Intégration d'éléments techniques existants de mensuration officielle dans les opérations de renouvellement ou de mise à jour

Rémi Girard

Février 2024

Domaine Ingénierie et Architecture

Master conjoint UNIGE-HES-SO en développement territorial

Orientation Ingénierie géomatique

Directeur : Prof. Yves Deillon

Co-directeur : Prof. Dr. Sébastien Guillaume

Expert : M. François Gigon

Mémoire n° : 1067

UNIVERSITÉ DE GENÈVE

Hes·so
Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale

Remerciements

Je tiens à remercier particulièrement les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire. En particulier :

- Prof. Yves Deillon, pour son intérêt pour le sujet, son accompagnement et son expérience précieuse tout au long de ce travail.
- Prof. Dr. Sébastien Guillaume, pour la qualité de son enseignement et son expertise.
- M. François Gigon et le Service du cadastre et de la géomatique du canton de Fribourg, pour leur intérêt à suivre ce travail.
- Matteo Casto, pour son appui sur l'environnement Nelcas, les développements réalisés en collaboration avec ce travail et la validation de l'outil.
- Pierre Dumas et l'ensemble de mes collègues de Geosud SA, pour leur soutien et la souplesse offerte lors de ces années de formation.

Ainsi que ma famille et tous les proches qui m'ont soutenu lors de mon cursus.

Lexique et abréviations

BDMO	Base de données de la mensuration officielle
CC, CCS	Code civil suisse
CSCC	Conférence des services cantonaux du cadastre
HEIG-VD	Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud
MO	Mensuration officielle
Nelcas	Network least-square adjustement for cadastral surveying
OMO	Ordonnance sur la mensuration officielle du 1er juillet 1993
OMO-DDPS	Ordonnance du DDPS sur la mensuration officielle du du 24 août 2023
OTEMO	Ordonnance technique du DDPS sur la mensuration officielle du 1er juillet 1994
PF	Point fixe
PL	Point limite
PR	Premier relevé
PS	Point de situation
Ra&D	Recherche appliquée et développement
REMO	Réforme de la mensuration officielle
RDPPF	Restrictions de droit public à la propriété foncière
REN	Renouvellement de la mensuration officielle
TM	Travail de Master
XML	Extensible Markup Language

Master conjoint UNIGE-HES-SO en développement territorial
Orientation Ingénierie géomatique
Étudiant Rémi Girard
Directeur du travail de Master Pr. Yves Deillon
Co-directeur Pr. Dr. Sébastien Guillaume

Travail de Master 2023 - 2024

Intégration d'éléments techniques existants de mensuration officielle dans les opérations de renouvellement ou de mise à jour

---

Résumé publiable

Dans le cadre des opérations de renouvellement et de mise à jour de la MO sur des zones importantes, il est parfois indispensable d'intégrer des éléments techniques anciens ou récents existants de MO (systèmes locaux de points et/ou observations d'origine) qui peuvent être homogènes ou inhomogènes.

La HEIG-VD développe, dans le cadre de ses travaux Ra&D, un prototype de moteur d'estimation des points de la MO par les moindres carrés, désigné NELCAS, ainsi qu'une standardisation des formats XML pour les fichiers input des points et des observations des logiciels de calcul.

Dans le contexte précité, ce travail de master a pour buts de réaliser le développement des concepts théoriques de quelques méthodes d'intégration de systèmes locaux de points homogènes ou inhomogènes et/ou d'observations d'origine, leurs développements mathématiques, leur implémentation en python orientés objet et documentée, le test des outils développés et leur analyse technique, qualitative et des coûts/avantages.

Étudiant :	Date et lieu :	Signature :
Girard Rémi	.....	.....
Directeur du travail :	Date et lieu :	Signature :
Deillon Yves	.....	.....

UNIVERSITÉ DE GENÈVE Hes·so Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale

Préambule

Ce mémoire de Master est réalisé en fin de cursus d'études, en vue de l'obtention du titre de Master of Science HES-SO/UNIGE en Développement du territoire, orientation Ingénierie géomatique.

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'Ecole.

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

HES-SO Master

Responsable d'orientation

Yverdon-les-Bains, le 6 février 2024

UNIVERSITÉ DE GENÈVE Hes·so Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale

Authentification

Le soussigné, Rémi Girard, atteste par la présente avoir réalisé seul ce travail et n'avoir utilisé aucune autre source que celles expressément mentionnées.

Yverdon-les-Bains, le 6 février 2024

Rémi Girard

Table des matières

1 Introduction **17**
1.1 Cadre du travail . . . 17
1.2 Définitions . . . 18
1.3 Problématique et objectifs . . . 18
1.4 Structure du rapport . . . 19

2 Contexte et état de l'art **21**
2.1 Historique . . . 21
2.2 Tensions locales et systèmes inhomogènes . . . 22
2.3 Enjeux . . . 23
2.4 Outils existants . . . 24
2.4.1 Outils de calculs topométriques . . . 24
2.4.2 Outils de compensation de réseau géodésique . . . 24
2.4.3 Outils de transformation et d'interpolation . . . 25
2.4.4 Autres . . . 27

3 Méthodologie **29**
3.1 Approche théorique . . . 29
3.2 Outils et environnement de développement . . . 30
3.3 Définitions des scénarios . . . 30
3.3.1 Reprise de mesures approuvées . . . 30
3.3.2 Simulation d'observations fictives . . . 31
3.3.3 Transformation par triangles via moteur de calcul par les moindres carrés . . . 32
3.4 Méthode d'évaluation . . . 32

4 Développement des scénarios **33**
4.1 Scénario 1 – Reprise de mesures approuvées . . . 33
4.1.1 Développements théoriques . . . 33
4.1.2 Modèle stochastique . . . 33
4.1.3 Processus . . . 34
4.1.4 Analyse critique . . . 35

4.1.5 Développements possibles . . . 37
4.2 Scénario 2 – Simulation d'observations fictives . . . 39
4.2.1 Développements théoriques . . . 39
4.2.2 Modèle stochastique . . . 40
4.2.3 Processus . . . 40
4.2.4 Analyse critique . . . 45
4.2.5 Développements possibles . . . 47
4.3 Scénario 3 – Transformation par triangles via moteur de calcul par les moindres carrés 48
4.3.1 Développements théoriques . . . 48
4.3.2 Modèle stochastique . . . 49
4.3.3 Processus . . . 49
4.3.4 Analyse critique . . . 51
4.3.5 Développements possibles . . . 52

5 Mise en œuvre des scénarios 53
5.1 Considérations métier . . . 53
5.2 Contextes des renouvellements . . . 53
5.3 Application des scénarios . . . 54
5.4 Intérêt de l'approche . . . 55
5.5 Application aux processus existants et analyse coûts/bénéfices . . . 56

6 Perspectives 59
6.1 Développements possibles . . . 59
6.2 Tests et contextes d'application . . . 60
6.3 Concepts non traités . . . 60

7 Conclusion 61

Bibliographie 63

Table des figures

1.1 Observations reprises 18

2.1 Représentation d'un triangle FINELTRA 26

4.1 Aperçus des formulaires de saisie 35
4.2 Aperçu de l'outil de contrôle des doublons géométriques 35
4.3 Extrait du canevas des observations reprises (ResMap) 36
4.4 Fs normés, pts de contrôle (S1) 36
4.5 Fs normés, pts de ratt. (S1) 36
4.6 Demi-grand axe, points BDMO recalc. 37
4.7 D.-g. axe, points de ratt. (S1) 37
4.8 Interface utilisateur du simulateur d'observations 41
4.9 Simulation sur PF 42
4.10 Sim. sur canevas fictif, $d_0 = 100$ m 42
4.11 Génération d'observations fictives pour un point 42
4.12 Compensation du réseau d'observations fictives 43
4.13 Filtrage des observations fictives pour la compensation finale 44
4.14 Systèmes locaux pour la contrainte des bâtiments 44
4.15 Plot, résumé graphique, en sortie 45
4.16 Fs normés, pts de contrôle (S2 obs.) 46
4.17 Fs normés, pts de ratt. (S2 obs.) 46
4.18 Fs normés, pts de contrôle (S2 obs. + sta.) 46
4.19 Fs normés, pts de ratt. (S2 obs. + sta.) 46
4.20 Analyse des points de rattachement 50
4.21 Fs normés, pts de contrôle (S3) 51

Chapitre 1

Introduction

1.1 Cadre du travail

Depuis son introduction par le Code civil suisse (CC) en 1912, la mensuration officielle suisse maintient les données spatiales qui constituent la base du système cadastral suisse. Elle offre également aux systèmes d'information du territoire et à leurs utilisateurs les géodonnées de référence dans des domaines comme l'économie, les administrations publiques ou pour des utilisations de la vie courante.

Les besoins toujours grandissants de la société et du monde du travail ont mené à la nécessité de la réforme de la mensuration officielle dans les années 90 (REMO). Les enjeux actuels de la mensuration officielle suisse (MO) visent ainsi un recouvrement complet du territoire avec des données au standard MO93. Actuellement, une partie importante dispose déjà d'une mensuration approuvée selon un ancien standard fédéral numérisée préalablement. Ces lots de mensuration présentent généralement une qualité hétérogène, ainsi que des lacunes et tensions importantes qui justifient leur *renouvellement*. Les dispositions fédérales recommandent ainsi de modifier et compléter les données existantes pour les adapter aux exigences actuelles plutôt que la réalisation de nouveaux premiers relevés (PR).

Dans ce contexte, ce travail de master (TM) vise à étudier les opportunités de revaloriser les éléments issus de mensurations de standards antérieurs et proposer des méthodes de reprise. Dans son déroulement, l'analyse et le traitement des tensions locales dans les jeux de données inhomogènes représentent un aspect central qui sera abordé de manière plus approfondie. Selon le cahier des charges, le TM abordera en particulier :

- le développement des concepts théoriques de méthodes d'intégration de systèmes locaux de points et/ou d'observations d'origine ;
- leurs développements mathématiques ;
- leurs développements en Python ;
- le test des outils développés et leur analyse technique, qualitative et des coûts/avantages.

Les opérations de MO sont basées, en règle générale, sur le principe de la liberté des méthodes à condition d'atteindre les critères de qualité exigés en matière de structuration, niveau de détail, validité des informations, précision et fiabilité. Aussi, la HEIG-VD développe, dans le cadre de ses travaux Ra&D, un prototype de moteur d'estimation des points de la MO par les moindres carrés, désigné NELCAS, ainsi qu'une standardisation des formats XML pour les fichiers input des points et des observations des logiciels de calcul. Les développements seront réalisés avec une approche par les moindres carrés dans l'environnement de développement de la HEIG-VD afin de fournir des indicateurs de qualité suffisants, en privilégiant des méthodes bien ancrée dans la pratique, et dans l'optique d'une potentielle intégration dans les outils développés par l'École.

Bien que ce travail s'inscrive dans le contexte de la mensuration officielle suisse, il traite aussi plus généralement de la problématique de transformation de données spatiales inhomogènes vers un système homogène. L'état actuel et les enjeux de la MO en sont toutefois une illustration particulièrement probante, notamment à la suite du changement de cadre de référence et dans l'optique des entreprises de mensuration en cours et à venir.

Finalement, il est précisé que ce TM est réalisé avant la révision de l'Ordonnance technique sur la MO (OTEMO), respectivement de l'introduction de l'Ordonnance du DDPS sur la MO (OMO-DDPS), et que certains aspects du travail se rapporteront spécifiquement au contexte fribourgeois de la mensuration officielle.

1.2 Définitions

Éléments de mensuration approuvés

Les éléments et les documents de l'ancienne mensuration officielle (OMO art. 5 al. 1 let. d), soit, les *données* et les *documents techniques* (observations reprises).

Observations polaires	polygonations formulaires 40n, ...
Systèmes locaux	levés orthogonnaux cheminements orthogonnaux formulaire de coordonnées
Sessions GNSS	levés GNSS sans ajustement local
Mesures simples	cotes de contrôle
Contraintes	alignements et perpendiculaires selon esquisses

FIGURE 1.1 – Observations reprises

Numérisation préalable (NP)

La transformation d'une ancienne mensuration officielle en une mensuration complètement numérique qui ne remplit pas toutes les nouvelles exigences d'une mensuration officielle conforme aux dispositions actuelles. On parlera plus généralement de :

Digitalisation
NP issue d'une digitalisation graphique du plan original.

Numérisation
NP issue d'un calcul numérique des éléments à partir des éléments techniques.

Ensemble inhomogène

Données de qualité variable, supposées homogènes localement, mais présentant des tensions non négligeables à une échelle globale.

Précision locale

La précision d'un point dans son voisinage.

1.3 Problématique et objectifs

La première problématique abordée est la qualification des éléments de la mensuration reprise. Aux vues des qualités hétérogènes des données, une typologie des données et des éléments techniques sera

proposée avec leur précision locale attendue. Les développements se basant sur le modèle de Gauss-Markov, cette qualification se traduira par un modèle stochastique permettant d'intégrer les éléments repris dans une compensation par les moindres carrés.

La deuxième étape du travail consiste alors à proposer des méthodes d'intégration permettant d'ajuster ces éléments dans un réseau homogène. Celles-ci seront formulées sous forme de scénarios d'implémentation, l'objectif final étant le développement d'un outil de conversion d'un jeu de données inhomogènes vers un système homogène ainsi que la qualification du résultat final.

1.4 Structure du rapport

La suite du rapport est structurée de manière à permettre au lecteur de comprendre le contexte et les enjeux liés à la mise à niveau des données de la mensuration officielle et plus spécifiquement aux données inhomogènes.

La méthodologie de travail sera abordée dans son ensemble avant de détailler spécifiquement chaque scénario d'implémentation avec son processus et les considérations théoriques liées, ainsi que les résultats obtenus et les perspectives d'améliorations.

Le potentiel des scénarios sera alors considéré avec leurs applications « métier » afin d'évaluer les opportunités d'application.

Finalement, le rapport ouvrira certaines pistes de réflexion sur les développements possibles liés au produit de ce travail et sur les applications connexes qu'il pourrait offrir.

Chapitre 2

Contexte et état de l'art

2.1 Historique

Depuis l'introduction de la mensuration officielle comme œuvre nationale depuis 1912, plusieurs standards de qualité se sont succédé jusqu'à l'introduction du standard actuel :

Graphiques - GR

Entièrement graphique (directives fédérales de 1919).

Semi-numérique - SN

Calcul traditionnel des points de polygonation uniquement (directives fédérales de 1919).

Partiellement numérique - NM

Calcul traditionnel des points de polygonation et des points limites (directives fédérales de 1974).

Complément numérique - CN

Calcul traditionnel des points de polygonation, des points limites et points de situation (directives fédérales de 1974).

Depuis les années 1990, le développement des outils informatiques, l'accessibilité de ces données, et l'introduction des méthodes de mesure GNSS ont offert de nouvelles perspectives à la MO. En parallèle, les besoins toujours plus poussés en matière de données de référence ont montré les limites des standards de 1974, notamment avec les évolutions de l'immobilier, de l'aménagement du territoire et certains projets d'infrastructures nationales. L'ensemble de ces aspects ont alors mené à mettre à jour les dispositions légales et les normes techniques y relatives, à commencer par l'ordonnance sur la mensuration officielle (OMO, 1992) et son ordonnance technique (OTEMO, 1994) dans le cadre de la réforme sur la mensuration officielle.

Cette réforme introduit deux nouveaux standards de qualité :

Numérisation préalable – NP

Numérisation (calcul) ou digitalisation à partir des éléments d'une mensuration conforme à un standard fédéral et des éléments techniques de la mise à jour (directives fédérales de 1993).

Mensuration officielle de 1993 - MO93

Données numériques conformes aux directives fédérales de 1993.

Trois aspects techniques se dégagent particulièrement de cette réforme concernant les données de la MO :

- Des nouveaux degrés de précision ;

- Un nouveau degré de spécification ;
- Un nouveau cadre de référence.

Ce dernier point s'est concrétisé par l'introduction officielle depuis 2017 de MN95 comme cadre de référence statique pour la MO (*Cadres de référence géodésiques*, [s. d.]). Celui-ci présente comme avantage principal une homogénéité sur l'ensemble de la Suisse. En effet, les mensurations antérieures au changement de cadre de référence sont basées sur la triangulation de points fixes (PF) de premier à troisième ordre MN03. L'introduction des mesures électroniques de distance puis des levés GNSS a permis de mettre en évidence les inhomogénéités présentes dans la triangulation. Lors de l'établissement de la mensuration nationale de 1995, les coordonnées des points du cadre de référence planimétrique ont été définies avec une précision centimétrique à l'échelle de la Suisse.

À l'échelle nationale, les tensions ont été réduites par une transformation par maillage triangulaire. Le maillage triangulaire CHENyx06 repose sur des points fixes planimétriques de premier et deuxième ordre utilisés comme points d'appui (= points de rattachement) pour la transformation (PAT). La densité de points d'ajustage reste donc relativement faible et ne permet pas de tenir compte des nombreuses tensions locales. Pour remédier à ce problème, certains services cantonaux ont décidé de densifier les mailles avec des PFP3. C'est par exemple le cas des cantons de Berne avec BEENyx15 et Fribourg avec FRENyx16. Cette solution a permis d'estomper globalement les tensions, mais la densité de ces nouvelles mailles laisse toujours passer des tensions résiduelles. Ces transformations ont également présenté des effets indésirables sur les données qui en résultent, en particulier entre des lots de mensuration de qualité différente. Les secteurs où ces effets sont les plus visibles sont les lots de mensuration issus d'une numérisation préalable et leur voisinage direct.

Les enjeux actuels de la mensuration officielle suisse (MO) visent un recouvrement complet du territoire avec des données au standard MO93. Actuellement, une partie importante est encore issue de numérisations préalables. Pour celles-ci, les dispositions légales préconisent des entreprises de renouvellement de la MO (REN). En opposition à un Premier relevé, celles-ci consistent à modifier et compléter les données existantes pour les adapter aux exigences actuelles.

Une fois numérisés, ces lots de mensuration sont tenus à jour avec la base de données de la mensuration officielle (BDMO) et leur qualité locale est suffisante pour la majorité de leurs applications. Petit à petit, la mise à jour permanente complète les lacunes en mettant ponctuellement aux standards et précisions actuels les biens-fonds touchés par les mutations. Certains cantons, comme Fribourg, ont également étendu les travaux de mise à jour périodique aux lots issus de NP. De cette manière, la couverture du sol et les objets divers de ces secteurs atteignent le degré de spécification prévu par les directives de la Conférence des services cantonaux du cadastre (CSCC). On constate donc que la richesse des données des NP et leur précision locale tendent vers le standard MO93. Toutefois, des erreurs systématiques sur les coordonnées persistent malgré les traitements réalisés lors du changement de cadre de référence.

2.2 Tensions locales et systèmes inhomogènes

La précision et la fiabilité externe des points d'une NP sont rarement conformes au standard MO93 et aux enjeux actuels de la MO. Malgré tout, la précision locale d'un point calculé à partir de ses éléments d'origine reste la plupart du temps satisfaisante pour les travaux courants de géomatique. Lorsque l'écart-type sur les points est supérieur à la précision requise par l'OTEMO, et qu'il peut être corrigé moyennant un ajustement local, on parle alors de zones de tensions (CSCC, 2010).

Un autre exemple pratique de traitement de tensions locales dans la MO est la mise à jour dans les territoires en mouvement permanent (CSCC, 2004). En effet, sans parler de tension locale, le Code civil prévoit ce cas pour lequel une limite théorique peut être adaptée à sa situation sur le terrain. La méthode recommandée pour le traitement de ces zones est le positionnement des nouveaux éléments

par ajustage local (transformation ou interpolation) par analogie à la directive concernant l'utilisation de GNSS pour la détermination de points de détail en MO.

La recommandation concernant l'« analyse des tensions locales pouvant affecter des mensurations et délimitation des zones où les tensions sont négligeables » (swisstopo, 2011) propose certaines mesures d'amélioration afin de minimiser ces tensions. Celles-ci se présentent sous la forme d'outils de transformation et d'interpolation. Il y est toutefois fait mention de l'importance de l'échantillon de point d'appui, notamment leur représentativité de la « tendance » d'un secteur et de leur répartition, ainsi que de l'homogénéité des tensions. Il est souligné que le rapport coût/bénéfice d'une telle méthode peut être déséquilibré et que l'amélioration attendue reste relative lorsque les conditions ne sont pas optimales.

Dans la « recommandation pour l'application des transformations géométriques en mensuration officielle », swisstopo mentionne les résultats de diplômants de la Fachhochschule Nordwestschweiz visant à l'homogénéisation de réseau de points fixes par des transformations et interpolations. Les constats mentionnent entre autres que ces méthodes ne sont applicables qu'à certaines conditions, notamment :

- les données doivent être homogènes localement ;
- l'échantillon de points d'appui doit être représentatif des tensions du voisinage ;
- les points d'appui ne doivent pas être entachés d'erreur ;
- un échantillon de points de contrôles indépendants doit être disponible.

Swisstopo appuie qu'aucune solution « presse bouton » appropriée n'existe. Ainsi, la nécessité d'avoir un échantillon de points suffisamment représentatif et contrôlé, et les analyses des tensions et des effets des transformations représentent la plupart du temps un volume de travail trop important pour les effets attendus.

Dans une perspective de mise en œuvre, dans les secteurs issus d'anciennes mensurations, il est préconisé d'intégrer ces opérations dans le cadre de renouvellement.

2.3 Enjeux

La mise à niveau de la mensuration officielle dans les secteurs issus d'une numérisation préalable figure comme le premier objectif de la stratégie de la mensuration officielle pour les années 2024 à 2027 (swisstopo, 2024). Le standard MO93 a déjà trente ans. Les disparités entre les cantons et les montants investis pour les programmes de renouvellement des cantons constituent un frein à la mise en œuvre des autres objectifs de la MO. Pour les cantons romands, cela implique des mandats à planifier à court terme avec les géomètres privés et des montants investis se comptant en dizaines de millions (*Exposé des motifs et projet de décret accordant au Conseil d'Etat un crédit d'investissement [...]* 2020). Les perspectives d'optimisation de ces processus peuvent donc avoir un rôle central dans la mise en œuvre de la MO à moyen terme. Beaucoup de ressources ont déjà été investies autour de ces réflexions dans le cadre du changement de cadre de référence, pour des résultats relativement mitigés.

En dehors des objectifs directement liés à la mise en œuvre de la mensuration officielle, la problématique du traitement des tensions locales est au cœur de nombreux aspects de la gestion de données géographiques. Par exemple, l'intégration de données établies sur la base d'une ancienne mensuration ou cadre de référence doit être adaptée aux nouvelles déterminations de la MO. C'est pourquoi il est demandé, par exemple, de documenter les zones de tensions avec les bases de calculs afin de pouvoir les appliquer sur d'autres géodonnées. Avec l'augmentation du nombre de gestionnaires de données géographiques et la démocratisation des sytèmes GNSS, entre-autres, les tensions locales ajoutent un niveau d'incohérence dans les systèmes d'information.

Les données de portée publique du cadastre des restrictions de droit public à la propriété foncière (RDPPF) sont un bon exemple de ces enjeux, ainsi que les réflexions quant à un projet de cadastre des conduites. Ces systèmes d'information se basent sur des géodonnées de provenances diverses, référencées de manière variable. Une transformation ou une interpolation simple semble difficilement envisageable sans dégrader des conditions géométriques (alignement sur les limites de propriété, par exemple) ou induire des déformations internes indésirables. Celles-ci peuvent toutefois être considérées homogènes localement et des points d'appui peuvent être identifiés. Il sera donc intéressant d'étendre les réflexions du travail et étudier les opportunités qu'elles représentent dans ces contextes d'applications.

2.4 Outils existants

Dans la pratique de la MO, plusieurs méthodes et outils sont proposés et couramment utilisés. Principalement, ces méthodes se déclinent en trois catégories :

2.4.1 Outils de calculs topométriques

Ces outils permettent le calcul traditionnel des observations de la MO :

- Levé polaire
- Levés orthogonaux
- Cheminements orthogonaux
- Intersections
- Conditions géométriques (alignement, perpendicularité)
- Cote simple
- Transformations à 4 ou 6 paramètres
- Moyennes arithmétiques de coordonnées

Ces observations sont calculées sur la base de points connus. Les indicateurs en sortie se résument généralement aux écarts-types sur les moyennes arithmétiques.

Ces outils sont privilégiés pour les calculs courants d'éléments de détail (points limites et points de situation).

2.4.2 Outils de compensation de réseau géodésique

Ces outils permettent la compensation des observations sous forme de réseau. Les applications courantes reposent sur le modèle de Gauss-Markov avec une compensation par les moindres carrés, minimisant la somme des carrés des résidus normés. Elles intègrent ainsi un modèle stochastique rigoureux pour chaque groupe d'observations et offrent les indicateurs nécessaires à l'évaluation globale du calcul du réseau (quotient d'erreur moyenne sur les groupes d'observations, indicateur de précision a posteriori, fiabilité externe).

Un calcul libre-ajusté permet également le contrôle de l'homogénéité des points d'appui par rapport au réseau géodésique compensé.

Ces outils sont privilégiés pour le calcul de réseau de points fixes et de réseaux géodésiques particuliers.

Nelcas s'insère dans cette catégorie mais se différencie par son approche de la compensation par les moindres carrés avec contraintes, particulièrement adaptée aux pratiques de la mensuration officielle. Il permet de saisir et intégrer l'ensemble des types d'observations et de contraintes habituels. Nelcas est optimisé de manière à permettre le calcul de plusieurs milliers de points et d'observations. L'ouverture de son code Python et l'approche modulaire de son développement offrent également des possibilités intéressantes pour sortir du calcul de réseau traditionnel et décliner le moteur de calcul à d'autres contextes d'applications.

2.4.3 Outils de transformation et d'interpolation

Ces outils sont adaptés pour les adaptations locales en mensuration officielle ou pour les travaux de mensuration technique. Par exemple, le module TRANSINT de swisstopo permet des transformations géométriques et des interpolations.

Cet outil se démarque en particulier par deux méthodes d'interpolation.

Transint – pondération inverse à la distance avec corrélation

Cette méthode consiste à déterminer le vecteur de transformation d'un point par une moyenne pondérée des vecteurs sur les points d'appui.

La relation d'un point connu dans deux systèmes peut être définie comme suit :

$$\begin{pmatrix} E_i \\ N_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_i \\ x_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_{E_i} \\ v_{N_i} \end{pmatrix} \tag{2.1}$$

Avec :

- E, N : les coordonnées du point p dans le système global (destination) ;
- y, x : les coordonnées du point p dans le système local (origine) ;
- v_E, v_N : les vecteurs entre les cooordonnées du système d'origine vers la destination.

Les coordonnées d'un point p dans le système global peuvent être déterminées par pondération des vecteurs des points rattachement voisins :

$$\begin{aligned} v_{E_p} &= \frac{\sum_{i=1}^{n} p_i \cdot v_{E_i}}{\sum_{i=1}^{n} p_i} \\ v_{N_p} &= \frac{\sum_{i=1}^{n} p_i \cdot v_{N_i}}{\sum_{i=1}^{n} p_i} \end{aligned} \tag{2.2}$$

Avec p_i la fonction de poids du vecteur.

La pondération simple est réalisée à l'inverse de la distance :

$$p_i = \frac{1}{d_i^2} \tag{2.3}$$

Avec d_i la distance du point ajusté au point d'ajustage i.

Même avec une répartition homogène des points de rattachement, l'influence de groupes de points reste possible bien qu'indésirable. Empiriquement, swisstopo ont déterminé une fonction de corrélation convenable entre les points de rattachement :

$$r_i = 0.9 \cdot e^{-(\ln 1.8)\frac{d_i^2}{d_0^2}} \tag{2.4}$$

Avec d_0 le paramètre constant représentant la distance entre deux points d'ajustage pour lesquels la corrélation a été fixée à r = 0.5.

Fineltra – transformation par maillage triangulaire

Cette méthode d'« interpolation » correspond à une combinaison de transformations affines par triangle, les trois sommets offrant les observations requises pour calculer les six paramètres de la transformation. Pour ce faire, les coordonnées transformées sont issues d'une pondération des vecteurs proportionnellement à la surface opposée aux sommets des triangles (Condamin et al., 2022).

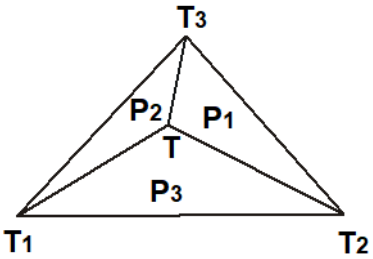

FIGURE 2.1 – Représentation d'un triangle FINELTRA

Ainsi, les coordonnées dans le système global sont obtenues de la manière suivante :

$$\begin{aligned} E &= \frac{v_{y_1} \cdot P_1 + v_{y_2} \cdot P_2 + v_{y_3} \cdot P_3}{P_1 + P_2 + P_3} \\ N &= \frac{v_{x_1} \cdot P_1 + v_{x_2} \cdot P_2 + v_{x_3} \cdot P_3}{P_1 + P_2 + P_3} \end{aligned} \tag{2.5}$$

Avec :

- v_{y_i} : le vecteur $E_i - y_i$;
- v_{x_i} : le vecteur $N_i - x_i$;
- P_i : la surface du triangle opposé au sommet i ;

Quelques aspects propres à la méthode sont à souligner :

- La transformation affine par maille ne reposant pas sur une surdétermination, toute erreur sur les points d'appui se reporte pleinement sur les points transformés et n'est donc pas détectée.
- Les exigences d'un nombre de triangles réduit et d'une précision de transformation élevées sont contradictoires.
- Pour permettre l'appréciation correcte de la qualité d'un triangle, celui-ci doit au moins comprendre trois points de contrôle (swisstopo, 2017).

D'autres modèles d'interpolation sont également implémentés dans le module Geosuite TRANSINT (Shepard modifiée, etc.). Ces méthodes étant moins bien introduites dans la pratique, elles ne seront pas développées davantage dans ce travail. La documentation grise relative figure dans la bibliographie.

Toutes ces transformations présentent toutefois des limites dans leur application à l'échelle locale. Certains risques demandent une analyse critique importante de l'opérateur concernant le choix de l'outil, des points d'appui et l'analyse des résultats. Ces méthodes sont plutôt privilégiées pour des transformations "grande maille", pour traiter des systématismes à l'échelle d'un territoire, sans effet de bord sur le voisinage.

2.4.4 Autres

D'autres algortihmes ou modèles mathématiques existent mais ne sont pas introduits dans la pratique. Pourtant, ceux-ci peuvent constituer des outils intéressants dans le contexte précité. Deux axes de recherche seront abordés plus spécifiquement dans les perspectives (voir chapitre 6.3) :

- la collocation (Least squares collocation) ;
- les algorithmes génétiques.

Chapitre 3

Méthodologie

3.1 Approche théorique

Comme souligné précédemment, le principal enjeu lié à la reprise des données des mensurations antérieures est leur intégration locale. Dans les secteurs soumis à des tensions, cette étape est nécessaire afin de pouvoir valoriser les éléments de la mensuration approuvée et de la mise à jour.

L'approche choisie pour ce travail est de considérer l'échelle la plus grande supposée homogène : le voisinage. Les méthodes de transformation et d'interpolation utilisées lors du changement de cadre de référence présentent des limites techniques et de mise en œuvre à cette échelle. La finalité du travail est donc d'offrir un moyen de transformer, ou *démailler*, des coordonnées homogènes dans un voisinage vers un cadre de référence homogène globalement. Le voisinage peut être considéré comme la relation entre un point donné et les points situés dans un rayon d_0. L'approche finale proposée par ce travail est de considérer ces relations comme des observations.

De cette proposition initiale, trois scénarios d'implémentation ont été formulés. Ils se présentent sous la forme d'une reprise ou d'une génération d'observations locales homogènes qui pourront être intégrées à un moteur de calcul par les moindres carrés. Cette approche permet une compensation et un ajustement rigoureux des données sur des observations de coordonnées en MN95. Elle offre également les moyens d'analyser les résultats et de compléter par des observations complémentaires les lacunes du calcul. Finalement, passer par le moteur de calcul Nelcas permet d'intégrer des observations et contraintes supplémentaires visant à préserver ou corriger l'intégrité géométrique des données en sortie de calcul.

Les scénarios ne sont pas directement substituables et les opportunités d'application dépendent des types de données à disposition et de leur qualité. En revanche, ces scénarios se fondent sur les mêmes principes fondamentaux. Ils sont ainsi tous paramétrés par les aspects suivants, déjà introduits dans les chapitres précédents :

- La précision locale d'un point ;
- La relation de voisinage d_0 ;
- La densité et la répartition des points d'appui.

D'un point de vue technique, les scénarios doivent se distinguer en étant utilisables avec des ressources limitées. Chaque processus doit pouvoir être appliqué avec un certain systématisme et une approche pratique, fournir des éléments d'autocontrôle suffisants et permettre d'identifier les fautes grossières ou lacunes.

Seule la planimétrie a été traitée. Les processus complets et les fonctionnalités implémentées de chaque scénario sont détaillés au chapitre 4.

3.2 Outils et environnement de développement

Environnement Nelcas

Les développements ont été réalisés dans l'environnement de l'outil Nelcas, développé par l'HEIG-VD et l'Institut d'Ingénierie du territoire (INSIT). Ce logiciel permet l'ajustement des réseaux par les moindres carrés, orienté entre autres pour les travaux de MO. Il offre notamment des fonctionnalités qui lui sont propres afin d'intégrer l'ensemble des observations usuelles de la MO et des contraintes géométriques dans la compensation. Cet environnement intègre également une standardisation des fichiers de points, d'observations et de paramètres de compensations au format XML (Casto et al., 2022). Les outils de reporting, de visualisation graphique, les contrôles de cohérence syntaxique et géométrique du réseau, ainsi que le module de calcul des coordonnées approchées en font une boîte à outils particulièrement adaptée aux travaux de MO. Une approche modulaire a été privilégiée pour les implémentations du TM, afin de ne pas altérer le développement continu de Nelcas et avoir un outil autonome pouvant être rattaché ultérieurement au logiciel. Malgré tout, quelques adaptations ont été nécessaires dans le code source de Nelcas. Il s'agit principalement des aspects liés à l'intégration des paramètres de transformation affine à Nelcas, comme le fichier de modèle XSD et le code source Python (voir ci-dessous)

Python

L'implémentation a été réalisée dans le langage de programmation Python, comme pour Nelcas. Les librairies suivantes ont été utilisées :

Nelcas	
geometrieUtils	Opérations géométriques simples (librairie modifiée)
controlesCoherenceUtils	Contrôle de l'intégrité des fichiers en entrée (librairie modifiée)
conversionUtils	Conversions de fichiers liées à la standardisation XML
Autres	
scipy : spatial	Traitements SIG simples (Delaunay, etc.)
pandas	Lecture/écriture de tables de données XLSX et CSV
matplotlib	Plot graphique

Les compensations simplifiées réalisées pour les scénarios 2 et 3 sont également inspirées de la librairie Nelcas estimationUtils (librairie modifiée).

Divers

En dehors des développements personnels, les outils ArcGIS Pro et FME ont été utilisés pour la préparation des données de base pour les tests.

3.3 Définitions des scénarios

3.3.1 Reprise de mesures approuvées

Ce scénario vise à étudier les opportunités de recalculer les éléments de la mensuration officielle (MO) à partir des mesures de la mensuration d'origine et de ses mises à jour ultérieures.

Il est courant dans les tâches usuelles de la MO de calculer les éléments numérisés à partir des levés d'origine. Le calcul des levés polaires et orthogonaux est généralement réalisé sur la base des points de polygonation d'époque. Les levés faisaient alors l'objet d'un levé de contrôle et d'une moyenne arithmétique, ou étaient fiabilisés au moyen d'une cote de contrôle efficace.

Cette méthode atteint rapidement certaines limites pour les besoins actuels de la MO, en particulier :

- La précision globale dépend de la qualité des points de polygonation, qui peuvent être entachés de leurs propres tensions.

- Une simple moyenne arithmétique ne tient pas directement compte des précisions selon les types d'observations et n'offre pas les indicateurs permettant de qualifier rigoureusement la qualité d'un point calculé.

Malgré tout, les mesures archivées restent des observations homogènes, avec leur précision intrinsèque, et gardent une certaine portée technico-juridique. Ces mesures peuvent facilement être qualifiées en fonction des tables de tolérance de l'époque ou des informations disponibles sur l'instrumentation utilisée puis être intégrées dans un moteur de calcul par les moindres carrés. Si les évolutions techniques en matière de mesures électroniques de distance sont significatives, il faut également souligner que les observations de direction d'époque restent largement tolérables pour atteindre les exigences actuelles de la MO dans un certain voisinage. Ainsi, une compensation avec un modèle stochastique rigoureux privilégiera les intersections de direction et offrira une amélioration globale des éléments calculés. De même, les précisions des méthodes orthogonales offrent la plupart du temps des résultats satisfaisants lorsque les conditions sont adéquates.

Finalement, ces observations sont ajustées par le calcul sur un échantillon de points mesurés en MN95, eux-mêmes contrôlés par le calcul libre-ajusté. En addition, le nombre d'observations offertes par les documents techniques de la mise à jour offre une surabondance importante dans les secteurs les plus dynamiques, où les niveaux de tolérance sont généralement les plus élevés.

Le calcul par moindres carrés permet aussi de réaliser des contrôles de cohérence, offre les indicateurs et des outils robustes afin de limiter l'impact des fautes sur les données en entrée de calcul.

Contrairement aux scénarios suivants, les points de situation ne sont pas traités dans ce scénario pour des questions de mise en œuvre. En effet, la saisie des éléments techniques, l'identification des points et l'épuration des observations prennent des proportions importantes et intègrent certaines incertitudes. Par exemple, la difficulté à distinguer une modification d'une construction (isolation périphérique, par exemple) du bruit d'une observation d'époque relève d'une certaine part d'interprétation aux vues des précisions attendues.

3.3.2 Simulation d'observations fictives

Le but de ce deuxième scénario est également de valoriser au maximum les éléments de la mensuration approuvée, mais sans remonter jusqu'aux mesures d'origine. Seules les coordonnées issues de la numérisation préalable, respectivement les éléments figurant en BDMO, sont reprises. Ce scénario mise en effet sur l'homogénéité et la précision locale entre les points dans leur voisinage, qualifiables autant pour des points calculés lors de la numérisation ou d'une mutation que pour un point digitalisé.

Sur ce principe, le but est de dériver les coordonnées en observations locales, puis de les intégrer dans des relevés en MN95 par le moteur de calcul par les moindres carrés. La précision des observations ne sera donc pas relative aux mesures d'origine, mais à la précision locale attendue des coordonnées en BDMO.

Lors de la définition du processus, le type d'observations simulées a été testé pour des levés polaires et de systèmes locaux. Abstraction faite du type de coordonnées locales (polaires ou cartésiennes), le modèle stochastique est identique (voir 4.2.1). La seule différence se trouve dans le regroupement des observations polaires dans des objets "stations" plutôt que la génération de systèmes locaux par point. Aucune différence significative n'a été constatée lors des tests. Le choix s'est finalement porté sur la simulation d'observations polaires qui présente certain avantage :

- observations en partie assimilables aux mesures réelles d'époque ;
- réseau d'observations visuellement plus facile à appréhender ;
- structuration des observations fictives parmi le reste du réseau (identifiant de station, autres types d'observations simulées, etc.).

Dans l'hypothèse où la majorité des tensions résiduelles proviennent des polygonales, le choix a été fait pour les premiers tests de simuler les observations polaires depuis un canevas connu d'anciens points de polygones. Dans un deuxième temps, un simulateur général à partir d'une grille régulière de stations fictives a été implémenté.

Le procédé est assimilable en pratique à un ensemble d'ajustements locaux compensés par les moindres carrés.

3.3.3 Transformation par triangles via moteur de calcul par les moindres carrés

Le troisième scénario se base également sur les données issues de la BDMO. La méthode est assimilable à une interpolation par maillage triangulaire (voir 4.3.1). La différence est que le traitement n'est pas un processus isolé, mais est intégré à une compensation par les moindres carrés.

Concrètement, le résultat du calcul est identique à FINELTRA mais le modèle fonctionnel est modifié de sorte que les paramètres de la transformation affine soient rigoureusement ajustables par les moindres carrés. L'intérêt principal est d'intégrer un contrôle préalable des points d'appui par rapport à leur voisinage et de permettre l'ajout d'observations complémentaires. Par exemple, des points de contrôle pourront être intégrés directement à la compensation dans chaque triangle. En ajoutant des contraintes sur la géométrie des bâtiments ou sur les limites, les sommets de triangle présentant des déformations aberrantes pourront être identifiés.

3.4 Méthode d'évaluation

L'évaluation des trois scénarios a été réalisée sur la base de deux jeux de données principaux. Un jeu de données fictives a été utilisé afin de valider les hypothèses théoriques des scénarios 2 et 3, en y induisant des tensions maitrisées. Les coordonnées DOIT étant connues, l'analyse des résultats a été réalisée directement par comparaison de coordonnées. Un jeu de données réelles a été utilisé afin de confronter les hypothèses théoriques à un cas pratique et comparer les résultats au scénario 1. Dans ce jeu de données, un échantillon de points de contrôle indépendant a été levé afin de comparer les résultats entre les scénarios. La présentation détaillée des jeux de données et des tests figure en annexe 1 du rapport.

En complément, les indicateurs ressortant des traitements ont également été analysés. En particulier, les effets sur les points d'appui et leurs résidus donnent une bonne appréciation de l'état général du réseau.

En parallèle, le scénario 2 a fait l'objet de tests indépendants par l'INSIT afin d'évaluer différentes configurations de jeux de données et de tensions. Les résultats sont également résumés dans le rapport technique annexé.

Chapitre 4

Développement des scénarios

4.1 Scénario 1 – Reprise de mesures approuvées

4.1.1 Développements théoriques

Les éléments théoriques de ce scénario se présentent comme une compensation de réseau géodésique classique par les moindres carrés avec contraintes entre les paramètres. Il n'appelle aucun commentaire particulier. Sans rappeler ces principes, l'implémentation de Nelcas s'appuie sur la littérature grise spécialisée et le support de cours du Prof. Sébastien Guillaume « Méthodes d'estimation et réseaux géodésiques ». La documentation de l'outil décrit ces éléments, en particulier les aspects propres à l'implémentation des contraintes géométriques (Casto, 2022).

Pour sa mise en œuvre, le scénario utilise comme données :

- Observations du réseau (formulaires de levé repris de la mensuration d'origine et de la mise à jour) ;
- Contraintes géométriques (identifiées aux moyens des croquis d'origine et esquisses de mutation) ;
- Points de rattachement (observations GNSS en MN95) ;
- Coordonnées approchées (calculées dans le cadre du processus, un échantillon initial suffisant reste nécessaire) ;
- Eventuellement, observations complémentaires.

4.1.2 Modèle stochastique

Le remplissage des matrices de variance-covariance est réalisé selon les équations usuelles (voir documentation de référence mentionnée ci-dessus). Les groupes d'observations ont été définis sur la base des informations disponibles, respectivement de l'instrumentation et/ou de la date des mesures et des standards de qualité en vigueur. Lorsque cela s'est montré pertinent, les groupes d'observations ont été subdivisés selon les années suivantes :

- 1912 - 1970
- 1970 - 1990
- 1990 - aujourd'hui

Précision angulaire

Si information disponible, la précision instrumentale a été reprise. Sinon, elle est estimée à partir de la date de l'observation.

Distances

Si information disponible, la précision instrumentale a été reprise. Sinon, la constante est estimée et le facteur d'échelle dégradé relativement à la date de l'observation.

Centrage

Estimé relativement à la date de l'observation (à la station et au point visé).

Systèmes locaux et sessions GNSS

Estimé selon le type d'observation (voir figure 1.1).

Mesure simple

Erreur moyenne globale.

Les erreurs moyennes à priori ont été ajustées empiriquement selon les quotients issus de la compensation par les moindres carrés, après l'analyse et la suppression des fautes grossières.

4.1.3 Processus

Le processus s'appuie sur les principes d'une compensation de réseau géodésique conventionnelle. Quelques particularités spécifiques à la reprise d'éléments techniques anciens et à l'utilisation du moteur Nelcas sont à mentionner. Les étapes clés sont commentées ci-dessous.

Préparation d'un formulaire de saisie

Nelcas intègre des outils de création et d'édition des fichiers au standard XML (observations, points, paramètres). Au vu du volume de la saisie, un formulaire type Excel a été préparé afin de faciliter la saisie des observations et des contraintes de la MO (4.1). Celui-ci a permis le renseignement rigoureux des observations, avec leur date, instrument et autres commentaires. La classification des groupes d'observation a été réalisée automatiquement directement dans le fichier Excel selon les informations disponibles. Les éléments repris figurent en 1.1.

Certains points non conservés ont également été numérotés manuellement pour les intégrer au réseau d'observation. Les observations sur d'anciens points ont été saisies, mais non numérotées.

Conversion au standard XML

Des scripts ont été développés sur Python pour convertir le fichier de saisie Excel au standard XML de Nelcas. Un script supplémentaire a été réalisé pour convertir des extraits de points au standard XML. Ce dernier modèle a été adapté pour permettre l'ajout de balise supplémentaire, notamment l'attribut « planiStdDev » (écart-type) ou des attributs de classification permettant de faciliter l'analyse ultérieure.

Calcul des coordonnées approchées

Le calcul des coordonnées approchées a été réalisé avec le module éponyme de Nelcas. Celui-ci convertit les stations polaires en coordonnées cartésiennes locales, puis les transforme par Helmert sur les coordonnées connues lorsqu'au minimum deux points homologues sont connus. Le calcul est itératif et permet d'obtenir les coordonnées approchées de la majorité des points. À noter que la saisie préalable des coordonnées des anciens points de polygones peut être nécessaire.

À la suite de cette étape, un contrôle du fichier de coordonnées approchées à l'aide de l'outil *doublons géométriques* permet une première épuration des observations et des identifiants de points manquants ou erronés (4.2).

Compensation libre-ajustée et épuration des observations

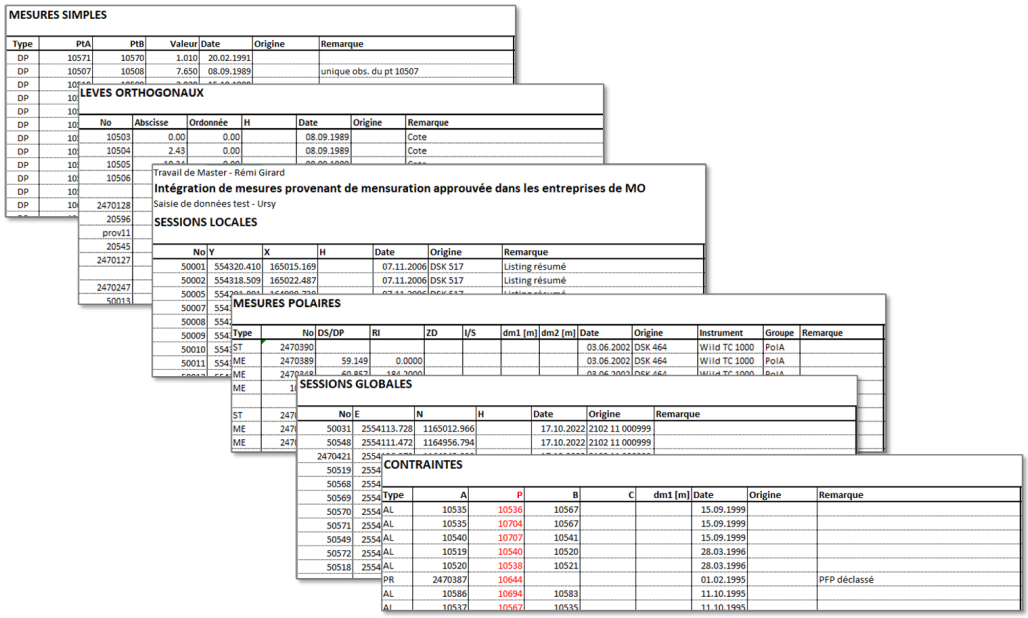

FIGURE 4.1 – Aperçus des formulaires de saisie

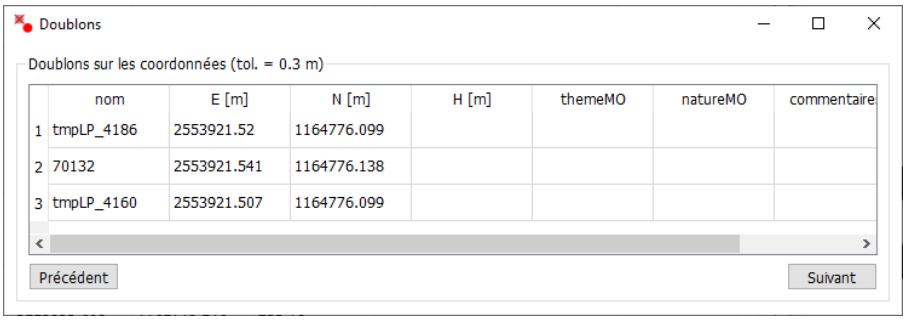

FIGURE 4.2 – Aperçu de l'outil de contrôle des doublons géométriques

Le fichier de paramètres a été réalisé sur Nelcas avec le modèle stochastique initiale. Les points de rattachement ont été ajoutés automatiquement au moyen d'un script Python à partir d'un listing CSV de points mesurés en MN95. Les coordonnées approchées de ces points ont été remplacées par la même occasion dans le fichier de points.

À ce stade, un premier calcul a été lancé avec les options de contrôle de cohérence. Ceci a permis de mettre en évidence une première série de fautes grossières issues de la saisie (numérotation de points, faute de frappe). Passé un stade, ces contrôles ont été désactivés afin de passer les dernières erreurs présentes (écart latéral sur des directions de contrôles éloignées).

La suite de l'épuration a été réalisée par itérations de calcul en adaptant le modèle stochastique des groupes d'observation et en analysant une à une les observations litigieuses. Si nécessaire, les points de rattachement hors tolérance ont été désactivés.

4.1.4 Analyse critique

Les tests sont détaillés dans le rapport annexe 1.

Les résultats obtenus satisfont les exigences de la mensuration (4.4, 4.5, 4.6, 4.7). Considérant l'échantillon de points d'appui et de contrôle, les indicateurs obtenus peuvent même être considérés comme

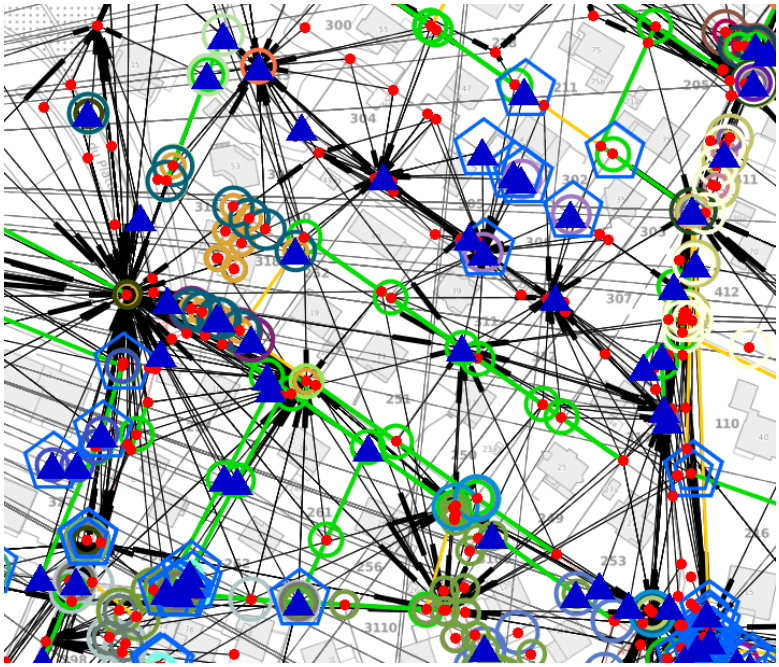

FIGURE 4.3 – Extrait du canevas des observations reprises (ResMap)

une illustration pessimiste du scénario. Un certain nombre d'anciens points de la MO ont été calculés. Cette étape est facultative et les indicateurs sur ces points sont généralement en deçà de la moyenne. Elle permet par contre de densifier le réseau d'observations, notamment dans les secteurs peu touchés par la mise à jour. Malgré tout, la moitié des points présentent des demi-grands axes d'ellipse d'erreur inférieurs à 3 cm.

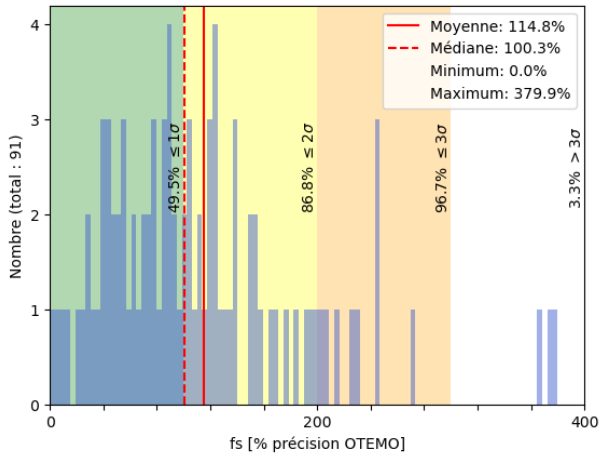

FIGURE 4.4 – Fs normés, pts de contrôle (S1)

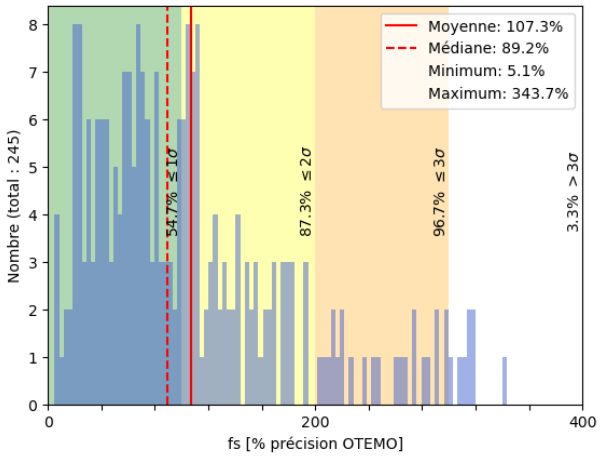

FIGURE 4.5 – Fs normés, pts de ratt. (S1)

D'un point de vue opérationnel, ce scénario reste relativement chronophage, en particulier en raison des travaux de saisie des mesures, l'analyse des esquisses, l'identification des points et l'épuration des mesures. Ces aspects sont communs au calcul traditionnel. Pour une estimation du temps similaire, le calcul par les moindres carrés présente donc un avantage certain en termes de qualité du produit.

Quelques remarques sont à souligner quant à la réalisation du scénario sur les outils de Nelcas. Globalement, l'application offre des outils précieux, dont certaines fonctionnalités développées en parallèle du travail, en coordination avec l'HEIG-VD. L'analyse des doublons géométriques, les contrôles de solvabilités géométriques, les outils de filtrage du visualisateur ResMap et l'assouplissement des ba-

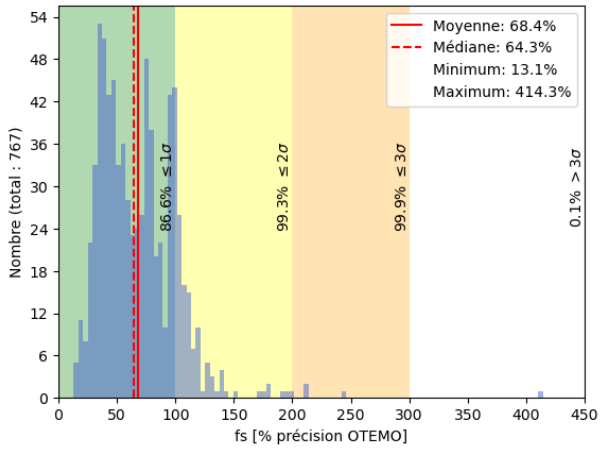

FIGURE 4.6 – Demi-grand axe, points BDMO recalc.

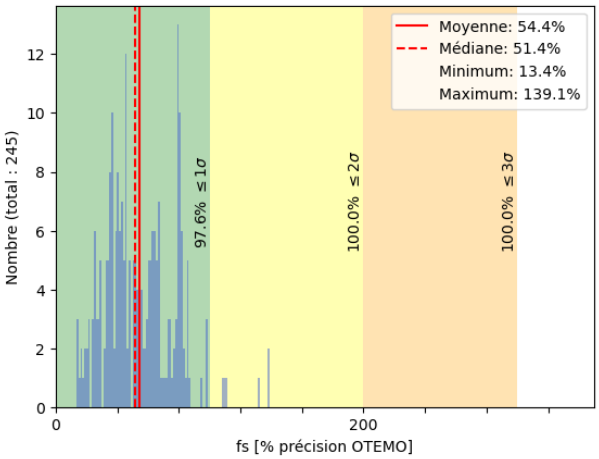

FIGURE 4.7 – D.-g. axe, points de ratt. (S1)

lises personnalisées dans les modèles XSD sont ainsi autant d'ajouts propres au moteur de calcul qui en font un outil à privilégier dans le contexte de ce scénario.

D'autres spécificités propres à la reprise de mesures d'époque ont été soumises pour d'éventuels ajouts ultérieurs, comme l'impossibilité de calculer les coordonnées approchées lorsqu'une station est déterminée par son emplacement et une direction seule (clocher, sommet). L'algorithme ne dispose effectivement pas de suffisamment d'éléments pour calculer la transformation. Pour remédier à ce problème, un script a été réalisé afin de calculer une distance à partir des coordonnées connues, permettant alors de calculer les coordonnées locales nécessaires pour la transformation et le calcul des coordonnées approchées.

4.1.5 Développements possibles

Malgré des résultats de meilleure qualité pour un investissement en temps similaire à un calcul traditionnel, la charge de travail impliquée par le scénario 1 reste conséquente. Sans autres considérations, la comparaison coûts/bénéfices de cette méthode par rapport à un double levé systématique, par exemple, reste délicate et dépendera de considération locale avant-tout (qualité, accessibilité, visibilité, etc.). Les principales tâches alourdissant la mise en œuvre sont décrites ci-dessous. Elles ouvrent sur des pistes d'amélioration relatives.

Saisie des formulaires de levé

La numérisation des formulaires de levés ne demande pas de compétence particulière, mais représente un volume de travail important. Cette étape est également la source potentielle de fautes de copie qui auront une incidence sur les étapes d'analyse et d'épuration des observations.

Les outils de reconnaissance de texte existent depuis de nombreuses années. Ils présentent également des limites de robustesse. Toutefois, avec l'évolution exponentielle qu'ont connue les algorithmes de *deep learning* ces dernières années, il serait intéressant d'entrainer un outil à la reconnaissance de formulaires de levés, de qualifier le résultat obtenu et de le comparer avec une intervention humaine.

Identification des points levés et épurations des mesures

Ces étapes représentent la part la plus chronophage du scénario, notamment en raison de la recherche des esquisses de mutation, de leur analyse et du contrôle des observations hors tolérance à partir de leurs documents d'origine. La qualité du résultat est pourtant tributaire de ces étapes.

Un processus a été proposé dans le cadre du travail, mais n'a pas été retenu pour l'implémentation. À la place, une fonctionnalité d'analyse de doublon géométrique a été ajoutée à Nelcas qui facilite déjà

l'identification des observations.

Le processus complet peut être résumé comme suit :

1. Attribution de numéros provisoires aux mesures polaires et observations de systèmes locaux sans identifiant de point connus (minimum deux points connus nécessaires) ;
2. Calcul des coordonnées approchées par intégrations itératives des levés sur les points connus (fonction existante) ;
3. Analyse des doublons géométriques (fonction existante à modifier), avec les cas possibles :
   - Attribution de l'identifiant du point aux coordonnées approchées temporaires situées dans le rayon de tolérance d'un point connu (les observations correspondent donc à un point existant),
   - Attribution d'un identifiant commun aux amas de coordonnées approchées temporaires (les observations correspondent à d'anciens points, pour la densification du réseau),
   - Listing des coordonnées approchées isolées (les observations contiennent une faute probable ou une absence de surabondance sur un ancien point → observations inutiles),
   - Listing des stations présentant un nombre faible ou insuffisant de points homologues avec le reste du réseau (les observations contiennent une faute probable ou des observations isolées du réseau) ;
4. Réattribution des nouveaux identifiants de points aux observations.

Sur le jeu de données test, la saisie représente 60% du temps investi jusqu'à un calcul satisfaisant et l'épuration 40%. Avec ce processus, le gain de temps est estimé 2/3 pour la saisie, qui peut être réalisée à la chaine. Pour l'épuration, le gain sera d'autant plus important que la plupart des fautes seront identifiées directement par le processus. Le temps nécessaire estimé est réduit à 1/4 pour cette seconde étape. Le gain total sur le scénario 1 peut donc être estimé à environ 70%, rendant sa mise en œuvre plus intéressante.

4.2 Scénario 2 – Simulation d'observations fictives

4.2.1 Développements théoriques

Les observations fictives peuvent être générées facilement au moyen des coordonnées existantes :

$$r_{ij} = \text{atan2}\left(\Delta\text{CX}_j^i, \Delta\text{CY}_j^i\right) \cdot \rho \tag{4.1}$$

pour une direction horizontales (RI) ;

$$d_{ij} = \sqrt{\Delta\text{CX}_j^{i\,2} + \Delta\text{CY}_j^{i\,2}} \tag{4.2}$$

pour une distance horizontale dans le plan de projection (DP).
Avec :

- r_{ij} : direction du point i (station) vers j (visée) [gon] ;
- d_{ij} : distance dans le plan de projection entre le point i (station) et le point j (visée) [m] ;
- $\Delta\text{CX}_j^i, \Delta\text{CY}_j^i$: différence entre les coordonées Est et Nord des points i et j [m] ;
- ρ : facteur de conversion, $\rho = \dfrac{200}{\pi}$.

La qualification des observations générées peut se baser sur la précision locale des points à partir desquels elles sont générées, selon leur classe de précision MO (= précision locale) et s'ils sont issus de la numérisation ou de mutations ultérieures.
La matrice de variante-covariance $\mathbf{K_{ll}}$ pour une direction horizontale RI est remplie à partir de :

$$\sigma_{r_{ij}}^2 = \sigma_r^2 + \left(\frac{\rho}{d_{ij}}\right)^2 \cdot \left(\sigma_{\odot\text{sta}}^2 + \sigma_{\odot\text{vis}}^2\right) \tag{4.3}$$

Avec :

- $\sigma_{r_{ij}}$: écart-type d'une direction du point i vers j [cc] ;
- σ_r : écart-type d'une direction mesurée [cc] ;
- $\sigma_{\odot\text{sta}}^2$, $\sigma_{\odot\text{vis}}^2$: centrage à la station i et à la visée j [m] ;
- ρ : facteur de conversion, $\rho = \dfrac{2000000}{\pi}$.

Dès lors, l'erreur sur les coordonnées des points peut être reportée sur la précision de la mesure comme suit. Que ce soit sur le centrage à la station i et à la visée j et en négligeant l'erreur sur la mesure de direction ou, à l'inverse, sur l'erreur de la mesure, l'équation devient :

$$\sigma_{r_{ij}}^2 = 0 + \left(\frac{\rho}{d_{ij}}\right)^2 \cdot \left(\sigma_{\text{CXY}_\text{i}}^2 + \sigma_{\text{CXY}_\text{j}}^2\right) \tag{4.4}$$

$$\sigma_{r_{ij}}^2 = \frac{\sigma_{\text{CXY}_i}^2 + \sigma_{\text{CXY}_j}^2}{d_{ij}^2} \cdot \rho^2 \tag{4.5}$$

De la même manière, l'erreur sur les coordonnées de base des points peut être reportée sur les observations de distance dans le plan de projection (DP) de la manière suivante :

$$\sigma_{d_{ij}}^2 = \sigma_d^2 + \left(\frac{\sigma_{d_{\text{ppm}}} \cdot d}{1000}\right)^2 + \sigma_{\text{CXY}_i}^2 + \sigma_{\text{CXY}_j}^2 \tag{4.6}$$

$$\sigma_{d_{ij}}^2 = \sigma_{\text{CXY}_i}^2 + \sigma_{\text{CXY}_j}^2 \tag{4.7}$$

Avec :

- $\sigma_{\text{CXY}_\text{i}}$: écart-type local des coordonnées d'un point i [m] ;
- d_{ij} : distance entre deux points i et j [m].

4.2.2 Modèle stochastique

Comme développé dans le chapitre précédent, la précision des observations simulées est définie sur la précision qu'on peut attendre d'un point dans son voisinage. Concrètement, le résultat du calcul n'améliorera pas la qualité de celle-ci. Mais les indicateurs des observations simulées permettront, par itération, de transformer le point de la manière la plus cohérente par rapport aux rattachements du voisinage, mesurés en MN95.

La reprise de la précision OTEMO permet d'avoir, grâce au quotient d'erreur moyenne, un indicateur sur le groupe d'observation qui permet de qualifier si, globalement, les coordonnées théoriques sont conformes aux précisions attendues. Par contre, les possibilités sont ouvertes pour modifier cette précision à priori, par exemple pour des angles de bâtiments qu'on estimerait mieux déterminés.

La précision des points de rattachement se basera sur l'écart-type réel des mesures GNSS. Le coefficient du groupe permettra ainsi de déterminer si le réseau d'observations simulées est trop rigide ou que le voisinage d_0 est trop grand. Si le coefficient est cohérent et que des points sont écartés du calcul, cela indiquera que ceux-ci ne sont pas homogènes avec leur voisinage (erreur grossière ou problème de matérialisation).

4.2.3 Processus

Le processus détaillé ci-dessous décrit les étapes réalisées par le script Python. Celui-ci est donc entièrement automatisé.

Paramétrage des fichiers en entrée

L'interface (4.8) permet de sélectionner les fichiers et paramètres nécessaires au processus, à savoir :

- Les points de l'ensemble inhomogène à transformer, au format XML ;
- Le rayon d_0 du voisinage supposé homogène ;
- La précision par défaut – ou bruit toléré – d'un point dans ce voisinage ;
- Le type de simulateur (pour ce scénario : « observations » ou « observations et stations ») ;
- Les points de rattachement, au format XML ;
- Le dossier de résultat.

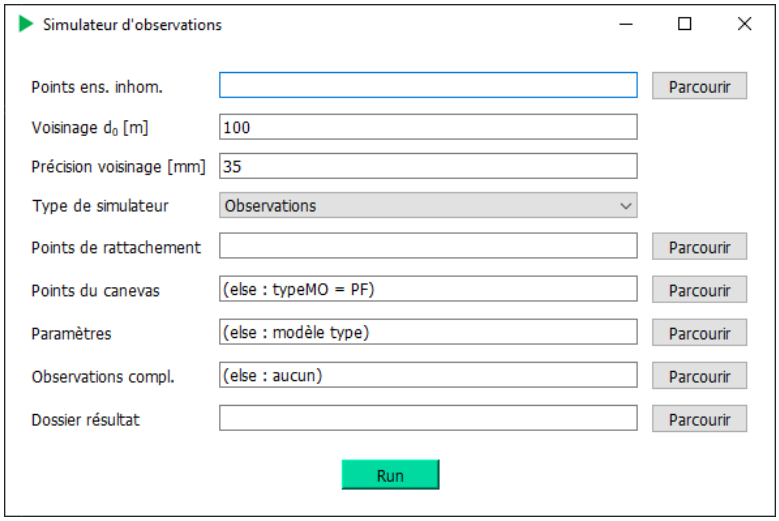

FIGURE 4.8 – Interface utilisateur du simulateur d'observations

Les points de l'ensemble inhomogène à transformer seront, dans notre contexte, issus d'un extrait de la BDMO et intègrent les points fixes, les points limites, les sommets et les milieux d'arcs des arêtes de bâtiments et de natures.

Trois fichiers facultatifs peuvent être ajoutés :

- Un fichier de points avec coordonnées des stations à reprendre, au format XML ;
- Un fichier de paramètres préexistant (uniquement pour la conversion de fichiers), au format XML ;
- Des observations complémentaires (uniquement pour la conversion de fichiers), au format XML.

Import et analyse du canevas de stations fictives

Les points de canevas sont importés soit depuis le fichier facultatif, soit directement depuis les points à transformer présentant un attribut « typeMO » égal à « PF ».

Le canevas est ensuite analysé et des stations fictives supplémentaires sont générées dans les secteurs lacunaires. Pour ce faire, une triangulation de Delaunay est calculée sur les stations. Pour chaque triangle, on contrôle que le barycentre ait une station dans un rayon d_0. Si ce n'est pas le cas, une station fictive est ajoutée au barycentre. Ce contrôle est réitéré jusqu'à ce qu'aucune nouvelle station fictive ne soit nécessaire.

Dans le cas où le simulateur « observations et stations » est sélectionné, les stations sont simulées depuis les sommets d'un maillage régulier de triangle de côté d_0.

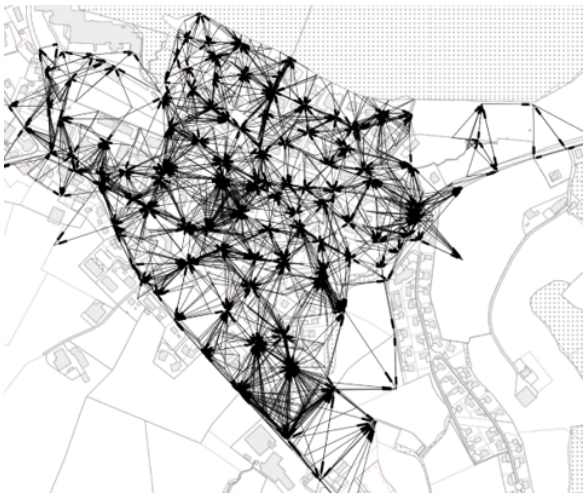

FIGURE 4.9 – Simulation sur PF

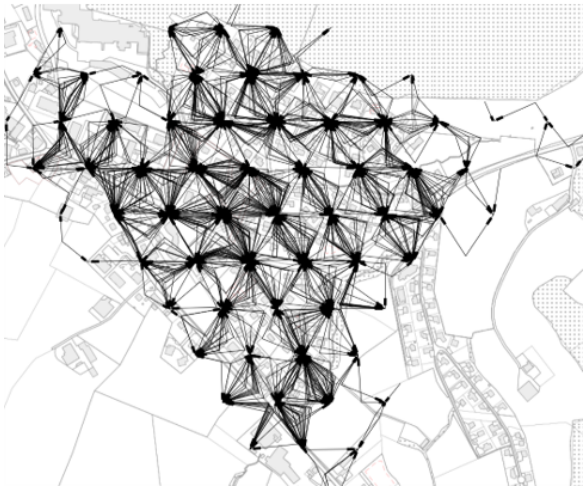

FIGURE 4.10 – Sim. sur canevas fictif, $d_0 = 100$ m

Génération des observations fictives

Pour chaque point, des observations polaires sont générées depuis les stations du voisinage d_0 (4.11). Les stations sont analysées de la plus proche à la plus éloignée. Les observations sont conservées lorsqu'elles présentent des recoupements de $\pm$ 60° au minimum avec les observations déjà générées, ceci afin d'avoir une répartition homogène autour du point. Si aucune station ne répond à cette condition (en bordure de périmètre, par exemple), une observation depuis la deuxième station la plus proche est générée afin d'avoir suffisamment d'éléments planimétriques pour le calcul.

Un contrôle du réseau est réalisé afin de vérifier que chaque station dispose de suffisamment d'observations pour être rattachée. Si ce n'est pas le cas, la station est supprimée du canevas et la génération des observations fictives est réitérée.

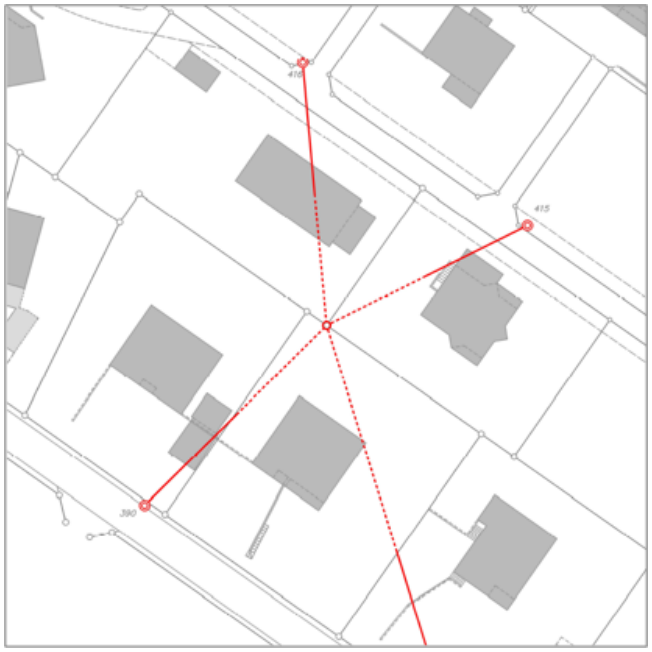

FIGURE 4.11 – Génération d'observations fictives pour un point

Compensation par les moindres carrés simplifiée

Le réseau simulé est compensé sur les points de rattachement mesurés en MN95 (4.12). Le calcul est simplifié dans la mesure où la matrice des cofacteurs et les indicateurs qui en découlent ne sont pas calculés. Ceux-ci ne sont pas nécessaires pour les étapes suivantes et demandent des ressources de calcul et de mémoire vive importantes au vu du nombre de points traités et d'observations générées.

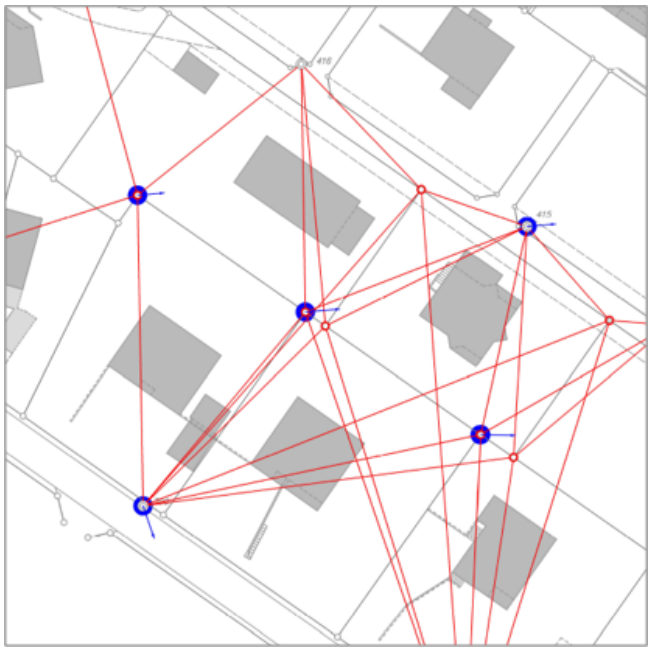

FIGURE 4.12 – Compensation du réseau d'observations fictives

Analyse du voisinage, filtrage des points de rattachement et des observations simulées

Dans un premier temps, les résidus sur les points de rattachement sont analysés. Les points présentant des écarts planimétriques supérieurs à 3.5 fois la précision à priori du point, et donc inhomogènes par rapport aux données de leur voisinage, ne sont plus considérés pour l'ajustement du réseau. Ce filtrage est réalisé par itération de calcul, jusqu'à ce qu'aucun point ne dépasse ce seuil.

Ensuite, les observations sont filtrées pour ne conserver pour chaque point que les deux mesures polaires présentant les résidus les plus faibles (4.13). Ceci permet de donner plus de souplesse au réseau pour tenir compte de façon naturelle des cassures présentes dans les données.

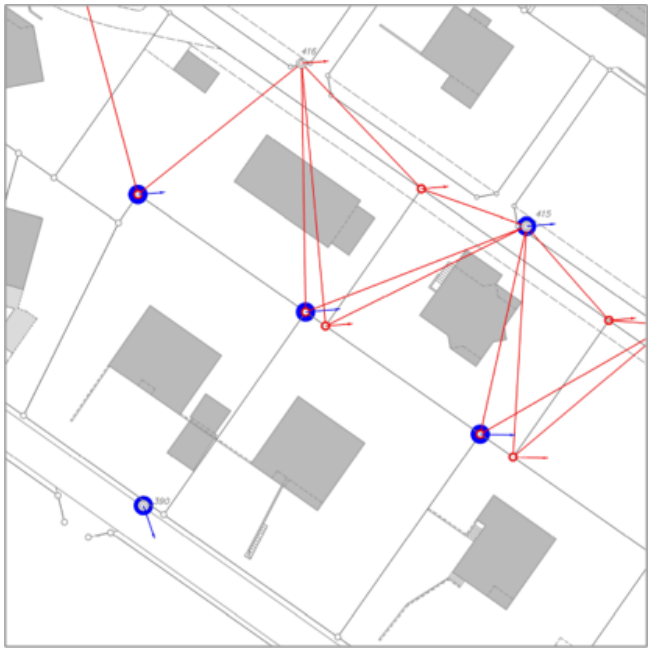

FIGURE 4.13 – Filtrage des observations fictives pour la compensation finale

Création des systèmes locaux par bâtiment

Des systèmes locaux sont générés à partir des points présentant l'attribut « objetMO » (4.14). Cet attribut a été ajouté lors de l'export BDMO par le traitement FME afin de renseigner les groupes de points appartenant à un même bâtiment. Cette étape n'est pas obligatoire pour le calcul, mais permet de contraindre la géométrie des bâtiments en ajoutant aux observations polaires des systèmes locaux avec des écarts-types très faibles.

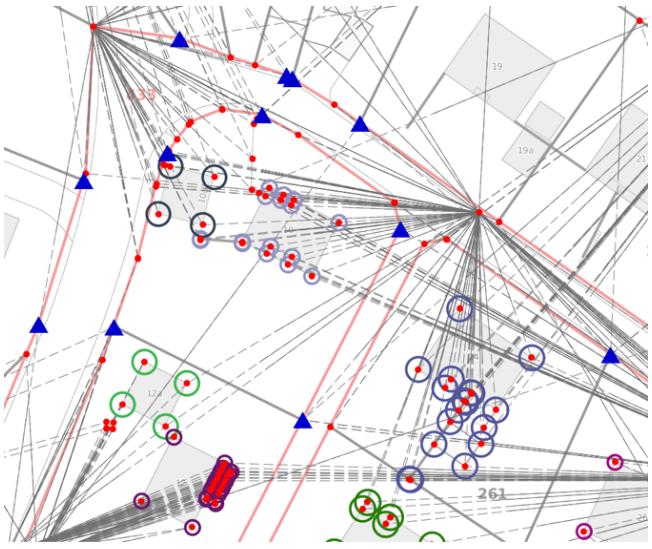

FIGURE 4.14 – Systèmes locaux pour la contrainte des bâtiments

Complétion du fichier des observations et traitement des fichiers de points et de paramètres

Les systèmes locaux générés pour les bâtiments sont ajoutés aux observations filtrées. Éventuellement,

les observations complémentaires et contraintes du fichier facultatif sont également ajoutées.

Les coordonnées des points de rattachement sont modifiées dans le fichier de point. Les stations fictives sont également ajoutées.

Le fichier de paramètre est généré par défaut ou complété à partir du fichier facultatif pour y ajouter les points de rattachement conservés.

Finalement, la triplette de fichiers est exportée en fichier XML pour permettre son utilisation dans le moteur de calcul Nelcas standard :

- allCooApprox2Nelcas.xml - fichier des coordonnées approchées ;
- allObs2Nelcas.xml - fichier des observations simulées ;
- allParam2Nelcas.xml - fichier de paramètres.

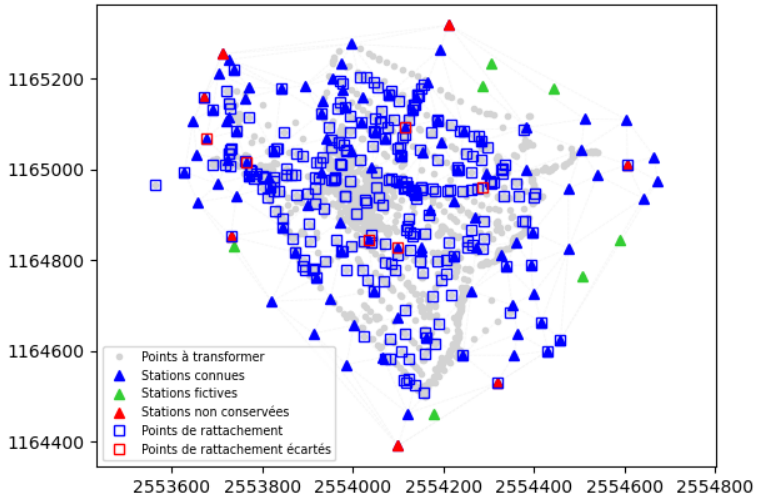

FIGURE 4.15 – Plot, résumé graphique, en sortie

4.2.4 Analyse critique

Les tests sont détaillés dans le rapport annexe 1.

Selon les données à disposition, ce scénario offre les résultats les plus intéressants par rapport aux ressources nécessaires et aux résultats obtenus. L'approche cognitive est également facilitée par la simplicité du concept et des paramètres associés, ces derniers étant facilement évaluables avec la connaissance du terrain.

Sur le jeu de données théoriques, les résidus après transformation sont de l'ordre millimétrique, jusqu'au centimètre, par rapport aux coordonnées DOIT. Sur le jeu de données réelles, la majorité des résidus sur l'échantillon de points de contrôle satisfont les exigences de la MO. Les points hors tolérance peuvent pour la plupart être justifiés par des inhomogénéités locales et les coordonnées peuvent être fiabilisées par des nouvelles déterminations ponctuelles. Ces points représentent moins de 10% des points de contrôle. Considérant l'échantillon de points d'appui et de contrôle, les indicateurs obtenus peuvent même être considérés comme une illustration pessimiste du scénario.

Du fait du filtrage des observations simulées, les deux simulateurs retenus présentent des résultats similaires et s'adaptent bien aux cassures dans les données. Seule différence constatée, le simulateur « observations et stations » peut écarter localement un point de rattachement supplémentaire dans une certaine configuration. Les résultats ne sont globalement pas significatifs sur les jeux de données tests.

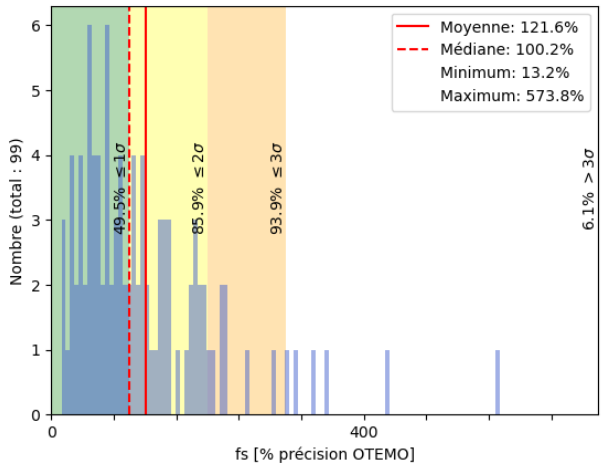

FIGURE 4.16 – Fs normés, pts de contrôle (S2 obs.)

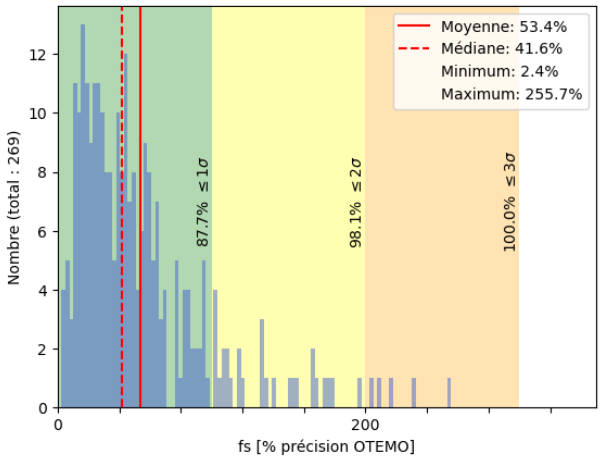

FIGURE 4.17 – Fs normés, pts de ratt. (S2 obs.)

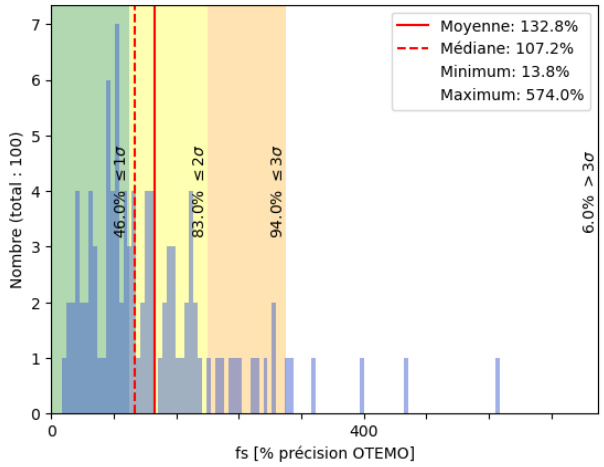

FIGURE 4.18 – Fs normés, pts de contrôle (S2 obs. + sta.)

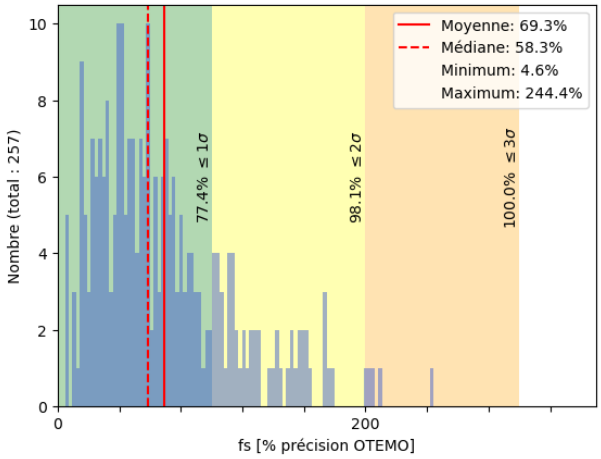

FIGURE 4.19 – Fs normés, pts de ratt. (S2 obs. + sta.)

Sans nouvelle détermination, le résultat reste des coordonnées théoriques et la précision intrinsèque des points n'est pas améliorée. Ce scénario est donc à réserver lorsque le systématisme local attendu est au moins équivalent à la précision locale du point.

Finalement, sur le plan technique, il faut souligner que le nombre d'observations générées peut poser des limites au niveau de la mémoire vive. En effet, la transformation de jeux de données complets, avec notamment l'ensemble des sommets de la couverture du sol, implique la génération de matrice des cofacteurs de taille exponentielle. Toutefois, une configuration standard de 16 Go, voire 8 Go est déjà suffisante pour le traitement de quelques milliers de points.

Ce scénario est à réserver en particulier lorsque les conditions suivantes sont remplies :

- La précision locale des points est satisfaisante.
- Le but visé est de supprimer des tensions de tout ou partie du périmètre traité.
- Le jeu de données est peu dense ou le matériel informatique (mémoire vive) est adéquat.

Un cas d'application serait le traitement des points limites numériques et des points fixes.

4.2.5 Développements possibles

Plusieurs améliorations peuvent encore être apportées au prototype.

Premièrement, le filtrage des observations pourrait être une option à activer ou désactiver. Cela permettrait de préférer pour des cas particuliers une approche de lissage des données plutôt que de correction des cassures au sein de celles-ci.

Deuxièmement, dans une optique de traçabilité, il serait pertinent de passer les points de rattachement écartés en observations de coordonnées désactivées plutôt que de les supprimer. Ceci permettrait de garder une trace dans le calcul des points inhomogènes avec leur voisinage, qui pourraient alors être réactivés comme observation et fiabilisé par un second levé. On pourrait alors choisir de plutôt désactiver les observations fictives sur ces points et conserver dans la même base de calcul les deux déterminations récentes.

4.3 Scénario 3 – Transformation par triangles via moteur de calcul par les moindres carrés

4.3.1 Développements théoriques

L'interpolation par transformation affine de triangles, type FINELTRA, applique la transformation de manière simplifiée, sans directement considérer la transformation d'un système local. Cette méthode peut être utilisée pour une transformation isolée, contrainte sur les points d'appui, et sans degré de liberté. Dans notre cas, cette option est insatisfaisante et ne permet pas d'entrer directement dans un modèle de Gauss-Markov. C'est pourquoi le modèle fonctionnel standard d'une transformation affine à six paramètres, pour un système *main gauche*, a été privilégié. Celui-ci a été intégrer directement au moteur de Nelcas en ajoutant la possibilité de *cocher* le facteur d'échelle et la rotation supplémentaire dans les paramètres du système local.

$$\begin{pmatrix} E \\ N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_E \\ t_N \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \lambda_y \cdot \cos\alpha_y & \lambda_x \cdot \sin\alpha_x \\ -\lambda_y \cdot \sin\alpha_y & \lambda_x \cdot \cos\alpha_x \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y \\ x \end{pmatrix} \tag{4.8}$$

Avec :

- y, x : les composantes du système d'origine locales ;
- E, N : les composantes du système de destination ;
- t_E, t_N : les translations sur les axes E et N ;
- α_y, α_x : les rotations sur les axes E et N ;
- λ_y, λ_x : les facteurs d'échelle sur les axes E et N ;

Le modèle fonctionnel est rappelé ci-dessous sans démontration.

Le vecteur des paramètres inconnus de la transformation affine :

$$\hat{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} \hat{t}_E \\ \hat{t}_N \\ \hat{\alpha}_y \\ \hat{\alpha}_x \\ \hat{\lambda}_y \\ \hat{\lambda}_x \end{pmatrix} \tag{4.9}$$

Le vecteur des observations :

$$\mathbf{l} = \begin{pmatrix} E_1 \\ N_1 \\ E_2 \\ N_2 \\ \vdots \\ E_n \\ N_n \end{pmatrix} \tag{4.10}$$

Les équations d'observation peuvent alors s'écrire sous la forme :

$$\mathbf{l} + \hat{\mathbf{v}} = \mathbf{f}\left(\hat{\mathbf{x}}\right) \tag{4.11}$$

soit :

$$\begin{pmatrix} E_1 \\ N_1 \\ E_2 \\ N_2 \\ \vdots \\ E_n \\ N_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \hat{v}_{E_1} \\ \hat{v}_{N_1} \\ \hat{v}_{E_2} \\ \hat{v}_{N_2} \\ \vdots \\ \hat{v}_{E_n} \\ \hat{v}_{N_n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{t}_E + \hat{\lambda}_y \cdot y_1 \cdot \cos\hat{\alpha}_y + \hat{\lambda}_x \cdot x_1 \cdot \sin\hat{\alpha}_x \\ \hat{t}_N - \hat{\lambda}_y \cdot y_1 \cdot \sin\hat{\alpha}_y + \hat{\lambda}_x \cdot x_1 \cdot \cos\hat{\alpha}_x \\ \hat{t}_E + \hat{\lambda}_y \cdot y_2 \cdot \cos\hat{\alpha}_y + \hat{\lambda}_x \cdot x_1 \cdot \sin\hat{\alpha}_x \\ \hat{t}_N - \hat{\lambda}_y \cdot y_2 \cdot \sin\hat{\alpha}_y + \hat{\lambda}_x \cdot x_1 \cdot \cos\hat{\alpha}_x \\ \vdots \\ \hat{t}_E + \hat{\lambda}_y \cdot y_n \cdot \cos\hat{\alpha}_y + \hat{\lambda}_x \cdot x_n \cdot \sin\hat{\alpha}_x \\ \hat{t}_N - \hat{\lambda}_y \cdot y_n \cdot \sin\hat{\alpha}_y + \hat{\lambda}_x \cdot x_n \cdot \cos\hat{\alpha}_x \end{pmatrix} \tag{4.12}$$

Le modèle fonctionnel doit encore être linéarisé sous la forme :

$$\mathbf{l} + \hat{\mathbf{v}} = \mathbf{f}\left(\mathring{\mathbf{x}}\right) + \mathbf{A} \cdot \delta\hat{\mathbf{x}} \tag{4.13}$$

avec $\mathbf{A}$, la matrice jacobienne des dérivées partielles.

Pour un point i, nous avons finalement :

$$\underbrace{\begin{pmatrix} E_i \\ N_i \end{pmatrix}}_{\mathbf{l}} + \underbrace{\begin{pmatrix} \hat{v}_{E_i} \\ \hat{v}_{N_i} \end{pmatrix}}_{\hat{\mathbf{v}}} = \underbrace{\begin{pmatrix} \mathring{t}_E + \mathring{\lambda}_y \cdot y_1 \cdot \cos\mathring{\alpha}_y + \mathring{\lambda}_x \cdot x_1 \cdot \sin\mathring{\alpha}_x \\ \mathring{t}_N - \mathring{\lambda}_y \cdot y_1 \cdot \sin\mathring{\alpha}_y + \mathring{\lambda}_x \cdot x_1 \cdot \cos\mathring{\alpha}_x \end{pmatrix}}_{\mathbf{f}(\mathring{\mathbf{x}})}$$

$$+ \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & -\mathring{\lambda}_y \cdot \sin\mathring{\alpha}_y \cdot E_i & \mathring{\lambda}_x \cdot \cos\mathring{\alpha}_x \cdot N_i & \cos\mathring{\alpha}_y \cdot E_i & \sin\mathring{\alpha}_x \cdot N_i \\ 0 & 1 & -\mathring{\lambda}_y \cdot \cos\mathring{\alpha}_y \cdot E_i & -\mathring{\lambda}_x \cdot \sin\mathring{\alpha}_x \cdot N_i & -\sin\mathring{\alpha}_y \cdot E_i & \cos\mathring{\alpha}_x \cdot N_i \end{pmatrix}}_{\mathbf{A}} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} \delta\hat{t}_E \\ \delta\hat{t}_N \\ \delta\hat{\alpha}_y \\ \delta\hat{\alpha}_x \\ \delta\hat{\lambda}_y \\ \delta\hat{\lambda}_x \end{pmatrix}}_{\delta\hat{\mathbf{x}}} \tag{4.14}$$

4.3.2 Modèle stochastique

La définition du modèle stochastique par rapport à la précision a priori des points est identique au scénario 2 (4.2.2). Deux distinctions sont toutefois à souligner, dues au processus.

La précision locale entrée en paramètre aura une influence importante sur l'analyse du voisinage et le filtrage des points de rattachement (points d'appui des triangles).

La précision des points selon OTEMO sera reportée sur la coordonnées locale des systèmes locaux générés par triangle. Celle-ci n'aura une influence qu'avec l'ajout d'observations ou contraintes complémentaires à la compensation finale.

4.3.3 Processus

Le processus détaillé ci-dessous décrit les étapes réalisées par le script Python. Celui-ci est donc également entièrement automatisé.

Paramétrage des fichiers en entrée

L'interface du scénario 3 a été regroupée à celle du scénario 2 (4.8). Les fichiers et paramètres nécessaires au processus sont identiques à deux exceptions :

- Le type de simulateur (pour ce scénario : « transformation par triangles ») ;

- Le fichier « points du canevas » n'est pas utilisé.

Analyse du voisinage des points de rattachement

Pour chaque point de rattachement, des systèmes locaux sont générés à partir des coordonnées inhomogènes des points de rattachement présents dans le voisinage d_0. Les points isolés (en gris sur la figure 4.20) sont filtrés et mis en évidence.

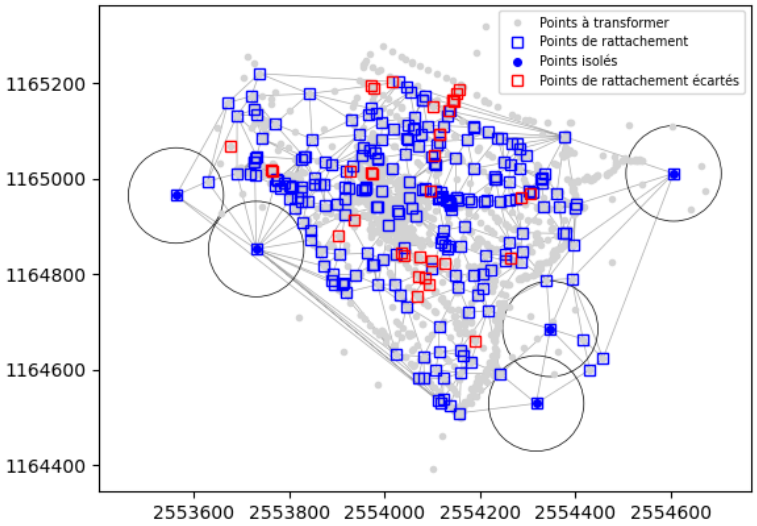

FIGURE 4.20 – Analyse des points de rattachement

Compensation par les moindres carrés simplifiée

Une compensation simplifiée est réalisée à partir des observations de systèmes locaux générés, rattachés sur les points non isolés. Les systèmes locaux sont ajustés selon une transformation de Helmert. Le paramètre de la précision du voisinage est appliqué aux points des systèmes locaux pour cette étape.

Filtrage des points de rattachement

Les points de rattachement qui ne sont pas homogènes avec leur voisinage sont identifiés à partir des résultats de la compensation simplifiée (en rouge sur la figure 4.20). Cela concerne les points présentant des écarts planimétriques supérieurs à 3.5 fois la précision à priori du voisinage, et donc inhomogènes par rapport à celui-ci. Ce filtrage est réalisé par itération de calcul, jusqu'à ce qu'aucun point ne dépasse ce seuil.

Les points isolés, bien que non contrôlés, sont ajoutés aux rattachements afin d'avoir une répartition homogène sur le territoire. Ces points sont mis en évidence et devront être contrôlés par des éléments planimétriques surabondants.

Création des systèmes locaux pour la transformation par maillage triangulaire

Les systèmes locaux sont générés à partir de l'ensemble de points inhomogènes, sur la base d'une triangulation de Delaunay ayant pour sommets les points de rattachement conservés.

Les étapes suivantes sont ensuite identiques au scénario 2 :

- Création des systèmes locaux par bâtiment
- Complétion du fichier des observations et traitement des fichiers de points et de paramètres
- Calcul dans le moteur Nelcas

4.3.4 Analyse critique

Les tests sont détaillés dans le rapport annexe 1.

Ce scénario offre également des résultats intéressants pour des ressources investies relativement modérées. La transformation par maillage triangulaire est un concept connu et les paramètres supplémentaires pour le contrôle des points de rattachement dans leur voisinage sont facilement appréhendables avec la connaissance du terrain.

Le calcul étant par définition contraint, il n'est pas possible de mettre en évidence certain indicateurs.

Seul l'analyse des Fs sur l'échantillon de points de contrôle d'Ursy offre un contrôle indépendant et un élément de comparaison avec les autres scénarios (4.21).

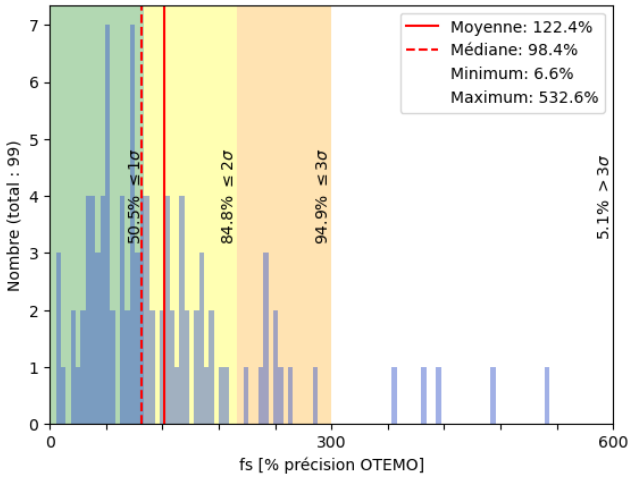

FIGURE 4.21 – Fs normés, pts de contrôle (S3)

Il est nécessaire de souligner que le résultat est, plus que les autres scénarios, dépendant de la répartition et de la densité de points de rattachement, notamment à l'extérieur du périmètre. Seule l'analyse des points de rattachement dans leur voisinage permet de filtrer efficacement les erreurs grossières et les inhomogénéités au sein de ceux-ci. Dans les secteurs dépourvus de tensions, le risque de reporter l'erreur de la mesure d'un point de rattachement et/ou de ses coordonnées sur tout le secteur peut persister.

Les points isolés ont été conservés, même non contrôlés, afin d'éviter des effets de grande maille, en particulier en bordure de périmètre. Les mailles concernées par ces sommets nécessitent un contrôle par des observations ou contraintes planimétriques supplémentaires. La génération de systèmes locaux pour contraindre la géométrie des bâtiments permet de mitiger une partie des risques dans les zones construites. Le processus se contentera également d'interpoler à l'intérieur d'un triangle sans tenir compte des éventuelles cassures dans les données.

En contrepartie, le calcul peut être également beaucoup plus léger et permet de démailler facilement de gros jeux de données. Ceci étant vrai lorsque l'échantillon de points de rattachement reste petit, il est important de ne pas noyer le processus par de la surinterpolation.

Ce scénario est donc à réserver en particulier lorsque les conditions suivantes sont atteintes :

- Une zone de tensions a été mise en évidence.
- Les données et tensions sont continues et sans cassures apparentes.
- Un échantillon de points de rattachement représentatifs de la tendance de leur voisinage est à

disposition (intervalle environ d_0).

- Des observations complémentaires, points de contrôle ou contraintes géométriques contrôlent des systèmes locaux générés.

Ce scénario est particulièrement adapté pour les éléments avec une tolérance un peu plus élevée ou les jeux de données plus volumineux, comme les points de situation.

4.3.5 Développements possibles

Trois options pourraient être envisagées dans la continuité de ce qui est déjà proposé.

Le contrôle des points de rattachement pourrait être réalisé par rapport aux triangles attenants plutôt qu'à un rayon de voisinage. Cette piste a été explorée dans un premier temps avant d'être écartée afin de garder une paramétrisation similaire entre les scénarios. Cette option permettrait toutefois d'analyser si un point est pertinent comme sommet ou pourrait être rattaché à une plus grande maille. Au final, l'aboutissement de ces réflexions rejoint la théorie des algorithmes génétiques qui sera mentionnée dans les perspectives finales.

Cette piste présenterait également un intérêt inverse, dans le cas d'une surinterpolation (trop de points d'appui et trop petites mailles). Pour cette situation, d'autres pistes peuvent être étudiées afin d'échantillonner le nombre de sommets et d'en passer une partie en observation de coordonnées. Une solutions intermédiaire serait d'utiliser le fichier en entrée *points du canevas* pour réaliser le filtrage des points de rattachement à utiliser comme sommets de triangles.

Dans la même idée, une option pourrait permettre de passer les points isolés comme observation, permettant d'apporter de la surabondance à une plus grande maille, mais au risque de noyer certaines tensions locales.

Finalement, le scénario pourrait être appliqué sous la forme de systèmes locaux s'appuyant sur un maillage régulier de côtés d_0, sur le même principe que le simulateur de station du scénario 2. Le déplacement sur chaque sommet fictif pourrait être déterminé par rapport au champ de vecteur de son voisinage. Cette variante a été étudiée dans le cadre du travail mais n'a pas été retenue pour l'implémentation.

Chapitre 5

Mise en œuvre des scénarios

5.1 Considérations métier

Les scénarios offrent des perspectives intéressantes pour obtenir des coordonnées théoriques minimisant les tensions locales, en simplifiant significativement la préanalyse des traitements et l'interprétation des résultats par rapport aux méthodes de transformations et d'interpolation habituelles. Toutefois, certaines étapes restent conséquentes, comme la réalisation des relevés de points d'appui, la reprise des éléments techniques (scénario 1), les travaux techniques ultérieurs aux traitements (construction graphique) ou leur mise en production (mutation, chargement BDMO). Il est donc recommandé de choisir le(s) scénario(s) adapté(s) aux éléments à disposition et d'inclure ces transformations dans des processus existants qui intègrent d'office ces tâches et de réaliser une estimation du rapport coût/avantage avant leur application.

Il est nécessaire de rappeler que la qualité globale du résultat d'un point de vue de la MO dépend de la qualité des données initiales transformées, soit, de la mensuration d'origine et de la mise à jour de celle-ci. Aussi, les coordonnées calculées sont des coordonnées théoriques et ne reflètent pas de manière exhaustive la réalité du terrain. Seul l'échantillon de points de rattachement provient de relevés récents. Les quelques points de rattachement écartés lors des calculs sur le jeu de données réelles attestent d'une part supplémentaire d'inhomogénéité au sein même d'un voisinage, liée à des considérations pratiques et historiques.

Pour ces raisons, les renouvellements de la MO semblent offrir toutes les conditions pour valoriser au maximum les bénéfices de la méthode.

5.2 Contextes des renouvellements

Le renouvellement vise à obtenir des géodonnées au standard de qualité MO93 pour chaque objet de l'ensemble des couches d'information d'une mensuration approuvée sur un standard de qualité antérieur. Le cadre général du REN est défini dans les dispositions fédérales. L'OMO le décrit comme visant à modifier et compléter les éléments d'une mensuration pour les adapter aux exigences actuelles. L'OTEMO précise la nécessité de reprendre et réutiliser tous les éléments de l'ancienne mensuration et de les compléter ou les actualiser. La preuve du respect des exigences de précision et de fiabilité des documents repris de la mensuration approuvée doit être démontrée. Ces aspects peuvent être résumés dans une vision du renouvellement en deux volets :

1. La reprise ou le calcul des coordonnées théoriques et la qualification de celles-ci ;
2. La mise à niveau des géodonnées lacunaires au standard MO93.

Trois aspects principaux distinguent une NP d'une mensuration MO93 : 1. Le degré de spécification des éléments de situation, 2. La précision locale des données, 3. L'intégration locale des données par rapport au cadre de référence national.

Dans certains cantons, l'ampleur des travaux dépasse largement les ressources disponibles pour réaliser les objectifs de la direction fédérale des mensurations cadastrales (D+M). Il convient alors de déterminer les enjeux réels qui distinguent les renouvellements des autres opérations de MO afin de prioriser les entreprises et proposer les processus rationnels adaptés pour les atteindre, le tout en ayant en tête l'évolution des pratiques et des besoins depuis la définition du standard MO93, il y a plus de trente ans.

Premièrement, une mensuration présentant uniquement les lacunes concernant le niveau de détail des éléments de situation ou son réseau de points fixes serait traitée par une mise à jour périodique (MPD). Ces entreprises, bien que d'une certaine ampleur, peuvent être facilement réalisées à l'échelle d'un certain territoire. Celles-ci ont notamment été facilitées grâce aux géodonnées à disposition qui permettent un contrôle efficace de l'exhaustivité des données et la saisie d'une partie des informations de la couverture du sol.

Ensuite, comme mentionné préalablement, la précision locale d'un point est rarement un obstacle lors des travaux courants. Les éléments calculés lors de la numérisation offrent généralement une précision satisfaisante. Le calcul des points limites digitalisés à partir des éléments techniques offre également une précision similaire. Les opérations de la mise à jour permanente tendent à recalculer et/ou remplacer ces données progressivement. Le nombre de mutation étant plus élevé dans les secteurs urbanisés, la précision des données s'améliore naturellement dans les périmètres présentant des enjeux plus importants au niveau de l'aménagement du territoire.

Finalement, le traitement des tensions locales est une tâche qui ne peut pas être réalisée par la mise à jour (2.2). Comme développé précédemment, les tentatives de densification de PAT de certains cantons lors du changement de cadre de références n'ont permis, la plupart du temps, que d'estomper une partie de ces tensions. Les transformations par « grandes mailles » n'offrent ainsi pas les outils permettant d'appréhender cette problématique, qui nécessite une approche à l'échelle la plus fondamentale de la MO : le voisinage. Seule une entreprise d'un certain périmètre mais intervenant à cette échelle, que la pratique prévoit homogène, peut corriger rigoureusement ces tensions. C'est donc là ce qui distingue les renouvellements des autres travaux de mensuration et qui en font également une priorité.

5.3 Application des scénarios

Dans sa forme la plus simple, le renouvellement se résume à reprendre, corriger et compléter une mensuration approuvée à partir d'un standard de qualité antérieur. Comme décrit précédemment, le premier objectif des renouvellements doit être une base de données dépourvue de tensions locales. C'est justement à ce niveau que les scénarios proposés par ce travail peuvent jouer un rôle essentiel. Ils offrent en effet un nouvel outil permettant une transformation rigoureuse des données à l'échelle du voisinage. À partir des tests réalisés, nous pouvons proposer un processus minimal de renouvellement dont le produit serait une base de données exempte de tension, issue de la transformation à partir des données d'une numérisation préalable. Pour être appliqués, les scénarios 2 et 3 nécessitent :

1. Une base de données de laquelle on peut extraire les coordonnées à transformer ;
2. Un échantillon de point de rattachement, levé en MN95 et déterminé avec une précision locale satisfaisante dans le jeu de données à transformer.

Dans les secteurs où les points n'offrent pas une précision locale satisfaisante pour être utilisés comme rattachement, le scénario 1 est à privilégier.

Empiriquement, les tests ont démontré que l'amélioration des coordonnées théoriques transformées était de moins en moins significative à partir d'un échantillon de 25% des PL et PF matérialisés utilisés comme points de rattachement. Cette estimation restant liée aux jeux de données tests, il serait plus juste de ramener cette densité au rayon du voisinage, ce qui représente environ 8 points par ${d_0}^2$, ou environ un point tous les $0.4 \cdot d_0$.

Ces éléments fournissent le cahier des charges minimum d'un renouvellement, auquel peut s'ajouter le contrôle et l'adaptation des éléments de situation au degré de spécification, selon les principes d'une MPD (voir ci-dessus). Les Services cantonaux peuvent ensuite compléter le cahier des charges pour l'adapter à la qualité des lots, aux niveaux de tolérance et aux enjeux territoriaux du secteur, avec par exemple :

- L'augmentation de la taille de l'échantillon, éventuellement jusqu'à un contrôle systématique de l'ensemble des PF et PL (contrôle de la réalité du terrain).
- Le calcul à partir des éléments d'origine des points ne disposant pas d'une précision locale satisfaisante (certaines digitalisations de PL).
- Le relevé à neuf des éléments ne disposant pas d'une précision locale satisfaisante (points de situation).
- La révision du réseau de points fixes (contrôle des points, densification).

5.4 Intérêt de l'approche

Réduction du nombre d'interventions de terrain par le regroupement des levés des PF, PL et PS

Ceci permet de limiter les temps de préparation, les déplacements en véhicule et à pied, les installations et initialisations des instruments, ou encore une partie des mesures (Casto, 2022). Ces aspects représentent une partie significative du temps passé sur le terrain. Pouvoir rationaliser les interventions et éviter de *marcher dans ses propres traces* à quelques mois d'intervalle présente des effets directs sur les ressources nécessaire et offre plus de souplesse pour la gestion des travaux de terrain, évitant ainsi les opérations coup de poing, la multiplicité des intervenants et permettant d'optimiser les interventions en fonction des conditions de relevés (météo, feuillage, etc.). Cette optimisation du processus se présente donc également comme un gage de qualité et d'égalité dans les marchés, en mettant l'accent sur les compétences organisationnelles et techniques plutôt que sur la taille de l'entreprise soumissionnaire.

Valorisation des éléments présentant une précision locale satisfaisante

Les tests ont démontré que les scénarios proposés permettent la reprise des éléments des mensurations approuvés avec des résultats satisfaisants. Cette démarche permet de valoriser l'ensemble des travaux réalisés précédemment, des levés d'origine jusqu'aux dernières cadastrations de bâtiment, en passant par les travaux considérables des numérisations préalables. Cela réduit considérablement les travaux nécessaires, notamment par rapport aux tâches suivantes :

- le calcul séparé d'un nouveau réseau de PFP3 ;
- la redétermination des coordonnées des points de manière traditionnelle (calcul traditionnel, levé de contrôle et éventuellement analyse et transformations locales, ou nouvelle détermination) ;
- le contrôle des constructions et le relevé à neuf des objets hors tolérance ou, la transformation au cas par cas de ces objets.

Nelcas

L'intérêt de l'approche par l'environnement Nelcas et de pouvoir traiter l'ensemble de ces traitements dans une unique base de calculs, puis un seul fichier résultat avec tous les indicateurs, et d'offrir les outils d'analyse nécessaires pour l'évaluation des opérations réalisés. Cette approche permet d'avoir un suivi complet des travaux et des éléments lacunaires. Pour l'organe de vérification, ces outils offrent également les moyens efficaces pour contrôler l'ensemble des travaux techniques réalisés.

Les aspects ci-dessus laissent entrevoir de belles perspectives pour l'utilisation de l'outil Nelcas et du simulateur dans le contexte d'un renouvellement. Cette démarche pourrait se matérialiser par le lancement d'un projet pilote selon les recommandations ci-dessus ou, partiellement, par l'intégration de ces outils dans des cahiers des charges existants.

5.5 Application aux processus existants et analyse coûts/bénéfices

L'œuvre cadastrale est soumise au morcellement des lots de mensuration et à leur historique. Il est donc difficile de fournir une appréciation globale et chiffrer précisément l'application des scénarios aux vues des variations importantes qu'il peut y avoir d'un périmètre à un autre.

Aussi, malgré les standards fédéraux et la tendance générale à l'harmonisation sur l'ensemble du territoire suisse, le produit de la MO est soumis aux règles d'exécution définies par chaque canton, à qui incombe la gestion opérationnelle de la mensuration. Il est donc difficile de considérer l'ensemble des pratiques concernant les renouvellements, qui évoluent d'autant plus ces dernières années aux vues des enjeux relatifs.

Une estimation des bénéfices pouvant être attendus de l'application des scénarios dans un processus existant a toutefois été réalisée mais repose sur plusieurs hypothèses développées ci-dessous. Les résultats de cette analyse sont donc à prendre en compte avec certaines réserves.

Le processus de référence est issu du cahier des charges du Service du cadastre et de la géomatique du canton de Fribourg. Le canton place le contrôle des éléments repris avec la réalité du terrain comme le cœur des travaux de renouvellement. Le SCG préconise ainsi un levé systématique des éléments de la MO (SCG, 2023), avec :

1. Détermination et calcul d'un nouveau réseau de points fixes sur la base de l'existant ;
2. Levé de contrôle systématique des éléments de détail (PL-PS) existants sur le terrain ;
3. Deuxième levé des éléments hors tolérance (PL) ;
4. Relevé complet des éléments hors tolérance (PS).

Cette démarche peut être vue comme une solution « brute force » de traitement des tensions locales, avec ses avantages et inconvénients. Mais elle permet également un contrôle de la rigueur de la mise à jour de la MO depuis la mensuration d'origine (matérialisation, intégrations locales, etc.) et une révision générale des objets de la MO (rectifications de limite, suppression de points alignés inexistants, adaptation des limites des cours d'eau, etc.). La recherche et le levé systématique des points ont donc été conservés dans l'estimations et les postes de la soumission concernant les travaux ultérieurs à l'obtention de coordonnées définitives sur les PF, PL et PS n'ont pas été modifiés (production documentaire, etc.).

L'estimations repose également sur les aspects suivants :

- Pour des questions d'enjeux commerciaux et de protection de données, les analyses n'ont pu se baser que sur les documents suivants :
  - Avant-projets de REN des communes de Châtel-Saint-Denis, Broc et Ursy.

  - Soumission du bureau Geosud au REN de Châtel-Saint-Denis et Broc.

- Les valeurs clés utilisées sont :
  - Le nombre de PF et PL calculés en BDMO ;
  - Le nombre de PL digitalisés en BDMO ;
  - Le nombre de bâtiments issus de mutations récentes ;
  - Le nombre de bâtiments digitalisés.
- Le résultat des tests sur le jeu de données réelles d'Ursy a servi de référence.
- Seuls les postes pouvant être reliés directement à des valeurs statistiques ont été analysés. Les bénéfices indirects sur l'organisation, la rationalisation des relevés ou l'analyse n'ont pas pu être quantifiée sur la base des éléments à disposition, bien que les avantages retirés des scénarios soient significatifs sur ces aspects.
- Le calcul des coordonnées théoriques à partir des mesures d'origine a été estimé identique selon la méthode traditionnelle
- En cas de doute, l'appréciation a été faite « au plus pessimiste ».

Les postes concernés par des optimisations sont, en particulier :

- le traitement des points fixes en parallèle des autres travaux,
- la réduction du nombre de points limites nécessitant un double levé suite à la suppression des tensions locale,
- la limitation des levés aux constructions digitalisées en BDMO,
- l'intégration locale automatique des éléments à reprendre (bâtiments récents, points limites non matérialisés, etc.).

Les travaux relatifs représentent environ 50% de l'offre totale. En appliquant les rapports statistiques aux postes ci-dessus, le montant final pour l'entreprise est réduit d'environ 23%. En tenant compte des autres bénéfices difficilement quantifiables et des effets indirects sur les autres postes de l'offre et l'organisation du mandat, cette estimation peut sans crainte être élevée à plus d'un quart du coût total de l'entreprise, en préservant au maximum le processus général proposé par le SCG.

Chapitre 6

Perspectives

6.1 Développements possibles

Les propositions d'améliorations propres à chaque scénario sont mentionnées dans les chapitres perspectives. De manière générale, quelques modifications peuvent être apportées au code Python en ce qui concerne la journalisation des traitements et au niveau de la structuration des classes et méthodes des processus.

En dehors de ces améliorations, quatre pistes de développement ajouteraient une plus-value certaine au module.

Premièrement, l'implémentation d'un *scénario généralisé* peut s'avérer optimale pour la mise en production de ce travail à un contexte de MO. Comme mentionné précédemment, chaque scénario présente ses avantages et ses inconvénients selon les données traitées. Il serait envisageable de les combiner pour tirer avantage de chacun dans un seul processus. Des observations fictives seraient alors générées sur les PF et PL calculés. Des systèmes locaux seraient créés afin de contraindre la géométrie des bâtiments. Les points de situation seraient intégrés dans des transformations affines par triangle. Les observations reprises pour le calcul des PL digitalisés seraient intégrées au moteur, ainsi que les observations complémentaires.

Ensuite, la *lecture d'un fichier INTERLIS* en alternative au fichier de point XML inhomogène permettrait facilement de corriger les tensions locales de n'importe quel périmètre. Cette étape implique la lecture de l'ITF, l'identification des points particuliers avec leurs attributs (PF, PL, angles de bâtiment) et l'extraction des autres géométries par parsing. Les coordonnées transformées devront ensuite être réinjectées à l'ITF après validation du traitement, ce qui permettra leur intégration dans une base de données propre et exempt de tension. Ce même type de procédé est déjà intégré à des outils comme Geosuite et pourrait être ajouté de manière analogue au simulateur ou aux outils de conversion Nelcas de manière générale.

La *détection automatisée des contraintes géométriques* selon une certaine tolérance a été abordée rapidement lors de la réalisation de ce travail. La saisie des contraintes à partir des esquisses de mutations et des croquis d'origine n'est pas une tâche particulièrement évidente. Cette piste de développement permettrait de gagner en aisance lors de la saisie des éléments techniques (scénario 1), mais également de corriger automatiquement les défauts d'alignement ou de perpendicularité induits par les transformations antérieures (CHENyx06, FRENyx16) dans les autres scénarios. Ceci ajouterait également des éléments planimétriques de contrôle pour la transformation affine par triangles (scénario 3).

Finalement, seule la planimétrie a été intégrée aux simulateurs, selon les applications dérivées, l'*altimétrie* pourrait présenter un certain intérêt.

6.2 Tests et contextes d'application

Le cadre d'un travail de master n'offre malheureusement pas le loisir de poursuivre les tests autant que souhaité. Les tests ont dû se limiter à la validation des hypothèses théoriques des scénarios, à leur application à un jeu de données réelles et à quelques tests de robustesses de l'outil, puis à la comparaison des résultats. La comparaison de ces simulateurs avec d'autres outils de transformation/interpolation pourrait également amener des conclusions pertinantes.

Il serait aussi intéressant de poursuivre ces tests dans des contextes bien spécifiques et dans le cadre d'autres applications concrètes, notamment sorties du contexte de la MO. L'ajustement de données établies dans un ancien cadre de référance ou issues de levés locaux n'a pas pu être testé. En complément des mentions du chapitre 2.3, la validation des scénarios pour quelques jeux de données en particulier pourraient faire l'objet d'une suite à ce travail :

- Plan général d'évacuation des eaux (PGEE) ;
- Plan d'aménagement ;
- Limites forestières légalisées ;
- Etc.

6.3 Concepts non traités

Deux concepts ont été abordés lors des premières réflexions sur les scénarios 2 et 3, mais n'ont pas pu s'inscrire dans le périmètre du travail. Ceux-ci présentent toutefois un intérêt certain dans les aspects abordés par ce travail de master et pourraient faire l'objet de sujets à part entière.

Collocation
Un modèle général de transformation-interpolation existe, nommé collocation ou Least squares collocation (swisstopo, 2017, Müller, 2011). La compensation permet alors d'ajuster à la fois le bruit et un systématisme local (signal). Ce dernier pouvant être reporté sur les points nouveaux sur la base d'un critère de proximité. Ce modèle présente ainsi une méthode élégante de compenser un réseau en tenant compte d'une corrélation entre les points dans un voisinage. Elle présente toutefois le désavantage de s'éloigner des applications métiers courantes ainsi que des modèles et moteurs de calculs usuels. Les ressources informatiques peuvent également prendre des proportions importantes et la méthode reste globalement complexe d'un point de vue mathématique.

Délimitation de sous-périmètres homogènes par algorithme génétique
Comme mentionné précédemment, les opportunités d'application des méthodes de transformation/interpolation dépendent principalement de la densité et de la répartition des points d'appui, de leur représentativité de la tendance du voisinage et de la délimitation de ces derniers. L'évaluation de ces aspects est souvent manuelle et soumise au biais de l'œil humain. Une méthode plus élaborée est l'utilisation d'un algorithme génétique.

Cette méthode permet de déterminer automatiquement les périmètres minimisant, par exemple, les résidus sur les points de rattachement (appelé gènes) suite à une transformation (fonction critère). Ces périmètres intégreraient alors davantage de points d'appui, améliorant l'estimation des paramètres de transformation et l'autocontrôle du réseau.

Les algorithmes génétiques ne sont toutefois pas des traitements conventionnels dans le milieu de la géomatique. Quelques applications se rapportant à notre contexte peuvent être mentionnées, notamment pour l'amélioration du modèle cinématique de la Suisse (Villiger, 2014).

Chapitre 7

Conclusion

L'objectif de ce travail de master était de fournir les éléments de contexte permettant d'appréhender les enjeux liés à la problématique des tensions locales et au renouvellement de lots de MO approuvés selon un ancien standard, puis d'étudier les opportunités offertes par la reprise de leurs éléments techniques et de leurs données pour répondre à ces enjeux. Trois scénarios ont été formulés et implémentés. Des tests ont été réalisés afin de valider les hypothèses théoriques et le bon fonctionnement des outils sur un jeu de données réelles. Le contexte d'un travail de fin d'études reste généralement contraignant au niveau du temps à disposition. Malgré cela, les objectifs du cahier des charges initial ont été globalement remplis. Le périmètre du travail a été ouvert sur d'autres aspects connexes et perspectives qui ajoutent un niveau de réflexion au travail.

La force des scénarios présentés réside dans leur approche cognitive. Les concepts s'appuient sur des modèles ancrés dans la pratique et facilement appréhendables, facilitant ainsi la prise en mains des outils.

En termes de développement, même si les outils implémentés restent au stade de prototype, ils fonctionnent correctement et certaines fonctionnalités et optimisations ont déjà pu être apportées. Une mise en production pourrait donc être envisagée.

L'environnement Nelcas offre un intérêt certain pour la mise en œuvre des méthodes proposées. Les développements s'inscrivent ainsi dans une chaîne de traitement complète et profitent des outils et standards établis par l'HEIG-VD. Réciproquement, le module développé dans le cadre de ce projet pourrait offrir des fonctionnalités uniques à l'application, qui répondent à des enjeux réels de la géomatique s'il venait à y être ajouté.

À titre personnel, ce travail de master répond aux aspirations que j'avais lors de la formulation du sujet. Il illustre ainsi les deux volets que j'ai dû concilier au long de ma formation en emploi. D'une part, une approche très pratique axée sur les enjeux auxquels je suis confronté dans mon environnement professionnel. D'autre part, une approche académique axée recherche et développement.

Ce projet s'inscrit aussi dans deux branches dans lesquelles il me tenait à cœur de m'investir, la mensuration officielle et la géodésie. Il m'a offert l'opportunité de me plonger dans la programmation en Python et de me familiariser avec la rédaction en LaTeX, ce qui constituait deux objectifs personnels. Mes recherches et les échanges avec mes encadrants ont également attiré ma curiosité sur des sujets qui n'avaient pas pu être abordés lors de mon parcours académique.

Finalement, même si un travail de ce type ne semble jamais terminé et que les tests et développements pourraient être poursuivis encore sur plusieurs semestres, l'état du projet me laisse un sentiment de satisfaction. La documentation des scénarios et les propositions offrent des pistes que je remets avec confiance à l'INSIT. J'ose ainsi croire aux perspectives que ce travail pourrait offrir et me montre naturellement intéressé par les suites qu'il pourrait donner.

Bibliographie

Cadres de référence géodésiques [swisstopo.admin.ch], [s. d.] [en ligne]. [visité le 2024-01-12]. Disp. à l'adr. : `https://www.swisstopo.admin.ch/fr/connaissances-faits/mensuration-geodesie/cadres-de-reference.html`.

CASTO, Matteo, 2022. *Réalisation d'une plateforme de calcul par les moindres carrés des points fixes et des points de détail combinés, adaptée aux spécificités de la MO*. Travail de Bachelor. HEIG-VD.

CASTO, Matteo ; DEILLON, Yves ; GUILLAUME, Sébastion, 2022. *Standardised points and observations formats for cadastral surveys*. Technical documentation. HEIG-VD.

CONDAMIN, Sebastian ; GUERDAT, Damien ; MARTI, Urs et al., 2022. *Manual - GeoSuite*. Rapp. tech. swisstopo.

CSCC, 2004. *Traitement des territoires en mouvement permanent dans la mensuration officielle*. recommandations.

CSCC, 2010. *Utilisation de GNSS pour la détermination de points de détail en mensuration officielle*. 2010-décembre. directive.

DEILLON, Yves, 2023. *Maîtrise foncière et mensuration officielle*. Notes de cours. Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, Institut d'ingénierie du territoire.

Exposé des motifs et projet de décret accordant au Conseil d'Etat un crédit d'investissement [...] 2020. Rapp. tech. Conseil d'Etat du canton de Vaud.

GUILLAUME, Sébastien, 2023a. *Eléments de géodésie*. Rapp. tech. Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, Institut d'ingénierie du territoire.

GUILLAUME, Sébastien, 2023b. *Méthodes d'estimation et réseaux géodésiques*. Rapp. tech. Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, Institut d'ingénierie du territoire.

Instruction pour l'abornement et la mensuration parcellaire, 1919.

Instruction pour l'emploi de la méthode des coordonnées polaires avec mesure optique de distances dans les mensurations cadastrales suisses, 1927.

Instruction sur l'application du traitement automatique de l'information dans la mensuration parcellaire, 1974.

MÜLLER, Michael D., 2011. *Analysis of long-term GPS observations in Greece (1993-2009) and geodynamic implications for the Eastern Mediterranean*. Rapp. tech. Schweizerischen Geodätischen Kommission.

Ordonnance du DDPS sur la mensuration officielle (OMO-DDPS), 2023.

Ordonnance sur la mensuration officielle (OMO), 2024.

Ordonnance technique sur la mensuration officielle (OTEMO), 2008.

REGISTRE FONCIER, Bureau fédéral du, 1913. *Tables des tolérances*. Rapp. tech.

SCG, 2023. *Exigences techniques pour la saisie initiale et la conservation de la mensuration officielle*. directive.

SWISSTOPO, 2004. *Modèle de données 2001 de la mensuration officielle «Confédération»*. annexe. Département fédéral de la défense, de la protection de la population et des sports DDPS.

SWISSTOPO, 2011. *Analyse des tensions locales pouvant affecter des mensurations et délimitation des zones où les tensions sont négligeables*. recommandations. Département fédéral de la défense, de la protection de la population et des sports DDPS.

SWISSTOPO, 2017. *Recommandation pour l'application des transformations géométriques en mensuration officielle*. recommandation. Département fédéral de la défense, de la protection de la population et des sports DDPS.

SWISSTOPO, 2024. *Stratégie de la mensuration officielle pour les années 2024 à 2027*. Rapp. tech. Département fédéral de la défense, de la protection de la population et des sports DDPS.

TOPOGRAPHIE, Office fédéral de, 1966. *Directives pour l'introduction du traitement automatique de l'information dans la mensuration cadastrale*. directives. Direction fédérales des mensurations cadastrales.

VILLIGER, Arturo, 2014. *Improvement of the Kinematic Model of Switzerland (Swiss 4D II)*. Rapp. tech. Schweizerischen Geodätischen Kommission.

Annexes

Une clé USB est jointe au présent rapport papier. Les annexes décrites ci-dessous sont regroupées sur ce support. Il est demandé de procéder à des copies avant toute utilisation de ces fichiers.

01 Rapport technique

- **2023.02.06-TM_remi_girard-annexe1_rapport_technique.pdf** :
  Rapport technique de tests

02 Code source

En particulier :

- **MainScriptSimul.py** : Script principal pour l'exécution du module "simulateur"
- /libUtils/**processSimulObsFict.py** : Script du processus du module "simulateur"
- /libUtils/**simulationMesUtils.py** : Fonctions utiliraires du "simulateur"
- /libUtils/**conversionUtils.py** : Modifié, ajout de fonctions
- /libUtils/**estimationUtils.py** : Modifié, ajout de la transformation affine
- /libUtils/**preTraitementsUtils.py** : Modifié, ajout de la transformation affine
- /libUtils/**controlesCoherenceUtils.py** : Modifié, ajout de la transformation affine
- /libUtils/**analyseSolvabiliteUtils.py** : Modifié, ajout de la transformation affine
- /libUtils/**geometrieUtils.py** : Modifié, ajout de fonctions

03 Fichier de tests et résultats

- /03_01-Data/**Siviriez/***/ : Fichiers de base, tensions maîtrisées
- /03_01-Data/**Ursy/***/ : Fichiers de base, jeux de données réelles
- /03_02-Tests/«**Périmètre**»-«**scénario**»_«**description**»**/***/ :
  Fichiers de calculs et résultats de l'ensembles des tests commentés
-

04 Cahier des charges

- **CDC_au_2024.02.06.pdf** : Cahier des charges, état au 6 février 2024

UNIVERSITÉ DE GENÈVE Hes·so Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale

Master en Développement territorial
Orientation Ingénierie géomatique

Annexe 1 - Rapport technique

Intégration d'éléments techniques existants de mensuration officielle dans les opérations de renouvellement ou de mise à jour

Non confidentiel

Étudiant : Rémi Girard
Directeur du travail : Pr. Yves Deillon
Co-directeur : Pr. Dr. Sébastien Guillaume

Année académique : 2023 - 2024

Yverdon-les-Bains, le 6 février 2024

Table des matières

1 Jeux de données **5**

1.1 Jeu de données théoriques - Siviriez . . . 5

1.1.1 Description . . . 5

1.1.2 Méthode d'évaluation . . . 6

1.2 Jeu de données réelles - Ursy . . . 6

1.2.1 Description . . . 6

1.2.2 Méthode d'évaluation . . . 6

1.3 Divers . . . 7

2 Scénario 1 - Reprise d'éléments techniques de mensurations approuvées **9**

2.1 Données . . . 9

2.2 Déroulement des tests . . . 9

2.3 Résultats . . . 10

3 Scénario 2 - Simulation d'observations **13**

3.1 Données . . . 13

3.2 Déroulement des tests . . . 13

3.3 Résultats . . . 14

3.3.1 Variation des points de rattachement . . . 14

3.3.2 Densité de stations . . . 14

3.3.3 Choix du simulateur . . . 15

3.3.4 Effet sur les zones de tensions . . . 15

3.3.5 Effet sur les zones de tensions négligeables . . . 16

3.4 Appréciation générale . . . 16

4 Scénario 3 - Transformation par triangles via moteur de calcul par les moindres carrés **21**

4.1 Données . . . 21

4.2 Déroulement des tests . . . 21

4.3 Résultats . . . 22

4.3.1 Densité des points de rattachement . . . 22

4.3.2 Rayon de voisinage 22
4.3.3 Fautes grossières 22
4.3.4 Effet sur les zones de tensions 23
4.3.5 Effet sur les zones de tensions négligeables 23
4.4 Appréciation générale 23

5 Comparaison des scénarios **25**
5.1 Résultat sur l'échantillon de point de contrôle 25
5.2 Comparaison directe des résultats 28
5.3 Conclusion 30

6 Tests complémentaires **31**

Chapitre 1

Jeux de données

Plusieurs jeux de données ont été utilisés dans le cadre des tests réalisés lors de ce travail. Ils sont détaillés ci-dessous.

1.1 Jeu de données théoriques - Siviriez

1.1.1 Description

Le jeu de données de Siviriez a permis de valider la plupart des hypothèses théoriques des scénarios 2 et 3, en écartant les considérations métiers (voir rapport de TM). Un extrait d'une base de données issue d'un premier relevé récent a été considéré comme des coordonnées DOIT. A partir de celui-ci, les tensions suivantes ont été induites pour créer un jeu de données AVOIR :

1. Périmètre important avec tensions induites par voisin naturel, représentatif des effets d'une déviation de polygonale, par exemple (en bleu).
2. Petits périmètres avec tensions générées par Helmert, représentatifs de mutations ou points fixes mal intégrés localement (orange et vert).

Sur le sous-périmètre orange, une rotation importante, avec des FS de 10 cm jusqu'à 80 cm a été induite afin de tester la robustesse de la méthode.

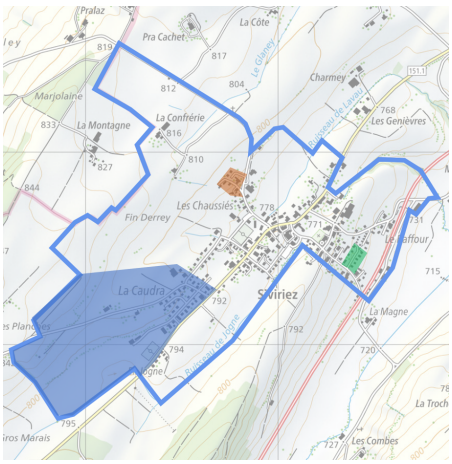

FIGURE 1.1 – Périmètre de tests - Siviriez

1.1.2 Méthode d'évaluation

L'analyse a été réalisée directement entre les coordonnées en sortie de calcul et les coordonnées DOIT de référence. Certains indicateurs issus de la compensation permettent également une bonne compréhension des effets du scénario, comme le quotient, la norme et la direction des vecteurs sur les points de rattachement.

1.2 Jeu de données réelles - Ursy

1.2.1 Description

Le périmètre d'Ursy a permis de confronter les hypothèses théoriques à un jeu de données réelles, soumis à certaines considérations métiers. Ce jeu de données a également permis une comparaison directe des scénarios 2 et 3 avec le résultat d'un calcul reprenant d'anciens documents techniques approuvées (S1).

Le périmètre de travail se situe au centre de la commune d'Ursy (FR). Il présente une superficie d'environ 30 hectares en NT2 issu d'un levé d'origine de 1920, lorsque le secteur n'était alors pas urbanisé. 1'100 points fixes et points limites ont été calculés traditionnellement lors de la numérisation préalable (2006) sur les points de polygones d'origine, transformés par TRANSINT. Les données présentent un certain morcellement dû aux densifications du réseau de points de polygonation liées à l'urbanisation du secteur. Les tensions locales sont d'ordre centimétriques et jusqu'à 10-12 cm selon les secteurs. Le périmètre a été transformé lors du changement de cadre de référence avec le maillage FRENyx16.

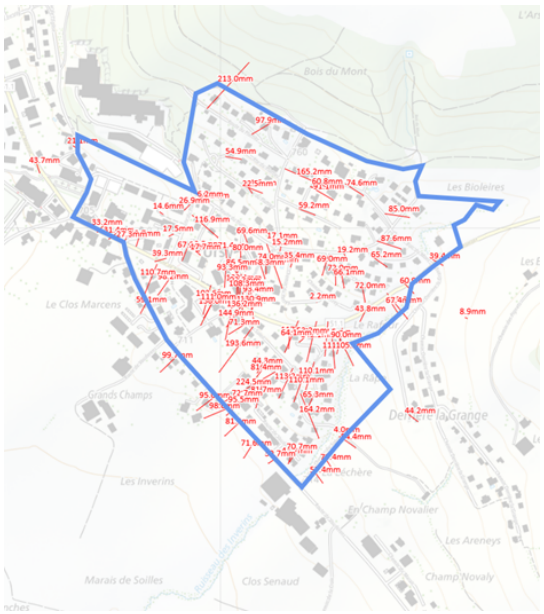

FIGURE 1.2 – Périmètre de tests et vecteurs de tensions principaux - Ursy

1.2.2 Méthode d'évaluation

Les coordonnées calculées sont comparées à un échantillon de points de contrôle indépendants, mesurés en MN95. Ceux-ci proviennent de mesures récentes au GNSS. Les points de contrôle représentent un échantillon d'environ 10% des points calculés. Une partie de cet échantillon a été pris volontairement

dans des secteurs de cassures afin de mettre en évidence les différences entre les scénarios dans ces zones critiques. Les résultats peuvent donc être légèrement pessimistes par rapport à la tendance générale réelle du secteur.

La figure 1.3 ci-dessous présente les écarts planimétriques entre en BDMO et l'échantillon de points de contrôle.

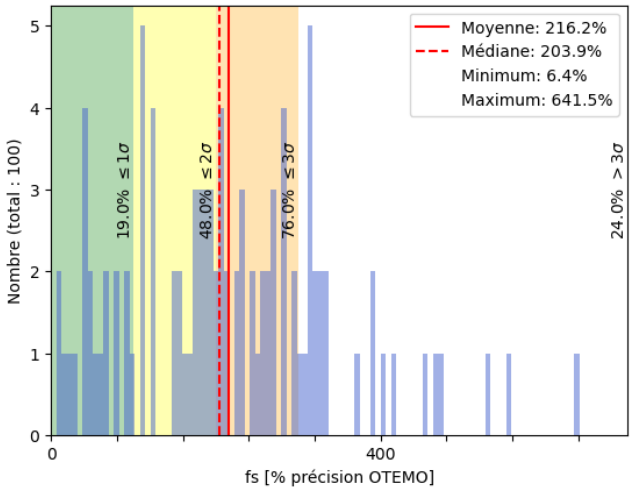

FIGURE 1.3 – Norme des vecteurs entre les coordonnées BDMO et les points de contrôle

1.3 Divers

Des tests supplémentaires ont été réalisés lors de la validation de l'outil en collaboration avec l'Ecole. Le périmètre de ces calculs se trouve sur la Commune de Belmont-sur-Yverdon. Les coordonnées sont issues d'une nouvelle mensuration MO93. La précision interne des données attendue est de l'ordre de 30 à 40 mm.

Ces tests sont détaillés directement au chapitre 6.

Chapitre 2

Scénario 1 - Reprise d'éléments techniques de mensurations approuvées

2.1 Données

Les données utilisées proviennent des levés de la mensuration d'origine et de la mise à jour jusqu'à 2023, sur les points fixes et points limites uniquement. Pour ce secteur de 30 hectares, particulièrement concerné par la mise à jour de la MO entre les années 1950 et 2010, cela représente environ :

- 135 points de polygonation (pour coordonnées approchées absentes de la BDMO) ;
- 570 stations (dont 180 de polygonation) pour 3'830 mesures polaires ;
- 12 levés orthogonaux pour 40 points observés ;
- 104 formulaires de coordonnées pour 1'070 observations de coordonnées ;
- 5 formulaires de levé GNSS sans ajustement pour 125 observations de coordonnées MN95 ;
- 220 cotes ;
- 175 contraintes géométriques (non exhaustif).

Également, 80 bases orthogonales issues des croquis d'origine (570 points mesurés) ont été saisies mais n'ont pas été intégrées au calcul final. En effet, tous les points à calculer présentant des indicateurs satisfaisants sans l'ajout de ces observations, cela aurait impliqué un travail supplémentaire pour aucune amélioration significative du résultat.

En termes de temps investi, cela représente 85 heures de reprise et saisie des formulaires de levés et 55 heures pour le contrôle et l'épuration des mesures. Cette estimation reste indicative. Elle intègre notamment une part de saisie et d'analyse propres à ce travail, et la mise en place de la base de calcul ainsi que la prise en main de Nelcas. Certains aspects ont également été développés en collaboration avec l'HEIG-VD pour offrir des outils d'analyse de réseau afin de faciliter ces étapes à l'avenir.

Les points de rattachement sont issus d'un échantillon mesuré en MN95 et réparti de manière homogène sur le périmètre.

2.2 Déroulement des tests

Les opérations se sont déroulées selon les étapes standards d'un calcul de réseau géodésique. Certains aspects propres à la reprise d'anciennes mesures sont toutefois à souligner.

Premièrement, lors de la saisie, l'analyse des esquisses pour l'identification points observés est particulièrement lourde en termes de temps et de conséquences sur la suite du traitement. Dans un secteur aussi touché par la mise à jour, chaque ancien point de la BDMO, numérotations provisoires, stations auxiliaires non conservées, etc., ajoutent autant de particularités à analyser.

Ensuite, le calcul des coordonnées approchées a pu mettre en évidence certaines observations non rattachées au réseau. En particulier, les stations calculées avec uniquement une direction de contrôle n'ont pas pu être traitée par le module Nelcas. Un script a été créé afin d'y remédier.

Les contrôles de cohérence ont identifié un nombre important d'erreurs de numérotation de point ou de fautes lors de la saisie.

Une analyse supplémentaire a également été nécessaire afin d'identifier les parties du réseau non rattachées.

Depuis, ces aspects ont été discutés avec l'HEIG-VD et des outils de contrôle géométrique de réseau et d'analyse de doublons géométriques de points facilitent les tâches d'analyse et de validation du réseau jusqu'à pouvoir exécuter une compensation.

Ensuite, l'épuration des observations et l'adaptation du modèle stochastique ont été réalisées à une échelle plus fine jusqu'à éliminer les coefficients aberrants sur les groupes d'observations tout en gardant un modèle stochastique cohérent.

2.3 Résultats

Le résultat du calcul et les nouveaux outils de reporting de Nelcas offrent les moyens de qualifier les résultats pour ce scénario.

En ne considérant que les coordonnées théoriques calculées, on mentionnera les quelques constats ci-dessous.

5% des points ne disposent que d'une détermination. Ces points sont la plupart du temps issus de formulaires de levés déjà moyennés ou de listing de mutation de projet. Les coordonnées concernées sont donc déjà fiabilisées en dehors du processus. Les demi-grands axes des ellipses d'erreur moyenne à 1σ sont en moyenne de 28.5 mm. À noter que ces résultats incluent les anciens points supprimés de la MO, calculés afin de densifier le réseau d'observations mais souvent moins bien déterminés.

L'analyse des quotients d'erreur moyenne des groupes d'observations n'est pas détaillée. Certains groupes ont encore statistiquement un modèle stochastique légèrement trop optimiste, mais sans entâcher les résultats finaux. En revanche, l'analyse du quotient sur les points de rattachement indique si, concrètement, les observations contraignent trop les points de rattachement. En l'occurence, le quotient d'environ **1.10** ainsi que la direction et la norme des vecteurs sur ceux-ci donnent une bonne indication de l'état général du réseau (2.1).

Par rapport à l'échantillon de points de contrôle, les écarts-types planimétriques sont en moyenne de 3.8 cm, avec une médiane à 2.9 cm. À noter que les points de contrôle sont déterminés avec la précision d'un levé GNSS RTK simple à environ 2.5 cm à 1σ (5.1).

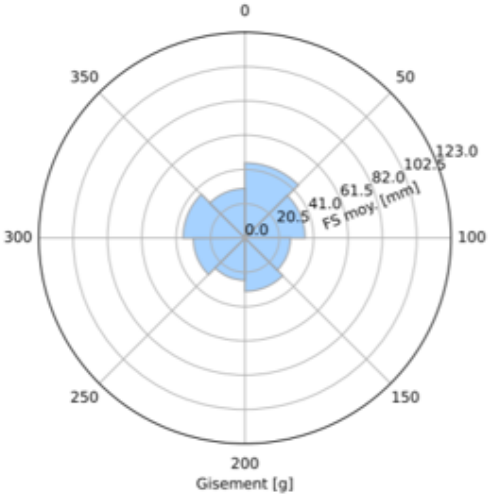

FIGURE 2.1 – Direction et norme des vecteurs sur les points de rattachement - S1

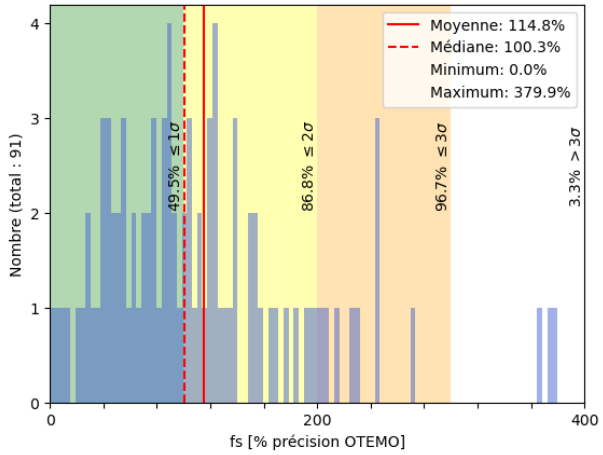

FIGURE 2.2 – Fs normés, pts de contrôle

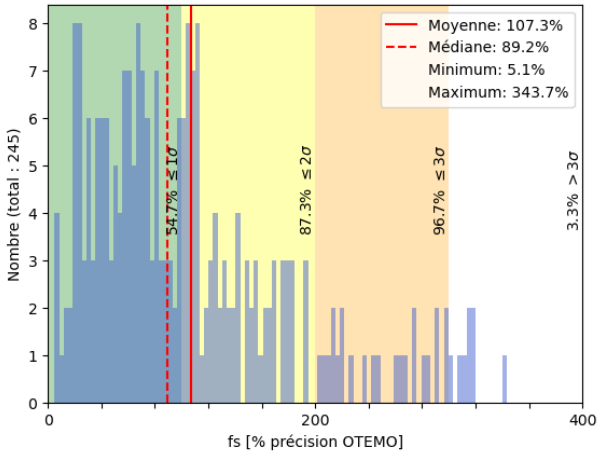

FIGURE 2.3 – Fs normés, pts de rattachement

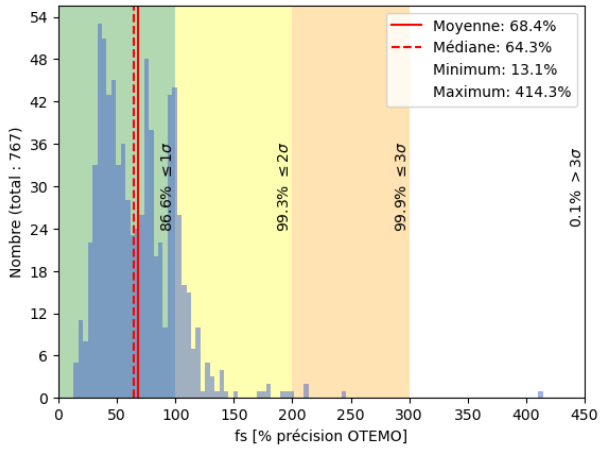

FIGURE 2.4 – Demi-grand axe, points calculés

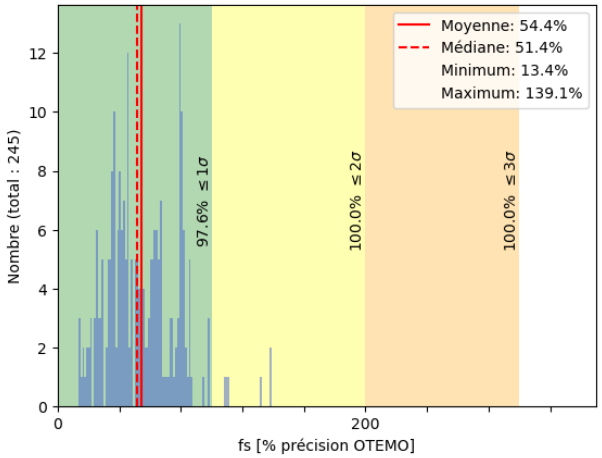

FIGURE 2.5 – D.-g. axe, points de rattachement

Chapitre 3

Scénario 2 - Simulation d'observations

3.1 Données

Les observations sont simulées uniquement à partir des points en base de données de la MO.

Des observations usuelles et contraintes de la MO peuvent toutefois être ajoutées à la compensation finale.

Les points de rattachement sont issus d'un échantillon mesuré en MN95 et réparti de manière homogène sur le périmètre.

3.2 Déroulement des tests

Densité et configuration des points de rattachement

Les premiers tests visaient à déterminer l'impact de la densité de points de rattachement dans la compensation. Seuls les points fixes et les points limites matérialisés de la MO ont été pris comme points de rattachement potentiels. Afin de ne pas biaiser les résultats par une certaine configuration de points, trois jeux de données ont été générés et successivement rééchantillonnés selon les paliers déterminés de manière suivante :

- 5% : levés ponctuels sur des points bien accessibles et répartis de manière homogène (par quartier, long de route, etc.) ;
- 10% : échantillon d'un avant-projet de renouvellement selon cahier des charges fribourgeois ;
- 50% : un point sur deux ;
- 75% : pourcentage de point retrouvés, empiriquement, lors des avant-projets de renouvellement ;
- 100% : hypothétiquement.

Type de simulateur

Le processus a été testé sur les deux variantes de simulateur : observations sur un canevas de points fixes existants et simulation de stations fictives. Le but est de déterminer si la simulation à partir d'un canevas de station réaliste améliore le résultat de la compensation finale. Pour le jeu de données d'Ursy, la simulation sur le canevas polygonométrique de la mensuration d'origine a également été testée.

Distance entre les stations simulées

Pour le simulateur de station, la densité de station a finalement été testée selon les intervalles suivants :

- 50 m ;
- 70 m ;
- 100 m ;
- 150 m ;
- 300 m.

3.3 Résultats

3.3.1 Variation des points de rattachement

L'écart-type sur la médiane des Fs permet une comparaison des trois échantillons. En ne considérant que les points transformés, on remarque une fluctuation respective de ± 4.5, 3.3, 1.5, 1.3, 0.3 et 0.0% sur les échantillons de 5, 10, 25, 50, 75 et 100% (3.1). On peut ainsi attester que la configuration des points lorsqu'ils sont épars peut avoir une certaine influence sur la qualité des résultats. En analysant ce même effet sur le nombre de points dans la tranche des < 1, 2 et 3σ, on peut affirmer que cet effet devient relativement négligeable dès 25% de points de rattachement.

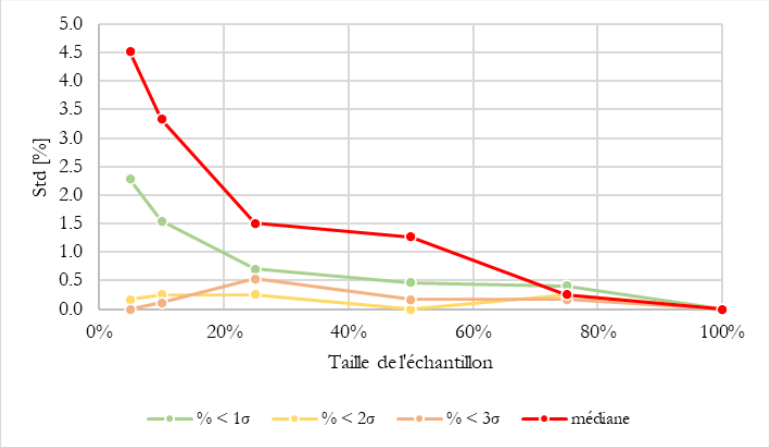

FIGURE 3.1 – Ecart-type selon les tailles d'échantillons de points de rattachement

Concernant les effets de la densité de points de rattachement, on constate une amélioration des Fs importante jusqu'à 25%, pour se stabiliser autour de 50% et ensuite ne devenir que relative (± 2%) (3.2).

Pour la suite des tests, considérant ces premiers constats, il a généralement été choisi de les réaliser sur une base de 25% de points de rattachement, à partir de l'échantillon qui se rapprochait le plus de la moyenne.

3.3.2 Densité de stations

L'effet général de la variation du paramètre d_0 a été mis en évidence.

Globalement, l'effet semble relativement négligeable à l'échelle des tolérances de la MO. En effet, seul une amélioration de 1.5% des points en dessous de 1σ est constaté entre une distance inter-station de 100 m et 300 m (3.4, 3.5, 3.6, 3.7). Aucun accroissement significatif n'est constaté en dessous de 100 m. Toutefois, en regardant mieux la répartition spatiale des points concernés, nous remarquons qu'une valeur d_0 trop élevée aura des effets négatifs dans les petits périmètres et les zones

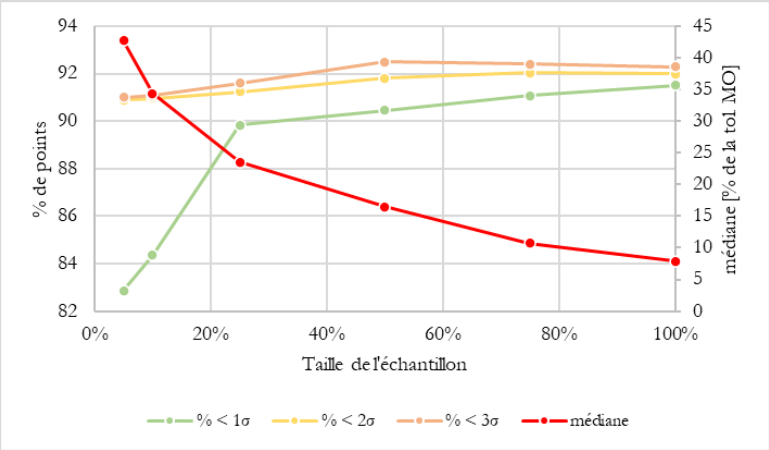

FIGURE 3.2 – Répartition des Fs selon les tailles d'échantillons de points de rattachement

de transition (3.7). En réduisant la valeur de cette variable, le calcul permettra donc de mieux adapter les observations filtrées aux effets locaux. Ceci a aussi pour effet d'écarter un nombre plus faible de points de rattachement. Des problèmes de cohérance de réseau peuvent aussi être remarqués lorsque la valeur est trop faible, résultant sur quelques valeurs aberrantes (3.3).

Pour la suite des tests, la valeur d_0 a été maintenue à 100 m.

3.3.3 Choix du simulateur

Les résultats entre le simulateur d'observations à partir d'un canevas existant et le simulateur de station sur un maillage régulier ont pu être comparés. Considérant les constats précédents, la comparaison s'est portée sur le calcul avec l'échantillon de 25% de points de rattachement et une valeur d_0 de 100 m. On peut remarquer sur l'histogrammes ci-après qu'aucune différence significative ne peut être constatée (3.10).

Cela s'explique en partie du fait que la densification du canevas existant génère une densité et une répartition de stations fictives similaire à la simulation complète du canevas (3.11, 3.12). L'analyse est approfondie ci-après sur le jeu de données d'Ursy, où le canevas existant issu de la polygonation d'origine présente une configuration moins régulière.

3.3.4 Effet sur les zones de tensions

Sur l'ensemble des tests, 90% des points limites et points fixes calculées présente des écarts jusqu'à 1σ (3.4). Dans le secteur bleu, les points sont transformés correctement (3.13). Seuls quelques points sur le périmètre présentent des Fs significatifs (3.14). Ceci est expliqué par le découpage de la zone de tension et par l'absence de point de rattachement dans ces secteurs. Sur les bâtiments, l'intégrité géométrique est bel et bien conservée et la médiane des Fs se trouve en dessous du centimètre.

Malgré tout, quelques artefacts sont constatés, notamment, dans le sous-périmètre orange, où les FS sont exagérément importants par rapport à son étendue. De ce fait, les observations simulées ne s'adaptent pas naturellement sur les levés en MN95, dont la plupart des points sont filtrés lors de l'étape 1 du calcul par moindres carrés (3.15).

Sur le périmètre vert, avec un systématisme induit du même ordre de grandeur ou plus petit que la précision du voisinage, le traitement détecte et corrige quand même des tensions mais dans une moindre mesure.

3.3.5 Effet sur les zones de tensions négligeables

Les Fs constatés en dehors des zones de tensions sont de l'ordre de quelques millimètres jusqu'au centimètre. Quelques phénomènes d'extrapolation peuvent être constatés vers l'extérieur du périmètre dans les secteurs lacunaire en points de rattachement (3.14). Toutefois, les vecteurs restent dans la tolérance attendue de l'OTEMO.

3.4 Appréciation générale

Le simulateur offre des perspectives très intéressantes afin de supprimer la plupart des tensions dans les zones concernées. Dans tous les cas, il est constaté que, même dans les secteurs critiques, le processus n'aggrave pas la qualité des données et peut offrir des améliorations partielles. Le simulateur permet également de contrôler un levé RTK simple au moyen de coordonnées théoriques homogène localement.

Comme constaté, le processus est cependant tributaire de deux aspects :

1. Un nombre de points de rattachement suffisants (au moins 25%) et répartis de manière homogène ;
2. Une densité de stations suffisante (d_0 entre 70 et 100 m semble un bon compromis pour la MO).

Le résultat du calcul peut être considéré comme des coordonnées dépourvues de tensions locales. Toutefois, les coordonnées des points non levés restent théoriques et peuvent être entachées d'autres fautes grossières liées à l'historique du point (rétablissement, etc.). Globalement, ces limites sont mises en évidence lors du processus lorsque les éléments le permettent, notamment par l'écartement automatique des points de rattachement incohérents avec leur voisinage. Dans le cas du secteur orange de Siviriez, par exemple, les points écartés permettent de mettre en évidence le phénomène aberrant du secteur. À Ursy, les fautes grossières sur les points de rattachement sont également écartées.

Après identification des points et secteurs lacunaires, il devient dès lors facile de filtrer, puis fiabiliser les points par l'ajout d'observations et/ou de contraintes supplémentaires lors d'une deuxième étape du calcul, sur le moteur Nelcas.

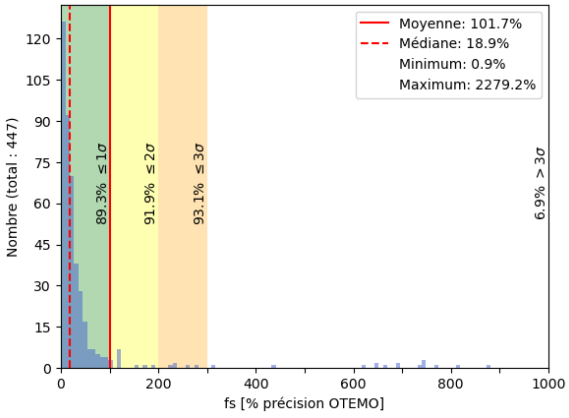

FIGURE 3.3 – Fs - simulation de station, 50 m

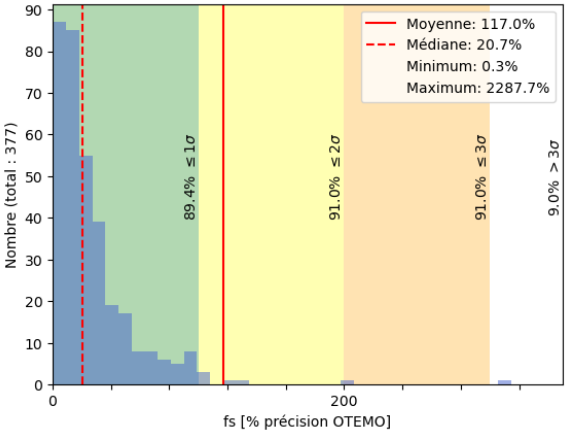

FIGURE 3.5 – Fs - simulation de station, 70 m

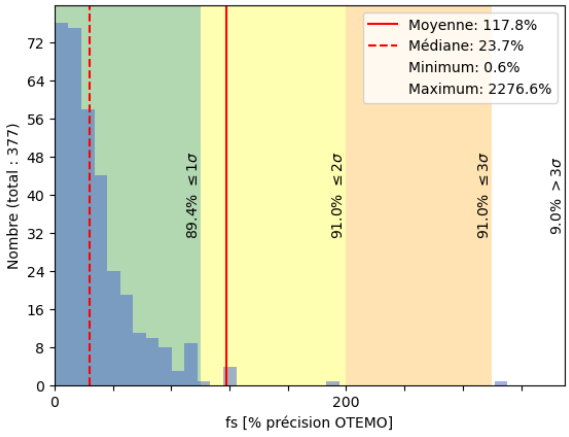

FIGURE 3.4 – Fs - simulation de station, 100 m

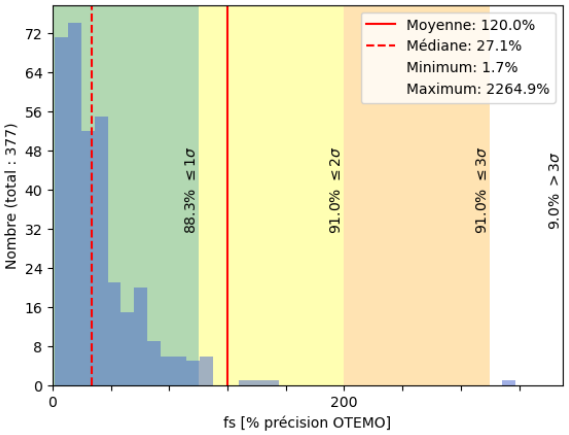

FIGURE 3.6 – Fs - simulation de station, 150 m

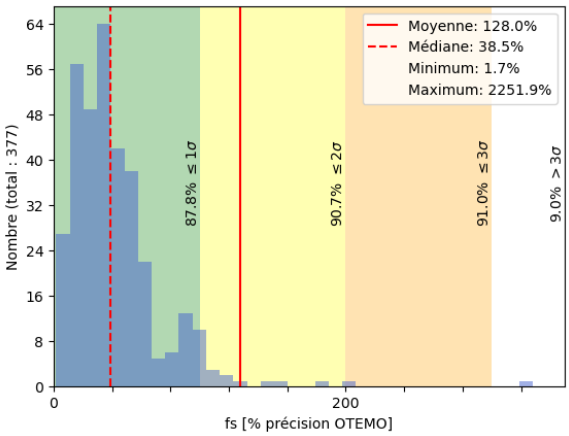

FIGURE 3.7 – Fs - simulation de station, 300 m

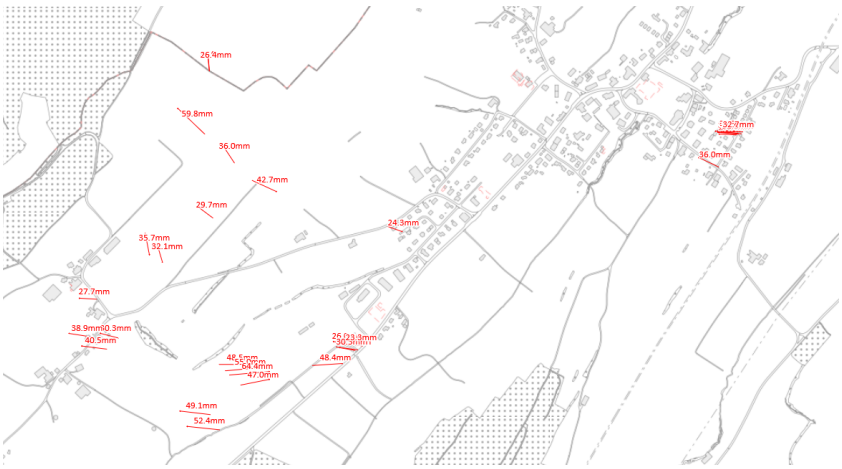

FIGURE 3.8 – Fs 70-130% tol - 70 m

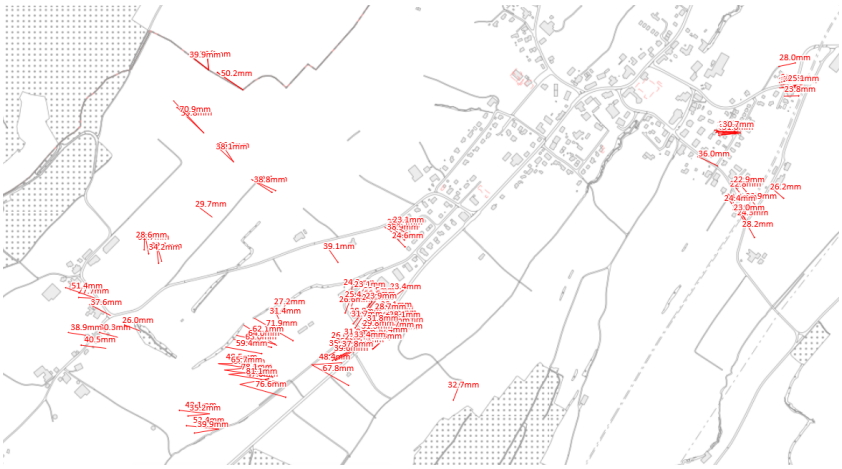

FIGURE 3.9 – Fs 70-130% tol - 300 m

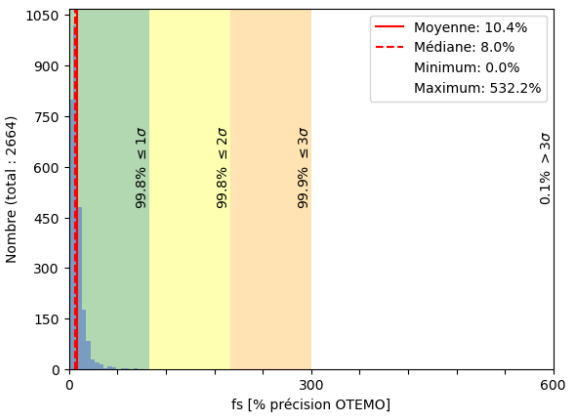

FIGURE 3.10 – Fs entre les simulateurs

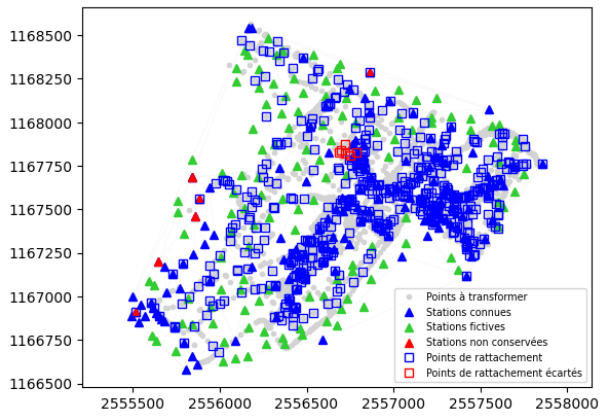

FIGURE 3.11 – Résumé du canevas (obs.)

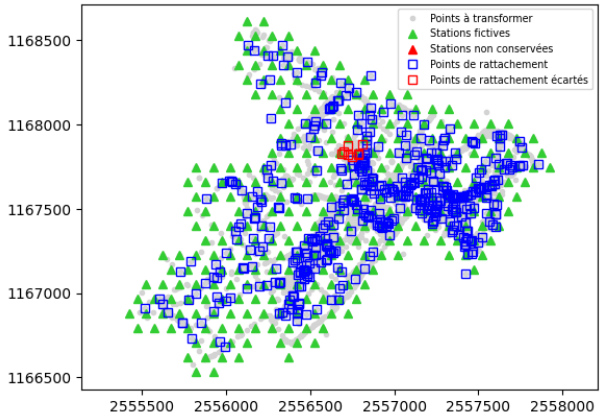

FIGURE 3.12 – Résumé du canevas (obs. + sta.)

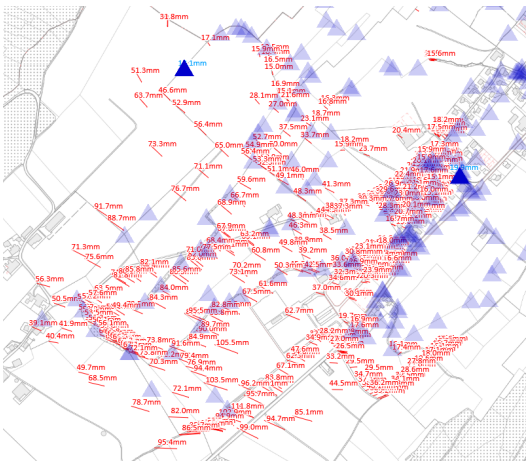

FIGURE 3.13 – Vecteurs de transformation (S2)

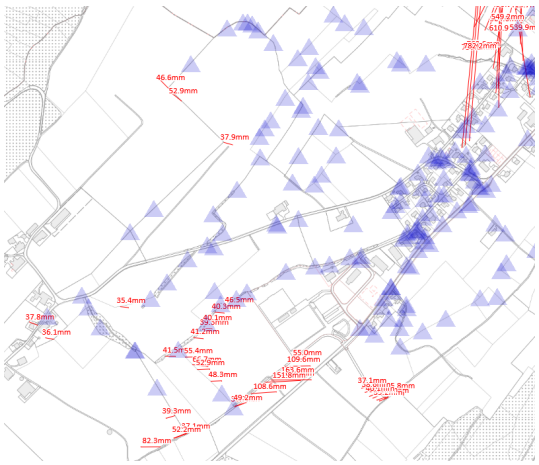

FIGURE 3.14 – Fs > 3.5 cm sur les coord. DOIT (S2)

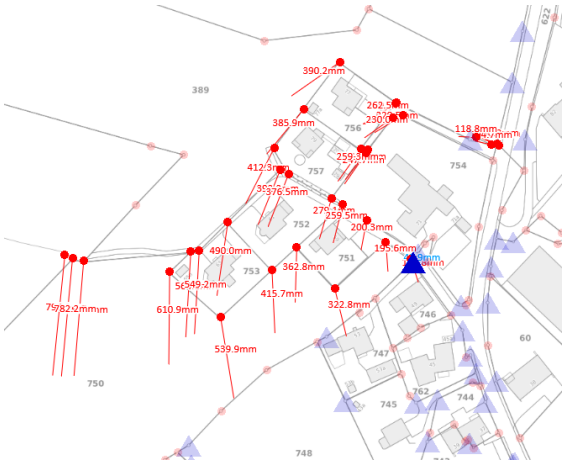

FIGURE 3.15 – Fs > 3.5 cm sur les coord. DOIT (S2), périmètre orange

Chapitre 4

Scénario 3 - Transformation par triangles via moteur de calcul par les moindres carrés

4.1 Données

Les systèmes locaux sont simulés à partir des points en base de données de la MO. Les points de rattachement sont issus d'un échantillon mesuré en MN95 et répartis de manière homogène sur le périmètre. Ceux-ci servent également de sommets des triangles pour la création de la triangulation de Delaunay qui délimite les systèmes locaux.

Des observations usuelles et contraintes de la MO peuvent toutefois être ajoutées à la compensation finale.

4.2 Déroulement des tests

Densité des points de rattachement

Le calcul a été réalisé sur les mêmes jeux de données que le simulateur d'observations fictives. Le réseau a été calculé avec une densité de points de rattachement de 25%, 50% et 75%.

Rayon de voisinage

Le paramètre d_0 a été fixé à 100 et 300m pour l'analyse du voisinage des points de rattachement. La précision locale des points a été fixée à 3 cm pour cette étape.

Fautes grossières

Une attention particulière a été mise sur l'analyse des résulats et sur les comportements du calcul par rapport à des fautes grossières sur les points de rattachement. Deux fautes grossières ont été induite dans les secteurs hors tension, dont une dans un secteur avec une densité de point théoriquement suffisante pour sa mise en évidence.

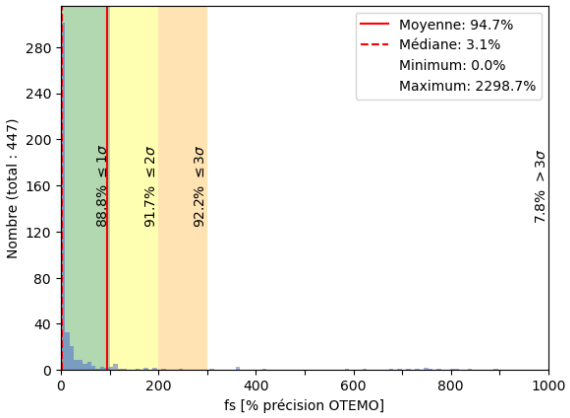

FIGURE 4.1 – FS - Scénario 3, 25%

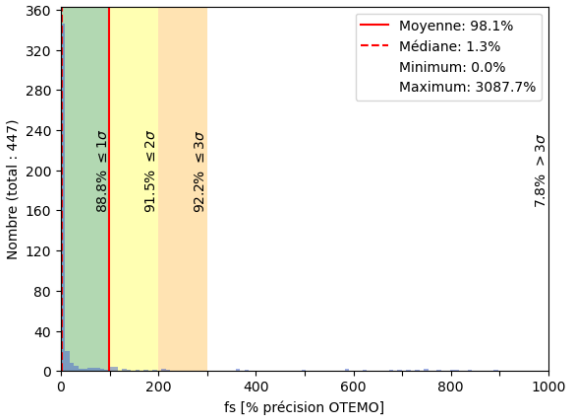

FIGURE 4.2 – FS - Scénario 3, 50%

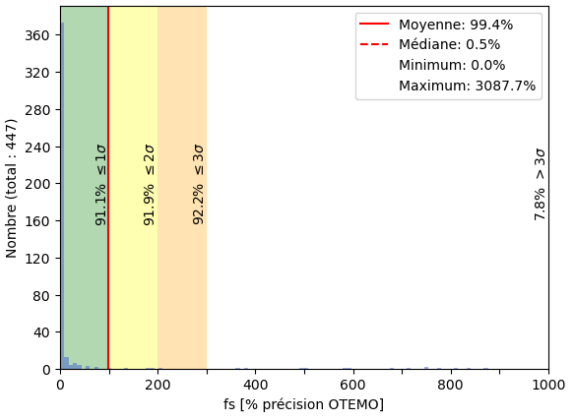

FIGURE 4.3 – FS - Scénario 3, 75%

4.3 Résultats

4.3.1 Densité des points de rattachement

Aucune amélioration significative n'est constatée entre un échantillon de 25% et 75% de points de rattachement (± 2%) (4.1, 4.2, 4.3). En terme de performance, la durée du traitement a été considérablement prolongée en augmentant le nombre de points de rattachement, et donc de systèmes locaux.

Pour la suite des tests, considérant ce premier constat, il a généralement été choisi de les réaliser sur une base de 25% de points de rattachement.

4.3.2 Rayon de voisinage

Aucun effet significatif n'a été remarqué suite à l'augmentation du paramètre d_0 à 300 m sur la densité de 25% de points d'appui. Sur ce jeu de données, l'augmentation du rayon du voisinage pour l'analyse influence peu la taille des sessions pour le contrôle du voisinage, en opposition à la densification de l'échantillon de points.

4.3.3 Fautes grossières

Deux fautes grossières (1m) ont été ajoutées sur deux points de rattachement, un isolé et un disposant d'autres points dans son voisinage. Le contrôle de voisinage a mis en évidence ce dernier. Le point

isolé a par contre été conservé en rattachement et l'erreur a été reportée sur les triangles liés (4.4).

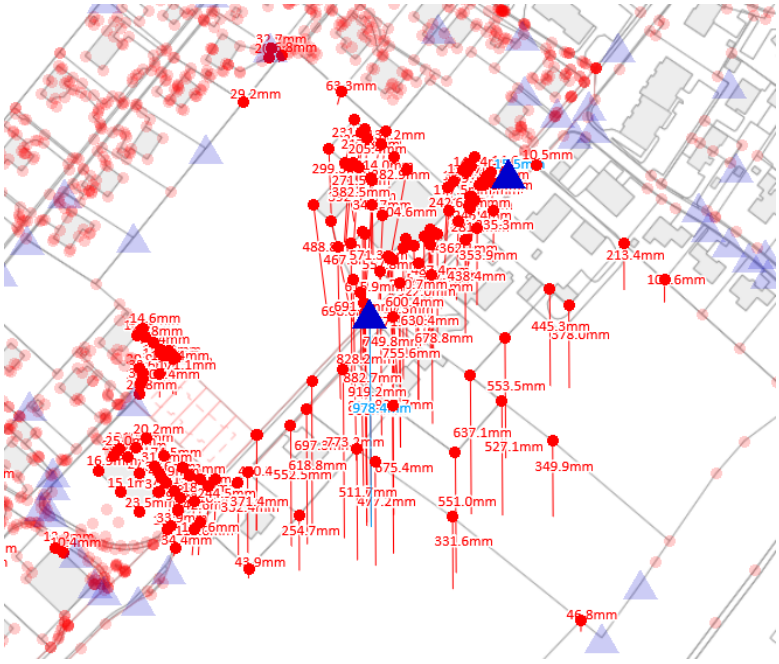

FIGURE 4.4 – Erreur reportée d'une faute grossière sur un PAT isolé

Les systèmes locaux des bâtiments permettent de mettre en évidence le cas dans le résultat de la compensation finale. Il faut toutefois souligner les risques liés et la nécessité de contrôler au préalable les points de rattachement, indépendamment du processus.

4.3.4 Effet sur les zones de tensions

Sur l'ensemble des tests, 90% des points limites et points fixes calculés présentent des écarts jusqu'à 1σ (4.1). Sur les bâtiments, l'intégrité géométrique est bel et bien conservée et la médiane des Fs se trouve en dessous du centimètre.

4.3.5 Effet sur les zones de tensions négligeables

Les phénomètres d'extrapolation en bord de périmètre du scénario 2 se retrouvent sur ce scénario. Ceux-ci soulignent l'importance d'avoir une répartition homogène des points d'appui, en particulier dans les triangles grands extérieurs (enveloppe convexe).

4.4 Appréciation générale

La transformation par triangles offre des perspectives intéressantes afin de transformer des jeux de données important avec un nombre de points de rattachement limité. Avec les mêmes 25% de points de rattachement, le traitement offre un résultat similaire à la simulation d'observations fictives mais pour des ressources de calcul beaucoup plus légères. Seul le secteur avec des tensions exagérées n'est pas corrigé du fait que les quelques points de rattachement liés sont écartés lors de l'analyse de voisinage.

En revanche, on constate des effets négatifs lors de l'ajout de la densification des points de rattachement. Le nombre de sessions et donc de paramètres augmente avec la densification du maillage liée à l'augmentation des points d'appui. Ceci a un effet direct sur les performances du simulateur dès l'utilisation d'un échantillon de 50%.

Ainsi, le scénario 3 devrait être privilégié uniquement pour la transformation de gros jeux de données qui peuvent d'appuyer sur un nombre restreint de points de rattachement.

Chapitre 5

Comparaison des scénarios

5.1 Résultat sur l'échantillon de point de contrôle

La comparaison entre les scénarios s'est appuyée sur les tests réalisés sur le périmètre d'Ursy, tous avec une base de 274 de points de rattachement (environ 25%). Comme pour la reprise des éléments techniques approuvés (S1), l'évaluation a été réalisée sur la base d'un échantillon indépendant de 100 points (10% des points calculés) en MN95.

1. Scénario 1 (5.1) ;
2. Scénario 2, canevas de stations issu des points fixes en BDMO (5.2) ;
3. Scénario 2, simulation du canevas avec $d_0 = 100$ m (5.3) ;
4. Scénario 3, avec $d_0 = 100$ m (5.3).

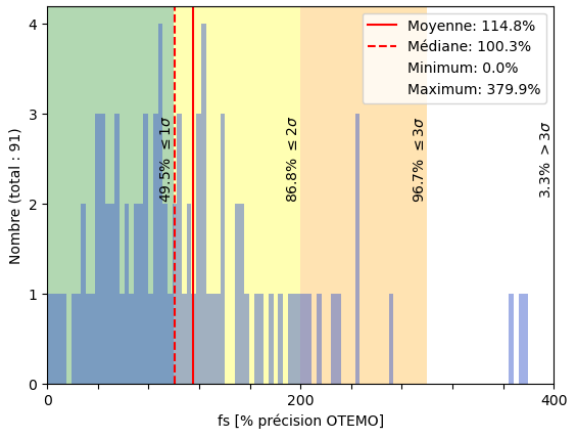

FIGURE 5.1 – Fs - reprise des éléments techniques

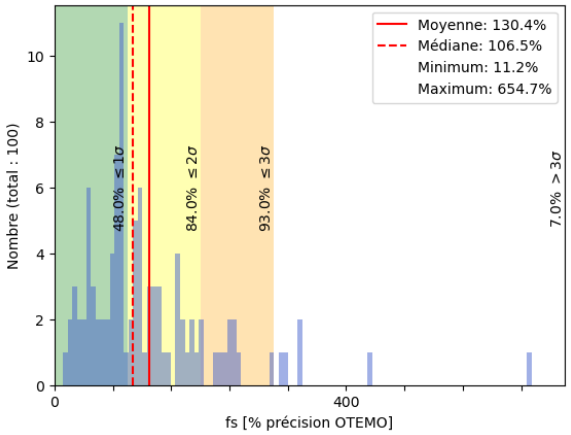

FIGURE 5.2 – Fs - simulation depuis PF MO

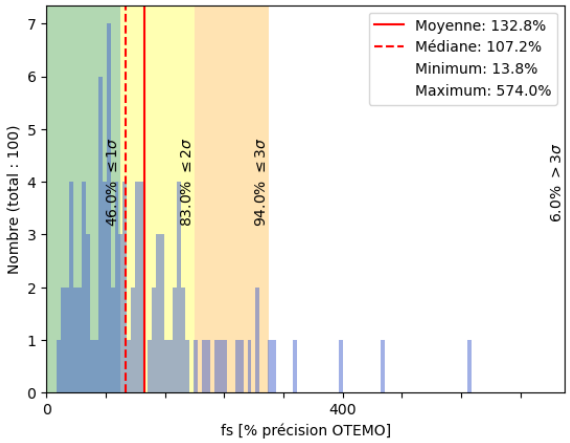

FIGURE 5.3 – Fs - simulation de station

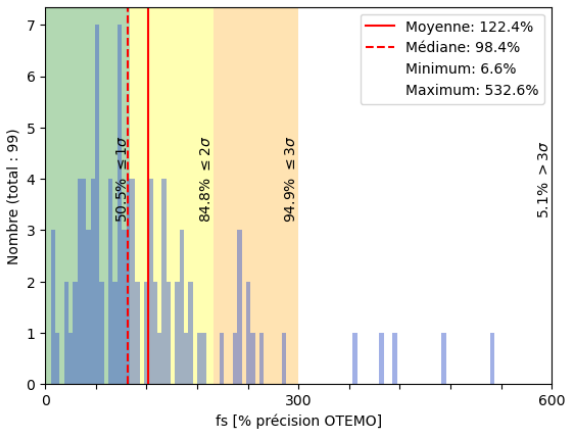

FIGURE 5.4 – Fs - transformation par triangles

Globalement, tous les calculs présentent des résultats similaires. À ± 2%, on retrouve 48% des points en dessous de 1σ, 85% en dessous de 2σ et 95% en dessous de 3σ. On peut donc constater une amélioration significative de l'intégration des points en MN95.

Sur le solde de points hors tolérance après calcul, nous constatons que ces points présentaient déjà des Fs aberrants avant calcul et que ce dernier a malgré tout amélioré la tendance générale également sur ces points (5.5 et 5.6). La transformation par triangle met davantage de points en évidence. Les valeurs les plus aberrantes sont également identifiées par le simulateur et par la triangulation (5.7)

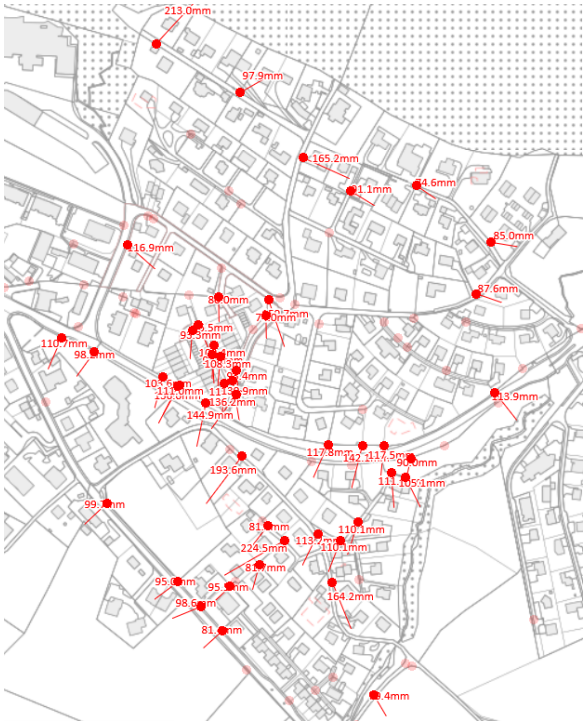

FIGURE 5.5 – Fs principaux - BDMO

FIGURE 5.6 – Fs principaux - simulateur

FIGURE 5.7 – Fs principaux - transformation par triangles

L'échantillon de point de rattachement filtrés reste similaire entre les scénarios. Les points avec les Fs les plus significatifs sont écartés sur tous les scénarios. Le scénario 1 écarte une trentaine de point au total (11%). Le scénario 3 est celui qui filtre le plus de points avec près d'une vingtaine (13%) (5.9). Finalement, le simulateur d'observations et le simulateur observations-stations sont ceux qui s'adaptent le mieux localement, avec respectivement 5 point (2%) et 17 (6%) (5.8). Le fait de simuler

des observations depuis les points fixes semble la solution qui offre le plus de souplesse au réseau pour s'adapter à la réalité du terrain.

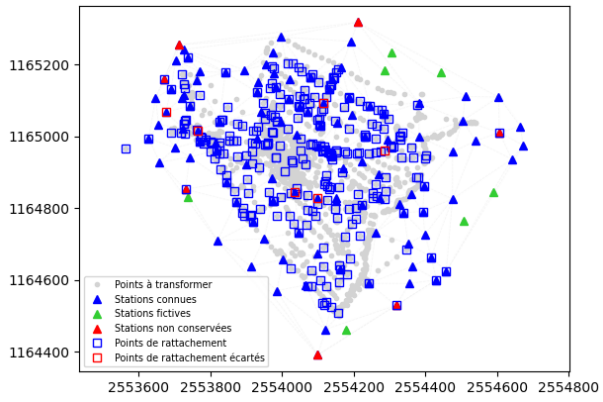

FIGURE 5.8 – Résumé graphique (S2)

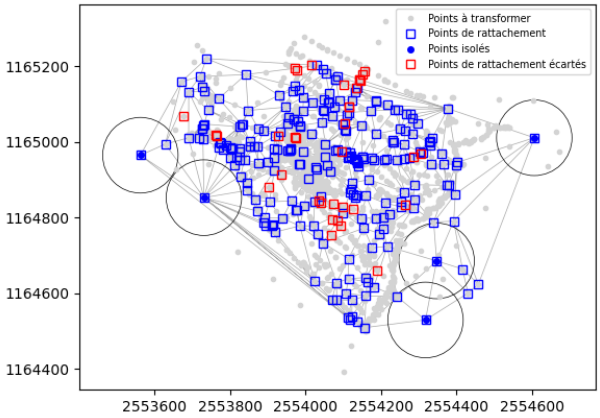

FIGURE 5.9 – Résumé graphique (S3)

Il est également intéressant de comparer les déplacements des points de rattachement, notamment dans l'hypothèse d'un levé systématique de tous les points. Du fait de l'absence de surabondance sur la majorité des triangles, les écarts pour le scénario 3 sont nuls ou millimétrique. La comparaison des résultats entre les scénarios 1 et 2 permet d'appuyer les constats précédents concernant le scénario 2 (5.10 et 5.11). En admettant un levé systématique de l'ensemble des points, seul environ 5% des points retrouvés sur le terrain sont estimés incohérant avec leur voisinage et nécessiteraient un nouveau levé de contrôle.

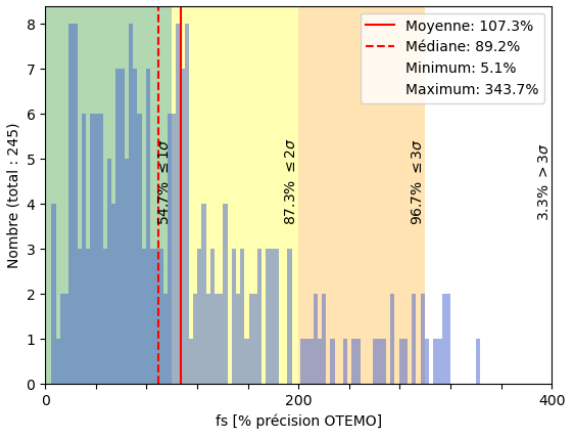

FIGURE 5.10 – FS sur les rattachements (S1)

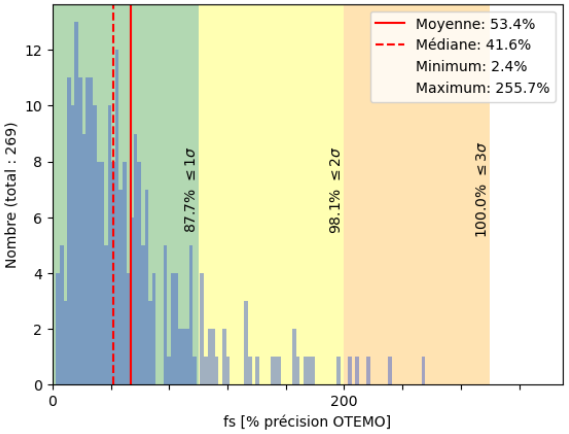

FIGURE 5.11 – FS sur les rattachements (S2)

5.2 Comparaison directe des résultats

Une seconde analyse a été réalisée, mais cette fois par comparaison directe entre les coordonnées en sortie de calcul des différents scénarios. Celle-ci a permis de contrôler si, au-delà des Fs sur les points de contrôle, les résultats sont cohérants entre les scénarios et connaître l'ordre de grandeur des écarts à attendre entre l'une ou l'autre méthode.

Les écarts entre les deux variantes du scénario 2 sont millimétriques (5.15). Entre le scénario 2 et 3, les différences restent également relativement faibles, en moyenne inférieure à 2 cm (5.16, 5.17). Elles sont cohérentes avec les effets attendus de la transformation par triangles s'appuyant sur des points déterminés avec cette précision.

Les différences des scénarios 2 et 3 sont plus intéressantes dans la mesure où les éléments utilisés pour les calculs diffèrent. Elles permettent ainsi une comparaison entre des éléments plus indépendants en donnant également un indicateur global des effets du calcul traditionnel lors de la numérisation. Même si la tendance générale reste proche, nous pouvons constater que le scénario 2 se rapproche davantage des résultats du scénario 1, sans écart significatif entre les deux variantes (5.12, 5.13, 5.14). En effet, on retrouve une répartition des Fs à 64% en dessous de 1σ, 89% en dessous de 2 et 95% en dessous de 3σ.

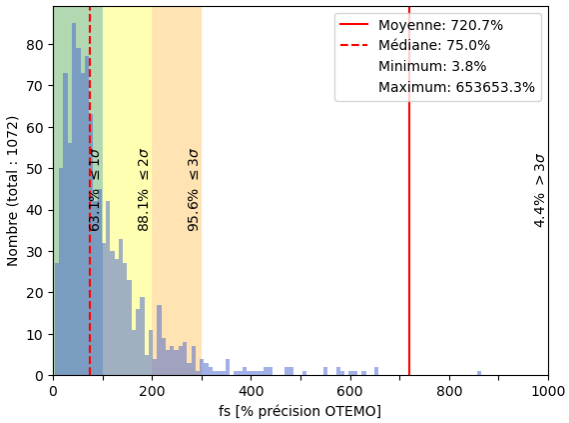

FIGURE 5.12 – Fs - S1 et S2 (obs.)

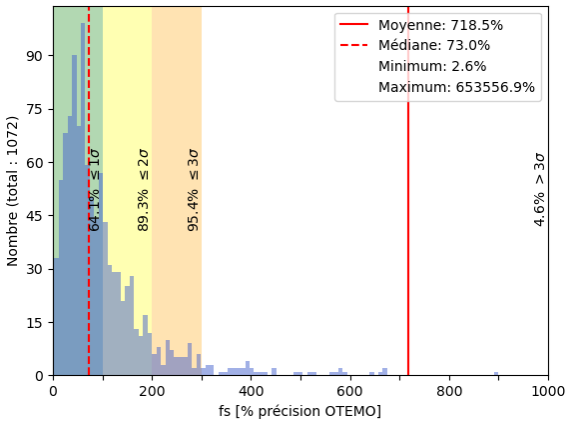

FIGURE 5.13 – Fs - S1 et S2 (sta. + obs.)

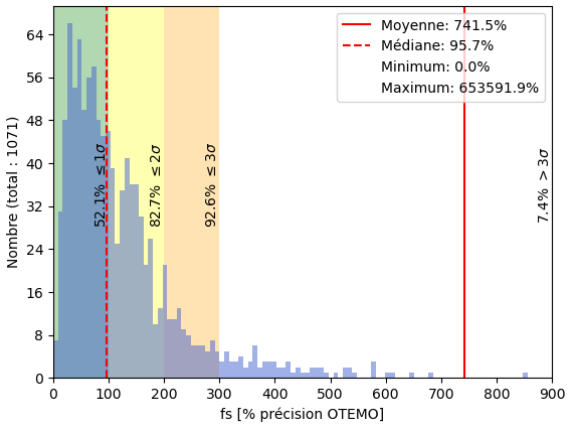

FIGURE 5.14 – Fs - S1 et S3

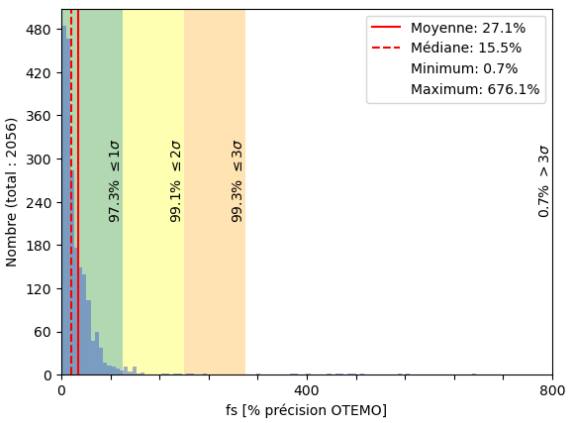

FIGURE 5.15 – Fs - S2 (obs.) et S2 (sta. + obs.)

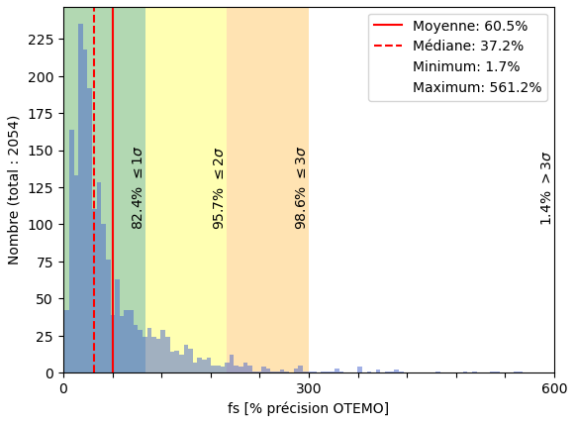

FIGURE 5.16 – Fs - S2 (obs.) et S3

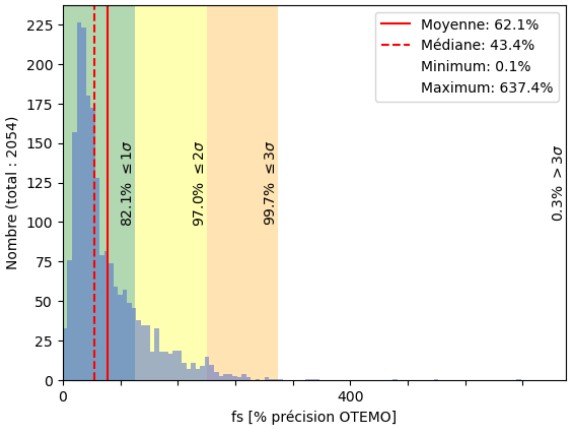

FIGURE 5.17 – Fs - S2 (sta. + obs.) et S3

5.3 Conclusion

Les trois scénarios offrent des perspectives intéressantes pour reprendre des données approuvées, mais entachées de tensions locales. Le scénario 2 offre le meilleur rapport entre les résultats et les ressources nécessaires, mais nécessite d'avoir à disposition des coordonnées avec une précision locale suffisante. La simulation à partir des points fixes existants semblent présenter des résultats légèrement meilleurs. Les différences n'étant pas significatives, la simulation à partir d'une grille fictive peut être privilégiée pour des raisons opérationnelles.

Le scénario 3 offre également un outil intéressant pour transformer des gros jeux de données. En l'état, il est recommandé de réaliser une analyse au moins partiellement manuelle pour sélectionner les sommets des triangles, les points de contrôle et éviter les effets de sur-interpolation.

Le scénario 1 est à réserver lorsque l'on ne dispose pas de coordonnées ayant une précision locale suffisante. Sur le jeu de données de test, les vecteurs sur les points de contrôle sont similaires aux autres scénarios.

Finalement, nous pouvons conclure que le choix d'un scénario peut être fait en fonction des éléments à disposition (points à transformer et rattachements) et de la taille des données, plutôt que sur les aspects qualitatifs, globalement équivalents entre les scénarios.

Chapitre 6

Tests complémentaires

Deux tests ont été réalisés par l'INSIT lors de la valisation du scénario 2.

Premièrement, une translation d'environ 25 cm a été appliquée à un petit périmètre. Les tests ont été réalisés avec des valeurs de voisinage $d_0 = 100$ m, puis 30 m. La première valeur a écarté les points de rattachement translatés, les considérant inhomogènes dans ce rayon. La valeur de 30m a permis la transformation correcte des points nouveaux avec la translation appliquée.

Ensuite, une rotation importante de 1°, puis 0.1° a été induite sur le même périmètre. Le voisinage $d_0 = 30$ m a été conservé. Les écarts induits par la rotation de 1° (1.7 m à 100) ont eu pour effet d'écarter les points de rattachement du secteur pivoté. Avec une valeur plus modeste de 0.1°, présentant toutefois des écarts relativement importants d'ordre décimétrique, la rotation a correctement été identifée et corrigée par le simulateur.

Sur le reste du jeu de données, aucun biais n'a été induit par l'opération. Seuls les secteurs directement attenants au périmètre transformé, et qui ne disposent d'aucun point de rattachement, présentent des vecteurs de norme linéaire selon leur éloignement des secteurs de tensions.

Ces constats soulignent l'importance de définir la répartition des points de rattachement et du paramètre d_0 en fonction du jeu de données transformé.

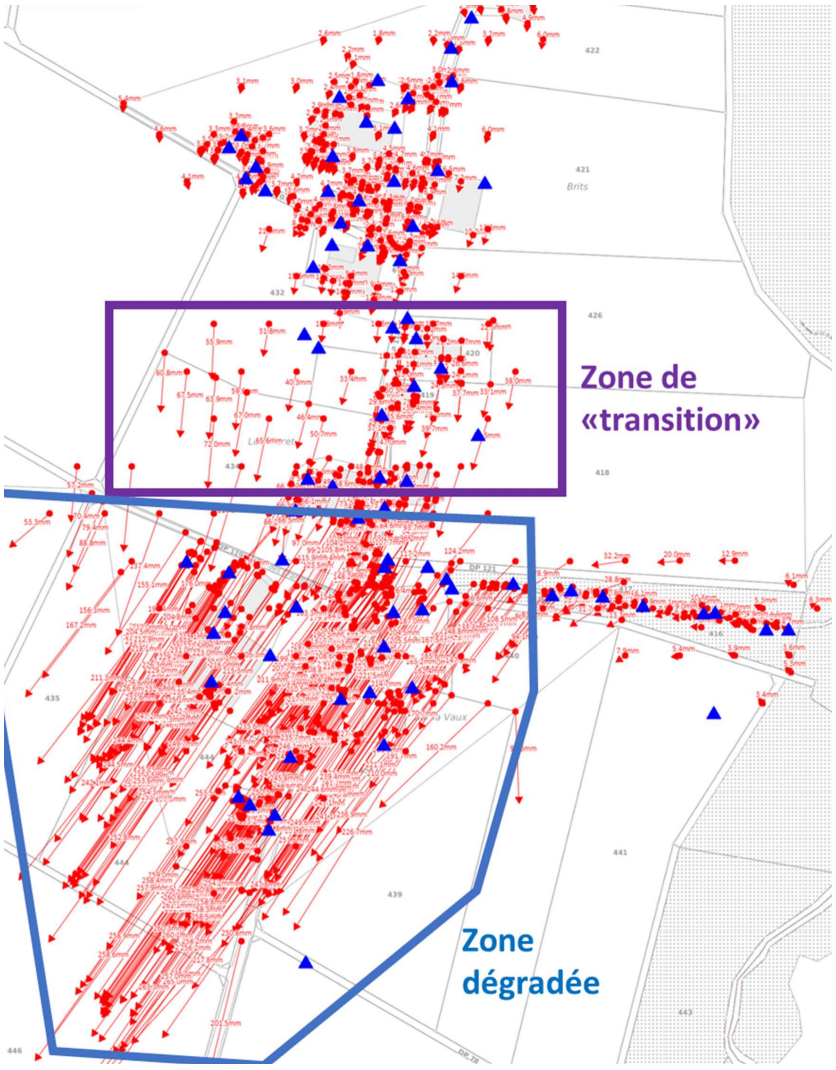

FIGURE 6.1 – Vecteurs sur le test de translation $d_0 = 30$m, HEIG-VD