

TrinetPY

@leon-paul-gomes

Développement d'un logiciel d'ajustement géodésique 3D

TrinetPY

Samuel Caillet-Bois

Juillet 2022 - V2

Domaine Ingénierie et Architecture

Master conjoint UNIGE-HES-SO en développement territorial

Orientation Ingénierie géomatique

Directeur : Prof. Dr. Sébastien Guillaume

Expert : Dr. Francis Klumb

Mémoire n° : 1019



**UNIVERSITÉ
DE GENÈVE**

Hes-so
Haute Ecole Spécialisée
de Suisse occidentale

Préambule

Ce travail de master est réalisé lors du dernier semestre du master conjoint HES-SO - UNIGE en développement territorial, en vue de l'obtention du diplôme de *master of science HES-SO en développement territorial / maîtrise universitaire en développement territorial*.

En tant que travail académique, son contenu, sans préjuger de sa valeur, n'engage ni la responsabilité de l'auteur, ni celles du jury du travail de master et de l'école.

Toute utilisation, même partielle, de ce document doit être faite dans le respect du droit d'auteur.

Remerciements

Une pensée et un remerciement tout particulier aux personnes suivantes :

Prof. Dr. **Sébastien Guillaume**, professeur en géodésie, en méthodes d'estimation et en navigation à la HEIG-VD, pour son soutien, son suivi et son appui théorique tout au long de cette élaboration.

Dr. **Francis Klumb**, responsable de la section *Acquisition, Processing and Control Software* au CERN, pour son rôle en tant qu'expert dans ce travail.

Prof. Dr. **Bertrand Cannelle**, responsable de la filière Géomatique à la HEIG-VD, pour son appui et son aide dans la réalisation de ce rapport.

M. **Samuel Schwyn**, étudiant du Master en développement territorial, pour son soutien durant le travail et son amitié tout au long de nos années d'étude.

M. **Fabien Caillet-Bois**, pour la relecture et la correction de ce présent document.

M. **Jean-Paul Gomes**, pour la réalisation du logo de TrinetPY.

Abréviations et définitions

Le tableau ci-dessous contient les différentes abréviations utiles à la bonne lecture de cet écrit :

Catégorie	Remarques
CERN	Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire
GNSS	Système de positionnement par satellites
HEIG-VD	Haute École d'Ingénierie et de Gestion du canton de Vaud
LTOP	Logiciel de compensation 2D+1 développé par swisstopo
Trinet+	Logiciel de compensation 3D développé à la HEIG-VD

TABLE 1 – Abréviations et définitions

Avant-propos

Dans le cadre du cursus de Master en développement territorial conjoint HES-SO et UNIGE, orientation ingénierie géomatique, le travail de master permet d'approfondir un sujet, développer des applications et effectuer différentes recherches.

Suite à une discussion avec Prof. Dr. Sébastien Guillaume, professeur en géodésie, en méthodes d'estimation et en navigation à la HEIG-VD, l'idée de développer un logiciel d'ajustement géodésique 3D en python est survenue. Ce sujet semble être une évidence en raison d'un fort intérêt pour la géodésie et la programmation.

Ce travail débute le 1^{er} février 2022 et se termine le 1^{er} juillet 2022. Ce dernier est ensuite défendu oralement en août.

C'est l'aboutissement de deux ans de master qui permet d'approfondir et de mettre en pratique les connaissances acquises durant ces années. Il donne également l'opportunité de se spécialiser dans un domaine et d'affiner ses connaissances.

Pour réaliser un logiciel de calcul de compensation, une méthode de travail rigoureuse est essentielle. Un mémoire qui représente une telle charge de programmation doit être ordonné de façon à comprendre directement une fonction ou une ligne de code.

Pour cette raison, tous les fichiers et chaque ligne de code sont commentées afin d'expliquer leur but. Ainsi, lors d'une éventuelle maintenance ou amélioration, il est facile de comprendre comment fonctionne le code. De plus, il est important de séparer le tout en module, car cela permet de structurer et de faciliter la maintenance.

Table des matières

I	Intoduction	16
1	Contexte	16
1.1	Intérêt de la 3D	17
2	Cahier des charges	18
2.1	Description du mandat	18
2.2	Objectifs du mandat	18
3	Ressources	19
3.1	Python	19
3.2	XML	19
3.2.1	Modèle de données XSD	19
3.3	Choix	19
3.3.1	Langage pour les fichiers d'import	19
3.3.2	Langage de programmation	19
II	Éléments théoriques	20
4	Systèmes de référence	20
4.1	Définition des systèmes	20
4.1.1	Définition du système de référence local topocentrique T+	20
4.1.2	Définition des système de référence locaux topocentriques des instruments	21
4.1.3	Définition du système de référence CH1903+	22
4.1.4	Définition du système de référence WGS84	22
4.2	Définition des pipelines de transformations de coordonnées	23
4.2.1	Passage entre UTM et le système topocentrique local T+	23
4.2.2	Passage entre MN95 et altitude sur le géoïde (PK) et le système topocentrique local T+	26
4.2.3	Passage entre MN95 et altitude sur ellipsoïde (PE) et le système topocentrique local T+	29
4.2.4	GNSS : Passage de WGS84 vers le système topocentrique T+	30
5	Modèle mathématique	32
5.1	Définition	32
5.2	Vecteur des observations	32
5.3	Paramètres des inconnues	33
5.4	Modèle fonctionnel	34
5.4.1	Transformation rigoureuse des coordonnées dans le système propre à la station	34
5.4.2	Équations d'observations	41
5.5	Modèle stochastique	45
5.5.1	Écart-type d'une distance 3D (DS)	45
5.5.2	Écart-type d'une direction horizontale (RI)	45
5.5.3	Écart-type d'un azimut astronomique (AZ)	46
5.5.4	Écart-type d'un angle zénithal (ZD)	46
5.5.5	Écart-type des différences de coordonnées topocentriques T+ (DY_T, DX_T, DZ_T)	46
5.5.6	Écart-type des différences de coordonnées topocentriques à l'axe des tourillons de la station ($DY_{Topo}, DX_{Topo}, DZ_{Topo}$)	47
5.5.7	Écart-type des différences d'altitudes orthométriques (DH)	47
5.5.8	Ecart-type des coordonnées GNSS (LY, LX, LZ)	47
5.5.9	Ecart-type des coordonnées comme observations (Libre-ajusté)	48

6	Estimation	49
6.1	Estimation des paramètres	49
6.2	Corrections des observations	52
6.2.1	Réfraction géodésique	52
6.2.2	Déviation de la verticale	52
6.3	Type de calcul	54
6.3.1	Calcul libre (Conditions d'Helmert)	54
6.3.2	Calcul libre-ajusté	55
6.3.3	Calcul contraint	55
7	Indicateurs de qualité	56
7.1	Niveau de confiance	56
7.2	Indicateurs statistiques - Précision	56
7.2.1	Surabondance du réseau	56
7.2.2	Écart-type	57
7.2.3	Test global	58
7.2.4	Erreur résiduelle et erreur résiduelle normée (WI)	58
7.2.5	Ellipsoïde d'erreur moyenne et de confiance	59
7.3	Indicateurs statistiques - Fiabilité	60
7.3.1	Indicateur de fiabilité locale (zi)	60
7.3.2	Grandeur probable d'une faute détectable (GI)	60
7.3.3	Fiabilité interne	60
7.3.4	Fiabilité externe	61
7.4	Résumé des indicateurs	62
III	Développement du logiciel	63
8	Descriptions des outils	63
8.1	Descriptions	63
8.1.1	Interpolation	63
8.1.2	Transformations des coordonnées	63
8.1.3	Simulation	63
8.1.4	Calcul d'ajustement	63
8.2	Structure des bibliothèques	64
9	Description des chaînes de traitement	65
9.1	Traitement de l'import des fichiers	65
9.2	Traitement pour l'interpolation	65
9.3	Traitement de la transformation de coordonnées	66
9.3.1	Fonctions définies dans les transformateurs de coordonnées	67
9.4	Traitement de la simulation	68
9.5	Traitement du calcul d'ajustement	68
10	Import des fichiers et modèles de données	70
10.1	Fichiers des données	70
10.2	Observations.xml	70
10.2.1	Fichier XML des données d'observations	70
10.2.2	Modèle XSD des données d'observations	70
10.3	Canevas.xml	73
10.4	Options.xml	75
10.4.1	Fichier XML des données des options	75
10.4.2	Modèle XSD des données des options	75
10.5	Points.xml	80
10.5.1	Fichier XML des données de points	80
10.5.2	Modèle XSD des données de points	80
10.6	PipelinesTransformationsCoordonnees.xml	81
10.6.1	Modèle XSD des données des pipelines de transformations de coordonnées	81

11 Paramètres des outils	83
11.1 Paramètres généraux	83
11.2 Paramètres de l'interpolation	83
11.3 Paramètres de la transformation de coordonnées	83
11.4 Paramètres pour la simulation	83
11.4.1 Paramètres du générateur	83
11.4.2 Paramètres du simulateur	84
11.5 Paramètres du calcul de l'ajustement	85
11.5.1 ParametresUtilisateurs.py	85
11.5.2 Options.xml	85
12 Gestion des inconnues supplémentaires	87
12.1 Groupes et sessions	87
12.1.1 Groupes de distances	87
12.1.2 Groupes de réfractions	87
12.1.3 Sessions GNSS	87
12.1.4 Paramétrisation des inconnues supplémentaires	87
12.2 Déviation de la verticale	88
13 Paramétrisation des types de calcul	89
13.1 Préanalyse	89
13.2 Libre	89
13.3 Libre-ajusté	90
13.4 Contraint	90
14 Observations écartées	91
15 Messages d'erreurs	91
16 Résultats	92
16.1 Résultat de l'interpolation	92
16.2 Résultat de la transformation de coordonnées	92
16.3 Résultat de la simulation	92
16.4 Résultat du calcul d'ajustement	93
16.4.1 Listing du résultat	93
17 Import et export csv	102
17.1 Import csv	102
17.2 Export csv	102
18 Exemple simple d'utilisation	103
18.1 Configuration de l'exemple	103
18.1.1 Données en entrée	104
18.2 Interpolation	104
18.3 Transformation des coordonnées	104
18.4 Simulation des observations	106
18.5 Compensation libre	108
18.6 Compensation libre-ajustée	110
18.7 Compensation contrainte	112
IV Applications et expérimentation	113
19 Structure	113

20	Expérimentation de la transformation des coordonnées	113
20.1	Expérience n° 1	114
20.1.1	Configuration	114
20.1.2	Résultat	114
20.1.3	Conclusion	115
20.2	Expérience n° 2	116
20.2.1	Configuration	116
20.2.2	Résultat	116
20.2.3	Conclusion	118
21	Expérimentation du modèle mathématique	119
21.1	Expérience n° 3	119
21.1.1	Configuration	119
21.1.2	Résultat	120
21.1.3	Conclusion	125
21.2	Expérience n° 4	126
21.2.1	Configuration	126
21.2.2	Résultats	126
21.2.3	Conclusion	133
21.3	Expérience n° 5	134
21.3.1	Configuration	134
21.3.2	Résultats	135
22	Expérimentation de la compensation	136
22.1	Expérience n° 6	136
22.1.1	Configuration	136
22.1.2	Résultats	136
22.1.3	Conclusion	136
22.2	Expérience n° 7	137
22.2.1	Configuration	137
22.2.2	Résultats	138
22.2.3	Conclusion	140
22.3	Expérience n° 8	141
22.3.1	Configuration	141
22.3.2	Résultats	141
22.3.3	Conclusion	142
22.4	Expérience n° 9	143
22.4.1	Configuration	143
22.4.2	Résultats	143
22.4.3	Conclusion	144
23	Conclusion sur l'expérimentation	145
V	Conclusion et perspective	146
24	Analyse du travail	146
24.1	Comparaison entre le travail prévu et le travail effectué	146
24.2	Applications possibles	147
24.3	Améliorations possibles	148
25	Conclusion	149

Table des figures

1	Système topocentrique T+	20
2	Systèmes de référence locaux topocentriques des instruments	21
3	UTM vers T+	23
4	MN95 et altitude sur géoïde vers T+	26
5	MN95 et altitude sur ellipsoïde vers T+	29
6	WGS84 vers T+	30
7	Transformation rigoureuse des coordonnées dans le système propre à la station	34
8	Réfraction géodésique	52
9	Déviations de la verticale	53
10	Niveau de confiance en trois dimensions	56
11	Outils implémenté dans le travail de Master	63
12	Chaîne de traitement pour l'import des données	65
13	Chaîne de traitement pour l'interpolation	65
14	Chaîne de traitement pour la transformation de coordonnées	66
15	Chaîne de traitement pour la simulation	68
16	Chaîne de traitement pour le calcul de l'ajustement	69
17	Modèle de données des observations GNSS	72
18	Modèle de données du canevas GNSS	74
19	Modèle de données des options	75
20	Modèle de données des options (corrections)	76
21	Modèle de données des options (topocentre)	76
22	Modèle de données des options (compensation libre)	76
23	Modèle de données des options (centre de distribution)	77
24	Modèle de données des options (options de calcul)	77
25	Modèle de données des options (paramètres de calcul)	77
26	Modèle de données des options (inconnues supplémentaires)	78
27	Modèle de données des options (inconnues supplémentaires de sessions)	78
28	Modèle de données des options (datum)	79
29	Modèle de données des options adapté pour la simulation	79
30	Modèle de données des points	80
31	Modèle de données des pipelines de transformations de coordonnées	81
32	Pipelines de transformation	82
33	Inconnues de déviations de la verticale	88
34	Calcul d'une préanalyse	89
35	Fichier d'observations pour une préanalyse	89
36	Calcul d'une compensation libre	90
37	Conditions d'Helmert	90
38	Type de compensation libre-ajustée	90
39	Type de compensation contrainte	90
40	Fichier avant l'interpolation (à gauche) et après (à droite)	92
41	Fichier avant la transformation (à gauche) et après (à droite)	92
42	Fichier avant la simulation (à gauche) et après (à droite)	93
43	Exemple simple d'utilisation	103
44	Cas pratique	104
45	Canevas des observations terrestres	106
46	Canevas des observations GNSS	107
47	Observations terrestres simulées	107
48	Observations GNSS simulées	108
49	Calcul d'une compensation libre	108
50	Conditions d'Helmert	109
51	Calcul d'une compensation libre-ajustée	110
52	Calcul d'une compensation contrainte	112
53	Réseau pour l'expérimentation de la transformation des coordonnées	113
54	Réseau pour l'expérimentation du modèle mathématique	119
55	Réseau pour l'expérimentation du modèle mathématique	134
56	Réseau pour l'expérience n° 6	136

57	Réseau pour l'expérience n° 7	137
58	Courbe de distribution normale pour la réfraction	138
59	Courbe de distribution normale pour la constante d'addition	139
60	Courbe de distribution normale pour le facteur d'échelle	140
61	Courbe de distribution normale pour la composante y du point 8001	142

Liste des tableaux

1	Abréviations et définitions	5
2	Intérêt de la 3D par rapport à la 2D+1	17
3	Systèmes du modèle fonctionnel	34
4	Conditions d’Helmert	54
5	Résumé des indicateurs	62
6	Structures des librairies	64
7	Fichiers en entrée pour l’interpolation	65
8	Fichiers en entrée pour la transformation de coordonnées	66
9	Fonction pour la transformation de coordonnées	67
10	Fichiers en entrée pour la simulation	68
11	Fichiers en entrée pour le calcul d’ajustement	68
12	Modèle de données des observations terrestres (1)	71
13	Modèle de données des observations terrestres (2)	71
14	Modèle de données du canevas terrestre (1)	73
15	Modèle de données du canevas terrestre (2)	73
16	Modèle de données des points (Types de coordonnées)	80
17	Fonction du script TransformUtils.py	82
18	Paramètres pour l’interpolation	83
19	Paramètres pour la transformation de coordonnées	83
20	Paramètres du simulateur	84
21	Paramètres pour le calcul d’ajustement	85
22	Paramètres pour la conversion	102
23	Analyse du résultat libre (1)	109
24	Analyse du résultat libre (2)	110
25	Analyse du résultat libre-ajusté	111
26	Analyse du résultat contraint	112
27	Topocentre PE vers CH1903+	114
28	Topocentre ellipsoïdale	114
29	Topocentre ellipsoïde vers CH1903+	114
30	Topocentre MN95	115
31	Coordonnées T+ dans TrinetPY vs Trinet+ sans déviation de la verticale	116
32	Coordonnées T+ TrinetPY vs Trinet+ sans déviation de la verticale (2)	117
33	Coordonnées T+ dans TrinetPY vs Trinet+ avec déviation de la verticale	117
34	Coordonnées estimées sans déviation de la verticale	120
35	Observations et résidus sans déviation de la verticale	120
36	Observations et résidus sans déviation de la verticale (2)	120
37	Observations et résidus sans déviation de la verticale (3)	121
38	Coordonnées estimées avec déviation de la verticale	121
39	Observations et résidus avec déviation de la verticale	121
40	Observations et résidus avec déviation de la verticale (2)	122
41	Observations et résidus avec déviation de la verticale (3)	122
42	Coordonnées estimées	122
43	Observations et résidus GNSS	123
44	Observations et résidus GNSS (2)	123
45	Coordonnées terrestres et GNSS du réseau à 100 mètres	124
46	Observations et résidus terrestres du réseau à 100 mètres	124
47	Observations et résidus terrestres du réseau à 100 mètres (2)	124
48	Observations et résidus terrestres du réseau à 100 mètres (3)	124
49	Observations et résidus GNSS du réseau à 100 mètres	125
50	Observations et résidus GNSS du réseau à 100 mètres (2)	125
51	Observations et résidus GNSS du réseau à 100 mètres (3)	125
52	Coordonnées estimées du réseau à 10 mètres	126
53	Observations terrestre du réseau à 10 mètres	126
54	Observations terrestre du réseau à 10 mètres (2)	126
55	Observations terrestre du réseau à 10 mètres (3)	127
56	Observations GNSS du réseau à 10 mètres	127

57	Observations GNSS du réseau à 10 mètres (2)	127
58	Observations GNSS du réseau à 10 mètres (3)	128
59	Coordonnées du réseau à 1 kilomètre	129
60	Observations terrestres du réseau à 1 kilomètre	129
61	Observations terrestres du réseau à 1 kilomètre (2)	129
62	Observations terrestres du réseau à 1 kilomètre (3)	130
63	Observations GNSS du réseau à 1 kilomètre	130
64	Observations GNSS du réseau à 1 kilomètre (2)	130
65	Observations GNSS du réseau à 1 kilomètre (3)	131
66	Coordonnées du réseau à 10 kilomètres	131
67	Observations terrestres du réseau à 10 kilomètres	131
68	Observations terrestres du réseau à 10 kilomètres (2)	132
69	Observations terrestres du réseau à 10 kilomètres (3)	132
70	Observations GNSS du réseau à 10 kilomètres	132
71	Observations GNSS du réseau à 10 kilomètres (2)	133
72	Observations GNSS du réseau à 10 kilomètres (3)	133
73	Réseau avec mesures d'azimut et de différence d'altitude orthométrique	135
74	Expérience n° 7	137
75	Expérience n° 8 sans bruit sur les mesures	141
76	Expérience n° 8 avec du bruit sur les mesures	141
77	Une seule erreur	143
78	Détection de la faute sur une observation	143
79	Plusieurs erreurs	143
80	Détection de plusieurs fautes sur une observation	143
81	Paramètres pour la conversion	145
82	Comparaison entre le travail prévu et le travail effectué	146
83	Comparaison entre le travail prévu et le travail effectué	148

Résumé

Les réseaux géodésiques sont indispensables dans le monde de la géomatique. Un logiciel de compensation permet de trouver la meilleure solution afin d'offrir un réseau de grande précision. Sur la base de ce dernier, il est possible, par exemple, de réaliser différentes analyses de stabilité d'un ouvrage. Pour s'assurer du résultat final, il est donc important de se baser sur un réseau compensé de manière rigoureuse.

Dans ce contexte, ce travail de master a pour but de développer un logiciel d'ajustement géodésique 3D. Cependant, il existe déjà de nombreux logiciels 3D. Nous pouvons citer *Trinet+* ou encore le logiciel développé au Cern *LGC*. Il est donc légitime de se demander quel est l'intérêt de créer un nouveau logiciel.

TrinetPY propose plusieurs éléments qui se distinguent de la littérature existante. En effet, ce dernier est développé en Python, langage de programmation le plus utilisé dans le monde. La majorité des logiciels existants ne sont pas développés dans ce dernier.

De plus, TrinetPY a pour vocation d'être très transparent pour l'utilisateur et faciliter ainsi la maintenance de ce dernier. Ce présent rapport explique les différents aspects théoriques, documente le développement et les aspects d'utilisation et expérimente le résultat afin de s'assurer de la qualité de la compensation. Sa documentation permet donc de maîtriser totalement les paramètres de calcul

Le logiciel est également *Open Source* ce qui permet à de tierces personnes de pouvoir améliorer le code au besoin.

TrinetPY possède un modèle mathématique très rigoureux. En effet, pour des observations terrestres, ce dernier travaille avec des coordonnées calculées directement dans le système propre à une station. Ainsi, les équations d'observations terrestres correspondent rigoureusement au système dans lequel les mesures sont réalisées. Ceci offre un résultat de calcul d'une grande précision y compris sur des réseaux à plus grande échelle.

Pour traiter un réseau, TrinetPY réalise des compensations libres selon la méthode des conditions d'Helmert, libre-ajusté ou encore contraint. Il est également possible de configurer un réseau a priori grâce à une préanalyse. De plus, tous les indicateurs nécessaires à une maîtrise complète du calcul sont implémentés.

Ce travail propose également une suite d'outils pour faciliter l'utilisation du logiciel. On retrouve la possibilité de créer des pipelines de transformations de coordonnées pour convertir facilement des points d'un système à un autre. Un simulateur est également implémenté pour tester différentes configurations de réseaux.

Première partie

Introduction

1 Contexte

Dans le monde de la géomatique, il existe divers outils essentiels pour réaliser les tâches qui incombent à ce domaine. Les logiciels d’ajustement géodésique en font partie et permettent de calculer des réseaux géodésiques en les optimisant. De plus, cela permet de mélanger de nombreux types d’observations terrestres ou GNSS. Il existe plusieurs sortes de modèles mathématiques pour un logiciel de compensation. Les plus utilisés sont les logiciels 2D+1 qui permettent de séparer les composantes planimétriques des composantes altimétriques lors du calcul. Les logiciels 3D travaillent avec les deux composantes regroupées.

En Suisse, nous trouvons différents logiciels de référence pour le domaine de la géomatique. Pour les modèles 2D+1, le logiciel de référence dans les bureaux d’ingénieurs est développé par l’Office fédéral de topographie. Il s’agit de *LTOP* qui permet de réaliser des préanalyses et des compensations de réseaux combinant des observations terrestres et GNSS. Ce logiciel permet également de réaliser des compensations libres, libres-ajustées et contraintes [Swisstopo, 2003]. Cependant, il est important de noter que ce logiciel n’est pas exactement dans la même catégorie que celui dont il est question dans ce travail car le calcul de planimétrie dans *LTOP* est indépendant de l’altimétrie.

En ce qui concerne les logiciels purement 3D, *Trinet+* est un logiciel développé à Muttens, puis à l’HEIG-VD. Il est très complet et permet de jouer avec les paramètres à estimer, de calculer des indicateurs de précision et de fiabilité ainsi que de visualiser différents graphiques 3D dynamiques. Il se base sur un modèle mathématique rigoureusement 3D et sur un ajustement des coordonnées dans un système topocentrique. Il est également possible d’adapter la compensation pour réaliser un calcul libre, libre-ajusté ou contraint. *Trinet+* est développé en *Visual C++ 6.0*, ce qui laisse peu de marge pour maintenir et améliorer le logiciel [GUILLAUME, MULLER ET CATTIN, 2022].

D’autres logiciels 3D sont également disponibles sur le marché. On retrouve le logiciel développé par le groupe rmDATA qui se nomme *rmNETZ*. Ce dernier se dit être très polyvalent et simple d’utilisation. Il permet de calculer des réseaux avec tous les types d’observations. Il est lié à une base de données ce qui permet un bon suivi des calculs. Cependant, ce logiciel n’est pas très transparent. En effet, le modèle mathématique est très peu documenté ce qui ne permet pas de pouvoir totalement maîtriser les paramètres des calculs réalisés [rmData, 2022].

Afin de compléter la famille des modèles 3D, le logiciel général de compensation (LGC) développé dans le cadre du conseil Européen pour la recherche nucléaire (CERN) offre la possibilité de compenser un grand nombre de types d’observations avec tous les indicateurs de fiabilité qui permettent de maîtriser parfaitement l’ajustement. Ce logiciel est implémenté dans le langage *C*. Cependant, ce logiciel n’est pas commercialisé. Il est uniquement utilisé dans le cadre de l’accélérateur de particules du CERN [TRACOL, 2012].

Il existe une multitude d’autres logiciels d’ajustement qui ne sont pas cités dans cet écrit.

C’est dans ce contexte que ce travail vient s’inscrire. En effet, ce dernier a l’ambition de créer un logiciel d’ajustement géodésique 3D très transparent, où chacun peut l’enrichir par ses compétences et besoins. Ce développement est réalisé avec le langage de programmation *python* qui n’est pas utilisé par les autres logiciels cités dans ce travail. Python a pris de l’ampleur dans le monde de la programmation durant ces dernières années. Il s’est même imposé comme langage le plus utilisé durant l’année 2021 [FAMIE-GALTIER, 2022].

Ce travail a pour but d’offrir un outil pour répondre aux problèmes rencontrés dans le domaine de la géodésie tout en étant adapté à la technologie.

1.1 Intérêt de la 3D

L'ajustement 3D n'est pas la méthode la plus utilisée dans le domaine de la géomatique. En effet, les bureaux d'ingénieurs portent un fort intérêt pour les calculs en 2D+1. Cela se traduit notamment par l'utilisation majoritaire du logiciel de calcul *LTOP*. Il est alors intéressant de se poser la question de l'apport d'un calcul 3D pour un bureau de géomatique.

Ce tableau compare la méthode de calcul en 2D+1 et en 3D. Elle permet de se rendre compte des différences significatives entre les deux méthodes.

Catégorie	Remarques
Précision	Toutes les observations sont utilisées dans le même calcul donc la surabondance est augmentée. Pour un même réseau calculé avec un logiciel 2D+1 et 3D, le second permet d'obtenir une meilleure précision.
Fiabilité	Les logiciels 3D permettent une meilleure fiabilité car les angles zénithaux apportent un contrôle aux angles horizontaux. Cependant, lors d'un calcul 2D+1, les observations utilisées pour une composante ne contrôlent pas l'autre.
Prix à payer	Les logiciels 3D obligent de connaître la géométrie du champ de gravité à la même précision que les mesures.

TABLE 2 – Intérêt de la 3D par rapport à la 2D+1

Cette comparaison permet de mettre en évidence que les logiciels 3D doivent être utilisés dans un cadre particulier et qu'une attention doit être portée sur la précision de toutes les mesures. Certes, une compensation 3D augmente la précision et la fiabilité mais une imprécision sur une simple mesure de hauteur impacte les autres mesures en planimétrie et altimétrie. Il est donc nécessaire de mettre en place des systèmes fiables et précis pour l'observation des ces éléments.

Il est intéressant de voir que le calcul 3D permet une compensation homogène du réseau et augmente la surabondance de ce dernier. Cependant, il est important de connaître la géométrie du champ de gravité avec précision ce qui peut augmenter la difficulté du calcul. Ils doivent donc être utilisés lors de situation où une grande précision est demandée.

2 Cahier des charges

2.1 Description du mandat

La mandat consiste à développer un nouveau logiciel d'ajustement de réseaux géodésiques qui est basé sur un modèle mathématique rigoureusement 3D. Ce dernier est développé avec le langage de programmation python. TrinetPY est fortement inspiré de Trinet+. Toutefois, il existe de nombreuses différences dans le modèle fonctionnel, le modèle de données et dans différentes autres parties du logiciel. Une attention particulière est portée sur la documentation du logiciel pour le rendre le plus transparent possible. Ceci dans le but de le maintenir et de l'améliorer facilement par un tiers. Ce dernier doit être au moins exécutable en mode *console* en se basant sur les fichiers de mesures et de configuration.

2.2 Objectifs du mandat

Pour répondre à ce mandat, un cahier des charges est mis en place avec Dr. Prof. Sébastien Guillaume. Il est décrit ci-dessous :

- 1) Étude de littérature des logiciels d'ajustement de réseaux géodésiques 3D existants.
- 2) Mise en place du modèle mathématique 3D :
 - A) Modèle fonctionnel et stochastique des observations terrestres.
 - B) Modèle fonctionnel et stochastique des sessions GNSS
- 3) Évaluation et mise en place des stratégies de calcul des différents types de datum (libre, libre-ajusté, contraint, multi-époque).
- 4) Évaluation et mise en place des différents indicateurs de précision et de fiabilité.
- 5) Évaluation et mise en place de l'ajustement robuste.
- 6) Mise en place de l'architecture du logiciel.
- 7) Réalisation d'un simulateur d'observations basé sur le modèle mathématique prédéfini.
- 8) Développement des différentes classes, modules et bibliothèques.

3 Ressources

Cette partie permet de recenser les différentes ressources ou outils utilisés dans ce travail de master. Une brève description de ces dernières est également réalisée.

3.1 Python

Le langage de programmation python est créé en 1991 par Guido Van Rossum [Python, 2020]. Celui-ci est *opensource* ce qui signifie qu'il est disponible gratuitement. Cette ressource peut donc être développée par de tierces personnes. La version utilisée dans ce travail est la version *Python 3.9*. Ce langage est au cœur de cette démarche car il permet d'implémenter les différentes librairies et modules.

3.2 XML

Le *XML* est un langage qui se base sur un système de balisage. Son nom complet est *eXtensible Markup Language*. Son but premier est le transport et le stockage de différentes données ordonnées dans des balises. Ces dernières ne sont pas prédéfinies et permettent une grande liberté pour l'utilisateur [w3School (1), 2022]. Dans ce travail, les fichiers d'import et d'export des données sont implémentés dans ce langage.

3.2.1 Modèle de données XSD

En plus de sa grande souplesse, le langage *XML* permet de créer des modèles de données dans le format *XSD*. Il permet de structurer le document. Au moyen de librairies python, la comptabilité entre le fichier *XML* et son modèle peut être vérifiée. Ainsi, lors du *parsing* des fichiers dans python, une logique peut être créée [w3school (2), 2022].

3.3 Choix

3.3.1 Langage pour les fichiers d'import

Le premier choix qui s'est posé est celui du langage pour les fichiers d'import et d'export. En effet, le but est de trouver un langage souple, facilement compréhensible pour l'utilisateur et qui laisse la possibilité de créer des modèles de données.

Les deux principaux choix sont le *Yaml* ou le *XML*. Le format *Yaml* est très lisible et très compréhensible. Cependant, l'imbrication de balise est beaucoup plus difficile qu'avec du *XML*. De plus, ce dernier permet de réaliser des modèles très poussés afin de conserver la même structure pour tous les documents.

C'est donc pour ces raisons que le langage *XML* est retenu.

3.3.2 Langage de programmation

Le deuxième choix est celui du langage de programmation. Il existe plusieurs possibilités intéressantes. Il est envisageable de citer *C++* qui permet une grande rapidité de calcul. Néanmoins, le langage *python* est très utilisé dans le monde et possède une grande communauté. De plus, ce dernier est constamment amélioré et permet une large palette de possibilité. Il possède une syntaxe simple et facilement maîtrisable [Python, 2020].

C'est pour ces différentes raisons que le *python* est choisi pour réaliser ce logiciel.

Deuxième partie

Éléments théoriques

Les éléments théoriques sont largement inspirés des cours du Prof. Dr. Sébastien Guillaume [GUILLAUME (1). 2021] [GUILLAUME (2). 2021]. Les illustrations sont réalisées avec le module *Tikz* de latex [TEXample, 2022].

4 Systèmes de référence

4.1 Définition des systèmes

4.1.1 Définition du système de référence local topocentrique $T+$

Le système topocentrique $T+$ est défini rigoureusement de manière analogue à celui de *Trinet+*.

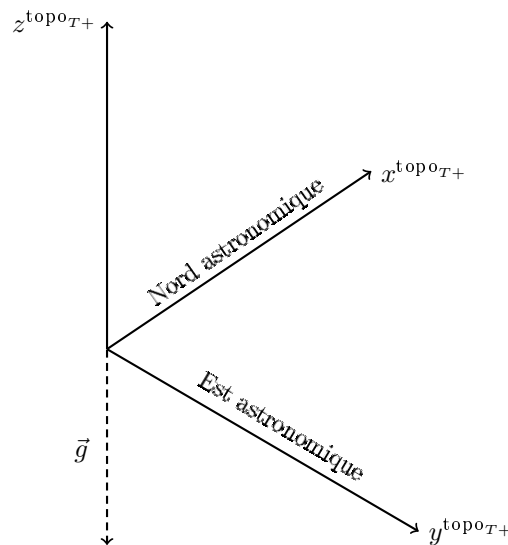


FIGURE 1 – Système topocentrique $T+$

1. Le topocentre \mathbf{O} est l'origine du système qui se trouve généralement au centre des stations terrestres.
2. L'axe \mathbf{Y} pointe vers l'est astronomique perpendiculairement aux axes \mathbf{X} et \mathbf{Z} .
3. L'axe \mathbf{X} est tangent à la surface équipotentielle qui passe par le topocentre et pointe vers le nord astronomique.
4. L'axe \mathbf{Z} est dans le sens opposé du vecteur de l'accélération de la pesanteur au topocentre.

Un point dans ce système est défini de la manière suivante :

$$\mathbf{x}^{\text{topo}_{T+}} = \begin{pmatrix} y^{\text{topo}_{T+}} \\ x^{\text{topo}_{T+}} \\ z^{\text{topo}_{T+}} \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

Il s'agit d'un système main gauche.

Toutes les coordonnées pour le lancement d'une compensation doivent se trouver dans ce système.

4.1.2 Définition des système de référence locaux topocentriques des instruments

Durant le calcul, plusieurs autres systèmes de référence local topocentrique interviennent. Ces derniers sont définis selon la même convention que le système de référence local topocentrique T+.

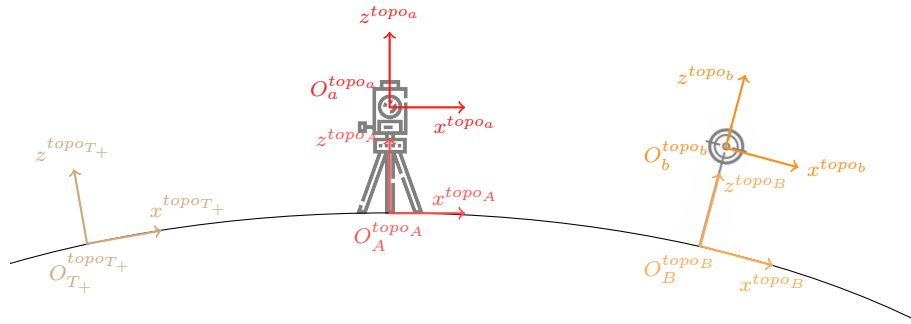


FIGURE 2 – Systèmes de référence locaux topocentriques des instruments

1. Système topocentrique avec son centre sur le point au sol de la station.

Un point dans ce système est défini de la manière suivante :

$$\mathbf{x}^{\text{topo}_A} = \begin{pmatrix} y^{\text{topo}_A} \\ x^{\text{topo}_A} \\ z^{\text{topo}_A} \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

2. Système topocentrique avec son centre à l'axe des tourillons de la station.

Un point dans ce système est défini de la manière suivante :

$$\mathbf{x}^{\text{topo}_a} = \begin{pmatrix} y^{\text{topo}_a} \\ x^{\text{topo}_a} \\ z^{\text{topo}_a} \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

3. Système topocentrique avec son centre sur le point au sol du point visé.

Un point dans ce système est défini de la manière suivante :

$$\mathbf{x}^{\text{topo}_B} = \begin{pmatrix} y^{\text{topo}_B} \\ x^{\text{topo}_B} \\ z^{\text{topo}_B} \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

4. Système topocentrique avec son centre au milieu du point visé.

Un point dans ce système est défini de la manière suivante :

$$\mathbf{x}^{\text{topo}_b} = \begin{pmatrix} y^{\text{topo}_b} \\ x^{\text{topo}_b} \\ z^{\text{topo}_b} \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

4.1.3 Définition du système de référence CH1903+

Le système de référence suisse se nomme CH1903+. Ce dernier complète l'ancien système CH1903. En effet, suite à l'apparition des mesures GNSS, une partie des points de triangulation est mesurée en GNSS afin de réaliser une transformation de similitude entre le système CHTRS95 et le système CH1903 pour donner le nouveau système CH1903+ [GUILLAUME (2), 2021].

Les systèmes ITRS sont géocentriques et possèdent des axes fixes par rapport à la surface de la Terre. Ils permettent une bonne adaptation sur l'ensemble du globe. Pour travailler dans un petit secteur, ces derniers sont moins adaptés. Il convient de les utiliser pour les applications mondiales ou intercontinentales. Cependant, un système plus local à l'échelle du pays (CH1903+) est préférable pour s'adapter au mieux au secteur de travail.

Son ellipsoïde de référence est celui de *Bessel 1841*. Il s'agit d'un système main droite standard.

Ce système de référence CH1903+ est réalisé par le cadre de référence *MN95* et le système d'altitude orthométrique *RAN95*. Afin de passer du système au cadre de référence, la projection suisse doit être appliquée.

Un point dans ce système est défini de la manière suivante :

$$\mathbf{x}^{\text{CH1903+}} = \begin{pmatrix} x^{\text{CH1903+}} \\ y^{\text{CH1903+}} \\ z^{\text{CH1903+}} \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

4.1.4 Définition du système de référence WGS84

Le système de référence *WGS84* est un système de référence global, il est notamment utilisé pour le positionnement par satellites. Il s'agit d'un système cartésien géocentrique ITRS (International Terrestrial Reference System). Ces axes sont fixes par rapport à la surface de la Terre [GUILLAUME (2), 2021].

- L'origine \mathbf{O} est l'origine du système qui se trouve au centre de l'ellipsoïde de révolution de référence (GRS80).
- L'axe \mathbf{X} pointe en direction de l'intersection du plan de l'équateur avec le méridien de Greenwich.
- L'axe \mathbf{Y} est perpendiculaire aux deux autres vecteurs de base et se situe dans le plan de l'équateur.
- L'axe \mathbf{Z} est parallèle à l'axe de rotation de la Terre.

$$\mathbf{x}^{\text{WGS84}} = \begin{pmatrix} x^{\text{WGS84}} \\ y^{\text{WGS84}} \\ z^{\text{WGS84}} \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

Son ellipsoïde de référence est le *GRS80*. Il s'agit d'un système main droite standard.

4.2 Définition des pipelines de transformations de coordonnées

Ce chapitre décrit les transformations entre les différents systèmes de coordonnées.

4.2.1 Passage entre UTM et le système topocentrique local T+

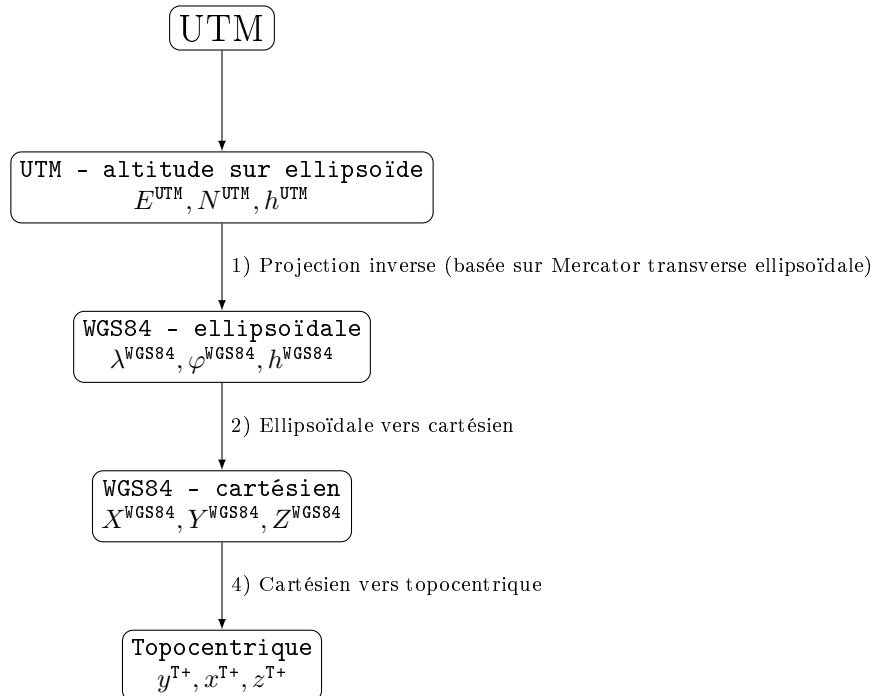


FIGURE 3 – UTM vers T+

Les différentes transformations intermédiaires entre le cadre de référence UTM et le système topocentrique T+ sont décrites ci-dessous :

- 1) La première étape consiste à calculer la longitude du centre de projection (λ_0^Z) qui correspond à la zone :

$$\lambda_0^Z = -180 + \text{Zone} \cdot 6 - 3 \quad (4.8)$$

avec :

Zone : Numéro de la zone UTM

- 2) Projection inverse (basée sur Mercator transverse ellipsoïdale) :

$$\begin{pmatrix} \lambda^{\text{WGS84}}(E, N) \\ \varphi^{\text{WGS84}}(E, N) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_0^Z + \arcsin\left(\frac{\tanh\eta_0}{\cos\beta}\right) \\ \arctan(\sinh Q_2) \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

Afin de calculer la longitude (λ^{WGS84}) et la latitude (φ^{WGS84}), il est nécessaire de calculer les paramètres suivants :

$$k_0 = 0.9996$$

$$n = \frac{f}{2 - f}$$

$$B = \frac{a}{1 + n} \cdot \left(1 + \frac{n^2}{4} + \frac{n^4}{64}\right)$$

$$h_1 = \frac{n}{2} + \frac{2 \cdot n^2}{3} + \frac{37 \cdot n^3}{96} + \frac{1 \cdot n^4}{360} \quad (4.10)$$

$$h_2 = \frac{n^2}{48} + \frac{n^3}{15} + \frac{437 \cdot n^4}{1440}$$

$$h_3 = \frac{17 \cdot n^3}{480} + \frac{37 \cdot n^4}{840}$$

$$h_4 = \frac{4397 \cdot n^4}{161280}$$

avec :

$a = 6'378'137.000$: Demi-grand axe de l'ellipsoïde GRS80 [m]

$f = \frac{1}{298.25722356}$: aplatissement de l'ellipsoïde GRS80 [-]

Ensuite, il est possible de calculer les composantes de la déviation de la verticale eta (η) et xi (ξ) :

$$\eta = \frac{E - E_0}{B \cdot k_0} \quad (4.11)$$

$$\xi = \frac{N - N_0}{B \cdot k_0}$$

$$\begin{aligned} \xi_0 = \xi - h_1 \cdot \sin(2 \cdot \xi) \cdot \cosh(2 \cdot \eta) - h_2 \cdot \sin(4 \cdot \xi) \cdot \cosh(4 \cdot \eta) \\ - h_3 \cdot \sin(6 \cdot \xi) \cdot \cosh(6 \cdot \eta) - h_4 \cdot \sin(8 \cdot \xi) \cdot \cosh(8 \cdot \eta) \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} \eta_0 = \eta - h_1 \cdot \cos(6 \cdot \xi) \cdot \sinh(2 \cdot \eta) - h_2 \cdot \cos(4 \cdot \xi) \cdot \sinh(4 \cdot \eta) \\ - h_3 \cdot \cos(6 \cdot \xi) \cdot \sinh(6 \cdot \eta) - h_4 \cdot \cos(8 \cdot \xi) \cdot \sinh(8 \cdot \eta) \end{aligned} \quad (4.13)$$

Pour finir par itération pour calculer Q_2 :

$$\beta = \arcsin\left(\frac{\sin \xi_0}{\cosh \eta_0}\right)$$

$$Q_1 = \operatorname{arcsinh}(\tan \beta) \quad (4.14)$$

$$Q_2 = Q_1 + e \cdot \operatorname{arctanh}(e \cdot \tanh Q_2)$$

Pour finir, les paramètres calculés ci-dessus peuvent être appliqués dans l'équation 4.9.

3) Transformation de ellipsoïdale $(\lambda^{\text{WGS84}}, \varphi^{\text{WGS84}}, h^{\text{WGS84}})$ en cartésienne $(X^{\text{WGS84}}, Y^{\text{WGS84}}, Z^{\text{WGS84}})$:

$$\begin{aligned} X^{\text{WGS84}} &= (R_N + h^{\text{WGS84}}) \cdot \cos \varphi^{\text{WGS84}} \cdot \cos \lambda^{\text{WGS84}} \\ Y^{\text{WGS84}} &= (R_N + h^{\text{WGS84}}) \cdot \cos \varphi^{\text{WGS84}} \cdot \sin \lambda^{\text{WGS84}} \\ Z^{\text{WGS84}} &= [R_N \cdot (1 - e^2) + h^{\text{WGS84}}] \cdot \sin \varphi^{\text{WGS84}} \end{aligned} \quad (4.15)$$

avec :

$$R_N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi}} : \text{Rayon de courbure de la section normale à l'ellipsoïde}$$

$$a = 6'378'137.000 : \text{Demi-grand axe de l'ellipsoïde GRS80 [m]}$$

$$e = 0.0816968312225269 : \text{excentricité de l'ellipsoïde GRS80 [-]}$$

4) Transformation cartésienne vers topocentrique, pour un point P :

$$\mathbf{P}^{\text{T}^+} = \mathbf{T}(\Lambda, \Phi) \cdot (\mathbf{P}^{\text{WGS84}} - \mathbf{O}^{\text{WGS84}}) + \mathbf{O}^{\text{T}^+} \quad (4.16)$$

$$(4.17)$$

$$\mathbf{T}(\Lambda, \Phi) = \begin{pmatrix} -\sin \Phi \cdot \cos \Lambda & -\sin \Phi \cdot \sin \Lambda & \cos \Phi \\ -\sin \Lambda & \cos \Phi & 0 \\ \cos \Phi \cdot \cos \Lambda & \cos \Phi \sin \Lambda & \sin \Phi \end{pmatrix} \quad (4.18)$$

avec :

\mathbf{P}^{T^+} : Point dans le système topocentre T+

$\mathbf{P}^{\text{WGS84}}$: Point dans le système WGS84

$\mathbf{O}^{\text{WGS84}}$: Origine du système topocentrique dans le système WGS84

\mathbf{O}^{T^+} : Origine du système topocentrique dans le système T+ (0, 0, 0)

$\mathbf{T}(\Lambda, \Phi)$: Matrice de transformation entre le système WGS84 et le système topocentrique T+

Le lien entre la longitude (Λ) et la latitude (Φ) astronomique et ellipsoïdale $(\lambda^{\text{WGS84}}, \varphi^{\text{WGS84}})$ est le suivant :

$$\Lambda = \lambda^{\text{WGS84}} + \frac{\eta^{\text{WGS84}}}{\cos \varphi^{\text{WGS84}}} \quad (4.19)$$

$$\Phi = \lambda^{\text{WGS84}} + \xi^{\text{WGS84}} \quad (4.20)$$

avec :

η^{WGS84} : Déviation de la verticale, composante ouest-est [rad]

ξ^{WGS84} : Déviation de la verticale, composante nord-sud [rad]

4.2.2 Passage entre MN95 et altitude sur le géoïde (PK) et le système topocentrique local T+

Le code PK correspond au système de projection suisse avec des altitudes sur le géoïde. Cela correspond au cadre de référence MN95 suisse. Le passage entre ce système et le topocentrique T+ est défini de la manière suivante :

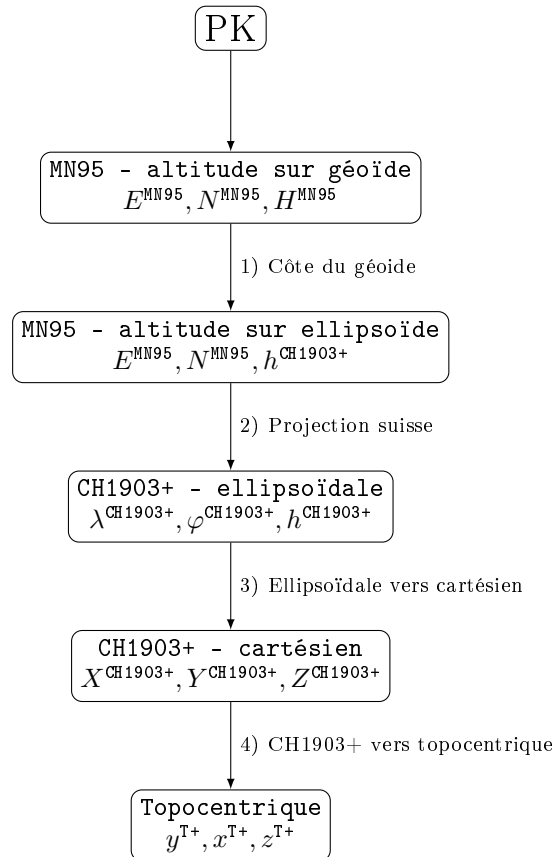


FIGURE 4 – MN95 et altitude sur géoïde vers T+

Les différentes transformations intermédiaires entre le cadre de référence MN95 et le système topocentrique T+ sont décrites ci-dessous :

- 1) Application de la cote du géoïde :

$$h^{\text{CH1903+}} = H^{\text{MN95}} + N \quad (4.21)$$

avec :

N : Cote du géoïde

- 2) Passage entre MN95 et CH1903+ par la formule de la projection suisse inverse :

- a) Tout d'abord, la projection de *Mercator sphérique normale inverse* permet de trouver les coordonnées sphériques obliques $(\lambda_{\text{sph}}^t, \varphi_{\text{sph}}^t)$:

$$\lambda_{\text{sph}}^t = \frac{E - E_0}{R_{\text{sph}}} \quad (4.22)$$

$$\varphi_{\text{sph}}^t = 2 \cdot \arctan \left(e \frac{N - N_0}{R_{\text{sph}}} \right) - \frac{\pi}{2} \quad (4.23)$$

avec :

$$R_{\text{sph}} = 6'378'815.90365 \text{ [m]}$$

$$E_0 = 2'600'000 \text{ [m]}$$

$$N_0 = 1'200'000 \text{ [m]}$$

- b) Une fois que les coordonnées sphériques obliques sont calculées. Il est temps d'appliquer la rotation inverse pour passer du système oblique au système normal et ainsi obtenir les coordonnées sphériques normales $(\lambda_{\text{sph}}, \varphi_{\text{sph}})$:

$$\lambda_{\text{sph}} = \arctan \left(\frac{\sin \lambda_{\text{sph}}^t}{\cos \varphi_0 \cdot \cos \lambda_{\text{sph}} - \sin \varphi_0 \cdot \cos \lambda_{\text{sph}}} \right) \quad (4.24)$$

$$\varphi_{\text{sph}} = \arcsin \left(\cos \varphi_0 \cdot \sin \varphi_{\text{sph}}^t + \sin \varphi_0 \cdot \cos \varphi_{\text{sph}}^t \cdot \cos \lambda_{\text{sph}}^t \right) \quad (4.25)$$

avec :

$\lambda_{\text{sph}}^t, \varphi_{\text{sph}}^t$: coordonnées sphériques oblique

$$\varphi_0 = 46^\circ 54' 27'' = 46.9077314579^\circ$$

- c) Finalement, la sphère est projetée sur l'ellipsoïde :

$$\begin{pmatrix} \lambda^{\text{CH1903+}}(\text{E}, \text{N}) \\ \varphi^{\text{CH1903+}}(\text{E}, \text{N}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_0 + \frac{1}{\alpha} \cdot \lambda_{\text{sph}} \\ 2 \cdot \arctan \left[\tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_{\text{sph}}}{2} \right) \frac{1}{\alpha} \cdot k^{-\frac{1}{\alpha}} \cdot \left(\frac{1 + e \cdot \sin \varphi_{\text{sph}}}{1 - e \cdot \sin \varphi_{\text{sph}}} \right)^{\frac{e}{2}} \right] - \frac{\pi}{2} \end{pmatrix} \quad (4.26)$$

avec :

$\lambda^{\text{CH1903+}}, \varphi^{\text{CH1903+}}$: Coordonnées ellipsoïdales

$\lambda_{\text{sph}}, \varphi_{\text{sph}}$: Coordonnées sphériques normales

$$\lambda_0 = 7^\circ 26' 22''.50 = 7.4395833333^\circ$$

$$\alpha = 1.0007291384304$$

$$k = 1.0030714396280$$

- 3) Transformation entre le système ellipsoïdale $(\lambda^{\text{CH1903+}}, \varphi^{\text{CH1903+}}, h^{\text{CH1903+}})$ et cartésien $(X^{\text{CH1903+}}, Y^{\text{CH1903+}}, Z^{\text{CH1903+}})$

$$X^{\text{CH1903+}} = (R_N + h^{\text{CH1903+}}) \cdot \cos \varphi^{\text{CH1903+}} \cdot \cos \lambda^{\text{CH1903+}}$$

$$Y^{\text{CH1903+}} = (R_N + h^{\text{CH1903+}}) \cdot \cos \varphi^{\text{CH1903+}} \cdot \sin \lambda^{\text{CH1903+}} \quad (4.27)$$

$$Z^{\text{CH1903+}} = [R_N \cdot (1 - e^2) + h^{\text{CH1903+}}] \cdot \sin \varphi^{\text{CH1903+}}$$

avec :

$$R_N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi}} : \text{Rayon de courbure de la section normale à l'ellipsoïde}$$

$$a = 6377397.155 : \text{Demi-grand axe de l'ellipsoïde de Bessel [m]}$$

$$e = 0.0816968312225269 : \text{excentricité de l'ellipsoïde de Bessel [-]}$$

4) Transformation cartésienne vers topocentrique pour un point P :

$$\mathbf{P}^{\text{T}+} = \mathbf{T}(\Lambda, \Phi) \cdot (\mathbf{P}^{\text{CH1903}+} - \mathbf{O}^{\text{CH1903}+}) + \mathbf{O}^{\text{T}+} \quad (4.28)$$

$$(4.29)$$

$$\mathbf{T}(\Lambda, \Phi) = \begin{pmatrix} -\sin \Phi \cdot \cos \Lambda & -\sin \Phi \cdot \sin \Lambda & \cos \Phi \\ -\sin \Lambda & \cos \Phi & 0 \\ \cos \Phi \cdot \cos \Lambda & \cos \Phi \sin \Lambda & \sin \Phi \end{pmatrix} \quad (4.30)$$

avec :

$\mathbf{P}^{\text{T}+}$: Point dans le système topocentre T+

$\mathbf{P}^{\text{CH1903}+}$: Point dans le système CH1903+

$\mathbf{O}^{\text{CH1903}+}$: Origine du système topocentrique dans le système CH1903+

$\mathbf{O}^{\text{T}+}$: Origine du système topocentrique dans le système T (0, 0, 0)

$\mathbf{T}(\Lambda, \Phi)$: Matrice de transformation entre le système CH1903+ et le système topocentrique T+

Le lien entre la longitude (Λ) et la latitude (Φ) astronomique [rad] et ellipsoïdale ($\lambda^{\text{CH1903}+}, \varphi^{\text{CH1903}+}$) [rad] est le suivant :

$$\Lambda = \lambda^{\text{CH1903}+} + \frac{\eta^{\text{CH1903}+}}{\cos \varphi^{\text{CH1903}+}} \quad (4.31)$$

$$\Phi = \lambda^{\text{CH1903}+} + \xi^{\text{CH1903}+} \quad (4.32)$$

avec :

$\eta^{\text{CH1903}+}$: Déviation de la verticale, composante ouest-est [rad]

$\xi^{\text{CH1903}+}$: Déviation de la verticale, composante nord-sud [rad]

4.2.3 Passage entre MN95 et altitude sur ellipsoïde (PE) et le système topocentrique local T+

Le code PE correspond au système de projection suisse avec des altitudes ellipsoïdales. Cela correspond au cadre de référence MN95 suisse. Pour passer de ce dernier au système T+, la transformation est la suivante :

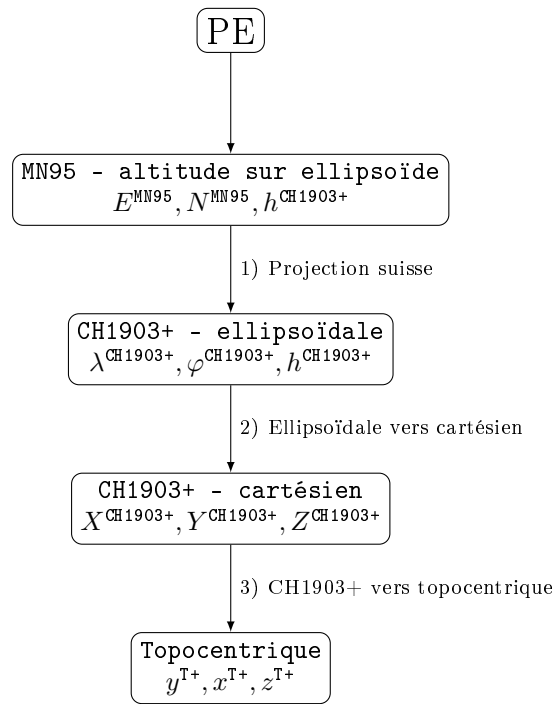


FIGURE 5 – MN95 et altitude sur ellipsoïde vers T+

Le détail des transformations est le même que celui entre PK et T+ en supprimant la première étape qui consiste à passer d'une altitude sur le géoïde à une altitude ellipsoïdale.

4.2.4 GNSS : Passage de WGS84 vers le système topocentrique T+

Le schéma ci-dessous décrit le traitement pour le passage des coordonnées WGS84 des observations GNSS vers le système T+.

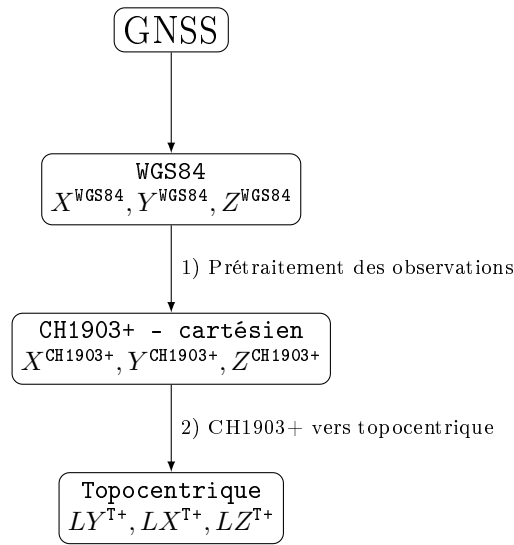


FIGURE 6 – WGS84 vers T+

- 1) Les mesures brutes GNSS doivent être prétraitées via un logiciel de post-traitement. Ainsi, des coordonnées prétraitées et intégrées dans une session peuvent être insérées dans ce logiciel.
- 2) Transformation cartésien vers topocentrique pour un point P :

$$\mathbf{P}^{\text{T}+} = \mathbf{T}(\Lambda, \Phi) \cdot (\mathbf{P}^{\text{CH1903}+} - \mathbf{O}^{\text{CH1903}+}) + \mathbf{O}^{\text{T}+} \quad (4.33)$$

$$(4.34)$$

$$\mathbf{T}(\Lambda, \Phi) = \begin{pmatrix} -\sin \Phi \cdot \cos \Lambda & -\sin \Phi \cdot \sin \Lambda & \cos \Phi \\ -\sin \Lambda & \cos \Phi & 0 \\ \cos \Phi \cdot \cos \Lambda & \cos \Phi \sin \Lambda & \sin \Phi \end{pmatrix} \quad (4.35)$$

avec :

$\mathbf{P}^{\text{T}+}$: Point dans le système topocentre T+

$\mathbf{P}^{\text{CH1903}+}$: Point dans le système CH1903+

$\mathbf{O}^{\text{CH1903}+}$: Origine du système topocentrique dans le système CH1903+

$\mathbf{O}^{\text{T}+}$: Origine du système topocentrique dans le système T (0, 0, 0)

$\mathbf{T}(\Lambda, \Phi)$: Matrice de transformation entre le système CH1903+ et le système topocentrique T+

Le lien entre la longitude (Λ) et la latitude (Φ) astronomique [rad] et ellipsoïdale ($\lambda^{\text{CH1903+}}, \varphi^{\text{CH1903+}}$) [rad] est le suivant :

$$\Lambda = \lambda^{\text{CH1903+}} + \frac{\eta^{\text{CH1903+}}}{\cos \varphi^{\text{CH1903+}}} \quad (4.36)$$

$$\Phi = \lambda^{\text{CH1903+}} + \xi^{\text{CH1903+}} \quad (4.37)$$

avec :

$\eta^{\text{CH1903+}}$: Déviation de la verticale, composante ouest-est [rad]

$\xi^{\text{CH1903+}}$: Déviation de la verticale, composante nord-sud [rad]

Les coordonnées GNSS sont compensées dans des sessions via un Helmert 3D. Cette étape est décrite dans les équations d'observations.

5 Modèle mathématique

5.1 Définition

Les symboles suivants sont utilisés dans ce chapitre :

$\overset{\circ}{x}$: Valeur approchée

\hat{x} : Valeur estimée

\check{x} : Valeur vraie

5.2 Vecteur des observations

Ce chapitre décrit le vecteur des observations pour le logiciel. Il est important de noter que les types d'observations peuvent être supprimés ou ajoutés selon la configuration du calcul.

$$\mathbf{l} = \begin{pmatrix} DS \\ RI \\ AZ \\ ZD \\ DY_T \\ DX_T \\ DZ_T \\ DY_{Topo} \\ DX_{Topo} \\ DZ_{Topo} \\ DH \\ LY \\ LX \\ LZ \\ y_{pf} \\ x_{pf} \\ z_{pf} \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

avec :

DS : Distance 3D entre deux points [m]

RI : Directions horizontales entre deux points [gon]

AZ : Azimuts entre deux points [gon]

ZD : Angles zénithaux entre deux points [gon]

DY_T, DX_T, DZ_T : Différences de coordonnées topocentriques T+ entre deux points [m]

$DY_{Topo}, DX_{Topo}, DZ_{Topo}$: Différences de coordonnées entre deux points dans le système topocentriques à l'axe des tourillons de la station [m]

DH : Différences d'altitudes orthométriques entre deux points [m]

LY, LX, LZ : Coordonnées GNSS dans une session j [m]

y_{pf}, x_{pf}, z_{pf} : Coordonnées des points fixes (Libre-ajusté) [m]

5.3 Paramètres des inconnues

Ce chapitre décrit les différentes inconnues qui interviennent dans le calcul de l'ajustement. Les huit derniers paramètres sont pour les sessions GNSS.

$$\hat{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} y \\ x \\ z \\ \xi \\ \eta \\ y_{\text{pf}} \\ x_{\text{pf}} \\ z_{\text{pf}} \\ \xi_{\text{pf}} \\ \eta_{\text{pf}} \\ \omega_0 \\ \omega_g \\ c \\ \lambda \\ k \\ T_y^j \\ T_x^j \\ T_z^j \\ R_y^j \\ R_x^j \\ R_z^j \\ E_{yx}^j \\ E_z^j \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

avec :

- y, x, z : Coordonnées 3D des points nouveaux dans le système T+ [m]
- ξ : Déviation de la verticale de la composante xi [arcsec]
- η : Déviation de la verticale de la composante eta [arcsec]
- $y_{\text{pf}}, x_{\text{pf}}, z_{\text{pf}}$: Coordonnées 3D des points fixes dans le système T+ (Libre ajusté) [m]
- ξ_{pf} : Déviation de la verticale de la composante xi (Libre ajusté) [arcsec]
- η_{pf} : Déviation de la verticale de la composante eta (Libre ajusté) [arcsec]
- ω_0 : Inconnue d'orientation par stationnement [gon]
- ω_g : Inconnue d'orientation par stationnement pour les azimuts [gon]
- c : Constante d'addition pour les distances [m]
- λ : Facteur d'échelle pour les distances [-]
- k : Coefficient de réfraction [-]
- T_y^j, T_x^j, T_z^j : Translations d'une session GNSS j [m]
- R_y^j, R_x^j, R_z^j : Rotations d'une session GNSS j [gon]
- E_{yx}^j : Facteur d'échelle des composantes y, x d'une session j GNSS [-]
- E_z^j : Facteur d'échelle de la composante z d'une session j GNSS [-]

5.4 Modèle fonctionnel

5.4.1 Transformation rigoureuse des coordonnées dans le système propre à la station

Ce chapitre concerne uniquement les observation terrestres. Afin d'assurer la détermination des équations d'observations rigoureuses, il est important d'appliquer et d'utiliser les coordonnées des points observés dans le système topocentrique propre à la station. Pour ce faire, il est nécessaire d'utiliser la déviation de la verticale ainsi que les hauteurs de signaux et d'instruments dans les bons systèmes.

Ensuite, il est fondamental de poser la base d'une transformation entre un premier système vers un deuxième système. Elle peut être décrite par l'équation suivante [GUILLAUME (1), 2021] :

$$\begin{pmatrix} y^{\text{II}} \\ x^{\text{II}} \\ z^{\text{II}} \end{pmatrix} = (\mathbf{T}^{\text{II}})^T \cdot (\mathbf{o}^{\text{I}} - \mathbf{o}^{\text{II}}) + (\mathbf{T}^{\text{II}})^T \cdot \mathbf{T}^{\text{I}} \cdot \begin{pmatrix} y^{\text{I}} \\ x^{\text{I}} \\ z^{\text{I}} \end{pmatrix} = \mathbf{t}_1^{\text{II}} + \mathbf{R}_1^{\text{II}} \cdot \begin{pmatrix} y^{\text{I}} \\ x^{\text{I}} \\ z^{\text{I}} \end{pmatrix} \quad (5.3)$$

Données

Les éléments connus pour réaliser cette transformation doivent être définis. En effet, grâce aux différentes pipelines, toutes les données sont connues dans le système $T+$.

L'objectif est d'obtenir les coordonnées du topocentre du système topo_b situé au point visé dans le système topo_a à la station. Les différentes équations d'observations sont donc parfaitement rigoureuses.

Comme le montre le graphique ci-dessous, il est possible de découper le problème en plusieurs systèmes intermédiaires.

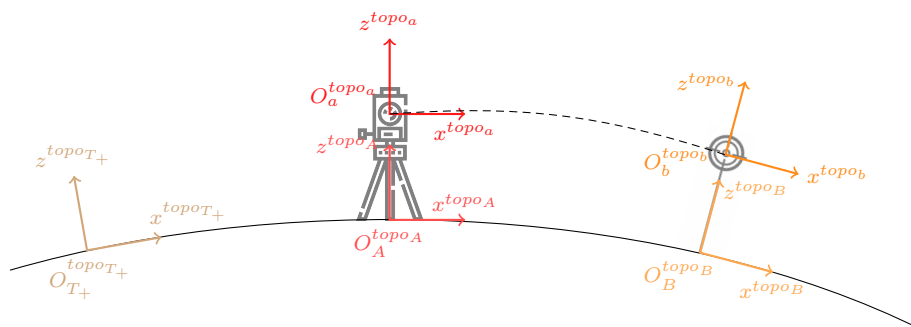


FIGURE 7 – Transformation rigoureuse des coordonnées dans le système propre à la station

Le tableau ci-dessous récapitule les différents systèmes :

Système	Description
$\mathbf{x}^{\text{topo}_A}$	Système avec son origine sur le point au sol de la station
$\mathbf{x}^{\text{topo}_a}$	Système avec son origine à l'axe des tourillons de la station
$\mathbf{x}^{\text{topo}_B}$	Système avec son origine sur le point au sol du point visé
$\mathbf{x}^{\text{topo}_b}$	Système avec son origine au centre du point visé

TABLE 3 – Systèmes du modèle fonctionnel

Pour les notations, l'élément en exposant représente le système dans lequel se trouve le point. Celui en indice donne le numéro du point. Ainsi, le point $\mathbf{x}_b^{\text{topo}_a}$ est le point b dans le système topocentrique a. Pour la suite de la démonstration, un point est représenté par son vecteur \mathbf{x} . Les composantes ne sont pas détaillées pour des raisons de lisibilité. Cependant, le chapitre des systèmes de références explique en détails les composantes des points.

Les éléments connus sont les suivants :

$$\mathbf{x}_{T+}^{\text{topo}_{T+}} = \begin{pmatrix} y_{T+}^{\text{topo}_{T+}} \\ x_{T+}^{\text{topo}_{T+}} \\ z_{T+}^{\text{topo}_{T+}} \end{pmatrix} \quad \mathbf{x}_A^{\text{topo}_{T+}} = \begin{pmatrix} y_A^{\text{topo}_{T+}} \\ x_A^{\text{topo}_{T+}} \\ z_A^{\text{topo}_{T+}} \end{pmatrix} \quad \mathbf{x}_B^{\text{topo}_{T+}} = \begin{pmatrix} y_B^{\text{topo}_{T+}} \\ x_B^{\text{topo}_{T+}} \\ z_B^{\text{topo}_{T+}} \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

Transformation entre le système topocentrique $T+$ et le système CH1903+

Afin de pouvoir réaliser la transformation, le lien entre ces différents systèmes est le système géocentrique CH1903+. Il est donc nécessaire d'obtenir les coordonnées CH1903+ de ces trois points. Pour ce faire, les coordonnées CH1903+ du topocentre sont choisies par l'utilisateur. En général, ce dernier se trouve au centre des stations. La transformation entre le système topo_{T+} et CH1903+ est la suivante :

$$\mathbf{x}^{\text{CH1903+}} = \mathbf{x}_0^{\text{CH1903+}} + \mathbf{R}_{\text{topo}_{T+}}^{\text{CH1903+}} \cdot \mathbf{x}_{T+}^{\text{topo}_{T+}} \quad (5.5)$$

Il ne reste plus qu'à définir la matrice de transformation du système topo_{T+} au CH1903+ en transformant tout d'abord les coordonnées cartésiennes du topocentre $T+$ en coordonnées ellipsoïdales ($\lambda_{T+}^{\text{CH1903+}}, \varphi_{T+}^{\text{CH1903+}}, h_{T+}^{\text{CH1903+}}$) :

$$\lambda_{T+}^{\text{CH1903+}} = \arctan \left(\frac{y_{T+}^{\text{CH1903+}}}{x_{T+}^{\text{CH1903+}}} \right)$$

$$\varphi_{T+}^{\text{CH1903+}} = \arctan \left(\frac{z_{T+}^{\text{CH1903+}}}{\sqrt{x_{T+}^{\text{CH1903+}2} + y_{T+}^{\text{CH1903+}2}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{R_N}{R_N + h_{T+}^{\text{CH1903+}}} \cdot e^2}} \right) \quad (5.6)$$

$$h_{T+}^{\text{CH1903+}} = \frac{\sqrt{x_{T+}^{\text{CH1903+}2} + y_{T+}^{\text{CH1903+}2}}}{\cos \varphi_{T+}^{\text{CH1903+}}} - R_N$$

avec :

$$R_N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi_{T+}^{\text{CH1903+}}}} : \text{Rayon de courbure de la section normale à l'ellipsoïde}$$

$$a = 6377397.155 : \text{Demi-grand axe de l'ellipsoïde de Bessel [m]}$$

$$e = 0.0816968312225269 : \text{excentricité de l'ellipsoïde de Bessel [-]}$$

Puis, la longitude et latitude astronomique sont calculées, en appliquant la déviation de la verticale au topocentre $T+$. Les coordonnées ellipsoïdales doivent être transformées de degrés en radians et les composantes de la déviation doivent être converties d'arc-secondes en radians.

$$\Lambda_{T+}^{\text{CH1903+}} = \lambda_{T+}^{\text{CH1903+}} + \frac{\eta_{T+}^{\text{CH1903+}}}{\cos \varphi_{T+}^{\text{CH1903+}}} \quad (5.7)$$

$$\Phi_{T+}^{\text{CH1903+}} = \varphi_{T+}^{\text{CH1903+}} + \xi_{T+}^{\text{CH1903+}} \quad (5.8)$$

avec :

$$\Lambda_{T+}^{\text{CH1903+}} : \text{Longitude astronomique [rad]}$$

$$\Phi_{T+}^{\text{CH1903+}} : \text{Latitude astronomique [rad]}$$

$$\eta_{T+}^{\text{CH1903+}} : \text{Déviation de la verticale, composante ouest-est du topocentre } T+ \text{ [rad]}$$

$$\xi_{T+}^{\text{CH1903+}} : \text{Déviation de la verticale, composante nord-sud du topocentre } T+ \text{ [rad]}$$

Il est possible de reconstruire la matrice de transformation entre le système $T+$ et $CH1903+$:

$$\mathbf{R}_{T+}^{CH1903+} = \begin{pmatrix} -\sin \Phi_{T+}^{CH1903+} \cdot \cos \Lambda_{T+}^{CH1903+} & -\sin \Lambda_{T+}^{CH1903+} & \cos \Phi_{T+}^{CH1903+} \cdot \cos \Lambda_{T+}^{CH1903+} \\ -\sin \Phi_{T+}^{CH1903+} \cdot \sin \Lambda_{T+}^{CH1903+} & \cos \Lambda_{T+}^{CH1903+} & \cos \Phi_{T+}^{CH1903+} \cdot \sin \Lambda_{T+}^{CH1903+} \\ \cos \Phi_{T+}^{CH1903+} & 0 & \sin \Phi_{T+}^{CH1903+} \end{pmatrix} \quad (5.9)$$

Et ensuite l'appliquer pour obtenir les coordonnées dans le système $CH1903+$:

$$\mathbf{x}_A^{CH1903+} = \mathbf{x}_{T+}^{CH1903+} + \mathbf{R}_{\text{topo}_{T+}}^{CH1903+} \cdot \mathbf{x}_A^{\text{topo}_{T+}} \quad (5.10)$$

$$\mathbf{x}_B^{CH1903+} = \mathbf{x}_{T+}^{CH1903+} + \mathbf{R}_{\text{topo}_{T+}}^{CH1903+} \cdot \mathbf{x}_B^{\text{topo}_{T+}} \quad (5.11)$$

Transformation entre le système $CH1903+$ et le système topocentrique B

La formule suivante permet de déterminer le point B dans le système topo_B . En sachant que le point B est le topocentre de ce système, il est donc logique que ce dernier soit nul. Nous pouvons constater que le deux vecteurs s'annulent et multiplient la matrice de transformation par un vecteur nul qui nous donne un vecteur nul.

$$\mathbf{x}_B^{\text{topo}_B} = \mathbf{R}_{CH1903+}^{\text{topo}_B} \cdot [\mathbf{x}_B^{CH1903+} - \mathbf{x}_B^{CH1903+}] = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5.12)$$

avec :

$$\mathbf{R}_{CH1903+}^{\text{topo}_B} = \begin{pmatrix} -\sin \Phi_B^{CH1903+} \cdot \cos \Lambda_B^{CH1903+} & -\sin \Phi_B^{CH1903+} \cdot \sin \Lambda_B^{\text{TRS}} & \cos \Lambda_B^{\text{TRS}} \\ -\sin \Lambda_B^{CH1903+} & \cos \Phi_B^{CH1903+} & 0 \\ \cos \Phi_B^{CH1903+} \cdot \cos \Lambda_B & \cos \Phi_B^{CH1903+} \cdot \sin \Lambda_B^{CH1903+} & \sin \Phi_B^{CH1903+} \end{pmatrix}$$

Le lien entre la longitude et la latitude astronomique et ellipsoïdale est le suivant, en appliquant la déviation de la verticale. Les coordonnées ellipsoïdales doivent être transformées de degrés en radians et les composantes de la déviation doivent être converties d'arc-secondes en radians.

$$\Lambda_B^{CH1903+} = \lambda_B^{CH1903+} + \frac{\eta_B^{CH1903+}}{\cos \varphi_B^{CH1903+}} \quad (5.13)$$

$$\Phi_B^{CH1903+} = \lambda_B^{CH1903+} + \xi_B^{CH1903+} \quad (5.14)$$

avec :

$\Lambda_B^{CH1903+}$: Longitude astronomique [rad]

$\Phi_B^{CH1903+}$: Latitude astronomique [rad]

$\eta_B^{CH1903+}$: Déviation de la verticale, composante ouest-est du point B [rad]

$\xi_B^{CH1903+}$: Déviation de la verticale, composante nord-sud du point B [rad]

Transformation du point b dans le système topocentrique B

Puis, le point b est obtenu dans le système topo_B en ajoutant la hauteur de signal. Elle est mesurée dans le système topocentrique propre à la cible en admettant que le point au sol est parfaitement à la verticale de l'axe de la cible. Il existe uniquement une translation entre ces deux points. En utilisant, l'équation 5.3, la transformation est donc la suivante :

$$\mathbf{x}_b^{\text{topo}_B} = \mathbf{t}_{\text{topo}_b}^{\text{topo}_B} + \mathbf{R}_{\text{topo}_b}^{\text{topo}_B} \cdot \mathbf{x}_b^{\text{topo}_b} \quad (5.15)$$

avec :

$$\mathbf{t}_{\text{topo}_b}^{\text{topo}_B} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ S \end{pmatrix}$$

$\mathbf{R}_{\text{topo}_b}^{\text{topo}_B} = \mathbf{I}$: Il est admis qu'aucune rotation n'est réalisée entre les deux systèmes (identitaire).

Transformation du système topocentrique B vers le système CH1903+

Maintenant que les coordonnées des points b sont connus dans le système topo_B , il faut les transformer dans le système topo_A . Pour ce faire, il est tout d'abord nécessaire de convertir les coordonnées dans le système de transition CH1903+.

$$\mathbf{x}_b^{\text{CH1903+}} = \mathbf{x}_B^{\text{CH1903+}} + \mathbf{R}_{\text{topo}_B}^{\text{CH1903+}} \cdot \mathbf{x}_b^{\text{topo}_B} \quad (5.16)$$

avec :

$$\mathbf{R}_B^{\text{CH1903+}} = \begin{pmatrix} -\sin \Phi_B^{\text{CH1903+}} \cdot \cos \Lambda_B^{\text{CH1903+}} & -\sin \Lambda_B^{\text{CH1903+}} & \cos \Phi_B^{\text{CH1903+}} \cdot \cos \Lambda_B^{\text{CH1903+}} \\ -\sin \Phi_B^{\text{CH1903+}} \cdot \sin \Lambda_B^{\text{CH1903+}} & \cos \Lambda_B^{\text{CH1903+}} & \cos \Phi_B^{\text{CH1903+}} \cdot \sin \Lambda_B^{\text{CH1903+}} \\ \cos \Phi_B^{\text{CH1903+}} & 0 & \sin \Phi_B^{\text{CH1903+}} \end{pmatrix}$$

Le lien entre la longitude et la latitude astronomique et ellipsoïdale est le suivant. La déviation de la verticale au point visé est appliquée. Les coordonnées ellipsoïdales doivent être transformées de degrés en radians et les composantes de la déviation doivent être converties d'arc-secondes en radians.

$$\Lambda_B^{\text{CH1903+}} = \lambda_B^{\text{CH1903+}} + \frac{\eta_B^{\text{CH1903+}}}{\cos \varphi_B^{\text{CH1903+}}} \quad (5.17)$$

$$\Phi_B^{\text{CH1903+}} = \lambda_B^{\text{CH1903+}} + \xi_B^{\text{CH1903+}} \quad (5.18)$$

avec :

$\Lambda_B^{\text{CH1903+}}$: Longitude astronomique [rad]

$\Phi_B^{\text{CH1903+}}$: Latitude astronomique [rad]

$\eta_B^{\text{CH1903+}}$: Déviation de la verticale, composante ouest-est du point B [rad]

$\xi_B^{\text{CH1903+}}$: Déviation de la verticale, composante nord-sud du point B [rad]

Transformation du système CH1903+ vers le système topocentrique A

Ensuite, les coordonnées sont transformées dans le système topo_A qui se trouve sur le point au sol de la station.

$$\mathbf{x}_b^{\text{topo}_A} = \mathbf{R}_{\text{TRS}}^{\text{topo}_A} \cdot [\mathbf{x}_b^{\text{CH1903+}} - \mathbf{x}_A^{\text{CH1903+}}] \quad (5.19)$$

avec :

$$\mathbf{R}_{\text{CH1903+}}^{\text{topo}_A} = \begin{pmatrix} -\sin \Phi_A^{\text{CH1903+}} \cdot \cos \Lambda_A^{\text{CH1903+}} & -\sin \Phi_A^{\text{CH1903+}} \cdot \sin \Lambda_A^{\text{CH1903+}} & \cos \Lambda_A^{\text{CH1903+}} \\ -\sin \Lambda_A^{\text{CH1903+}} & \cos \Phi_A^{\text{CH1903+}} & 0 \\ \cos \Phi_A^{\text{CH1903+}} \cdot \cos \Lambda_A^{\text{CH1903+}} & \cos \Phi_A^{\text{CH1903+}} \cdot \sin \Lambda_A^{\text{CH1903+}} & \sin \Phi_A^{\text{CH1903+}} \end{pmatrix}$$

Le lien entre la longitude et la latitude astronomique et ellipsoïdale est le suivant. La déviation de la verticale à la station est appliquée. Les coordonnées ellipsoïdales doivent être transformées de degrés en radians et les composantes de la déviation doivent être converties d'arc-secondes en radians.

$$\Lambda_A^{\text{CH1903+}} = \lambda_A^{\text{CH1903+}} + \frac{\eta_A^{\text{CH1903+}}}{\cos \varphi_A^{\text{CH1903+}}} \quad (5.20)$$

$$\Phi_A^{\text{CH1903+}} = \lambda_A^{\text{CH1903+}} + \xi_A^{\text{CH1903+}}$$

avec :

$\Lambda_A^{\text{CH1903+}}$: Longitude astronomique [rad]

$\Phi_A^{\text{CH1903+}}$: Latitude astronomique [rad]

$\eta_A^{\text{CH1903+}}$: Déviation de la verticale, composante ouest-est du point A [rad]

$\xi_A^{\text{CH1903+}}$: Déviation de la verticale, composante nord-sud du point A [rad]

Transformation du système topocentrique A au système topocentrique a

Puis, il est nécessaire d'obtenir le topocentre b dans le système topo_a . Dans ce modèle, il est admis qu'aucune rotation n'existe entre le système à l'axe des tourillons et le système du point au sol. Ainsi, dans le cas où la hauteur de station est nulle, les systèmes topo_A et topo_a sont parfaitement confondus. Il est donc possible d'écrire la relation suivante :

$$\mathbf{x}_b^{\text{topo}_a} = \mathbf{t}_{\text{topo}_A}^{\text{topo}_a} + \mathbf{R}_{\text{topo}_A}^{\text{topo}_a} \cdot \mathbf{x}_b^{\text{topo}_A} \quad (5.21)$$

avec :

$$\mathbf{t}_{\text{topo}_A}^{\text{topo}_a} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -I \end{pmatrix}$$

$\mathbf{R}_{\text{topo}_A}^{\text{topo}_a} = \mathbf{I}$: car il est admis qu'aucune rotation n'est réalisée entre les deux systèmes (identitaire).

Résumé du passage du système topocentrique T+ au système topocentrique à l'axe des tourillons de la station

Pour finir, l'équation suivante représente la totalité de la transformation entre le système T+ et le système topo_a en passant par le système topo_b . Les coordonnées du point visé sont donc connues dans le système topocentrique à l'axe des tourillons de l'appareil. Il s'agit du système rigoureux dans lequel la totalité des mesures terrestres sont observées.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_b^{\text{topo}_a} = \mathbf{t}_{\text{topo}_A}^{\text{topo}_a} + \mathbf{R}_{\text{topo}_A}^{\text{topo}_a} \cdot \left[\mathbf{R}_{\text{CH1903+}}^{\text{topo}_A} \cdot \left[\left(\mathbf{x}_{T+}^{\text{CH1903+}} + \mathbf{R}_{\text{topo}_{T+}}^{\text{CH1903+}} \cdot \mathbf{x}_B^{\text{topo}_{T+}} \right) + \mathbf{R}_{\text{topo}_B}^{\text{CH1903+}} \cdot \right. \right. \\ \left. \left. \left[\mathbf{t}_{\text{topo}_b}^{\text{topo}_B} + \mathbf{R}_{\text{topo}_b}^{\text{topo}_B} \cdot \left(\mathbf{R}_{\text{TRS}}^{\text{topo}_B} \cdot \left[\mathbf{x}_{T+}^{\text{CH1903+}} + \mathbf{R}_{\text{topo}_{T+}}^{\text{CH1903+}} \cdot \mathbf{x}_B^{\text{topo}_{T+}} - \mathbf{x}_{T+}^{\text{CH1903+}} + \right. \right. \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \left. \mathbf{R}_{\text{topo}_{T+}}^{\text{CH1903+}} \cdot \mathbf{x}_B^{\text{topo}_{T+}} \right] \right) \right] - \left(\mathbf{x}_{T+}^{\text{CH1903+}} + \mathbf{R}_{\text{topo}_{T+}}^{\text{CH1903+}} \cdot \mathbf{x}_A^{\text{topo}_{T+}} \right) \right] \right] \end{aligned} \quad (5.22)$$

Ainsi, il est possible de simplifier plusieurs éléments :

$$\boxed{\mathbf{x}_b^{\text{topo}_a} = \mathbf{t}_{\text{topo}_A}^{\text{topo}_a} + \left[\mathbf{R}_{\text{CH1903+}}^{\text{topo}_A} \cdot \left[\mathbf{R}_{\text{topo}_{T+}}^{\text{CH1903+}} \cdot \left(\mathbf{x}_B^{\text{topo}_{T+}} - \mathbf{x}_A^{\text{topo}_{T+}} \right) + \mathbf{R}_{\text{topo}_B}^{\text{CH1903+}} \cdot \mathbf{t}_{\text{topo}_b}^{\text{topo}_B} \right] \right]} \quad (5.23)$$

avec :

$$\mathbf{t}_{\text{topo}_A}^{\text{topo}_a} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ I \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{R}_{\text{CH1903+}}^{\text{topo}_A} = \begin{pmatrix} -\sin \Phi_A^{\text{CH1903+}} \cdot \cos \Lambda_A^{\text{CH1903+}} & -\sin \Phi_A^{\text{CH1903+}} \cdot \sin \Lambda_A^{\text{CH1903+}} & \cos \Lambda_A^{\text{CH1903+}} \\ -\sin \Lambda_A^{\text{CH1903+}} & \cos \Phi_A^{\text{CH1903+}} & 0 \\ \cos \Phi_A^{\text{CH1903+}} \cdot \cos \Lambda_A^{\text{CH1903+}} & \cos \Phi_A^{\text{CH1903+}} \cdot \sin \Lambda_A^{\text{CH1903+}} & \sin \Phi_A^{\text{CH1903+}} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{R}_{T+}^{\text{CH1903+}} = \begin{pmatrix} -\sin \Phi_{T+}^{\text{CH1903+}} \cdot \cos \Lambda_{T+}^{\text{CH1903+}} & -\sin \Lambda_{T+}^{\text{CH1903+}} & \cos \Phi_{T+}^{\text{CH1903+}} \cdot \cos \Lambda_{T+}^{\text{CH1903+}} \\ -\sin \Phi_{T+}^{\text{CH1903+}} \cdot \sin \Lambda_{T+}^{\text{CH1903+}} & \cos \Lambda_{T+}^{\text{CH1903+}} & \cos \Phi_{T+}^{\text{CH1903+}} \cdot \sin \Lambda_{T+}^{\text{CH1903+}} \\ \cos \Phi_{T+}^{\text{CH1903+}} & 0 & \sin \Phi_{T+}^{\text{CH1903+}} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{R}_B^{\text{CH1903+}} = \begin{pmatrix} -\sin \Phi_B^{\text{CH1903+}} \cdot \cos \Lambda_B^{\text{CH1903+}} & -\sin \Lambda_B^{\text{CH1903+}} & \cos \Phi_B^{\text{CH1903+}} \cdot \cos \Lambda_B^{\text{CH1903+}} \\ -\sin \Phi_B^{\text{CH1903+}} \cdot \sin \Lambda_B^{\text{CH1903+}} & \cos \Lambda_B^{\text{CH1903+}} & \cos \Phi_B^{\text{CH1903+}} \cdot \sin \Lambda_B^{\text{CH1903+}} \\ \cos \Phi_B^{\text{CH1903+}} & 0 & \sin \Phi_B^{\text{CH1903+}} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{t}_{\text{topo}_b}^{\text{topo}_B} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ S \end{pmatrix}$$

Il est donc possible de déterminer, via ces coordonnées, les équations d'observations rigoureuses des différentes observations terrestres.

Exemple d'application numérique

Afin d'illustrer le chapitre précédent, un exemple numérique est réalisé. Le point 8001 est mesuré depuis la station 8002. Les coordonnées des deux points sont connues dans le système topocentrique T+. Les coordonnées du topocentre du système T+ sont connues dans le système CH1903+. Il faut trouver les coordonnées du point 8001 dans le système topocentrique à l'axe des tourillons de la station 8002.

Les données en entrées sont les suivantes :

$$\text{— } \mathbf{x}_{8001}^{\text{topo}_{T+}} = \begin{pmatrix} 75.000000 \\ -145.000000 \\ -1.000000 \end{pmatrix} : \text{Point visé (8001)}$$

$$\text{— } \mathbf{x}_{8002}^{\text{topo}_{T+}} = \begin{pmatrix} 50.000000 \\ 200.000000 \\ 0.99000000 \end{pmatrix} : \text{Point stationné (8002)}$$

$$\text{— } \mathbf{x}_{T+}^{\text{CH1903+}} = \begin{pmatrix} 4324343.022064 \\ 564823.561487 \\ 4638175.726648 \end{pmatrix} : \text{Topocentre du système T+ dans le système CH1903+ cartésien}$$

$$\text{— } I = 1.600 : \text{Hauteur d'instrument de la station (8002) [m]}$$

$$\text{— } S = 1.500 : \text{Hauteur de signal du point (8001) [m]}$$

$$\text{— } (\eta_{8001}^{\text{CH1903+}}, \xi_{8001}^{\text{CH1903+}}) = (-0.42, -0.79) : \text{Composantes de la déviation de la verticale du point visé (8001) [arcsec]}$$

$$\text{— } (\eta_{8002}^{\text{CH1903+}}, \xi_{8002}^{\text{CH1903+}}) = (-0.54, -1.08) : \text{Composantes de la déviation de la verticale du point stationné (8002) [arcsec]}$$

$$\text{— } (\eta_{T+}^{\text{CH1903+}}, \xi_{T+}^{\text{CH1903+}}) = (-0.27, -0.87) : \text{Composantes de la déviation de la verticale du topocentre T+ [arcsec]}$$

Pour commencer, il est nécessaire de calculer les longitudes et latitudes ellipsoïdales des points via les pipelines de transformations entre systèmes définis au chapitre 4.2.

$$\text{— } \mathbf{x}_{8001}^{\text{CH1903+}} = \begin{pmatrix} 7.4425394902 \\ 46.9537999343 \\ 390.000111 \end{pmatrix} : \text{Point visé dans le système CH1903+ [deg]}$$

$$\text{— } \mathbf{x}_{8002}^{\text{CH1903+}} = \begin{pmatrix} 7.4422111853 \\ 46.9569036457 \\ 392.000269 \end{pmatrix} : \text{Point stationné dans le système CH1903+ [deg]}$$

$$\text{— } \mathbf{x}_{T+}^{\text{CH1903+}} = \begin{pmatrix} 7.4415541535 \\ 46.9551044113 \\ 391.000000 \end{pmatrix} : \text{Topocentre T+ dans le système CH1903+ ellipsoïdale [deg]}$$

Les composantes de la déviation de la verticale et les coordonnées ellipsoïdales doivent être converties en radians. L'exemple ci-dessous montre la conversion pour la longitude du point 8001 :

$$0.1298968188 = \frac{7.4425394902 \cdot \pi}{180}$$

L'exemple ci-dessous montre la conversion pour la composante eta (η) de la déviation de la verticale du point 8001 :

$$-2.04 \cdot 10^{-06} = \frac{\pi}{180} \cdot \frac{-0.42}{3600}$$

Voici le résultat pour tous les points :

$$\text{— } \mathbf{x}_{8001}^{\text{CH1903+}} = \begin{pmatrix} 0.1298968188 \\ 0.8194984052 \\ 390.000111 \end{pmatrix} : \text{Point visé dans le système CH1903+ [rad]}$$

$$\text{--- } \mathbf{x}_{8002}^{\text{CH1903+}} = \begin{pmatrix} 0.1298910888 \\ 0.8195525752 \\ 392.000269 \end{pmatrix} : \text{Point stationné dans le système CH1903+ [rad]}$$

$$\text{--- } \mathbf{x}_{T+}^{\text{CH1903+}} = \begin{pmatrix} 0.1298796214 \\ 0.8195211726 \\ 391.000000 \end{pmatrix} : \text{Topocentre T+ dans le système CH1903+ ellipsoïdale [rad]}$$

Puis, les longitudes et latitudes astronomiques sont calculées en appliquant la déviation de la verticale selon l'équation 5.20.

$$\text{--- } \mathbf{x}_{8001}^{\text{CH1903+}} = \begin{pmatrix} 0.1298938357 \\ 0.8194945751 \\ 390.000111 \end{pmatrix} : \text{Point visé dans le système CH1903+ [rad]}$$

$$\text{--- } \mathbf{x}_{8002}^{\text{CH1903+}} = \begin{pmatrix} 0.1298872532 \\ 0.8195473392 \\ 392.000269 \end{pmatrix} : \text{Point stationné dans le système CH1903+ [rad]}$$

$$\text{--- } \mathbf{x}_{T+}^{\text{CH1903+}} = \begin{pmatrix} 0.1298777037 \\ 0.8195169547 \\ 391.000000 \end{pmatrix} : \text{Topocentre T+ dans le système CH1903+ ellipsoïdale [rad]}$$

L'équation 5.23 permet de mettre en relation les différentes données et de calculer les coordonnées du point visé dans le système à l'axe des tourillons de la station.

$$\begin{pmatrix} 24.990930 \\ -345.021983 \\ -2.107652 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1.600 \end{pmatrix} + \left[\mathbf{R}_{\text{CH1903+}}^{\text{topoA}} \cdot \left[\mathbf{R}_{\text{topoT+}}^{\text{CH1903+}} \cdot \begin{pmatrix} 75.000000 - 50.000000 \\ -145.000000 - 200.000000 \\ -1.000000 - 0.9900000 \end{pmatrix} + \mathbf{R}_{\text{topoB}}^{\text{CH1903+}} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1.500 \end{pmatrix} \right] \right]$$

avec :

$$\mathbf{R}_{\text{CH1903+}}^{\text{topoA}} = \begin{pmatrix} -\sin 0.8194945751 \cdot \cos 0.1298938357 & -\sin 0.8194945751 \cdot \sin 0.1298938357 & \cos 0.1298938357 \\ -\sin 0.8194945751 & \cos 0.8194945751 & 0 \\ \cos 0.1298938357 \cdot \cos 0.1298938357 & \cos 0.8194945751 \cdot \sin 0.1298938357 & \sin 0.8194945751 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{R}_{T+}^{\text{CH1903+}} = \begin{pmatrix} -\sin 0.8195473392 \cdot \cos 0.1298872532 & -\sin 0.1298872532 & \cos 0.8195473392 \cdot \cos 0.1298872532 \\ -\sin 0.8195473392 \cdot \sin 0.1298872532 & \cos 0.1298872532 & \cos 0.8195473392 \cdot \sin 0.1298872532 \\ \cos 0.8195473392 & 0 & \sin 0.8195473392 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{R}_B^{\text{CH1903+}} = \begin{pmatrix} -\sin 0.8195169547 \cdot \cos 0.1298777037 & -\sin 0.1298777037 & \cos 0.8195169547 \cdot \cos 0.1298777037 \\ -\sin 0.8195169547 \cdot \sin 0.1298777037 & \cos 0.1298777037 & \cos 0.8195169547 \cdot \sin 0.1298777037 \\ \cos 0.8195169547 & 0 & \sin 0.8195169547 \end{pmatrix}$$

5.4.2 Équations d'observations

Dans les deux chapitres précédents, les coordonnées qui concernent les observations terrestres sont traitées. Ainsi, les coordonnées d'un point observé depuis une station sont connues dans le système propre à cette dernière.

$$\mathbf{x}_b^{\text{topo}_a} = \begin{pmatrix} y_b^{\text{topo}_a} \\ x_b^{\text{topo}_a} \\ z_b^{\text{topo}_a} \end{pmatrix} \quad (5.24)$$

De plus, les coordonnées du point a à l'axe des tourillons de la station sont nulles dans ce même système :

$$\mathbf{x}_a^{\text{topo}_a} = \begin{pmatrix} y_a^{\text{topo}_a} \\ x_a^{\text{topo}_a} \\ z_a^{\text{topo}_a} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5.25)$$

A partir de là, il est possible de définir les équations rigoureuses suivantes :

Distance 3D (DS)

Ce type d'observations représente la distance en trois dimensions entre deux points. Les hauteurs d'instruments et de signaux sont appliquées préalablement aux équations 5.15 et 5.21.

$$s_{ab} + \hat{v}_{s_{ab}} = -\hat{c} + \frac{1}{\hat{\lambda}} \cdot \sqrt{(\hat{y}_b^{\text{topo}_a})^2 + (\hat{x}_b^{\text{topo}_a})^2 + (\hat{z}_b^{\text{topo}_a})^2} \quad (5.26)$$

avec :

- s_{ab} : Distances 3D entre deux points A et B [m]
- $\hat{v}_{s_{ab}}$: Erreur résiduelle [m]
- \hat{c} : Constante d'addition estimée [-]
- $\hat{\lambda}$: Facteur d'échelle estimée [m]

Direction horizontale (RI)

Ce type d'observations représente la direction horizontale entre deux points. Les hauteurs d'instruments et de signaux ainsi que la correction due à la déviation de la verticale sont appliquées dans le chapitre sur la transformation dans le système de la station.

$$r_{ab} + \hat{v}_{r_{ab}} = -\hat{\omega}_{0_a} + \arctan2(\hat{y}_b^{\text{topo}_a}, \hat{x}_b^{\text{topo}_a}) \quad (5.27)$$

avec :

- r_{ab} : Direction horizontale entre deux points A et B [gon]
- $\hat{v}_{r_{ab}}$: Erreur résiduelle [gon]
- $\hat{\omega}_{0_a}$: Inconnue d'orientation de la station [gon]

Azimut astronomique (AZ)

Ce type d'observations représente l'azimut astronomique entre deux points. Les hauteurs d'instruments et de signaux ainsi que la correction due à la déviation de la verticale sont appliquées dans le chapitre sur la transformation dans le système de la station.

$$\varphi_{z_{ab}} + \hat{v}_{\varphi_{z_{ab}}} = -\hat{\omega}_{\varphi_z} + \arctan2(\hat{y}_b^{\text{topo}_a}, \hat{x}_b^{\text{topo}_a}) \quad (5.28)$$

avec :

- $\varphi_{z_{ab}}$: Azimut astronomique entre deux points A et B [gon]
- $\hat{v}_{\varphi_{z_{ab}}}$: Erreur résiduelle [gon]
- $\hat{\omega}_{\varphi_z}$: Inconnue d'azimut de la station [gon]

Angle zénithal (ZD)

Ce type d'observations représente l'angle zénithal entre deux points. Les hauteurs d'instruments et de signaux ainsi que la correction due à la déviation de la verticale sont appliquées dans le chapitre sur la transformation dans le système de la station.

$$\zeta_{ab} + \widehat{v}_{\zeta_{ab}} = \arctan2\left(\sqrt{(\widehat{y}_b^{\text{topo}_a})^2 + (\widehat{x}_b^{\text{topo}_a})^2}, \widehat{z}_b^{\text{topo}_a}\right) - \delta_{\text{refr}} \quad (5.29)$$

avec :

ζ_{ab} : Angle zénithale entre deux points A et B [gon]

$\widehat{v}_{\zeta_{ab}}$: Erreur résiduelle [gon]

δ_{refr} : Correction de la réfraction [gon]

La correction de la réfraction est expliquée au chapitre sur la réfraction géodésique.

Différences de coordonnées topocentriques T+ (DY_T, DX_T, DZ_T)

Ce type d'observations correspond à une différence entre deux coordonnées qui sont dans le système topocentrique T+.

$$\Delta y_{ab}^{\text{topo}_{T+}} + \widehat{v}_{\Delta x_{ab}^{\text{topo}_{T+}}} = \widehat{y}_b^{\text{topo}_{T+}} - \widehat{y}_a^{\text{topo}_{T+}} \quad (5.30)$$

$$\Delta x_{ab}^{\text{topo}_{T+}} + \widehat{v}_{\Delta y_{ab}^{\text{topo}_{T+}}} = \widehat{x}_b^{\text{topo}_{T+}} - \widehat{x}_a^{\text{topo}_{T+}} \quad (5.31)$$

$$\Delta z_{ab}^{\text{topo}_{T+}} + \widehat{v}_{\Delta z_{ab}^{\text{topo}_{T+}}} = \widehat{z}_b^{\text{topo}_{T+}} - \widehat{z}_a^{\text{topo}_{T+}} \quad (5.32)$$

avec :

$\Delta y_{ab}^{\text{topo}_{T+}}$: Différence de coordonnées topocentrique T+ en y entre deux points A et B [m]

$\Delta x_{ab}^{\text{topo}_{T+}}$: Différence de coordonnées topocentrique T+ en x entre deux points A et B [m]

$\Delta z_{ab}^{\text{topo}_{T+}}$: Différence de coordonnées topocentrique T+ en z entre deux points A et B [m]

$\widehat{v}_{\Delta_{ab}^{\text{topo}_{T+}}}$: Erreur résiduelle [m]

Différences de coordonnées topocentriques à l'axe des tourillons de la station

($DY_{\text{Topo}}, DX_{\text{Topo}}, DZ_{\text{Topo}}$)

La différence de coordonnées topocentriques dans le système à l'axe des tourillons de la station permet de réaliser la différence entre le point visé et la station dans le système à l'axe des tourillons de cette dernière. Les coordonnées de la station étant nulles, la différence est directement la coordonnée du point visé dans le système à l'axe des tourillons de la station.

$$\Delta y_{ab}^{\text{topo}_a} + \widehat{v}_{\Delta y_{ab}^{\text{topo}_a}} = \widehat{y}_b^{\text{topo}_a} \quad (5.33)$$

$$\Delta x_{ab}^{\text{topo}_a} + \widehat{v}_{\Delta x_{ab}^{\text{topo}_a}} = \widehat{x}_b^{\text{topo}_a} \quad (5.34)$$

$$\Delta z_{ab}^{\text{topo}_a} + \widehat{v}_{\Delta z_{ab}^{\text{topo}_a}} = \widehat{z}_b^{\text{topo}_a} \quad (5.35)$$

avec :

$\Delta y_{ab}^{\text{topo}_a}$: Différences de coordonnées topocentriques à l'axe des tourillons de la station y entre deux points A et B [m]

$\Delta x_{ab}^{\text{topo}_a}$: Différences de coordonnées topocentriques à l'axe des tourillons de la station x entre deux points A et B [m]

$\Delta z_{ab}^{\text{topo}_a}$: Différences de coordonnées topocentriques à l'axe des tourillons de la station z entre deux points A et B [m]

$\widehat{v}_{\Delta_{ab}^{\text{topo}_a}}$: Erreur résiduelle [m]

Différences d'altitudes orthométriques (DH)

Le nivellement géométrique est un outil très précis qui permet de réaliser des différences d'altitudes très rigoureuses. Ces observations sont liées directement au champ de pesanteur [GUILLAUME, MULLER et CATTIN, 2022]. Contrairement à la 2D+1 où l'altimétrie est compensée de façon séparée, il est important de transformer la mesure dans le système topocentrique T+ pour l'utiliser de façon convenable.

Voici le développement de l'équation d'observations avec les différentes transformations implémentées dans TrinetPy avec le point de station A et le point visé B.

1. Passage des coordonnées T+ vers le système CH1903+ selon l'équation 5.10 :

$$\begin{pmatrix} x_A^{\text{CH1903+}} \\ y_A^{\text{CH1903+}} \\ z_A^{\text{CH1903+}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_{T+}^{\text{CH1903+}} \\ x_{T+}^{\text{CH1903+}} \\ z_{T+}^{\text{CH1903+}} \end{pmatrix} + \mathbf{R}_{\text{topo}_{T+}}^{\text{CH1903+}} \cdot \begin{pmatrix} y_A^{\text{topo}_{T+}} \\ x_A^{\text{topo}_{T+}} \\ z_A^{\text{topo}_{T+}} \end{pmatrix} \quad (5.36)$$

$$\begin{pmatrix} x_B^{\text{CH1903+}} \\ y_B^{\text{CH1903+}} \\ z_B^{\text{CH1903+}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{T+}^{\text{CH1903+}} \\ y_{T+}^{\text{CH1903+}} \\ z_{T+}^{\text{CH1903+}} \end{pmatrix} + \mathbf{R}_{\text{topo}_{T+}}^{\text{CH1903+}} \cdot \begin{pmatrix} y_B^{\text{topo}_{T+}} \\ x_B^{\text{topo}_{T+}} \\ z_B^{\text{topo}_{T+}} \end{pmatrix} \quad (5.37)$$

2. Passage des coordonnées CH1903+ vers des coordonnées ellipsoïdales :

$$\lambda_{A/B}^{\text{CH1903+}} = \arctan2(x_{A/B}^{\text{CH1903+}}, y_{A/B}^{\text{CH1903+}})$$

$$\varphi_{A/B}^{\text{CH1903+}} = \arctan2\left(z_{A/B}^{\text{CH1903+}}, \sqrt{x_{A/B}^{\text{CH1903+}^2} + y_{A/B}^{\text{CH1903+}^2}} \cdot \left(1 - \frac{R_N}{R_N + h} \cdot e^2\right)\right) \quad (5.38)$$

$$h_{A/B}^{\text{CH1903+}} = \frac{\sqrt{x_{A/B}^{\text{CH1903+}^2} + y_{A/B}^{\text{CH1903+}^2}}}{\cos \varphi} - R_N$$

avec :

$$R_N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi_{T+}^{\text{CH1903+}}}} : \text{Rayon de courbure de la section normale à l'ellipsoïde, calculé de manière itérative}$$

$$a = 6377397.155 : \text{Demi-grand axe de l'ellipsoïde de Bessel [m]}$$

$$e = 0.0816968312225269 : \text{excentricité de l'ellipsoïde de Bessel [-]}$$

3. Calcul de la différence d'altitudes orthométriques :

$$\boxed{\Delta_{H_{AB}} + \hat{v}_{\Delta_{H_{AB}}} = h_B^{\text{CH1903+}} - h_A^{\text{CH1903+}} - N_B + N_A} \quad (5.39)$$

avec :

$$\Delta_{H_{AB}} : \text{Différences d'altitudes orthométriques entre deux points A et B [m]}$$

$$\hat{v}_{\Delta_{H_{AB}}} : \text{Erreur résiduelle [m]}$$

$$N : \text{Cote du géoïde [m]}$$

Coordonnées GNSS (LY, LX, LZ)

En ce qui concerne le GNSS, les observations brutes sont prétraitées dans un logiciel approprié. Il n'y a donc pas de prétraitement dans TrinetPY. Cependant, les observations sont mesurées dans des sessions avec différents paramètres de compensation d'Helmert.

Les transformations sont appliquées dans l'ordre suivant [GUILLAUME, MULLER et CATTIN, 2022] :

1. Réduction des observations et des points concernés aux centres de gravité respectifs des sessions.
2. Rotation autour de l'axe x (\widehat{R}_x^j)
3. Rotation autour de l'axe y (\widehat{R}_y^j)
4. Mise à l'échelle de l'axe x et y (\widehat{E}_{yx}^j)
5. Rotation autour de l'axe z (\widehat{R}_z^j)
6. Mise à l'échelle de l'axe z (\widehat{E}_z^j)
7. Translation y, x et z ($\widehat{T}_y^j, \widehat{T}_x^j, \widehat{T}_z^j$)

Pour une observation sur le point i dans une session j :

$$\begin{aligned} y_i^j + \widehat{v}_{y_i}^j &= y_{cg}^{obs} + \widehat{E}_{yx}^j \cdot \cos \widehat{R}_z^j \cdot \cos \widehat{R}_x^j \cdot (\widehat{y}_i^{topo_{T+}} - y_{cg}^{coord}) + \\ &(\cos \widehat{R}_z^j \cdot \sin \widehat{R}_x^j \cdot \sin \widehat{R}_y^j - \widehat{E}_{yx}^j \cdot \sin \widehat{R}_z^j \cdot \cos \widehat{R}_y^j) \cdot (\widehat{x}_i^{topo_{T+}} - x_{cg}^{coord}) + \\ &(\widehat{E}_z^j \cdot \sin \widehat{R}_z^j \cdot \sin \widehat{R}_y^j + \cos \widehat{R}_z^j \cdot \sin \widehat{R}_x^j \cdot \sin \widehat{R}_y^j) \cdot (\widehat{z}_i^{topo_{T+}} - z_{cg}^{coord}) + \widehat{T}_y^j \end{aligned} \quad (5.40)$$

$$\begin{aligned} x_i^j + \widehat{v}_{x_i}^j &= x_{cg}^{obs} + \widehat{E}_{yx}^j \cdot \sin \widehat{R}_z^j \cdot \cos \widehat{R}_x^j \cdot (\widehat{y}_i^{topo_{T+}} - y_{cg}^{coord}) + \\ &(\widehat{E}_{yx}^j \cdot \cos \widehat{R}_z^j \cdot \cos \widehat{R}_y^j + \sin \widehat{R}_z^j \cdot \sin \widehat{R}_x^j \cdot \sin \widehat{R}_y^j) \cdot (\widehat{x}_i^{topo_{T+}} - x_{cg}^{coord}) \\ &(\sin \widehat{R}_z^j \cdot \sin \widehat{R}_x^j \cdot \cos \widehat{R}_y^j - \widehat{E}_z^j \cdot \cos \widehat{R}_z^j \cdot \sin \widehat{R}_y^j) \cdot (\widehat{z}_i^{topo_{T+}} - z_{cg}^{coord}) + \widehat{T}_x^j \end{aligned} \quad (5.41)$$

$$\begin{aligned} z_i^j + \widehat{v}_{z_i}^j &= z_{cg}^{obs} + \widehat{E}_{yx}^j \cdot \sin \widehat{R}_x^j \cdot (\widehat{y}_i^{topo_{T+}} - y_{cg}^{coord}) \\ &+ \widehat{E}_{yx}^j \cdot \cos \widehat{R}_z^j \cdot \sin \widehat{R}_y^j \cdot (\widehat{x}_i^{topo_{T+}} - x_{cg}^{coord}) + \\ &\widehat{E}_z^j \cdot \cos \widehat{R}_z^j \cdot \cos \widehat{R}_y^j \cdot (\widehat{z}_i^{topo_{T+}} - z_{cg}^{coord}) + \widehat{T}_z^j \end{aligned} \quad (5.42)$$

avec :

$$\begin{pmatrix} \widehat{y}_i^{topo_{T+}} \\ \widehat{x}_i^{topo_{T+}} \\ \widehat{z}_i^{topo_{T+}} \end{pmatrix} : \text{Coordonnées estimées dans le système topocentrique T+}$$

$$\begin{pmatrix} y_{cg}^{obs} \\ x_{cg}^{obs} \\ z_{cg}^{obs} \end{pmatrix} = \frac{\Sigma \mathbf{x}_i^j}{n_i} : \text{Coordonnées du centre de gravité de la station}$$

Coordonnées en observations (Libre ajusté)

Avec un point fixe i :

$$x_i + \widehat{v}_{x_i} = \widehat{x}_i^{topo_{T+}} \quad (5.43)$$

$$y_i + \widehat{v}_{y_i} = \widehat{y}_i^{topo_{T+}} \quad (5.44)$$

$$z_i + \widehat{v}_{z_i} = \widehat{z}_i^{topo_{T+}} \quad (5.45)$$

5.5 Modèle stochastique

D'une fois que le modèle fonctionnel est déterminé, il est nécessaire de poser le modèle stochastique. Pour autant que les variables soient indépendantes les unes des autres, la matrice de variance-covariance des observations est une matrice diagonale :

$$\mathbf{K}_{\text{II}} = \text{diag}(\sigma_{l_1}^2, \sigma_{l_2}^2, \sigma_{l_3}^2, \dots, \sigma_{l_n}^2) \quad (5.46)$$

avec :

\mathbf{K}_{II} : Matrice de variance-covariance des observations

$\sigma_{l_n}^2$: Variance de l'observation n

La variance des observations est calculée en appliquant la loi de la propagation des erreurs avec les paramètres suivants :

- Écart-type interne de l'observation
- Écart-type sur la hauteur de l'instrument
- Écart-type sur la hauteur du signal
- Écart-type de centrage

La relation entre l'écart-type (précision) et la variance est la suivante :

$$\text{variance} = \sigma^2 \quad (5.47)$$

5.5.1 Écart-type d'une distance 3D (DS)

$$\sigma_{\text{DS}_{ab}} = \sqrt{\sigma_{s_m}^2 + \left(\frac{z_b^{\text{topo}_a}}{s_{ab}}\right)^2 \cdot (\sigma_I^2 + \sigma_S^2) + \left(\frac{s_{ab}}{d_{ab}}\right)^2 \cdot (\sigma_{c_{st}}^2 + \sigma_{c_{vis}}^2)} \quad (5.48)$$

avec :

σ_{s_m} : Écart-type interne (mesure et ppm)[m]

d_{ab} : Distance projetée dans le plan [m]

σ_I : Écart-type de la hauteur d'instrument [m]

σ_S : Écart-type de la hauteur du signal [m]

$\sigma_{c_{st}}$: Écart-type de centrage de la station [m]

$\sigma_{c_{vis}}$: Écart-type de centrage du point visé [m]

5.5.2 Écart-type d'une direction horizontale (RI)

$$\sigma_{\text{RI}_{ab}} = \sqrt{\sigma_{s_m}^2 + \left(\frac{\rho_{\text{gon}}}{d_{ab}}\right)^2 \cdot (\sigma_{c_{st}}^2 + \sigma_{c_{vis}}^2)} \quad (5.49)$$

avec :

σ_{s_m} : Écart-type interne [gon]

ρ_{gon} : Facteur de conversion entre radian et gon [gon]

d_{ab} : Distance projetée dans le plan [m]

$\sigma_{c_{st}}$: Écart-type de centrage de la station [m]

$\sigma_{c_{vis}}$: Écart-type de centrage du point visé [m]

5.5.3 Écart-type d'un azimut astronomique (AZ)

$$\sigma_{AZ_{ab}} = \sqrt{\sigma_{s_m}^2 + \left(\frac{\rho_{gon}}{d_{ab}}\right)^2 \cdot (\sigma_{c_{st}}^2 + \sigma_{c_{vis}}^2)} \quad (5.50)$$

avec :

- σ_{s_m} : Écart-type interne [gon]
- ρ_{gon} : Facteur de conversion entre radian et gon [gon]
- d_{ab} : Distance projetée dans le plan [m]
- $\sigma_{c_{st}}$: Écart-type de centrage de la station [m]
- $\sigma_{c_{vis}}$: Écart-type de centrage du point visé [m]

5.5.4 Écart-type d'un angle zénithal (ZD)

$$\sigma_{ZD_{ab}} = \sqrt{\sigma_{s_m}^2 + \left(\frac{d_{ab}}{s_{ab}^2} \cdot \rho_{gon}\right)^2 \cdot (\sigma_I^2 + \sigma_S^2) + \left(\frac{z_b^{topo_a}}{s_{ab}^2} \cdot \rho_{gon}\right)^2 \cdot (\sigma_{c_{st}}^2 + \sigma_{c_{vis}}^2)} \quad (5.51)$$

avec :

- σ_{s_m} : Écart-type interne [gon]
- ρ_{gon} : Facteur de conversion entre radian et gon [gon]
- d_{ab} : Distance projetée dans le plan [m]
- s_{ab} : Distance 3D [m]
- σ_I : Écart-type de la hauteur d'instrument [m]
- σ_S : Écart-type de la hauteur du signal [m]
- $\sigma_{c_{st}}$: Écart-type de centrage de la station [m]
- $\sigma_{c_{vis}}$: Écart-type de centrage du point visé [m]

5.5.5 Écart-type des différences de coordonnées topocentriques T+ (DY_T, DX_T, DZ_T)

$$\sigma_{DY_{T_{ab}}} = \sqrt{\sigma_{s_m}^2 + \frac{\sigma_{c_{st}}^2 + \sigma_{c_{vis}}^2}{2}} \quad (5.52)$$

$$\sigma_{DX_{T_{ab}}} = \sqrt{\sigma_{s_m}^2 + \frac{\sigma_{c_{st}}^2 + \sigma_{c_{vis}}^2}{2}} \quad (5.53)$$

$$\sigma_{DZ_{T_{ab}}} = \sqrt{\sigma_{s_m}^2 + \frac{\sigma_I^2 + \sigma_S^2}{2}} \quad (5.54)$$

avec :

- σ_{s_m} : Écart-type interne [m]
- σ_I : Écart-type de la hauteur d'instrument [m]
- σ_S : Écart-type de la hauteur du signal [m]
- $\sigma_{c_{st}}$: Écart-type de centrage de la station [m]
- $\sigma_{c_{vis}}$: Écart-type de centrage du point visé [m]

5.5.6 Écart-type des différences de coordonnées topocentriques à l'axe des tourillons de la station (DY_{Topo} , DX_{Topo} , DZ_{Topo})

$$\sigma_{DY_{Topo_{ab}}} = \sqrt{\sigma_{s_m}^2 + \frac{\sigma_{c_{st}}^2 + \sigma_{c_{vis}}^2}{2}} \quad (5.55)$$

$$\sigma_{DX_{Topo_{ab}}} = \sqrt{\sigma_{s_m}^2 + \frac{\sigma_{c_{st}}^2 + \sigma_{c_{vis}}^2}{2}} \quad (5.56)$$

$$\sigma_{DZ_{Topo_{ab}}} = \sqrt{\sigma_{s_m}^2 + \frac{\sigma_I^2 + \sigma_S^2}{2}} \quad (5.57)$$

avec :

- σ_{s_m} : Écart-type interne [m]
- σ_I : Écart-type de la hauteur d'instrument [m]
- σ_S : Écart-type de la hauteur du signal [m]
- $\sigma_{c_{st}}$: Écart-type de centrage de la station [m]
- $\sigma_{c_{vis}}$: Écart-type de centrage du point visé [m]

5.5.7 Écart-type des différences d'altitudes orthométriques (DH)

$$\sigma_{DH_{ab}} = \sqrt{\sigma_{s_m}^2 + \frac{\sigma_I^2 + \sigma_S^2}{2}} \quad (5.58)$$

avec :

- σ_{s_m} : Écart-type interne [m]
- σ_I : Écart-type de la hauteur d'instrument [m]
- σ_S : Écart-type de la hauteur du signal [m]

5.5.8 Écart-type des coordonnées GNSS (LY, LX, LZ)

$$\sigma_{LY_{GNSS}} = \sqrt{\sigma_{s_m}^2 + \frac{\sigma_{c_{st}}^2}{2}} \quad (5.59)$$

$$\sigma_{LX_{GNSS}} = \sqrt{\sigma_{s_m}^2 + \frac{\sigma_{c_{st}}^2}{2}} \quad (5.60)$$

$$\sigma_{LZ_{GNSS}} = \sqrt{\sigma_{s_m}^2 + \sigma_I^2} \quad (5.61)$$

avec :

- σ_{s_m} : Écart-type interne [m]
- σ_I : Écart-type de la hauteur d'instrument [m]
- $\sigma_{c_{st}}$: Écart-type de centrage [m]

5.5.9 Écart-type des coordonnées comme observations (Libre-ajusté)

$$\sigma_y = \sigma_{s_m} \quad (5.62)$$

$$\sigma_x = \sigma_{s_m} \quad (5.63)$$

$$\sigma_z = \sigma_{s_m} \quad (5.64)$$

avec :

σ_{s_m} : Écart-type interne [m]

6 Estimation

6.1 Estimation des paramètres

L'ajustement défini dans ce logiciel est réalisé selon la méthode de compensation paramétrique avec conditions *Gauss-Markov*. Cela permet de fixer et libérer des paramètres aisément tout en conservant les mêmes dimensions des vecteurs des inconnues et des observations. Cela facilite donc la mise en place des différents types de calcul (libre, libre-ajusté, ...).

Les équations d'observations ne sont pas linéaires. Il faut donc les linéariser avant de pouvoir définir la matrice jacobienne (\mathbf{A}) qui permet d'estimer les inconnues. En raison de la complexité de certaines équations, il est difficile de linéariser ces dernières de façon analytique. De ce fait, la dérivée numérique est utilisée. Une très petite valeur de delta est fixée et le calcul s'effectue de la manière suivante pour chaque inconnue :

$$\frac{\partial f(y)}{\partial y} \simeq \frac{f(y + \Delta_y) - f(y)}{\Delta_y} \quad (6.1)$$

Ensuite, on peut remplir la matrice jacobienne avec le nombre de lignes qui correspond au nombre d'observations et le nombre de colonnes pour les inconnues. Le développement de cette matrice est le suivant :

$$\mathbf{A} = \begin{matrix} DS \\ RI \\ \vdots \\ LZ \end{matrix} \begin{pmatrix} \hat{y} & \hat{x} & \hat{z} & \dots & \hat{R}_z^j & \hat{E}_{yx}^j & \hat{E}_z^j \\ \frac{\partial f(y)_1}{\partial y} & \frac{\partial f(x)_1}{\partial x} & \frac{\partial f(z)_1}{\partial z} & \dots & \frac{\partial f(R_z^j)_1}{\partial R_z^j} & \frac{\partial f(E_{yx}^j)_1}{\partial E_{yx}^j} & \frac{\partial f(E_z^j)_1}{\partial E_z^j} \\ \frac{\partial f(y)_2}{\partial y} & \frac{\partial f(x)_2}{\partial x} & \frac{\partial f(z)_2}{\partial z} & \dots & \frac{\partial f(R_z^j)_2}{\partial R_z^j} & \frac{\partial f(E_{yx}^j)_2}{\partial E_{yx}^j} & \frac{\partial f(E_z^j)_2}{\partial E_z^j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f(y)_n}{\partial y} & \frac{\partial f(x)_n}{\partial x} & \frac{\partial f(z)_n}{\partial z} & \dots & \frac{\partial f(R_z^j)_n}{\partial R_z^j} & \frac{\partial f(E_{yx}^j)_n}{\partial E_{yx}^j} & \frac{\partial f(E_z^j)_n}{\partial E_z^j} \end{pmatrix} \quad (6.2)$$

Puis, les observations réduites sont calculées. Cela se résume à calculer l'observation via les inconnues approchées et de soustraire ce résultat aux vecteurs des observations.

$$\delta \mathbf{l} = \mathbf{l} - \mathbf{f}(\hat{y}, \hat{x}, \hat{z}, \hat{y}_{pf}, \hat{x}_{pf}, \hat{z}_{pf}, \hat{\omega}_0, \hat{\omega}_{\varphi_z}, \hat{\xi}, \hat{\eta}, \hat{c}, \hat{\lambda}, \hat{T}_x^j, \hat{T}_y^j, \hat{T}_z^j, \hat{R}_x^j, \hat{R}_y^j, \hat{R}_z^j, \hat{E}_{yx}^j, \hat{E}_z^j) \quad (6.3)$$

Avec :

\mathbf{l} : Vecteur des observations

\mathbf{f} : Vecteur calculé avec les inconnues approchées

Une condition est ajoutée pour chaque inconnue fixée. La matrice des conditions \mathbf{C} permet de fixer le datum géodésique. Elle est composée des conditions dans les lignes et des inconnues dans les colonnes. Lorsqu'une inconnue est fixée, cette dernière est incrémentée d'un 1 à la colonne et à la ligne correspondante. L'exemple ci-dessous montre un exemple avec les trois composantes d'un point fixe.

$$\mathbf{C} = \begin{matrix} \hat{y} \\ \hat{x} \\ \hat{z} \end{matrix} \begin{pmatrix} \hat{y} & \hat{x} & \hat{z} & \hat{\xi} & \hat{\eta} & \dots & \hat{E}_z^j \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \quad (6.4)$$

Par la suite, il est donc possible de poser les relations suivantes :

$$\begin{cases} \delta \mathbf{l} + \hat{\mathbf{v}} = \mathbf{A} \cdot \delta \hat{\mathbf{x}} \\ \mathbf{C} \cdot \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{t} = 0 \end{cases} \quad (6.5)$$

avec :

$\delta \mathbf{l}$: Vecteur des observations réduites
 $\hat{\mathbf{v}}$: Vecteur des erreurs résiduelles apparentes
 \mathbf{A} : Matrice jacobienne issus de la linéarisation des équations d'observations
 $\delta \hat{\mathbf{x}}$: Vecteur des accroissements des inconnues
 \mathbf{C} : Matrice des coefficients des conditions des inconnues issus de la linéarisation des équations de conditions
 \mathbf{t} : Vecteur des conditions réduites
 $\hat{\mathbf{x}}$: Vecteur des inconnues

Puis, la matrice carrée de variance-covariance des observations (\mathbf{K}_{II}) est définie. Cette matrice est construite avec l'écart-type des observations selon le chapitre 5.5 du modèle stochastique.

$$\mathbf{K}_{\text{II}} = \begin{pmatrix} \sigma_{DS_1}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{RI_1}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{ZD_1}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots \end{pmatrix} \quad (6.6)$$

Ensuite, il est possible de calculer la matrice des cofacteurs des observations (\mathbf{Q}_{II}) et la matrice des poids (\mathbf{P}) :

$$\mathbf{Q}_{\text{II}} = \frac{\mathbf{K}_{\text{II}}}{\sigma_0^2} \implies \mathbf{P} = \mathbf{Q}_{\text{II}}^{-1} \quad (6.7)$$

avec :

σ_0 : Écart-type de l'unité de poids à priori

Pour estimer de manière optimale les paramètres selon la méthode du maximum de vraisemblance, la méthode des moindres carrés est utilisée. Il s'agit de trouver un vecteur des inconnues qui minimise la fonction suivante [GUILLAUME, MULLER et CATTIN, 2022] :

$$\Phi = \hat{\mathbf{v}}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \hat{\mathbf{v}} + 2 \cdot \mathbf{k}^T \cdot (\mathbf{C} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{t}) \implies \textit{minimum} \quad (6.8)$$

avec :

Φ : Fonction de Lagrange
 \mathbf{Q}_{II} : Matrice des cofacteurs des observations
 σ_0 : Écart-type de l'unité de poids à priori
 \mathbf{k} : Vecteur des coefficients de Lagrange
 $\hat{\mathbf{v}}$: Vecteur des erreurs résiduelles apparentes

Puis, la solution du système est définie de la manière suivante :

$$\begin{pmatrix} \delta \hat{\mathbf{x}} \\ \mathbf{k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{A} & \mathbf{C}^T \\ \mathbf{C} & 0 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \delta \mathbf{l} \\ \mathbf{t} \end{pmatrix} \quad (6.9)$$

Pour minimiser l'équation ci-dessus, une itération est réalisée jusqu'à atteindre le seuil de convergence souhaité. Le vecteur des paramètres est mis à jour de la façon suivante :

$$\hat{\mathbf{x}}_{i+1} = \hat{\mathbf{x}}_i + \delta \hat{\mathbf{x}}_i \quad (6.10)$$

Le seuil de convergence est défini :

$$\max(\text{abs}(\delta \mathbf{x})) \leq \text{seuil de convergence} \quad (6.11)$$

La matrice \mathbf{N}^{-1} est la suivante :

$$\mathbf{N}^{-1} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{A} & \mathbf{C}^T \\ \mathbf{C} & 0 \end{pmatrix}^{-1} \quad (6.12)$$

Comme le démontre le cours de Prof. Dr. Sébastien Guillaume, pour une matrice carrée \mathbf{N} ($n \times n$), le rang de cette dernière peut être compris entre 0 et n .

Il y a deux cas particuliers intéressants :

1. $\text{rang}(\mathbf{N}) = n$: le déterminant est non-nul et la matrice est régulière
2. $\text{rang}(\mathbf{N}) < n$: le déterminant est nul et la matrice est singulière et possède un défaut de rang

Ainsi le défaut de datum (d) est calculé par :

$$d = n - \text{rang}(\mathbf{N}) \quad (6.13)$$

Si ce défaut n'est pas égal à zéro cela signifie qu'un problème survient dans la définition du datum géodésique. Cependant, il faut noter que le calcul de rang avec la librairie *numpy* de Python ne fournit pas un résultat cohérent. En effet, ce dernier semble ne pas être stable. Le défaut de datum est donc uniquement dans la partie théorique mais ne possède pas encore d'implémentation dans le code.

Sur la base de la matrice \mathbf{N}^{-1} , la matrice des cofacteurs des paramètres estimés est sortie. Elle intervient dans les indicateurs de précision et de fiabilité du calcul :

$$\mathbf{Q}_{\widehat{\mathbf{x}}\widehat{\mathbf{x}}} = \mathbf{N}^{-1}(\text{réduit [nombre d'inconnues x nombre d'inconnues]}) \quad (6.14)$$

6.2 Corrections des observations

6.2.1 Réfraction géodésique

Lorsque un point est visé avec un appareil de mesures de type théodolite ou station totale, le rayon de visé ne prend pas la trajectoire d'une droite mais suit une courbe entre la station et le point de visé [GUILLAUME (2), 2021].

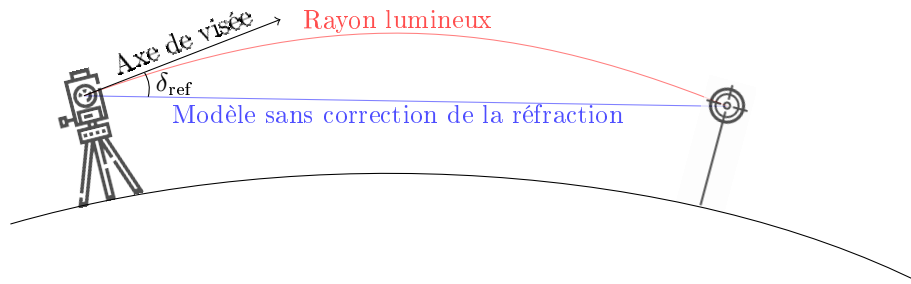


FIGURE 8 – Réfraction géodésique

En effet, la visée est assimilée à la propagation de la lumière. Le principe de Fermat s'applique donc à cette dernière. Il permet de dire que la lumière se propage d'un point A à un point B avec le temps de trajet le plus court possible. La propagation de la lumière dans un milieu homogène permet de dire que cette dernière parcourt le chemin en ligne droite car la vitesse tout au long de la trajectoire est constante. Cependant, lors de son trajet dans l'atmosphère, la visée n'est pas dans un milieu homogène et la vitesse de déplacement varie. [femto-physique, 2022].

C'est pour cette raison que la réfraction est prise en compte avec un modèle simplifié. En effet, l'application de cette correction est réalisée selon la méthode de Trinet+ [GUILLAUME, MULLER et CATTIN, 2022]. De la même manière que dans ce logiciel, les hypothèses suivantes sont émises :

1. Variation uniquement dans le plan vertical et application uniquement aux angles zénithaux.
2. Variation linéaire sur l'ensemble de la visée.
3. Le coefficient de réfraction et le rayon de la terre sont les seules variables.

De façon analogue à la formule implémentée dans le logiciel Trinet+ :

$$\delta_{\text{ref}} = \frac{k \cdot D_{hz}}{2 \cdot R} \cdot \rho_{\text{gon}} \quad (6.15)$$

avec :

δ_{ref} : Correction de la réfraction sur l'angle zénithal [gon]

k : Coefficient de réfraction [-]

D_{hz} : Distance horizontal entre les deux points [m]

R : Rayon moyen de la terre [m]

ρ_{gon} : Facteur de conversion entre radians et gons [-]

6.2.2 Déviation de la verticale

La déviation de la verticale est l'angle formé entre la verticale du lieu (normale au géoïde) et la normale à l'ellipsoïde. L'instrument et la cible sont verticalisés selon la verticale locale en direction de la pesanteur. Or, lors d'une transformation d'un système topocentrique à un autre, il est nécessaire de tenir compte de cet angle. Ce dernier est en deux dimensions et possède donc deux composantes (η, ξ) .

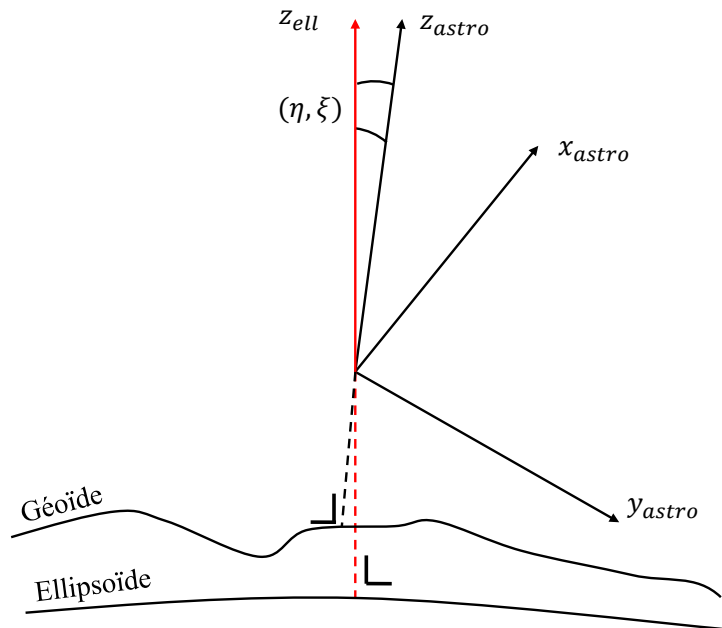


FIGURE 9 – Déviation de la verticale

La déviation de la verticale est appliquée dans le modèle fonctionnel lors du calcul des coordonnées dans le système propre à la station. Ceci permet d'appliquer de manière rigoureuse cette correction, de prendre en compte la courbure de la terre et d'appliquer le tout dans le bon système. Les composantes de la déviation de la verticale se trouvent donc directement dans la définition des matrices de transformation.

La déviation de la verticale peut être insérée de deux manières différentes :

1. Via une interpolation qui se base sur le modèle du géοide de swisstopo (CHGeo2004).
2. Manuellement avec les points.

Si la déviation n'est pas activée, la longitude ellipsoïdale correspond à longitude astronomique. Toutes les composantes sont nulles car la courbure de la terre est directement prise en compte dans l'équation d'observations.

6.3 Type de calcul

Cette partie décrit les modes de calcul. Ces derniers permettent d'obtenir des résultats multiples avec des utilités distinctes.

Pour s'assurer de traiter un réseau de manière convenable et d'éliminer toutes les éventuelles erreurs, il est important de réaliser la compensation libre, puis la libre-ajusté et finir par la compensation contraintes.

6.3.1 Calcul libre (Conditions d'Helmert)

Le calcul libre est une méthode qui permet de détecter les différentes tensions dans la géométrie interne du réseau. Cela offre la possibilité de repérer les fautes grossières dans les observations. Pour ce faire, le réseau doit être calculé de façon à totalement supprimer l'impact des points fixes sur le calcul.

Il est important de différencier l'intérêt d'un calcul libre pour une préanalyse et un ajustement :

- Préanalyse : **Capacité** du réseau à détecter une faute grossière sur les observations .
- Ajustement : **Détection** des fautes grossières sur les observations dans le réseau.

Afin de pouvoir contrôler la géométrie interne du réseau, il est nécessaire de supprimer l'impact des points fixes sur ce dernier. Cependant, si la totalité des points est libérée, le réseau n'est plus calé. Un défaut de datum existe ce qui ne permet pas la convergence d'un calcul d'ajustement.

C'est dans ce contexte qu'intervient la possibilité d'ajouter des conditions d'Helmert afin de réaliser le calage du réseau sur les coordonnées approchées des points. La première étape consiste à libérer tous les points supposés fixes. Ces derniers sont mis à jour durant l'estimation. Puis, il est possible de définir les points qui interviennent dans ses conditions. Lorsque tous les points sont sélectionnés, le calcul d'Helmert correspond à la minimisation de la trace de la matrice des cofacteurs des inconnues. Si seulement une partie des points est choisie, il s'agit alors de la minimisation de la trace partielle de cette matrice. L'Helmert permet de se caler au mieux sur les coordonnées approchées des conditions. Afin de ne pas déformer le réseau, il est important de le traiter comme un bloc.

Les paramètres et les conditions d'Helmert sont les suivants [GUILLAUME (1), 2021] :

Paramètre	Nom	Fonction des inconnues approchés
T_y	Translation en y	$\delta y_i = 0$
T_x	Translation en x	$\delta x_i = 0$
T_z	Translation en z	$\delta z_i = 0$
R_y	Rotation en y	$-\overset{\circ}{z}_i \cdot \delta x_i + \overset{\circ}{x}_i \cdot \delta z_i = 0$
R_x	Rotation en x	$-\overset{\circ}{z}_i \cdot \delta y_i + \overset{\circ}{y}_i \cdot \delta z_i = 0$
R_z	Rotation en z	$-\overset{\circ}{x}_i \cdot \delta y_i + \overset{\circ}{y}_i \cdot \delta x_i = 0$
λ_{dist}	Facteur d'échelle sur les distances	$\overset{\circ}{y}_i \cdot \delta y_i + \overset{\circ}{x}_i \cdot \delta x_i + \overset{\circ}{z}_i \cdot \delta z_i = 0$
$\lambda_{yx}^{\text{GNSS}}$	Facteur d'échelle sur les axe y et x (GNSS)	$\overset{\circ}{y}_i \cdot \delta y_i + \overset{\circ}{x}_i \cdot \delta x_i = 0$
λ_z^{GNSS}	Facteur d'échelle sur l'axe z (GNSS)	$\overset{\circ}{z}_i \cdot \delta z_i = 0$

TABLE 4 – Conditions d'Helmert

avec :

$\overset{\circ}{y}_i, \overset{\circ}{x}_i, \overset{\circ}{z}_i$: Coordonnées approchées du point
 $\delta \hat{y}_i, \delta \hat{x}_i, \delta \hat{z}_i$: Accroissement du point

Toutes les conditions ne doivent pas être appliquées dans tous les cas de figure. En effet, afin que le calcul soit réellement libre, les conditions suivantes doivent être activées :

- Réseau terrestre avec uniquement des distances : $T_y, T_x, T_z, R_y, R_x, R_z$
- Réseau terrestre avec uniquement des directions horizontales et des angles zénithaux : $T_y, T_x, T_z, R_z, \lambda_{\text{dist}}$
- Réseau GNSS avec les rotations bloquées sur au moins une session : $T_y, T_x, T_z, \lambda_{yx}^{\text{GNSS}}, \lambda_z^{\text{GNSS}}$

- Réseau terrestre et GNSS avec des distances, des directions horizontales et des angles et tous les paramètres estimés sur l'ensemble des sessions : T_y, T_x, T_z, R_z
- Réseau terrestre et GNSS avec des distances et une rotation "z" bloquées sur une session : T_y, T_x, T_z
- ...

Il existe de nombreuses autres configurations de réseau et les conditions doivent être activées en fonction des différents cas de figure.

Sur la base des paramètres, il est possible de définir la matrice \mathbf{G} pour tous les points du réseau. L'exemple ci-dessous démontre les composantes d'un point dans les lignes et les conditions dans les colonnes.

$$\mathbf{G} = \begin{matrix} \hat{y} \\ \hat{x} \\ \hat{z} \end{matrix} \begin{pmatrix} T_y & T_x & T_z & R_y & R_x & R_z & \lambda_{\text{dist}} & \lambda_{yx}^{\text{GNSS}} & \lambda_z^{\text{GNSS}} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -z_i & -x_i & y_i & y_i & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -z_i & 0 & y_i & x_i & x_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 & x_i & y_i & 0 & z_i & 0 & z_i \end{pmatrix} \quad (6.16)$$

Une matrice de sélection carrée selon le nombre de points est composée de 1 dans la diagonale pour chaque point en condition d'Helmert. Elle vient multiplier la matrice \mathbf{G} pour conserver uniquement les conditions activées.

Pour finir, cette matrice est concaténée avec la matrice des conditions du datum de l'équation 6.4.

Le modèle stochastique des observations peut être adapté pour être réaliste lors du calcul libre.

6.3.2 Calcul libre-ajusté

Le calcul libre-ajusté est une méthode qui met en évidence les fautes grossières sur les points fixes du réseau. Pour ce faire, tous les points sont libérés et considérés comme nouveaux. Puis, les coordonnées de ces derniers sont introduites comme observations. Cela permet de pouvoir obtenir les résultats des différents indicateurs et ainsi pouvoir détecter une éventuelle faute grossière sur les points de calages du réseau [GUILLAUME (1), 2021].

Il est primordial de différencier l'intérêt d'un calcul libre-ajusté pour une préanalyse et un ajustement :

- Préanalyse : **Capacité** du réseau à détecter une faute grossière sur les points fixes.
- Ajustement : **Détection** des fautes grossières sur les points fixes.

Les équations pour les conditions pour le calcul libre-ajusté sont décrites au chapitre équations d'observations. De plus, il faut ajouter les valeurs y_{pf}, x_{pf}, z_{pf} au vecteur des observations.

Le modèle stochastique des coordonnées des points comme observations peut être adapté pour être réaliste.

6.3.3 Calcul contraint

Le calcul contraint est la méthode qui consiste à fixer ou libérer les points selon le canevas. Le réseau est donc intégré dans les points fixes.

Il est important de différencier l'intérêt d'un calcul contraint pour une préanalyse et un ajustement :

- Préanalyse : **Capacité** du réseau à atteindre la précision et la fiabilité souhaitée.
- Ajustement : **Compensation** avec la surabondance maximale du réseau. En principe, le modèle stochastique ne doit plus être ajusté et les observations ne doivent plus être écartées.

Les observations ne doivent normalement plus être écartées et le modèle stochastique doit être réaliste.

7 Indicateurs de qualité

Afin de pouvoir correctement analyser un ajustement, il existe différents indicateurs qui permettent de donner des informations sur la précision et la fiabilité du réseau. Ces derniers sont décrits dans le chapitre suivant.

7.1 Niveau de confiance

Le niveau de confiance sert à calculer l'intervalle de confiance pour l'analyse d'un résultat.

Il est important de noter que l'écart-type d'une inconnue est un élément en une dimension, qu'une ellipse de confiance est en deux dimensions, alors que un ellipsoïde de confiance et la fiabilité externe sont des objets en trois dimensions. Le tableau ci-dessous indique le coefficient à multiplier en abscisse et le niveau de confiance en ordonné pour transformer les écart-types en intervalles de confiance [GUILLAUME (1), 2021].

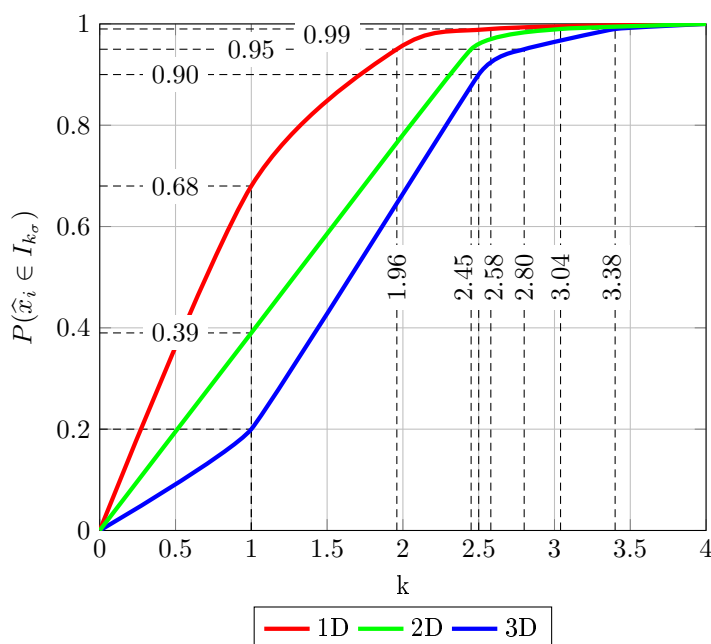


FIGURE 10 – Niveau de confiance en trois dimensions

Par exemple, en trois dimensions, la valeur vraie d'une inconnue vaut 5.000 mètres avec un écart-type de 5 mm à un sigma. Il est donc possible de dire que la valeur estimée à 20% de probabilité de se trouver dans l'intervalle de confiance [4.995m à 5.005m]. Lors d'un calcul à 95%, l'écart-type doit être multiplié par le coefficient de confiance. Ce dernier vaut 1.96 en une dimension et l'écart-type à 95% vaut $1.96 \cdot 5 = 9.8$ [mm]. Ainsi, il existe une probabilité de 95% que la valeur vraie se trouve dans l'intervalle [4.990m et 5.010m].

7.2 Indicateurs statistiques - Précision

7.2.1 Surabondance du réseau

Pour une compensation avec condition, la surabondance du réseau se calcule de la manière suivante :

$$r = n - u + c \quad (7.1)$$

avec :

- r : Surabondance
- n : Nombre d'observations
- u : Nombre d'inconnues
- c : Nombre de conditions

7.2.2 Écart-type

Écart-type de l'unité de poids a posteriori

L'écart-type de l'unité de poids a posteriori est défini de la manière suivante :

$$s_0 = \sqrt{\frac{\widehat{\mathbf{v}}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \widehat{\mathbf{v}}}{n - u + c}} \quad (7.2)$$

avec :

- s_0 : Écart-type de l'unité de poids a posteriori
- n : Nombre d'observations
- u : Nombre d'inconnues
- c : Nombre de conditions
- \mathbf{P} : Matrice des poids
- $\widehat{\mathbf{v}}$: Vecteur des résidus des observations

Écart-type d'un groupe d'observations

L'écart-type d'un groupe d'observations a posteriori est défini de la manière suivante :

$$s_k = \sqrt{\frac{\widehat{\mathbf{v}}_i^T \cdot \mathbf{P}_i \cdot \widehat{\mathbf{v}}_i}{\sum z_i}} \quad (7.3)$$

avec :

- s_k : Écart-type d'un groupe d'observations
- z_i : Fiabilité locale du groupe
- \mathbf{P}_i : Matrice des poids du groupe
- $\widehat{\mathbf{v}}_i$: Vecteur des résidus des observations du groupe

L'écart-type d'un groupe d'observations a priori est défini de la manière suivante :

$$\sigma_k = \frac{\sum \sigma_i}{n_k} \quad (7.4)$$

avec :

- σ_k : Écart-type d'un groupe d'observations a priori
- n_k : Nombre d'observations dans le groupe
- σ_i : Écart-type de l'observation du groupe

Écart-type d'une inconnue

L'écart-type pour une inconnue est la précision de la valeur estimée. Elle est définie de la manière suivante :

Pour une préanalyse :

$$\sigma_{\widehat{x}_i} = \sigma_0 \cdot \sqrt{q_{\widehat{x}_i \widehat{x}_i}} \quad (7.5)$$

avec :

- $\sigma_{\widehat{x}_i}$: Écart-type d'une inconnue a priori
- $q_{\widehat{x}_i \widehat{x}_i}$: Composante de la matrice des cofacteurs des inconnues $\mathbf{Q}_{\widehat{\mathbf{x}}\widehat{\mathbf{x}}}$
- σ_0 : Écart-type de l'unité de poids a priori

Pour une compensation :

$$s_{\hat{x}_i} = s_0 \cdot \sqrt{q_{\hat{x}_i \hat{x}_i}} \quad (7.6)$$

avec :

- $s_{\hat{x}_i}$: Écart-type d'une inconnue a posteriori
- $q_{\hat{x}_i \hat{x}_i}$: Composante de la matrice des cofacteurs des inconnues $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}}$
- s_0 : Écart-type de l'unité de poids a posteriori

7.2.3 Test global

Le test global permet de tester si les hypothèses effectuées avant le calcul correspondent au résultat après l'ajustement.

$$Q^2 = \frac{s_0^2}{\sigma_0^2} \quad (7.7)$$

avec :

- Q : Quotient
- s_0 : Écart-type de l'unité de poids a posteriori
- σ_0 : Écart-type de l'unité de poids a priori

Ainsi, le résultat doit tendre vers 1 pour être validé.

Si le test est rejeté, le problème peut provenir de plusieurs sources. Il est nécessaire tout d'abord de supprimer toutes les fautes grossières. Puis, il faut contrôler si le modèle fonctionnel est correct (ex. constante d'addition à estimer).

Si tous ces problèmes sont réglés et que le test ne passe toujours pas. Il s'agit certainement d'un problème dans le modèle stochastique :

- $Q^2 < 1$: Le modèle stochastique est pessimiste. L'écart-type a priori est trop élevé par rapport à l'écart-type a posteriori.
- $Q^2 > 1$: Le modèle stochastique est optimiste. L'écart-type a priori est trop faible par rapport à l'écart-type a posteriori.

En général, on admet que le modèle stochastique est réaliste lorsque le quotient est entre 0.8 et 1.2.

7.2.4 Erreur résiduelle et erreur résiduelle normée (WI)

Les erreurs résiduelles sur les observations sont des indicateurs pour juger la qualité d'une mesure.

$$\hat{\mathbf{v}} = \mathbf{A} \cdot \delta \hat{\mathbf{x}} - \delta \mathbf{l} \quad (7.8)$$

avec :

- $\hat{\mathbf{v}}$: Erreur résiduelle
- \mathbf{A} : Matrice jacobienne issus de la linéarisation des équations d'observations
- $\delta \hat{\mathbf{x}}$: Vecteur des accroissements des inconnues d'observations
- $\delta \mathbf{l}$: Vecteur des observations réduites

Cependant, afin de pouvoir analyser correctement le réel impact d'une observation sur le calcul, il est nécessaire de normer ces résidus afin de les comparer selon une échelle uniformisée qui ne dépend plus de la nature de l'observation. C'est pour cette raison, que l'erreur résiduelle normée est l'indicateur le plus utilisé pour l'analyse d'un ajustement.

$$w_i = \frac{\hat{v}_i}{\sigma_0 \cdot \sqrt{q_{\hat{v}_i \hat{v}_i}}} \quad (7.9)$$

avec :

- w_i : Erreur résiduelle normée
- $q_{\hat{v}_i \hat{v}_i}$: Composante de la matrice des cofacteurs des erreurs résiduelles $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{v}}\hat{\mathbf{v}}}$
- σ_0 : Écart-type de l'unité de poids a priori

Pour analyser les résidus normés, ce travail de master et le cours d'estimation du Prof. Dr. Sébastien Guillaume, conseillent de fixer $\alpha = 1\%$ et $\beta = 5\%$. Ceci donne la valeur de δ_0 à 4.22. En ce qui concerne le w_i max, la valeur vaut donc 2,58 [GUILLAUME (1), 2021].

7.2.5 Ellipsoïde d'erreur moyenne et de confiance

L'ellipsoïde d'erreur moyenne est la région dans laquelle la probabilité de trouver la valeur vraie du point recherché est de 20%. Un ellipsoïde est calculé pour tous les points. Il est donc logique que les points avec toutes les composantes fixes possèdent un ellipsoïde nul.

L'ellipsoïde d'erreur moyenne peut être transformé en ellipsoïde de confiance en le multipliant par le coefficient qui correspond au niveau de confiance 3D souhaité. Ce dernier peut être trouvé grâce à la figure 7.1. Le principe est de calculer la matrice de variances-covariances des inconnues pour chaque point :

— Pour une préanalyse :

$$\mathbf{k}_{\hat{\mathbf{x}}_i \hat{\mathbf{x}}_{i \text{ priori}}} = \sigma_0^2 \cdot \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_i \hat{\mathbf{x}}_i} \quad (7.10)$$

avec :

σ_0 : Écart-type de l'unité de poids a priori

$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_i \hat{\mathbf{x}}_i}$: Sous-matrice des cofacteurs des inconnues $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}} \hat{\mathbf{x}}}$

— Pour une compensation :

$$\mathbf{k}_{\hat{\mathbf{x}}_i \hat{\mathbf{x}}_{i \text{ posteriori}}} = s_0^2 \cdot \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_i \hat{\mathbf{x}}_i} \quad (7.11)$$

avec :

s_0 : Écart-type de l'unité de poids a posteriori

$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_i \hat{\mathbf{x}}_i}$: Sousmatrice des cofacteurs des inconnues $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}} \hat{\mathbf{x}}}$

Les valeurs propres et les vecteurs propres de chaque point sont calculés sur la base des matrices ci-dessus. Pour chaque ellipsoïde, la matrice de variances-covariances des inconnues pour chaque point se décompose de cette manière [GUILLAUME, MULLER et CATTIN, 2022] :

$$\mathbf{k}_{\hat{\mathbf{x}}_i \hat{\mathbf{x}}_i} = \begin{pmatrix} A_y & B_y & C_y \\ A_x & B_x & C_x \\ A_z & B_z & C_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \|A\|^2 & 0 & 0 \\ 0 & \|B\|^2 & 0 \\ 0 & 0 & \|C\|^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_y & B_y & C_y \\ A_x & B_x & C_x \\ A_z & B_z & C_z \end{pmatrix}^T \quad (7.12)$$

Cela produit les trois vecteurs de l'ellipsoïde d'erreur. Les composantes de ces derniers permettent de calculer l'angle zénithal (ζ) et l'azimut (φ) de chaque vecteur.

$$\zeta = \arctan 2(\sqrt{A_y^2 + A_x^2}, A_z^2) \quad (7.13)$$

$$\varphi = \arctan 2(A_y^2, A_x^2) \quad (7.14)$$

Pour un ellipsoïde, les éléments suivants sont donnés :

- La norme de l'axe principal.
- La norme de l'axe secondaire.
- La norme de l'axe tertiaire.
- L'angle zénithal de l'axe principal.
- L'azimut de l'axe principal.
- L'angle zénithal de l'axe secondaire.
- L'azimut de l'axe secondaire.

7.3 Indicateurs statistiques - Fiabilité

7.3.1 Indicateur de fiabilité locale (z_i)

L'indicateur de fiabilité locale permet de déterminer le niveau de contrôle d'une observation par le réseau. Cette valeur dépend directement de la géométrie interne du réseau d'observations ainsi que du poids de cette dernière (écart-type a priori).

$$z_i = \frac{q_{\hat{v}_i \hat{v}_i}}{q_{l_i l_i}} \quad (7.15)$$

avec :

z_i : Indicateur de fiabilité locale

$q_{\hat{v}_i \hat{v}_i}$: Composante de la matrice des cofacteurs des erreurs résiduelles $\mathbf{Q}_{\hat{v}\hat{v}}$

$q_{l_i l_i}$: Composante de la matrice des cofacteurs des observations \mathbf{Q}_{ll}

La somme de la totalité des z_i retombe toujours sur la surabondance totale du réseau.

Cette valeur, sans dimension, est comprise entre 0 et 1. Les différents résultats de cet indicateur permettent de déduire les éléments suivants :

- $z_i = 1$: L'observation est parfaitement contrôlée.
- $z_i = 0.5$: L'observation est contrôlée à 50%.
- $z_i = 0.25$: L'observation est contrôlée à 25%. Il est possible de dire qu'une observation est suffisamment contrôlée avec ce résultat.
- $z_i = 0$: L'observation n'est pas du tout contrôlée.

7.3.2 Grandeur probable d'une faute détectable (GI)

Lorsque le w_i dépasse le seuil requis, il est important de se questionner sur la faute probable de cette mesure. C'est pour cela que cet indicateur permet une analyse plus en profondeur de l'observation.

$$g_i = \frac{-\hat{v}_i}{z_i} \quad (7.16)$$

avec :

g_i : Grandeur probable d'une faute détectable

\hat{v}_i : Erreur résiduelle sur l'observation.

z_i : Fiabilité locale de l'observation.

7.3.3 Fiabilité interne

La fiabilité interne permet de donner une estimation de la plus grande faute non-détectable. Pour une préanalyse :

$$\nabla_{l_i} = \frac{\sigma_0 \cdot \sqrt{q_{\hat{v}_i \hat{v}_i}}}{z_i} \cdot \delta_0 \quad (7.17)$$

avec :

∇_{l_i} : Fiabilité interne a priori

$q_{\hat{v}_i \hat{v}_i}$: Composante de la matrice des cofacteurs des erreurs résiduelles $\mathbf{Q}_{\hat{v}\hat{v}}$.

z_i : Fiabilité locale de l'observation.

σ_0 : Écart-type de l'unité de poids a priori.

δ_0 : Delta du centre de distribution.

Pour une compensation :

$$\nabla_{l_i} = \frac{s_0 \cdot \sqrt{\hat{v}_{v_i \hat{v}_i}}}{z_i} \cdot \delta_0 \quad (7.18)$$

avec :

∇_{l_i} : Fiabilité interne a posteriori

$q_{\hat{v}_i \hat{v}_i}$: Composante de la matrice des cofacteurs des erreurs résiduelles $\mathbf{Q}_{\hat{v}\hat{v}}$.

z_i : Fiabilité locale de l'observation.

s_0 : Écart-type de l'unité de poids a posteriori

δ_0 : Delta du centre de distribution.

7.3.4 Fiabilité externe

La fiabilité externe permet d'analyser l'incidence des plus grandes fautes non-détectables des observations sur les coordonnées estimées des points.

Le principe est de calculer pour chaque observation :

$$\nabla x_i = \mathbf{Q}_{\hat{x}\hat{x}} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{Q}_{\Pi}^{-1} \cdot \nabla l_i \quad (7.19)$$

Le vecteur de fiabilité externe pour une observation est le suivant :

$$\nabla x_i = \begin{pmatrix} \nabla y_1 \\ \nabla x_1 \\ \nabla z_1 \\ \dots \\ \nabla y_n \\ \nabla x_n \\ \nabla z_n \end{pmatrix} \quad (7.20)$$

Puis, la norme de chaque vecteur est calculée pour chaque observation et chaque point.

$$N = \sqrt{\nabla y_n^2 + \nabla x_n^2 + \nabla z_n^2} \quad (7.21)$$

Ensuite, le plus grand vecteur de chaque point est conservé. L'azimut (φ) de ce vecteur et l'angle zénithal (ζ) est calculé. L'observation à risque est celle qui correspond au plus grand vecteur.

$$\zeta = \arctan2(\sqrt{\nabla y_n^2 + \nabla x_n^2}, \nabla z_n^2) \quad (7.22)$$

$$\varphi = \arctan2(\nabla y_n^2, \nabla x_n^2) \quad (7.23)$$

Pour un ajustement 3D, les éléments suivants sont donnés :

- Le plus grand vecteur de fiabilité externe.
- L'azimut du plus grand vecteur.
- L'angle zénithal du plus grand vecteur.

7.4 Résumé des indicateurs

Indicateur	Symbole	Préanalyse	Compensation	Descriptions
Écart-type de l'unité de poids a posteriori	s_0		X	Écart-type de l'unité de poids a posteriori.
Écart-type de l'unité de poids a priori	σ_0	X	X	Écart-type de l'unité de poids a priori.
Écart-type d'un groupe d'observations a posteriori	s_k		X	Écart-type pour chaque groupe d'observations a posteriori.
Écart-type d'un groupe d'observations a priori	σ_k	X	X	Écart-type pour chaque groupe d'observations a priori.
Écart-type d'une inconnue a posteriori	$s_{\hat{x}_i}$		X	Écart-type sur les inconnues a posteriori.
Écart-type d'une inconnue a priori	$\sigma_{\hat{x}_i}$	X	X	Écart-type sur les inconnues a priori.
Quotient	Q		X	Comparaison entre l'hypothèse avant calcul et le résultat après calcul.
Erreur résiduelle	\hat{v}_i		X	Erreur résiduelle sur une observation.
Erreur résiduelle normée	w_i		X	Erreur résiduelle normée par son poids sur une observation.
Ellipsoïde d'erreur moyenne	-	X	X	L'ellipsoïde d'erreur moyenne est la région dans laquelle la probabilité de trouver la valeur vraie du point recherché est de 20%.
Indicateur de fiabilité locale	z_i	X	X	Niveau de contrôle d'une observation.
Grandeur probable d'une faute détectable	g_i		X	Grandeur probable d'une faute sur une observation.
Fiabilité interne	∇l_i	X	X	Plus grande faute non-détectable.
Fiabilité externe	∇x_i	X	X	Incidence des plus grandes fautes non-détectables sur les observations.

TABLE 5 – Résumé des indicateurs

Troisième partie

Développement du logiciel

8 Descriptions des outils

Ce chapitre donne l'occasion de décrire brièvement les outils mis en place dans ce travail.

8.1 Descriptions

Le graphique ci-dessous illustre les différents outils du travail de master.

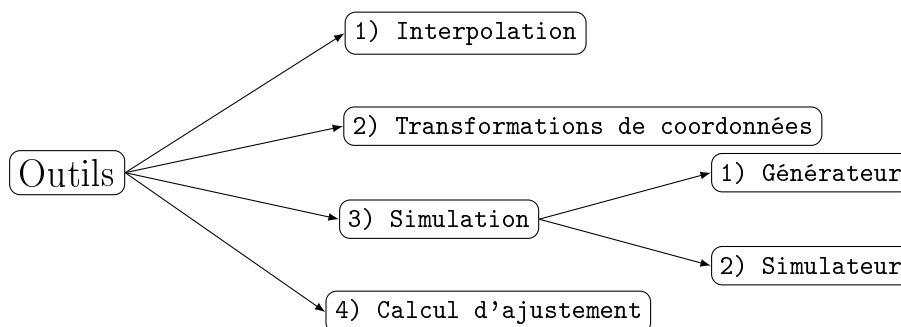


FIGURE 11 – Outils implémenté dans le travail de Master

8.1.1 Interpolation

Sur la base des coordonnées en MN95 et altitudes sur géoïde, cet outil interpole les composantes de la déviation de la verticale et la cote du géoïde pour tous les points. L'interpolation est réalisée sur la base d'une grille régulière des valeurs de la déviation de la verticale de swisstopo. Cette dernière est effectuée par défaut selon la méthode linéaire.

Cet outil doit être utilisé en premier si la déviation de la verticale et la cote du géoïde ne sont pas connues.

8.1.2 Transformations des coordonnées

Le deuxième outil permet une transformation des coordonnées d'un système d'origine à un système de destination.

Cet outil doit être utilisé après l'interpolation ou directement si la déviation de la verticale est connue car il permet de transformer les coordonnées dans un système. Il est également utilisé à la fin pour retransformer les coordonnées dans les systèmes finaux. Cet outil est un transformateur indépendant de la compensation et permet des transformations entre plusieurs systèmes.

8.1.3 Simulation

Afin de pouvoir tester un logiciel et le pousser dans ses retranchements, il est capital de créer un outil qui permet de simuler tous les cas de figure. C'est dans ce cadre qu'un simulateur d'observations est créé.

A noter la distinction des deux termes suivants :

Simulation / Simulateur : Sur la base d'un canevas, d'un fichier de points et d'un fichier d'options, il met à jour les fichiers avec les observations simulées selon le modèle stochastique.

Génération / Générateur : Sur la base d'un dictionnaire contenant le nombre de station et de sessions ainsi que le nombre de points mesurés, il génère aléatoirement un canevas, un fichier de points et un fichier d'options afin de réaliser une simulation avec des fichiers générés aléatoirement.

8.1.4 Calcul d'ajustement

Le logiciel de compensation est le cœur de ce travail de master. Il permet de compenser des réseaux d'observations terrestres et GNSS. Tous les autres outils de ce travail sont conçus pour faciliter l'utilisation

de ce dernier.

Cet outil doit être utilisé avec des coordonnées T+. Il est donc nécessaire de passer au préalable par la transformation de coordonnées si ces dernières ne sont pas déjà dans le système T+.

8.2 Structure des librairies

Le tableau ci-dessous décrit les différentes librairies et leur utilité. Cela permet de comprendre la façon dont fonctionne ce travail et de faciliter la recherche en cas d'erreur ou d'amélioration du logiciel. Cependant, le fonctionnement précis des librairies est décrit dans la suite du travail.

Librairie et modules	Description	Utilisations
CompensationUtils	Calcul de l'ajustement	Calcul d'ajustement
ConditionsFichierUtils	Module qui contrôle les fichiers avant l'import et qui permet de gérer la plupart des erreurs	Interpolation, transformations de coordonnées, simulation et calcul d'ajustement
ConversionUtils	Module pour la conversion des fichiers csv en xml	Import csv
GenerateurUtils	Module pour générer automatiquement des réseaux pour le simulateur	Simulation
InterpolationUtils	Module pour interpoler les valeurs de la déviation de la verticale et de la cote du géoïde	Interpolation
MatriceUtils	Module de création des vecteurs des inconnues et des observations	Simulation et calcul d'ajustement
ObservationsUtils	Module qui contient les différentes équations d'observations et le calcul de l'écart-type	Simulation et calcul d'ajustement
PlotUtils	Module pour la création des plots du résultats	Simulation et transformations de coordonnées
SimUtils	Module pour la réalisation de la simulation des observations	Simulation
TransformUtils	Module qui contient les fonctions pour passer d'un système à un autre	Transformations de coordonnées et calcul d'ajustement
XMLUtils	Module qui gère l'import, le contrôle de la correspondance au modèle, la mise en conformité et l'export des fichiers XML	Interpolation, transformations de coordonnées, simulation et calcul d'ajustement

TABLE 6 – Structures des librairies

9 Description des chaines de traitement

Ce chapitre décrit le fonctionnement des traitements pour tous les outils.

9.1 Traitement de l'import des fichiers

Cette chaine de traitement illustre l'import des données. Cette chaine est utilisée pour chaque outil.



FIGURE 12 – Chaîne de traitement pour l'import des données

1. La conformité des fichiers au modèle de données est contrôlée. Cela permet de s'assurer du bon déroulement de la suite du traitement.
2. Les fichiers sont importés et transformés en dictionnaire.
3. Lorsqu'une borne est unique, un dictionnaire est créé alors que si la borne apparaît plusieurs fois, une liste de dictionnaire est créé. Il est important, pour permettre un traitement systématique des données, de former des listes dans tous les cas de figure. C'est pour cette raison qu'une mise en conformité du dictionnaire est nécessaire.
4. Les dictionnaires sont parsés pour détecter les éventuelles erreurs. La liste des erreurs se trouvent en annexe (annexe n° 6).
5. Une liste avec les dictionnaires est retournée. Elle est utilisée dans la suite des différents traitements.

9.2 Traitement pour l'interpolation

Les fichiers en entrée pour l'interpolation sont énumérés dans le tableau ci-dessous. Les modèles de ces fichiers sont détaillés dans le chapitre sur les modèles de données.

Nom	Description
Options.xml	Fichier qui contient les options du calcul dont le topocentre
Points.xml	Fichier qui contient les points dans le système PK ou PE
CHGEO2004.prn	Grille régulière de swsstopo avec les composantes de la déviation de la verticale

TABLE 7 – Fichiers en entrée pour l'interpolation

Afin d'être totalement transparent avec l'utilisateur, un schéma explique sommairement la façon dont fonctionne le script pour l'interpolation des composantes de la déviation de la verticale.

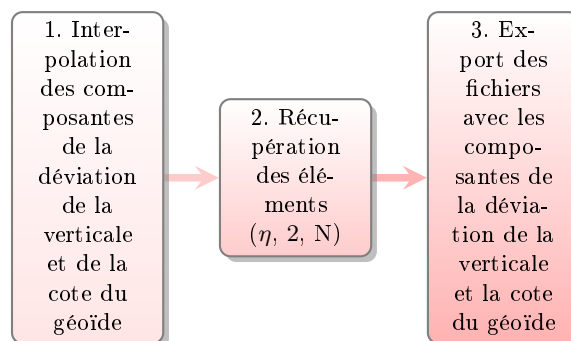


FIGURE 13 – Chaîne de traitement pour l'interpolation

9.3 Traitement de la transformation de coordonnées

Les fichiers en entrée pour la transformation sont énumérés dans le tableau ci-dessous. Les modèles de ces fichiers sont détaillés dans le chapitre sur les modèles de données.

Nom	Description
Options.xml	Fichier qui contient les options du calcul dont le topocentre
PipelinesTransformationsCoordonnees.xml	Fichier qui contient les pipelines de transformations des coordonnées
Points.xml	Fichier qui contient les points dans le système d'origine
ParamsUtilisateurs.py	Script avec des paramètres qui ne doivent généralement pas être modifié par l'utilisateur

TABLE 8 – Fichiers en entrée pour la transformation de coordonnées

Le transformateur effectue deux principales tâches. Ces deux tâches sont les suivantes :

- **Topocentre vers CH1903+** : Cette tâche consiste à transformer les coordonnées du topocentre dans le fichier options.xml vers un système CH1903+. Pour ce faire, le transformateur contrôle si le code des coordonnées est CH1903+. Si ce dernier est un autre code, il cherche dans le fichier pipelinesTransformationsCoordonnees.xml si une pipeline permet de passer du code jusqu'au système CH1903+. Si ce n'est pas le cas un message d'erreur est imprimé. Dans le cas où une pipeline est trouvée, le script utilise le fichier *TransformUtils.py* qui contient les différentes fonctions pour transformer les coordonnées.
- **Points d'un système d'origine à un système de destination** : Cette tâche consiste à récupérer le système de destination choisi dans le fichier *ParamsUtilisateurs.py* et de transformer les points dans le fichier *points.xml* vers ce système. Pour ce faire, le transformateur cherche dans le fichier pipelinesTransformationsCoordonnees.xml si une transformation permet d'effectuer le lien entre les deux systèmes. Si cette dernière n'existe pas, il retourne un message qui indique la transformation manquante. Dans le deuxième cas, il transforme à l'aide du fichier *TransformUtils.py* les coordonnées vers le système de destination. Cette tâche permet d'effectuer une transformation de coordonnées indépendante des autres outils du programme (ex. Reframe).

Afin d'être totalement transparent avec l'utilisateur, un schéma explique sommairement la façon dont fonctionne le script pour la transformation des coordonnées. Le traitement est le même pour les deux tâches expliquées précédemment.

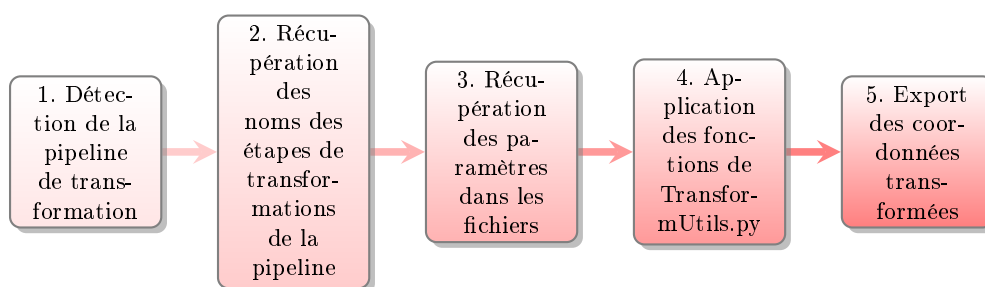


FIGURE 14 – Chaîne de traitement pour la transformation de coordonnées

1. La pipeline est détectée grâce au code du système d'origine dans le fichier points ou options. Le nom du système de destination est récupéré dans le fichier *ParametresUtilisateurs.py*. Puis, la bonne pipeline est sélectionnée.
2. La liste des étapes de transformations de cette pipeline est sortie.
3. Les arguments sont récupérés du fichier options ou points (exemple : les coordonnées des points).
4. La liste des fonctions est ensuite parsée et ces dernières sont appliquées aux coordonnées les unes après les autres.
5. Les coordonnées finales sont ajoutées au dictionnaire et ce dernier est transformé en fichier XML.

9.3.1 Fonctions définies dans les transformateurs de coordonnées

Ce chapitre décrit les différentes fonctions implémentées dans le fichier de transformation *TransformUtils.py*. Il est important de comprendre que les différentes fonctions correspondent aux transformations utilisées dans le fichier *pipelinesTransformationsCoordonnees.xml*.

Voici la liste et les explications de chaque fonction :

Nom de la fonction	Définition
EN2ell	Coordonnées dans le plan de projection vers ellipsoïdales
ell2EN	Coordonnées ellipsoïdales vers le plan de projection
ell2Cart	Coordonnées ellipsoïdales vers cartésiennes
cart2Ell	Coordonnées cartésiennes vers ellipsoïdales
TRS2Topo	Coordonnées TRS vers topocentriques
Topo2TRS	Coordonnées topocentriques vers TRS

TABLE 9 – Fonction pour la transformation de coordonnées

Il est possible de rajouter d'éventuelles fonctions dans ce script afin de créer de nouvelles pipelines.

9.4 Traitement de la simulation

Les fichiers en entrée pour la simulation sont énumérés dans le tableau ci-dessous. Les modèles de ces fichiers sont détaillés dans le chapitre sur les modèles de données.

Nom	Description
Options.xml	Fichier qui contient les options du calcul
Canevas.xml	Fichier qui contient le canevas des mesures prévues (Sans les observations)
Points.xml	Fichier qui contient les points dans le système T+
ParamsUtilisateurs.py	Script avec des paramètres qui ne doivent généralement pas être modifié par l'utilisateur

TABLE 10 – Fichiers en entrée pour la simulation

Afin d'être totalement transparent avec l'utilisateur, un schéma explique sommairement la façon dont fonctionne le script pour la simulation.

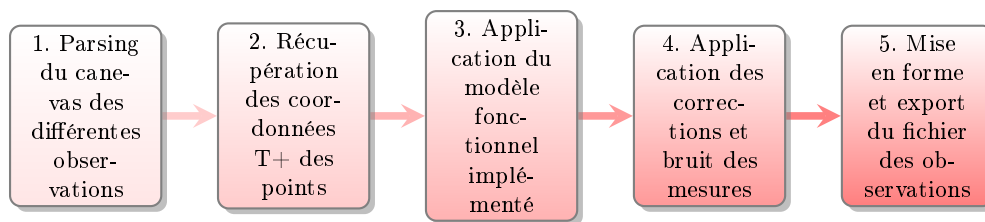


FIGURE 15 – Chaîne de traitement pour la simulation

1. Le canevas pour les observations terrestres et GNSS est parsé pour récupérer les différentes informations et le schéma de mesures.
2. Les coordonnées T+ des différents points sont récupérées dans le fichier point.
3. Les observations vraies sont simulées selon le modèle fonctionnel sur la base des coordonnées des points.
4. Les différentes corrections sont appliquées en fonction du choix défini dans le fichier des options. Puis, si l'option est activée, un bruit de mesure est ajouté selon une distribution Gaussienne (normale). Le centre de distribution est la valeur vraie et l'écart-type est déterminé selon la propagation des erreurs définie dans le modèle stochastique sur la base des informations du canevas.
5. La totalité des observations est ajoutée au dictionnaire. Ce dernier est mis en forme et exporté en fichier XML conformément au modèle de données.

9.5 Traitement du calcul d'ajustement

Les fichiers en entrée pour le calcul d'ajustement sont énumérés dans le tableau ci-dessous. Les modèles de ces fichiers sont détaillés dans le chapitre sur les modèles de données.

Nom	Description
Options.xml	Fichier qui contient les options du calcul
Observations.xml	Fichier qui contient les observations
Points.xml	Fichier qui contient les points dans le système T+
ParamsUtilisateurs.py	Script avec des paramètres qui ne doivent généralement pas être modifié par l'utilisateur

TABLE 11 – Fichiers en entrée pour le calcul d'ajustement

Afin d'être totalement transparent avec l'utilisateur, un schéma explique sommairement la façon dont fonctionne le script pour la simulation.

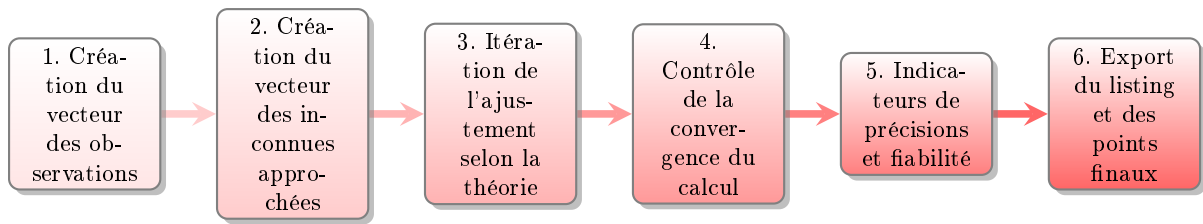


FIGURE 16 – Chaîne de traitement pour le calcul de l'ajustement

1. Le vecteur d'observations est créé selon le nombre d'observations dans le fichier des observations.
2. Le vecteur des inconnues est créé selon le nombre d'inconnues et de conditions. Ces derniers sont calculés en fonction du type de calcul et des inconnues supplémentaires.
3. Itération pour l'ajustement par moindres carrés selon la théorie décrite dans la partie théorique.
4. Le contrôle de la convergence du calcul est effectué selon le critère d'interruption du fichier options.
5. Les différents indicateurs présentés dans la partie théorique sont calculés.
6. Le fichier listing est créé et les points sont transformés dans le système final puis les deux fichiers sont exportés.

10 Import des fichiers et modèles de données

Il est important de définir le modèle des fichiers en entrée. Il est également nécessaire de décrire leur structure avant d'expliquer les outils plus en détails. Ceci permet de mettre en place un systématisme afin de créer une chaîne de traitement générale. En effet, ce logiciel utilise des fichiers d'import en format XML avec une arborescence spécifique, créé uniquement pour ce dernier.

10.1 Fichiers des données

Les outils prennent en entrée cinq fichiers :

- **Observations.xml** : Un fichier avec les observations qui contient le canevas et les observations terrestres et GNSS.
- **Canevas.xml** : Un fichier avec le canevas des observations prévues sans les valeurs de ces dernières (pour la simulation).
- **Options.xml** : Un fichier avec les options qui contient les options de calcul, les différents groupes de distances et de réfractions, les sessions et le datum des points (Remplace l'interface).
- **Points.xml** : Un fichier avec les points qui contient les différentes coordonnées des points.
- **PipelinesTransformationsCoordonnees.xml** : Un fichier avec les transformations entre systèmes qui contient des transformations prédéfinies et qui permettent d'implémenter des transformations entre un système d'origine et un système de destination.

10.2 Observations.xml

Ce chapitre décrit le format de données des observations. Il s'agit du fichier qui concentre les observations terrestres et GNSS. Il a la même utilité que le fichier *.me* de LTOP.

10.2.1 Fichier XML des données d'observations

Afin que l'utilisateur puisse comprendre le systématisme du fichier, un exemple est fourni en annexe de ce présent rapport (Annexe n° 2).

Les types d'observations sont les suivants :

- DS : distance 3D [m]
- RI : direction horizontale [gons]
- AZ : azimut astronomique [gons]
- ZD : angle zénithal [gons]
- DYT, DXT, DZT : différences de coordonnées topocentriques T+ [m]
- DYTopo, DXTopo, DZTopo : différences de coordonnées topocentriques à l'axe des tourillons de la station [m]
- DH : différences d'altitudes orthométriques [m]
- LY, LX, LZ : coordonnées GNSS [m]

10.2.2 Modèle XSD des données d'observations

Les schémas de cette partie décrivent la structure du modèle et le tableau en annexe permet de comprendre le détail des différentes balises (annexe n° 5).

Terrestre

Le schéma ci-dessous montre le modèle des données pour importer des observations terrestres :

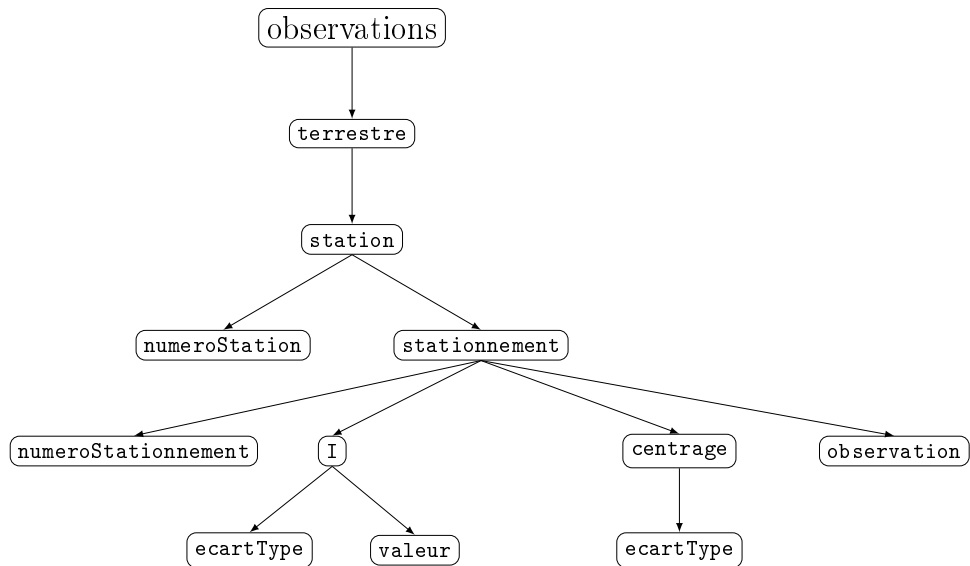


TABLE 12 – Modèle de données des observations terrestres (1)

Le schéma ci-dessous correspond aux sous-bornes de la balise *observation* ci-dessus. Le graphique est séparé pour une question de représentation.

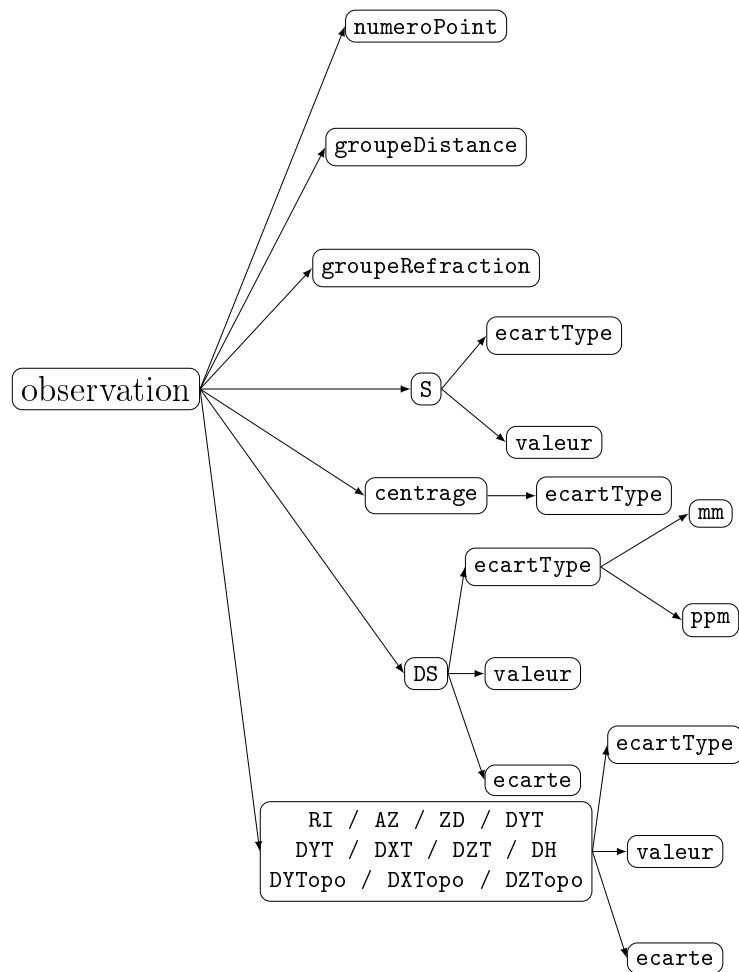


TABLE 13 – Modèle de données des observations terrestres (2)

GNSS

Le schéma ci-dessous montre le modèle des données pour importer les observations GNSS. Il est important de savoir que les observations GNSS sont dans le même fichier que les observations terrestres mais toujours après ces dernières.

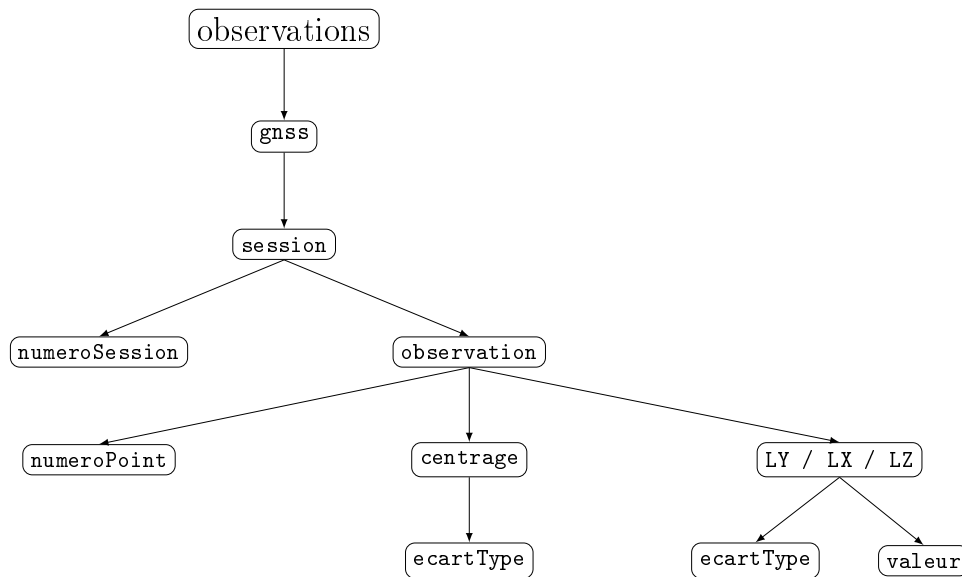


FIGURE 17 – Modèle de données des observations GNSS

Contraintes

Il existe quelques contraintes importantes pour ce modèle :

- L'ordre des bornes des types d'observations (DS, RI, ...) n'a pas d'importance.
- Les observations terrestres doivent toujours apparaître avant les observations GNSS.
- L'orthographe des noms des balises doit être respectée.
- Il ne peut pas exister simultanément de mesure d'azimut astronomique (AZ) et de direction horizontale (RI) depuis la même station, stationnement et point.
- Il ne peut pas exister simultanément de mesure de différence topocentrique z et de différence d'altitude orthométrique (DH) depuis la même station, stationnement et point.

10.3 Canevas.xml

Ce chapitre décrit le format de données du canevas pour la simulation. Il s'agit du fichier qui concentre les intentions de mesures.

Terrestre

Le schéma ci-dessous montre le modèle des données pour importer le canevas terrestre :

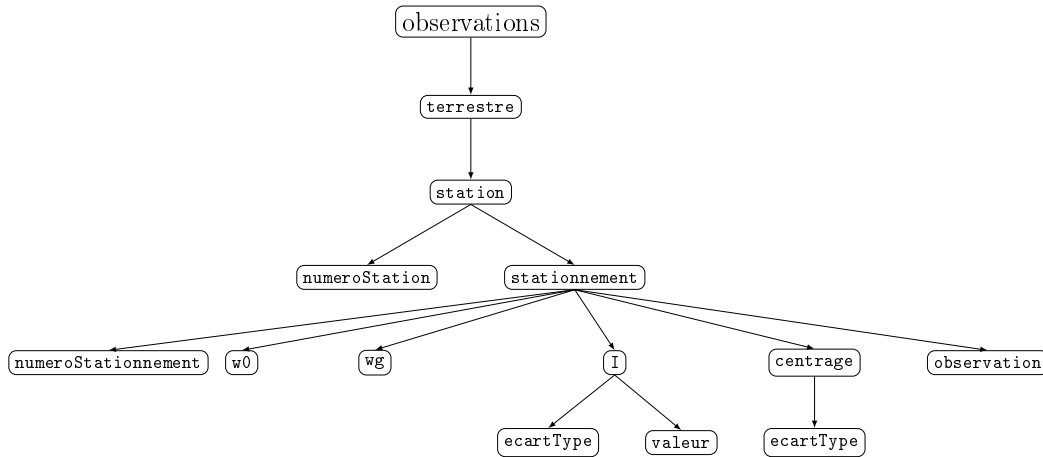


TABLE 14 – Modèle de données du canevas terrestre (1)

Le schéma ci-dessous correspond aux sous-bornes de la borne *observation* ci-dessus. Le graphique est séparé pour une question de représentation.

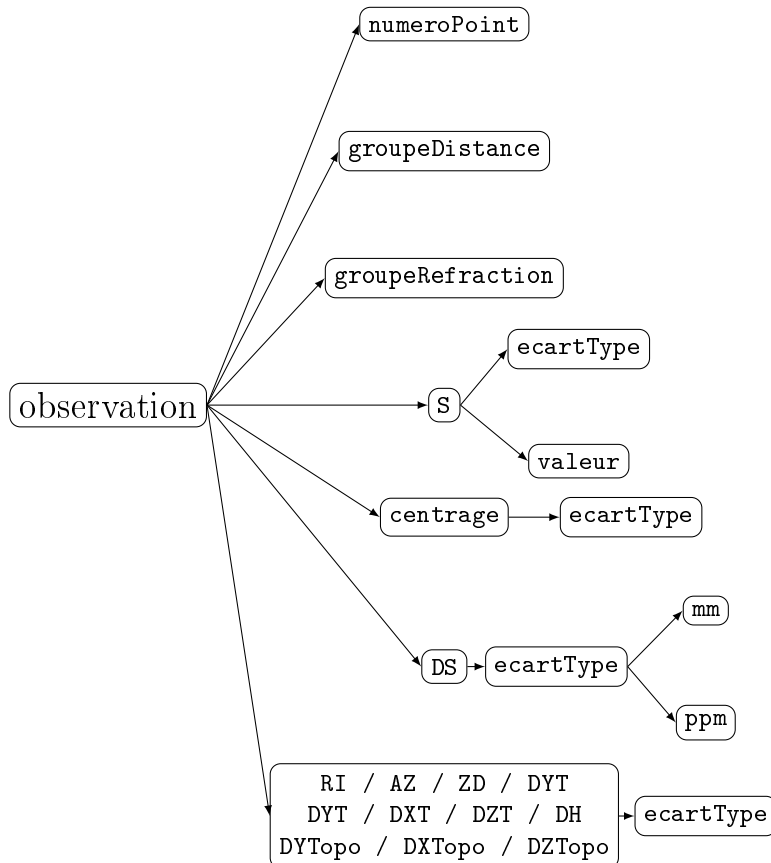


TABLE 15 – Modèle de données du canevas terrestre (2)

GNSS

Le schéma ci-dessous montre le modèle des données pour importer le canevas GNSS. Il est important de savoir que le canevas GNSS se trouve dans le même fichier que le canevas terrestre mais toujours après ce dernier.

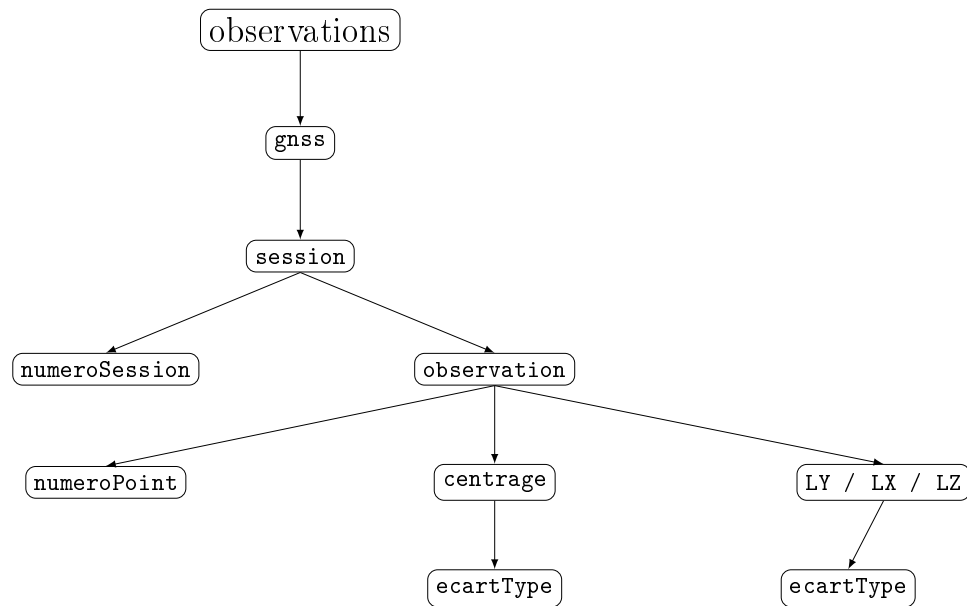


FIGURE 18 – Modèle de données du canevas GNSS

10.4 Options.xml

Ce chapitre décrit le format de données d'options. Il s'agit du fichier qui contient les options de calcul, les différents groupes de distances et de réfractions, les sessions et le datum des points. Ce fichier sert à remplacer l'interface du calcul.

10.4.1 Fichier XML des données des options

Afin que l'utilisateur puisse comprendre le systématisme du fichier, un exemple est fourni en annexe de ce présent rapport (Annexe n° 2).

10.4.2 Modèle XSD des données des options

Les schémas de cette partie décrivent la structure du modèle et le tableau en annexe permet de comprendre le détail des différentes balises (Annexe n° 5).

Le graphique ci-dessous montre le modèle des données pour importer les options.

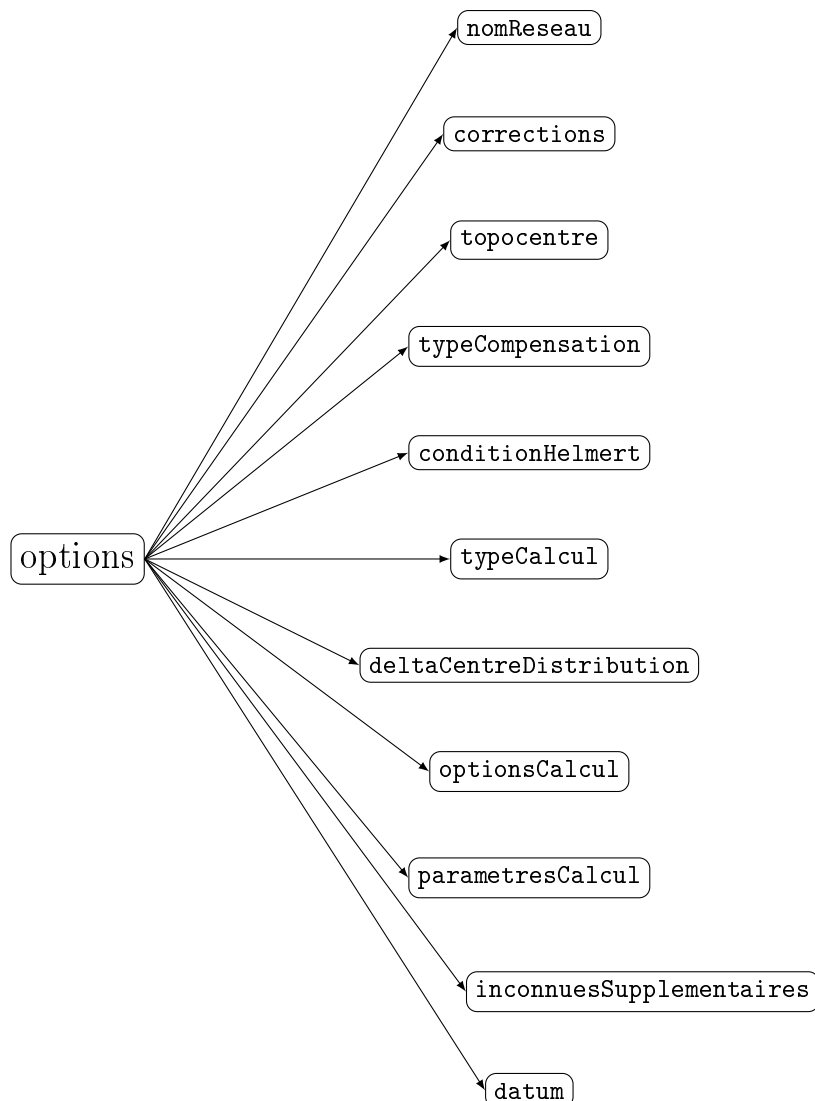


FIGURE 19 – Modèle de données des options

Afin d'avoir le détail, les bornes qui comportent des bornes enfants sont explicitées ci-dessous.

Corrections

La borne *corrections* permet d'activer ou désactiver les corrections appliquées aux observations :

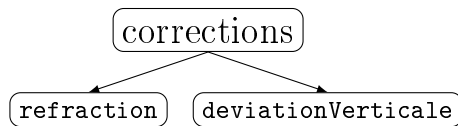


FIGURE 20 – Modèle de données des options (corrections)

Topocentre

La borne *topocentre* permet d'indiquer les informations du topocentre :

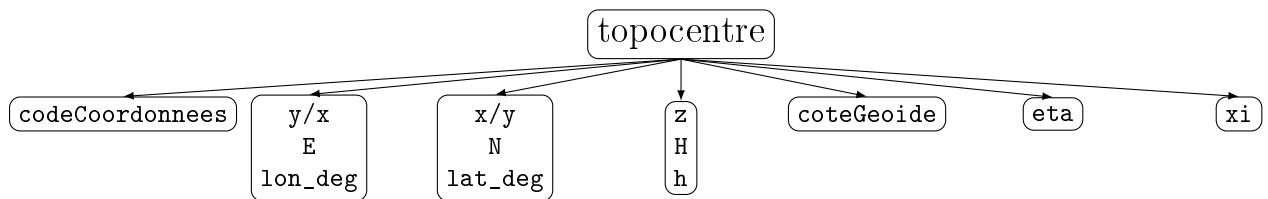


FIGURE 21 – Modèle de données des options (topocentre)

Conditions d'Helmert

La borne *conditionHelmert* permet de paramétrer les conditions pour réaliser un Helmert lors d'une compensation libre. Elle peut être supprimée ou conservée lors d'autres types de compensations. Si la borne est toujours présente, cette dernière est ignorée par le calcul.



FIGURE 22 – Modèle de données des options (compensation libre)

Centre de distribution

La borne *deltaCentreDistribution* permet de paramétrer le centre de distribution. Le risque de première espèce *alpha* influence le W_i maximum et le risque de deuxième espèce *beta* modifie directement le delta du centre de distribution.

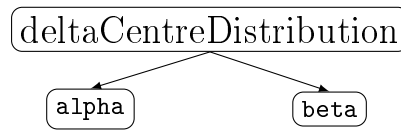


FIGURE 23 – Modèle de données des options (centre de distribution)

Options de calcul

La borne *optionsCalcul* permet de régler les options du calcul d'une compensation. Il est possible de régler le nombre d'itérations maximum et le seuil pour stopper le calcul :

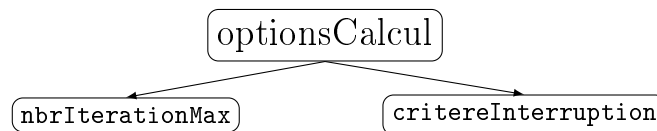


FIGURE 24 – Modèle de données des options (options de calcul)

Paramètres du calcul

La borne *parametresCalcul* permet de paramétrer le calcul. Il décrit le delta appliqué pour les dérivées numériques, le rayon de la terre, le niveau de confiance pour le calcul des intervalles de confiance, le σ_0 et le nom de l'ellipsoïde à utiliser :

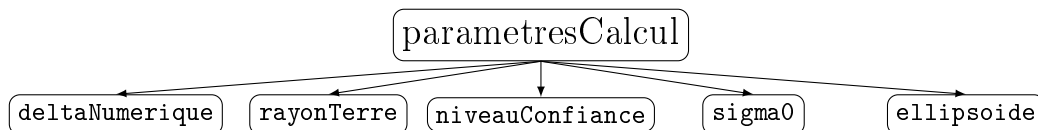


FIGURE 25 – Modèle de données des options (paramètres de calcul)

Inconnues supplémentaires

La borne *inconnuesSupplementaires* permet d'ajouter des inconnues dans le calcul. Les groupes de distances, les groupes de réfractions, les sessions GNSS ainsi que la possibilité d'estimer la déviation de la verticale se trouvent à cet endroit. Il est possible de supprimer les bornes qui ne sont pas utiles pour le calcul. Par exemple, lors d'un réseau GNSS, les bornes *groupesDistances* et *groupeRefractions* peuvent être supprimées. Si elles sont conservées, le calcul les ignore.

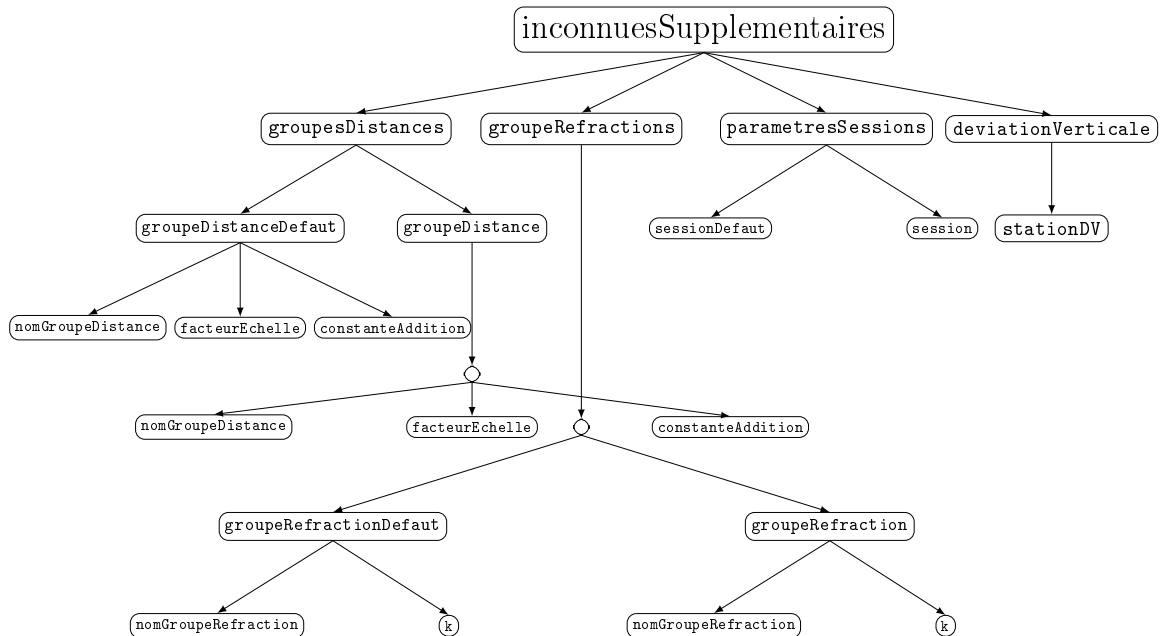


FIGURE 26 – Modèle de données des options (inconnues supplémentaires)

Il est nécessaire de noter que la borne avec les groupes ou la session par défaut doit apparaître avant les éventuels autres groupes ou sessions dans le fichier.

Voici le détail des bornes *sessionDefault* et *session* :

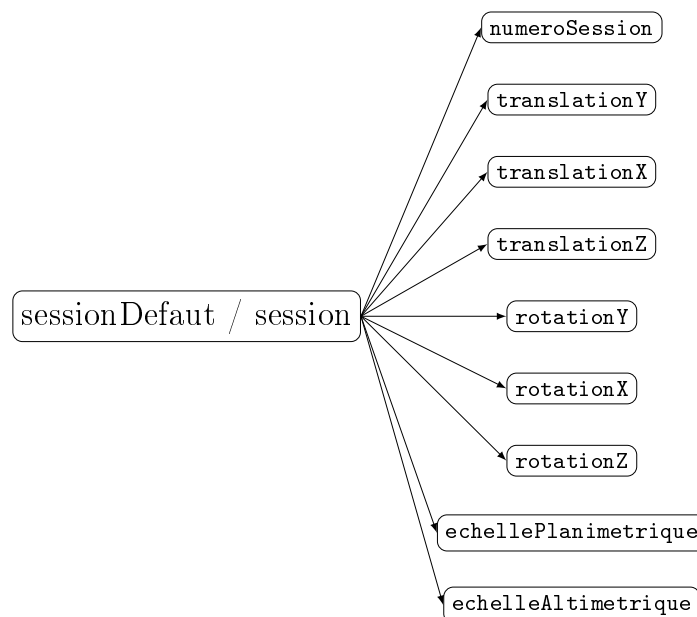


FIGURE 27 – Modèle de données des options (inconnues supplémentaires de sessions)

Datum

La borne *datum* permet de fixer les composantes des points séparément pour l'ajustement. Cela laisse également la possibilité de donner un écart-type sur ces composantes pour un calcul libre-ajusté :

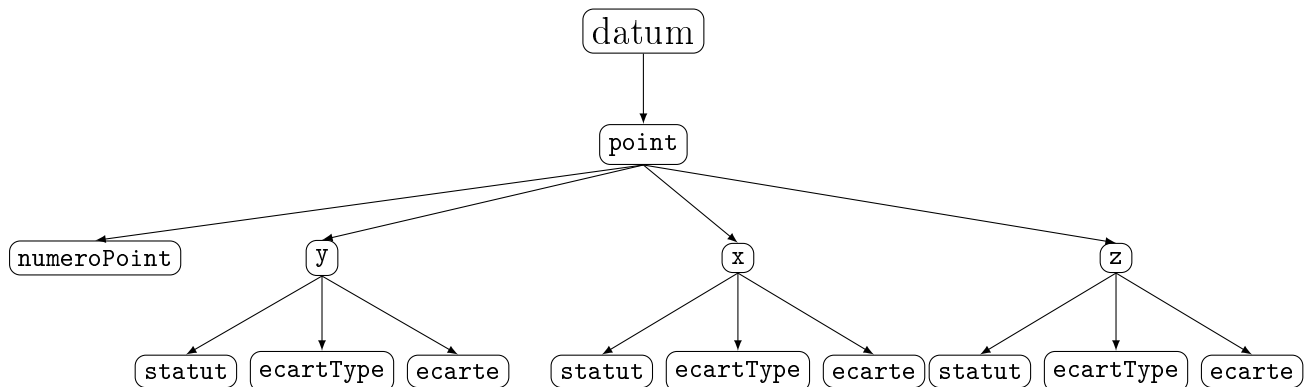


FIGURE 28 – Modèle de données des options (datum)

Modèle de données pour la simulation

Le modèle de données évoqué ci-dessus est adapté pour les besoins de la simulation car certaines bornes ne sont pas nécessaire dans la simulation.

Pour le fichier des options pour la simulation est le suivant :

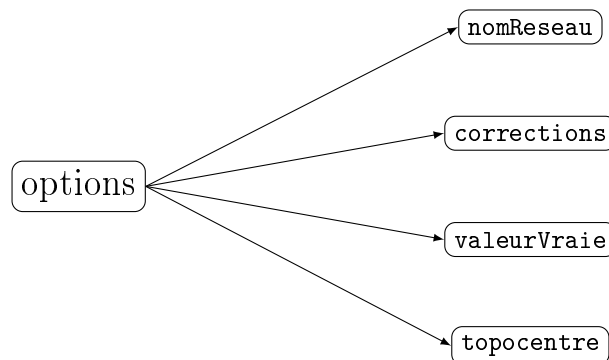


FIGURE 29 – Modèle de données des options adapté pour la simulation

La borne *valeurVraie* permet d'activer (False) ou de désactiver (True) la génération de bruits sur les observations.

10.5 Points.xml

10.5.1 Fichier XML des données de points

Dans ce logiciel, il est possible d'importer plusieurs types de coordonnées qui sont largement inspirés des formats créés dans les logiciels LTOP et Trinet+. Les formats suivants sont prédéfinis dans le modèle :

- **PK** : Système de projection suisse avec altitudes orthométriques (MN95)
- **PE** : Système de projection suisse avec hauteurs ellipsoïdales (MN95)
- **UTM** : *Universal Transverse Mercator*
- **T** : Coordonnées topocentriques T+
- **ELL** : Coordonnées ellipsoïdales sur l'ellipsoïde de Bessel
- **CH1903PLUS** : Coordonnées géocentriques CH1903+
- **ProjH** : Coordonnées projetées avec altitudes sur le géoïde, structure pour accueillir d'autres projections avec altitudes sur le géoïde
- **Projh** : Coordonnées projetées avec altitudes sur l'ellipsoïde, structure pour accueillir d'autres projections avec altitudes sur l'ellipsoïde

10.5.2 Modèle XSD des données de points

Les schémas de cette partie décrivent la structure du modèle et le tableau en annexe permet de comprendre le détail des différentes balises (Annexe n° 5).

Le schéma ci-dessous montre le modèle des données pour importer les points. Il est conseillé de travailler avec un fichier par type de coordonnées.

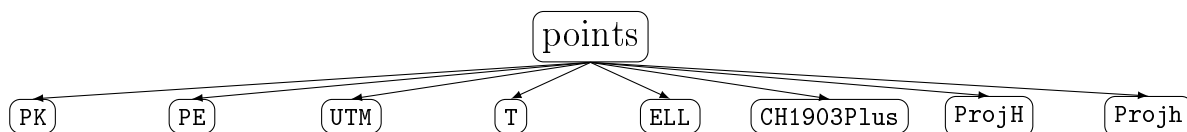


FIGURE 30 – Modèle de données des points

Le détail des bornes pour l'import des points est défini ci-dessous. Cependant, il faut noter que les bornes enfants doivent être dans l'ordre.

Borne parent	Bornes enfants
PK	[numéro, E, N, H, coteGeoide, eta, xi]
PE	[numéro, E, N, h, coteGeoide, eta, xi]
UTM	[numéro, E, N, h, coteGeoide, eta, xi]
T	[numéro, y, x, z, coteGeoide, eta, xi]
CH1903Plus	[numéro, x, y, z, coteGeoide, eta, xi]
ProjH	[numéro, E, N, H, coteGeoide, eta, xi]
Projh	[numéro, E, N, h, coteGeoide, eta, xi]

TABLE 16 – Modèle de données des points (Types de coordonnées)

10.6 PipelinesTransformationsCoordonnees.xml

Ce chapitre décrit le fichier qui contient les pipelines de transformation de coordonnées entre un système d'origine vers un système de destination.

Premièrement, il est nécessaire de clarifier la façon dont fonctionne ce fichier. Il décrit les pipelines ou les procédures de transformation entre un système d'origine vers un système de destination. Certaines transformations sont déjà prédéfinies dans ce fichier. Ces dernières sont nommées grâce à un système de coordonnées d'origine, un système de coordonnées de destination et un type de coordonnées en sortie. On remarque donc qu'il est possible de créer une multitude de transformation en créant son propre code dans le fichier "PipelinesTransformationsCoordonnees.xml" et en appelant les étapes de transformations dans l'ordre souhaité.

10.6.1 Modèle XSD des données des pipelines de transformations de coordonnées

Les schémas de cette partie décrivent la structure du modèle et le tableau en annexe permet de comprendre le détail des différentes balises (Annexe n° 5).

Le schéma ci-dessous montre le modèle des données pour importer les pipelines. L'ordre des bornes n'a pas d'importance et cela permet de mettre bout à bout des fonctions pour réaliser la transformation.

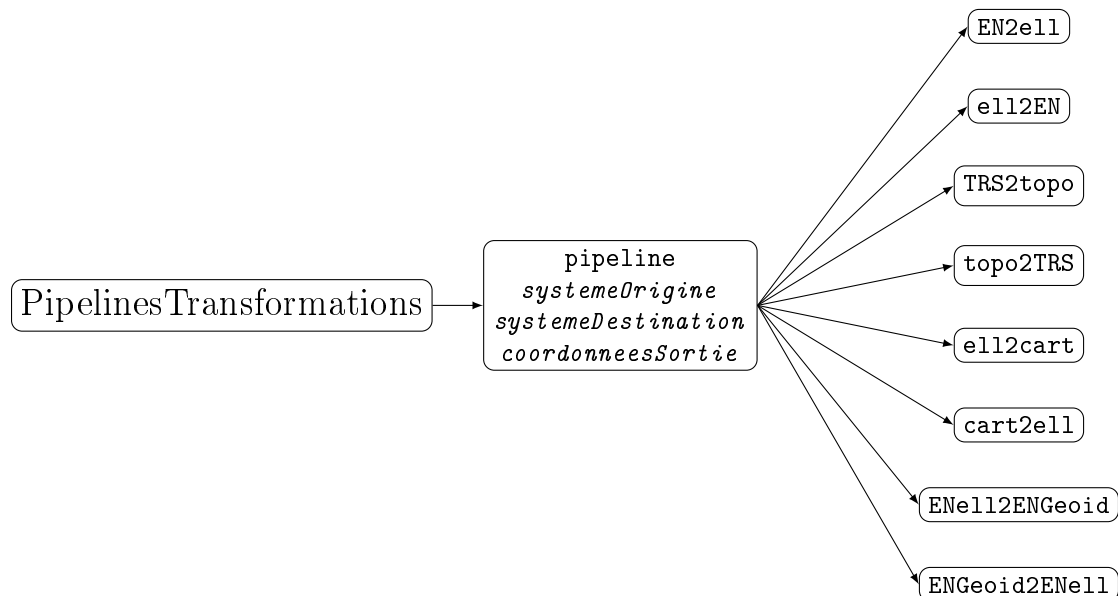


FIGURE 31 – Modèle de données des pipelines de transformations de coordonnées

La borne *pipeline* contient des attributs qui sont le système d'origine des coordonnées, le système de destination dans lequel les coordonnées sont transformées et le type de coordonnées en sortie. Par exemple, pour passer des coordonnées PE vers le système topocentrique T+ :

```
<pipeline systemeOrigine="PE" systemeDestination="T" coordonneesSortie="y_x_z">
  <EN2ell>
    <proj>swiss_MN95</proj>
    <E/>
    <N/>
    <h/>
    <ellipsoide>Bessel</ellipsoide>
    <zoneUTM>32</zoneUTM>
  </EN2ell>
  <ell2cart>
    <ellipsoide>Bessel</ellipsoide>
    <lon_deg/>
    <lat_deg/>
    <h/>
  </ell2cart>
  <TRS2topo>
    <ellipsoide>Bessel</ellipsoide>
    <x0_geo/>
    <y0_geo/>
    <z0_geo/>
    <x/>
    <y/>
    <z/>
    <eta/>
    <xi/>
  </TRS2topo>
</pipeline>
```

FIGURE 32 – Pipelines de transformation

On remarque que la plupart des bornes sont vides car le script cherche automatiquement les valeurs dans les bons fichiers.

Arguments des fonctions

Les fonctions ci-dessus prennent des bornes enfants qui correspondent aux arguments des différentes fonctions dans le fichier *TransformUtils.py*. Voici la liste de ces bornes dans l'ordre de déclaration qui doit être respecté :

Borne parent	Borne enfant
EN2ell	[proj, E, N, h, a, e, zoneUTM]
ell2EN	[proj, lon_deg, lat_deg, h, a, e]
TRS2topo	[a, e, y0_geo, x0_geo, z0_geo, y, x, z, eta, xi]
topo2TRS	[a, e, y0_geo, x0_geo, z0_geo, y, x, z, eta, xi]
ell2cart	[a, e, lon_deg, lat_deg, h]
cart2ell	[a, e, y, x, z]
ENell2ENGeooid	[E, N, H, coteGeoide]
ENGeooid2ENell	[E, N, H, coteGeoide]

TABLE 17 – Fonction du script TransformUtils.py

11 Paramètres des outils

Cette section décrit l'ensemble des paramètres pour régler les outils selon les besoins de l'utilisateur. Ces derniers se trouvent dans le fichier *ParametresUtilisateurs.py* ou dans le fichier d'options.

11.1 Paramètres généraux

Dans le fichier *ParametresUtilisateurs.py*, les ellipsoïdes sont définis. Elle se compose du nom, de la valeur du demi-grand axe et de son excentricité.

```
#Définition des ellipsoïdes (demi-grand axe et excentricité)
ellipsoïde = {"Bessel" : {"a":6377397.155, "e":0.0816968312225269},
              "GRS80" : {"a":6378137.000, "e":0.081819190842622}}
```

11.2 Paramètres de l'interpolation

Pour réaliser une interpolation des composantes de la déviation de la verticale, il est possible de régler plusieurs paramètres qui sont regroupés dans le fichier *ParametresUtilisateurs.py*. Les variables sont les suivantes :

Variables	Descriptions
nomFichierInterpolation	Liens vers les fichiers en entrée.
dossierExportInterpolation	Lien pour les fichiers résultats.
grilleData	Lien vers la grille régulière des données.
methodeInterpolation	Méthode pour l'interpolation (ex. Linear).

TABLE 18 – Paramètres pour l'interpolation

11.3 Paramètres de la transformation de coordonnées

Pour réaliser une transformation, il est possible de régler plusieurs paramètres qui sont regroupés dans le fichier *ParametresUtilisateurs.py*. Les variables sont les suivantes :

Variables	Descriptions
nomFichierPipelines	Liens vers les fichiers en entrée.
dossierExportPipelines	Lien pour les fichiers résultats.
transformations	Système de coordonnées de destination.

TABLE 19 – Paramètres pour la transformation de coordonnées

11.4 Paramètres pour la simulation

11.4.1 Paramètres du générateur

Afin de pouvoir tester le programme avec un nombre conséquent d'observations, il semble intéressante de réaliser un générateur qui permet de créer un canevas de manière aléatoire. C'est pour ce faire, qu'une variable booléenne permet d'activer le mode de génération aléatoire dans le fichier *simMain.py*.

True : Génération des fichiers dans le dossier *Simulateur/Donnees*

False : Utilisation des fichiers dans le dossier *Simulateur/Donnees* sans les régénérer

Afin d'adapter au mieux la génération au besoin des différents tests, des variables permettent de modifier le résultat. Le dictionnaire dans le fichier *ParametresUtilisateurs.py* ci-dessous permet pour les observations terrestres de changer le nombre de station, le nombre de stationnement de ces dernières, le nombre de point mesuré par station, le nombre de groupe de distance et les types d'observations pour chaque station. Pour les observations GNSS, il est possible de varier le nombre de sessions et le nombre de points mesurés par session.

```

paramsCanevas = {'nb_st':5,
                 'nb_stationnement':2,
                 'nb_pt_station':4,
                 'nb_pt_session': 4,
                 'nb_session':2,
                 'nb_groupe_dist':4,
                 "typeObs":["DS","RI","ZD", "DY"]}

```

Pour un contrôle total de la simulation, l'utilisateur peut également choisir les domaines de simulation de tous les éléments via le fichier *ParametresUtilisateurs.py*. Par exemple, si les numéros de point sont compris entre 7000 et 9999, il est possible de le régler dans le dictionnaire *aleatoire* à la clé correspondante de la manière suivante :

```
'numero': [7000, 9999]
```

11.4.2 Paramètres du simulateur

ParametresUtilisateurs.py

Pour réaliser une simulation, il est possible de régler plusieurs paramètres qui sont regroupés dans le fichier *ParametresUtilisateurs.py*.

Les variables sont les suivantes :

Variables	Descriptions
nomFichierSimulation	Liens vers les fichiers en entrée.
dossierExportSimulation	Lien pour les fichiers résultats.
ellipsoideUtilise	Ellipsoïdes utilisés pour le calcul.
ref	Rayon moyen de la terre.
facteurEchelle	Valeur du facteur d'échelle pour la simulation des observations.
constanteAddition	Valeur de la constante d'addition pour la simulation des observations.
k	Valeur du coefficient de réfraction pour la simulation des observations.
Paramètres de sessions	Valeur des paramètres et code de l'estimation (+, - ou 1 à 99).

TABLE 20 – Paramètres du simulateur

Options.xml

Le chapitre suivant décrit les différents paramètres modifiables par l'utilisateur pour la simulation dans le fichier options.xml.

- **Nom du réseau** : Le nom du réseau.
- **Corrections / Réfraction** : Cette option permet d'activer la correction de la réfraction sur les observations simulées d'angles zénithaux (True ou False).
- **Corrections / Déviation de la verticale** : Cette option permet d'activer la déviation de la verticale. Lorsque cette option est activée, la déviation de la verticale est appliquée lors de la transformation entre un système TRS et topocentrique. Dans le cas où cette option n'est pas activée, la longitude et la latitude astronomique sont confondues avec la longitude et la latitude ellipsoïdale. De plus, la déviation de la verticale sur les stations et le topocentre sont supprimés.
- **Valeur vraie** : Cette option permet de générer du bruit (False) sur les observations selon une distribution normale centrée sur la valeur vraie.
- **Topocentre** : Le topocentre peut être déterminé dans le fichier options.xml. Le code des coordonnées permet de donner le système ou le cadre de référence dans lequel se trouvent les coordonnées. Lors d'une compensation, il est obligatoire de fournir les coordonnées dans le système CH1903+.

11.5 Paramètres du calcul de l'ajustement

Pour le calcul de l'ajustement, la majorité des paramètres se trouve dans le fichier options.xml qui remplace l'interface pour régler le calcul. Cependant, certains paramètres secondaires, ne doivent généralement pas être modifiés, sont dans le fichier *ParametresUtilisateurs.py*.

11.5.1 ParametresUtilisateurs.py

Les variables présents dans le fichier sont les suivantes :

Variables	Descriptions
nomFichierLogiciel	Liens vers les fichiers en entrée.
dossierExportLogiciel	Lien pour les fichiers résultats.
incApp	Inconnues approchées des paramètres.
systemeExportFinal	Système pour l'export final des points. Une pipeline du système T+ vers ce système doit être définie dans le fichier <i>PipelinesTransformationsCoordonnees.xml</i> .

TABLE 21 – Paramètres pour le calcul d'ajustement

11.5.2 Options.xml

Le chapitre suivant décrit les différents paramètres modifiables par l'utilisateur pour le calcul d'une compensation dans le fichier options.xml.

- **Nom du réseau** : Le nom du réseau.
- **Corrections / Réfraction** : Cette options permet d'activer la correction de la réfraction sur les observations d'angles zénithaux (True ou False). Le coefficient de réfraction appliqué dans cette correction peut être estimé dans les groupes de réfraction.
- **Corrections / Déviation de la verticale** : Cette option permet d'activer la déviation de la verticale. Lorsque cette dernière est activée, la déviation de la verticale est appliquée lors de la transformation. Dans le cas où elle n'est pas activée, la longitude et la latitude astronomique sont confondues avec la longitude et la latitude ellipsoïdale. De plus, la déviation de la verticale sur les stations et le topocentre sont supprimées.
- **Topocentre** : Le topocentre peut être déterminé dans le fichier options.xml. Le code des coordonnées permet de donner le système ou le cadre de référence dans lequel se trouve les coordonnées. Lors d'une compensation, il est obligatoire de fournir les coordonnées dans le système CH1903+. L'utilisateur connaît rarement les coordonnées dans ce système. C'est pour cela que le transformateur permet d'effectuer la transformation.
- **Type de compensation** : Le type de compensation sert à déterminer si le calcul est libre, libre-ajusté ou contraint.

- **Type de calcul** : Cette option donne la possibilité de réaliser un calcul de préanalyse ou de compensation.
- **Centre de distribution** : Il est possible de déterminer l'erreur de première et de deuxième espèce. La première permet de calculer le W_i maximum et le deuxième le delta du centre de distribution.
- **Nombre d'itération** : Ce paramètre détermine le nombre d'itération maximal de l'ajustement.
- **Critère d'interruption** : Ce critère est le seuil pour stopper les itérations. Si le plus grand δ_x est inférieur à ce dernier, le calcul a convergé.
- **Delta numérique** : Le delta numérique permet d'implémenter la matrice jacobienne (A) via les dérivés numériques.
- **Rayon de la Terre** : Le rayon moyen terrestre est utilisé pour le calcul de la réfraction.
- **Niveau de confiance** : Le niveau de confiance permet l'analyse des indicateurs. Les différents intervalles de confiance sont calculés au niveau de confiance souhaité.
- **Sigma 0** : Le σ_0 est l'erreur moyenne de l'unité de poids. En général, ce paramètre vaut 1.0.
- **Ellipsoïde** : Le nom de l'ellipsoïde est indiqué dans cette option. Il est directement relié au le script *ParametresUtilisateurs.py* et le dictionnaire des paramètres de l'ellipsoïde. Ces derniers sont utilisés dans les différentes transformations et dans le calcul rigoureux de l'équation rigoureuse.
- **Inconnues supplémentaires** : Des inconnues supplémentaires peuvent être ajoutées dans le vecteur des inconnues.
- **Datum** : Le datum des points peut être réglé. Les composantes peuvent être libérées et fixées séparément. Si le point n'apparaît pas dans cette option, il est automatiquement estimé. L'écart-type est inscrit pour le calcul libre-ajusté et il est également possible d'écarter une composante.

12 Gestion des inconnues supplémentaires

Dans le logiciel TrinetPY, il est possible d'ajouter des inconnues lors du calcul de la compensation. Ce chapitre les décrit ainsi que la façon de les ajouter ou les supprimer du calcul.

12.1 Groupes et sessions

12.1.1 Groupes de distances

Les groupes de distances permettent d'estimer un facteur d'échelle et une constante d'addition pour les distances 3D. Deux points mesurés dans la même station peuvent appartenir à deux groupes différents. Les inconnues de facteurs d'échelle et de constante d'addition sont automatiquement supprimées si aucune distance 3D n'existe. La définition des groupes dans le fichier options peut donc être conservée ou supprimée s'il n'y a pas de distance 3D.

12.1.2 Groupes de réfractions

Les groupes de réfractions permettent d'estimer le coefficient de réfraction (k) pour appliquer la réfraction uniquement sur les angles zénithaux. Un coefficient de réfraction est estimé pour chaque groupe. Le coefficient est automatiquement supprimé du vecteur des inconnues si aucun angle zénithal n'existe. La définition des groupes dans le fichier options peut donc être conservée ou supprimée s'il n'y a pas d'angles zénithaux. Il est important de noter que lorsque la correction de la réfraction est désactivée dans le fichier options.xml, le coefficient de réfraction n'est pas estimé.

12.1.3 Sessions GNSS

Les sessions permettent d'estimer les paramètres de transformation d'Helmert 3D pour compenser les sessions GNSS. Cela offre la possibilité d'estimer trois translations, trois rotations et deux facteurs d'échelle. Toutes les sessions doivent être définies dans le fichier d'options. Ainsi, deux points mesurés dans la même session ne peuvent pas appartenir à deux groupes différents. Les paramètres de sessions soient automatiquement supprimés du calcul si aucune session n'existe.

12.1.4 Paramétrisation des inconnues supplémentaires

Dans le fichier options.xml, les différents groupes et sessions doivent être impérativement définis pour autant qu'ils sont utilisés dans les observations. Les codes suivants permettent l'estimation ou non des paramètres :

- + : Estimation du paramètre unique pour ce groupe.
- - : Pas d'estimation du paramètre pour ce groupe.
- 1 à 99 : Estimation du paramètre en commun avec tous les autres groupes qui ont le même chiffre.

Dans le cas où un paramètre n'est pas estimé, les inconnues approchées du fichier *ParametresUtilisateurs.py* sont utilisées. Les valeurs suivantes sont appliquées par défaut :

- Translation : 0.000 [m]
- Rotation : 0.000 [m]
- Échelle : 1.000 [-]
- Constante d'addition : 0.000 [m]
- Coefficient de réfraction : 0.13 [-]

12.2 Déviation de la verticale

Le logiciel permet également d'estimer la déviation de la verticale. Cependant, il est possible de le faire uniquement sur les stations car le lien entre le point au sol et le centre de la cible n'est pas suffisamment défini dans les points visés. Pour le réaliser, il suffit d'insérer le numéro de la station dans la partie inconnue supplémentaire, dans la sous-borne *deviationVerticale*. Il faut ensuite ajouter une borne *stationDV* avec le numéro de la station à estimer.

```
<inconnuesSupplementaires>
  <deviationVerticale>
    <stationDV>8002</stationDV>
  </deviationVerticale>
</inconnuesSupplementaires>
```

FIGURE 33 – Inconnues de déviation de la verticale

13 Paramétrisation des types de calcul

13.1 Préanalyse

La préanalyse permet d'analyser la géométrie et le niveau de contrôle du réseau avant la réalisation de ce dernier. L'activation de ce mode peut se faire dans le fichier options.xml de la manière suivante :

```
<typeCalcul>preanalyse</typeCalcul>
```

FIGURE 34 – Calcul d'une préanalyse

Pour ce faire, le calcul prend en entrée les mêmes fichiers que pour une compensation. Cependant, les différentes bornes valeur dans le fichier observations.xml ne doivent pas apparaître car le calcul est réalisé avant ces dernières. Dans le cas où elles sont conservées, elles ne sont pas prises en compte.

```
<gnss>
  <session>
    <numeroSession>6001</numeroSession>
    <observation>
      <numeroPoint>8002</numeroPoint>
      <centrage>
        <ecartType>1.0</ecartType>
      </centrage>
      <LY>
        <ecartType>3.0</ecartType>
        <ecarte>False</ecarte>
      </LY>
      <LX>
        <ecartType>3.0</ecartType>
        <ecarte>False</ecarte>
      </LX>
      <LZ>
        <ecartType>3.0</ecartType>
        <ecarte>False</ecarte>
      </LZ>
    </observation>
  </session>
</gnss>
```

FIGURE 35 – Fichier d'observations pour une préanalyse

Une préanalyse peut être réalisée dans tous les types de calcul (libre, libre-ajusté ou contraint). Les différents indicateurs et le listing sont adaptés pour répondre à ce type de calcul.

13.2 Libre

Il est également possible de réaliser un calcul libre de façon à analyser la géométrie interne du réseau. Pour ce faire, la totalité des composantes des points est automatiquement libérée afin de supprimer l'impact des points fixes sur le réseau. Lors de ce dernier, la déviation de la verticale n'est pas estimée sauf si cette dernière est inscrite dans les options. Cependant, il faut au minimum que les composantes de la déviation d'une station soient fixes. Les autres paramètres estimables peuvent être libérés ou fixés.

Puis, le réseau est calé au mieux sur les coordonnées approchées des points sans intervenir sur la géométrie du réseau. Le détail est décrit dans la partie théorique.

Pour activer ce mode, cela se passe dans le fichier options.xml :

```
<typeCompensation>libre</typeCompensation>
```

FIGURE 36 – Calcul d’une compensation libre

Puis, les points et les conditions d’Helmert sont définis dans le même fichier :

```
<conditionHelmert>
  <pointsHelmert>
    <pointHelmert>8001</pointHelmert>
    <pointHelmert>8002</pointHelmert>
    <pointHelmert>8003</pointHelmert>
  </pointsHelmert>
  <parametresHelmert>
    <helmertTranslationY>True</helmertTranslationY>
    <helmertTranslationX>True</helmertTranslationX>
    <helmertTranslationZ>True</helmertTranslationZ>
    <helmertRotationY>False</helmertRotationY>
    <helmertRotationX>False</helmertRotationX>
    <helmertRotationZ>True</helmertRotationZ>
    <helmertFacteurDistance>False</helmertFacteurDistance>
    <helmertFacteurYXGNSS>True</helmertFacteurYXGNSS>
    <helmertFacteurZGNSS>True</helmertFacteurZGNSS>
  </parametresHelmert>
</conditionHelmert>
```

FIGURE 37 – Conditions d’Helmert

Il est possible d’insérer tous les points dans l’Helmert sans impacter la géométrie interne du réseau car le calage est réalisé au mieux sur les coordonnées approchées. TrinetPY prend le parti de laisser l’utilisateur gérer les conditions afin de lui donner la totale maîtrise du calcul. Cependant, il est important de comprendre que selon les conditions, le calcul n’est pas forcément libre. Il est de la responsabilité de l’utilisateur de gérer les conditions selon les indications de la partie théorique du calcul libre.

13.3 Libre-ajusté

Le calcul libre-ajusté permet d’analyser les points fixes. Cette option peut être activée dans le fichier options.xml.

```
<typeCompensation>libreAjuste</typeCompensation>
```

FIGURE 38 – Type de compensation libre-ajustée

Cette méthode libère les points fixes et passe les coordonnées de ces points dans le vecteur des observations.

13.4 Contraint

Le calcul contraint permet d’estimer les coordonnées des points libres en les intégrant dans un réseau de points fixes. Cette option peut être activée dans le fichier options.xml.

```
<typeCompensation>contraint</typeCompensation>
```

FIGURE 39 – Type de compensation contrainte

Cette méthode travaille avec la surabondance maximale du réseau.

14 Observations écartées

Afin de pouvoir travailler sur le réseau et le modifier facilement en conservant une trace de toutes les observations, il est important de pouvoir écarter les mesures entachées d'une faute grossière.

Pour ce faire, chaque observation dans le fichier observations.xml possède une borne *ecarte* qui peut être activée *True* ou désactivée *False*. Dans le cas où elle est activée, l'erreur moyenne de cette valeur est passée à l'interne du calcul à 99999999 mm ce qui lui donne un poids nul dans le calcul. Son impact est donc supprimé. La valeur est également supprimée du calcul des erreurs moyennes des groupes et les indicateurs ne sont pas calculés sur cette dernière.

15 Messages d'erreurs

Dans les annexes (annexe n° 6), les différentes erreurs possibles dans le calcul sont décrites. Le chiffre permet de trouver la catégorie d'erreur (1ère colonne) et la lettre permet de trouver la sous-catégorie (3ème colonne). Les erreurs agissent comme des barrières afin d'éviter les problèmes dans l'exécution du script. Cela permet également d'orienter l'utilisateur afin de corriger rapidement le problème.

16 Résultats

16.1 Résultat de l'interpolation

L'interpolation prend en entrée un fichier `point.xml` et un fichier `options.xml` sans les bornes *eta*, *xi* et *coteGeoide*. Ci-dessous, l'exemple pour le point 8005 dans le fichier `points.xml`. Cependant, cette fonctionnalité est identique pour la gestion du topocentre dans les options.

<pre><points> <PE> <point> <numero>8005</numero> <E>2600100.000</E> <N>1200200.000</N> <h>390.000</h> </point> </PE> </points></pre>	\implies	<pre><points> <PE> <point> <numero>8005</numero> <E>2600100.000</E> <N>1200200.000</N> <h>390.000</h> <coteGeoide>-0.63222</coteGeoide> <eta>-0.31</eta> <xi>-0.85</xi> </point> </PE> </points></pre>
--	------------	--

FIGURE 40 – Fichier avant l'interpolation (à gauche) et après (à droite)

16.2 Résultat de la transformation de coordonnées

Le résultat qui ressort d'une transformation est constitué de deux fichiers. Le premier est le fichier `Options.xml` qui est un fichier directement prêt à être utilisé pour une simulation ou une compensation avec le topocentre transformé dans le système CH1903+.

Le deuxième est le fichier `points.xml` qui contient les points dans le système de destination.

Ci-dessous, l'exemple démontre la transformation entre le système PE et T+ du point 8005 situé au topocentre.

<pre><points> <PE> <point> <numero>8005</numero> <E>2600100.000</E> <N>1200200.000</N> <h>390.000</h> <coteGeoide>-0.63222</coteGeoide> <eta>-0.31</eta> <xi>-0.85</xi> </point> </PE> </points></pre>	\implies	<pre><points> <T> <point> <numero>8005</numero> <y>0.0</y> <x>-0.0</x> <z>-0.0</z> <coteGeoide>-0.63222</coteGeoide> <eta>-0.31</eta> <xi>-0.85</xi> </point> </T> </points></pre>
--	------------	--

FIGURE 41 – Fichier avant la transformation (à gauche) et après (à droite)

16.3 Résultat de la simulation

Tout d'abord, le fichier `options.xml` est mis à jour. Les paramètres des groupes de réfractions, des groupes de distance et des sessions GNSS sont récupérés et ajoutés à ce dernier.

La liste des points est également récupérée pour ajouter la borne avec le datum dans le fichier d'options. Toutes les composantes des points sont passées sur libre.

Puis, les dictionnaires sont exportés pour sortir des fichiers XML prêts et conformes à l'utilisation.

L'exemple ci-dessous montre une observation de direction horizontale avant et après la simulation.

<pre><RI> <ecartType>1</ecartType> </RI></pre>	\implies	<pre><RI> <ecartType>1.0</ecartType> <valeur>320.484439</valeur> <ecarte>False</ecarte> </RI></pre>
--	------------	---

FIGURE 42 – Fichier avant la simulation (à gauche) et après (à droite)

16.4 Résultat du calcul d'ajustement

Suite à l'utilisation du logiciel de calcul d'ajustement, trois éléments émergent et se trouvent dans le dossier d'export choisi.

- Listing.txt \longrightarrow Le listing du résultat avec les différents indicateurs
- Listing.pdf \longrightarrow Le listing du résultat avec les différents indicateurs en format PDF afin d'obtenir un rendu propre et non-modifiable
- pointsT.xml \longrightarrow Le fichier avec les points dans le système T+.
- pointsX.xml \longrightarrow Le fichier avec les points dans le système x choisit dans la variable "systemeExportFinal" du fichier "'ParametresUtilisateurs.py'".

16.4.1 Listing du résultat

Le listing des résultats finaux est fortement inspiré des logiciels LTOP et Trinet+.

Le logiciel de calcul pour la compensation réalise un fichier de listing après chaque calcul de compensation ou de préanalyse. Ce dernier se nomme *listing.txt*.

Entête du fichier

```
=====
                          Compensation 3D du réseau : 'ListingDemo'
=====

30/06/22 19:16

=====
                          Données en entrée
=====

=====
Type de calcul : compensation
Type de compensation : contraint
=====
```

Les éléments suivants se trouvent dans cette partie :

- Le nom du réseau de calcul
- La date et heure de la fin du calcul
- Le type de calcul \longrightarrow préanalyse ou compensation
- Le type de compensation \longrightarrow libre, libre-ajusté ou contraint

Données en entrée

La partie des données en entrée résume le datum ainsi que les coordonnées approchées de la compensation. Cela permet de confirmer que la paramétrisation du calcul est la bonne.

Points fixes et libres

La totalité des points de l'estimation est résumée dans cette partie. La valeur approchée et le statut de la composante de chaque point sont indiqués.

=====
Points fixes et libres :
=====

Points	y	statut	x	statut	z	statut	eta	statut	xi	statut
	[m]		[m]		[m]		[arcSec]		[arcSec]	
8005	0.000000	libre	-0.000000	libre	-0.000000	libre	-0.27	fixe	-0.87	fixe

Inconnue d'orientation et d'azimut

Les différentes inconnues d'orientation et d'azimut des stations et stationnements sont répertoriées.

=====
Inconnue d'orientation et d'azimut :
=====

Paramètres	Station	Stationnement	Statut
w0	8006	1	libre

Groupes de distance

Les groupes de distance sont indiqués ce qui permet de visualiser directement si la constante d'addition et le facteur d'échelle sont estimés ou non. Pour rappel, le "+" indique que l'élément est estimé. Le "-" indique que la valeur n'est pas estimée. Si un chiffre est indiqué, cela signifie qu'une seule valeur est estimée pour tous les groupes qui possèdent le même chiffre.

=====
Groupe de distance :
=====

Groupe	Constante d'addition	Facteur d'échelle
grDistDef	+	+

Groupes de réfraction

Les groupes de réfraction sont indiqués ce qui permet de visualiser directement si le coefficient de réfraction est estimé ou non. Les codes fonctionnent de la même manière que pour les groupes de distance.

=====
Groupe de réfraction :
=====

Groupe	Coefficient de réfraction
grRefDef	+

Sessions GNSS

Les sessions GNSS sont indiqués ce qui permet de visualiser directement les paramètres de sessions qui sont estimés ou non. Les codes fonctionnent de la même manière que pour les groupes de distance.

=====
Sessions GNSS :
=====

Sessions	TY	TX	TZ	RY	RX	RZ	EYX	EZ
6001	+	+	+	+	+	+	+	-
6002	+	+	+	+	+	+	+	-

Statistiques de l'ajustement

=====
Statistiques de l'ajustement :
=====

nbr itérations : 2

max(abs(dx)) : 0.000000
deg de liberté : 63

Les éléments suivants se trouvent dans cette partie :

- Le nombre d'itération réalisé par le calcul (Compensation)
- max(abs(dx)) → la plus grande différence entre une inconnue estimée à l'avant-dernière itération et la valeur estimée à la dernière itération. (Compensation)
- Le degré de liberté du calcul (Compensation/Préanalyse)

Résultat de l'ajustement

=====

Résultat de l'ajustement :

=====

sigma0 : 1.00000 [m]
s0 : 0.81323 [m]
s0²/sigma0² : 0.66

Les éléments suivants se trouvent dans cette partie :

1. Écart-type de l'unité de poids a priori (Compensation/Préanalyse)
2. Écart-type de l'unité de poids a posteriori. (Compensation)
3. $\frac{s_0^2}{\sigma_0^2}$ → Quotient (Compensation)

Paramètres de fiabilité

=====

Paramètres de fiabilité :

=====

Risque de 1ère espèce, alpha : 1.0 [%] => wmax : 2.6
Risque de 2ème espèce, beta : 5.0 [%] => delta0 : 4.2

Les éléments suivants se trouvent dans cette partie :

1. Risque de premier espèce du fichier options.xml (Compensation)
2. Le calcul du Wi max (Compensation)
3. Risque de deuxième espèce du fichier options.xml (Compensation)
4. Le calcul du delta du centre de distribution (Compensation)

Écart-type des groupes et sessions

Écart-type des groupes de distances

Écart-type des groupes de distance :

Groupe	Nombre	em a priori [mm]	em a posteriori [mm]	Quotient
grDistDef	15	1.93	1.02	0.53

Les éléments suivants se trouvent dans cette partie :

1. Le nom du groupe de distance (Compensation/Préanalyse)
2. Le nombre d'observations dans le groupe (Compensation/Préanalyse)
3. L'écart-type a priori (Compensation/Préanalyse)
4. L'écart-type a posteriori (Compensation)
5. Le quotient (Compensation)

Écart-type des groupes de réfraction

Écart-type des groupes de réfraction :

Groupe	Nombre	em a priori [cc]	em a posteriori [cc]	Quotient
grRefDef	15	3.37	2.63	0.78

Les éléments suivants se trouvent dans cette partie :

1. Le nom du groupe de réfraction (Compensation/Préanalyse)
2. Le nombre d'observations dans le groupe (Compensation/Préanalyse)
3. L'écart-type a priori (Compensation/Préanalyse)
4. L'écart-type a posteriori (Compensation)
5. Le quotient (Compensation)

Écart-type des sessions

Pour les écarts-types des sessions, elles sont séparées selon les composantes.

Écart-type des sessions :

Groupe	Type d'observations	Nombre	em a priori [mm]	em a posteriori [mm]	Quotient
6001	LY	6	3.08	3.77	1.22
6001	LX	6	3.08	2.89	0.94
6001	LZ	6	3.00	1.86	0.62

Les éléments suivants se trouvent dans cette partie :

1. Le nom de la session (Compensation/Préanalyse)
2. Le composante (Compensation/Préanalyse)
3. Le nombre d'observations dans la session (Compensation/Préanalyse)
4. L'erreur moyenne a priori (Compensation/Préanalyse)
5. L'erreur moyenne a posteriori (Compensation)
6. le quotient (Compensation)

Écart-type des types d'observations

Un groupe est également créé pour chaque type d'observations.

Écart-type des types d'observations :

Type d'observations	Nombre	em a priori [mm/cc]	em a posteriori [mm/cc]	Quotient
ZD	15	3.33	2.63	0.78

Les éléments suivants se trouvent dans cette partie :

1. Le type d'observations (Compensation/Préanalyse)
2. Le composante (Compensation/Préanalyse)
3. Le nombre d'observations dans la session (Compensation/Préanalyse)
4. L'écart-type a priori (Compensation/Préanalyse)
5. L'écart-type a posteriori (Compensation)
6. Le quotient (Compensation)

Conditions d'Helmert

Cette partie intervient uniquement lors d'un calcul libre avec les conditions d'Helmert.

```
=====
Conditions d'Helmert :
=====
```

Points des conditions de Helmert :

```
-----
9001, 9002, 8001, 8002, 8003, 8004
```

Les conditions de Helmert :

```
-----
```

```
TranslationY : True
TranslationX : True
TranslationZ : True
RotationY : False
RotationX : False
RotationZ : True
FacteurDistance : False
FacteurYXGNSS : True
FacteurZGNSS : False
```

La première partie récapitule les points qui interviennent dans la condition d'Helmert. La deuxième partie fait la liste des paramètres activés ou non.

Inconnues

De manière général, lors de la préanalyse dans la partie des inconnues, la valeur estimée de l'inconnue n'est pas affichée dans le listing car cette dernière n'existe pas. L'erreur moyenne de l'inconnue est le seul élément affiché pour les inconnues lors d'une préanalyse.

Points fixes et nouveaux

Cette partie présente les valeurs des points estimés, l'erreur moyenne et l'intervalle de confiance pour chaque composante.

Points fixes et nouveaux :

```
-----
```

Point	y [m]	x [m]	z [m]	em y [mm]	em x [mm]	em z [mm]	Niveau de confiance (95.0%)		
							IC y [mm]	IC x [mm]	IC z [mm]
8001	75.001079	-145.010456	-1.001830	0.689	0.705	0.497	1.351	1.381	0.974

Déviations de la verticale en inconnue

Cette partie est ajoutée uniquement dans le cas où la déviation de la verticale sur une station est passée en inconnue.

Déviations de la verticale :

```
-----
```

point	eta [arcSec]	xi [arcSec]	em eta [arcSec]	em xi [arcSec]	Niveau de confiance (95.0%)	
					IC eta [arcSec]	IC xi [arcSec]
8002	-0.76	0.53	0.065	0.071	0.127	0.138

Sessions GNSS

Cette partie met en évidence les différentes sessions GNSS avec les paramètres, leur erreur moyenne et les intervalles de confiance. Les paramètres non-estimés ne sont pas affichés dans cette partie.

Sessions GNSS :

Sessions	TY [m]	TX [m]	TZ [m]	em TY [mm]	em TX [mm]	Niveau de confiance (95.0%)			
						em TZ [mm]	IC TY [mm]	IC TX [mm]	IC TZ [mm]
6001	0.000884	-0.002485	0.000483	1.055	1.059	1.017	2.068	2.075	1.993

Sessions	RY [gon]	RX [gon]	RZ [gon]	em RY [cc]	em RX [cc]	Niveau de confiance (95.0%)			
						em RZ [cc]	IC RY [cc]	IC RX [cc]	IC RZ [cc]
6001	-0.000457	0.000256	0.000526	5.620	4.023	3.144	11.015	7.886	6.162

Sessions	EYX [m]	EZ [m]	em EYX [mm]	em EZ [mm]	Niveau de confiance (95.0%)	
					IC EYX [mm]	IC EZ [mm]
6001	0.999995	-	0.005	-	0.010	-

Groupes de distances

Cette partie met en évidence les différents groupes de distances avec les paramètres ainsi que leur erreur moyenne. Le calcul de l'intervalle selon le niveau de confiance est également représenté. Les paramètres non-estimés ne sont pas affichés dans cette partie.

Groupes de distances :

Groupe	Cons. d'add. [m]	Fac. d'éch. [m]	em Cons. d'add. [mm]	em Fac. d'éch. [mm]	Niveau de confiance (95.0%)			
					IC Cons. d'add. [mm]	IC Fac. d'éch. [mm]		
grDistDef	-0.001869	1.000004	1.460	0.005	2.862	0.009		

Groupes de réfractions

Cette partie met en évidence les différents groupes de réfractions avec les paramètres ainsi que leur erreur moyenne. Le calcul de l'intervalle selon le niveau de confiance est également représenté. Les paramètres non-estimés ne sont pas affichés dans cette partie.

Groupes de réfractions :

Groupe	Niveau de confiance (95.0%)	
	Coefficient de réfraction	em coefficient de réfraction
grRefDef	0.120588	0.036233
		0.071015

Ellipsoïde de confiance

L'ellipsoïde d'erreur moyenne est la région dans laquelle la probabilité de trouver la valeur vraie du point recherché est de 20%. Cette dernière est transformée en ellipsoïde de confiance par la multiplication du coefficient 3D correspondant au niveau de confiance. Cette dernière est représentée par ses trois axes principaux (A, B et C) ainsi que les azimuts et les angles zénithaux de deux axes (A et B).

=====
 Ellipsoïde de confiance (3D)
 =====

Point	A (20%) [mm]	B (20%) [mm]	C (20%) [mm]	A (95.0%) [mm]	B (95.0%) [mm]	C (95.0%) [mm]	AZ (A) [gon]	ZD (A) [gon]	AZ (B) [gon]	ZD (B) [gon]
8001	0.75	0.64	0.50	2.10	1.78	1.39	245.69	100.04	345.69	99.78

Ellipse de confiance

L'ellipse d'erreur moyenne est la région dans laquelle la probabilité de trouver la valeur vraie du point recherché est de 39%. L'ellipse de confiance est déterminé en multipliant les normes des axes par le coefficient selon le niveau de confiance. Cette dernière est représentée par ses deux axes principaux (A et B) ainsi que l'azimut de son axe principal.

=====
 Ellipse de confiance (2D)
 =====

Point	A (39%) [mm]	B (39%) [mm]	A (95.0%) [mm]	B (95.0%) [mm]	AZ (A) [gon]
8001	0.75	0.64	1.84	1.56	245.69

Fiabilité externe

La fiabilité externe est représentée par le plus grand vecteur de déplacement des différents points. On retrouve sa norme (NA), son azimut (AZ) ainsi que son angle zénithal (ZD).

=====
 Fiabilité externe (alpha : 1.0%, beta : 5.0%)
 =====

Point	NA (20%)	NA (95.0%)	AZ (NA)	ZD (NA)	Observation responsable			
	[mm]	[mm]	[gon]	[gon]	Station/session	Stationnement	Point	Type
8001	2.05	5.73	395.19	99.92	8001	1	8003	RI

Observations

Cette partie regroupe toutes les observations ainsi que ses différents indicateurs.

Observations terrestres

Observations terrestres :
 =====

Station n° : 8001 Stationnement n° : 1 w : 100.000069 [gon] +/- 3.008 [cc]

ID	Type	Station	Stationnement	Point	Observ. [m/gon]	em a priori [mm/gon]	vi [mm/cc]	wi	zi	gi [mm/cc]	nabla_li [mm/cc]
1	DS	8001	1	9002	316.289294	1.93	-0.18	-0.10	+0.84		+8.13

Dans l'entête (de gauche à droite) :

- Station → numéro de la station (Compensation/Préanalyse)
- Stationnement → numéro du stationnement (Compensation/Préanalyse)
- w → inconnue d'orientation (Compensation)
- +/- → erreur moyenne de l'inconnue d'orientation (Compensation/Préanalyse)

Les éléments suivants se trouvent dans la partie du bas (de gauche à droite) :

- ID → ID de l'observation (Compensation/Préanalyse)
- Type → type d'observations (Compensation/Préanalyse)
- Station → numéro de la station (Compensation/Préanalyse)
- Stationnement → numéro du stationnement (Compensation/Préanalyse)
- Point → numéro du point observé (Compensation/Préanalyse)
- Observ. → valeur observée [m/gon] (Compensation)
- em a priori → écart-type a priori [mm/cc] (Compensation/Préanalyse)
- vi → erreur résiduelle de l'observation [mm/cc] (Compensation)
- wi → erreur résiduelle normée de l'observation (Compensation)
- zi → indicateur de fiabilité locale (Compensation/Préanalyse)
- gi → grandeur de la faute probable qui est calculée uniquement si le Wi dépasse le seuil [mm/cc] (Compensation)
- nabra_li → plus petite faute détectable [mm/cc] (Compensation/Préanalyse)

Observations GNSS

Observations GNSS :

=====

Session n° : 6001

ID	Type	Session	Point	Observ. [m/gon]	em a priori [mm/cc]	vi [mm/cc]	wi	zi	gi [mm/cc]	nabra_li [mm/cc]
46	LY	6001	8001	-0.001675	1.22	+0.87	+0.88	+0.65		+5.87

Dans l'entête, on retrouve :

- Session → Numéro de la session (Compensation/Préanalyse)

Les éléments suivants se trouvent dans la partie du bas :

- ID → ID de l'observation (Compensation/Préanalyse)
- Type → Type d'observations (Compensation/Préanalyse)
- Session → Numéro de la session (Compensation/Préanalyse)
- Point → Numéro du point observé (Compensation/Préanalyse)
- Observ. → Valeur observée [m/gon] (Compensation)
- em à priori → Écart-type a priori [mm/cc] (Compensation/Préanalyse)
- vi → Erreur résiduelle de l'observation [mm/cc] (Compensation)
- wi → Erreur résiduelle normée de l'observation (Compensation)
- zi → Indicateur de fiabilité locale (Compensation/Préanalyse)
- gi → Grandeur de la faute probable qui est calculée uniquement si le Wi dépasse le seuil [mm/cc] (Compensation)
- nabra_li → Plus petite faute détectable [mm/cc] (Compensation/Préanalyse)

Observations libre-ajusté

Observations libre-ajusté :

=====

Point n° : 8001

ID	Type	Point	Observ. [m/gon]	em a priori [mm/cc]	vi [mm/cc]	wi	zi	gi [mm/cc]	nabla_li [mm/cc]
100	y	8001	0.000000	1.00	+0.04	+0.16	+0.05		+16.43

Dans l'entête, on retrouve :

— Point → Numéro du point (Compensation/Préanalyse)

Les éléments suivants se trouvent dans la partie du bas :

— ID → ID de l'observation (Compensation/Préanalyse)

— Type → Type d'observations (Compensation/Préanalyse)

— Point → Numéro du point observé (Compensation/Préanalyse)

— Observ. → Valeur observée [m/gon] (Compensation)

— em a priori → Écart-type a priori [mm/cc] (Compensation/Préanalyse)

— vi → Erreur résiduelle de l'observation [mm/cc] (Compensation)

— wi → Erreur résiduelle normée de l'observation (Compensation)

— zi → Indicateur de fiabilité locale (Compensation/Préanalyse)

— gi → Grandeur de la faute probable qui est calculée uniquement si le Wi dépasse le seuil [mm/cc] (Compensation)

— nabla_li → Plus petite faute détectable [mm/cc] (Compensation/Préanalyse)

Wi

9 > Wmax (2.58)

=====

Les cinq plus grands Wi :

ID	Wi
75	4.22
30	4.10
91	3.55
106	3.26
122	3.16

Cette partie compte le nombre d'observations qui dépassent le seuil du Wi max. Il exporte également une liste comprenant les cinq plus grands Wi avec le numéro d'observations correspondant.

17 Import et export csv

Le logiciel TrinetPY permet de réaliser des imports et des exports au format csv. Ce dernier est compatible avec le logiciel Trinet+.

17.1 Import csv

Pour importer un fichier csv, il suffit de le convertir en format XML. Le script *ConversionMain.py* traite les observations et les points pour les convertir en format XML directement compatible avec le logiciel de compensation. De plus, sur la base des informations, il crée un fichier options.xml.

Les fichiers en entrée sont les suivants :

- observations.csv
- points.csv

Les fichiers en sortie sont les suivants :

- observations.xml
- points.xml
- options.xml (à valider par l'utilisateur)

Quelques paramètres doivent être préalablement réglés. :

Variables	Descriptions
nomFichierConversion	Liens vers les fichiers en entrée.
dossierExportConversion	Lien pour les fichiers résultats.
typeCoordonnee	Types de coordonnées en entrée (ex. x_y_z).

TABLE 22 – Paramètres pour la conversion

Il n'est pas possible de rentrer directement avec un fichier csv dans le logiciel car quelques informations du fichier options.xml doivent être contrôlées et adaptées selon les besoins de l'utilisateur.

17.2 Export csv

Pour l'export csv, l'utilisateur peut choisir la possibilité d'activer cette fonction directement dans le script *ParametresUtilisateurs.py*.

```
#Type de format d'export
exportType = {"CSV":True,
              "XML":True}
```

Les fichiers observations.csv et points.csv sont exportés directement après la compensation. Il est possible de réaliser cette action car aucun fichier d'options est créé.

18 Exemple simple d'utilisation

Cette section résume la partie pratique. En effet, il s'agit d'un cas qui reprend l'ensemble des éléments de cette partie. Les fichiers en entrée et en sortie se trouvent en annexe (annexe n° 3).

18.1 Configuration de l'exemple

Afin d'avoir un cas pratique complet pour illustrer au mieux l'utilisation des différents outils, des observations terrestres et GNSS sont utilisées. Dans ce chapitre, la méthodologie d'un réseau est décrite.

Le réseau comporte six points mesurés en trois sessions GNSS et depuis trois stations. Les points sont dans le cadre de référence MN95 et les altitudes sont basées sur l'ellipsoïde de Bessel.

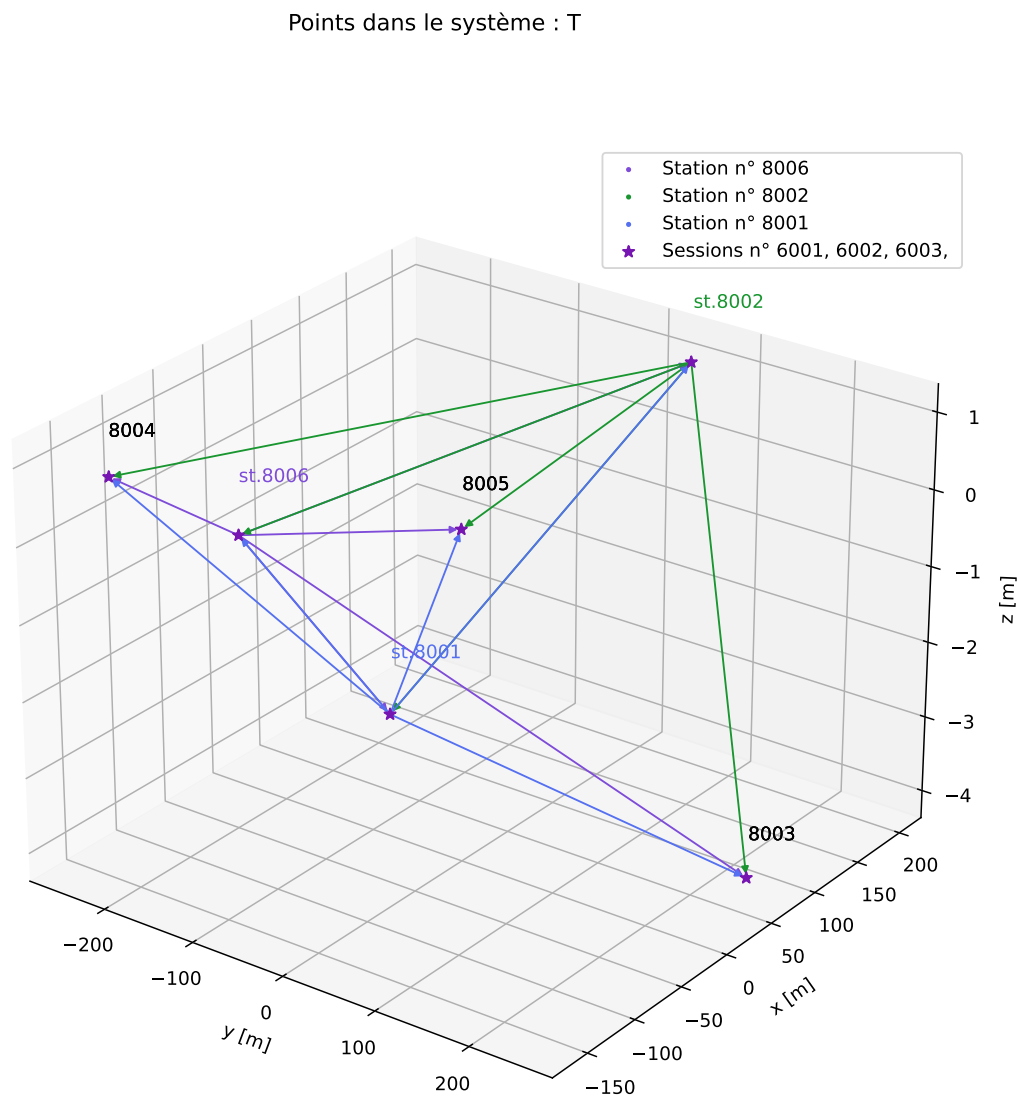


FIGURE 43 – Exemple simple d'utilisation

Pour tester tous les outils, les étapes suivantes sont effectuées. Il s'agit de la pipeline d'utilisation des outils dans ce travail de master.

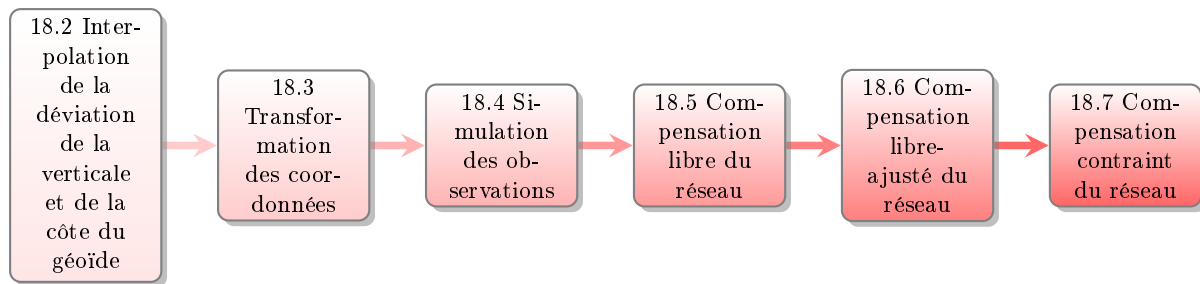


FIGURE 44 – Cas pratique

Lors de la lecture du rapport, il est intéressant d'ouvrir les différents fichiers pour comprendre au mieux le cas pratique. En effet, pour chaque étape, les fichiers en entrée et en sortie sont annexés.

18.1.1 Données en entrée

Les différentes données en entrée se trouvent dans l'annexe n° 3.

- **Points.xml** : Tous les points sont insérés dans ce fichier. Uniquement les bornes E, N, et h pour chaque point sont représentées.
- **Options.xml** : Toutes les options se trouvent dans ce fichier. Le nom du réseau est *CasPratique*. On y retrouve le topocentre dans le cadre de référence MN95. La génération du bruit sur les observations, la correction de la réfraction et la correction de la déviation de la verticale sont activées.
- **Canevas.xml** : Le canevas des observations se trouvent dans ce fichier. Il ne contient aucune valeur de mesures car ces dernières sont simulées. Cependant, les écarts-types des observations sont insérées. Il contient le canevas pour les observations terrestres et GNSS, les hauteurs d'instruments et de signaux ainsi que les différents groupes de distances, réfractions et sessions auxquels les mesures appartiennent.
- **PipelinesTransformationsCoordonnees.xml** : Les pipelines de transformations sont définies dans ce fichier. Dans ce cas pratique, les pipelines ci-dessous sont utiles :
 - PE vers T
 - PE vers CH1903+
 - T vers PE
- **ParametresUtilisateurs.py** : Les paramètres de l'utilisateur sont définis dans ce script. Les groupes de distances, de réfraction ainsi que les sessions sont définis dans ce fichier et sont retranscrits automatiquement dans le fichier options.xml après la simulation. Les ellipsoïdes et les liens vers les fichiers en entrée et en sortie sont également à l'intérieur. La liste exhaustive de ce fichier se trouve dans le chapitre des paramètres des outils.

18.2 Interpolation

Pour la première étape, les six points dans le fichier points.xml sont donnés en entrée du calcul de l'interpolation. Le fichier options.xml et le topocentre sont également fournis pour l'interpolation. Il est possible de changer la grille d'interpolation et la méthode d'interpolation dans le fichier *ParametresUtilisateurs.py* respectivement avec la variable *grilleData* et *methodeInterpolation*. Dans ce cas, la méthode linéaire et la grille *CHGeo2004.prn* de swisstopo sont utilisées. Pour démarrer le calcul, il suffit d'exécuter le script *InterpolationMain.py* (annexe n° 1). Puis, l'interpolation est terminée et la cote du géoïde ainsi que les composantes eta et xi de la déviation de la verticale sont ajoutées pour chaque point.

18.3 Transformation des coordonnées

Avant de pouvoir réaliser une simulation ou un ajustement, il est nécessaire de connaître les coordonnées des différents points dans le système T+. C'est à ce moment qu'intervient le transformateur des coordonnées et ses pipelines. Les fichiers points.xml et options.xml qui sortent directement de l'étape précédente d'interpolation sont pris en entrée. Le fichier *PipelinesTransformationsCoordonnees.xml* est également utilisé.

Les pipelines sont définies selon l'exemple dans le modèle de données. Il est possible de lancer le calcul. Le système de coordonnées en entrée est PE. Il est défini par la borne dans le fichier `points.xml`. Le système d'origine est donc récupéré automatiquement. Cependant, le système de destination (T) doit être précisé. Ce dernier est défini dans le fichier `ParametresUtilisateurs.py` dans le dictionnaire des transformations.

Pour le fichier `options.xml`, les coordonnées du topocentre doivent se trouver dans le système CH1903+. L'outil détecte donc la borne `codeCoordonnees` dans le fichier `options.xml` et le transforme automatique dans le système CH1903+. Il est important que la pipeline PE vers CH1903+ soit définie.

Pour démarrer le calcul, il suffit d'exécuter le script `PipelinesTransformationsMain.py` (annexe n° 1).

18.4 Simulation des observations

La déviation de la verticale et la cote du géoïde sont interpolées. Les coordonnées des points se trouvent dans le système T+ et le topocentre dans le système CH1903+. Toutes les conditions sont donc réunies pour réaliser une simulation. Les données en entrée sont les fichiers options.xml et point.xml obtenus à l'étape précédente. Il faut ajouter à cela le fichier canevas.xml qui contient le canevas des observations sans leur valeur. Le fichier complet se trouve en annexe (annexe n° 3).

```

<station>
  <numeroStation>8006</numeroStation>
  <stationnement>
    <numeroStationnement>1</numeroStationnement>
    <w0>100.0000</w0>
    <I>
      <ecartType>1</ecartType>
      <valeur>1.600</valeur>
    </I>
    <centrage>
      <ecartType>1</ecartType>
    </centrage>
    <observation>
      <numeroPoint>8001</numeroPoint>
      <groupeDistance>grDistDef</groupeDistance>
      <groupeRefraction>grRefDef</groupeRefraction>
      <S>
        <ecartType>1</ecartType>
        <valeur>1.500</valeur>
      </S>
      <centrage>
        <ecartType>1.0</ecartType>
      </centrage>
      <DS>
        <ecartType>
          <mm>1</mm>
          <ppm>1</ppm>
        </ecartType>
      </DS>
      <RI>
        <ecartType>1</ecartType>
      </RI>
    </observation>
  </stationnement>
</station>

```

FIGURE 45 – Canevas des observations terrestres

Les inconnues d'orientation et d'azimut, les hauteurs de signaux et d'instruments sont définies dans ce fichier. Les différents groupes de distances et de réfractions sont attribués. L'écart-type des observations est défini afin de pouvoir générer du bruit sur les observations.

Le canevas GNSS est le suivant :

```

<session>
  <numeroSession>6001</numeroSession>
  <observation>
    <numeroPoint>8001</numeroPoint>
    <centrage>
      <ecartType>1.0</ecartType>
    </centrage>
    <LY>
      <ecartType>3.0</ecartType>
    </LY>
    <LX>
      <ecartType>3.0</ecartType>
    </LX>
    <LZ>
      <ecartType>3.0</ecartType>
    </LZ>
  </observation>
</session>

```

FIGURE 46 – Canevas des observations GNSS

Pour démarrer le calcul, il suffit d'exécuter le script *SimMain.py* (annexe n° 1). Le résultat de la simulation pour l'exemple ci-dessus est le suivant.

```

<station>
  <numeroStation>8006</numeroStation>
  <stationnement>
    <numeroStationnement>1</numeroStationnement>
    <I>
      <ecartType>1.0</ecartType>
      <valeur>1.600</valeur>
    </I>
    <centrage>
      <ecartType>1.0</ecartType>
    </centrage>
    <observation>
      <numeroPoint>8001</numeroPoint>
      <groupeDistance>grDistDef</groupeDistance>
      <groupeRefraction>grRefDef</groupeRefraction>
      <S>
        <ecartType>1.0</ecartType>
        <valeur>1.500</valeur>
      </S>
      <centrage>
        <ecartType>1.0</ecartType>
      </centrage>
      <RI>
        <ecartType>1.0</ecartType>
        <valeur>26.714032</valeur>
        <ecarte>False</ecarte>
      </RI>
    </observation>
  </stationnement>
</station>

```

FIGURE 47 – Observations terrestres simulées

Le résultat pour les observations GNSS est le suivant :

```

<session>
  <numeroSession>6001</numeroSession>
  <observation>
    <numeroPoint>8001</numeroPoint>
    <centrage>
      <ecartType>1.0</ecartType>
    </centrage>
    <LY>
      <ecartType>3.0</ecartType>
      <valeur>74.997418</valeur>
      <ecarte>False</ecarte>
    </LY>
    <LX>
      <ecartType>3.0</ecartType>
      <valeur>-145.014687</valeur>
      <ecarte>False</ecarte>
    </LX>
    <LZ>
      <ecartType>3.0</ecartType>
      <valeur>-1.001743</valeur>
      <ecarte>False</ecarte>
    </LZ>
  </observation>
</session>

```

FIGURE 48 – Observations GNSS simulées

Les différentes valeurs des observations sont ajoutées et la borne w_0 est supprimée. Le fichier observations.xml est créé en sortie.

En ce qui concerne le fichier options.xml, il est complètement transformé automatiquement via la simulation. L'utilisateur doit régler les paramètres avant un ajustement. La totalité du fichier options.xml se trouve en annexe (annexe n° 3).

18.5 Compensation libre

Les mesures sont simulées. La suite est la compensation libre qui permet de contrôler la géométrie interne du réseau. De la même manière que pour les autres étapes, les fichiers en entrée et en sortie se trouvent en annexe (annexe n° 3).

Pour commencer, le fichier options.xml est adapté pour paramétrer un calcul libre.

```
<typeCompensation>libre</typeCompensation>
```

FIGURE 49 – Calcul d'une compensation libre

Dans cet exemple, tous les points sont utilisés comme conditions. Cela signifie que l'Helmert est réalisé sur l'ensemble des points du réseau. De plus, la configuration du réseau implique que les conditions sont composées de trois translations et une rotation autour de l'axe z.

```

<conditionHelmert>
  <pointsHelmert>
    <pointHelmert>8001</pointHelmert>
    <pointHelmert>8002</pointHelmert>
    <pointHelmert>8003</pointHelmert>
    <pointHelmert>8004</pointHelmert>
    <pointHelmert>8005</pointHelmert>
    <pointHelmert>8006</pointHelmert>
  </pointsHelmert>
  <parametresHelmert>
    <helmertTranslationY>True</helmertTranslationY>
    <helmertTranslationX>True</helmertTranslationX>
    <helmertTranslationZ>True</helmertTranslationZ>
    <helmertRotationY>False</helmertRotationY>
    <helmertRotationX>False</helmertRotationX>
    <helmertRotationZ>True</helmertRotationZ>
    <helmertFacteurDistance>False</helmertFacteurDistance>
    <helmertFacteurYXGNSS>False</helmertFacteurYXGNSS>
    <helmertFacteurZGNSS>False</helmertFacteurZGNSS>
  </parametresHelmert>
</conditionHelmert>

```

FIGURE 50 – Conditions d'Helmert

Tous les points sont automatiquement libérés. La constante d'addition et le facteur d'échelle du groupe sont estimés. Le coefficient de réfraction est également calculé. En ce qui concerne les sessions GNSS, les translations, les rotations et l'échelle planimétrique sont libérées.

Pour démarrer le calcul, il suffit d'exécuter le script *AjustementMain.py* (annexe n° 1). L'analyse du résultat est réalisée grâce au fichier *Listing.txt*.

Indicateur	Valeur	Explication
Wi (RI station 8006 Point 8001)	2.81	Cette valeur dépasse le seuil fixé. L'observation est écartée car il y a suffisamment de surabondance.
Wi (LY session 6003 Point 8001)	3.04	Cette valeur dépasse le seuil fixé. L'observation est écartée car il y a suffisamment de surabondance.

TABLE 23 – Analyse du résultat libre (1)

Le calcul est relancé en supprimant les deux observations.

Indicateur	Valeur	Explication
Nombre d'itération	3	Le calcul a convergé.
Quotient	0.67	Le modèle stochastique est légèrement pessimiste.
Quotient du groupe de distance <i>grDistDef</i>	0.57	Le modèle stochastique du groupe est légèrement pessimiste.
Quotient du groupe de réfraction <i>grRefDef</i>	0.76	Le modèle stochastique du groupe est légèrement pessimiste.
Quotient des sessions	entre 0.51 et 1.43	Le modèle stochastique est réaliste pour la plupart des composantes et sessions. On peut noter que les composantes LZ de la session 6001 sont pessimistes et LZ de la session 6002 sont légèrement optimistes.
Quotient des groupes d'observations	entre 0.57 et 1.06	Le modèle stochastique est réaliste pour la plupart des groupes d'observations. Cependant, il est légèrement pessimiste pour les distance 3D et les angles horizontaux.
Wi	Wi < Seuil (2.58)	Aucun Wi dépasse le seuil.
Zi	Zi > 0.25	La géométrie du réseau est convenable car les observations sont suffisamment contrôlées.

TABLE 24 – Analyse du résultat libre (2)

Pour les besoins de la démonstration, le modèle stochastique n'est pas adapté. Dans un cas réel, l'écart-type a priori doit être réduit pour que le modèle soit réaliste. Deux mesures sont écartées et la géométrie interne du réseau est validée.

18.6 Compensation libre-ajustée

La compensation libre-ajustée est l'étape suivante. Elle contrôle l'impact des points fixes sur le réseau. De la même manière que pour les autres étapes, les fichiers en entrée et en sortie se trouvent en annexe (annexe n° 3).

Pour commencer, le fichier options.xml est adapté pour paramétrer un calcul libre-ajusté.

```
<typeCompensation>libreAjuste</typeCompensation>
```

FIGURE 51 – Calcul d'une compensation libre-ajustée

Les points supposés fixes sont passés en observations. Puis, ces derniers sont automatiquement libérés. La constante d'addition et le facteur d'échelle du groupe sont estimés. Le coefficient de réfraction est également calculé. En ce qui concerne les sessions GNSS, les translations et les rotations sont libérées au contraire des échelles.

Pour démarrer le calcul, il suffit d'exécuter le script *AjustementMain.py* (annexe n° 1). L'analyse du résultat est réalisé grâce au fichier *Listing.txt*.

Indicateur	Valeur	Explication
Nombre d'itération	2	Le calcul a convergé.
Quotient	0.64	Le modèle stochastique est pessimiste.
Quotient des coordonnées comme observations	entre 0.13 et 0.61	Le modèle stochastique du groupe est trop pessimiste.
Écarts-types points fixes et nouveaux	< 1mm	Il y a une probabilité de 68% que la composante estimée du point se trouve à +/- 1mm de sa valeur vraie.
Wi	Wi < Seuil (2.57)	Aucun Wi dépasse le seuil.
Zi	Zi > 0.07 à 0.80	La géométrie du réseau est convenable car la plupart des observations est suffisamment contrôlée. Les composantes y et x comme observations du point 8004 ne sont pas suffisamment contrôlée. Une attention particulière doit être portée sur ce point.

TABLE 25 – Analyse du résultat libre-ajusté

Pour les besoins de la démonstration, le modèle stochastique des points comme observations n'est pas adapté. Dans un cas réel, l'écart-type a priori doit être réduit pour que le modèle soit réaliste. Cependant, on peut dire que aucun point fixe semble impacter le calcul. Il est possible de passer au réseau final.

18.7 Compensation contrainte

La compensation contrainte est l'étape suivante. Elle contrôle l'impact des points fixes sur le réseau. De la même manière que pour les autres étapes, les fichiers en entrée et en sortie se trouvent en annexe (annexe n° 3).

Pour commencer, le fichier options.xml est adapté pour paramétrer un calcul libre.

```
<typeCompensation>contraint</typeCompensation>
```

FIGURE 52 – Calcul d'une compensation contrainte

Les composantes des points 8002, 8003 et 8004 sont fixées. La constante d'addition et le facteur d'échelle du groupe sont estimés. Le coefficient de réfraction est également calculé. En ce qui concerne les sessions GNSS, les translations et les rotations sont libérées au contraire des échelles.

Pour démarrer le calcul, il suffit d'exécuter le script *AjustementMain.py* (annexe n° 1). L'analyse du résultat est réalisé grâce au fichier *Listing.txt*.

Indicateur	Valeur	Explication
Nombre d'itération	2	Le calcul a convergé.
Quotient	0.66	Le modèle stochastique est pessimiste.
Quotient du groupe de distance <i>grDistDef</i>	0.53	Le modèle stochastique du groupe est légèrement pessimiste.
Quotient du groupe de réfraction <i>grRefDef</i>	0.78	Le modèle stochastique du groupe est légèrement pessimiste.
Quotient des sessions	entre 0.51 et 1.46	Le modèle stochastique est réaliste pour la plupart des composantes et sessions. Nous pouvons noter que les composantes LZ de la session 6001 sont pessimistes et LZ de la session 6002 sont légèrement optimistes.
Quotient des groupes d'observations	entre 0.53 et 1.06	Le modèle stochastique est réaliste pour la plupart des groupes d'observations. Cependant, il est légèrement pessimiste pour les distance 3D et les angles horizontaux.
Écart-types points fixes et nouveaux	< 1mm	Il y a une probabilité de 68% que la composante estimée du point se trouve à +/- 1mm de sa valeur vraie.
Ellipsoïde de confiance des points nouveaux	2mm	Il y a une probabilité de 95% que le point estimé se trouve dans l'ellipsoïde.
Fiabilité externe	6mm	Il y a une probabilité de 95% que la plus grande faute non-détectable a une incidence de moins de 6mm sur les coordonnées.
Wi	Wi < Seuil (2.58)	Aucun Wi dépasse le seuil.
Zi	Zi > 0.25	La géométrie du réseau est convenable.

TABLE 26 – Analyse du résultat contraint

Le réseau est terminé. Il est validé. Du bruit de mesures est ajouté sur la base du modèle stochastique. Le résultat est cohérent avec ce dernier. En effet, les écarts-types des observations métriques sont fixés à un millimètre alors que ceux des angles sont définis à trois *cc*. Les résultats finaux se trouvent en annexe (annexe n°2). Les écarts avec les coordonnées de base sont inférieurs à un millimètre. Le modèle stochastique n'est pas adapté. Cependant, cela permet de montrer un exemple avec un modèle stochastique pessimiste ou optimiste.

Quatrième partie

Applications et expérimentation

19 Structure

Un dossier en annexe (annexe n° 4) contient les données en entrée et le résultat de chaque expérience. Un répertoire est également créé pour chaque sous-expérience.

20 Expérimentation de la transformation des coordonnées

Cette section permet de juger la valeur des transformations de coordonnées entre différents systèmes. Pour ce faire, différentes transformations sont réalisées dans TrinetPY puis comparées avec les résultats obtenus dans Trinet+. Chaque expérience est décrite en détail dans les différents chapitres suivants.

Le schéma ci-dessous illustre le réseau de points utilisé dans toute la section :

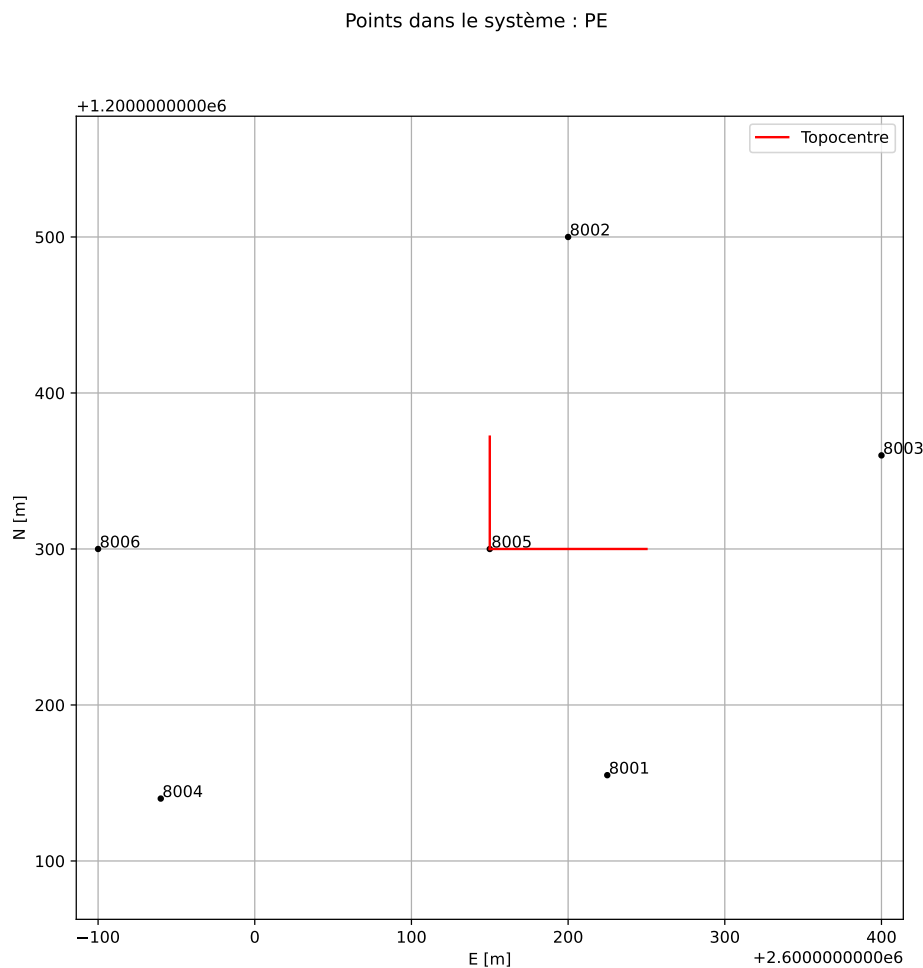


FIGURE 53 – Réseau pour l'expérimentation de la transformation des coordonnées

20.1 Expérience n° 1

20.1.1 Configuration

Les coordonnées du topocentre en MN95 avec altitude ellipsoïdale (PE) sont transformées dans le système CH1903+. La transformation est réalisée avec Trinet+ et TrinetPY. Puis, une comparaison est réalisée.

Coordonnées PE du topocentre :

2'600'150.000	1'200'300.000	391.000
---------------	---------------	---------

20.1.2 Résultat

Expérience n° 1.1 : Coordonnées MN95 - Ellipsoïdale vers coordonnées CH1903+

Voici le résultat obtenu avec les deux logiciels :

Composante	TrinetPY [m]	Trinet+ [m]	Différence [mm]
x	4324343.022064	4324343.022014	0.050
y	564823.561487	564823.561481	0.006
z	4638175.726648	4638175.726698	0.050

TABLE 27 – Topocentre PE vers CH1903+

Nous remarquons une différence de quelques centièmes de millimètres entre les deux logiciels. Afin de se rendre compte d'où vient cet écart, il est important de contrôler les différentes étapes intermédiaires du calcul.

Expérience n° 1.2 : Coordonnées MN95 - Ellipsoïdale vers coordonnées ellipsoïdales

Les coordonnées MN95 avec altitude sur l'ellipsoïde sont transformées en coordonnées ellipsoïdales.

Composante	TrinetPY [m]	Trinet+ [m]	Différence [mm]
long	7.4415541535	7.441554153	0.0000000005
lat	46.9551044113	46.955104412	-0.0000000007
h	391.000000	391.000000	0.000000

TABLE 28 – Topocentre ellipsoïdale

Il y a donc une légère différence entre le logiciel Trinet+ et TrinetPY. Elle vient du fait que le logiciel du travail de master fonctionne avec davantage de décimal que Trinet+. De plus, afin de calculer les coordonnées, une itération est réalisée pour le calcul de la latitude. On remarque qu'il s'agit de la composante où il y a le plus de différence.

Expérience n° 1.3 : Coordonnées ellipsoïdales vers coordonnées CH1903+

Afin de tester uniquement cette transformation, les coordonnées ellipsoïdales du logiciel de TrinetPY sont utilisées en entrée dans Trinet+.

Composante	TrinetPY [m]	Trinet+ [m]	Différence [mm]
x	4324343.022064	4324343.022065	-0.001
y	564823.561487	564823.561489	-0.002
z	4638175.726648	4638175.726649	-0.001

TABLE 29 – Topocentre ellipsoïde vers CH1903+

La plupart des différences sont supprimées. Il est possible de dire que cette transformation est semblable entre les deux logiciels.

Expérience n° 1.4 : Coordonnées CH1903+ vers coordonnées MN95 - Ellipsoïdale

La transformation inverse est réalisée afin de contrôler que l'on retombe sur le bon résultat. Pour ce faire, les coordonnées CH1903+ obtenues avec le logiciel TrinetPY sont utilisées.

Composante	TrinetPY [m]	Trinet+ [m]	Différence [mm]
E	2600150.00000	2600150.00000	0.000
N	1200300.00000	1200299.99993	0.070
h	391.00000	391.00000	0.000

TABLE 30 – Topocentre MN95

Il est donc possible de constater que l'écart est uniquement sur la composante Nord. Nous arrivons à la conclusion que la différence provient du calcul par itération de la latitude et du nombre de chiffres significatifs utilisés.

20.1.3 Conclusion

Cet expérimentation permet d'affirmer que la transformation du topocentre en CH1903+ est réalisée correctement dans TrinetPY. Certes, il existe une légère différence avec Trinet+ mais cette dernière provient du calcul par itération des coordonnées ellipsoïdales et du nombre de chiffres significatifs utilisé pour le calcul. On peut donc dire que la précision de la transformation obtenue est largement satisfaisante.

20.2 Expérience n° 2

20.2.1 Configuration

La deuxième expérience consiste à réaliser la transformation des coordonnées MN95 avec les altitudes sur l'ellipsoïde vers le système T+. Cette dernière se base sur le même réseau que l'expérience précédente.

Afin de contrôler uniquement la transformation des coordonnées, le topocentre CH1903+ obtenu avec TrinetPY est directement saisi dans Trinet+. Ceci permet de ne pas influencer le test avec le résultat explicite durant l'expérimentation n° 1.

Coordonnées CH1903+ du topocentre :

4324343.022064	564823.561487	4638175.726648
----------------	---------------	----------------

20.2.2 Résultat

Expérience n° 2.1 : Sans déviation de la verticale

La première partie consiste à contrôler la transformation sans tenir compte de la déviation de la verticale.

Numéro	Composante	TrinetPY [m]	Trinet+ [m]	Différence [mm]
8001	y	75.000933	75.000933	0.000
8001	x	-145.010764	-145.010693	-0.071
8001	z	-1.002091	-1.002089	-0.002
8002	y	50.008096	50.008096	0.000
8002	x	200.011053	200.011124	-0.071
8002	z	0.996664	0.996666	-0.002
8003	y	250.016652	250.016652	0.000
8003	x	59.997362	59.997433	-0.071
8003	z	-4.005174	-4.005172	-0.002
8004	y	-210.016907	-210.016907	0.000
8004	x	-160.004568	-160.004497	-0.071
8004	z	0.994539	0.994540	-0.002
8005	y	0.000000	0.000000	0.000
8005	x	0.000000	0.000071	-0.071
8005	z	0.000000	0.000002	-0.002
8006	y	-250.015260	-250.015260	0.000
8006	x	0.006285	0.006356	-0.071
8006	z	-1.004892	-1.004890	-0.001

TABLE 31 – Coordonnées T+ dans TrinetPY vs Trinet+ sans déviation de la verticale

Il existe donc un systématisme dans la différence entre les coordonnées calculées avec Trinet+ et le logiciel du travail de master. En effet, cela provient certainement de la transformation entre les coordonnées PE et ellipsoïdales de la même manière que le premier test. En effet, le logiciel Trinet+ travaille avec neuf décimales alors que le logiciel du travail de master travaille avec dix décimales. Ceci impacte directement le résultat.

Expérience n° 2.2 : Coordonnées ellipsoïdales (Bessel) vers coordonnées T+

Afin de valider les conclusions émises au chapitre précédent, une transformation entre les coordonnées ellipsoïdales vers les coordonnées T+ dans les deux logiciels est effectuée.

Numéro	Composante	TrinetPY [m]	Trinet+ [m]	Différence [mm]
8001	y	75.000933	75.000932	0.001
8001	x	-145.010764	-145.010765	0.001
8001	z	-1.002091	-1.002089	-0.002
8002	y	50.008096	50.008096	0.000
8002	x	200.011053	200.011054	-0.001
8002	z	0.996664	0.996666	-0.002
8003	y	250.016652	250.016655	-0.003
8003	x	59.997362	59.997365	-0.003
8003	z	-4.005174	-4.005172	-0.002
8004	y	-210.016907	-210.016908	0.001
8004	x	-160.004568	-160.004567	-0.001
8004	z	0.994539	0.994540	-0.001
8005	y	0.000000	0.000002	-0.002
8005	x	0.000000	0.000001	-0.001
8005	z	0.000000	0.000002	-0.002
8006	y	-250.015260	-250.015263	-0.003
8006	x	0.006285	0.006294	-0.009
8006	z	-1.004892	-1.004890	-0.002

TABLE 32 – Coordonnées T+ TrinetPY vs Trinet+ sans déviation de la verticale (2)

La comparaison entre les deux logiciels est presque identique. Cela confirme donc le fait que la différence provient de la transformation entre les coordonnées MN95 - ellipsoïdale vers coordonnées ellipsoïdales.

Expérience n° 2.3 : Avec déviation de la verticale

La deuxième partie consiste à contrôler la transformation en tenant compte de la déviation de la verticale.

Numéro	Composante	TrinetPY [m]	Trinet+ [m]	Différence [mm]
8001	y	75.001135	75.001582	-0.447
8001	x	-145.010663	-145.010359	-0.304
8001	z	-1.001577	-1.002216	0.639
8002	y	50.007817	50.007192	0.625
8002	x	200.011127	200.011347	-0.220
8002	z	0.995755	0.996195	-0.440
8003	y	250.016562	250.016360	-0.202
8003	x	59.997695	59.998555	-0.860
8003	z	-4.005755	-4.006306	0.551
8004	y	-210.016681	-210.016182	-0.499
8004	x	-160.004858	-160.005450	0.592
8004	z	0.995488	0.995637	-0.149
8005	y	0.000000	-0.000003	0.003
8005	x	0.000000	0.000067	-0.067
8005	z	0.000000	0.000003	0.003
8006	y	-250.015262	-250.015268	-0.006
8006	x	0.005931	0.005220	0.711
8006	z	-1.004564	-1.003832	-0.732

TABLE 33 – Coordonnées T+ dans TrinetPY vs Trinet+ avec déviation de la verticale

Une différence conséquente est remarquée entre les deux logiciels. Elle est due en partie à la transformation en coordonnées ellipsoïdales et en majorité à la méthode d'application de la déviation de la

verticale. En effet, dans le logiciel Trinet+, le défaut de la verticalité est appliqué. Il s'agit d'un modèle mathématique linéarisé. Cependant, grâce au modèle de transformation appliqué dans TrinetPY, la déviation de la verticale est appliquée de manière rigoureuse. Ce problème induit donc la différence entre les deux logiciels.

20.2.3 Conclusion

Cet expérimentation permet de conclure que la transformation de PE vers le système T+ est réalisée de manière correcte. Il est finalement possible de dire que la différence provient également de la transformation vers les coordonnées ellipsoïdales ainsi que de la façon d'appliquer de la déviation de la verticale.

21 Expérimentation du modèle mathématique

Cette section permet de juger la valeur du modèle mathématique implémenté dans ce logiciel. Pour ce faire, des simulations de mesures sont réalisées avec le simulateur. Puis, des ajustements sont réalisés avec le logiciel Trinet+. Chaque expérience est décrite en détails dans les chapitres suivants. Afin de tester uniquement le modèle mathématique, les coordonnées en T+ sont directement rentrées dans le logiciel et le topocentre est directement inséré en CH1903+. Il s'agit d'un calcul contraint. Le schéma ci-dessous illustre le réseau de observations utilisé dans toute la section :

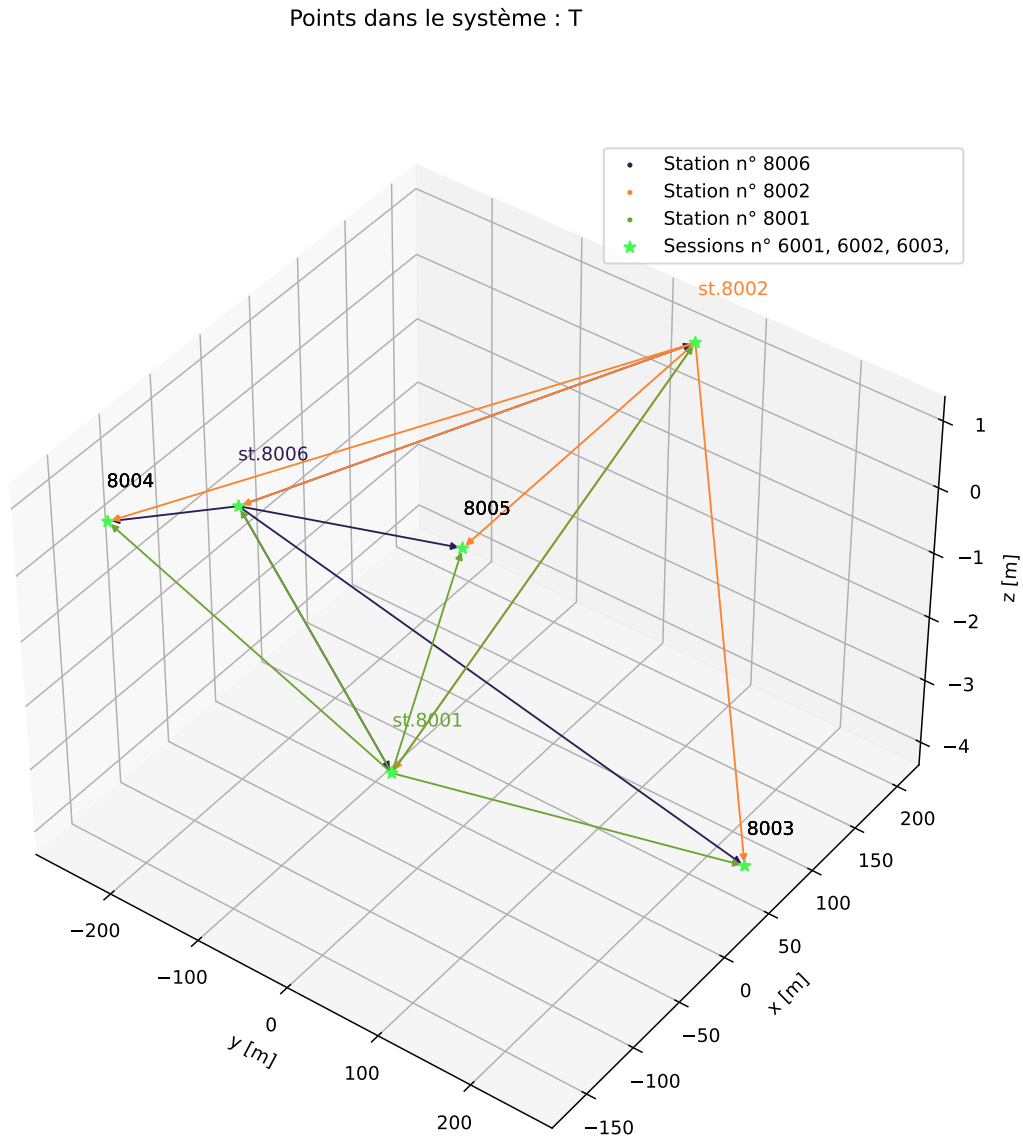


FIGURE 54 – Réseau pour l'expérimentation du modèle mathématique

Ce réseau contient des mesures d'angles zénithaux, de directions horizontales, de distances et GNSS. La taille du réseau est d'environ 100 m.

21.1 Expérience n° 3

21.1.1 Configuration

La troisième expérience consiste à réaliser un calcul d'ajustement avec le logiciel Trinet+ en utilisant des mesures parfaites simulées grâce au simulateur. Il n'y a donc aucun bruit de mesure sur ces dernières. Les coordonnées des points directement dans le système T+ sont utilisées pour le calcul. Les points 8002 à 8004 sont fixes.

21.1.2 Résultat

Expérience n° 3.1 : Observations terrestres sans déviation de la verticale

Pour cette première partie, la déviation de la verticale et la réfraction ne sont pas appliquées. De plus, aucune observation GNSS n'est effectuée dans cette première partie. Cependant, le modèle sphérique de la déviation de la verticale est activé dans Trinet+ pour prendre en compte la courbure de la Terre. Voici le résultat obtenu sur les points nouveaux :

Point Nr.	Y [m]	X [m]	Z [m]	emY [mm]	emX [mm]	emZ [mm]	DY [mm]	DX [mm]	DZ [mm]
8001	75.0011	-145.0107	-1.0016	0.017	0.014	0.012	0.007	-0.045	0.000
8005	-0.0000	-0.0000	-0.0000	0.019	0.020	0.017	-0.007	-0.022	-0.005
8006	-250.0153	0.0059	-1.0046	0.014	0.019	0.012	-0.061	-0.021	-0.013

TABLE 34 – Coordonnées estimées sans déviation de la verticale

Le résultat est plus que satisfaisant car les écarts-types sont de l'ordre du millième de millimètres. Puis, voici le résultat pour les observations :

Station	Point observé	Type	Valeur [m/gon]	Résidus Trinet+ [mm/cc]
8001	8002	DS	345.9320	-0.0
8001	8002	RI	380.3972	-0.0
8001	8002	ZD	99.6232	-0.0
8001	8003	DS	269.5693	-0.0
8001	8003	RI	29.9867	-0.1
8001	8003	ZD	100.6977	-0.0
8001	8004	DS	285.4194	-0.1
8001	8004	RI	281.6548	0.1
8001	8004	ZD	99.5434	0.0
8001	8005	DS	163.2617	-0.0
8001	8005	RI	354.6136	-0.0
8001	8005	ZD	99.5899	-0.0
8001	8006	DS	355.9010	-0.0
8001	8006	RI	311.7181	-0.0
8001	8006	ZD	99.9916	0.0

TABLE 35 – Observations et résidus sans déviation de la verticale

Station	Point observé	Type	Valeur [m/gon]	Résidus Trinet+ [mm/cc]
8002	8001	DS	345.9314	-0.0
8002	8001	RI	195.3969	-0.0
8002	8001	ZD	100.3584	-0.0
8002	8003	DS	244.1962	-0.1
8002	8003	RI	138.8821	-0.0
8002	8003	ZD	101.2910	-0.0
8002	8004	DS	444.0995	-0.1
8002	8004	RI	239.8217	-0.0
8002	8004	ZD	99.9929	-0.0
8002	8005	DS	206.1702	-0.0
8002	8005	RI	215.5979	0.0
8002	8005	ZD	100.2920	-0.0
8002	8006	DS	360.5826	-0.0
8002	8006	RI	262.5686	0.0
8002	8006	ZD	100.3443	0.0

TABLE 36 – Observations et résidus sans déviation de la verticale (2)

Station	Point observé	Type	Valeur [m/gon]	Résidus Trinet+ [mm/cc]
8006	8001	DS	355.9010	-0.0
8006	8001	RI	26.7147	0.0
8006	8001	ZD	100.0173	0.0
8006	8002	DS	360.5823	-0.0
8006	8002	RI	362.5654	0.0
8006	8002	ZD	99.6645	0.0
8006	8003	DS	503.6274	-0.1
8006	8003	RI	392.3958	0.0
8006	8003	ZD	100.3920	0.0
8006	8004	DS	164.9453	-0.0
8006	8004	RI	84.4030	-0.2
8006	8004	ZD	99.2666	-0.1
8006	8005	DS	250.0170	-0.0
8006	8005	RI	399.9988	0.0
8006	8005	ZD	99.7697	0.0

TABLE 37 – Observations et résidus sans déviation de la verticale (3)

Les résidus sont quasiment inexistantes. Le modèle terrestre pour ces observations est donc validé.

Expérience n° 3.2 : Avec la déviation de la verticale

Cette deuxième partie réalise exactement le même calcul que précédemment mais en corrigeant la déviation de la verticale et en tenant compte de la réfraction.

Voici le résultat obtenu sur les points nouveaux :

Point Nr.	Y [m]	X [m]	Z [m]	emY [mm]	emX [mm]	emZ [mm]	DY [mm]	DX [mm]	DZ [mm]
8001	75.0011	-145.0107	-1.0016	0.101	0.084	0.070	0.008	-0.044	0.023
8005	-0.0000	-0.0000	0.0002	0.117	0.118	0.102	-0.006	-0.022	0.180
8006	-250.0153	0.0059	-1.0043	0.084	0.116	0.071	-0.060	-0.024	0.162

TABLE 38 – Coordonnées estimées avec déviation de la verticale

Le résultat est satisfaisant. Cependant, un écart s'est ajouté, dû à l'application différente de la déviation de la verticale entre les deux systèmes.

Puis, voici le résultat pour les observations :

Station	Point observé	Type	Valeur [m/gon]	Résidus Trinet+ [mm/cc]
8001	8002	DS	345.9320	-0.0
8001	8002	RI	380.3971	-0.0
8001	8002	ZD	99.6232	0.3
8001	8003	DS	269.5693	-0.0
8001	8003	RI	29.9867	-0.1
8001	8003	ZD	100.6977	-0.1
8001	8004	DS	285.4194	-0.1
8001	8004	RI	281.6547	0.1
8001	8004	ZD	99.5434	0.5
8001	8005	DS	163.2617	-0.0
8001	8005	RI	354.6135	-0.0
8001	8005	ZD	99.5899	-0.2
8001	8006	DS	355.9010	-0.0
8001	8006	RI	311.7181	-0.0
8001	8006	ZD	99.9915	0.3

TABLE 39 – Observations et résidus avec déviation de la verticale

Station	Point observé	Type	Valeur [m/gon]	Résidus Trinet+ [mm/cc]
8002	8001	DS	345.9314	-0.0
8002	8001	RI	195.3968	-0.0
8002	8001	ZD	100.3583	0.5
8002	8003	DS	244.1962	-0.1
8002	8003	RI	138.8820	-0.0
8002	8003	ZD	101.2910	-0.3
8002	8004	DS	444.0995	-0.1
8002	8004	RI	239.8216	-0.0
8002	8004	ZD	99.9928	1.0
8002	8005	DS	206.1702	-0.0
8002	8005	RI	215.5978	-0.0
8002	8005	ZD	100.2920	0.2
8002	8006	DS	360.5826	-0.0
8002	8006	RI	262.5685	0.0
8002	8006	ZD	100.3442	0.8

TABLE 40 – Observations et résidus avec déviation de la verticale (2)

Station	Point observé	Type	Valeur [m/gon]	Résidus Trinet+ [mm/cc]
8006	8001	DS	355.9010	-0.0
8006	8001	RI	26.7146	0.0
8006	8001	ZD	100.0173	0.3
8006	8002	DS	360.5823	-0.0
8006	8002	RI	362.5654	0.0
8006	8002	ZD	99.6645	0.1
8006	8003	DS	503.6274	-0.1
8006	8003	RI	392.3958	-0.0
8006	8003	ZD	100.3920	0.2
8006	8004	DS	164.9453	-0.0
8006	8004	RI	84.4030	-0.2
8006	8004	ZD	99.2666	0.9
8006	8005	DS	250.0170	-0.0
8006	8005	RI	399.9988	0.0
8006	8005	ZD	99.7697	-0.1

TABLE 41 – Observations et résidus avec déviation de la verticale (3)

Un léger écart apparaît sur les angles zénithaux. Ceci est dû à la différence d'application de la déviation de la verticale entre les deux logiciels. En effet, ces observations sont les plus sensibles à la déviation de la verticale.

Expérience n° 3.3 : Observations GNSS

La configuration est la même hormis les observations terrestres sont remplacées par trois sessions GNSS mesurant tous les points.

Point Nr.	Y [m]	X [m]	Z [m]	emY [mm]	emX [mm]	emZ [mm]	DY [mm]	DX [mm]	DZ [mm]
8001	75.0011	-145.0107	-1.0016	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8005	0.0000	0.0000	0.0000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8006	-250.0153	0.0059	-1.0046	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

TABLE 42 – Coordonnées estimées

Le résultat est très satisfaisant car la totalité des composantes des points se trouve à zéro.

Session	Point observé	Type	Valeur [m/gon]	Résidus Trinet+ [mm/cc]
6001	8001	Y	75.0011	0.0
6001	8001	X	-145.0107	0.0
6001	8001	Z	-1.0016	0.0
6001	8002	Y	50.0078	0.0
6001	8002	X	200.0111	0.0
6001	8002	Z	0.9958	0.0
6001	8003	Y	250.0166	0.0
6001	8003	X	59.9977	0.0
6001	8003	Z	-4.0058	0.0
6001	8004	Y	-210.0167	0.0
6001	8004	X	-160.0049	0.0
6001	8004	Z	0.9955	0.0
6001	8005	Y	0.0000	0.0
6001	8005	X	0.0000	0.0
6001	8005	Z	0.0000	0.0
6001	8006	Y	-250.0153	0.0
6001	8006	X	0.0059	0.0
6001	8006	Z	-1.0046	0.0

TABLE 43 – Observations et résidus GNSS

Session	Point observé	Type	Valeur [m/gon]	Résidus Trinet+ [mm/cc]
6002	8001	Y	75.0011	0.0
6002	8001	X	-145.0107	0.0
6002	8001	Z	-1.0016	0.0
6002	8002	Y	50.0078	0.0
6002	8002	X	200.0111	0.0
6002	8002	Z	0.9958	0.0
6002	8003	Y	250.0166	0.0
6002	8003	X	59.9977	0.0
6002	8003	Z	-4.0058	0.0
6002	8004	Y	-210.0167	0.0
6002	8004	X	-160.0049	0.0
6002	8004	Z	0.9955	0.0
6002	8005	Y	0.0000	0.0
6002	8005	X	0.0000	0.0
6002	8005	Z	0.0000	0.0
6002	8006	Y	-250.0153	0.0
6002	8006	X	0.0059	0.0
6002	8006	Z	-1.0046	0.0

TABLE 44 – Observations et résidus GNSS (2)

Les observations sont parfaites, ce qui prouve que la différence sur les observations terrestres provient de la déviation de la verticale. En effet, les observations GNSS ne sont pas impactées par la déviation de la verticale.

Expérience n° 3.4 : Observations terrestres et GNSS

Pour terminer, les observations terrestres et GNSS sont mélangées dans le calcul. Les observations sont corrigées de la déviation de la verticale et de la réfraction.

Point Nr.	Y [m]	X [m]	Z [m]	emY [mm]	emX [mm]	emZ [mm]	DY [mm]	DX [mm]	DZ [mm]
8001	75.0011	-145.0107	-1.0016	0.066	0.057	0.048	0.008	-0.041	0.016
8005	-0.0000	-0.0000	0.0002	0.074	0.075	0.066	-0.005	-0.018	0.150
8006	-250.0153	0.0059	-1.0044	0.057	0.076	0.049	-0.055	-0.020	0.150

TABLE 45 – Coordonnées terrestres et GNSS du réseau à 100 mètres

Le résultat est très satisfaisant pour les réseaux de moyenne taille car la totalité des composantes des points se trouve inférieur au dixième de millimètre.

Station	Point observé	Type	Valeur [m/gon]	Résidus Trinet+ [mm/cc]
8001	8002	DS	345.9320	-0.0
8001	8002	RI	295.3971	-0.0
8001	8002	ZD	99.6232	0.3
8001	8003	DS	269.5693	-0.0
8001	8003	RI	344.9867	-0.1
8001	8003	ZD	100.6977	-0.1
8001	8004	DS	285.4194	-0.1
8001	8004	RI	196.6547	0.1
8001	8004	ZD	99.5434	0.5
8001	8005	DS	163.2617	-0.0
8001	8005	RI	269.6135	-0.0
8001	8005	ZD	99.5899	-0.1
8001	8006	DS	355.9010	-0.0
8001	8006	RI	226.7181	-0.0
8001	8006	ZD	99.9915	0.3

TABLE 46 – Observations et résidus terrestres du réseau à 100 mètres

Station	Point observé	Type	Valeur [m/gon]	Résidus Trinet+ [mm/cc]
8002	8001	DS	345.9314	-0.0
8002	8001	RI	95.3968	-0.0
8002	8001	ZD	100.3583	0.5
8002	8003	DS	244.1962	-0.1
8002	8003	RI	38.8820	-0.0
8002	8003	ZD	101.2910	-0.3
8002	8004	DS	444.0995	-0.1
8002	8004	RI	139.8216	-0.0
8002	8004	ZD	99.9928	1.0
8002	8005	DS	206.1702	-0.0
8002	8005	RI	115.5978	-0.0
8002	8005	ZD	100.2920	0.3
8002	8006	DS	360.5826	-0.0
8002	8006	RI	162.5685	0.0
8002	8006	ZD	100.3442	0.8

TABLE 47 – Observations et résidus terrestres du réseau à 100 mètres (2)

Station	Point observé	Type	Valeur [m/gon]	Résidus Trinet+ [mm/cc]
8006	8001	DS	355.9010	-0.0
8006	8001	RI	26.7146	0.0
8006	8001	ZD	100.0173	0.3
8006	8002	DS	360.5823	-0.0
8006	8002	RI	362.5654	0.0
8006	8002	ZD	99.6645	0.1
8006	8003	DS	503.6274	-0.1
8006	8003	RI	392.3958	-0.0
8006	8003	ZD	100.3920	0.1
8006	8004	DS	164.9453	-0.0
8006	8004	RI	84.4030	-0.2
8006	8004	ZD	99.2666	0.8
8006	8005	DS	250.0170	-0.0
8006	8005	RI	399.9988	0.0
8006	8005	ZD	99.7697	-0.0

TABLE 48 – Observations et résidus terrestres du réseau à 100 mètres (3)

Session	Point observé	Type	Valeur [m/gon]	Résidus Trinet+ [mm/cc]
6001	8001	Y	75.0011	0.0
6001	8001	X	-145.0107	-0.0
6001	8001	Z	-1.0016	0.0
6001	8002	Y	50.0078	0.0
6001	8002	X	200.0111	-0.0
6001	8002	Z	0.9958	-0.1
6001	8003	Y	250.0166	-0.0
6001	8003	X	59.9977	0.0
6001	8003	Z	-4.0058	-0.0
6001	8004	Y	-210.0167	0.0
6001	8004	X	-160.0049	0.0
6001	8004	Z	0.9955	-0.1
6001	8005	Y	0.0000	0.0
6001	8005	X	0.0000	-0.0
6001	8005	Z	0.0000	0.1
6001	8006	Y	-250.0153	-0.0
6001	8006	X	0.0059	-0.0
6001	8006	Z	-1.0046	0.1

TABLE 49 – Observations et résidus GNSS du réseau à 100 mètres

Session	Point observé	Type	Valeur [m/gon]	Résidus Trinet+ [mm/cc]
6002	8001	Y	75.0011	0.0
6002	8001	X	-145.0107	-0.0
6002	8001	Z	-1.0016	0.0
6002	8002	Y	50.0078	0.0
6002	8002	X	200.0111	-0.0
6002	8002	Z	0.9958	-0.1
6002	8003	Y	250.0166	-0.0
6002	8003	X	59.9977	0.0
6002	8003	Z	-4.0058	-0.0
6002	8004	Y	-210.0167	0.0
6002	8004	X	-160.0049	0.0
6002	8004	Z	0.9955	-0.1
6002	8005	Y	0.0000	0.0
6002	8005	X	0.0000	-0.0
6002	8005	Z	0.0000	0.1
6002	8006	Y	-250.0153	-0.0
6002	8006	X	0.0059	-0.0
6002	8006	Z	-1.0046	0.1

TABLE 50 – Observations et résidus GNSS du réseau à 100 mètres (2)

Session	Point observé	Type	Valeur [m/gon]	Résidus Trinet+ [mm/cc]
6003	8001	Y	75.0011	0.0
6003	8001	X	-145.0107	-0.0
6003	8001	Z	-1.0016	0.0
6003	8002	Y	50.0078	0.0
6003	8002	X	200.0111	-0.0
6003	8002	Z	0.9958	-0.1
6003	8003	Y	250.0166	-0.0
6003	8003	X	59.9977	0.0
6003	8003	Z	-4.0058	-0.0
6003	8004	Y	-210.0167	0.0
6003	8004	X	-160.0049	0.0
6003	8004	Z	0.9955	-0.1
6003	8005	Y	0.0000	0.0
6003	8005	X	0.0000	-0.0
6003	8005	Z	0.0000	0.1
6003	8006	Y	-250.0153	-0.0
6003	8006	X	0.0059	-0.0
6003	8006	Z	-1.0046	0.1

TABLE 51 – Observations et résidus GNSS du réseau à 100 mètres (3)

21.1.3 Conclusion

Le résultat est très satisfaisant et les observations sont presque parfaites. Le modèle mathématique du travail de master est donc validé. Il existe quelques différences avec Trinet+ mais ces différences sont dues à des choix différents.

21.2 Expérience n° 4

21.2.1 Configuration

Afin de déterminer l'impact de la différence d'application de la déviation de la verticale en fonction de la taille du réseau, cette expérience reprend exactement l'expérience précédente. Cependant, la taille des réseaux est différente. Il s'agit d'un calcul contraint.

21.2.2 Résultats

Expérience n° 4.1 : Réseau à une dizaine de mètres

Cette expérience utilise un réseau d'une dizaine de mètres autour du topocentre. Les trois stations et les trois sessions GNSS sont conservées. La déviation de la verticale et la réfraction sont également appliquées.

Point Nr.	Y [m]	X [m]	Z [m]	emY [mm]	emX [mm]	emZ [mm]	DY [mm]	DX [mm]	DZ [mm]
8001	12.0005	-8.0008	-1.0000	0.001	0.001	0.001	0.002	-0.003	-0.000
8005	-0.0000	-0.0000	0.0000	0.001	0.001	0.001	-0.001	-0.001	0.000
8006	-0.0004	-15.0009	-1.0000	0.001	0.001	0.001	-0.001	-0.004	0.000

TABLE 52 – Coordonnées estimées du réseau à 10 mètres

Le résultat est très satisfaisant car la totalité des composantes des points se trouve inférieur au centième de millimètre.

Voici le résultat pour les observations terrestres :

Station	Point observé	Type	Valeur [m/gon]	Résidus Trinet+ [mm/cc]
8001	8002	DS	18.2275	-0.0
8001	8002	RI	292.9570	-0.1
8001	8002	ZD	92.8252	-0.0
8001	8003	DS	25.2345	-0.0
8001	8003	RI	268.2122	-0.0
8001	8003	ZD	107.4596	0.0
8001	8004	DS	28.9362	-0.0
8001	8004	RI	184.4058	0.0
8001	8004	ZD	95.4860	0.0
8001	8005	DS	14.4613	-0.0
8001	8005	RI	237.4351	-0.0
8001	8005	ZD	95.3736	-0.0
8001	8006	DS	13.8934	-0.0
8001	8006	RI	166.3834	-0.0
8001	8006	ZD	99.7707	0.0

TABLE 53 – Observations terrestre du réseau à 10 mètres

Station	Point observé	Type	Valeur [m/gon]	Résidus Trinet+ [mm/cc]
8002	8001	DS	18.2166	-0.0
8002	8001	RI	92.9570	-0.0
8002	8001	ZD	106.8276	0.0
8002	8003	DS	11.8540	-0.0
8002	8003	RI	224.2252	0.0
8002	8003	ZD	127.4244	0.2
8002	8004	DS	36.0716	-0.0
8002	8004	RI	151.2497	0.0
8002	8004	ZD	99.9115	-0.0
8002	8005	DS	14.1749	-0.0
8002	8005	RI	150.0016	-0.0
8002	8005	ZD	104.2695	0.0
8002	8006	DS	26.9980	-0.0
8002	8006	RI	124.2254	-0.0
8002	8006	ZD	104.6019	0.0

TABLE 54 – Observations terrestre du réseau à 10 mètres (2)

Station	Point observé	Type	Valeur [m/gon]	Résidus Trinet+ [mm/cc]
8006	8001	DS	13.8937	-0.0
8006	8001	RI	366.3832	-0.0
8006	8001	ZD	100.4584	-0.0
8006	8002	DS	26.9944	-0.0
8006	8002	RI	324.2253	-0.0
8006	8002	ZD	95.5157	-0.0
8006	8003	DS	29.1670	-0.0
8006	8003	RI	300.0015	-0.0
8006	8003	ZD	106.7794	0.0
8006	8004	DS	16.1134	-0.0
8006	8004	RI	200.0015	0.1
8006	8004	ZD	92.4758	-0.0
8006	8005	DS	15.0279	-0.0
8006	8005	RI	300.0015	-0.0
8006	8005	ZD	96.1853	-0.0

TABLE 55 – Observations terrestre du réseau à 10 mètres (3)

Voici le résultat pour les observations GNSS :

Session	Point observé	Type	Valeur [m/gon]	Résidus Trinet+ [mm/cc]
6001	8001	Y	12.0005	0.0
6001	8001	X	-8.0008	-0.0
6001	8001	Z	-1.0000	-0.0
6001	8002	Y	10.0009	-0.0
6001	8002	X	10.0004	0.0
6001	8002	Z	0.9999	0.0
6001	8003	Y	0.0003	-0.0
6001	8003	X	14.0008	0.0
6001	8003	Z	-4.0001	0.0
6001	8004	Y	-16.0013	0.0
6001	8004	X	-15.0005	0.0
6001	8004	Z	1.0000	-0.0
6001	8005	Y	0.0000	-0.0
6001	8005	X	0.0000	0.0
6001	8005	Z	0.0000	0.0
6001	8006	Y	-0.0004	-0.0
6001	8006	X	-15.0009	-0.0
6001	8006	Z	-1.0000	0.0

TABLE 56 – Observations GNSS du réseau à 10 mètres

Session	Point observé	Type	Valeur [m/gon]	Résidus Trinet+ [mm/cc]
6002	8001	Y	12.0005	0.0
6002	8001	X	-8.0008	-0.0
6002	8001	Z	-1.0000	-0.0
6002	8002	Y	10.0009	-0.0
6002	8002	X	10.0004	0.0
6002	8002	Z	0.9999	0.0
6002	8003	Y	0.0003	-0.0
6002	8003	X	14.0008	0.0
6002	8003	Z	-4.0001	0.0
6002	8004	Y	-16.0013	0.0
6002	8004	X	-15.0005	0.0
6002	8004	Z	1.0000	-0.0
6002	8005	Y	0.0000	-0.0
6002	8005	X	0.0000	0.0
6002	8005	Z	0.0000	0.0
6002	8006	Y	-0.0004	-0.0
6002	8006	X	-15.0009	-0.0
6002	8006	Z	-1.0000	0.0

TABLE 57 – Observations GNSS du réseau à 10 mètres (2)

Session	Point observé	Type	Valeur [m/ gon]	Résidus Trinet+ [mm/cc]
6003	8001	Y	12.0005	0.0
6003	8001	X	-8.0008	-0.0
6003	8001	Z	-1.0000	-0.0
6003	8002	Y	10.0009	-0.0
6003	8002	X	10.0004	0.0
6003	8002	Z	0.9999	0.0
6003	8003	Y	0.0003	-0.0
6003	8003	X	14.0008	0.0
6003	8003	Z	-4.0001	0.0
6003	8004	Y	-16.0013	0.0
6003	8004	X	-15.0005	0.0
6003	8004	Z	1.0000	-0.0
6003	8005	Y	0.0000	-0.0
6003	8005	X	0.0000	0.0
6003	8005	Z	0.0000	0.0
6003	8006	Y	-0.0004	-0.0
6003	8006	X	-15.0009	-0.0
6003	8006	Z	-1.0000	0.0

TABLE 58 – Observations GNSS du réseau à 10 mètres (3)

Lors d'une faible distance, la différence induite par le modèle linéaire de la déviation de Trinet+ n'a presque aucun impact. La comparaison entre les deux modèles est identique.

Expérience n° 4.2 : Réseau à un kilomètre

Cette expérience utilise un réseau d'environ un kilomètre autour du topocentre. Les trois stations et les trois sessions GNSS sont conservées. La déviation de la verticale et la réfraction sont également appliquées.

Point Nr.	Y [m]	X [m]	Z [m]	emY [mm]	emX [mm]	emZ [mm]	DY [mm]	DX [mm]	DZ [mm]
8001	1012.0734	485.0056	-1.1044	0.674	0.865	0.618	0.104	-0.028	-2.744
8005	-0.0001	-0.0001	0.0029	0.988	0.926	0.869	-0.076	-0.087	2.489
8006	500.0254	-215.0252	-1.0226	0.792	0.723	0.649	0.020	-0.136	-0.058

TABLE 59 – Coordonnées du réseau à 1 kilomètres

En s'éloignant, le résultat se dégrade légèrement. Cependant, pour un réseau d'environ un kilomètre, la différence reste acceptable selon l'utilisation. Voici le résultat pour les observations terrestres :

Station	Point observé	Type	Valeur [m/gon]	Résidus Trinet+ [mm/cc]
8001	8002	DS	382.6895	0.0
8001	8002	RI	264.6091	-0.2
8001	8002	ZD	99.6597	-3.3
8001	8003	DS	1224.0819	-0.2
8001	8003	RI	191.0888	0.0
8001	8003	ZD	100.1483	2.6
8001	8004	DS	1604.3393	-0.3
8001	8004	RI	162.0942	0.0
8001	8004	ZD	99.9150	2.7
8001	8005	DS	1122.2855	-0.1
8001	8005	RI	171.5608	0.0
8001	8005	ZD	99.9343	1.0
8001	8006	DS	867.3156	-0.1
8001	8006	RI	140.2150	-0.0
8001	8006	ZD	99.9902	1.1

TABLE 60 – Observations terrestres du réseau à 1 kilomètres

Station	Point observé	Type	Valeur [m/gon]	Résidus Trinet+ [mm/cc]
8002	8001	DS	382.6889	0.0
8002	8001	RI	64.6070	-0.1
8002	8001	ZD	100.3236	3.4
8002	8003	DS	1125.2980	-0.2
8002	8003	RI	170.9485	0.0
8002	8003	ZD	100.2743	3.8
8002	8004	DS	1663.9839	-0.4
8002	8004	RI	147.3305	0.0
8002	8004	ZD	99.9944	3.2
8002	8005	DS	1145.5839	-0.1
8002	8005	RI	150.0098	0.0
8002	8005	ZD	100.0465	2.0
8002	8006	DS	1070.9202	-0.1
8002	8006	RI	118.7068	-0.0
8002	8006	ZD	100.1107	2.0

TABLE 61 – Observations terrestres du réseau à 1 kilomètres (2)

Station	Point observé	Type	Valeur [m/gon]	Résidus Trinet+ [mm/cc]
8006	8001	DS	867.3156	-0.1
8006	8001	RI	340.2097	-0.0
8006	8001	ZD	100.0133	0.7
8006	8002	DS	1070.9201	-0.1
8006	8002	RI	318.7037	-0.1
8006	8002	ZD	99.8921	-0.7
8006	8003	DS	877.4649	-0.1
8006	8003	RI	241.2054	0.0
8006	8003	ZD	100.2239	1.6
8006	8004	DS	840.2061	-0.2
8006	8004	RI	184.7048	0.1
8006	8004	ZD	99.8555	2.0
8006	8005	DS	544.2997	-0.0
8006	8005	RI	225.8596	-0.0
8006	8005	ZD	99.8919	-1.1

TABLE 62 – Observations terrestres du réseau à 1 kilomètre (3)

Voici le résultat pour les observations GNSS :

Session	Point observé	Type	Valeur [m/gon]	Résidus Trinet+ [mm/cc]
6001	8001	Y	1012.0733	0.0
6001	8001	X	485.0057	0.0
6001	8001	Z	-1.1020	-1.3
6001	8002	Y	810.0689	-0.1
6001	8002	X	810.0306	0.0
6001	8002	Z	0.8927	0.7
6001	8003	Y	-200.0047	0.0
6001	8003	X	314.0238	0.0
6001	8003	Z	-4.0119	-1.0
6001	8004	Y	-316.0292	0.0
6001	8004	X	-415.0180	0.1
6001	8004	Z	0.9808	-1.2
6001	8005	Y	0.0000	-0.1
6001	8005	X	0.0000	-0.0
6001	8005	Z	0.0000	2.3
6001	8006	Y	- 500.0254	0.0
6001	8006	X	-215.0250	-0.1
6001	8006	Z	-1.0229	0.5

TABLE 63 – Observations GNSS du réseau à 1 kilomètre

Session	Point observé	Type	Valeur [m/gon]	Résidus Trinet+ [mm/cc]
6002	8001	Y	1012.0733	0.0
6002	8001	X	485.0057	0.0
6002	8001	Z	-1.1020	-1.3
6002	8002	Y	810.0689	-0.1
6002	8002	X	810.0306	0.0
6002	8002	Z	0.8927	0.7
6002	8003	Y	-200.0047	0.0
6002	8003	X	314.0238	0.0
6002	8003	Z	-4.0119	-1.0
6002	8004	Y	-316.0292	0.0
6002	8004	X	-415.0180	0.1
6002	8004	Z	0.9808	-1.2
6002	8005	Y	0.0000	-0.1
6002	8005	X	0.0000	-0.0
6002	8005	Z	0.0000	2.3
6002	8006	Y	- 500.0254	0.0
6002	8006	X	-215.0250	-0.1
6002	8006	Z	-1.0229	0.5

TABLE 64 – Observations GNSS du réseau à 1 kilomètre (2)

Session	Point observé	Type	Valeur [m/gon]	Résidus Trinet+ [mm/cc]
6003	8001	Y	1012.0733	0.0
6003	8001	X	485.0057	0.0
6003	8001	Z	-1.1020	-1.3
6003	8002	Y	810.0689	-0.1
6003	8002	X	810.0306	0.0
6003	8002	Z	0.8927	0.7
6003	8003	Y	-200.0047	0.0
6003	8003	X	314.0238	0.0
6003	8003	Z	-4.0119	-1.0
6003	8004	Y	-316.0292	0.0
6003	8004	X	-415.0180	0.1
6003	8004	Z	0.9808	-1.2
6003	8005	Y	0.0000	-0.1
6003	8005	X	0.0000	-0.0
6003	8005	Z	0.0000	2.3
6003	8006	Y	500.0254	0.0
6003	8006	X	-215.0250	-0.1
6003	8006	Z	-1.0229	0.5

TABLE 65 – Observations GNSS du réseau à 1 kilomètre (3)

Le résultat pour un réseau d'environ un kilomètre est légèrement moins bon. En effet, l'angle zénithal du point 8003 depuis la station 8002 est impacté d'un écart latéral de 6.84 mm.

Expérience n° 4.3 : Réseau à dix kilomètres

Cette expérience utilise un réseau d'environ dix kilomètres autour du topocentre. Les trois stations et les trois sessions GNSS sont conservées. La déviation de la verticale et la réfraction sont également appliquées et les deux stations sont fixées.

Point Nr.	Y [m]	X [m]	Z [m]	emY [mm]	emX [mm]	emZ [mm]	DY [mm]	DX [mm]	DZ [mm]
8001	9012.6963	6485.1805	-10.7155	5.436	6.033	5.654	0.309	-0.539	-17.744
8005	-0.0001	-0.0003	-0.0028	6.052	6.094	6.578	-0.072	-0.277	-2.688
8006	5500.3065	-1215.2055	-3.5071	6.253	6.178	10.088	0.312	-0.609	-21.433

TABLE 66 – Coordonnées du réseau à 10 kilomètres

En s'éloignant à environ dix kilomètres, le résultat se dégrade fortement. La composante altimétrique est fortement impactée. En effet, la différence est de plus de six millimètres sur les coordonnées estimées. Voici le résultat pour les observations terrestres :

Station	Point observé	Type	Valeur [m/gon]	Résidus Trinet+ [mm/cc]
8001	8002	DS	2225.9910	-0.0
8001	8002	RI	209.4261	-0.4
8001	8002	ZD	99.8724	1.2
8001	8003	DS	19962.2246	-4.5
8001	8003	RI	173.2485	-0.2
8001	8003	ZD	99.9998	4.0
8001	8004	DS	15205.8491	-3.5
8001	8004	RI	160.2897	0.0
8001	8004	ZD	99.9559	2.8
8001	8005	DS	11103.4424	-2.3
8001	8005	RI	160.3877	0.0
8001	8005	ZD	99.9380	2.7
8001	8006	DS	8463.6228	-1.9
8001	8006	RI	127.3393	0.4
8001	8006	ZD	99.9453	0.8

TABLE 67 – Observations terrestres du réseau à 10 kilomètres

Station	Point observé	Type	Valeur [m/gon]	Résidus Trinet+ [mm/cc]
8006	8001	DS	2225.9909	-0.2
8006	8001	RI	9.4023	-0.2
8006	8001	ZD	100.1250	-3.6
8006	8002	DS	18125.7287	-4.2
8006	8002	RI	169.0141	-0.2
8006	8002	ZD	100.0152	5.4
8006	8003	DS	13698.8873	-3.1
8006	8003	RI	153.0355	-0.0
8006	8003	ZD	99.9715	3.4
8006	8004	DS	9631.3847	-1.9
8006	8004	RI	150.0735	0.0
8006	8004	ZD	99.9577	3.2
8006	8005	DS	8131.7184	-1.3
8006	8005	RI	110.3748	0.3
8006	8005	ZD	99.9778	-0.9

TABLE 68 – Observations terrestres du réseau à 10 kilomètres (2)

Station	Point observé	Type	Valeur [m/gon]	Résidus Trinet+ [mm/cc]
8006	8001	DS	8463.6229	-1.9
8006	8001	RI	327.3010	0.0
8006	8001	ZD	100.0559	-9.0
8006	8002	DS	8131.7185	-1.4
8006	8002	RI	310.3602	-0.1
8006	8002	ZD	100.0235	-7.5
8006	8003	DS	14708.4384	-3.2
8006	8003	RI	198.0198	0.0
8006	8003	ZD	100.0310	11.6
8006	8004	DS	8897.8408	-1.9
8006	8004	RI	191.4464	0.1
8006	8004	ZD	99.9767	11.3
8006	8005	DS	5632.9493	-0.9
8006	8005	RI	213.9001	-0.0
8006	8005	ZD	99.9606	9.1

TABLE 69 – Observations terrestres du réseau à 10 kilomètres (3)

Voici le résultat pour les observations GNSS :

Session	Point observé	Type	Valeur [m/gon]	Résidus Trinet+ [mm/cc]
6001	8001	Y	9012.6960	0.1
6001	8001	X	6485.1810	-0.2
6001	8001	Z	-10.6975	-7.1
6001	8002	Y	6810.5740	-0.3
6001	8002	X	6810.2549	0.3
6001	8002	Z	-6.3084	6.6
6001	8003	Y	-9200.5939	0.1
6001	8003	X	-1685.8838	0.0
6001	8003	Z	-10.8285	-5.9
6001	8004	Y	-3316.2605	0.0
6001	8004	X	-2415.0698	0.2
6001	8004	Z	-0.3040	5.4
6001	8005	Y	0.0000	-0.1
6001	8005	X	0.0000	-0.1
6001	8005	Z	0.0000	4.1
6001	8006	Y	-5500.3062	0.2
6001	8006	X	-1215.2048	-0.3
6001	8006	Z	-3.4855	-3.2

TABLE 70 – Observations GNSS du réseau à 10 kilomètres

Session	Point observé	Type	Valeur [m/gon]	Résidus Trinet+ [mm/cc]
6002	8001	Y	9012.6960	0.1
6002	8001	X	6485.1810	-0.2
6002	8001	Z	-10.6975	-7.1
6002	8002	Y	6810.5740	-0.3
6002	8002	X	6810.2549	0.3
6002	8002	Z	-6.3084	6.6
6002	8003	Y	-9200.5939	0.1
6002	8003	X	-1685.8838	0.0
6002	8003	Z	-10.8285	-5.9
6002	8004	Y	-3316.2605	0.0
6002	8004	X	-2415.0698	0.2
6002	8004	Z	-0.3040	5.4
6002	8005	Y	0.0000	-0.1
6002	8005	X	0.0000	-0.1
6002	8005	Z	0.0000	4.1
6002	8006	Y	-5500.3062	0.2
6002	8006	X	-1215.2048	-0.3
6002	8006	Z	-3.4855	-3.2

TABLE 71 – Observations GNSS du réseau à 10 kilomètres (2)

Session	Point observé	Type	Valeur [m/gon]	Résidus Trinet+ [mm/cc]
6003	8001	Y	9012.6960	0.1
6003	8001	X	6485.1810	-0.2
6003	8001	Z	-10.6975	-7.1
6003	8002	Y	6810.5740	-0.3
6003	8002	X	6810.2549	0.3
6003	8002	Z	-6.3084	6.6
6003	8003	Y	-9200.5939	0.1
6003	8003	X	-1685.8838	0.0
6003	8003	Z	-10.8285	-5.9
6003	8004	Y	-3316.2605	0.0
6003	8004	X	-2415.0698	0.2
6003	8004	Z	-0.3040	5.4
6003	8005	Y	0.0000	-0.1
6003	8005	X	0.0000	-0.1
6003	8005	Z	0.0000	4.1
6003	8006	Y	5500.3062	0.2
6003	8006	X	-1215.2048	-0.3
6003	8006	Z	-3.4855	-3.2

TABLE 72 – Observations GNSS du réseau à 10 kilomètres (3)

Le résultat pour un réseau d'environ dix kilomètres est réellement détérioré par le modèle linéarisé du défaut de la verticalité de Trinet+. Les angles zénithaux sont les observations les plus impactées. Le point 8003 mesuré depuis la station 8006 possède un écart latéral de 27 mm. Les observations GNSS qui ne sont pas impactées par la déviation de la verticale ont beaucoup moins de résidus.

21.2.3 Conclusion

Pour conclure, il est constaté que plus on s'éloigne du topocentre plus le modèle rigoureux de l'application de la déviation de la verticale est utile. Cependant, pour des réseaux proches du topocentre, il n'y a pas de différence significative entre Trinet+ et TrinetPY.

21.3 Expérience n° 5

21.3.1 Configuration

Le réseau des expériences ci-dessus n'utilise pas les observations de différence de coordonnées et d'azimut astronomique. Afin de s'assurer que le modèle fonctionnel de ces observations est également correct, un réseau d'une centaine de mètre est créé avec des observations de ce type. La déviation de la verticale n'est pas corrigée. En effet, il est question de tester le modèle fonctionnel sans tenir compte de l'impact de la déviation de la verticale qui est différent entre les deux logiciels.

Le réseau terrestre est composé d'une seule station :

Points dans le système : T

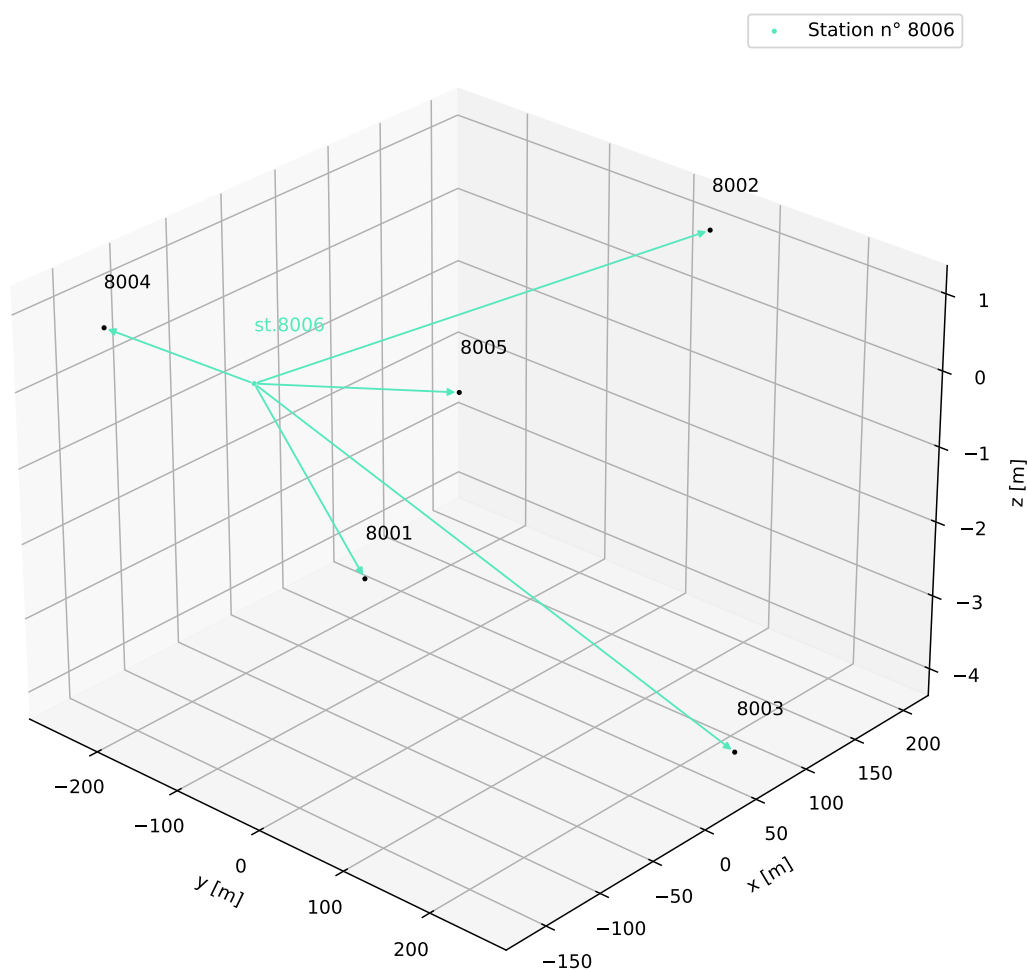


FIGURE 55 – Réseau pour l'expérimentation du modèle mathématique

21.3.2 Résultats

Station	Point observé	Type	Valeur [m/gon]	Résidus Trinet+ [mm/cc]
8006	8001	DS	355.9010	-0.1
8006	8001	AZ	126.7147	0.0
8006	8001	DYT	325.0164	0.0
8006	8001	DXT	-145.0166	-0.0
8006	8001	DH	0.0030	-0.0
8006	8002	DS	360.5823	-0.1
8006	8002	AZ	62.5654	0.0
8006	8002	DYT	300.0231	0.0
8006	8002	DXT	200.0052	0.0
8006	8002	DH	2.0003	0.0
8006	8003	DS	503.6274	-0.1
8006	8003	AZ	92.3958	0.0
8006	8003	DYT	500.0318	0.0
8006	8003	DXT	59.9918	0.0
8006	8003	DH	-3.0012	-0.0
8006	8004	DS	164.9453	-0.0
8006	8004	AZ	184.4030	-0.1
8006	8004	DYT	39.9986	0.0
8006	8004	DXT	-160.0108	0.0
8006	8004	DH	2.0001	-0.0
8006	8005	DS	250.0170	-0.0
8006	8005	AZ	99.9988	-0.0
8006	8005	DYT	250.0153	0.0
8006	8005	DXT	-0.0059	-0.0
8006	8005	DH	1.0046	0.0

TABLE 73 – Réseau avec mesures d'azimut et de différence d'altitude orthométrique

Les résidus sont nuls. Le modèle mathématique de tous les types d'observations a été testé. On remarque que les observations simulées sans bruit correspondent au modèle de Trinet+. Le modèle fonctionnel est donc similaire à Trinet+.

22 Expérimentation de la compensation

22.1 Expérience n° 6

22.1.1 Configuration

Afin de comparer les indicateurs de Trinet+ et de TrinetPY, cette expérience compense un réseau d'observations GNSS avec les deux logiciels et analyse les résultats. Cette dernière est réalisée de manière contrainte. En effet, le modèle mathématique est similaire entre les deux logiciels sur les observations GNSS. De plus, les coordonnées en T+ des points sont directement entrées dans les deux logiciels. Le résultat des indicateurs doit donc être sensiblement similaire. Un calcul libre, libre-ajusté et contraint est réalisé afin de contrôler tous les types de compensation.

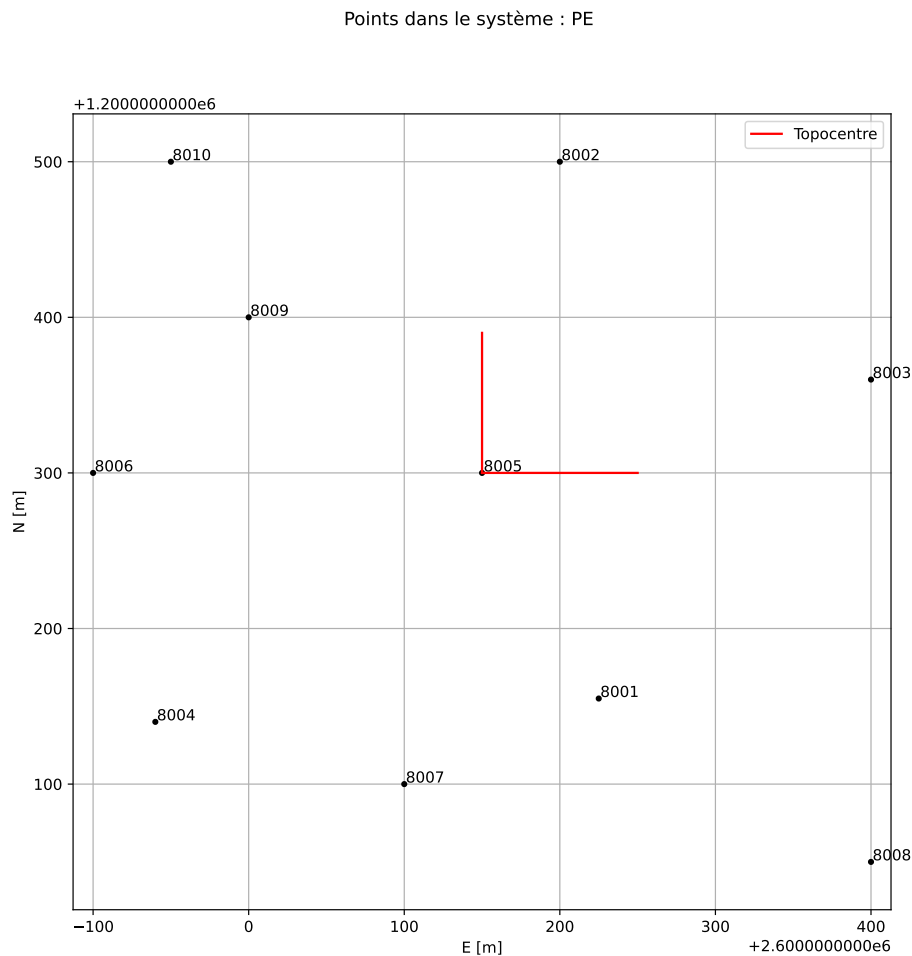


FIGURE 56 – Réseau pour l'expérience n° 6

22.1.2 Résultats

Le résultat de cette expérience se trouve en annexe pour des raisons d'esthétisme et de compréhension (annexe n° 4 / Experience_6). Les listing de Trinet+ et de TrinetPY permettent de comparer les deux résultats. De plus, un tableau effectue une synthèse de la comparaison.

22.1.3 Conclusion

Les résultats de cette expérience prouvent que les indicateurs sont calculés de manière similaire entre les deux logiciels. En effet, les écarts sont très faibles. Les résidus normés sont très importants et le résultat obtenu est très satisfaisant. Les indicateurs concordent entre les deux logiciels. Il est possible d'affirmer qu'aucune erreur majeure se trouve dans l'implémentation des indicateurs statistiques du logiciel TrinetPY.

22.2 Expérience n° 7

22.2.1 Configuration

L'estimation du coefficient de réfraction semble inédit dans les logiciels de compensation. Afin de la qualifier, un réseau de distances 3D, d'angles zénithaux et de directions horizontaux est réalisée afin d'estimer ce paramètre. De plus, cette expérience estime une constante d'addition et un facteur d'échelle pour les distances 3D. Le calcul est contraint.

Points dans le système : T

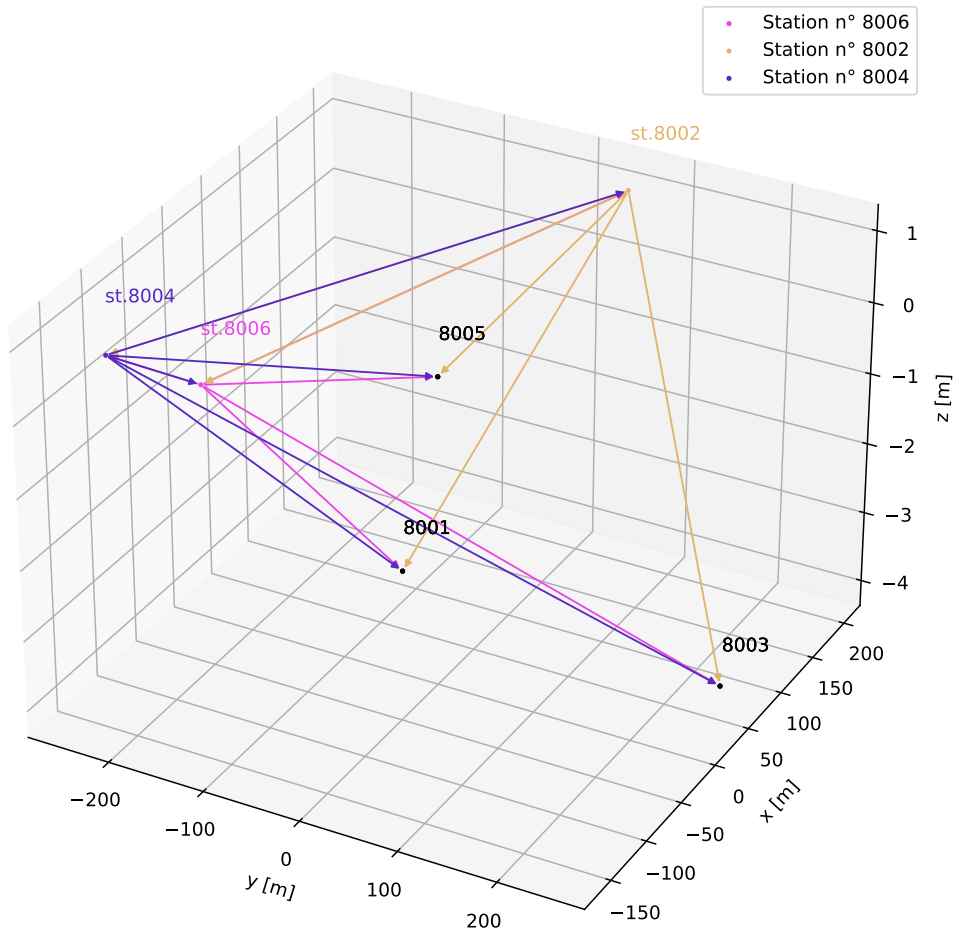


FIGURE 57 – Réseau pour l'expérience n° 7

Les observations sont simulées avec du bruit de mesure. Les paramètres intéressants pour cette expérience sont les suivants :

Composante	Valeur vraie	Inconnue approchée
Coefficient de réfraction	10.0000	0.13
Constante d'addition	0.500	0.000
Facteur d'échelle	1.500	1.000

TABLE 74 – Expérience n° 7

Ensuite, le réseau est compensé et le coefficient de réfraction, la constante d'addition et le facteur d'échelle sont estimés. Cette opération est répétée 500 fois.

22.2.2 Résultats

1. **Coefficient de réfraction** : La courbe de distribution normale des valeurs du coefficient estimé doit logiquement être centrée sur la valeur vraie. Le graphique ci-dessous représente ce résultat :

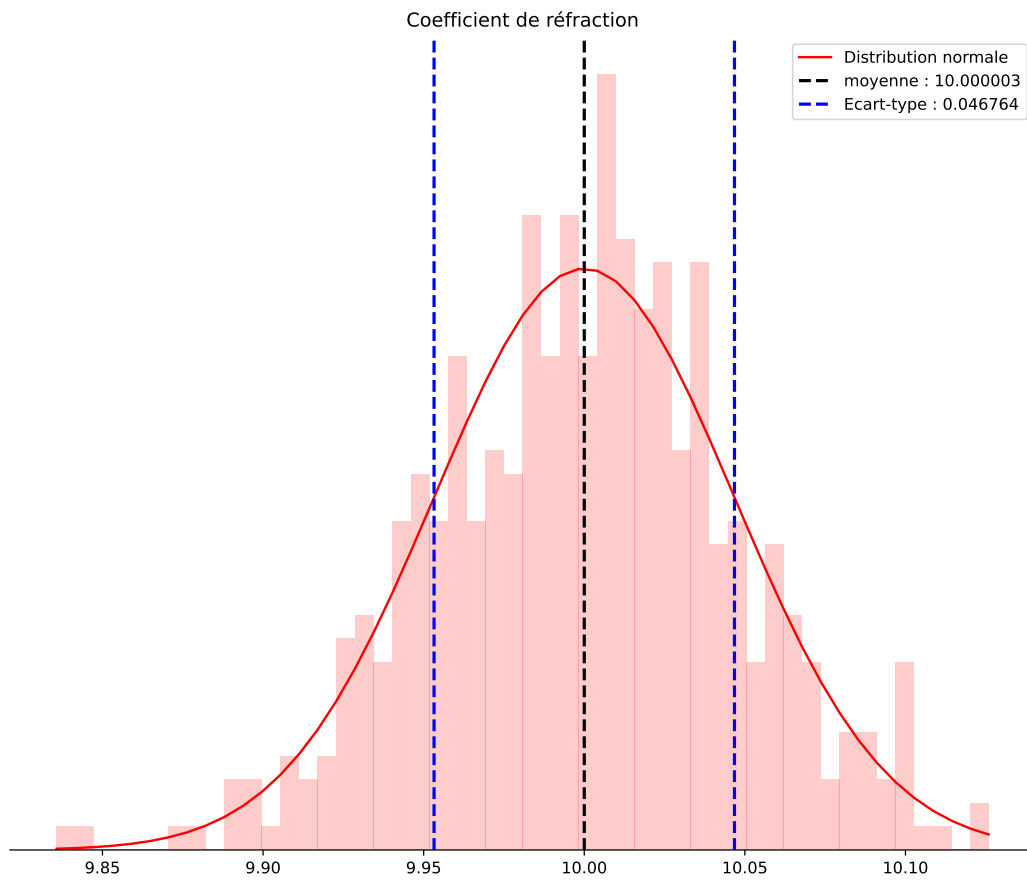


FIGURE 58 – Courbe de distribution normale pour la réfraction

On constate que la moyenne des valeurs se situe à 10.000003 [-]. De plus, l'écart-type des valeurs à un sigma se trouve à 0.046764 [-]. Ainsi, 68% des coefficients de réfractons se trouvent entre 9.953239 m et 10.046767 [-]. Il y a une différence de 0.000003 [-] entre la moyenne (10.000000 [-]) et la valeur vraie (10.000003 [-]).

2. **Constante d'addition** : La courbe de distribution normale des valeurs de la constante d'addition estimée doit logiquement être centrée sur la valeur vraie. Le graphique ci-dessous représente ce résultat :

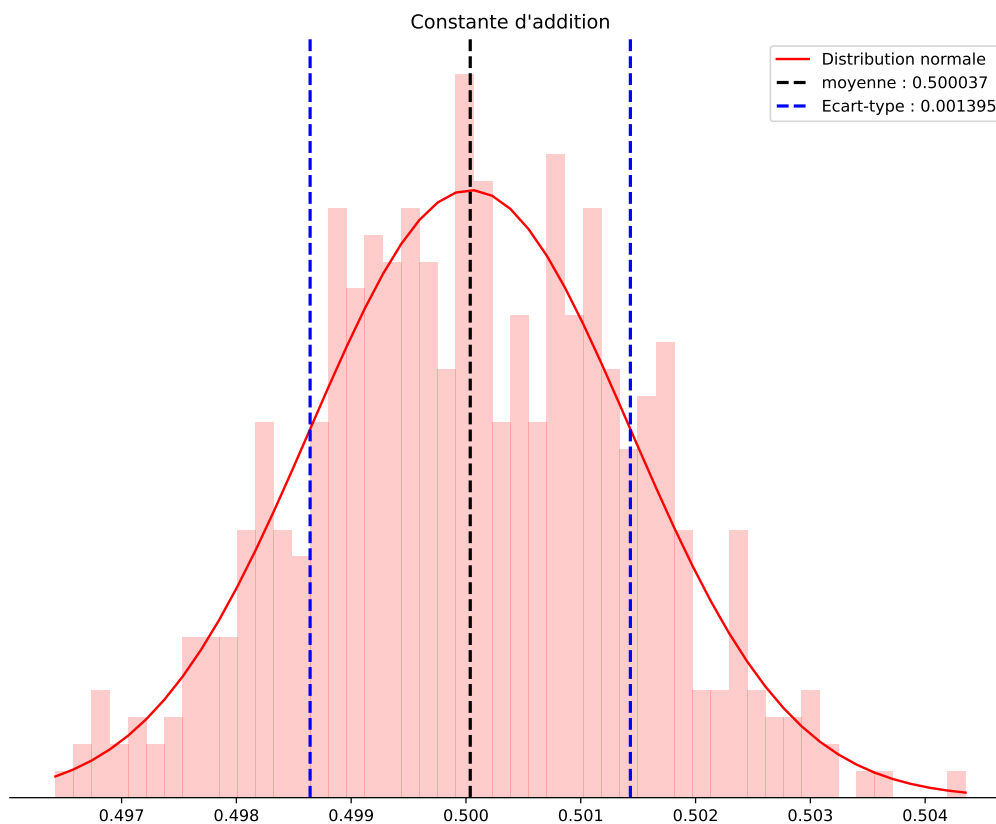


FIGURE 59 – Courbe de distribution normale pour la constante d'addition

On constate que la moyenne des valeurs se situe à 0.500037 m. De plus, l'écart-type des valeurs à un sigma se trouve à 0.001395 m. Ainsi, 68% des constantes d'addition se trouvent entre 0.498642 m et 0.501432 m. La différence entre la valeur vraie et la moyenne est de 0.037 mm.

3. **Facteur d'échelle** : La courbe de distribution normale des valeurs du facteur d'échelle estimé doit logiquement être centré sur la valeur vraie. Le graphique ci-dessous représente ce résultat :

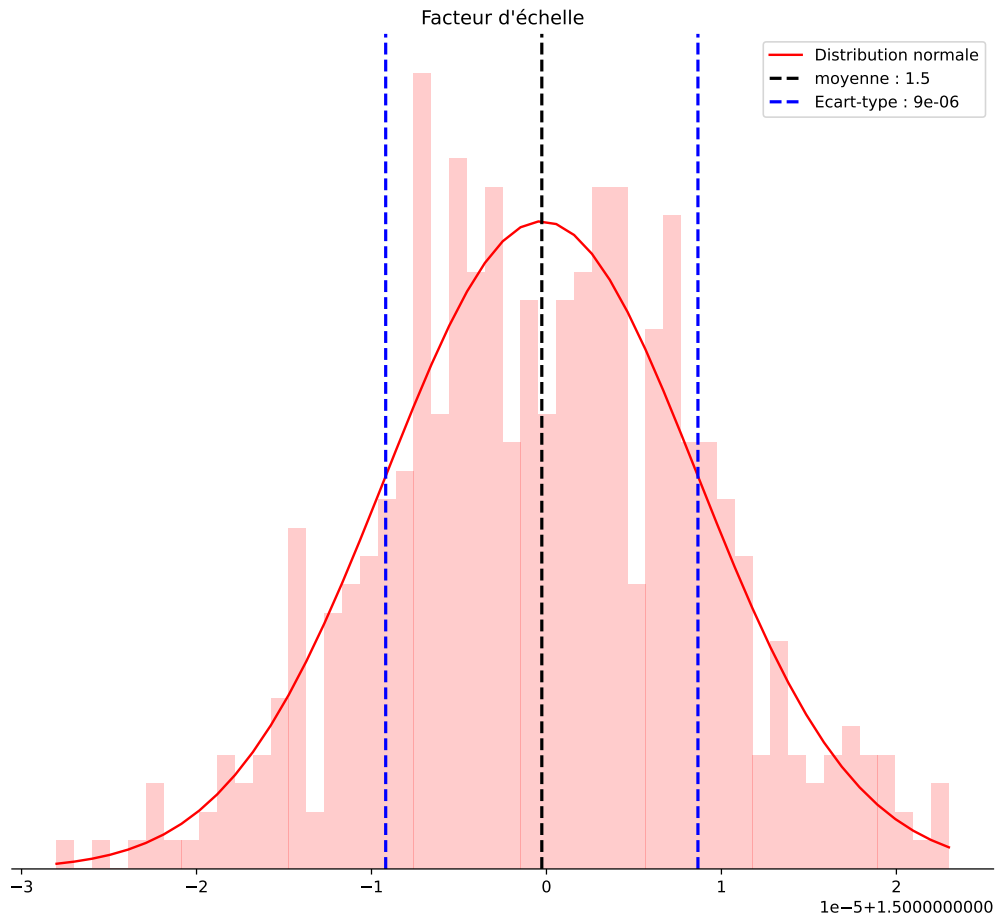


FIGURE 60 – Courbe de distribution normale pour le facteur d'échelle

Nous constatons que la moyenne des valeurs se situe à 1.500000 [-]. De plus, l'écart-type des valeurs à un sigma se trouve à 0.000009 [-]. Ainsi, 68% des facteurs d'échelle se trouvent entre 1.499991 [-] et 1.500009 [-].

22.2.3 Conclusion

Le résultat montre que lorsque le nombre de simulations tend vers l'infini, la moyenne correspond à la valeur vraie. Dans l'exemple, les trois courbes sont centrées très proche de la valeur vraie. Cela démontre que l'estimation des différents paramètres de cet exemple est correct.

22.3 Expérience n° 8

22.3.1 Configuration

Afin de tester l'ajustement, il est intéressant de comparer les coordonnées utilisées pour de la simulation des observations et les coordonnées estimées lors de l'ajustement. Le réseau de l'expérience n° 7 est utilisé pour cette expérience. La compensation est contrainte. Le facteur d'échelle et la constante d'addition sont estimés. Cependant, le coefficient de réfraction n'est pas estimé.

22.3.2 Résultats

Expérience 8.1 : Sans bruit de mesures

La première partie consiste à réaliser le calcul sans bruit sur les mesures.

Numéro	Composante	Coordonnée pour la simulation	Coordonnée estimée	Différence [mm]	Écart-type [mm]
8001	y	75.001135	75.001134	0.001	0.001
8001	x	-145.010663	-145.010663	0.000	0.001
8001	z	-1.001577	-1.001577	0.000	0.001
8005	y	0.000000	-0.000001	0.001	0.001
8005	x	0.000000	-0.000000	0.000	0.001
8005	z	0.000000	-0.000000	0.000	0.001

TABLE 75 – Expérience n° 8 sans bruit sur les mesures

La différence entre les coordonnées est quasiment nulle. De plus, les différences se trouvent dans l'intervalle de confiance à 68% formée par l'écart-type. La compensation est donc correcte lorsqu'il y a pas de bruit sur les mesures.

Expérience 8.2 : Avec bruit de mesures

La deuxième partie consiste à réaliser le calcul avec du bruit sur les mesures.

Numéro	Composante	Coordonnée pour la simulation	Coordonnée estimée	Différence [mm]	Écart-type [mm]
8001	y	75.001135	75.001355	0.220	1.038
8001	x	-145.010663	-145.009924	-0.739	0.966
8001	z	-1.001577	-1.000521	-1.056	0.796
8005	y	0.000000	-0.000523	0.523	0.952
8005	x	0.000000	0.000981	-0.981	0.910
8005	z	0.000000	0.001474	1.474	0.779

TABLE 76 – Expérience n° 8 avec du bruit sur les mesures

La différence entre les coordonnées est d'environ 1mm.

Afin de qualifier l'estimation des coordonnées, les observations sont simulées et ajustées 500 fois. L'analyse est réalisée uniquement sur la composante y du point 8001.

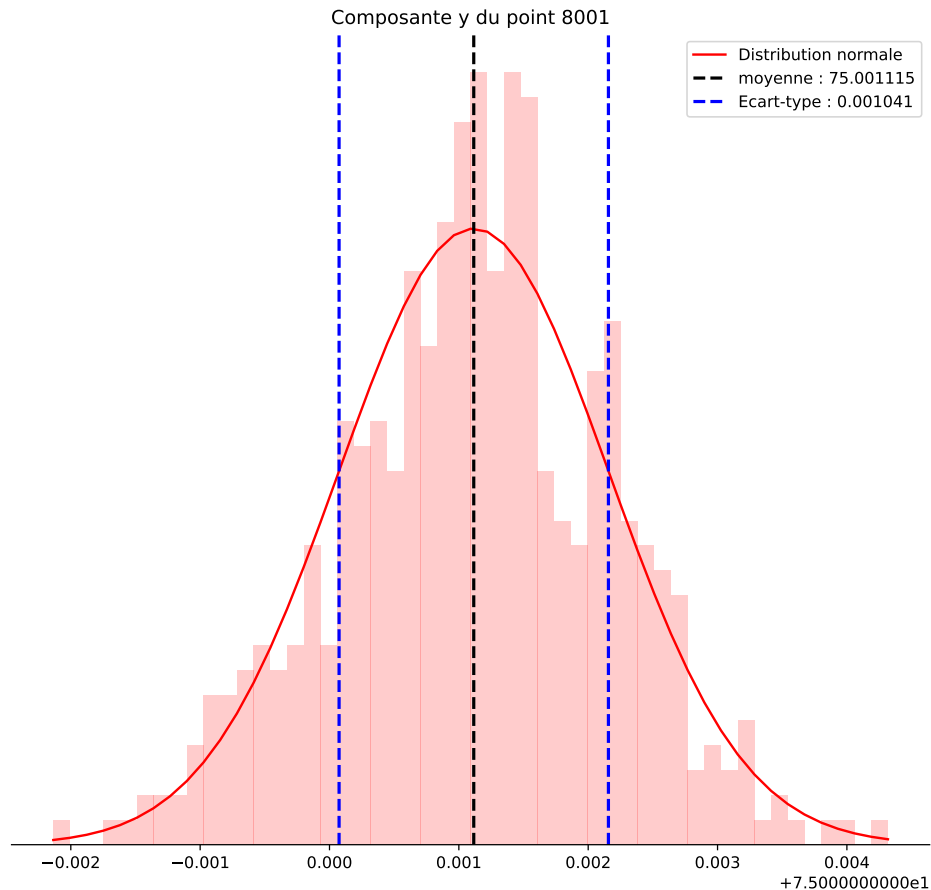


FIGURE 61 – Courbe de distribution normale pour la composante y du point 8001

On constate que la moyenne des valeurs se situent à 75.001115m. De plus, l'écart-type des valeurs à un sigma se trouve à 0.001041 m. Ainsi, 68% des composantes du point se trouvent entre 75.000074 m et 75.002156 m. La différence entre la valeur vraie (75.001135) et la moyenne (75.001115) des 500 valeurs est de 0.02 mm. On remarque donc que cela tend vers la valeur vraie.

22.3.3 Conclusion

Cette expérience prouve que lors d'un calcul d'ajustement les coordonnées sont estimées correctement. En effet, lorsque du bruit est généré sur les observations, l'estimation des coordonnées tend vers la valeur vraie.

22.4 Expérience n° 9

22.4.1 Configuration

Afin de tester la capacité du logiciel à détecter des fautes dans le réseau, des fautes sont ajoutées. Le réseau de l'expérience n° 7 est utilisé pour cette expérience. De plus, du bruit sur les mesures est ajouté. Le facteur d'échelle, la constante d'addition et le coefficient de réfraction ne sont pas estimés.

La compensation est libre car cela permet de détecter des tensions dans le réseau. Les trois translations et une rotation autour de l'axe z sont ajoutés dans les conditions d'Helmert. Tous les points sont utilisés pour le calage sur les coordonnées approchées.

22.4.2 Résultats

Expérience 9.1 : Une seule erreur

La première étape est d'ajouter une seule faute grossière d'un mètre sur la distance entre la station 8006 et le point 8001.

Type d'observations	Station	Point visé	Valeur sans l'erreur	Valeur avec l'erreur
DS	8006	8001	355.901027	356.901027

TABLE 77 – Une seule erreur

Le résultat de l'ajustement avec l'erreur de 1m sur un distance est la suivante :

Type d'observations	Station	Point visé	v [mm]	W_i	g_i [mm]	Faute insérée [mm]	Différence [mm]
DS	8006	8001	-653.78	-412.57	1000.06	1000.00	-0.06

TABLE 78 – Détection de la faute sur une observation

La faute probable sur la distance 3D vaut 1000.06 mm. On remarque que cela correspond à la valeur de la faute insérée dans les observations. De plus, le W_i sur cette observation est le plus grand du calcul.

Expérience 9.2 : Plusieurs erreurs

La deuxième étape est d'ajouter plusieurs fautes grossières dans le réseau.

Type d'observations	Station	Point visé	Valeur sans l'erreur	Valeur avec l'erreur
DS	8006	8001	355.901027	356.901027
RI	8006	8002	362.565422	363.065422
ZD	8004	8001	100.469767	100.869767

TABLE 79 – Plusieurs erreurs

Le résultat de l'ajustement avec les erreurs sur un distance est la suivante :

Type d'observations	Station	Point visé	v [mm/cc]	W_i	g_i [mm/cc]	Faute insérée [mm/cc]	Différence [mm/cc]
DS	8006	8001	-480.19	-303.01	734.48	1000.00	-265.52
RI	8006	8002	-2810.52	-1378.49	4883.09	5000.00	-116.91
ZD	8004	8001	-2310.46	-939.55	4005.40	4000.00	-5.40

TABLE 80 – Détection de plusieurs fautes sur une observation

Le plus grand W_i concerne l'observation d'angle zénithal sur le point 8001 depuis la station 8004. La faute probable (g_i) sur cette observation est bien détectée car il y a seulement 5.40 cc de différence avec la valeur insérée. Le deuxième W_i est celui de l'observation de direction horizontale sur le point 8002 depuis la station 8006. On remarque que la faute est également bien repérée. En ce qui concerne l'observation de distance 3D, le W_i n'est pas dans les plus élevés. Il est donc nécessaire de travailler par itération. L'angle zénithal doit tout d'abord être écarté. Puis, la direction horizontale doit être également supprimée du calcul. Pour finir, le réseau se retrouve dans la configuration de l'expérience avec une seule erreur. Dans ce cas, l'erreur est bien détectée et elle peut être éliminée du réseau.

22.4.3 Conclusion

Pour conclure, le réseau est capable de localiser des fautes insérées sur des observations. Avec une seule erreur, la valeur de la faute probable correspond précisément à la valeur vraie. Lors qu'il y a plusieurs erreurs, il est important de travailler par itération pour déceler les problèmes. La compensation semble donc pouvoir détecter différentes fautes dans les réseaux.

23 Conclusion sur l'expérimentation

Les expériences démontrent que le logiciel fonctionne correctement et qu'aucune erreur conséquente d'implémentation entache le code source. Les différents tests se basent sur le logiciel Trinet+ qui a déjà largement fait ses preuves et sur différents autres tests. Ce résultat est donc très satisfaisant.

On constate que les grosses différences interviennent sur les réseaux de longues distances. Le modèle fonctionnel de TrinetPY semble être rigoureux. Ceci limite donc l'impact d'une grande distance par rapport au topocentre. Cependant, ce modèle implique une maîtrise totale du champ de pesanteur et une parfaite connaissance des composantes de la déviation de la verticale sur l'ensemble des points du réseau.

Le tableau ci-dessous définit l'ordre de grandeur de la différence entre le modèle mathématique de Trinet+ et de TrinetPY. Ceci revient à comparer l'application du défaut de verticalité (Trinet+) et l'utilisation de la déviation de la verticale en utilisant l'équation d'observations rigoureuse dans le système dans lequel l'observation est réalisée (TrinetPY).

Ordre de grandeur du réseau [m]	Ordre de grandeur sur une coordonnée y et x estimées [mm]	Ordre de grandeur sur une coordonnée z estimées [mm]
10	0.000	0.000
100	0.010	0.100
1000	0.100	2.000
10000	0.500	20.000

TABLE 81 – Paramètres pour la conversion

Tous les types de calcul, les indicateurs statistiques, les transformations de coordonnées et le modèle mathématique sont donc validés. L'estimation est également testée et aucune erreur grossière semble survenir.

Afin de terminer les tests, il est intéressant d'ajouter des compensations de réseaux réels. En raison du manque de temps, ces expériences ne sont pas réalisées. Toutefois, les réseaux effectués par simulation permettent largement de tester le logiciel.

Cinquième partie

Conclusion et perspective

24 Analyse du travail

Cette partie dresse le bilan du travail et traite les différentes perspectives.

24.1 Comparaison entre le travail prévu et le travail effectué

Ce chapitre compare la charge de travail prévue dans le cahier des charges et celle réellement effectuée dans ce travail. Grâce à cela, il est possible d'avoir une vue d'ensemble sur l'aspect quantitatif du travail.

Cahier des charges	Réalisation	Travail effectué	Remarques
Étude de littérature	=	Chapitre 1 <i>Contexte</i>	-
Modèle mathématique 3D	=	Chapitre 5 <i>Modèle mathématique</i>	-
Stratégies de calcul (libre, libre-ajusté, contraint, multi-époque)	\cong	Chapitre 6.3 <i>Type de calcul</i>	Le type de calcul multi-époque n'est pas implémenté.
Indicateurs de précision et de fiabilité	=	Chapitre 7 <i>Indicateurs de qualité</i>	-
Ajustement robuste	\neq	-	L'ajustement robuste n'est pas encore implémenté dans le logiciel.
Architecture du logiciel	=	Chapitre 8 <i>Descriptions des outils</i>	-
Simulateur d'observations	=	Chapitre 8.1.3 <i>Simulation</i>	-
Classes, modules et librairies	=	Chapitre 8.2 <i>Structure des librairies</i>	-

TABLE 82 – Comparaison entre le travail prévu et le travail effectué

Le tableau ci-dessus permet de se rendre compte que la plupart des contraintes du cahier des charges sont respectées. Cependant, la gestion du multi-époque et la compensation robuste ne sont pas encore implémentées. Ceci est dû au manque de temps. En effet, le cahier des charges est fixé dès le début de manière optimiste. Les différents aléas rencontrés durant le travail ne permettent pas toujours de répondre à toutes les exigences.

24.2 Applications possibles

TrinetPy possède une large palette d'applications possibles. En effet, ce logiciel a pour but premier de réaliser l'ajustement de réseau géodésique en trois dimensions.

Cependant, l'ensemble des outils de TrinetPY permet une bien plus large application. Ce logiciel offre la possibilité de rentrer une grille régulière avec les composantes de la déviation de la verticale et de pouvoir interpoler les valeurs de ces dernières sur les points du réseau.

De plus, la suite d'outils de TrinetPY offre la possibilité de réaliser des transformations de coordonnées. Le fichier de pipelines permet de définir des transformations entre une multitude de système. L'utilisateur peut donc créer sa suite de fonction et ainsi utiliser le logiciel TrinetPY depuis n'importe quel système.

Puis, le simulateur est outil essentiel pour estimer la qualité de l'estimation du logiciel. En effet, il est possible de simuler de grandes quantités de données et ainsi pouvoir tester le logiciel.

Pour finir, le logiciel de compensation TrinetPY donne la possibilité de réaliser la compensation de réseaux géodésique avec des observations terrestres et des observations GNSS. Une grande quantité d'indicateurs permet de qualifier l'estimation de la compensation. Les équations rigoureuses du modèle mathématique offrent un résultat très précis et parfaitement adéquat pour le contrôle d'ouvrage et des réseaux de précision.

24.3 Améliorations possibles

Un logiciel de géodésie possède de multiples possibilités d'améliorations. En effet, il est possible d'ajouter des types d'observations, des fonctions, des systèmes de coordonnées pris en compte et plus encore. C'est pour cette raison que le logiciel TrinetPY a pour but d'être transparent dans sa documentation et de créer un code largement commenté et compréhensible. Il est également *open source* afin de permettre à de tierces personnes d'améliorer le logiciel selon leur besoin et leur utilité. Cependant, il existe certains points importants qui nécessitent une amélioration. Ces éléments sont les suivants :

Améliorations	Descriptions	Raisons
I, S et centrage en observations	Trinet+ permet d'ajouter les hauteurs de signaux et d'instruments et le centrage comme observations, ce que ne permet pas TrinetPY.	Cette fonction est très peu utilisée. De plus, elle peut s'avérer dangereuse car dans la majorité des réseaux, le seul lien entre le point au sol et le point à l'axe des tourillons est la hauteur d'instrument. Cette observation ne possède aucune surabondance. Cette option est intéressante pour autant que la hauteur d'instrument soit mesurée deux fois et de deux manières indépendantes. De plus, les deux observations doivent être saisies séparément dans le logiciel.
Ajustement robuste	Un ajustement par moindres carrés est très sensible aux fautes grossières (Moyenne). Il est donc intéressant de réaliser un calcul, moins sensible aux fautes grossières et qui permet de les détecter et les supprimer (Médiane).	Cet élément n'est pas implémenté en raison du manque de temps. Il est donc intéressant dans un futur proche d'ajouter cette fonction afin de faciliter la détection des fautes grossières. Cependant, elle ne remplace pas une estimation par la méthode des moindres carrés.
Calcul multi-époques (ellipsoïde d'erreur relative)	Cette fonction est très intéressante car elle permet de comparer le comportement de deux réseaux qui sont réalisés à deux époques différentes. Cela donne la possibilité par exemple d'analyser des mouvements sur des ouvrages.	Cette fonction n'est pas implémentée en raison du manque de temps. Il est pertinent d'ajouter la possibilité de créer des ellipsoïdes d'erreur relative. Ces dernières permettent d'analyser des déplacements relatifs entre deux points.
Ajout de conditions	Lors d'un ajustement, il est intéressant de pouvoir ajouter, sur la base d'une fonction des inconnues, des conditions. Ceci fonctionne de manière analogue aux conditions d'Helmert lors d'un calcul libre.	Cet élément n'est pas implémenté en raison du manque de temps.
Analyse en composantes principales	Ces indicateurs prennent en compte la corrélation entre les points. Ces derniers sont très utiles pour analyser le comportement global d'un réseau lors de déplacements [GUILLAUME (1), 2021].	Cet élément n'est pas implémenté en raison du manque de temps.
Interface	Une interface de calcul facilite l'utilisation du logiciel. Cela offre un rendu visuel plus intéressant.	L'attention est portée plus largement sur le développement du cœur du calcul. Le temps nécessaire à la réalisation d'une interface est considérable et celle-ci n'a donc pas pu être entamée.
Fonctions des inconnues	La précision et la fiabilité d'une fonction des inconnues sont des éléments intéressants pour l'analyse poussée d'un réseau. Par exemple, dans le cas d'un calcul de distance entre deux points via les coordonnées estimées, cela offre la possibilité de sortir les éléments statistiques de ce calcul.	Cet élément n'est pas implémenté en raison du manque de temps.

TABLE 83 – Comparaison entre le travail prévu et le travail effectué

25 Conclusion

Pour conclure, ce travail a permis d'implémenter, grâce à Python, un logiciel de compensation 3D qui possède un modèle mathématique rigoureux.

La première partie permet de se rendre compte de l'état de la littérature des logiciels d'ajustement 3D. Il est relevé que plusieurs programmes existent déjà. Cependant, le modèle mathématique et la création d'équations d'observations, qui se positionnent directement dans le système de la station, semblent inédits.

Puis, une deuxième partie appuie la théorie qui a permis d'implémenter ce travail. En effet, les différents aspects théoriques sont recensés ce qui permet une maîtrise totale du calcul.

L'utilisation du logiciel est définie dans une troisième partie qui explique la pratique, la création des fichiers en entrée et l'interprétation des résultats. Le but est de faciliter la manipulation afin de rendre le calcul simple mais efficace. De plus, le journal des erreurs oriente rapidement l'utilisateur vers les éventuels problèmes. Le tableau du modèle de données des fichiers en entrée fournit un appui pour la création de ces derniers.

Pour finir, l'expérimentation des résultats est effectuée afin de prendre conscience de la qualité du modèle mathématique et de l'ajustement. Les objectifs de précision semblent atteints et répondent aux différentes attentes. La comparaison avec Trinet+ qualifie le résultat. Les réseaux à petite échelle apportent des solutions sensiblement similaires. Les plus grandes divergences interviennent avec l'application de la déviation de la verticale sur des réseaux à plus large échelle. Ce phénomène s'explique par la différence de modèle fonctionnel. En effet, les équations d'observations de TrinetPY offre un calcul efficace avec une distance conséquente par rapport au topocentre.

TrinetPY permet plusieurs types de compensations (libre, libre-ajusté et contraint). De plus, les indicateurs statistiques, exportés lors d'un calcul, offrent une maîtrise complète dans l'analyse du résultat. Il est également possible de gérer le datum et les inconnues supplémentaires selon les besoins de l'utilisateur. Les principaux types d'observations utilisés dans le domaine sont supportés. Les fichiers en entrée orientent l'utilisateur afin d'éviter des problèmes majeurs. Cependant, la maîtrise des paramètres dans les options laisse la liberté de créer un calcul propre à l'utilisation et aux habitudes de chacun.

Son code peut donc être amélioré par de tierces personnes et potentiellement se développer dans le futur. Le code est structuré et commenté pour faciliter les prochaines améliorations.

Un travail de ce type permet d'ouvrir de grandes possibilités d'améliorations afin d'adapter ce dernier aux besoins. Les développements futurs les plus pertinents sont la réalisation des ajustements robustes qui facilitent la détection de fautes grossières et le calcul multi-époques qui facilite grandement la comparaison de deux états de mesures.

Lors du choix de ce sujet, ce dernier semblait très ambitieux. Cependant, suite à beaucoup d'investissements, de recherches et de ratés, ce travail semble répondre à la majorité des attentes. C'est donc avec une grande satisfaction et sur une note positive que ce travail se conclue.

Bibliographie

FAMIE-GALTIER Héloïse. 2022. *Python nommé langage de programmation de l'année 2021*. [En ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.blogdumoderateur.com/python-langage-programmation-2021/> [Consulté le 04.04.2022]

femto-physique. 2022. [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://femto-physique.fr/optique/principe-de-fermat.php> [Consulté le 19.05.2022]

GUILLAUME Sébastien. 2021. *Méthode d'estimation et réseaux géodésiques*. [Document PDF]. HEIG-VD. Filière : EC+G. Année académique 2021-2022

GUILLAUME Sébastien (2). 2021. *Éléments de géodésie*. [Document PDF]. HEIG-VD. Filière : EC+G. Année académique 2021-2022

GUILLAUME Sébastien, MULLER Cyril et CATTIN Paul-Henri. 2022. *Trinet+ logiciel de compensation de réseaux 3D, Mode d'emploi (Version 6.1)*. [Document PDF].

Python. 2020. python.org [en ligne] Disponible à l'adresse : <https://www.python.org/about/apps/> [Consulté le 10.03.2022]

rmData. 2022. *Produits*. [En ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.rmdatagroup.com/fr/produits/rmnetz/> [Consulté le 04.04.2022]

Swisstopo. 2003. *Description du programme LTOP Version 94*. [Document PDF]

TEXample. 2022. *Exemples "tikz"*. [En ligne]. Disponible à l'adresse : <https://texample.net/> [Consulté le 04.06.2022]

TRACOL Matthieu. 2012. *Intégration du logiciel de compensation LTOP aux méthodes de travail de TPLM-3D pour les chantiers spéciaux*. [Document PDF]

w3school (1). 2022. *Introduction à XML*. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.w3schools.com/xml/xml_what.asp [Consulté le 20.02.2022]

w3school (2). 2022. *Tutoriel sur le schéma XML*. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.w3schools.com/xml/schema_intro.asp [Consulté le 20.02.2022]

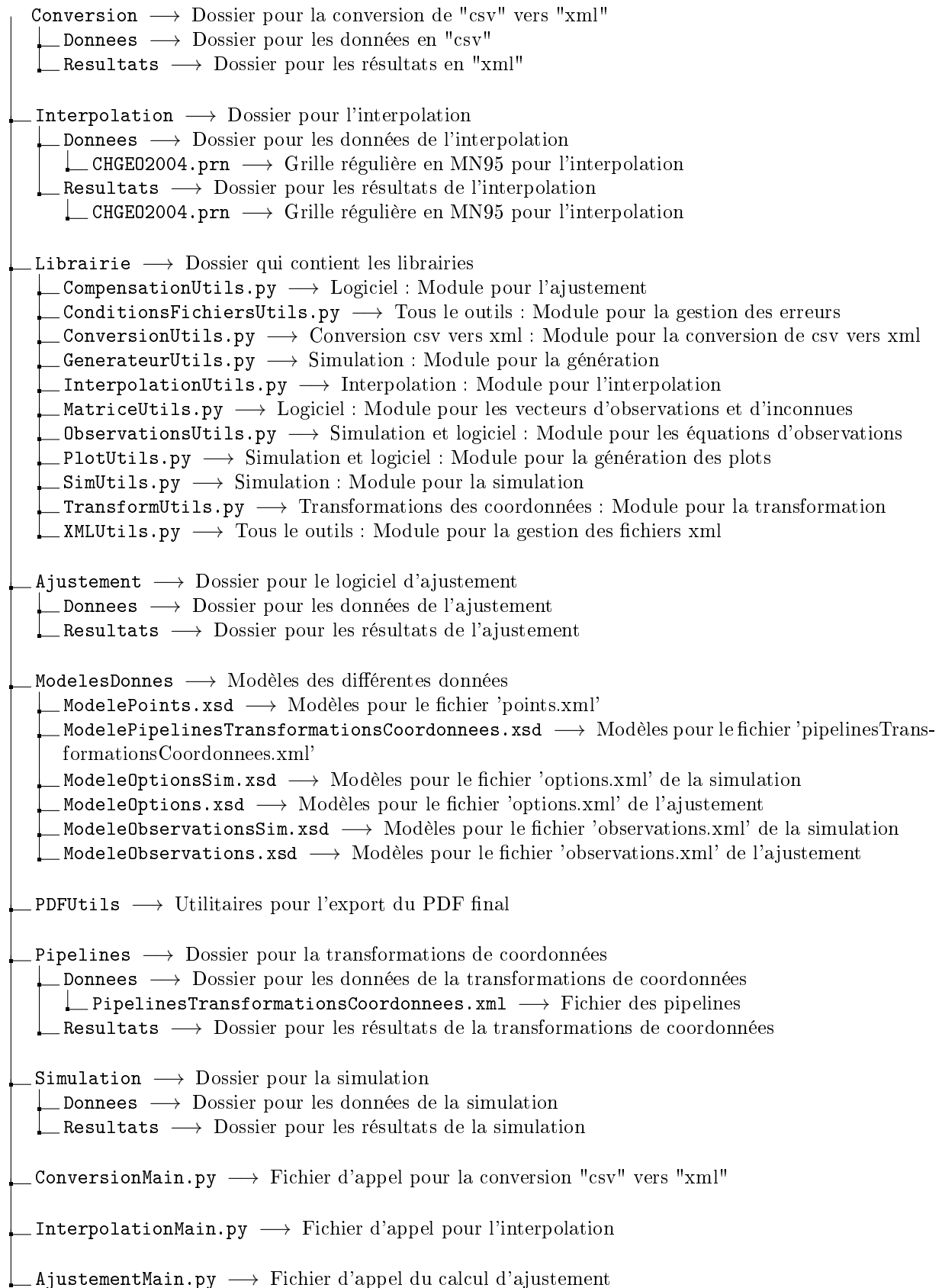
Annexes

Le tableau ci-dessous décrit les dossiers avec les annexes.

Annexe	Nom du dossier	Définition
Annexe n° 1	01_Code	Script avec les différents outils (informatique)
Annexe n° 2	02_ExemplesFichiers	Exemple de fichiers en entrée (informatique)
Annexe n° 3	03_ExempleSimpleUtilisation	Fichiers en entrée et en sortie de l'exemple simple d'utilisation (informatique)
Annexe n° 4	04_Experience	Dossier avec les résultats des expériences (informatique)
Annexe n° 5	05_ModelesDonnees_TrinetPY.pdf	Fichier qui décrit les modèles de données en détail
Annexe n° 6	06_JournalErreurs_TrinetPY.pdf	Fichier qui décrit les erreurs
Annexe n° 7	Planification et suivi	Tableau du suivi du travail de master

Annexe n° 1 : Code (informatique)

La figure ci-dessous décrit l'organisation du dossier avec les scripts (annexe n° 1) :

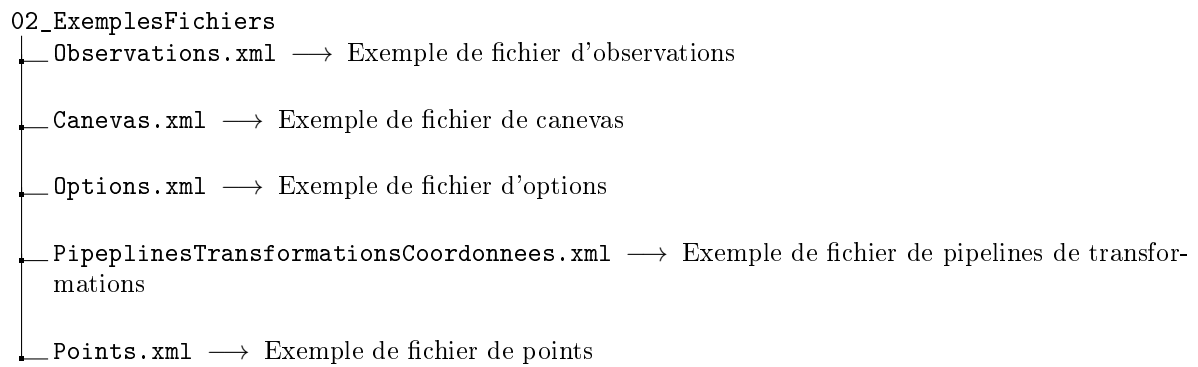


- `ParametresUtiliateurs.py` → Fichier avec les paramètres des outils
- `PipelinesMain.py` → Fichier d'appel des transformations
- `SimMain.py` → Fichier d'appel de la simulation et de la génération

Il est important de noter que les dossiers des données et les dossiers des résultats peuvent être modifiés par l'utilisateur directement dans le fichier *ParametresUtilisateurs.py*. Les différentes librairies sont regroupées dans un seul dossier de façon à éviter les doublons. Un dossier par outil est créé pour séparer les données en entrées et les résultats.

Annexe n° 2 : Exemples de fichiers (informatique)

La figure ci-dessous décrit l'organisation du dossier avec les exemples de fichiers (annexe n° 2) :



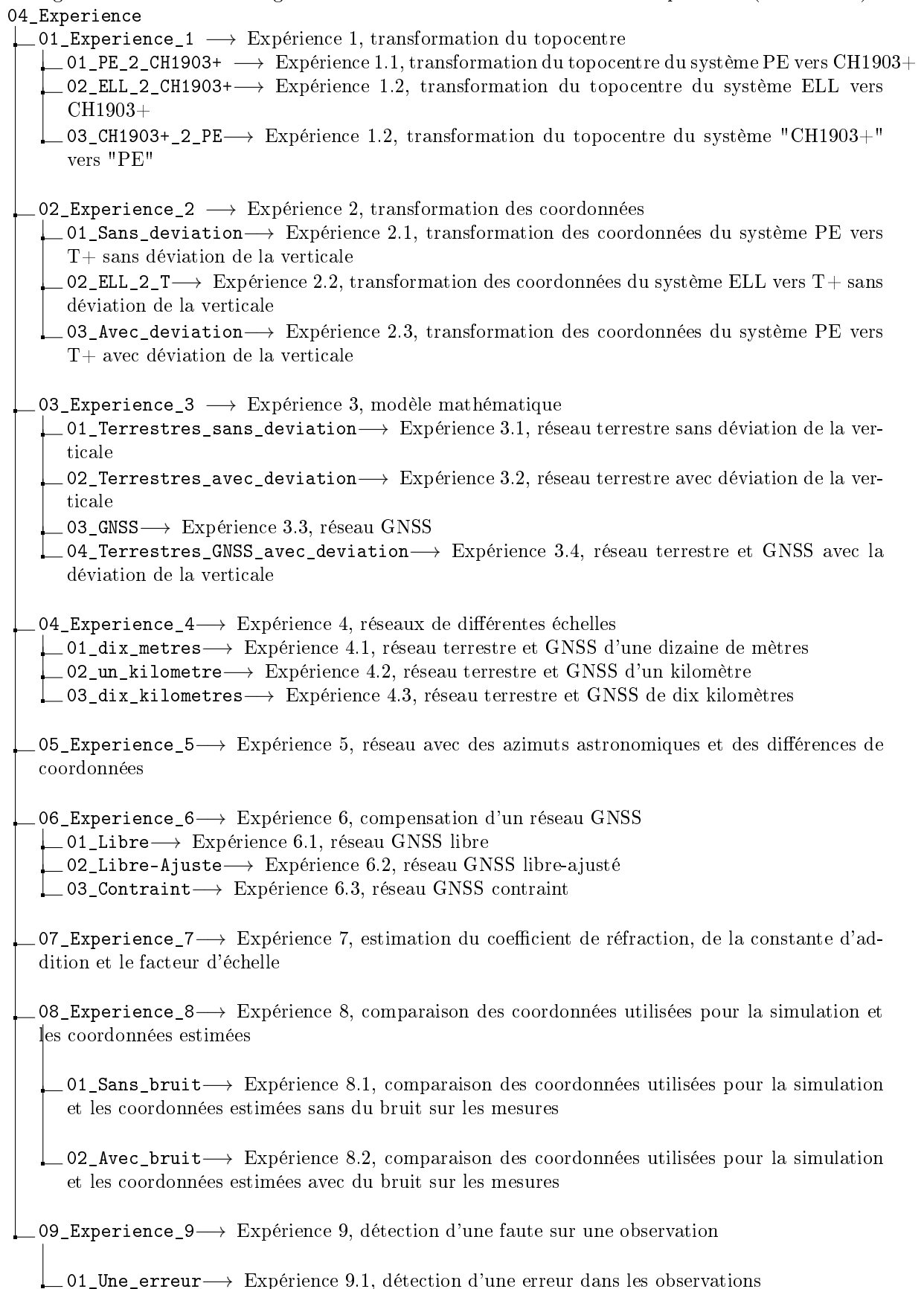
Annexe n° 3 : Exemple simple d'utilisation (informatique)

La figure ci-dessous décrit l'organisation du dossier avec l'exemple simple d'utilisation (annexe n° 3) :

```
03_ExempleSimpleUtilisation
├── 01_Interpolation → Interpolation de la déviation de la verticale et de la cote du géoïde
├── 02_PipelinesTransformations → Transformations des coordonnées du système PE vers le système T+
├── 03_Simulation → Simulation des observations
├── 04_Ajustement → Calcul de compensation du réseau
│   ├── 00_Preanalyse → Calcul de la préanalyse du réseau
│   ├── 01_Libre → Compensation libre du réseau
│   ├── 02_LibreAjuste → Compensation libre-ajustée du réseau
│   └── 03_contraint → Compensation contrainte du réseau
```

Annexe n° 4 : Expérimentation (informatique)

La figure ci-dessous décrit l'organisation du dossier avec les résultats des expériences (annexe n° 4) :



└ 02_Plusieurs_erreurs → Expérience 9.2, détection de plusieurs erreurs dans les observations

Annexe n° 5 : Modèles de données

Ce document recense l'ensemble des balises des fichiers en entrées. Il sert d'aide mémoire lors de la création des sources de données.

Il est important de lire le tableau en se positionnant depuis la borne parent directe. Ainsi, lorsque cette dernière est optionnelle et que la borne enfant est obligatoire, cela signifie qu'elle est obligatoire pour autant que la borne parent existe. De plus, si une balise possède *max : 1*, elle peut apparaître une seule fois sous chaque borne parent présente dans le fichier. Il faut noter que les bornes dont les **types** sont déterminés par - n'attendent aucun argument de l'utilisateur.

Observations.xml et Canevas.xml

Voici la liste exhaustive des bornes dans l'ordre alphabétique avec les contraintes imposées, le nombre d'occurrence de chaque borne, le type de données et les unités pour ce modèle :

Nom de la borne	Contrainte	Occurrence	Type	Unité	Description
AZ	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	[gon]	Azimut astronomique
centrage	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	-	-	Centrage de la station et du point visé
DH	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	[m]	Différences d'altitudes orthométriques
DS	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	[m]	Distance 3D
DXT	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	[m]	Différences de coordonnées x topocentriques T+
DXTopo	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	[m]	Différences de coordonnées x topocentriques instrument
DYT	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	[m]	Différences de coordonnées y topocentriques T+
DYTopo	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	[m]	Différences de coordonnées y topocentriques instrument
DZT	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	[m]	Différences de coordonnées z topocentriques T+
DZTopo	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	[m]	Différences de coordonnées z topocentriques instrument
ecarte	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	bool	-	[True / False] Permet d'écarter une observation du calcul.
ecartType	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	float	[mm/cc]	Ecart-type de l'observation
gnss	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	-	Observations GNSS
groupeDistance	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	"string"	-	Nom du groupe de distance
groupeRefraction	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	"string"	-	Nom du groupe de réfraction
I	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	-	-	Hauteur d'instrument
LX	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	[m]	Coordonnées GNSS x
LY	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	[m]	Coordonnées GNSS y
LZ	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	[m]	Coordonnées GNSS z

Nom de la borne	Contrainte	Occurrence	Type	Unité	Description
numeroPoint	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	string	-	Numéro du point
numeroSession	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	string	-	Numéro de la session
numeroStation	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	string	-	Numéro de la station
numeroStationnement	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	short	-	Numéro du stationnement
observation	Obligatoire	[min : 1 / max : infini]	-	-	Tous les types d'observation terrestre sur un point depuis une station et un stationnement
observations	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	-	-	Observations terrestres et GNSS
RI	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	[gon]	Direction horizontale
S	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	-	[m]	Hauteur de signal
session	Obligatoire	[min : 1 / max : infini]	-	-	Tous les types d'observation GNSS sur un point dans une session
station	Obligatoire	[min : 1 / max : infini]	-	-	Station terrestre
stationnement	Obligatoire	[min : 1 / max : infini]	-	-	Stationnement dans une station
terrestre	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	-	Observations terrestres
valeur	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	float	[m/gon]	Valeur de l'observation
w0	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	[gon]	Inconnue d'orientation uniquement pour la simulation
wg	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	[gon]	Inconnue d'azimut uniquement pour la simulation
ZD	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	[gon]	Angle zénithal

Options.xml

Voici la liste exhaustive des bornes avec les contraintes imposées, le nombre d'occurrence de chaque borne, le type de données en entrée, les unités et le domaine de valeur pour ce modèle. Il faut noter que les points qui n'apparaissent pas dans ce fichier sont considérés comme *libre*.

Nom de la borne	Contrainte	Occurrence	Type	Unité	Domaine de valeur	Description
alpha	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	float	-	[0.00 à 9.99]	Erreur de première espèce
beta	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	float	-	[0.00 à 9.99]	Erreur de deuxième espèce
codeCoordonnees	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	string	-	[PK, PE, CH1903Plus,...]	Code des coordonnées du topocentre en lien avec le fichier pipelines-Transformations-Coordonnees.xml
conditionHelmert	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	-	-	Paramétrisation des conditions d'helmert (libre)
constanteAddition	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	string	-	[+, -, 0 à 99]	Estimation d'une constante d'addition
corrections	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	-	-	-	Corrections sur les observations
coteGеоіde	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	float	[m]	-	Cote du géoïde du topocentre
critereInterruption	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	float	-	-	Critère d'interruption du calcul
datum	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	-	-	-	Datum des points pour le calcul
deltaCentreDistribution	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	-	-	Paramètre du centre de distribution
deltaNumerique	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	float	[m/gon]	-	Delta pour la dérivé numérique
deviationVerticale	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	bool	-	[True, False]	Déviatiоn de la verticale en inconnue
ecarte	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	bool	-	[True, False]	Permet d'écarter une observation libre-ajusté
ecartType	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	float	-	-	Ecart-type de la coordonnée (Libre-ajusté)
echelleAltimetrique	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	string	-	[+, -, 0 à 99]	Estimation d'une échelle altimétrique (GNSS)
echellePlanimetrique	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	string	-	[+, -, 0 à 99]	Estimation d'une échelle planimétrique (GNSS)
ellipsoide	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	string	-	-	Nom de l'ellipsoïde
eta	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	float	[arcsec]	-	Composante eta de la déviation de la verticale du topocentre
facteurEchelle	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	string	-	[+, -, 0 à 99]	Estimation d'un facteur d'échelle
groupesDistances	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	-	-	Tous les groupes de distances
groupeDistance	Optionnelle	[min : 0 / max : infini]	-	-	-	Groupe de distance
groupeDistanceDefaut	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	-	-	-	Groupe de distance par défaut
groupeRefractions	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	-	-	Tous les groupes de réfractiоns
groupeRefractionDefaut	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	-	-	-	Groupe de réfractiоn par défaut
groupeRefractionDefaut	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	-	-	-	Groupe de réfractiоn par défaut

Nom de la borne	Contrainte	Occurrence	Type	Unité	Domaine de valeur	Description
helmertFacteurDistance	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	bool	-	[True, False]	Facteur pour les distances pour l'Helmert
helmertFacteurYXGNSS	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	bool	-	[True, False]	Facteur y et "x" pour le GNSS pour l'Helmert
helmertFacteurZGNSS	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	bool	-	[True, False]	Facteur z pour le GNSS pour l'Helmert
helmertRotationX	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	bool	-	[True, False]	Rotation X pour l'Helmert
helmertRotationY	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	bool	-	[True, False]	Rotation Y pour l'Helmert
helmertRotationZ	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	bool	-	[True, False]	Rotation Z pour l'Helmert
helmertTranslationX	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	bool	-	[True, False]	Translation X pour l'Helmert
helmertTranslationY	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	bool	-	[True, False]	Translation Y pour l'Helmert
helmertTranslationZ	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	bool	-	[True, False]	Translation Z pour l'helmert
k	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	string	-	[+, -, 0 à 99]	Coefficient de réfraction
nbrIterationMax	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	short	-	-	Nombre d'itération maximum du calcul
nomGroupeDistance	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	string	-	-	Nom du groupe de distance
nomGroupeRefraction	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	string	-	-	Nom du groupe de réfraction
nomReseau	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	string	-	-	Nom du réseau
niveauConfiance	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	float	-	[0 à 1.00]	Niveau de confiance
numeroPoint	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	string	-	-	Numéro du point dans le datum
numeroSession	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	string	-	-	Numéro de la session
options	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	-	-	-	Options de la compensation
optionsCalcul	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	-	-	-	Options pour le calcul
parametresCalcul	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	-	-	-	Paramètres du calcul
parametresHelmert	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	-	-	-	Paramètres pour l'helmert
parametresSessions	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	-	-	Toutes les sessions GNSS
pointHelmert	optionnelle	[min : 0 / max : infini]	string	-	-	Point pour l'Helmert
pointsHelmert	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	-	-	-	Tous les points pour les conditions
rayonTerre	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	float	[m]	-	Rayon de la terre
refraction	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	bool	-	[True, False]	Correction de la réfraction
rotationX	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	string	[gon]	[+, -, 0 à 99]	Estimation d'une rotation en x (GNSS)
rotationY	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	string	[gon]	[+, -, 0 à 99]	Estimation d'une rotation en y (GNSS)
rotationZ	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	string	[gon]	[+, -, 0 à 99]	Estimation d'une rotation en z (GNSS)
session	Optionnelle	[min : 0 / max : infini]	-	-	-	Session GNSS
sessionDefault	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	-	-	-	Session GNSS par défaut
sigma0	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	float	-	-	σ_0
stationDV	Obligatoire	[min : 0 / max : infini]	string	-	-	Numéro de la station pour l'estimation de la déviation de la verticale
statut	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	string	-	[libre, fixe]	Statut de la composante
topocentre	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	-	-	-	Paramètres du topocentre

Nom de la borne	Contrainte	Occurrence	Type	Unité	Domaine de valeur	Description
translationX	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	string	[m]	[+, -, 0 à 99]	Estimation d'une translation en x (GNSS)
translationY	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	string	[m]	[+, -, 0 à 99]	Estimation d'une translation en y (GNSS)
translationZ	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	string	[m]	[+, -, 0 à 99]	Estimation d'une translation en z (GNSS)
typeCalcul	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	string	-	[compensation, preanalyse]	Type de calcul
typeCompensation	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	string	-	[libreAjuste, libre, contraint]	Type de compensation
valeurVraie	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	bool	-	[True, False]	Activation du bruits de mesures, obligatoire uniquement pour la simulation
x	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	-	-	-	Composante x dans le datum
xi	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	float	[arcsec]	-	Composante xi de la déviation de la verticale du topocentre
x/y/lat_deg	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	float	[m]	-	2ème composante du topocentre
y	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	-	-	-	Composante y dans le datum
y/x/long_deg	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	float	[m]	-	1ère composante du topocentre
z	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	-	-	-	Composante z dans le datum
z/H/h	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	float	[m]	-	3ème composante du topocentre

points.xml

Voici la liste exhaustive des bornes avec les contraintes imposées, le nombre d'occurrence de chaque borne, le type de données en entrée et les unités pour ce modèle :

Nom de la borne	Contrainte	Occurrence	Type	Unité	Description
CH1903Plus	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	-	Coordonnées CH1903+
coteGeoide	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	float	[m]	Cote du géoïde pour le point
E	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	float	[m]	Composante Est du point
ELL	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	-	Coordonnées ellipsoïdale
eta	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	float	[arcsec]	Composante eta de la déviation de la verticale
H	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	float	[m]	Altitude sur le géoïde
h	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	float	[m]	Altitude sur l'ellipsoïde
lat_deg	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	float	[deg]	Latitude
lon_deg	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	float	[deg]	Longitude
PE	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	-	Coordonnées projetées MN95 et altitude sur le géoïde
PK	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	-	Coordonnées projetées MN95 et altitude sur l'ellipsoïde
ProjH	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	-	Coordonnées projetées et altitude sur l'ellipsoïde
Projh	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	-	Coordonnées projetées et altitude sur l'ellipsoïde
N	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	float	[m]	Composante Nord du point
numero	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	short	-	Numéro du point
point	Obligatoire	[min : 1 / max : infini]	-	-	Description d'un point
points	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	-	-	Tous les points
T	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	-	Coordonnées dans le système topocentrique T+
UTM	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	-	Coordonnées projetées UTM et altitude sur l'ellipsoïde
x	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	float	[m]	composante x du point
xi	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	float	[arcsec]	composante xi de la déviation de la verticale
y	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	float	[m]	composante y du point
z	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	float	[m]	composante z du point

PipelinesTransformationsCoordonnees.xml

Voici la liste exhaustive des bornes avec les contraintes imposées, le nombre d'occurrence de chaque borne, le type de données en entrée et les unités pour ce modèle :

Nom de la borne	Contrainte	Occurrence	Type	Unité	Domaine de valeur	Description
cart2ell	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	-	-	Cartésienne vers ellipsoïdale
coteGeoide	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	-	-	Aucune valeur	Cote du géoïde
E	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	-	-	Aucune valeur	Composante Est du point récupéré du fichier points.xml
ell2cart	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	-	-	Ellipsoïdale vers cartésienne
ell2EN	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	-	-	Ellipsoïdale vers projetée
ellipsoide	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	string	-	-	Nom de l'ellipsoïde
EN2ell	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	-	-	Projetée vers ellipsoïdale
ENell2ENGeoid	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	-	-	Altitude ellipsoïdale vers géoïde
ENGeoid2ENell	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	-	-	Altitude géoïde vers ellipsoïdale
eta	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	-	-	Aucune valeur	Composante eta de la déviation de la verticale récupéré du fichier points.xml
H	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	-	-	Aucune valeur	Altitude sur géoïde du point récupéré du fichier points.xml
h	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	-	-	Aucune valeur	Altitude sur l'ellipsoïde du point récupéré du fichier points.xml
lat_deg	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	-	-	Aucune valeur	Latitude du point récupéré du fichier points.xml
lon_deg	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	-	-	Aucune valeur	Longitude du point récupéré du fichier points.xml
N	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	-	-	Aucune valeur	Composante Nord du point récupéré du fichier points.xml
pipeline	Obligatoire	[min : 1 / max : infini]	-	-	-	Pipeline de transformation
pipelinesTransformations	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	-	-	-	Toutes les pipelines de transformations
proj	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	string	-	[plate_carre, mercator, swiss_MN95, swiss_MN03] utm,	Type de projection
topo2TRS	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	-	-	Topocentrique vers Ch1903+
TRS2topo	Optionnelle	[min : 0 / max : 1]	-	-	-	CH1903+ vers topocentrique
x	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	-	-	Aucune valeur	Composante x du point récupéré du fichier points.xml
x0_geo	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	-	-	Aucune valeur	Composante x CH1903+ du topocentre récupéré du fichier "options.xml"
xi	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	-	-	Aucune valeur	Composante xi de la déviation de la verticale récupéré du fichier points.xml

Nom de la borne	Contrainte	Occurrence	Type	Unité	Domaine de valeur	Description
y	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	-	-	Aucune valeur	Composante y du point récupéré du fichier "points.xml"
y0_geo	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	-	-	Aucune valeur	Composante y CH1903+ du topocentre récupéré du fichier options.xml
z	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	-	-	Aucune valeur	Composante z du point récupéré du fichier points.xml
z0_geo	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	-	-	Aucune valeur	Composante z CH1903+ du topocentre récupéré du fichier options.xml
zoneUTM	Obligatoire	[min : 1 / max : 1]	short	-	[1 à 60]	Zone UTM

Les différentes fonctions peuvent apparaître une seule fois par pipeline mais plusieurs fois dans l'ensemble du fichier. Les bornes qui contiennent *aucune valeur* ne doivent pas être remplies car elles le seront automatiquement depuis le fichier points.xml ou la transformation précédente.

Annexe n° 6 : Journal d'erreur

Ce document est un journal qui décrit toutes les erreurs qui peuvent apparaître dans le calcul. Le chiffre permet de trouver la catégorie d'erreur (1ère colonne) et la lettre donne le détail (3ème colonne).

Code	Description	Sous-code	Explications du problème
1	Fichier introuvable	A	Un fichier XML en entrée est introuvable. Veuillez contrôler le nom des fichiers et le lien vers ces derniers ("ParametresUtilisateurs.py").
		B	Un fichier XSD qui est le modèle de donnée est introuvable. Veuillez contrôler le nom des fichiers et le lien vers ces derniers (ParametresUtilisateurs.py).
		C	La grille d'interpolation des composantes de la déviation de la verticale et de la côte du géoïde est introuvable.
		D	Le chemin vers le dossier en sortie est erroné (ParametresUtilisateurs.py).
2	Système de coordonnées	A	Afin de pouvoir réaliser une interpolation des paramètres de la déviation de la verticale et de la côte du géoïde, les coordonnées (points.xml) doivent se trouver dans le système PK.
		B	Afin de pouvoir réaliser une interpolation des paramètres de la déviation de la verticale et de la cote du géoïde, les coordonnées du topocentre (options.xml) doivent se trouver dans le système PK ou PE.
		C	Lors de l'utilisation du simulateur ou du logiciel d'ajustement, les coordonnées du topocentre (options.xml) doivent être dans le système CH1903+. Vous pouvez utiliser le transformateur de coordonnées pour obtenir les coordonnées dans ce système.
		D	Lors de l'utilisation du simulateur ou du logiciel d'ajustement, les coordonnées dans le fichier points.xml doivent être dans le système T+. Vous pouvez utiliser le transformateur de coordonnées pour obtenir les coordonnées dans ce système.
3	Conformité au modèle	A	Le fichier en entrée n'est pas conforme au modèle de données. Veuillez contrôler vos fichier en entrée et les remettre en ordre (annexe n° 5).
4	Définition des points	A	Le point mentionné n'est pas défini dans le fichier points.xml. Il s'agit d'une station terrestre. Veuillez contrôler la numérotation de vos points dans les fichiers observations.xml et points.xml.
		B	Le point mentionné n'est pas défini dans le fichier points.xml. Il s'agit d'une point observé depuis une station terrestre. Veuillez contrôler la numérotation de vos points dans le fichier observations.xml et dans le fichier points.xml afin d'assurer une correspondance.
		C	Le point mentionné n'est pas défini dans le fichier points.xml. Il s'agit d'une point observé depuis une session GNSS. Veuillez contrôler la numérotation de vos points dans les fichiers observations.xml et points.xml.
		D	Le point mentionné est défini dans la partie Datum (options.xml). Cependant, ce point n'est pas défini dans le fichier points.xml. Veuillez contrôler la numérotation de vos points dans les fichiers options.xml et points.xml.
		E	Lors de la transformation, simulation ou compensation, les bornes eta, xi et coteGéoide doivent exister dans le fichier points.xml.

5	Plage de l'écart-type	A	La plage pour l'écart-type de la hauteur d'instrument doit se trouver entre 0.1 et 99.0 mm. Veuillez contrôler les unités (mm) et les valeurs.
		B	La plage pour l'écart-type de la hauteur du signal doit se trouver entre 0.1 et 99.0 mm. Veuillez contrôler les unités (mm) et les valeurs.
		C	La plage pour l'écart-type de l'observation terrestre mentionnée doit se trouver entre 0.1 et 99.0 gon/mm. Veuillez contrôler les unités (mm ou gon) et les valeurs.
		D	La plage pour les ppm de l'observation de distance mentionnée doit se trouver entre 0.1 et 99.0 ppm. Veuillez contrôler les unités (ppm) et les valeurs.
		E	La plage pour l'écart-type de centrage mentionné doit se trouver entre 0.1 et 99.0 mm. Veuillez contrôler les unités (mm) et les valeurs.
		F	La plage pour l'écart-type de l'observation GNSS mentionnée doit se trouver entre 0.1 et 99.0 mm. Veuillez contrôler les unités (mm) et les valeurs.
		G	La plage pour l'écart-type du point mentionné dans le datum (options.xml) doit se trouver entre 0.1 et 99.0 mm. Veuillez contrôler les unités (mm) et les valeurs.
6	Groupes et sessions	A	Le groupe de distance mentionné n'est pas défini dans le fichier options.xml ou dans les paramètres de simulation. Il est important de définir les groupes et sessions dans le fichier <i>SimParams.py</i> pour une simulation et dans le fichier options.xml pour une compensation.
		B	Le groupe de réfraction mentionné n'est pas défini dans le fichier "options.xml" ou dans les paramètres de simulation. Il est important de définir les groupes et sessions dans le fichier <i>SimParams.py</i> pour une simulation et dans le fichier options.xml pour une compensation.
		C	La session mentionnée n'est pas définie dans le fichier options.xml ou dans les paramètres de simulation. Il est important de définir les groupes et sessions dans le fichier <i>SimParams.py</i> pour une simulation et dans le fichier options.xml pour une compensation.
		D	Le groupe de distance mentionné est défini plusieurs fois dans le fichier options.xml. Veuillez supprimer le doublon.
		E	Le groupe de réfraction mentionné est défini plusieurs fois dans le fichier "options.xml". Veuillez supprimer le doublon!
		F	La session mentionnée est définie plusieurs fois dans le fichier "options.xml". Veuillez supprimer le doublon.
7	Inconnue d'orientation	A	L'inconnue d'orientation doit être compris entre 0.0000 et 400.0000 gons. Veuillez contrôler la valeur et l'unité (gon).
		B	L'inconnue d'azimut doit être compris entre 0.0000 et 400.0000 gons. Veuillez contrôler la valeur et l'unité (gon).
		C	Une inconnue d'azimut est nécessaire pour une observation d'azimut.
		D	Une inconnue d'orientation est nécessaire pour une observation de direction horizontale.
8	Export CSV	A	Le fichier points.csv est ouvert. Il faut le fermer afin de pouvoir le récrire.
		B	Le fichier observations.csv est ouvert. Il faut le fermer afin de pouvoir le récrire.

9	Ellipsoïde	A	L'ellipsoïde choisit dans le fichier simParams.py n'est pas défini dans ce même fichier. Veuillez le définir et vérifier l'orthographe du nom.
10	Observations terrestres	A	Un problème est survenu avec l'observation de distance 3D mentionnée. Veuillez vérifier la définition de cette dernière dans le fichier observations.xml.
		B	Un problème est survenu avec l'observation de la direction horizontale mentionnée. Veuillez vérifier la définition de cette dernière dans le fichier observations.xml.
		C	Un problème est survenu avec l'observation d'azimut mentionnée. Veuillez vérifier la définition de cette dernière dans le fichier observations.xml.
		D	Un problème est survenu avec l'observation d'angle zénithal mentionnée. Veuillez vérifier la définition de cette dernière dans le fichier observations.xml.
		E	Un problème est survenu avec l'observation de différence de coordonnées T+ mentionnée. Veuillez vérifier la définition de cette dernière dans le fichier observations.xml.
		F	Un problème est survenu avec l'observation de différence de coordonnées topocentrique mentionnée. Veuillez vérifier la définition de cette dernière dans le fichier observations.xml.
		G	Un problème est survenu avec l'observation de différence d'altitudes orthométriques mentionnée. Veuillez vérifier la définition de cette dernière dans le fichier observations.xml.
11	Observations GNSS	A	Un problème est survenu avec l'observation de coordonnée Y mentionnée. Veuillez vérifier la définition de cette dernière dans le fichier observations.xml.
		B	Un problème est survenu avec l'observation de coordonnée X mentionnée. Veuillez vérifier la définition de cette dernière dans le fichier observations.xml.
		C	Un problème est survenu avec l'observation de coordonnée Z mentionnée. Veuillez vérifier la définition de cette dernière dans le fichier observations.xml.
12	Transformations	A	Lors de la transformation du topocentre vers le système CH1903+, il n'est pas possible d'utiliser la fonction "TRS2topo" ou "topo2TRS" car cette fonction utilise le topocentre dans le système CH1903+.
		B	Dans la définition des pipelines (PipelinesTranformationsCoordonnees.xml), il est important que les bornes définies soient dans le même ordre et possèdent le même nom que les attributs des fonctions utilisées dans le fichier PipelinesTranformationsCoordonnees.xml.
		C	Une pipeline définie dans le fichier TransformationUtils.xml ne peut pas contenir deux fois la même fonction.
		D	Aucune pipeline ne permet de relier le système d'origine au système de destination. Veuillez définir la transformation dans le fichier PipelinesTransformationsCoordonnees.xml ou vérifier l'orthographe des codes de coordonnées.
		E	Le code de coordonnées dans le fichier points.xml ne correspond pas à un code défini dans le fichier PipelinesTransformationsCoordonnees.xml. Veuillez vérifier l'orthographe des codes de coordonnées.
		F	Dans le fichier PipelinesTransformationsCoordonnees.xml, le type de coordonnées doit être séparé de "_", doit contenir trois éléments (ex : x_y_z) et ne peut pas contenir deux éléments similaires.

13	Générateur de fichiers	A	Il n'y a pas assez de possibilité pour que les numéros simulés de points soient différents.
		B	Il n'y a pas assez de possibilité pour que les numéros de sessions simulés soient différents.
14	Types observations	A	Afin d'éviter des problèmes de calcul, il n'est pas possible de réaliser une observation d'angles horizontale et d'azimut depuis la même station, le même stationnement et le même point observé.
		B	Afin d'éviter des problèmes de calcul, il n'est pas possible de réaliser une observation de différence topocentrique en z et une différence d'altitude orthométrique depuis la même station, le même stationnement et le même point observé.
15	Compensation	A	Lors d'un calcul de compensation le fichier observation.xml doit contenir des bornes valeur.
		B	La matrice N est singulière. Veuillez contrôler les paramètres de corrections et les inconnues supplémentaires dans le fichier options.xml.
		C	La surabondance du calcul est négative. Le calcul ne peut pas converger. Veuillez adapter le nombre de points fixes et les inconnues supplémentaires.
16	Libre	A	Veuillez définir les paramètres de condition d'Helmert (options.xml). Ceci permet de réaliser un calcul libre.
		B	Les conditions d'Helmert doivent contenir au minimum un point lors d'un ajustement libre.
		C	Un point choisit dans les conditions n'existe pas dans le fichier points.xml.
17	Numéro et nom	A	Un numéro de point, de session, de groupe de distance ou de groupe de réfraction ne peut pas contenir de "_". Les mots-clés <i>terrestre</i> et <i>gnss</i> sont également interdits.
		B	Une point ne peut pas être mesuré depuis une station du même nom.
18	Déviation verticale	A	Dans la bornes deviationVerticale (options.xml), les points doivent être des stations .
		B	Pour estimer la déviation de la verticale d'une station, il faut activer la correction de la déviation de la verticale (options.xml).
19	Conversion CSV	A	Le fichier en entrée n'est pas un fichier d'observations. Veuillez contrôler le lien vers ce dernier.
		B	Le fichier en entrée n'est pas un fichier de points. Veuillez contrôler le lien vers ce dernier..

Annexe n° 7 : Planification et suivi des tâches

Le tableau ci-dessous permet de se rendre compte de la planification du travail et recense le nombre d'heures pour arriver à ce résultat.

Tâches	Heures	Périodes
Recherche de littérature de logiciels existants	30	01.02.2022 - 14.02.2022
Lecture de différents documents	40	01.02.2022 - 14.02.2022
Prise en main de Latex	10	01.02.2022 - 14.02.2022
Réalisation du rapport	120	01.02.2022-01.07.2022
Création et réflexion sur les fichiers en entrée et en sortie	60	14.02.2022 - 21.02.2022
Mise en place du modèle mathématique 3D des observations terrestres (Fonctionnel et stochastique)	60	21.02.2022 - 07.03.2022
Mise en place du modèle mathématique 3D des sessions GNSS (Fonctionnel et stochastique)	20	21.02.2022 - 07.03.2022
Test du modèle mathématique et comparaison avec Trinet+	30	07.03.2022 - 14.03.2022
Réalisation d'un outil d'interpolation de la déviation de la verticale	10	07.03.2022 - 14.03.2022
Réalisation d'un transformateur de coordonnées	40	14.03.2022 - 21.03.2022
Réalisation d'un simulateur d'observations	100	14.03.2022 - 18.04.2022
Mise en place de l'architecture du logiciel et création d'une logique de travail	16	18.03.2022 - 25.04.2022
Réalisation du script de base d'ajustement	60	18.04.2022 - 09.05.2022
Mise en place du calcul contraint	20	09.05.2022 - 16.05.2022
Mise en place du calcul libre-ajusté	10	09.05.2022 - 16.05.2022
Mise en place du calcul libre	30	16.05.2022 - 23.05.2022
Mise en place des différents indicateurs de précision et de fiabilité	40	23.05.2022 - 06.06.2022
Test des indicateurs et comparaison avec Trinet+	20	23.05.2022 - 06.06.2022
Réalisation du listing en sortie de la compensation	40	06.06.2022 - 13.06.2022
Réparation de divers problèmes	40	13.06.2022 - 01.07.2022
Finalisation et commentaires du code	60	01.02.2022-01.07.2022
Finalisation du rapport et divers	40	13.06.2022 - 01.07.2022
Relecture du rapport	24	13.06.2022 - 01.07.2022
Somme des heures :	920	

TABLE 1 – Temps investi

Ce tableau montre une vue d'ensemble du temps investi pour réaliser ce travail de master. Le temps annoté dans ce tableau est à titre indicatif et il ne s'agit pas de la durée exacte des tâches. Les périodes sont indiquées de manière approximative. Le rapport est réalisé tout au long du travail ce qui demande passablement d'investissement.