 528S | 50.11 | 50.11 | 0.71 | 368.08 | 100.00 | 68.08 | 100.00 |
| 6 | 0.68 | 0.35 | 0.34 | 128.62 | 0.61 | 11.70 | 99.84 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | 0.68 | 0.35 | 0.33 | 136.52 | 0.53 | 20.68 | 99.87 |
| 8 | 0.72 | 0.49 | 0.39 | 127.78 | 2.02 | 34.24 | 100.20 |
| 9 | 0.71 | 0.41 | 0.39 | 230.17 | 1.14 | 384.02 | 99.15 |
| AIGE | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| ARD2 | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| ARDE | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| BOU2 | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| BOUR | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| C1 | 0.70 | 0.38 | 0.36 | 126.70 | 0.56 | 8.59 | 99.84 |
| C2 | 0.70 | 0.38 | 0.35 | 131.58 | 0.58 | 21.47 | 99.91 |
| C3 | 0.71 | 0.39 | 0.37 | 135.57 | 0.66 | 38.54 | 100.03 |
| C4 | 0.71 | 0.39 | 0.38 | 148.44 | 0.54 | 43.81 | 99.96 |
| C5 | 0.71 | 0.39 | 0.38 | 147.24 | 0.55 | 368.48 | 99.48 |
| C6 | 0.71 | 0.41 | 0.37 | 136.88 | 0.57 | 383.01 | 99.57 |
| DAV2 | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| DAVO | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| EPFL | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| ETH2 | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| ETHZ | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| FALE | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| FHNW | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| FRI3 | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| FRIC | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| G4 | 0.77 | 0.48 | 0.43 | 40.59 | 1.93 | 27.91 | 101.89 |
| HABG | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| HOH2 | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| HOHT | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| HUTT | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| KALT | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| KREU | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| KROL | 0.69 | 0.39 | 0.37 | 140.55 | 0.54 | 28.79 | 99.90 |
| KROM | 0.69 | 0.40 | 0.38 | 140.10 | 0.57 | 371.73 | 99.50 |
| KROR | 0.69 | 0.39 | 0.36 | 138.87 | 0.56 | 12.09 | 99.77 |
| LOMO | 1.57 | 0.79 | 0.79 | 352.84 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| LUZE | 1.57 | 0.79 | 0.79 | 352.61 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| MAR2 | 1.37 | 0.96 | 0.69 | 353.94 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| MAR3 | 1.37 | 0.96 | 0.69 | 353.94 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| N10 | 32.28 | 32.28 | 0.69 | 20.47 | 100.00 | 120.47 | 100.00 |
| N101 | 133.54 | 133.54 | 0.75 | 374.70 | 100.00 | 74.70 | 100.00 |
| N103 | 155.69 | 155.69 | 0.78 | 374.70 | 100.00 | 74.70 | 100.00 |
| N104 | 162.40 | 162.40 | 0.79 | 374.70 | 100.00 | 74.70 | 100.00 |
| N105 | 174.92 | 174.92 | 0.79 | 103.35 | 100.00 | 3.35 | 100.00 |
| N106.1 | 168.71 | 168.71 | 0.80 | 103.31 | 100.00 | 3.31 | 100.00 |
| N107 | 162.26 | 162.26 | 0.81 | 103.31 | 100.00 | 3.31 | 100.00 |
| N108 | 157.82 | 157.82 | 0.81 | 103.31 | 100.00 | 3.31 | 100.00 |
| N109 | 153.24 | 153.24 | 0.82 | 103.31 | 100.00 | 3.31 | 100.00 |
| N10A | 44.33 | 44.33 | 0.69 | 19.66 | 100.00 | 119.66 | 100.00 |
| N11 | 43.09 | 43.09 | 0.69 | 20.47 | 100.00 | 120.47 | 100.00 |
| N110 | 146.11 | 146.11 | 0.82 | 103.31 | 100.00 | 3.31 | 100.00 |
| N111 | 138.61 | 138.61 | 0.83 | 103.31 | 100.00 | 3.31 | 100.00 |
| N112 | 130.68 | 130.68 | 0.84 | 103.31 | 100.00 | 3.31 | 100.00 |
| N113 | 122.24 | 122.24 | 0.85 | 103.31 | 100.00 | 3.31 | 100.00 |
| N114 | 130.68 | 130.68 | 0.86 | 103.31 | 100.00 | 3.31 | 100.00 |
| N115 | 138.61 | 138.61 | 0.86 | 103.31 | 100.00 | 3.31 | 100.00 |
| N116 | 113.18 | 113.18 | 0.85 | 103.33 | 100.00 | 3.33 | 100.00 |
| N117 | 103.32 | 103.32 | 0.86 | 103.33 | 100.00 | 3.33 | 100.00 |
| N118 | 92.41 | 92.41 | 0.86 | 103.33 | 100.00 | 3.33 | 100.00 |
| N119 | 80.03 | 80.03 | 0.86 | 103.33 | 100.00 | 3.33 | 100.00 |
| N11A | 49.53 | 49.53 | 0.69 | 20.53 | 100.00 | 120.53 | 100.00 |
| N12 | 48.68 | 48.68 | 0.69 | 20.48 | 100.00 | 120.48 | 100.00 |
| N120 | 65.34 | 65.34 | 0.87 | 103.33 | 100.00 | 3.33 | 100.00 |
| N121 | 46.21 | 46.21 | 0.87 | 103.32 | 100.00 | 3.32 | 100.00 |
| N12A | 54.65 | 54.65 | 0.69 | 20.11 | 100.00 | 120.11 | 100.00 |
| N13 | 51.66 | 51.66 | 0.69 | 19.87 | 100.00 | 119.87 | 100.00 |
| N130 | 65.34 | 65.34 | 0.73 | 376.77 | 100.00 | 76.77 | 100.00 |
| N132E | 73.35 | 73.35 | 0.74 | 382.31 | 100.00 | 82.31 | 100.00 |
| N133 | 78.41 | 78.41 | 0.75 | 388.01 | 100.00 | 88.01 | 100.00 |
| N133A | 81.61 | 81.61 | 0.75 | 397.04 | 100.00 | 97.04 | 100.00 |
| N134 | 76.20 | 76.20 | 0.76 | 2.38 | 100.00 | 102.38 | 100.00 |
| N134.1 | 89.11 | 89.11 | 0.76 | 2.39 | 100.00 | 102.39 | 100.00 |
| N135 | 69.77 | 69.76 | 0.76 | 4.07 | 100.00 | 104.07 | 100.00 |
| N137 | 75.64 | 75.64 | 0.78 | 5.32 | 100.00 | 105.32 | 100.00 |
| N137.1 | 88.63 | 88.63 | 0.79 | 5.32 | 100.00 | 105.32 | 100.00 |
| N138 | 59.89 | 59.89 | 0.77 | 5.32 | 100.00 | 105.32 | 100.00 |
| N13A | 56.76 | 56.76 | 0.69 | 20.71 | 100.00 | 120.71 | 100.00 |
| N14 | 52.93 | 52.93 | 0.69 | 11.72 | 100.00 | 111.72 | 100.00 |
| N15 | 55.70 | 55.70 | 0.69 | 16.18 | 100.00 | 116.18 | 100.00 |
| N150 | 81.34 | 81.34 | 0.71 | 21.50 | 100.00 | 121.50 | 100.00 |
| N151 | 84.41 | 84.41 | 0.72 | 20.79 | 100.00 | 120.79 | 100.00 |
| N152 | 85.57 | 85.57 | 0.72 | 18.97 | 100.00 | 118.97 | 100.00 |
| N153 | 97.25 | 97.25 | 0.73 | 18.97 | 100.00 | 118.97 | 100.00 |
| N154 | 107.67 | 107.67 | 0.74 | 18.97 | 100.00 | 118.97 | 100.00 |
| N155 | 117.16 | 117.16 | 0.75 | 18.97 | 100.00 | 118.97 | 100.00 |
| N156 | 84.91 | 84.91 | 0.72 | 16.19 | 100.00 | 116.19 | 100.00 |
| N157 | 82.38 | 82.38 | 0.71 | 13.21 | 100.00 | 113.21 | 100.00 |
| N158 | 94.45 | 94.45 | 0.73 | 12.36 | 100.00 | 112.36 | 100.00 |
| N16 | 53.82 | 53.82 | 0.69 | 33.91 | 100.00 | 133.91 | 100.00 |
| N167 | 77.79 | 77.79 | 0.71 | 9.72 | 100.00 | 109.72 | 100.00 |
| N16A | 41.78 | 41.77 | 0.69 | 44.03 | 100.00 | 144.03 | 100.00 |

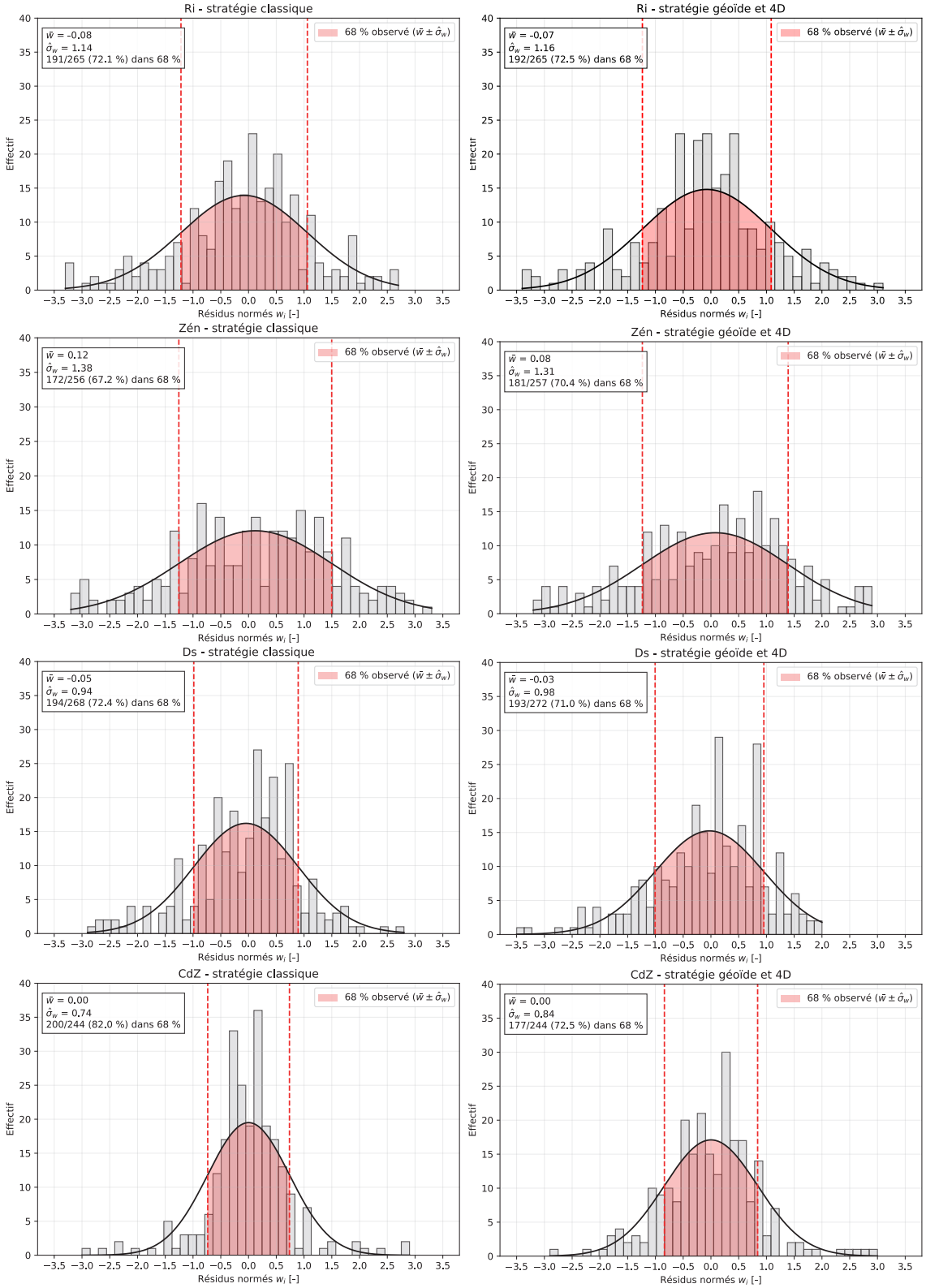
| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| N16B | 52.06 | 52.06 | 0.69 | 40.23 | 100.00 | 140.23 | 100.00 |
| N170 | 70.74 | 70.74 | 0.71 | 6.13 | 100.00 | 106.13 | 100.00 |
| N171 | 60.39 | 60.39 | 0.70 | 2.86 | 100.00 | 102.86 | 100.00 |
| N18 | 38.80 | 38.80 | 0.70 | 368.90 | 100.00 | 68.90 | 100.00 |
| N18A | 64.22 | 64.22 | 0.71 | 373.22 | 100.00 | 73.22 | 100.00 |
| N18B | 70.89 | 70.89 | 0.71 | 375.29 | 100.00 | 75.29 | 100.00 |
| N18C | 84.62 | 84.62 | 0.72 | 375.48 | 100.00 | 75.48 | 100.00 |
| N18D | 96.41 | 96.41 | 0.73 | 375.48 | 100.00 | 75.48 | 100.00 |
| N18E | 106.91 | 106.91 | 0.73 | 375.48 | 100.00 | 75.48 | 100.00 |
| N19 | 116.47 | 116.47 | 0.74 | 375.48 | 100.00 | 75.48 | 100.00 |
| N2 | 141.31 | 141.31 | 0.77 | 374.70 | 100.00 | 74.70 | 100.00 |
| N2.1 | 148.67 | 148.67 | 0.78 | 374.70 | 100.00 | 74.70 | 100.00 |
| N4 | 68.30 | 68.30 | 0.70 | 21.81 | 100.00 | 121.81 | 100.00 |
| N4.1 | 65.34 | 65.34 | 0.69 | 380.56 | 100.00 | 80.56 | 100.00 |
| N5 | 76.13 | 76.13 | 0.71 | 22.60 | 100.00 | 122.60 | 100.00 |
| N6 | 40.35 | 40.35 | 0.68 | 19.62 | 100.00 | 119.62 | 100.00 |
| N6.1 | 47.99 | 47.99 | 0.69 | 24.60 | 100.00 | 124.60 | 100.00 |
| N6.1A | 61.69 | 61.68 | 0.69 | 21.98 | 100.00 | 121.98 | 100.00 |
| N6A | 49.52 | 49.52 | 0.69 | 20.22 | 100.00 | 120.22 | 100.00 |
| N7 | 39.65 | 39.65 | 0.69 | 17.78 | 100.00 | 117.78 | 100.00 |
| N7A | 47.06 | 47.06 | 0.69 | 17.83 | 100.00 | 117.83 | 100.00 |
| N8 | 35.72 | 35.72 | 0.68 | 16.02 | 100.00 | 116.02 | 100.00 |
| N8A | 33.64 | 33.64 | 0.69 | 15.26 | 100.00 | 115.26 | 100.00 |
| N9 | 34.14 | 34.14 | 0.68 | 15.89 | 100.00 | 115.89 | 100.00 |
| N9A | 32.73 | 32.73 | 0.69 | 5.46 | 100.00 | 105.46 | 100.00 |
| NBU | 53.09 | 53.09 | 0.71 | 372.33 | 100.00 | 72.33 | 100.00 |
| NBU2 | 70.38 | 70.38 | 0.71 | 372.40 | 100.00 | 72.40 | 100.00 |
| NBU3 | 84.19 | 84.19 | 0.72 | 372.40 | 100.00 | 72.40 | 100.00 |
| NBU4 | 96.03 | 96.03 | 0.73 | 372.12 | 100.00 | 72.12 | 100.00 |
| NEUC | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| OALP | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| PAYE | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| SAA2 | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| SAAN | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| SAM2 | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| SANB | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| SAR2 | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| SCHA | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| STA2 | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| STAB | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| STCX | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| STGA | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| ZERM | 2.72 | 1.37 | 1.37 | 352.71 | 0.00 | 100.00 | 100.00 |
| ZIM2 | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| ZIMM | 1.37 | 0.69 | 0.69 | 352.80 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |

Ellipsoïde d'err. relatif:
==========

| Point 1 | Point 2 | A [mm] | B [mm] | C [mm] | Gis(A) [gon] | Z(A) [gon] | Gis(B) [gon] | Z(B) [gon] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 0.55 | 0.52 | 0.23 | 356.82 | 96.82 | 230.47 | 7.86 |
| 11 | 12 | 0.30 | 0.29 | 0.18 | 371.84 | 100.97 | 283.10 | 5.47 |
| 11 | 13 | 0.62 | 0.56 | 0.38 | 99.42 | 103.63 | 130.49 | 4.11 |
| 11 | 15 | 0.56 | 0.38 | 0.24 | 11.60 | 102.22 | 15.11 | 2.23 |
| 11 | 7 | 0.19 | 0.18 | 0.14 | 353.87 | 99.58 | 84.31 | 0.92 |
| 1101 | 1102 | 1.73 | 0.89 | 0.77 | 198.34 | 2.52 | 37.67 | 97.94 |
| 1102 | 1104 | 1.71 | 0.91 | 0.79 | 45.98 | 2.90 | 377.71 | 101.39 |
| 13 | 14 | 1.21 | 0.71 | 0.62 | 302.94 | 3.04 | 50.94 | 97.92 |
| 15 | 13 | 0.72 | 0.63 | 0.62 | 40.42 | 105.63 | 117.45 | 15.66 |
| 15 | 14 | 1.15 | 0.89 | 0.43 | 295.27 | 2.53 | 21.96 | 98.97 |
| 7 | 9 | 0.25 | 0.24 | 0.21 | 364.67 | 103.92 | 268.82 | 48.28 |
| NBU | N13 | 74.07 | 74.07 | 0.25 | 366.96 | 100.00 | 66.96 | 100.00 |

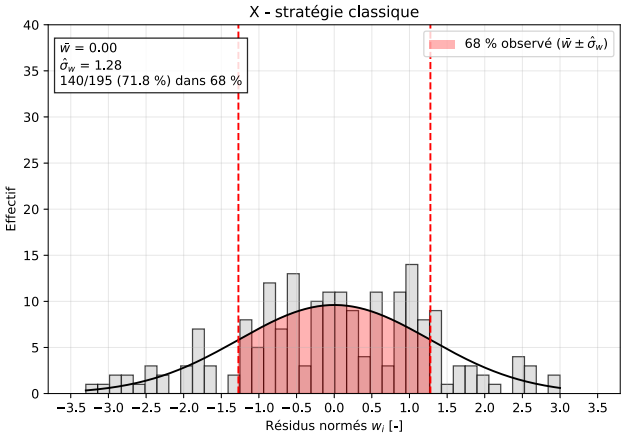
# ANNEXE U

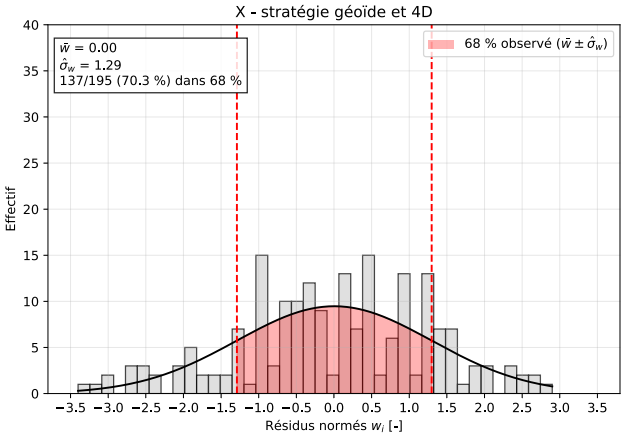
# STATISTIQUE DES RÉSULTATS FINAUX : TERRESTRES

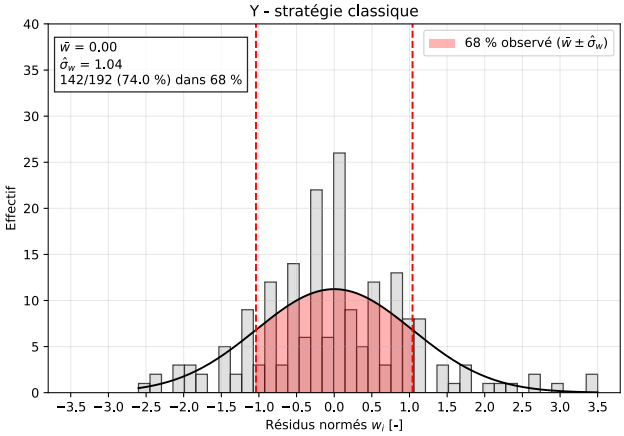


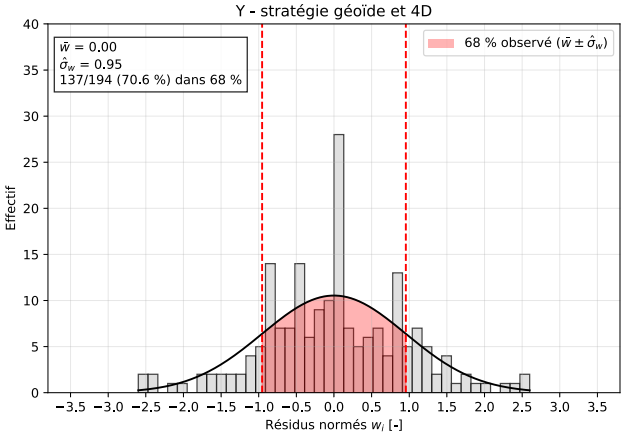
# ANNEXE V

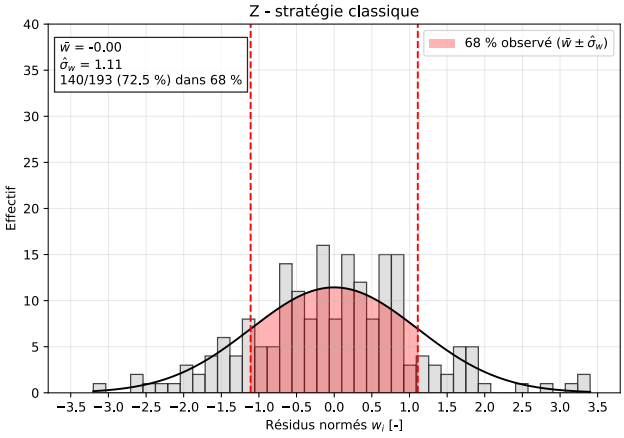
# STATISTIQUE DES RÉSULTATS FINAUX : GNSS

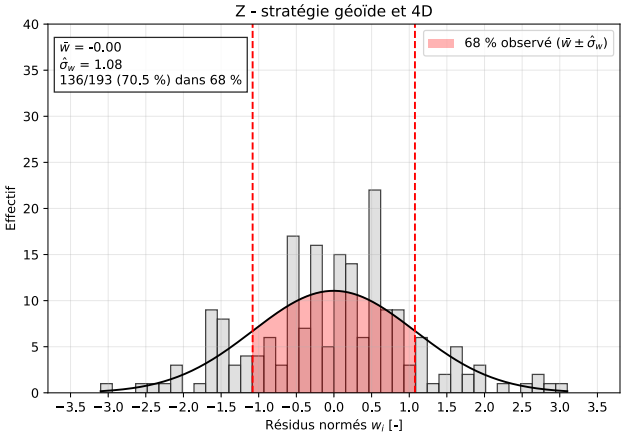


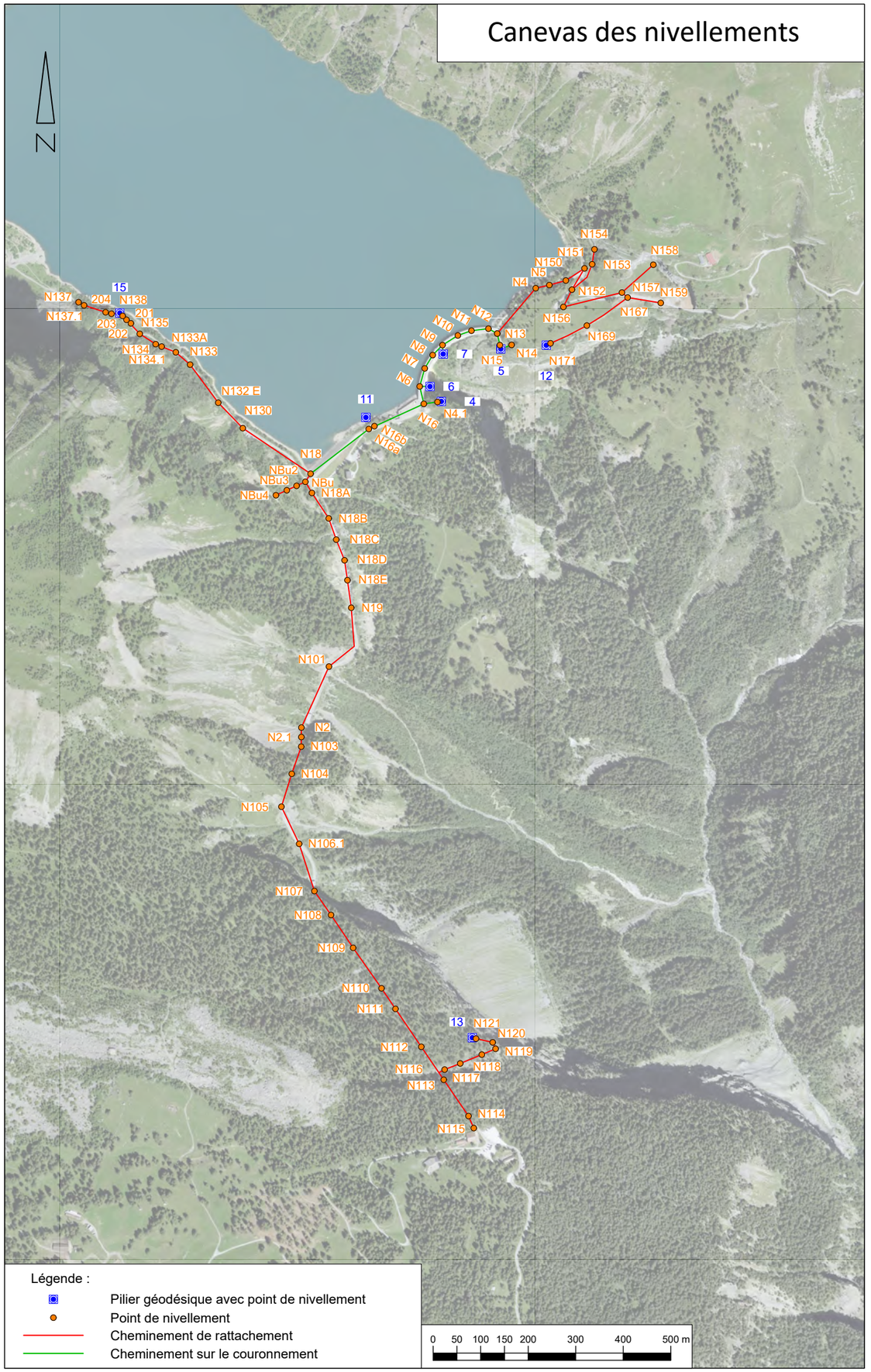



# ANNEXE W

# SITUATION DES POINTS ET CHEMINEMENTS DU NIVELLEMENT GÉOMÉTRIQUE

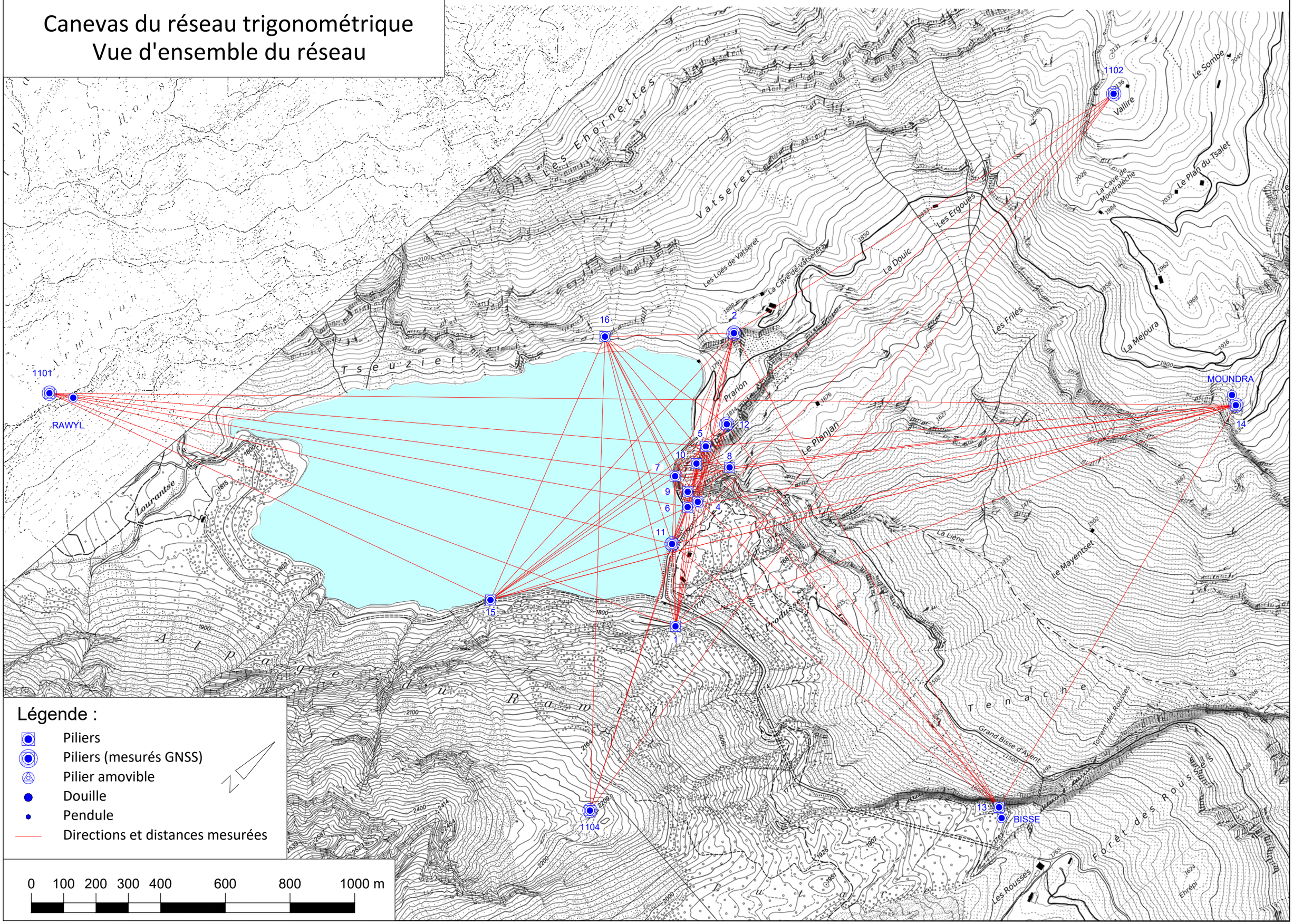
# Canevas des nivellements



# ANNEXE X

# SITUATION DU RÉSEAU TRIGONOMÉTRIQUE, VUE D'ENSEMBLE

# Canevas du réseau trigonométrique
# Vue d'ensemble du réseau




## Légende :

- Piliers
- Piliers (mesurés GNSS)
- Pilier amovible
- Douille
- Pendule
- Directions et distances mesurées

0 100 200 300 400 600 800 1000 m

# ANNEXE Y

# SITUATION DU RÉSEAU TRIGONOMÉTRIQUE PROCHE DE L'OUVRAGE

# Canevas du réseau trigonométrique
# Secteur barrage et digue

N

KROL
KROM
KROR
522
523
524
525
526
527
528

1
2
4
5
6
7
8
9
10
11
12

## Légende :

- Piliers
- Piliers (mesurés GNSS)
- Pilier amovible
- Douille
- Pendule
- Directions et distances mesurées

0 25 50 75 100 150 200 250 m