



HAL
open science

Réalisation d'un canevas planimétrique et altimétrique précis et dense dans la cité Plantagenêt du Mans

Baptiste Jouhannet

► **To cite this version:**

Baptiste Jouhannet. Réalisation d'un canevas planimétrique et altimétrique précis et dense dans la cité Plantagenêt du Mans. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2024. dumas-04785723

HAL Id: dumas-04785723

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04785723v1>

Submitted on 15 Nov 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS
ECOLE SUPERIEURE D'INGENIEURS GEOMETRES ET TOPOGRAPHES

MEMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLOME D'INGENIEUR CNAM

SPECIALITE : Géomètre et Topographe

par

Baptiste JOUHANNET

Réalisation d'un canevas planimétrique et altimétrique précis et dense dans la
cité Plantagenêt du Mans

Soutenu le 04 septembre 2024

JURY

Monsieur Pierre KERVELLA	Président du jury
Monsieur Laurent MOREL	Maître de stage
Monsieur Ghyslain FERRÉ	Maître de stage
Monsieur Stéphane DURAND	Enseignant référent

Remerciements

Je tiens d'abord à remercier tout particulièrement Laurent MOREL pour son accompagnement, ses conseils, sa disponibilité et sa bonne humeur tout au long de ce travail. Il a su me guider lorsque j'en ressentais le besoin. Je voudrais aussi remercier Frédéric DURAND pour l'aide qu'il m'a apporté au niveau de la prise en main des outils informatiques du GeF.

J'avais pour ambition au début de ce travail d'effectuer mes propres mesures du réseau que je devais concevoir. Je remercie pleinement Ghyslain FERRÉ et Jérémie ROBERT d'une part pour leurs conseils au moment de la conception mais surtout pour leur précieuse aide lors de la semaine dédiée aux mesures topographiques. Aussi, je voudrais vraiment remercier l'ensemble des membres de la T0 : Laudea, Manon, Elise, Max, Ludo, Juliane et Sam, et Gaëtan, étudiant IG4 venu gentiment apporter son assistance, sans qui je n'aurais tout simplement pas pu effectuer les observations GNSS. Je les remercie aussi pour les cinq mois agréables que l'on a pu passer ensemble.

Je remercie également Joëlle NICOLAS-DUROY, Antoine BESLIN et les étudiants d'IG4 pour leur bonne humeur durant les trois semaines de TP.

Je n'oublie pas Pierre BOSSER, Stéphane DURAND et Hugo GERVILLE pour leurs conseils avisés lors du traitement des données avec les logiciels GipsyX et CoMeT.

Merci aussi à Virginie et tout le personnel pour leur bonne humeur au quotidien.

Je remercie mes parents, ma famille et Laudea qui m'ont toujours soutenu du début à la fin de mes études. Merci à toutes et à tous.

Liste des abréviations

ANTEX – ANTenna Exchange format

CDDIS - Crustal Dynamics Data Information System

CoMeT - Compensation de Mesures Topographiques

CERN – European Organization for Nuclear Research

GeF - Géomatique et Foncier

GLONASS - GLObal'naya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema

GMF - Global Mapping Function

GNSS - Global Navigation Satellite System

GPS - Global Positioning System

GPT - Global Pressure and Temperature

IGS - International GNSS Service

IONEX - IONosphere Exchange format

ITRF - International Terrestrial Reference Frame

JPL - Jet Propulsion Laboratory

LGC - Logiciel Général de Compensation

NASA - National Aeronautics and Space Administration

OVPF - Observatoire Volcanologique du Piton de la Fournaise

PPP - Precise Point Positioning

REGAT - REseau Gps de l'ATlas

RGP - Réseau GNSS Permanent

RINEX - Receiver INdependent EXchange format

STD-SHD-SWD/ZTD-ZHD-ZWD - Slant/Zenith Total/Hydrostatic/Wet Delay

TP - Travaux Pratiques

VMF - Vienna Mapping Function

VZHD – Vienna Zenith Hydrostatic Delay

Glossaire

Bernese : Logiciel de traitement GNSS de l'université de Berne (Suisse).

BLQ : Fichier de sortie contenant les paramètres du modèle de surcharge océanique.

CC48 : Projection Conique Conforme spécifique aux latitudes comprenant la ville du Mans.

C++ : Langage de programmation.

FES2004 : Modélisation de la surcharge océanique établi en 2004.

Galileo : Système Européen de navigation par satellite.

Gamit : Logiciel de traitement GNSS.

GPS : Système Américain de navigation par satellite.

GRS80 : Ellipsoïde de référence associé au RGF93.

NGF-IGN69 : Le Nivellement Général de la France établi en 1969 par l'Institut Géographique National est le système altimétrique de référence en France.

Python3 : Langage de programmation.

RGF93 : Le Réseau Géodésique Français, établi en 1993, est le système de référence en vigueur en France.

Test global de validation (Chi-deux) : Test statistique utilisé pour la validation globale du traitement par la méthode des moindres carrés.

YAML : Le Yet Another Markup Language est un format de sérialisation de données lisible par l'homme. Très proche du format tree proposé par GipsyX.

WGS84 : Système de référence mondial utilisé pour le système GPS.

Table des matières

INTRODUCTION	7
I CREATION ET OBSERVATION DU RESEAU GEODESIQUE	9
I.1 CONCEPTION ET IMPLANTATION.....	9
I.1.1 Les critères de conception.....	9
I.1.2 Elaboration du fichier KMZ.....	10
I.1.3 Préanalyse du réseau	11
I.1.4 Implantation des points	13
I.2 ACQUISITION DES MESURES	14
I.2.1 Observations GNSS	14
I.2.1.1 Méthodes employées	14
I.2.1.1.1 Multistations.....	14
I.2.1.1.2 Precise Point Positioning – PPP	14
I.2.1.2 Organisation et campagne de mesures.....	15
I.2.2 Observations topographiques.....	16
I.2.2.1 Stratégies employées	16
I.2.2.2 Campagne de mesures	16
II CALCUL DU RESEAU	17
II.1 TRAITEMENTS DES OBSERVATIONS GNSS.....	17
II.1.1 Traitement par la méthode PPP avec le logiciel GipsyX	17
II.1.1.1 Stratégies et paramétrages du traitement	18
II.1.1.1.1 Ionosphère.....	19
II.1.1.1.2 Troposphère	19
II.1.1.1.3 Produits GPS.....	19
II.1.1.1.4 Surcharge océanique	20
II.1.1.2 Conception d’un script automatisé pour le calcul de séries temporelles	20
II.1.1.3 Validation des résultats de GipsyX	22
II.1.1.3.1 Calcul de séries temporelles sur le RGP pour la qualification de la position estimée	22
II.1.1.3.2 Comparaison avec le logiciel GAMIT pour la qualification de l’estimation du délai troposphérique	23
II.1.1.4 Traitement du réseau de points de la cité Plantagenêt.....	24
II.1.2 Traitement par la méthode Multistations	25
II.1.2.1 Calcul en étoile.....	26
II.1.2.2 Calcul des sessions	26
II.1.2.3 Ajustement libre	26
II.1.2.4 Ajustement contraint	27
II.1.3 Comparaison des deux méthodes.....	27

II.2	AJUSTEMENT DES MESURES TOPOGRAPHIQUES	28
II.2.1	Ajustement et test du chi-deux.....	29
II.2.2	Analyse des résultats.....	30
II.2.3	Intégration des coordonnées issues du traitement PPP à la place du Multistations pour un second calcul du réseau	31
III	UTILISATION DU RESEAU POUR LES TRAVAUX PRATIQUES DE DEUXIEME ANNEE DU CYCLE INGENIEUR DE L'ESGT.....	32
III.1	PREPARATION DES TRAVAUX PRATIQUES	32
III.1.1	Besoins en matériel.....	32
III.1.2	Organisation.....	32
III.1.3	Supports	33
III.2	ENCADREMENT DES SESSIONS DE MESURE ET DE TRAITEMENT.....	33
III.3	COMPARAISON DES RESULTATS AVEC LE CALCUL DE REFERENCE	34
III.3.1	Compensation du réseau de lignes de base GNSS	34
III.3.2	Compensation du réseau géodésique complet.....	35
III.4	PISTES D'AMELIORATION ENVISAGEABLES DU RESEAU	37
	CONCLUSION.....	38
	LISTE DES FIGURES.....	39
	LISTE DES TABLEAUX	39
	BIBLIOGRAPHIE	40
	TABLE DES ANNEXES.....	43
	ANNEXE 1 PRECISIONS A PRIORI SUR LES OBSERVATIONS TOPOGRAPHIQUES UTILISEES POUR LES TRAVAUX PRATIQUES DES ANNEES PRECEDENTES	44
	ANNEXE 2 RESULTATS DE LA PREANALYSE DU RESEAU.....	45
	ANNEXE 3 EXEMPLE D'UNE FICHE SIGNALETIQUE.....	47
	ANNEXE 4 PLAN DES POINTS LEVES AU GNSS.....	48
	ANNEXE 5 SCHEMA DES SESSIONS GNSS POUR LE CALCUL EN RESEAU	50
	ANNEXE 6 STRUCTURE DU SCRIPT DE CALCUL DE SERIES TEMPORELLES AVEC GIPSYX	52
	ANNEXE 7 COORDONNEES ET REGIONS DE CONFIANCE A 95% ISSUES DE L'AJUSTEMENT COMPLET DU RESEAU	54

Introduction

La ville du Mans a la chance d'abriter sur son territoire une enceinte médiévale particulièrement bien conservée, offrant un témoignage précieux de son histoire. C'est ainsi que la cité Plantagenêt, communément appelée "le Vieux Mans", a été choisie comme site privilégié pour les travaux pratiques de deuxième année de cycle ingénieur à l'ESGT combinant activités de modélisation 3D et de géodésie. L'objectif de ce travail est de déterminer les méthodes de conception, d'observation et de traitement les plus optimisées pour la réalisation d'un réseau géodésique précis à l'échelle du centre historique du Mans. On cherchera à obtenir une précision à 1σ millimétrique en planimétrie et en altimétrie et une exactitude au moins inférieure à 2 cm sur les points de canevas. Les méthodes devront être appliquées une première fois en amont des Travaux Pratiques (TP) pour constituer un socle de référence. Cette phase permettra d'effectuer un traitement PPP (Precise Point Positioning) sur les observations GNSS (Global Navigation Satellite System) afin d'exploiter le logiciel GipsyX. L'objectif est de réintroduire GipsyX dans les futurs travaux du laboratoire Géomatique et Foncier (GeF) en actualisant les connaissances liées à son utilisation. En effet, la version précédente, Gipsy-Oasis, a déjà été utilisée par le laboratoire dans le passé mais le logiciel a depuis profondément changé. Il s'agira enfin d'exploiter ce réseau pour les TP avec les étudiants en les accompagnant tout au long du mois de mai.

L'entièreté du sujet repose sur la notion de réseau géodésique, c'est-à-dire un ensemble de points connus en coordonnées dans une zone géographique donnée. Nous ferons usage du système de référence national RGF93 v2b, de l'ellipsoïde GRS80, du méridien origine de Greenwich et de la projection CC48. Quant au système altimétrique, on utilisera le NGF-IGN69. Ce réseau 3D de points sera un support pour tous les travaux de géoréférencement internes à l'école mais aussi à l'échelle de Le Mans Métropole. Cela impose de le dimensionner suffisamment large pour couvrir toute la vieille ville tout en restant cohérent avec le volume de mesures réalisables par les étudiants en une journée. Le réseau sera implanté, observé et calculé une première fois en amont des travaux pratiques afin de constituer un socle de référence pour les années à venir.

L'ensemble des acquisitions se divisent en deux temps : les observations GNSS pour rattacher un certain nombre de points dans le système de coordonnées puis les mesures topographiques pour densifier le réseau géodésique à partir des points précédents. Les

observations GNSS seront traitées à l'aide de deux méthodes distinctes : la méthode Multistations et la méthode PPP. Le Multistations semble être la solution la plus adéquate pour la réalisation d'un tel réseau. Toutefois, cette technique est particulièrement coûteuse en moyens matériels et humains. D'autre part, elle nécessite que le territoire soit équipé de points connus précisément. La France dispose du Réseau GNSS Permanent (RGP) mais il sera intéressant d'utiliser d'autres méthodes comme le PPP contournant les contraintes imposées par le Multistations. Le PPP est une technique de positionnement absolu ne nécessitant qu'un seul récepteur. Celle-ci possède tout de même d'autres limites telle que le temps de convergence de la solution. Les traitements par la méthode PPP seront réalisés à l'aide de GipsyX, développé par le Jet Propulsion Laboratory (JPL) de la NASA (National Aeronautics and Space Administration). Nous verrons s'il est possible d'intégrer les coordonnées des points calculées par cette méthode dans l'ajustement des mesures topographiques réalisé avec le logiciel CoMeT (Compensation de Mesures Topographiques) développé par le laboratoire GeF. Ces mesures reposent sur un ensemble de techniques assurant le contrôle et la précision des données telles que le tour d'horizon, le centrage forcé, l'utilisation de références lointaines, etc. CoMeT utilise la méthode des moindres carrés, connue pour être performante pour la compensation de mesures issues de techniques différentes (tachéométrie, GNSS, etc) ainsi que pour la qualification des résultats.

Le réseau a été mesuré et calculé par les étudiants lors du mois de mai 2024. Lors de cette première mise en situation réelle du réseau, mon rôle s'est concentré sur l'organisation complète des trois semaines de travaux pratiques puis l'accompagnement des équipes pour arriver aux résultats les plus corrects possible. Il s'agit d'abord de prévoir le volume de matériel nécessaire pour chaque groupe afin d'adapter le contenu des journées de terrain. En effet, la mise en place de techniques comme le centrage forcé mobilise beaucoup d'équipements. Il faudra également anticiper un maximum d'imprévus qui pourraient survenir lors des journées de terrain afin d'apporter des solutions efficaces. Les résultats des étudiants seront comparés aux résultats de référence. Cette phase devrait aussi permettre d'améliorer le réseau en pointant de potentiels défauts.

Ce travail s'articulera d'abord autour de la conception du réseau et de l'acquisition des mesures de référence. Dans un second temps, on effectuera une comparaison entre les méthodes Multistations et PPP avant de discuter des résultats de l'ajustement complet du réseau de points. Enfin, on procédera à la description du déroulement des travaux pratiques et à l'analyse des résultats des différents groupes.

I Création et observation du réseau géodésique

I.1 Conception et implantation

I.1.1 Les critères de conception

Le réseau doit à la fois être assez étendu pour couvrir toute la zone d'étude, mais il doit être dimensionné pour les travaux pratiques. L'ensemble des mesures d'un seul groupe doit être réalisable en 3 demi-journées et doit constituer un réseau ajustable au sens des moindres carrés, c'est-à-dire d'avoir plus d'observations que d'inconnues. De plus, la détermination du réseau doit être la plus précise possible. La précision du réseau dépendra bien évidemment de la qualité des mesures effectuées, mais l'étape de conception joue également un rôle déterminant. Deux facteurs principaux doivent être étudiés : la redondance des observations et la géométrie du réseau. Plus les observations sont redondantes (multiples visées entre les points intervisibles), plus les fautes et les imprécisions sont détectables et plus le calcul est contrôlé. La géométrie du réseau est un autre aspect essentiel pour garantir la précision du réseau. Plus les points sont éloignés, plus les mesures angulaires sont précises, il faut donc éviter de placer des stations trop rapprochées. Plus il y a d'intervisées entre les branches du réseau, plus le réseau sera contraint, on évitera les grands cheminements isolés.

Pour être géoréférencé, le réseau nécessite au minimum un point connu en 3D et une orientation, pour laquelle on fait le choix de fixer un deuxième point au moins en 2D. Plus le nombre de points connus est grand, plus le réseau est contraint et bien orienté, à condition que les points fixés dans le référentiel soient déterminés avec une précision cohérente avec les travaux effectués. Pour optimiser la contrainte appliquée sur les mesures topographiques, on choisira les points de manière homogène dans le réseau. L'exactitude du réseau est assurée par l'exactitude des coordonnées des points levés au GNSS. Les points doivent donc être choisis afin de limiter la présence de masques (arbres, bâtiments) pour s'affranchir au maximum des effets du multitrajet. Le réseau est situé en milieu urbain. Il faut ainsi prévoir les potentielles difficultés liées aux stationnements gênants, aux travaux, et autres activités diverses (marchés, événements, ...) afin de rendre le réseau le plus pérenne possible. La conception du réseau se déroule en février-mars mais il faut tenir compte de la présence de feuilles dans les arbres au mois de mai.

I.1.2 Elaboration du fichier KMZ

Une fois l'ensemble des critères de conception connu, la deuxième phase consiste à créer un fichier KMZ sur le logiciel Google Earth Pro afin de constituer une base de travail. Il s'agit de placer un minimum de points sur la superficie de la zone, dont la position et la répartition respectent l'ensemble de critères énoncés précédemment. La zone d'étude est caractérisée par le relief et les rues étroites de la cité moyenâgeuse. Ainsi, il semble incontournable de placer des points à l'extérieur de la vieille ville afin de faciliter la mise en place de cheminements à longs côtés, limitant le nombre de stations. De cette façon se dessinent deux branches externes au Nord-Ouest et au Sud-Est du relief. Ensuite, l'intérêt est de densifier le réseau à l'intérieur des rues sinueuses. La branche principale est constituée de La Grande Rue prolongée jusqu'à la cathédrale, d'où part toute une série de branches secondaires reliées aux branches externes.

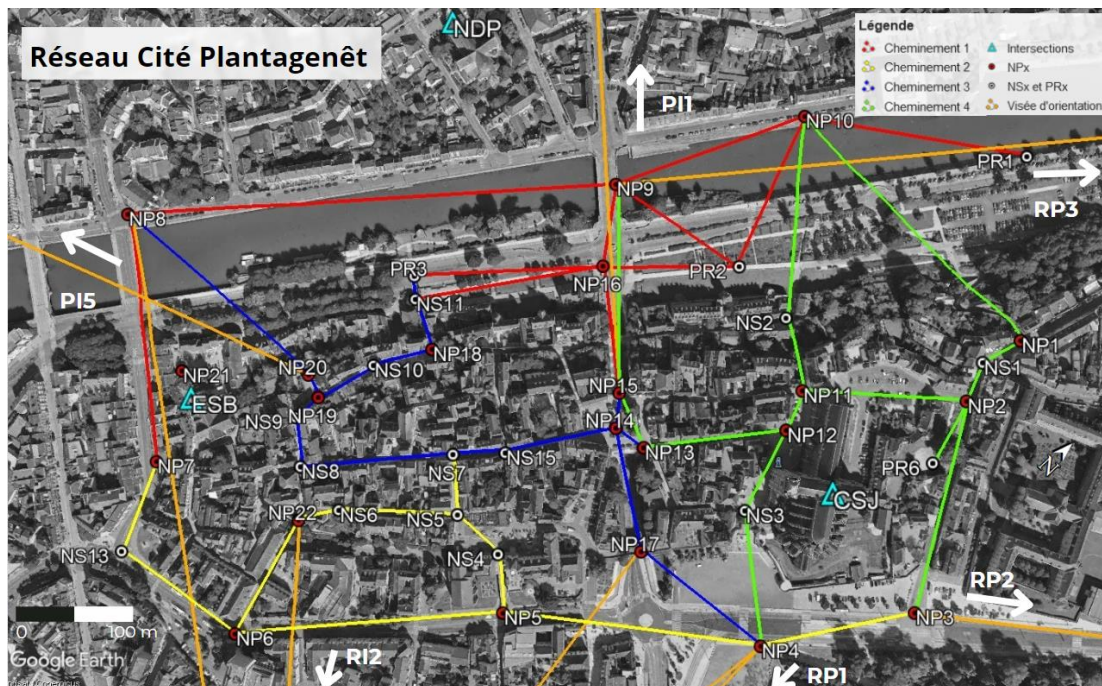


Figure 1 : Fichier KMZ du réseau géodésique, sans les visées d'intersection pour plus de clarté

Cette géométrie maximise le nombre de branches secondaires en minimisant le nombre de points. Trois secteurs semblent un peu plus fragiles en raison de la faible longueur des côtés : le square Jacques Dubois (NP13-NP14-NP15), la place Saint-Vincent (NP1-NS1-NP2) et la rue du Petit Saint-Pierre (NS8-NS9-NP19-NS10). Le réseau doit être subdivisé en sous-réseaux (aussi appelés cheminements dans ce travail par simplification), et chaque sous-réseau doit pouvoir être mesuré en deux demi-journées. Se forment alors quatre sous-réseaux, chacun représenté par une couleur sur la Figure 1. En vue d'améliorer la qualité de l'orientation du réseau, on cherche des points les plus éloignés possible des points de

canevas. Depuis l'esplanade du bicentenaire (NP20), on est capable de viser le quartier des Ardriers situé à 2 km. Depuis le square Jacques Dubois (NP15), on est en mesure de viser le quartier Chasse Royale situé à 1 km. À moindre distance (>300 m), on place 3 autres références afin de couvrir toutes les directions, bien que la direction Sud-Est soit assez obstruée. Ces 5 références seront levées au GNSS. On prévoit aussi d'effectuer des visées d'intersection sur le sommet des édifices religieux (église Saint-Benoît -ESB-, église Notre-Dame-du-Pré -NDP- et la cathédrale Saint-Julien -CSJ-) et sur l'antenne d'un bâtiment du quartier des comtes du Maine (RI2). Enfin, dans le but de densifier les espaces propices aux travaux de modélisation, on prévoit la présence de quelques points rayonnés, c'est-à-dire non stationnés. En somme, cela constitue un réseau géodésique de 51 points, dont 35 stationnés, de différentes natures :

- P_Ix : les Points Intermédiaires entre le réseau et les stations du RGP ;
- NP_x : les Nœuds Primaires, stations possédant plus de deux visées ;
- NS_x : les Nœuds Secondaires, stations réalisant seulement deux visées ;
- PR_x : les Points Rayonnés, seulement visés d'une ou plusieurs stations ;
- RP_x : les Références visées à l'aide d'un Prisme ;
- Autres points intersectés (ESB, CSJ, NDP, RI2).

I.1.3 Préanalyse du réseau

La préanalyse est une étape indispensable lors de la conception d'un réseau géodésique. Il s'agit d'évaluer la qualité de la géométrie du réseau construit et d'estimer la précision que l'on pourra obtenir sur les coordonnées des points en fonction de la précision des observations. En considérant des précisions a priori basées sur les travaux pratiques des années précédentes (14 à 50 dmgon sur les mesures angulaires et $\pm 2 \text{ mm} \pm 2 \text{ ppm}$ sur les mesures de distance), détaillées en annexe 1, on obtient les résultats présentés dans le Tableau 1. On différencie les points selon leur nature car les précisions de centrage et de mesure sont différentes. On s'attend donc à des précisions sur les coordonnées différentes :

Nature des points		NP _x	NS _x	PR _x	Intersection
Intervalle de confiance 1D - U	Moyenne (cm)	0,6	0,7	1,0	1,4
	Ecart type (cm)	0,2	0,1	0,3	0,3
Demi-grand axe de l'ellipse de confiance 2D - E,N	Moyenne (cm)	0,8	0,9	1,7	4,8
	Ecart type (cm)	0,8	0,8	2,8	3,1

Tableau 1 : Régions de confiance à 95% calculées durant la préanalyse du réseau

On porte l'analyse sur l'intervalle de confiance pour la composante altimétrique et l'ellipse de confiance pour la composante planimétrique, avec un seuil de confiance de 95%. Les résultats sont regroupés en annexe 2. On constate que les régions de confiance des points rayonnés et des points intersectés sont plus dégradées que celles des points stationnés. La différence entre les nœuds primaires et secondaires n'est pas flagrante ; les moyennes respectives de l'intervalle de confiance sur la composante altimétrique et le demi-grand axe de l'ellipse de confiance 2D sur la composante planimétrique sont de 7 et 9 mm. La dispersion est tout de même de 8 mm pour l'ellipse ce qui s'explique par la moins bonne détermination des points périphériques (moins contraints). De plus, l'orientation des ellipses est assez variable mais une tendance semble se dessiner autour de 110° : c'est la direction perpendiculaire au réseau qui est moins contrainte par les observations. Le rapport du demi-petit axe et du demi-grand axe est en moyenne égal à 0.6, ce qui est acceptable (les ellipses ne sont pas trop allongées). On remarque quand même quelques ellipses pour lesquelles le rapport est inférieur à 0.5 correspondant aux points de l'antenne NP21-NS12 et aux points PR1, NDP et RI2 situés à l'extérieur de l'enveloppe dessinée par les nœuds du réseau, dont les visées proviennent nécessairement d'une même direction.

Ainsi, les résultats de la préanalyse valident la géométrie du réseau et les techniques employées avec une précision à 2σ (régions de confiance à 95%) inférieure à 2 cm en 3D (hors points rayonnés et intersectés). Les chiffres ne montrent pas de points faibles dans le réseau, même pas dans les secteurs supposés fragiles lors de sa conception. Pour compléter, on a étudié l'influence de différents facteurs sur la qualité du réseau : l'absence de centrage forcé (en modifiant les précisions de centrage), l'absence de branches secondaires (en ne conservant que quelques branches) ou encore la réduction du nombre de points connus (en ne conservant que deux points connus en 3D dans le réseau – NP17 et PI5).

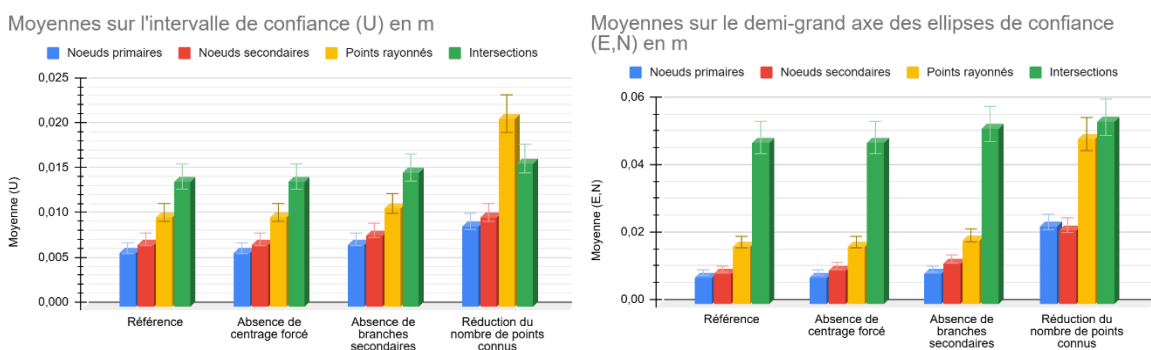


Figure 2 : Graphiques des résultats de la préanalyse des quatre réseaux testés

A travers la comparaison des régions de confiance issues des différents réseaux testés (en distinguant toujours les points selon leur nature), la Figure 2 démontre l'imprécision sur les points intersectés au regard des autres types de points. L'absence de centrage forcé ne semble pas impacter les régions de confiance. L'absence de certaines branches secondaires les dégrade de 1 à 2 mm en moyenne. C'est le nombre de points fixés en coordonnées dans le réseau qui influence grandement les résultats. En effet, en ne fixant que NP17 et PI5, on constate qu'en moyenne la valeur du demi-grand axe des ellipses a doublé. L'impact est compris entre 2-3 mm jusqu'à 2 cm sur la composante verticale selon le type de points. La multiplicité des points fixés et leur répartition spatiale est donc un facteur essentiel pour la qualité du réseau. Les deux autres facteurs ne doivent pas être négligés car ils apportent redondance et contrôle dans les observations.

I.1.4 Implantation des points

Une fois la configuration du réseau validée, on procède à l'implantation des points sur le terrain. Il ne s'agit pas seulement de planter les clous dans le sol car les points ont été repérés avec une précision métrique lors de la conception. Il est nécessaire d'affiner leur position et de s'assurer que l'ensemble des visées prévues puisse être effectué. Cette phase terrain, presque aussi longue que les observations, est déterminante pour le bon déroulement des mesures. Cela représente 6 demi-journées complètes. C'est à ce moment que doivent être pris en compte les facteurs extérieurs difficilement perceptibles lors de la conception comme les arbres, voitures et autres éléments structurels de la voirie. En plus de la matérialisation des points, c'est le moment de les décrire le plus précisément possible à travers des fiches signalétiques, dont un exemple est présenté en annexe 3. Ces fiches concentrent le matricule et la nature du point, le système de coordonnées, un plan de situation, une photographie ainsi que les coordonnées GPS (Global Positioning System) approchées du point (en WGS84). Elles doivent permettre de manière non ambiguë de retrouver les points.

La phase de conception du réseau a duré environ 3 semaines. Les observations sont divisées en deux temps : d'abord les observations GNSS pour géoréférencer une partie des points du réseau et puis les mesures topographiques pour propager le système de coordonnées à travers les rues de la cité Plantagenêt.

I.2 Acquisition des mesures

I.2.1 Observations GNSS

Les observations GNSS ayant vocation à être traitées à l'aide de deux méthodes différentes, le Multistations et le PPP, les stratégies et durées de mesure doivent être adaptées. Afin de comprendre le déroulement des observations, il est nécessaire de présenter rapidement ces deux méthodes.

I.2.1.1 Méthodes employées

I.2.1.1.1 Multistations

Le Multistations est une méthode de traitement GNSS souvent utilisée lors de campagnes de réalisation de réseaux géodésiques avec des points espacés de plusieurs dizaines voire centaines de kilomètres (Garthwaite et al., 2015 ; Yells-Chaouche et al., 2019). Il s'agit d'une technique de positionnement statique relatif qui nécessite un volume important de matériel et de main d'œuvre. Elle consiste à réaliser sur plusieurs jours un certain nombre de sessions de mesure. Chaque session est constituée de plusieurs points devant être mesurés simultanément pour le calcul des doubles différences et l'obtention de lignes de base. La robustesse de cette technique provient de la compensation du réseau, constitué de ces lignes de base, par la méthode des moindres carrés. Selon Legros et al. (2013), cette méthode « permet d'aller au bout de ce qu'il est possible d'obtenir par méthodes GNSS, tant en termes d'exactitude que de précision ». Elle est utilisée à des fins purement géodésiques (DRG - Direction de la Référence Géodésique du Québec, 1999 ; MRF - Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, 2012) ou pour le suivi de la déformation de la surface terrestre liée à des phénomènes naturels (Yells-Chaouche et al., 2019 ; Manevich et al., 2023) ou aux activités industrielles et minières (Garthwaite et al., 2015). Ces travaux-là s'exécutent sur plusieurs années voire dizaines d'années et les acteurs possèdent des moyens colossaux pour la réalisation géodésique.

I.2.1.1.2 Precise Point Positioning – PPP

Le PPP est une méthode de traitement GNSS pouvant s'avérer très utile dans un milieu ne disposant pas de station permanente proche (en mer, en avion, dans certains pays étrangers) ou simplement de point connu. On la retrouve dans des domaines variés allant de la météorologie, le suivi de déformation, etc (Tu et al., 2013). On parle de positionnement absolu car le calcul des coordonnées ne nécessite les observations de phase que d'un seul

récepteur. Ainsi, la méthode s'affranchit de l'installation d'une base, de sa stabilité et de son rattachement (Morel, 2024). En sortie du traitement, Elsheikh et al. (2023) précise que les coordonnées de la station sont directement dans le système international ITRF (International Terrestrial Reference Frame). En France ou dans un autre pays disposant d'un système légal, cette technique implique une conversion des coordonnées ITRF dans ce système. Enfin, le temps de convergence de la solution est le principal inconvénient de la méthode qui provient de la convergence même des ambiguïtés de phase requérant au moins une heure d'observation (Warnant, 2022). Une précision centimétrique sur la solution nécessite généralement plusieurs heures de mesure. De plus, la méthode nécessite des récepteurs bifréquences (An et al., 2020) pour l'élimination de l'erreur ionosphérique lors du traitement.

I.2.1.2 Organisation et campagne de mesures

L'ESGT dispose de 8 récepteurs Trimble pour des groupes de 7 à 8 binômes. En considérant que dans un cabinet de Géomètre Expert classique, il est rare de disposer de plus de 4 récepteurs GNSS, on opte pour des sessions de 4 récepteurs. Les observations devant occuper une demi-journée, on peut réaliser 2 sessions simultanément de 3 et 4 récepteurs dans le cas le plus défavorable (7 binômes), soit en moyenne 5,5 récepteurs par session en comptant les stations du RGP (MAN2 et ARNA) à proximité (voir annexe 5). Le temps d'observation minimal pour chaque session (assurant la résolution des ambiguïtés lors du calcul des doubles différences) est défini par Duquenne et al. (2009) et dépend de la longueur des lignes de base. Ici, elles n'excèdent pas 5 km, ce qui est très court, soit une durée d'observation d'au moins 15 min (10 min + 1 min/km + 1 min pour 100 m de dénivelée). Par expérience, en TP il est difficile de réaliser plus de 3 sessions de 15 minutes par équipe en une demi-journée ce qui porte le total à 6 sessions.

L'application d'un facteur de redondance défini par Duquenne et al. (2009) nous conduit à identifier 10 points dans le réseau. En plus des 5 références du réseau topographique (RP1, RP2, RP3, PI1 et PI5), on ajoute le point PI6 au Sud en direction d'ARNA pour homogénéiser la longueur des lignes de base (voir annexe 5). Enfin, en respectant au mieux un horizon dégagé à partir d'un angle d'élévation de 15° (DRG, 1999), on choisit 4 points de canevas : NP8, NP9, NP17 et NS13 (voir annexe 4). J'ai ensuite organisé le planning des sessions sur les 10 points, présenté graphiquement en annexe 5. L'objectif est de limiter le nombre de déplacements des équipes tout en assurant au moins deux occupations par point. Ainsi, au préalable des travaux pratiques, grâce à l'aide des autres stagiaires en TFE au laboratoire GeF, nous avons effectué les 6 sessions

d'observations GNSS. Les 4 premières sont des sessions de 20 minutes et les 2 dernières sont des sessions d'1 heure. Les observations des 2 dernières sessions pourront ainsi être utilisées pour l'application des deux méthodes, le Multistations et le PPP.

I.2.2 Observations topographiques

I.2.2.1 Stratégies employées

A la lecture de MRF (2012) et de Brabant (2003), nous décidons de réaliser des observations en centrage forcé en installant un système composé d'un trépied et d'une embase destiné à être conservé pour le plus de mesures possibles afin de limiter les imprécisions de calage et de centrage. La répétabilité du réseau serait de bien meilleure qualité si le centrage forcé était complètement respecté, en utilisant par exemple des poteaux en béton pouvant accueillir les appareils de mesure au fil des années, ce qui n'est pas envisageable dans notre contexte (site historique, rues étroites, ...). Sur les axes dégagés, on a la possibilité d'effectuer des visées de 200 à 600 m tandis que dans la cité, il est difficile d'excéder 100 m. Au préalable des mesures, les embases ont été calibrées afin d'affiner le réglage de la nivelle sphérique et du plomb optique. Nous exécuterons des tours d'horizon d'une seule paire de séquence mais en effectuant un double pointé sur chaque observation soumis à une tolérance de 12 dmgon. Les visées angulaires sont effectuées par coïncidence garantissant une précision 4 fois supérieure qu'avec un pointé ordinaire (Brabant, 2003).

I.2.2.2 Campagne de mesures

Au préalable des travaux pratiques, une première campagne de mesures a été effectuée sur une semaine à l'aide de 2 à 3 opérateurs par jour. Nous avons utilisé la station totale Leica TS06+ avec des prismes GPR1 comme les étudiants lors des TP. Cette campagne a pour vocation de constituer la mesure de référence du réseau géodésique et a été réalisée au mois de mars 2024, une période propice pour 2 raisons : l'absence de feuilles dans les arbres (pouvant gêner les mesures) et de flamboiement en raison des fortes chaleurs. C'est aussi l'opportunité d'envisager la faisabilité des manipulations pour les étudiants. Ainsi, la totalité du réseau a été mesurée en 24h en respectant le volume de matériel pouvant être accordé à chaque équipe d'étudiants. Les valeurs finales des observations sont obtenues à la suite d'une opération appelée réduction. Cette étape consiste à moyenniser les doubles pointés, à ramener les observations horizontales sur la référence puis à éliminer les erreurs systématiques. Cette campagne fut également l'occasion de densifier le réseau autour de l'église Saint-Benoît, pour laquelle des travaux de modélisation 3D débutent en mai 2024.

II Calcul du réseau

Comme pour les observations, le traitement s'organise en deux étapes. D'abord, on détermine les coordonnées des points levés au GNSS, puis on les intègre dans un calcul de compensation incluant l'ensemble des mesures topographiques.

II.1 Traitements des observations GNSS

Duquenne et al. (2009) définit la mesure de phase comme le déphasage entre le signal reçu par un récepteur i d'un satellite j et la réplique du signal générée par le récepteur :

$$\Phi_i^j = f * (dt^j - dt_i) + \frac{f}{c} * \rho_i^j - N_i^j \quad (1)$$

L'élément ρ_i^j représente la distance géométrique entre le récepteur et le satellite. Le terme dt^j désigne le décalage de l'horloge du satellite j (calculé à partir des paramètres envoyés par le satellite) et dt_i le décalage d'horloge du récepteur i considéré comme inconnu. Seulement, ce déphasage, compris entre 0 et 1, ne représente qu'une portion du déphasage total, qui lui « tient compte d'un nombre entier inconnu de cycles que le récepteur ne peut mesurer » (Duquenne et al., 2009). Ce nombre est appelé ambiguïté entière, notée N_i^j , et n'est déterminé que lors des premières observations grâce au compteur de cycle dont dispose le récepteur. La mesure de phase peut aussi être exprimée en distance : $L_i^j = \lambda \Phi_i^j$. Ainsi, en tenant compte des différents postes d'erreur, on obtient l'équation suivante (Duquenne et al., 2009) :

$$L_i^j = c * (dt^j - dt_i) + \rho_i^j - \lambda N_i^j + \delta \rho_i^{j,iono} + \delta \rho_i^{j,tropo} + \delta \rho_i^{j,u} + \delta \rho_i^{j,a} + \delta \rho_i^{j,r} + \delta \rho_i^{j,orb} \quad (2)$$

Où $\delta \rho_i^{j,iono} + \delta \rho_i^{j,tropo} + \delta \rho_i^{j,u} + \delta \rho_i^{j,a} + \delta \rho_i^{j,r} + \delta \rho_i^{j,orb}$ sont respectivement les corrections liées à l'ionosphère, à la troposphère, aux trajets multiples, au décalage du centre de phase, à la relativité et aux orbites. Dans les traitements, les corrections sont soit calculées à partir de modèles, soit considérées comme inconnues, soit ignorées (comme les trajets multiples).

II.1.1 Traitement par la méthode PPP avec le logiciel GipsyX

GipsyX, anciennement Gipsy-OASIS, est un logiciel de recherche pour le traitement d'observations GNSS, SLR et DORIS développé par le laboratoire JPL de la NASA. Il s'agit d'un ensemble d'exécutables écrits en C++ et en Python3. La principale modification

apportée par GipsyX se concentre sur le paramétrage du traitement des observations GNSS. Dans l'ancienne version, ces paramètres étaient passés en option dans l'exécution du script principal de traitement, autrefois appelé *gd2p.pl*. Désormais, le traitement s'articule autour du script *gd2e.py* et du fichier "tree" de paramétrage dont le format est propre à GipsyX, bien que similaire au format YAML (Bertiger et al., 2020). Nous n'utiliserons le logiciel que pour du traitement PPP, il n'est pas conçu pour calculer des lignes de base. Nous travaillerons précisément avec la version 2.2 de GipsyX.

Les paramètres de calcul sont ordonnés à travers une arborescence, d'où le terme de "tree". Bertiger et al. (2020) définit le tree comme « une structure hiérarchique identifiée à l'aide d'indentation de type Python qui se compose de racines, de branches et de feuilles ». Les feuilles contiennent généralement les données spécifiques. Le fichier tree par défaut utilise des modèles généraux ne nécessitant pas l'apport de fichiers supplémentaires. Afin d'améliorer les résultats, on va chercher à affiner les paramètres.

II.1.1.1 Stratégies et paramétrages du traitement

Par défaut, le traitement PPP avec GipsyX est simplifié pour les utilisateurs :

```
gd2e.py -rxFile {my_rinex}
```

Il requiert simplement l'exécution du script principal *gd2e.py* avec un fichier RINEX (Receiver INdependent Exchange Format). Cependant, il ne permet pas de traiter plusieurs fichiers en même temps. Les paramètres sont spécifiés dans le tree par défaut. Le traitement utilise les produits GPS du JPL (orbites et horloges) échantillonnés à 300s. Les effets de premier ordre ionosphérique sont éliminés grâce aux observations bifréquences. Le délai troposphérique est modélisé à l'aide de la fonction de projection GMF (Global Mapping Function) et du modèle GPT2 (Global Pressure et Temperature) pour le ZHD (Zenith Hydrostatic Delay). Les phénomènes de marée terrestre et polaire sont pris en compte mais pas la surcharge océanique. La correction du décalage du centre de phase des antennes utilise le fichier ANTEX (ANTenna EXchange) *igs14_2247.atx*. Enfin, l'angle de coupure de réception des signaux est de 7° . On associera pour chaque traitement de ce travail un jeu de paramètres du type : (*Ionosphère, troposphère, produits GNSS, surcharge océanique, angle de coupure*). Par défaut, le traitement PPP avec GipsyX est associé au jeu de paramètres suivant : (*1^{er} ordre, GMF-GPT2, JPL, /, 7°*). Ces paramètres peuvent être modifiés au travers du fichier *ppp_0.tree* et en téléchargeant les fichiers associés aux modèles utilisés. Nous présentons dans la suite l'utilisation des modèles respectant la stratégie (*2nd Ordre, VMF1-*

VZHD, IGS, FES2004, 7°). Les stratégies employées feront l'objet d'une validation par la suite à l'aide d'un script que j'ai conçu durant ce travail, avant d'être utilisées pour le traitement des observations de la cité Plantagenêt.

II.1.1.1.1 Ionosphère

On peut décider d'affiner la correction du retard ionosphérique en tenant compte des effets de second ordre nécessitant l'apport d'un fichier IONEX (IONosphere EXchange) journalier diffusé quotidiennement sur le serveur html CDDIS (Crustal Dynamics Data Information System) servant de centre de données pour l'IGS. Mon script *get_ionex.py* permet le téléchargement du fichier IONEX par protocole HTTPS.

II.1.1.1.2 Troposphère

Selon Fund et al. (2010), la traversée de la troposphère « affecte radicalement les observations GPS » d'une erreur, appelée STD (Slant Total Delay), modélisée par le SHD (Slant Hydrostatic Delay), le SWD (Slant Wet Delay) et l'anisotropie horizontale de la troposphère (Fund et al., 2010). Afin de limiter le nombre d'inconnues, on introduit les fonctions de projections (mapping functions) mf_H et mf_W qui permettent de ne considérer que les délais au zénith (ZHD et ZWD) en les projetant selon l'élévation du satellite (el) :

$$STD(el) = ZHD \cdot mf_H(el) + ZWD \cdot mf_W(el) + (G_N \cdot \cos(Az) + G_E \cdot \sin(Az)) \cdot mf_G(el) \quad (3)$$

Les paramètres ZWD, G_N et G_E sont estimés lors du traitement PPP. Les ZHD et les différentes fonctions de projection doivent être connues a priori (Fund et al., 2010). J'ai fait le choix d'utiliser une autre fonction de projection que celle définie par défaut avec GipsyX, la grille VMF1 (Vienna Mapping Function 1) accompagnée de la modélisation VZHD (Vienna Zenith Hydrostatic Delay). Cette modélisation nécessite le téléchargement d'un ensemble de fichiers diffusés par tranches de 6h par l'Université de Vienne en Autriche. Mon script *get_vmf1.py* télécharge ces fichiers pour la ou les dates requises pour le traitement et les ordonne selon une arborescence imposée par GipsyX. Le *tree* précise le modèle utilisé et le répertoire contenant l'arborescence. Dans un second temps, on génère les valeurs a priori du ZHD pour les différentes stations à l'aide de la fonction de GipsyX *tropNominal.py* qui produit un fichier *tropIn.tdp*.

II.1.1.1.3 Produits GPS

L'utilisation des produits finaux de l'IGS (orbites, horloges) est rendue possible par la fonction *igs2GipsyX.py*. Le script télécharge les produits de l'IGS et les convertit dans le

format propre à GipsyX. Seulement, le nom des produits de l'IGS a changé au début de la semaine GPS n°2238 sur le serveur CDDIS. La fonction de GipsyX semble apte à n'utiliser que les produits ultérieurs au premier jour de cette semaine, soit le 27/11/2022. En parallèle, le JPL fournit aussi « deux ensembles de produits GPS caractérisés par des latences, des niveaux de précision et d'exactitude différents », soit rapides, diffusés quotidiennement, soit finaux, diffusés avec une latence de 14 jours (Bertiger et al., 2020).

II.1.1.1.4 Surcharge océanique

La surcharge océanique est modélisée par les coefficients d'un fichier au format BLQ, généré manuellement pour une station donnée grâce au service OTL (Ocean Tide Loading) proposé par l'Université de Chalmers en Suède. Le modèle FES2004 a été choisi. La prise en compte de l'effet de surcharge océanique est indispensable mais elle est aussi très limitative dans le contexte d'automatisation car la génération du modèle est manuelle.

II.1.1.2 Conception d'un script automatisé pour le calcul de séries temporelles

Mon application Python a pour objectif principal le traitement complet de séries temporelles sur les données du RGP avec la stratégie de traitement décrite précédemment. Cette application s'avère utile pour valider les stratégies de traitement avec GipsyX ainsi que pour l'utilisation future du logiciel par le GeF. Son usage doit être simplifié pour l'utilisateur, travaillant sur son poste de travail, tout en faisant intervenir GipsyX, stocké sur les serveurs de calculs du GeF. Cette configuration nécessite, dans un contexte d'automatisation, l'utilisation de la méthode « sshpass » pour les connexions aux serveurs et de la librairie Python « subprocess » pour l'exécution de scripts sur un serveur distant. L'application est constituée d'un ensemble de scripts dont les principaux sont *serie.py*, *Calcul_PPP_series.py* et *extract_summary_series.py*. On décide d'orienter le script vers le traitement de séries temporelles des stations du RGP uniquement. La liste de stations étant finie, on génère un fichier BLQ relatif à l'ensemble des stations de la métropole, *OTL_RGP_RGF93.BLQ*. L'utilisateur passe en paramètres les jours de début (*datei*) et de fin (*datef*) de la série et une liste de stations du RGP (*stns*) à travers le script *serie.py*, exécuté dans le terminal de sa machine locale :

```
python3 serie.py -stns {[stn1, stn2, ...]} -datei {yyyy-mm-dd} -datef {yyyy-mm-dd} -deltaj {int}
-enr {nom de l'étude} -hr {[int, int, int, ...]}
```

Trois autres paramètres optionnels peuvent être utilisés :

- *deltaj* représente le nombre de jours séparant deux dates pour lesquelles sera effectué un traitement PPP. Par défaut cet entier est fixé à 1.
- *enr* est utilisé pour stocker les résultats du traitement dans un répertoire. Par défaut, les résultats d'un traitement sont écrasés lors de l'exécution d'un second traitement pour ne pas surcharger le serveur.
- *hr* est utilisé pour traiter des fichiers heure par heure. Par défaut, le traitement est effectué sur des fichiers de 24h.

Le script *serie.py* est une passerelle entre l'utilisateur travaillant sur sa machine locale et le serveur de calcul où est installé GipsyX. Ce script déclenche l'exécution du script *Calcul_PPP_serie.py*, stocké sur le nœud, en lui transmettant les paramètres passés par l'utilisateur. Ce deuxième script est le script central de mon application. C'est depuis ce dernier que sont téléchargés les fichiers RINEX sur le serveur ftp du RGP par le biais d'une méthode « ncftp ». C'est aussi depuis ce script que sont déclenchés les scripts *get_vmfl.py* et *get_ionex.py* respectivement chargés du téléchargement des fichiers liés aux modèles troposphérique et ionosphérique. Vu les difficultés rencontrées avec le script *igs2GipsyX*, on décide d'utiliser les produits JPL. Le fichier *tree* est stocké sur le nœud. Ainsi, on dispose de toutes les informations nécessaires au traitement, le script *Calcul_PPP_series.py* fait alors appel au script principal de GipsyX :

```
gd2e.py -runType PPP -gdcov -rnxFile {my_rinex} -tdpInput {chemin_tdp} -treeS {chemin_tree}
```

Le paramètre *gdcov* implique la génération d'un fichier contenant les précisions et les corrélations sur les coordonnées calculées. Le paramètre *tdpInput* permet de spécifier le chemin du fichier contenant les valeurs a priori du ZHD. Enfin, le paramètre *treeS* indique le chemin du *tree* à utiliser, sinon il prend celui défini par défaut.

Par la suite, le script *extract_summary_series.py* extrait les coordonnées ITRF2014 calculées du fichier *Summary* et les convertit en RGF93 à l'aide du script *ITRF2014toRGF93.py* que j'ai codé à partir des informations fournies par Altamimi (2018) et l'IGN (2021). Les coordonnées théoriques des stations du RGP sont connues en RGF93, ce qui laisse la possibilité de calculer des écarts externes sur les coordonnées calculées. Les écarts géocentriques calculés sont convertis en NEU dans un repère local à l'aide des formules de conversion décrites par Morel (2023) et le MRF (2012) et concentrées dans le script *xyz2nev.py*. Ensuite, ces écarts sont affichés dans des fenêtres graphiques à l'aide de

la librairie « matplotlib ». L'annexe 6 présente de manière détaillée la structure complète du script de séries temporelles sous la forme d'un graphique.

II.1.1.3 Validation des résultats de GipsyX

II.1.1.3.1 Calcul de séries temporelles sur le RGP pour la qualification de la position estimée

Cette partie vise à valider les résultats de position issus du traitement PPP avec GipsyX. La référence utilisée sera le RGP dont le calcul des coordonnées présente les caractéristiques suivantes : (*1^{er} ordre, GMF/GPT2, IGS, FES2004, 7°*). Ainsi, on comparera différentes stratégies pouvant être utilisées avec GipsyX. On va réaliser un calcul journalier sur l'année 2023 pour trois stations du RGP présentant des profils différents : BRST pour la proximité de l'océan, MAN2 à l'intérieur des terres et DEQU situé dans les Alpes à plus de 1000 m d'altitude. Pour cela, on exploite le script de calcul de séries temporelles :

```
python3 serie.py -stns [brst,man2,dequ] -datei 2023-01-01 -datef 2023-12-31 -enr 1st_PPP
```

Trois stratégies sont employées dans cette analyse :

- Stratégie 1 - Paramètres du RGP : (*1^{er} ordre, GMF-GPT2, IGS, FES2004, 7°*)
- Stratégie 2 - Emploi des produits JPL : (*1^{er} ordre, GMF-GPT2, JPL, FES2004, 7°*)
- Stratégie 3 - Paramètres "améliorés" : (*2nd Ordre, VMF1-VZHD, JPL, FES2004, 7°*)

Écart en mm	BRST			MAN2			DEQU		
	ΔNE	ΔU	Δ3D	ΔNE	ΔU	Δ3D	ΔNE	ΔU	Δ3D
Strat. 1	3 ± 2	5 ± 6	6 ± 3	3 ± 2	6 ± 6	7 ± 4	5 ± 5	13 ± 11	15 ± 8
Strat. 2	3 ± 2	6 ± 5	7 ± 3	3 ± 2	7 ± 10	8 ± 7	2 ± 2	8 ± 5	8 ± 4
Strat. 3	2 ± 2	7 ± 5	8 ± 4	1 ± 1	10 ± 5	10 ± 5	3 ± 3	7 ± 10	9 ± 7

Tableau 2 : Écart moyen annuel de la position issue du PPP par rapport aux coordonnées du RGP

Le Tableau 2 présente les écarts moyens observés entre les coordonnées calculées et théoriques diffusées par le RGP pour les 3 stations choisies. Premièrement, la comparaison des produits de l'IGS et du JPL ne montre pas de variations significatives pour les stations BRST et MAN2. Cependant, pour la station DEQU, l'écart 3D moyen en utilisant l'IGS, qui est de 1.5 cm, est deux fois plus grand qu'en utilisant les produits du JPL. Cela confirme que le paramétrage du traitement par JPL semble plus adapté pour leurs produits. En réalisant des essais sur des observations d'une heure grâce au paramètre « hr » du script de série

temporelle, on a pu constater que l'utilisation des produits IGS est encore moins adaptée au paramétrage. En effet, on constate quelques écarts 3D supérieurs à 50 cm, contre maximum 10 cm avec les produits JPL. Deuxièmement, les résultats de la stratégie 2 sont légèrement plus proches du RGP que ceux de la stratégie "améliorée" n°3. L'utilisation des modèles impactent la solution qui s'éloigne de la référence. Cependant, ce biais ne représente qu'1 mm en 3D pour BRST et DEQU, et 2 mm pour MAN2. Ainsi, il conviendra d'utiliser l'une des deux dernières stratégies en fonction de l'objectif recherché.

II.1.1.3.2 Comparaison avec le logiciel GAMIT pour la qualification de l'estimation du délai troposphérique

Cette seconde analyse de qualité vise à exploiter l'estimation des paramètres liés au délai troposphérique issus du traitement PPP. Les résultats de GipsyX sont comparés à ceux du logiciel GAMIT diffusés par l'Observatoire Volcanologique du Piton de la Fournaise (OVPF) de la Réunion. L'analyse se concentre sur six stations permanentes disposées autour du volcan pour six dates. Les observations des stations permanentes sont libres d'accès sur le site internet de l'OVPF et les résultats issus du traitement GAMIT sont diffusés sur un serveur ftp accessible par lignes de commande. Le choix de la stratégie sur GipsyX dépend de celle employée sur le logiciel GAMIT considéré comme la référence pour l'étude : (1^{er} ordre, GMF-GPT2, IGS, FES2004, 10°). On remplacera juste les produits de l'IGS par ceux du JPL mieux adaptés à GipsyX selon les tests réalisés précédemment.

Écarts en mm	H (m)	09/04/2021	10/04/2021	19/11/2021	01/12/2021	02/02/2022	03/02/2022
BOMG	2550			2 ± 2	4 ± 3	3 ± 2	3 ± 2
CASG	160	40 ± 5	40 ± 7	4 ± 5	5 ± 4	2 ± 5	5 ± 4
FEUG	67	21 ± 7	19 ± 6	7 ± 5	4 ± 3		
GPNG	1414			3 ± 2	6 ± 2	5 ± 4	6 ± 4
PBRG	2432			5 ± 3	7 ± 3	6 ± 6	7 ± 4
TRCG	173	44 ± 6	44 ± 7	7 ± 5	6 ± 3	7 ± 6	10 ± 4
Moyenne		35 ± 6	34 ± 7	5 ± 4	5 ± 3	5 ± 5	6 ± 4

Tableau 3 : Écarts sur le délai zénithal humide (ZWD) entre GipsyX et Gamit. En rouge, les résultats issus de Gamit sont inexploitable (valeurs négatives). En gris, les observations de la station sont indisponibles.

Le Tableau 3 présente les écarts moyens entre les valeurs de ZWD issues de GipsyX et de GAMIT. On constate que les résultats de GAMIT sont incohérents (valeurs négatives) pour les stations situées à plus de 1400m d'altitude le 9 et 10 avril 2021. Ces jours-ci, les écarts entre les deux logiciels sont en moyenne de 35 mm pour les stations à basse altitude. On a découvert par la suite que ces écarts étaient dus à un problème dans les traitements

effectués par l’OVPF. Pour les 4 autres dates, l’écart moyen est de 5 mm avec peu de dispersion. On pourrait encore affiner le paramétrage de GipsyX en analysant par exemple la méthode de pondération des observations selon l’élévation ou la valeur de la marche aléatoire sur le paramètre pour contraindre sa variation. Cette analyse sera bénéfique pour la thèse d’Hugo GERVILLE sur la restitution du champ de vapeur d’eau 3D par tomographie GNSS où il est amené à exploiter les valeurs de ZWD des stations de l’OVPF.

II.1.1.4 Traitement du réseau de points de la cité Plantagenêt

Les dix points du réseau ont été mesurés durant 1h. Nous avons été confrontés à une série de difficultés face au formatage des fichiers RINEX en sortie des récepteurs Trimble (matricules trop longs, mauvais nom d’antenne, etc). L’ensemble des modifications nécessaires a été concentré dans le script *formatage_trimble.py*. Les résultats du traitement PPP sur les fichiers d’1h d’observation seront comparés à ceux issus du traitement par la méthode Multistations dont le rattachement repose sur deux stations du RGP. Ainsi, pour le traitement PPP, la stratégie n°2 est employée. Le Tableau 4 illustre les résultats d’un test mené, avec la stratégie 2, sur le traitement annuel (en 2023) des fichiers horaires (à raison de 3 par jour) des 3 mêmes stations. Ce test intervient avant le traitement des RINEX de la campagne de mesure afin de s’assurer que les stratégies utilisées fonctionnent avec une seule heure d’observations.

Écarts en <i>mm</i>	BRST			MAN2			DEQU		
	Δ NE	Δ U	Δ 3D	Δ NE	Δ U	Δ 3D	Δ NE	Δ U	Δ 3D
Strat. 2	34 \pm 41	42 \pm 60	61 \pm 54	28 \pm 30	41 \pm 54	55 \pm 39	48 \pm 49	78 \pm 109	100 \pm 80

Tableau 4 : Écarts moyens annuels de la position issue du PPP horaire par rapport au RGP

Les écarts 3D pour BRST et MAN2 sont encore similaires (50 à 60 mm) et sont un peu plus importants pour DEQU (100 mm). On peut faire l’hypothèse que la différence entre les résultats des 3 stations est corrélée avec leur situation géographique. Les caractéristiques de la station MAN2 sont très proches de celles des points de la cité Plantagenêt. Ainsi, on considère que le traitement PPP doit permettre de calculer des coordonnées avec une exactitude sur la position 3D de l’ordre de 6 à 10 cm. Afin de limiter les manipulations mais gagner en exactitude sur les coordonnées, on décide de retourner mesurer uniquement 2 points durant 6h. Nous avons choisi le point NP17 au centre du réseau pour la position et le point PI5 pour orienter au mieux le réseau. L’objectif est d’obtenir des coordonnées plus exactes sur les points GNSS qu’avec 1h d’observation bien que les précisions obtenues sur

l'ensemble du réseau seront plus dégradées qu'avec 10 points connus comme l'a montré la préanalyse (voir Figure 2). Les coordonnées seront comparées en partie II.1.3 avec ceux du Multistations.

II.1.2 Traitement par la méthode Multistations

Il s'agit d'une technique de positionnement relatif dans le sens où les observations de plusieurs récepteurs sont utilisées pour calculer des lignes de base. Warnant (2022) précise que le calcul des doubles différences sur de courtes lignes de base rend négligeables les erreurs corrélées spatialement et temporellement tels que les retards atmosphériques, les erreurs d'orbites et d'horloges, etc. De plus, l'erreur d'horloge du récepteur est supprimée par la double différence. La prise en compte de l'effet ionosphérique en positionnement relatif dépend de la longueur de la ligne de base. En dessous de 15 km, on considère « que les chemins parcourus par le signal du satellite aux deux récepteurs sont très proches et donc que l'effet est presque identique » (Duquenne et al., 2009). L'effet est éliminé par les doubles différences. Pour les distances supérieures à 15 km, on utilise des récepteurs bifréquences et on forme la combinaison « iono free ». Duquenne et al. (2009) ajoute pour la troposphère que « si les conditions météorologiques aux deux récepteurs sont voisines, si en particulier la dénivelée est faible, l'effet est quasiment annulé par les doubles différences ». Des modèles peuvent être utilisés pour considérer l'effet résiduel ou dans le cas de plus longues lignes de base. Le calcul des lignes de base via les doubles différences aboutit à un ensemble de vecteurs GNSS (dX, dY, dZ) indépendants de l'époque de mesure. L'ensemble des traitements sont réalisés avec Leica Infinity, logiciel dit « commercial », afin de permettre une juste comparaison avec les résultats des TP. Il est néanmoins possible de traiter les données avec un logiciel dit « de recherche » comme Yelles-Chaouche et al. (2019) qui réalisent le traitement du réseau REGAT (REseau Gps de l'ATlas) avec GAMIT-GLOBK ou Manevich et al. (2023) utilisant Bernese pour le suivi du massif de Nizhne-Kansky en Sibérie.

La compensation des données se décompose en quatre grandes phases : un calcul de lignes de base “en étoile”, un calcul de lignes de base par session, un ajustement libre et enfin un ajustement contraint. La première et la troisième étape doivent permettre d'éliminer le maximum de fautes et d'imprécisions de mesure (hauteur d'antenne, solutions flottantes, imprécisions de centrage, ...).

II.1.2.1 Calcul en étoile

Le calcul en étoile consiste à calculer les lignes de base liant chaque station du RGP à chaque point mesuré. Durant cette étape, on se contente de détecter de potentiels artefacts, mais on ne supprime aucune observation. On note d'abord les lignes de base dont la solution est flottante, wide-lane ou issue des observations de pseudo-distances. Ensuite, grâce aux réoccupations, on est en mesure de détecter la présence d'imprécisions ou de fautes (centrage, mesure de hauteur, etc). En considérant que la précision sur une ligne de base est de 1 à 2 centimètres, on note les points pour lesquels l'écart à la moyenne est supérieur à 2-3 centimètres. C'est le cas pour les points RP1 et RP3 de la deuxième session, peut-être en raison de la géométrie de la constellation de satellites ou la présence de multitrajets.

II.1.2.2 Calcul des sessions

Pour chaque session, on calcule les lignes de base une à une selon le schéma présenté en annexe 5. La stratégie de traitement utilisée avec Leica Infinity pour le calcul des doubles différences est la suivante : (*1^{er} ordre, VMF1-GPT2, broadcast, /, 10°*). Il s'agit d'un traitement GPS-GLONASS. Les paramètres de traitement n'auront pas de gros impacts sur les résultats vu la faible longueur des lignes de base. On enregistre uniquement celles dont la solution est fixée, ce qui en élimine deux liées aux points RP1 et RP3 de la deuxième session. Au total, 32 lignes de base et leur matrice de variance-covariance sont calculées.

II.1.2.3 Ajustement libre

L'ajustement libre du réseau consiste à réaliser une compensation, au sens des moindres carrés, des lignes de base sans pour autant fixer de point en coordonnées. Ainsi, les plus gros résidus indiquent la présence d'imprécisions ou de fautes dans les pseudo-observations que sont les lignes de base (dX, dY, dZ), qu'il faut corriger ou écarter. Le test statistique du chi-deux permet de valider la solution globale issue du traitement. Une fois les plus gros résidus éliminés (> 2 cm), on constate que le test du chi-deux n'est toujours pas validé. Cela signifie que les précisions a priori sur les pseudo-observations sont trop optimistes (quelques dixièmes de millimètres). En multipliant les précisions a priori par la racine carrée de l'estimateur du facteur unitaire de variance, le test du chi-deux est validé. La précision finale sur les pseudo-observations est de 8 mm en moyenne, soit une précision de 1,4 cm sur la ligne de base.

II.1.2.4 Ajustement contraint

Les étapes précédentes ont permis de construire les pseudo-observations, d'éliminer celles trop imprécises et de repondérer les autres. Désormais, il ne reste plus qu'à fixer des points en coordonnées afin de rattacher précisément les points du réseau à la référence légale. Pour cela, on dispose de deux stations du RGP : MAN2 et ARNA. En ne fixant que MAN2, on constate que l'écart externe sur les coordonnées d'ARNA est de 1,3 cm en planimétrie et de 5 mm en altimétrie. En fixant les deux stations, le traitement donne les coordonnées finales des points du réseau en RGF93 ainsi que les précisions à 2σ associées qui sont, en moyenne de 9 mm en planimétrie et de 15 mm en altimétrie, justifiant l'utilisation de cette méthode.

II.1.3 Comparaison des deux méthodes

Premièrement, on sait que la méthode PPP avec une seule heure d'observation est moins précise que la méthode Multistations. Ainsi, on considérera la dernière méthode comme la référence. Le Tableau 5 présente la comparaison des coordonnées.

Point	NP17	NP8	NP9	NS13	PI1	PI5	PI6	RP1	RP2	RP3
ΔN (mm)	31	3	0	78	6	1	8	51	0	-119
ΔE (mm)	5	-48	21	64	0	-8	0	-28	-2	537
ΔH (mm)	-52	44	-35	58	-85	-35	-6	-306	-132	932

Tableau 5 : Ecarts observés sur les coordonnées de 10 points issus des méthodes PPP (sur une seule heure d'observation) et Multistations

On constate que les points RP1, RP2 et RP3 présentent des écarts décimétriques, voire quasi métriques pour RP3 (0% d'ambiguïté fixée). La composante verticale est moins bien déterminée que celle horizontale. En écartant les points RP_x, on montre un écart de 5,3 cm en moyenne sur la composante verticale avec assez peu de dispersion (3,2 cm). Pour la composante horizontale, c'est l'inverse, la moyenne est relativement basse, respectivement de 2,3 et 2,5 cm pour le Nord et l'Est, mais avec une assez forte dispersion (2,7 et 2,4 cm). On peut même distinguer deux ensembles de points présentant des écarts planimétriques similaires. Les points NP17, NP8, NS13 et RP1 montrent des écarts de plusieurs centimètres et sont situés assez proches des bâtiments alors que les points NP9, PI1, PI5, PI6 et RP2 indiquent des écarts millimétriques et sont situés dans des environnements plus ouverts. On peut ainsi faire l'hypothèse que ces différences sont corrélées avec la présence de multitrajet ou la géométrie de la constellation de satellites.

Point	ΔN (mm)	ΔE (mm)	ΔH (mm)
NP17	-2	-1	-40
PI5	3	-3	-41

Tableau 6 : Ecart observé sur les coordonnées de deux points issus des méthodes PPP (sur 6 heures d'observation) et Multistations

Le Tableau 6 montre une nette amélioration des résultats en planimétrie pour le point NP17 avec 6h d'observation. Pour le point PI5, les écarts sont similaires avec ceux observés pour 1h de mesure. Pour 6h de mesure, on aurait pu s'attendre à de meilleurs résultats, notamment en altimétrie. On peut émettre l'hypothèse que le volume réel d'observations est de l'ordre de 3h. En effet, nous avons bien mesuré durant 6h complètes mais par moment, les récepteurs Trimble ne semblaient pas détecter assez de satellites pour enregistrer les observations (le temps d'observation affiché en fin de session était d'environ 3h). Évidemment, comme a pu le montrer le calcul de séries temporelles, plus la durée d'observation est importante, meilleurs sont les résultats. Dans le cadre de ce travail, l'objectif n'était pas de mesurer durant 24h chaque point mais d'estimer la précision qu'on aurait pu atteindre en effectuant cela.

La méthode PPP peut donc être utilisée pour la mise en place de réseau géodésique mais nécessite une durée d'observation conséquente. Réaliser du calcul multi-constellations pourrait améliorer les résultats grâce à l'augmentation du nombre de satellites (Alken et al., 2015) tout en accélérant la convergence des ambiguïtés (Tu et al., 2013 ; Pan et al., 2017). Cependant, au vu des difficultés relayées par les utilisateurs sur le forum de GipsyX pour le traitement multi-GNSS, on décide de n'utiliser que la constellation GPS pour laquelle le logiciel a été conçu. A l'inverse, la méthode Multistations est certainement plus robuste mais nécessite d'une part beaucoup de matériel et d'autre part des points connus permettant de se rattacher à la référence choisie. Ainsi, on conserve les résultats de la méthode Multistations jugés plus précis et exacts que ceux issus de la méthode PPP avec 1h ou 6h d'observation.

II.2 Ajustement des mesures topographiques

Les valeurs corrigées des observations sont déterminées après réduction des carnets de terrain puis saisies informatiquement afin de procéder à l'ajustement complet du réseau géodésique avec le logiciel CoMeT. Ce logiciel a été validé après comparaison avec d'autres logiciels d'ajustement comme LGC (Logiciel Général de Compensation) du CERN (European Organization for Nuclear Research) et Trinet+ du HEIG-VD (School of Management and Engineering Vaud) (Durand et al., 2020).

II.2.1 Ajustement et test du chi-deux

Seules trois observations de référence ont été supprimées : un angle horizontal sur le point CSJ ainsi que les angles zénithaux lors des visées lointaines sur les points PI1 et PI5. La première suppression correspond à une faute de retranscription, mais ce point conserve tout de même 5 visées. Les points PI1 et PI5 jouent surtout un rôle dans l'orientation du réseau, la présence des visées zénithales n'est pas cruciale. Une fois ces observations écartées du calcul, la valeur de l'estimateur du facteur unitaire de variance, qui est inférieure à 1, indique que les précisions a priori choisies pour les observations (annexe 1) sont trop pessimistes. Ainsi, le traitement permet d'apprécier à quelle précision les observations ont été effectuées. CoMeT donne la possibilité de définir des familles de précision. Chaque famille correspond à un ensemble d'observations présentant des caractéristiques similaires. La définition des familles de précision est décrite par le Tableau 7.

Angles Tour d'Horizon		Famille de précision	Écart type (dmgon)	Centrage point stationné (mm)	Centrage point visé (mm)
Grandes distances (> 800 m)		LT	10		1
Distances moyennes (200-800 m)	Visée sur prisme	HMT/ZMT	10		1
	Visée par intersection	HMI/ZMI	10	0	10
Distances courtes (<200 m)	Visée sur prisme	HCT/ZCT	20		1
	Visée par intersection	HCI/ZCI	20		10
Distances	Famille de précision	Écart type (mm)	Centrage point stationné (mm)	Centrage point visé (mm)	PPM
Visée sur prisme	DIT	1	0	1	1

Tableau 7 : Description des précisions a priori sur les observations, où H_{xx} et Z_{xx} représentent respectivement les familles de précision des angles horizontaux et verticaux

Les valeurs des précisions a priori sont affinées au cours du traitement par moindres carrés. Celles-ci correspondent à un intermédiaire entre les précisions constructeurs (pour la Leica TS06+ 2" en angulaire et $\pm 1.5 \text{ mm} \pm 2 \text{ ppm}$ pour les mesures de distance) et les précisions utilisées lors des TP des années précédentes (annexe 1). On considère une précision de centrage de 0 mm pour le point stationné (calé à l'aide de la nivelle électronique) mais de 1 mm pour le point visé (calé avec la nivelle sphérique de l'embase). Pour les points intersectés, on fixe une précision de centrage de 1 cm en raison des possibles mouvements des antennes en hauteur. Il est important de préciser qu'aucune observation n'a été repondérée individuellement après avoir fixé les valeurs synthétisées à travers le Tableau 7. Ainsi, le test du chi-deux est validé pour un total de 360 observations et 163 inconnues.

II.2.2 Analyse des résultats

En sortie du traitement, on obtient les coordonnées planes et altimétriques des 51 points du réseau. Nous ne pouvons pas analyser ces coordonnées, déterminées pour la première fois, mais les indices de qualité associés que sont les régions de confiance 1D et 2D à 95%. La Figure 3 présente graphiquement les ellipses de confiance des points. On voit que les points intersectés sont les plus imprécis (demi-grand axe de 1 à 3 cm). Certains secteurs (dans la cité Plantagenêt) sont plus imprécis que d'autres en raison des

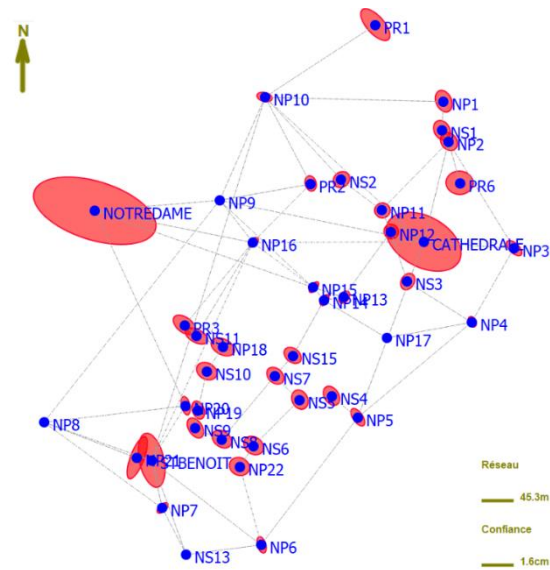


Figure 3 : Ellipses de confiance à 95%

plus petites visées effectuées dans les rues sinueuses. Cependant, ces différences ne sont que de 2-3 mm par rapport aux points de canevas situés à l'extérieur de la cité. L'ensemble des résultats est présenté en annexe 6. Les résultats décrits par le Tableau 8 montrent encore une fois une hiérarchie dans le réseau. Les nœuds primaires et secondaires possèdent des précisions à 2σ très similaires et sont regroupés pour former le type de points le plus précis du réseau avec 6 mm en planimétrie et 4 mm en altimétrie pour très peu de dispersion. Les points rayonnés sont un peu moins précis, ce qui est logique avec la géométrie des visées.

Enfin, les points intersectés composent le type le moins précis du réseau. Les points NDP et RI2 sont moins précis, notamment en planimétrie, que les deux autres points ce qui s'explique par leur position excentrée dans le réseau. On remarque que pour l'ensemble des types de points, les précisions à 2σ finales sont divisées par 1.5 par rapport à celles annoncées par la préanalyse du réseau. C'est évidemment grâce à la qualité des observations, bien plus précises que ce que j'avais pu imaginer en amont, entraînant la révision des précisions a priori d'un facteur similaire.

	Intervalle 1D H (mm)			Ellipse 2D N-E (mm)		
	Moy.	E. T.	Max.	Moy.	E. T.	Max.
Noeuds	4	1	9	6	2	11
Points rayonnés	7	2	7	11	6	10
Intersections	10	2	11	32	16	47

Tableau 8 : Régions de confiance à 95% calculées sur les coordonnées

L'orientation des ellipses montre une moins bonne détermination dans l'axe Nord-Ouest Sud-Est, soit la direction perpendiculaire aux branches principales des cheminements. Cependant, avec un rapport moyen de 0.7 pour les nœuds entre le demi-petit axe et le demi-grand axe, on se rapproche d'une forme quasi circulaire. Le calcul de référence du réseau sera par la suite comparé aux calculs réalisés par les différents groupes de TP. Cette comparaison devrait renforcer les constats effectués sur la référence tout en apportant un contrôle externe sur les résultats.

II.2.3 Intégration des coordonnées issues du traitement PPP à la place du Multistations pour un second calcul du réseau

Ce calcul s'inscrit dans la continuité de l'évaluation de l'utilisation du PPP en intégrant les coordonnées et les matrices de variance-covariance issues du traitement dans l'ajustement complet des mesures topographiques. En ne considérant que les coordonnées issues des observations d'1h, jugées trop imprécises, les résidus seraient reportés sur les observations et le test du chi-deux ne pourrait pas être validé. Ainsi, on propose d'intégrer à la place les coordonnées des deux points (NP17 et PI5) issues des observations de 6h, jugées plus précises. Le test du chi-deux est validé. Il convient de comparer les résultats au calcul de référence utilisant les coordonnées issues du Multistations.

	N (mm)			E (mm)			H (mm)		
	Moy.	E. T.	Max	Moy.	E. T.	Max	Moy.	E. T.	Max
Noeuds	2	2	6	1	1	3	38	3	45
Points rayonnés	2	1	3	1	1	2	37	3	40
Intersections	8	6	13	5	6	13	41	7	49

Tableau 9 : Comparaison du réseau incluant les coordonnées issues du traitement PPP avec la référence

Les résultats du Tableau 9 montrent qu'il y a très peu d'écarts en planimétrie mais un biais vertical de 40 mm. Ce biais correspond à celui de l'altitude des deux points fixés par PPP par rapport aux coordonnées issues du Multistations (voir Tableau 6). L'imprécision du PPP implique ainsi une translation verticale de l'ensemble du réseau de 4 cm.

Le calcul de référence complet du réseau est terminé, nous avons réussi à obtenir de très bons résultats avec cette géométrie. Le déroulement des premiers TP sur le réseau devrait permettre de valider son dimensionnement.

III Utilisation du réseau pour les travaux pratiques de deuxième année du cycle ingénieur de l'ESGT

La dernière phase de mon travail se concentre sur l'encadrement des travaux pratiques en deux temps : la préparation du contenu des TP et les manipulations sur le terrain et sur les logiciels. L'objectif est de guider les équipes vers les meilleurs résultats possibles avant de les comparer avec le calcul de référence.

III.1 Préparation des travaux pratiques

III.1.1 Besoins en matériel

Pour le GNSS, le nombre de points a été déterminé en fonction de l'effectif des 4 groupes de TP et des 8 récepteurs Trimble mis à disposition. Pour les mesures topographiques, la mise en place de tours d'horizon et de centrage forcé implique un gros volume de matériel. En effet, il faut autant de prismes que de points mesurés pour la station la plus importante. On notera TEPP le système composé d'un trépied, d'une embase et d'un porte prisme, et TC le système formé par un tripode et d'une canne. Dans l'idéal il faudrait autant de TEPP que de points dans le tour d'horizon pour respecter le centrage forcé, même pour les branches secondaires. En réalité, certains TEPP sont remplacés par des TC, faute de matériel. Le centrage forcé n'est donc que respecté que le long des branches principales

III.1.2 Organisation

Les groupes sont divisés en binômes pour les observations GNSS. Pour la topographie, le volume de matériel disponible est logiquement le premier aspect à prendre en compte pour l'organisation des journées de terrain. Seuls 3 cheminements peuvent être effectués simultanément. Autrement dit, chaque groupe est divisé en trois équipes de 4-5 étudiants qui ne mesureront que 3 des 4 cheminements que comporte le réseau. Une rotation est prévue pour que chaque groupe mesure une combinaison de 3 cheminements différente. Les cheminements possèdent un sens, afin d'éviter que deux équipes se retrouvent sur les mêmes points en même temps. Chaque cheminement est mesurable en 6h dans des conditions favorables. C'est pourquoi certaines stations en fin de journée sont rendues optionnelles afin de couvrir d'éventuelles difficultés. Ces stations ne sont pas essentielles pour la compensation même si leur présence assure plus de redondance.

III.1.3 Supports

La dernière étape de la préparation des TP consiste à décrire entièrement le réseau et l'organisation prévue à travers divers documents que j'ai réalisés, d'une part pour les étudiants et d'autre part pour les professeurs qui réutiliseront le réseau pendant plusieurs années. D'abord, le réseau est décrit spatialement par le fichier KMZ, ainsi que par un jeu de fiches signalétiques. Le polycopié destiné aux étudiants comporte l'ensemble des consignes et des informations nécessaires au bon déroulé des journées de TP. Pour chaque équipe, sont précisés les sessions de points à observer par GNSS, le cheminement topographique attribué avec une liste de matériel, la liste des visées par station ainsi qu'un résumé des traitements. Un fichier IOB est fourni pour aider les équipes lors de la préparation de l'ajustement des mesures topographiques (définition du système de coordonnées, valeurs des écarts types, etc).

III.2 Encadrement des sessions de mesure et de traitement

Les TP s'étalent sur 3 semaines où vont s'enchaîner les 4 groupes de 15 étudiants. Mon rôle, avec celui des autres encadrants, est d'assurer la gestion du matériel et des équipes sur le terrain puis lors des traitements. En topographie, il s'agit d'expliquer aux équipes les spécificités des mesures liées aux tours d'horizon, au centrage forcé, aux mesures manuelles sur les supports de prismes ainsi qu'aux visées d'intersection. Dans l'ensemble, les mesures se sont bien déroulées. Seule une intervisée n'a pas pu être mesurée sur l'ensemble du réseau en raison de la végétation. Très peu de visées ont été gênées par des éléments urbains (voitures, travaux, etc.).

La compensation GNSS est réalisée sur le logiciel Leica Infinity. En fin de journée, le réseau de lignes de base est compensé et les coordonnées ajustées des points sont exportées. La compensation des mesures topographiques est réalisée à l'aide de CoMeT. Les étudiants sont d'abord chargés de la réduction des carnets de tours d'horizon avant la saisie informatique des observations. L'accompagnement des équipes est généralement nécessaire pour les aider à corriger les erreurs de formatage puis à détecter les imprécisions et fautes à travers les observations. L'objectif en fin de journée est de valider le test du chi-deux sur l'ensemble des observations du groupe.

III.3 Comparaison des résultats avec le calcul de référence

Le calcul de référence était considéré comme le plus précis avant le déroulement des TP. Avec les déterminations des 4 groupes de TP, on est en mesure de remettre en question ce statut. Il est évident de commencer par l'analyse des résultats de la compensation GNSS car ceux-ci ont un impact direct sur la compensation des mesures topographiques.

III.3.1 Compensation du réseau de lignes de base GNSS

La robustesse du réseau dépend de la redondance des observations, de leur précision et de la géométrie du réseau. La géométrie ne devrait pas intervenir dans la comparaison entre les groupes car on impose les lignes de base à calculer, mais peut-être lors de la comparaison avec le réseau de référence. En effet, les observations de référence ont été réalisées par 8 équipes, contre 7 pour les groupes de TP, induisant une différence dans le nombre de lignes de base mesurées (33 pour la référence contre 27 pour les groupes de TP). Ainsi, le Tableau 10 montre que les calculs des groupes de TP comportent en moyenne 6 lignes de base en moins et le point PI6 n'a pas été observé. La précision finale sur les lignes de base est similaire pour tous les groupes et varie entre 1.3 et 1.7 cm. Il faut savoir que les références RPx n'étaient pas destinées à être mesurées par GNSS lors de la conception du réseau. Elles ont donc été placées pour maximiser la longueur des visées de sorte à améliorer l'orientation du réseau, mais leur position n'est pas idéale vis-à-vis du multitrajet. Le point RP3 est situé sous un arbre, la durée d'observation est trop faible pour permettre la résolution des ambiguïtés.

	Référence	Groupe A	Groupe B	Groupe C	Groupe D
Nombre de lignes de base	30	23	25	24	23

Tableau 10 : Nombre de lignes de base conservées par chaque groupe pour l'ajustement

La comparaison des coordonnées, synthétisée dans le Tableau 11, montre d'abord la faible dispersion entre les coordonnées des groupes de TP (5 mm en moyenne sur les 3 composantes) qui s'explique par une même géométrie comme supposé précédemment.

	Ecart type moyen sur les coordonnées des groupes de TP (mm)	Ecart moyen entre la référence et la moyenne des groupes de TP (mm)
Nord	4	7
Est	4	2
Altitude	6	8

Tableau 11 : Comparaison des coordonnées GNSS issues des 5 déterminations

On constate que la composante Nord semble présenter un décalage moyen de 7 mm par rapport à la détermination moyenne des groupes de TP. Cependant, il est difficile de parler de biais au vu de la dispersion des coordonnées des groupes de TP. En altitude, il y a une imprécision générale assez importante des groupes de TP (6 mm) et de la référence (écart moyen de 8 mm aux moyennes des TP). En est, la référence est très proche des groupes de TP (2 mm en moyenne). Les différences observées en Altitude mais surtout en Nord peuvent s'expliquer par la différence de géométrie entre le réseau de la référence et celui utilisé en TP. En effet, le calcul de référence inclut en moyenne 6 lignes de base supplémentaires dans la compensation ce qui a pour conséquence de contraindre davantage le réseau. De plus, l'azimut moyen des lignes de base ajoutées est de 30° soit une contrainte dans la direction Nord-Sud. En enlevant ces lignes de base (constituant la référence 2), le Tableau 12 montre que les coordonnées calculées sont plus cohérentes avec celles obtenues en TP dans la direction Nord notamment (7 mm pour la référence contre 4 mm pour la référence 2) :

	Nord (mm)	Est (mm)	Altitude (mm)
Ecart moyen entre la référence 2 et la moyenne des groupes de TP	4	3	7

Tableau 12 : Analyse des écarts entre les coordonnées GNSS de "ref2" et les groupes de TP

III.3.2 Compensation du réseau géodésique complet

Afin d'établir une comparaison plus juste, il convient de traiter les résultats des étudiants issus du calcul comprenant les 4 cheminements, et non les 3 que chaque groupe a mesuré. Pour cela, chaque groupe a utilisé les observations d'un autre groupe pour constituer le cheminement manquant. De même, l'antenne NP21-NS12 n'a été mesurée que lors des travaux de référence (dans le but de densifier le réseau autour de l'église Saint-Benoît), on n'en tiendra pas compte dans la comparaison. On propose de continuer les analyses uniquement pour les points de canevas. Le groupe A possède les moins bons résultats avec des écarts de plus de 5 cm sur toutes les composantes sur le cheminement 3, on l'écarte aussi de l'analyse. Mis à part ce groupe, les autres sont plutôt cohérents entre eux avec une dispersion de 4-5 mm en moyenne sur chacune des 3 composantes des nœuds du réseau.

	Ecart type moyen sur les coordonnées des groupes de TP (mm)	Ecart moyen entre la référence et la moyenne des groupes de TP (mm)
Nord	6	11
Est	4	5
Altitude	5	8

Tableau 13 : Comparaison des coordonnées des points de canevas issues des 5 déterminations

Logiquement, on constate d’après le Tableau 13 que la référence possède un biais sur la composante Nord (11 mm), qui est un petit peu plus important que celui observé sur les coordonnées de GNSS. On retrouve aussi l’imprécision en altimétrie et les faibles écarts en Est. Ainsi, les écarts observés sur les coordonnées des points de canevas sont directement corrélés avec les écarts sur les points fixés dans le réseau grâce au GNSS. La compensation GNSS de la référence est donc mieux contrainte induisant des écarts sur les coordonnées par rapport aux déterminations des TP, ce qui permet d’affirmer que la référence possède une meilleure exactitude sur les coordonnées du réseau. Cependant, il faut aussi examiner la qualité et l’exhaustivité des résultats.

	Référence	Groupe A	Groupe B	Groupe C	Groupe D
Nombre d’observations	345	293	307	321	318

Tableau 14 : Nombre d’observations topographiques conservées par chaque groupe pour l’ajustement

D’abord, le calcul de référence et des groupes B et D ont obtenu les coordonnées de la totalité des points du réseau, ce qui n’est pas le cas des groupes A et C (suppression de portions imprécises du réseau ou mauvais point visé). De plus, d’après le Tableau 14 le calcul de référence possède au minimum 24 observations de plus que les autres déterminations ce qui n’est pas négligeable dans un traitement par moindres carrés. Cette différence s’explique en grande partie par la suppression d’observations jugées trop imprécises par les étudiants pour être repondérées. Pour les groupes de TP, les précisions 3D à 1σ sur les coordonnées ajustées sont en moyenne de 5 mm sur les nœuds du réseau. Pour les points rayonnés et les intersections, les précisions 3D moyennes sont respectivement de 10 et 20 mm. Les précisions a priori du calcul de référence ont été dégradées par chacun des groupes avec un facteur différent : 1.25 pour les groupes B et C, 1.5 pour le groupe A et 2 pour le groupe D. On trouve le même facteur sur les précisions sur les coordonnées permettant de considérer la référence comme la plus précise.

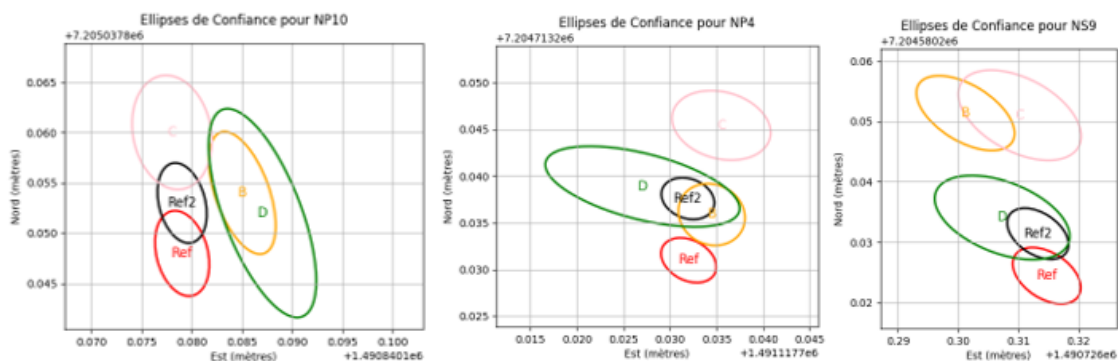


Figure 4 : Ellipses de confiance à 95% de trois points de canevas.

Les ellipses de confiance à 95% tracées en Figure 4 pour trois points de canevas (NP4, NP10, NS9) redémontrent encore une fois le biais sur la composante Nord. D'abord, les ellipses « Ref2 » correspondent aux résultats du calcul de référence calculés en incluant les coordonnées issues du traitement sans les lignes de base supplémentaires (voir section III.3.1). On voit que le biais en Nord est réduit d'1cm en moyenne entre « Ref » et « Ref2 », plaçant « Ref2 » proche de la moyenne des groupes de TP. Les ellipses s'intersectent plus ou moins bien principalement en raison de la dispersion des coordonnées fixées par GNSS. On peut tout de même noter que le point NS9, situé dans un secteur fragile à petit côté, présente des écarts de 2 à 3 cm entre les groupes. La forme et l'orientation des ellipses sont similaires pour toutes les déterminations, mais celles de la référence sont plus petites. C'est le même constat que pour les précisions. Ainsi, bien qu'il soit délicat de le démontrer avec les coordonnées obtenues, la référence semble être la détermination la plus qualitative en considérant les critères de redondance, d'exhaustivité et de précision. Les groupes de TP ont cependant obtenu des résultats très proches dans l'ensemble résultant d'une bonne implication.

III.4 Pistes d'amélioration envisageables du réseau

Il est intéressant de faire un retour d'expérience sur ce réseau après ces 5 déterminations. Comme expliqué précédemment, les références RP2 et RP3 ne sont pas bien adaptées à la mesure GNSS en raison des masques environnants. Il conviendra de les déplacer légèrement afin de ne pas trop réduire la longueur des visées. L'environnement urbain a peu gêné les observations, bien qu'il ne les ait pas facilités, montrant que les points sont suffisamment bien placés. Une intervisée a été gênée par la végétation mais elle n'est pas indispensable dans le réseau. Les points les plus imprécis du réseau sont les points intersectés, en raison de la nature des observations, bien que chacun peut être visé depuis au moins quatre positions. Il serait intéressant d'essayer d'améliorer encore la précision sur les observations angulaires en répétant un grand nombre de fois les mesures. Aussi, il serait intéressant d'ajouter quelques rayonnements sur les repères de nivellement ou des points appartenant au service de topographie de Le Mans Métropole afin de comparer les résultats à des références externes.

Conclusion

Rappelons que l'objectif principal de ce TFE est de réaliser un réseau géodésique dense et précis tant en planimétrie qu'en altimétrie dans la cité Plantagenêt au Mans. La préanalyse du réseau a validé la géométrie avec des précisions à 2σ inférieures à 2 cm sur les points de canevas, en prenant comme précisions a priori sur les observations celles des TP organisé sur l'ancien réseau aux Etangs Chauds. Nous avons ensuite procédé aux observations GNSS et aux mesures topographiques en respectant un ensemble de méthodes permettant de garantir une haute précision sur les observations.

Puis, nous avons procédé au traitement des observations en débutant par le GNSS. Après avoir pris en main le logiciel GipsyX et la structure informatique du GeF, j'ai mis en place une application utilisant le langage Python permettant d'automatiser les traitements PPP. J'ai aussi procédé à la qualification des résultats de position et de délai troposphérique qui montrent des écarts millimétriques dans l'ensemble par rapport aux références considérées. Bien que la méthode Multistations était sans aucun doute plus adaptée que la méthode PPP pour cette application, il était intéressant d'analyser les résultats que l'on pouvait obtenir avec du PPP en prenant le Multistations comme référence. En moyenne pour 1h d'observation, l'écart 3D sur les dix points est de 7 cm avec un écart type de 3 cm. En mesurant 6h deux points du réseau, on montre une amélioration des résultats. Il serait intéressant d'étudier d'autres pistes pour améliorer les résultats comme l'utilisation de plusieurs constellations de satellites ou de produits échantillonnés à 30 secondes. On a ainsi conservé les résultats issus de la méthode Multistations pour procéder à l'ajustement des mesures topographiques. Les résultats sont très satisfaisants, en moyenne l'intervalle et l'ellipse de confiance valent respectivement 4 et 6 mm avec une faible dispersion pour les points de canevas. Sans surprise, le test du chi-deux a permis d'améliorer les précisions a priori sur les observations justifiant les lourdes méthodes employées sur le terrain.

Le réseau a ainsi été utilisé pour les TP du mois de mai pour lesquels mon rôle a d'abord été d'élaborer l'organisation complète des journées. J'ai ensuite participé à l'encadrement des équipes sur le terrain comme lors les traitements. Il est difficile de montrer à travers les coordonnées que le calcul de référence du réseau est de meilleure qualité que ceux des groupes de TP. Cependant, ce calcul utilise des observations plus précises et plus redondantes, qui se traduisent par de meilleures précisions et ainsi très probablement par de meilleures coordonnées.

Liste des figures

Figure 1 : Fichier KMZ du réseau géodésique, sans les visées d'intersection pour plus de clarté ..	10
Figure 2 : Graphiques des résultats de la préanalyse des quatre réseaux testés	12
Figure 3 : Ellipses de confiance à 95%	30
Figure 4 : Ellipses de confiance à 95% de trois points de canevas.	36

Liste des tableaux

Tableau 1 : Régions de confiance à 95% calculées durant la préanalyse du réseau.....	11
Tableau 2 : Ecart moyen annuel de la position issue du PPP par rapport aux coordonnées du RGP	22
Tableau 3 : Ecart sur le délai zénithal humide (ZWD) entre GipsyX et Gamit. En rouge, les résultats issus de Gamit sont inexploitable (valeurs négatives). En gris, les observations de la station sont indisponibles.	23
Tableau 4 : Ecart moyen annuel de la position issue du PPP horaire par rapport au RGP.....	24
Tableau 5 : Ecart observé sur les coordonnées de 10 points issus des méthodes PPP (sur une seule heure d'observation) et Multistations	27
Tableau 6 : Ecart observé sur les coordonnées de deux points issus des méthodes PPP (sur 6 heures d'observation) et Multistations	28
Tableau 7 : Description des précisions a priori sur les observations, où Hxx et Zxx représentent respectivement les familles de précision des angles horizontaux et verticaux	29
Tableau 8 : Régions de confiance à 95% calculées sur les coordonnées	30
Tableau 9 : Comparaison du réseau incluant les coordonnées issues du traitement PPP avec la référence	31
Tableau 10 : Nombre de lignes de base conservées par chaque groupe pour l'ajustement	34
Tableau 11 : Comparaison des coordonnées GNSS issues des 5 déterminations	34
Tableau 12 : Analyse des écarts entre les coordonnées GNSS de "ref2" et les groupes de TP.....	35
Tableau 13 : Comparaison des coordonnées des points de canevas issues des 5 déterminations	35
Tableau 14 : Nombre d'observations topographiques conservées par chaque groupe pour l'ajustement.....	36

Bibliographie

Ouvrages imprimés

- Brabant M., 2003, *Maîtriser la topographie : Des observations au plan*. Eyrolles, 535 p.
- Duquenne F., Botton S., Peyret F., Bétaille D. & Willis P., 2009, *GPS : localisation et navigation par satellites* (2e édition revue et augmentée). Lavoisier, 284 p.

Ouvrages scientifiques

- Alkan R. M., Ilci V., Ozulu I. & M. Saka M. H., 2015, *A comparative study for accuracy assessment of PPP technique using GPS and GLONASS in urban areas*, Measurement, 69, 1-8 p.
- An, X., Meng, X. & Jiang, W., 2020, *Multi-constellation GNSS Precise Point Positioning with multi-frequency raw observations and dual-frequency observations of ionospheric-free linear combination*, Satell Navig, 1(7).
- Bertiger W., Bar-Sever Y., Dorsey A., Haines B., Harvey N., Hemberger D., Heflin M., Lu W., Miller M., Moire A. W., Murphy D., Ries P., Romans L., Sibois A., Sibthorpe A., Szilagyi B., Vallisneri M. & Willis P., 2020, *GipsyX/RTGx, a new tool set for space geodetic operations and research*, Advances in Space Research, 66, 469-489 p.
- Durand S., Touzé T., Jones M., Guillaume S., Cattin P-H. & Morel L., 2020, *Evaluation of Compatibility among Network Adjustment Software : CoMeT, LGC, and Trinet+*, Journal of Surveying Engineering, 146 (2).
- Elsheikh M., Iqbal U., Noureldin A. & Korenberg M., 2023, *The Implementation of Precise Point Positioning (PPP): A Comprehensive Review*, Sensors, 23(21).
- Fund F., Morel L. & Mocquet A., 2010, *Modélisations des retards troposphériques pour les observations GPS et impacts sur l'estimation de la hauteur ellipsoïdale*, revue XYZ, 123.
- Garthwaite M.C., Hazelwood M., Nancarrow S., Hislop A. & J. Dawson H., 2015, *A regional geodetic network to monitor ground surface response to resource extraction*

in the northern Surat Basin Queensland, Australian Journal of Earth Sciences, 62(4), 469-477 p.

- Legros R., Morel L., Viguier F. & Birot F., 2013, *Méthodes de travail dans les réseaux GNSS 3e partie : Méthodes du "statique multi-stations"*, Revue XYZ, 134.
- Manevich A., Shevchuk R., Kaftan V., Tatarinov V. & Zabrodin S., 2023, *Improvement of the GNSS Monitoring Network of the Nizhne-Kansky Massif Using a Bedrock Pin Geodetic Center*, Seismic Instruments, 58(4), 111-129 p.
- Morel L., Pottiaux E., Durand F., Fund F., Boniface K., Sergio de Oliveira Junior P. & Van Baelen J., 2014, *Validity and behaviour of tropospheric gradients estimated by GPS in Corsica*, Advances in Space Research.
- Ogutcu S., 2020, *Assessing the contribution of Galileo to GPS+GLONASS PPP: Towards full operational capability*, Measurement, 151.
- Pan Z., Chai H. & Kong Y., 2017, *Integrating multi-GNSS to improve the performance of precise point positioning*, Measurement, 60(12), 2596-2606 p.
- Tu R., Ge M., Zhang H. & Huang G., 2013, *The realization and convergence analysis of combined PPP based on raw observation*, Advances in Space Research, 52(1), 211-221 p.
- Xia F., Ye S., Xia P., Zhao L., Jiang N., Chen D. & Hu G., 2019, *Assessing the latest performance of Galileo-only PPP and the contribution of Galileo to Multi-GNSS PPP*, Advances in Space Research, 63(9), 2784-2795 p.
- Yelles-Chaouche A.K., Lammali K., Bellik A., Bougrine A., Mahsas A.H., Bacha W., Terki T., Meliani O., Ouzzani F., Lakehal Y., Air Amir A., Khellaf K., Khentar S.A., Chouiref A., Bendekan A. & Calais E., 2019, *REGAT: A permanent GPS network in Algeria, configuration and first results*, Heliyon, 5(4).

Supports de cours

- Morel L., 2023, *Techniques terrestres de la géodésie* (cours dispensé à l'ESGT).
- Morel L., 2024, *GNSS et géoréférencement* (cours dispensé à l'ESGT).
- Warnant R., 2022, *Global Navigation Satellite System* (cours dispensé à l'université de Liège).

Autres publications

- Altamimi Z. (IGN), 2018, *EUREF Technical Note 1: Relationship and Transformation between the International and the European Terrestrial Reference Systems*, disponible sur <http://etrs89.ensg.ign.fr/pub/EUREF-TN-1.pdf>, consulté le 3 mai 2024.
- IGN (Service de Géodésie et Métrologie), 2021, *Paramètres de transformation ITRF2014 vers les références nationales*, disponible sur https://geodesie.ign.fr/contenu/fichiers/documentation/rgf93/ITRF2014_vers_refere_nces_nationales.pdf, consulté le 3 mai 2024.
- DRG - Québec (Direction de la Référence Géodésique), 1999, *Instructions relatives à l'établissement de réseaux géodésiques par la méthode GPS*, disponible sur <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/bs44576>, consulté le 15 mai 2024.
- MRF - Québec (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune), 2012, *Instructions relatives à l'établissement de réseaux géodésiques*, disponible sur https://mrnf.gouv.qc.ca/documents/territoire/instructions_etablissement_reseaux_geod.pdf, consulté le 15 mai 2024.

Table des annexes

Annexe 1 Précisions a priori sur les observations topographiques utilisées pour les Travaux Pratiques des années précédentes	44
Annexe 2 Résultats de la préanalyse du réseau.....	45
Annexe 3 Exemple d'une fiche signalétique.....	47
Annexe 4 Plan des points levés au GNSS	48
Annexe 5 Schéma des sessions GNSS pour le calcul en réseau.....	49
Annexe 6 Structure du script de calcul de séries temporelles avec GipsyX	51
Annexe 7 Coordonnées et régions de confiance à 95% issues de l'ajustement complet du réseau .	53

Annexe 1

Précisions a priori sur les observations topographiques utilisées pour les Travaux Pratiques des années précédentes

Angles Tour d'Horizon		Famille de précision	Écart type (dmgon)	Centrage point stationné (mm)	Centrage point visé (mm)
Grandes distances (> 800 m)		LT	14		1
Distances moyennes (200-800 m)	Visée sur prisme	HMT/ZMT	20		1
	Visée par intersection	HMI/ZMI	30	0	10
Distances courtes (<200 m)	Visée sur prisme	HCT/ZCT	35		1
	Visée par intersection	HCI/ZCI	50		10
Distances	Famille de précision	Écart type (mm)	Centrage point stationné (mm)	Centrage point visé (mm)	PPM
Visée sur prisme	DIT	2	0	1	2

Ce tableau décrit les précisions a priori utilisées pour la préanalyse du réseau de la cité Plantagenêt. Ces valeurs sont tirées des TP réalisés par les étudiants des années passées. Ainsi, les précisions finales sur les coordonnées sont cohérentes avec celles que devraient trouver les étudiants, il ne devrait pas y avoir de gros écarts.

Les familles de précision Hxx et Zxx représentent respectivement les angles horizontaux et les angles verticaux. On considère une précision de centrage de 10 mm pour les points intersectés car il s'agit d'antenne pouvant bouger avec les conditions météorologiques.

Annexe 2


Résultats de la préanalyse du réseau

Intervalle de confiance 1D - U (95%)											
NPX		NSX		PRX		Intersections					
NP1	0,008	NS1	0,007	PR1	0,014	STBENOIT	0,011				
NP2	0,007	NS2	0,006	PR2	0,008	CATHEdraLE	0,013				
NP3	0,007	NS3	0,007	PR3	0,006	NOTREDAME	0,017				
NP4	0,006	NS4	0,006	PR4	0,011	Moyenne	0,014				
NP5	0,006	NS5	0,006	PR5	0,012	Ecart type	0,003				
NP6	0,006	NS6	0,007	PR6	0,009						
NP7	0,005	NS7	0,006	Moyenne	0,010						
NP10	0,005	NS8	0,006	Ecart type	0,003						
NP11	0,006	NS9	0,006								
NP12	0,006	NS10	0,006								
NP13	0,004	NS11	0,006								
NP14	0,004	NS12	0,011								
NP15	0,004	NS15	0,006								
NP16	0,004	Moyenne	0,007								
NP18	0,006	Ecart type	0,001								
NP19	0,006										
NP20	0,006										
NP21	0,010										
NP22	0,007										
Moyenne	0,006										
Ecart type	0,002										
Ellipse de confiance 2D - E,N (95%)											
NPX		NSX		PRX		Intersections					
NP1	0,010	156,819	NS1	0,009	154,619	PR1	0,020	138,987	STBENOIT	0,021	163,654
NP2	0,008	142,645	NS2	0,007	39,985	PR2	0,007	166,659	CATHEdraLE	0,026	119,270
NP3	0,008	134,073	NS3	0,007	32,672	PR3	0,010	126,908	NOTREDAME	0,049	103,503
NP4	0,005	154,088	NS4	0,009	146,302	PR4	0,025	23,919	RI2	0,095	157,276
NP5	0,009	144,887	NS5	0,009	149,810	PR5	0,028	11,147	Moyenne	0,048	135,926
NP6	0,008	159,585	NS6	0,009	131,871	PR6	0,010	124,246	Ecart type	0,034	29,174
NP7	0,006	49,149	NS7	0,008	135,718	Moyenne	0,017	98,644			
NP10	0,006	104,865	NS8	0,009	129,099	Ecart type	0,009	64,726			
NP11	0,006	89,675	NS9	0,009	151,628						
NP12	0,006	157,327	NS10	0,008	121,735						
NP13	0,006	37,156	NS11	0,010	116,221						
NP14	0,005	34,131	NS12	0,019	6,013						
NP15	0,005	38,167	NS15	0,008	130,834						
NP16	0,005	45,020	Moyenne	0,009	111,270						
NP18	0,010	116,923	Ecart type	0,003	50,345						
NP19	0,008	159,397									
NP20	0,008	167,460									
NP21	0,019	21,276									
NP22	0,009	126,466									
Moyenne	0,008	107,321									
Ecart type	0,003	52,747									

Ces tableaux présentent les résultats de la préanalyse du réseau géodésique. Ils sont divisés en deux parties : les intervalles et les ellipses de confiance. Au sein de chaque partie, on distingue les points selon leur nature. Pour les ellipses de confiance, on trouve deux valeurs en face de chaque point : la première est la valeur du demi-grand axe de l'ellipse et la deuxième représente son orientation en degré.

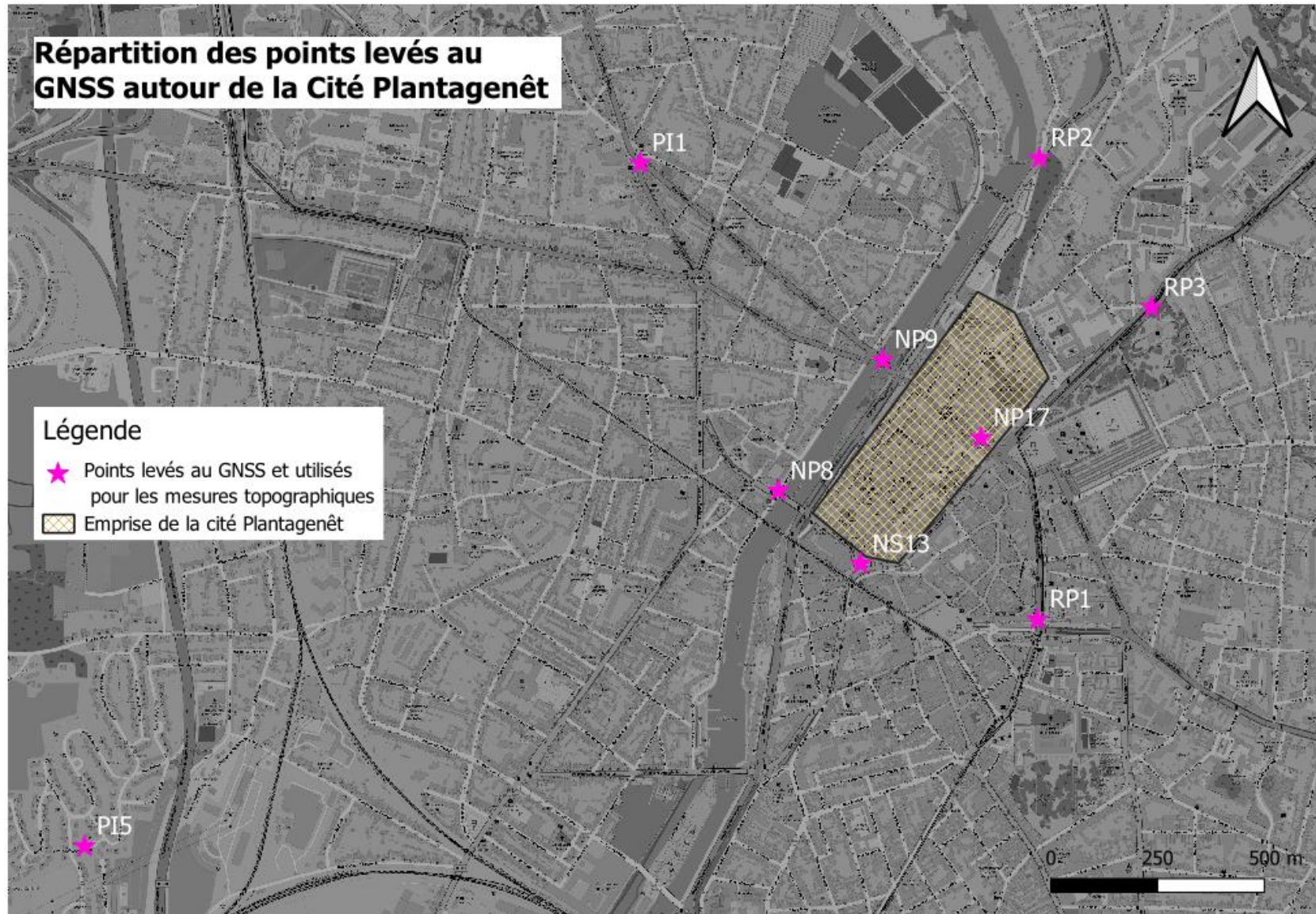
On remarque que les nœuds primaires et secondaires sont les plus précis du réseau car ils sont logiquement mieux contraints par les mesures. L'orientation des ellipses est assez variable mais une tendance se dessine autour de 110° : c'est la direction perpendiculaire aux cheminements à longs côtés.

Annexe 3 Exemple d'une fiche signalétique

FICHE SIGNALÉTIQUE	
NS11	
Région : Sarthe	Chantier : Cité Plantagenêt
Commune : Le Mans	
Date d'établissement de la fiche : 08/03/2024	
Nature du point : Clou d'arpentage	
Système planimétrique : RGF93 projection CC48 Système altimétrique : NGF-IGN69	
Coordonnées :	
Est : m Nord : m Altitude : m	
Précisions : 1 à 2 cm en planimétrie et en altimétrie	
Précision sur le lieu : En bas des escaliers de la Grande Poterne.	
Plan de situation	Illustration
	
Coordonnées géographiques WGS84 approximatives (48.008101, 0.194448)	

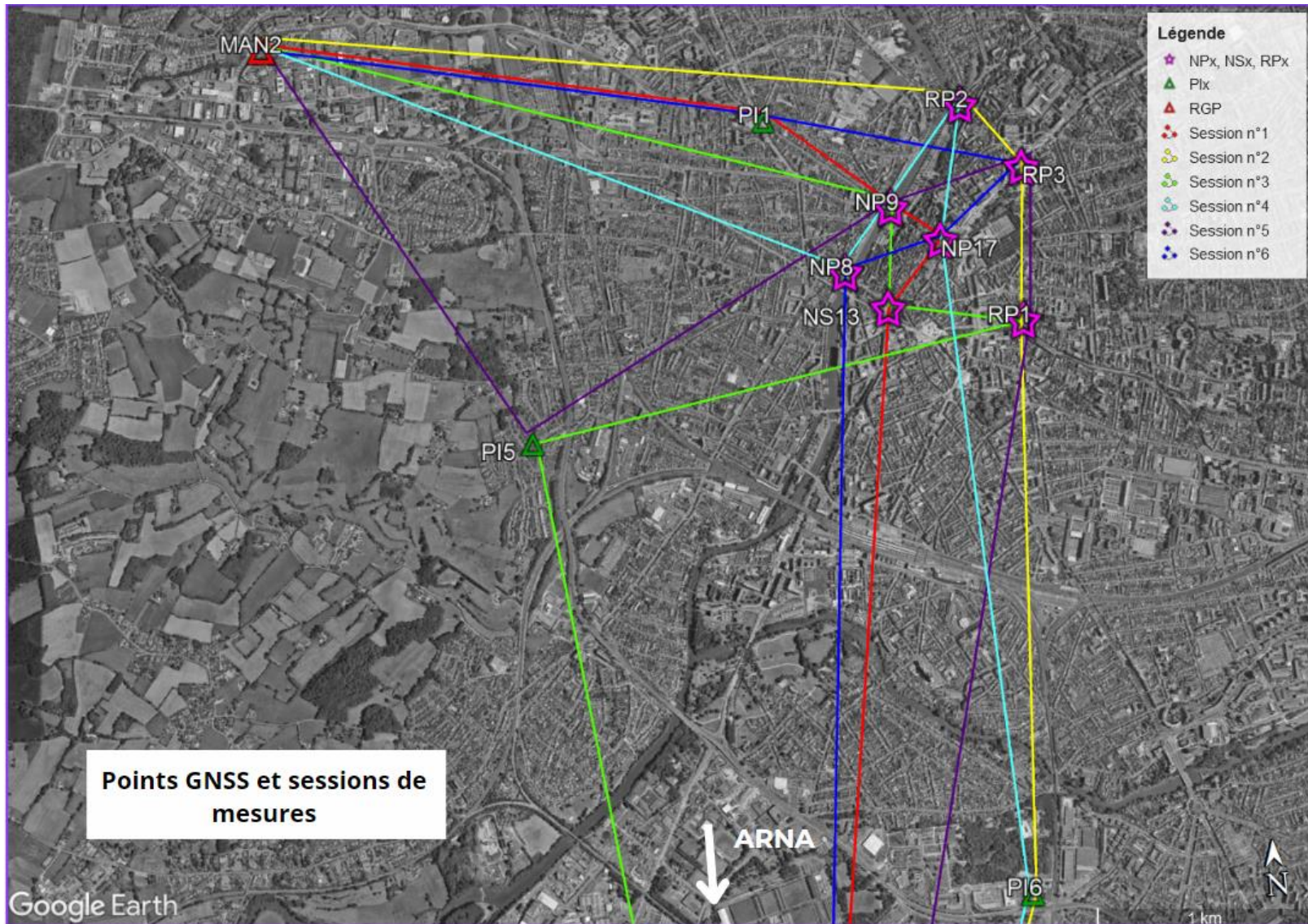
La conception d'un réseau de points matérialisés impose de constituer des fiches signalétiques permettant de les retrouver de manière non ambiguë sur le terrain (nature du point, plan de situation, photographie). On spécifie aussi généralement les coordonnées et le système auquel elles se rapportent, et les précisions sur celles-ci. Ici, les fiches ont vocation à être utilisées par les étudiants, on ne précise donc pas les coordonnées.

Annexe 4 Plan des points levés au GNSS



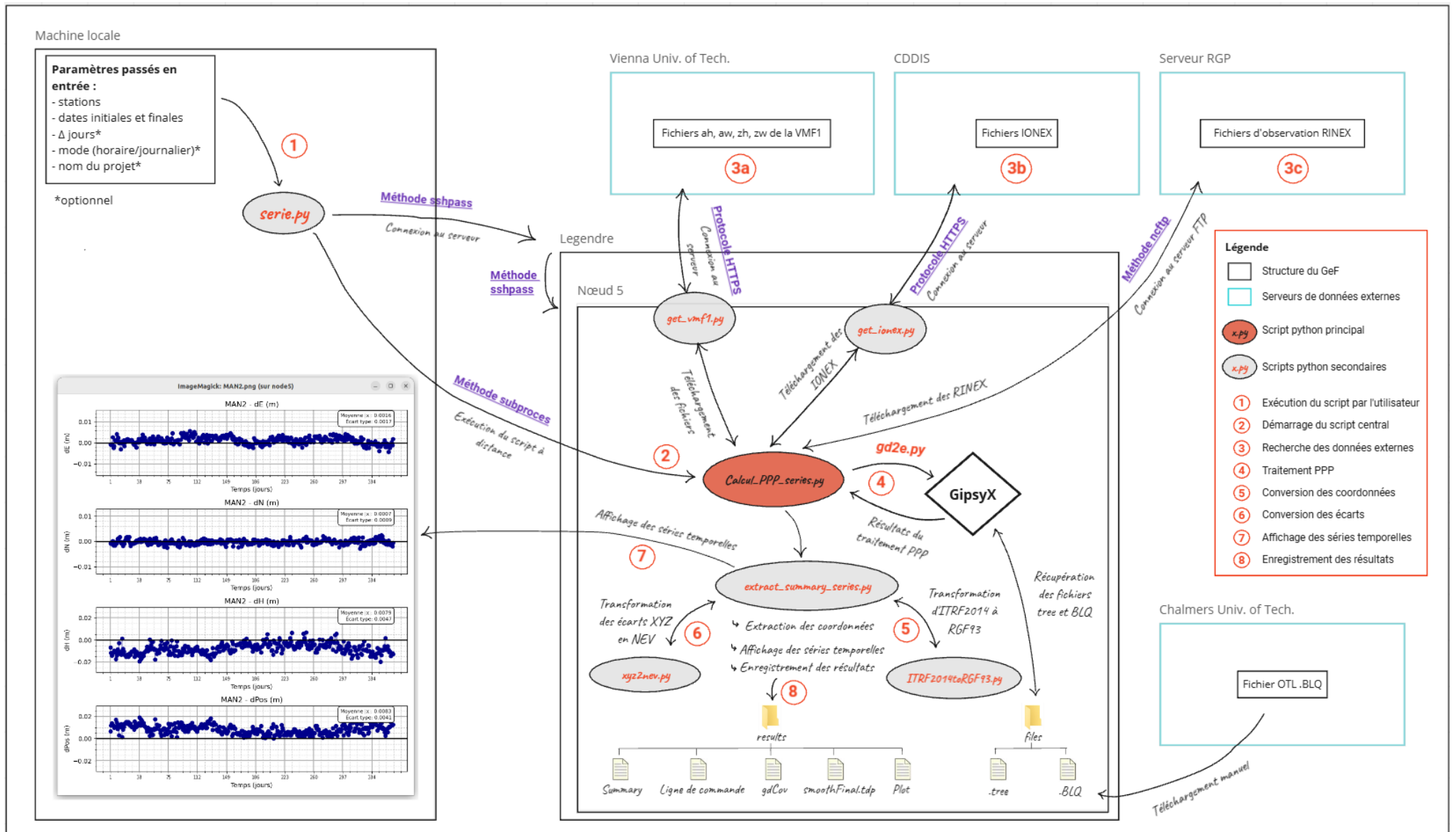
Cette figure présente la répartition spatiale des points fixés en coordonnées dans le réseau. On remarque que les points sont plutôt situés autour de la cité Plantagenêt, matérialisée par un quadrillage jaune. En effet, les rues de la cité moyenâgeuse ne sont pas adaptées aux observations GNSS. Les références sont assez bien réparties autour du réseau. On ne voit pas le point PI6, plus au sud, non utilisé pour la topographie mais plutôt lors du traitement GNSS pour diminuer la longueur des lignes de base vers ARNA.

Annexe 5 Schéma des sessions GNSS pour le calcul en réseau



Cette figure illustre les sessions utilisées pour le calcul des doubles différences lors de l'exécution de la méthode Multistations avec le logiciel Leica Infinity. Chaque couleur représente une session, soit un ensemble de côtés dont les sommets sont des points ayant fait l'objet de mesures GNSS simultanées. La deuxième station du RGP, ARNA, est située trop au sud pour figurer avec les autres points du réseau.

Annexe 6 Structure du script de calcul de séries temporelles avec GipsyX



Ce schéma simplifié décrit le fonctionnement de mon application python visant à calculer de manière automatique des séries temporelles sur le RGP avec le logiciel GipsyX. La structure est divisée en deux grandes parties : la machine locale et le serveur de calcul. L'intérêt de cette application est de ne faire interagir l'utilisateur qu'avec sa machine locale, en laissant le serveur s'occuper du téléchargement des modèles, de l'ensemble des traitements GNSS, de la conversion de coordonnées et de l'affichage des résultats.

Annexe 7
Coordonnées et régions de confiance à 95% issues de l'ajustement complet du réseau

	E (m)	N (m)	H (m)	Ellipse 95% - NE (m)	Intervalle 95% - H (m)
NP8	1490515,516	7204595,283	46,84	/	/
NP9	1490772,226	7204896,068	47,787	/	/
NP17	1490998,514	7204696,168	70,204	/	/
NS13	1490707,091	7204403,78	52,721	/	/
PI1	1490219,505	7205382,447	50,289	/	/
PI5	1488915,575	7203945,636	69,906	/	/
RP1	1491129,051	7204266,237	65,947	/	/
RP2	1491182,442	7205368,298	50,679	/	/
RP3	1491437,415	7205007,044	81,611	/	/
NP1	1491088,829	7205022,475	75,553	0,006	0,004
NP2	1491094,493	7204965,670	76,430	0,005	0,004
NP3	1491180,597	7204813,920	70,237	0,005	0,004
NP4	1491117,732	7204713,231	65,485	0,003	0,003
NP5	1490954,023	7204585,950	63,559	0,005	0,004
NP6	1490812,055	7204413,386	57,127	0,004	0,004
NP7	1490676,154	7204469,822	49,403	0,003	0,003
NP10	1490840,179	7205037,848	47,206	0,004	0,003
NP11	1490997,586	7204874,339	73,486	0,004	0,004
NP12	1491009,358	7204842,777	75,065	0,004	0,004
NP13	1490940,066	7204755,354	74,359	0,003	0,003
NP14	1490912,831	7204751,065	73,844	0,003	0,002
NP15	1490897,841	7204770,395	72,739	0,003	0,002
NP16	1490815,609	7204835,344	49,170	0,003	0,003
NP18	1490768,622	7204691,145	59,297	0,006	0,004
NP19	1490730,525	7204604,299	64,210	0,005	0,003
NP20	1490713,943	7204610,817	64,333	0,005	0,003
NP21	1490642,859	7204541,481	47,090	0,011	0,009
NP22	1490786,147	7204523,112	68,208	0,005	0,004
NS1	1491085,476	7204982,495	76,555	0,005	0,004
NS2	1490941,997	7204918,504	53,957	0,004	0,004
NS3	1491029,368	7204773,670	74,150	0,004	0,004
NS4	1490918,321	7204617,511	70,940	0,005	0,004
NS5	1490873,268	7204613,727	71,665	0,005	0,004

NS6	1490806,309	7204551,849	70,423	0,005	0,004
NS7	1490840,054	7204648,512	72,954	0,005	0,003
NS8	1490762,373	7204562,069	66,681	0,006	0,004
NS9	1490726,315	7204580,224	63,947	0,006	0,004
NS10	1490745,530	7204658,276	61,560	0,005	0,004
NS11	1490732,314	7204708,133	48,192	0,006	0,003
NS15	1490866,266	7204675,381	72,420	0,005	0,003
PR1	1490998,214	7205132,271	47,613	0,010	0,007
PR2	1490899,168	7204914,161	52,381	0,004	0,005
PR3	1490716,557	7204723,128	47,449	0,007	0,004
PR6	1491108,156	7204907,865	75,378	0,007	0,006
ESB	1490663,317	7204537,082	92,407	0,014	0,007
CSJ	1491055,271	7204827,910	131,037	0,021	0,009
NDP	1490596,775	7204888,032	92,127	0,032	0,011
RI2	1491066,941	7204198,944	/	0,047	/

Cette annexe présente finalement les résultats obtenus pour le réseau conçu au cours de ce travail. Il s'agit des coordonnées de l'ensemble des points accompagnées des régions de confiance à 95%. Les 9 premiers points ne possèdent pas de régions de confiance car on les considère fixés dans le référentiel.

Réalisation d'un canevas planimétrique et altimétrique précis et dense dans la cité Plantagenêt du Mans

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Le Mans 2024

RESUME

L'établissement d'un réseau géodésique d'une précision globale inférieure à 2 cm nécessite l'utilisation de dispositifs GNSS et topographiques combinés à des méthodes de levés et de traitements spécifiques telles que la compensation. Deux méthodes de traitement GNSS sont proposées dans cette étude. La première est le PPP (Precise Point Positioning), mise en œuvre au travers d'une application automatisée avec le logiciel GipsyX, qui montre des résultats encourageants bien que limitée par le temps de convergence de la solution. La deuxième méthode est celle du « Multistations », réputée pour être la plus robuste pour ce genre d'application. L'utilisation du réseau pour les travaux pratiques à l'ESGT a montré de bons résultats avec de écarts millimétriques sur les nœuds entre les déterminations.

Mots clés : Géodésie, PPP, GNSS, GipsyX, réseau, topographie.

SUMMARY

Establishing a geodetic network with a global precision of less than 2 cm requires GNSS and topographic devices combined with specific surveying and processing methods such as compensation. Two GNSS processing methods are proposed in this study. The first is PPP (Precise Point Positioning), implemented through an automated application with GipsyX software, which shows encouraging results, although limited by the solution's convergence time. The second method is the "multi-station", reputed to be the most robust for this type of application. The use of the network for practical work at ESGT showed good results, with millimetric deviations on the nodes between determinations.

Key words : Geodesy, PPP, GNSS, GipsyX, network, topography.